

# **Empirische Forschungsmethoden für die Evaluation visueller Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Philosophie (Dr. phil)  
der Fakultät für Kulturwissenschaften  
der Universität Paderborn

vorgelegt von  
Regina Sprenger

Juli 2008

Gutachter:

Prof. Dr. Niclas Schaper  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek



## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt allen Probandinnen und Probanden ohne deren Einsatz diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für die Betreuung der Arbeit und die konstruktiven Anregungen danke ich Prof. Dr. Niclas Schaper.

Prof. Dr.-Ing. Wallaschek danke ich für die Übernahme des Korreferats und seine Unterstützung als Vorstand des L-LABS.

Für die Unterstützung sowie die Bereitstellung der Versuchsfahrzeuge und des Messequipments danke ich dem L-LAB und der Hella KGaA Hueck & Co.

Bedanken möchte ich mich bei Dr. Jürgen Locher für die vielen konstruktiven Gespräche und seine Unterstützung während der gesamten Arbeit. Die sich daraus ergebenden Anregungen und Denkanstöße waren mir eine große Hilfe.

Danken möchte ich allen meinen Kolleginnen und Kollegen im L-LAB, insbesondere Anja Isenbort, Cord Bauch, Sabine Raphael und Thorsten Brandt, für die anregenden Diskussionen und ihre Hilfe. Es hat sehr viel Spaß gemacht, mit Euch zu arbeiten.

Ich bedanke mich bei allen Studierenden, die in meiner Zeit im L-LAB bei mir als Praktikantinnen und Praktikanten sowie Diplomandinnen und Diplomanden gearbeitet haben. Für ihren besonderen Einsatz danke ich Kay Friese und Lena Geiger.

Mein Dank gilt allen Korrektorinnen und Korrektoren für das unermüdliche Lesen und Korrigieren der Arbeit.

Insbesondere danke ich allen Personen, die durch Babysitting die Fertigstellung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Vielen Dank an meine Familie für ihre Unterstützung.

Zum Schluss sei Stefan für seine Unterstützung, Geduld und Aufmunterung gedankt.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung in der Dunkelheit .....	5
2.1.1 Definition Fahrerassistenzsysteme .....	6
2.1.2 Notwendigkeit des Einsatzes von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung in der Dunkelheit.....	7
2.1.3 Nachtsichtsysteme .....	11
2.1.3.1 Historische Entwicklung .....	12
2.1.3.2 Stand der Technik.....	12
2.1.3.3 Empirische Studien zum Nutzen von Nachtsichtsystemen .....	15
2.1.3.4 Probleme durch die Nutzung von Infrarot-Nachtsichtsystemen .....	23
2.1.4 Fazit .....	24
2.2 Nutzungsstrategien .....	26
2.2.1 Ausbildung von Strategien bei der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems .....	26
2.2.2 Verhaltensadaptation .....	29
2.2.3 Fazit .....	36
2.3 Beanspruchung .....	36
2.3.1 Allgemeine Definition von Beanspruchung .....	37
2.3.2 Der Komfortbegriff.....	38
2.3.3 Modelle zum Einfluss der Beanspruchung auf das Fahrverhalten .....	41
2.3.4 Visuelle Beanspruchung beim Fahren eines Kfz.....	43
2.3.4.1 Visuelle Beanspruchung als Unfallursache .....	46
2.3.4.2 Studien zur visuellen Beanspruchung durch die Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen .....	48
2.3.5 Studien zur Beanspruchung bei der Nutzung von Nachtsichtsystemen .....	49
2.3.6 Fazit .....	50

<b>3 Methoden zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen .....</b>	<b>53</b>
3.1 Methoden zur Erhebung von Nutzungsstrategien bei Fahrerassistenzsystemen .....	53
3.1.1 Selbstreport .....	55
3.1.1.1 Die Methode der Befragung .....	55
3.1.1.2 Die Befragung als Methode zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen .....	57
3.1.2 Blickbewegungsmessungen .....	61
3.1.2.1 Die Methode der Blickbewegungsmessung (Eye-Tracking) .....	62
3.1.2.2 Die Blickbewegungsmessung als Methode zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen .....	64
3.1.3 Fazit.....	66
3.2 Methoden zur Erhebung der Fahrerbeanspruchung.....	67
3.2.1 Selbstreport .....	70
3.2.1.1 Eindimensionale Skalen.....	70
3.2.1.2 Mehrdimensionale Skalen.....	75
3.2.2 Performance .....	79
3.2.2.1 Maße der Primäraufgabe.....	79
3.2.2.2 Maße der Sekundäraufgabe .....	84
3.2.2.3 Referenzmessungen .....	88
3.2.3 Physiologie.....	88
3.2.3.1 Kardiovaskuläre Aktivität.....	89
3.2.3.2 Elektrodermale Aktivität.....	91
3.2.3.3 Elektrische Muskelaktivität .....	92
3.2.3.4 Augenfunktionen .....	92
3.2.3.5 Weitere physiologische Parameter zur Beanspruchungsmessung ...	93
3.2.3.6 Studien mit Einsatz mehrerer physiologischer Parameter .....	94
3.2.4 Vergleichsstudien zwischen verschiedenen Methoden zur Erfassung der Beanspruchung.....	95
3.2.5 Fazit.....	98
3.3 Feld- versus Simulatorstudien .....	99
<b>4 Forschungsinteresse .....</b>	<b>105</b>

<b>5 Empirische Studien zu Nutzungsstrategien.....</b>	<b>107</b>
5.1 Studie 1: Methoden des Selbstreports zur Erfassung der Ausbildung von Nutzungsstrategien .....	107
5.1.1 Untersuchungsdesign.....	107
5.1.1.1 Untersuchungsziel .....	108
5.1.1.2 Versuchsfahrzeug .....	108
5.1.1.3 Stichprobe.....	108
5.1.1.4 Empirische Forschungsmethoden.....	109
5.1.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecken.....	111
5.1.2 Ergebnisse.....	111
5.1.2.1 Allgemeine Bewertung des Systems .....	112
5.1.2.2 Bewertung von Systemparametern.....	115
5.1.2.3 Nutzungsstrategien .....	116
5.1.3 Methodisches Fazit.....	123
5.2 Studie 2: Blickbewegungsmessungen zur Erfassung der Nutzungsstrategien .....	124
5.2.1 Untersuchungsdesign.....	124
5.2.1.1 Untersuchungsziel .....	124
5.2.1.2 Versuchsfahrzeug .....	125
5.2.1.3 Stichprobe.....	125
5.2.1.4 Empirische Forschungsmethoden.....	126
5.2.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecken.....	128
5.2.2 Ergebnisse.....	129
5.2.2.1 Blickabwendungszeiten.....	129
5.2.2.2 Häufigkeit der Blickzuwendung.....	130
5.2.2.3 Situationsabhängige Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems .....	131
5.2.2.4 Sicherheitsgefährdung durch die Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems .....	137
5.2.3 Methodisches Fazit.....	139
<b>6 Empirische Studien zur Beanspruchung .....</b>	<b>141</b>
6.1 Studie 3: Simulatorstudie zur Beanspruchungserhebung .....	141
6.1.1 Untersuchungsdesign.....	141
6.1.1.1 Untersuchungsziel .....	141
6.1.1.2 Versuchsfahrzeug .....	142
6.1.1.3 Stichprobe.....	143
6.1.1.4 Empirische Forschungsmethoden.....	144
6.1.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecke.....	147

6.1.2	Ergebnisse .....	153
6.1.2.1	Deskriptive Analyse der physiologischen Messergebnisse .....	153
6.1.2.2	Inferenzstatistische Analyse der physiologischen Messergebnisse	157
6.1.2.3	Ergebnisse der subjektiven Beanspruchungsmessung .....	162
6.1.3	Methodisches Fazit .....	166
6.2	Studie 4: Feldstudie zur Beanspruchungserhebung .....	167
6.2.1	Untersuchungsdesign .....	167
6.2.1.1	Untersuchungsziel .....	167
6.2.1.2	Versuchsfahrzeug .....	168
6.2.1.3	Stichprobe .....	168
6.2.1.4	Empirische Forschungsmethoden .....	168
6.2.1.5	Versuchsfahrten und Versuchsstrecke .....	169
6.2.2	Ergebnisse .....	172
6.2.2.1	Ergebnisse der physiologischen Beanspruchungsmessung .....	172
6.2.2.2	Ergebnisse der subjektiven Beanspruchungsmessung .....	174
6.2.2.3	Nutzung des aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems .....	176
6.2.3	Methodisches Fazit .....	177
<b>7</b>	<b>Diskussion der eingesetzten Evaluationsmethoden.....</b>	<b>179</b>
7.1	Methoden zur Erfassung von Nutzungsstrategien .....	179
7.2	Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung .....	184
7.3	Konsequenzen für die Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme.....	186
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>189</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>191</b>
<b>A.1</b>	<b>Empirische Studien zu Nutzungsstrategien.....</b>	<b>191</b>
A.1.1	Fragebogen Studie 1.....	191
A.1.2	Fragebogen Studie 2.....	196
<b>A.2</b>	<b>Empirische Studien zur Beanspruchung .....</b>	<b>199</b>
A.2.1	Fragebogen und Instruktion Studie 3 .....	199
A.2.2	NASA-TLX Studien 3 und 4 .....	201
A.2.3	Anstrengungsskala Studien 3 und 4 .....	206
A.2.4	Fragebogen <i>Persönliche Angaben</i> und Instruktion Studie 4 .....	207
A.2.5	Fragebogen <i>Nutzung Nachtsichtsystem</i> Studie 4 .....	210
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>213</b>	

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Erkennendistanz für vertikale Objekte.....	11
Tab. 2.2:	Verwendete Prototypen von Nachsichtssystemen .....	19
Tab. 2.3:	Unfalldatenanalyse – Unfallursache in der Kategorie <i>Ursache innerhalb des Fahrzeugs</i> .....	47
Tab. 2.4:	Unfalldatenanalyse – Unfallursache durch Ablenkung in den Kategorien <i>Armaturenbrett, Lenkrad und Bedieninstrumente</i> .....	47
Tab. 3.1:	Gegenüberstellung Fragebogen (standardisiert) und Interview (wenig strukturiert/teilstrukturiert) .....	57
Tab. 3.2:	Unterschiede im Blickverhalten beim Fahren mit und ohne Informationssystem .....	64
Tab. 3.3:	Prozentsatz der Blicke > eine Sekunde.....	65
Tab. 6.1:	Klassifikation des Anstiegs des Blutdrucks – Diskriminanzkriterium <i>eine Standardabweichung</i> .....	160
Tab. 6.2:	Klassifikation des Anstiegs der Herzfrequenz – Diskriminanzkriterium <i>eine Standardabweichung</i> .....	161
Tab. 6.3:	Klassifikation des Anstiegs des Hautleitwerts – Diskriminanzkriterium <i>eine Standardabweichung</i> .....	162
Tab. 6.4:	Korrelation der Beanspruchungsparameter, Fahrt 1 .....	165
Tab. 6.5:	Korrelation der Beanspruchungsparameter, Fahrt 2 .....	165
Tab. 6.6:	Vergleich der Mittelwerte der physiologischen Parameter, Fahrt 1 und Fahrt 2 .....	174
Tab. 7.1:	Bewertung der eingesetzten Methoden für die Erhebung von Nutzungsstrategien.....	182
Tab. 7.2:	Anforderungsvoraussetzungen der eingesetzten Methoden für die Erhebung von Nutzungsstrategien.....	183



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Roadmap heutiger und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme .....	6
Abb. 2.2:	Funktionsweise eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems .....	13
Abb. 2.3:	Darbietung des Bildes auf dem Display (Head-down Display) .....	13
Abb. 2.4:	Subjektive Lernkurve bei der Gewöhnung an ein Fahrerassistenzsystem.....	28
Abb. 2.5:	Prozessmodell der Verhaltensadaptation.....	33
Abb. 2.6:	Argumentationskette <i>Verringerung der Fahrerbeanspruchung</i> .....	39
Abb. 2.7:	Vereinfachte Struktur der Cluster-Analyse .....	40
Abb. 2.8:	Komfort-Diskomfort-Modell.....	41
Abb. 2.9:	Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Fahrperformance .....	42
Abb. 2.10:	Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Performance .....	43
Abb. 2.11:	Statistische Verteilung der Blickdauer eines Fahrers auf verschiedene Objekte während einer 50-minütigen Autofahrt .....	46
Abb. 3.1:	Kategorienschema <i>Erfassung von Nutzungsstrategien</i> .....	54
Abb. 3.2:	Zuordnung gebräuchlicher Bezugssysteme .....	55
Abb. 3.3:	Beispielitems eines Fragebogens zur Systembewertung .....	58
Abb. 3.4:	Kategorienschema <i>Beanspruchungsmessung</i> .....	68
Abb. 3.5:	Anstrengungsskala.....	71
Abb. 3.6:	Modifizierte Cooper-Harper Skala .....	73
Abb. 3.7:	Skala der AZA .....	74
Abb. 3.8:	Dimensionen und Ausprägungen des SWAT .....	78
Abb. 3.9:	Nutzung einer Sekundäraufgabe zur Messung der Restkapazität.....	84
Abb. 3.10:	Beanspruchung in sechs Regionen und Sensitivität verschiedener Methoden der Beanspruchungserhebung.....	97
Abb. 5.1:	Display des Infrarot-Nachtsichtsystems im Versuchsfahrzeug .....	108
Abb. 5.2:	Altersverteilung der Versuchspersonen.....	109
Abb. 5.3:	Beispielitem aus dem Fragebogen der Untersuchung .....	110
Abb. 5.4:	Veränderung der Mittelwerte der Akzeptanz im Verlauf der Versuchsfahrten...	112
Abb. 5.5:	Situationsabhängige Nutzung des Systems .....	118
Abb. 5.6:	Mittelwerte der Nutzungshäufigkeit auf verschiedenen Straßentypen über alle Fahrten .....	118
Abb. 5.7:	Display des Nachsichtsystems im Versuchsfahrzeug.....	125
Abb. 5.8:	Beispielitem aus dem Fragebogen der Untersuchung .....	126
Abb. 5.9:	ETS-Komponenten im Versuchsfahrzeug .....	128
Abb. 5.10:	Mittlere Blickabwendungszeiten aller Probanden und Versuchsfahrten.....	130
Abb. 5.11:	Blickzuwendungen zum Display aller Probanden (Versuchsfahrten 1 und 5)....	131

Abb. 5.12: Mittelwerte der Blickzuwendungen zum Display in Abhängigkeit vom Straßentyp .....	132
Abb. 5.13: Mittelwerte der Blickrate in Abhängigkeit vom Straßentyp .....	133
Abb. 5.14: Prozentsatz der Blickbewegungen in Abhängigkeit vom Streckenverlauf.....	135
Abb. 5.15: Blickrate in Abhängigkeit vom Streckenverlauf.....	136
Abb. 6.1: Fahrsimulator <i>Lightdriver</i> .....	143
Abb. 6.2: Fahrt im Simulator <i>Lightdriver</i> bei Nachtbedingungen .....	143
Abb. 6.3: Schematische Darstellung des EKG .....	146
Abb. 6.4: Untersuchungsablauf Studie 3.....	148
Abb. 6.5: Simulatorfahrt mit vorausfahrendem Fahrzeug .....	150
Abb. 6.6: Versuchsstrecke: <i>Rüthen-Szenerie</i> .....	151
Abb. 6.7: Stressor 2.....	152
Abb. 6.8: Verlaufskurve des Blutdrucks einer Versuchsperson (Fahrt 1) .....	153
Abb. 6.9: Verlaufskurve der Herzfrequenz einer Versuchsperson (Fahrt 1) .....	154
Abb. 6.10: Verlaufskurve des Hautleitwerts einer Versuchsperson (Fahrt 1) .....	155
Abb. 6.11: <i>Rüthen-Szenerie</i> mit integrierten Stressoren .....	155
Abb. 6.12: Verlaufskurve des Blutdrucks einer Versuchsperson (Fahrt 2) .....	156
Abb. 6.13: Verlaufskurve der Herzfrequenz einer Versuchsperson (Fahrt 2) .....	156
Abb. 6.14: Verlaufskurve des Hautleitwerts einer Versuchsperson (Fahrt 2) .....	157
Abb. 6.15: Messintervalle der physiologischen Parameter .....	158
Abb. 6.16: Häufigkeitsverteilung der Blutdruckerhöhung.....	161
Abb. 6.17: Mittelwert des Ratings des NASA-TLX, differenziert nach Versuchsgruppen..	163
Abb. 6.18: Mittelwert des Ratings der Anstrengungsskala, differenziert nach Versuchsgruppen.....	163
Abb. 6.19: Versuchsablauf Studie 4.....	171
Abb. 6.20: Mittelwert des Blutdrucks, erste Versuchsfahrt, Fahrt ohne und mit Infrarot-Nachtsichtsystem .....	172
Abb. 6.21: Mittelwert der Vergleichsparameter (a) Herzfrequenz und (b) Hautleitwert, erste Versuchsfahrt, Fahrt mit und ohne Infrarot-Nachtsichtsystem .....	173
Abb. 6.22: Vergleich der Ratingergebnisse, erste Versuchsfahrt (ohne und mit Nutzung Infrarot-Nachtsichtsystem).....	175
Abb. 6.23: Mittelwert der Ratingergebnisse, Versuchsgruppe 1 (ohne Nachtsichtsystem)..	175
Abb. 6.24: Mittelwert der Ratingergebnisse, Versuchsgruppe 2 (erste Fahrt mit Nachtsichtsystem) .....	176

# **Abkürzungsverzeichnis**

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
AOI	Area Of Interest
APR	Automatic Pedestrian Recognition
AZA	Skala der allgemeinen zentralen Aktiviertheit
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BP	Blutdruck
CCR	Curvature Change Rate
CID	Central Information Display
df	Freiheitsgrade
EDA	Elektrodermale Aktivität
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EOG	Elektrookulogramm
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETS	Eye-Tracking-System
FAS	Fahrerassistenzsystem
FIR	Far Infrared
FLIR	Forward Looking Infrared
HDD	Head-down Display
HF	Herzfrequenz
HRV	Herzratenvariabilität
HUD	Head-up Display
ibi	inter-beat intervall
IR	Infrared/Infrarot
Kfz	Kraftfahrzeug
LED	Light Emitting Diode
LDW	Lane Departure Warning
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index
NASA-RTLX	National Aeronautics and Space Administration-Raw Task Load Index
MCH	Modifizierte Cooper-Harper Skala
MHU	Mirror Head-up
n	Stichprobenumfang
NIR	Near Infrared
NVES	Night Vision Enhancement System
p	Wahrscheinlichkeit

PDT	Peripheral Detection Task
RFK	Rückfahrkamera
RLS	Regen-Licht-Sensor
RSME	Rating Scale of Mental Effort
$\sigma$	Standardabweichung
SCL	Skin Conductance Level
SDLP	Standard Deviation of Lateral Position
SDST	Standard Deviation of Steering Angle
SDSTW	Standard Deviation of the Steering-Wheel Movements
SRR	Steering Wheel Reversal Rate
SWA	Spurwechselassistent
SWAT	Subjective Workload Assessment Technique
t	t-Wert
VES	Vision Enhancement System
$\bar{x}$	Mittelwert

# **1 Einleitung und Problemstellung**

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle in Kraftfahrzeugen wird von technologischen Entwicklungen beeinflusst. Ziele der Entwicklung und Einführung neuer Fahrzeugtechnologien sind beispielsweise der Sicherheitsgewinn für alle Verkehrsteilnehmer sowie eine Verringerung der Beanspruchung des Fahrers durch die Fahraufgabe und eine daraus resultierende Komforterhöhung. Die Aufgabe des Menschen als Teil der Mensch-Maschine-Schnittstelle umfasst im Wesentlichen die Aufnahme, Verarbeitung und Umsetzung von Informationen, die durch technische Systeme bereitgestellt werden. Durch eine Verbesserung der Informationsaufnahme des Fahrers, beispielsweise mit Hilfe von Fahrerassistenzsystemen, können die oben genannten Ziele erreicht werden.

Die Erhöhung der Verkehrsdichte aufgrund einer größeren Anzahl von Kraftfahrzeugen verbunden mit einem Anstieg der gefahrenen Kilometer führte in den letzten Jahrzehnten zu einer Erhöhung der Komplexität der Fahraufgabe. Um das daraus resultierende erhöhte Sicherheitsrisiko zu kompensieren, werden immer neue Systeme für das Kraftfahrzeug entwickelt, die den Fahrer unterstützen sollen. Die ersten Assistenzsysteme wie beispielsweise Navigationssysteme und das Antiblockiersystem (ABS) sind seit den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts im Kraftfahrzeug erhältlich und gehören mittlerweile bereits häufig zur Serienausstattung.

Eine technische Realisierbarkeit neuer Assistenzsysteme garantiert noch nicht, dass dadurch tatsächlich die Fahrbedingungen für den Fahrer verbessert werden. Durch die Nutzung eines neuen Systems kann eventuell sogar ein Sicherheitsrisiko entstehen. Zusätzliche Informationsquellen im Kraftfahrzeug können sich auf das Fahrerverhalten auswirken und von der primären Fahraufgabe ablenken. Vor diesem Hintergrund ist eine Evaluation neuer Systeme bereits möglichst früh im Entwicklungsprozess von großer Bedeutung. Insbesondere ist dabei die Einbeziehung potentieller Nutzerinnen und Nutzer in diesem Entwicklungsschritt wichtig. Ergebnisse dieser Evaluation können zu einer Optimierung des Systems und von Systemparametern herangezogen werden und somit das Risiko eines systembedingten Unfalls reduzieren.

Momentan wird eine Vielzahl neuer Fahrerassistenzsysteme entwickelt. Da die Mensch-Maschine-Schnittstellen bei diesen Systemen sehr unterschiedlich sind, müssen für die Evaluation der jeweiligen Systemtypen auch spezifische Forschungsmethoden zum Einsatz kommen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die explorative Bewertung von empirischen Forschungsmethoden im Hinblick auf ihre Eignung zur Evaluation neuer Assistenzsysteme für Kraftfahr-

zeuge im Entwicklungsprozess. Dafür werden unterschiedliche Untersuchungsmethoden in Evaluationsstudien erprobt und diskutiert.

Für die Bewertung der empirischen Forschungsmethoden wird beispielhaft ein in den letzten Jahren für den Kfz-Bereich neu entwickeltes Fahrerassistenzsystem herangezogen – das Infrarot-Nachtsichtsystem. Aufgabe des Systems ist es, die visuelle Wahrnehmung des Fahrers in der Dunkelheit zu verbessern. Dies geschieht durch die Darbietung von Informationen auf einem Display, die über das hinausgehen, was der Fahrer mit seinem Blick durch die Windschutzscheibe sieht. Durch eine frühzeitige Erkennung von Gefahrensituationen ist der Fahrer in der Lage, schneller auf diese zu reagieren. Die Nutzung eines solchen Systems erfordert eine Blickabwendung von der Straße, was zu Gefährdungssituationen führen kann, wenn die Informationsaufnahme und -verarbeitung einen zu langen Zeitraum einnimmt. Daher ist es für die Bewertung eines solchen Systems sehr wichtig, zu wissen, welche Strategien die Fahrer zur Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems ausbilden. Offene Fragen sind beispielsweise:

- Nutzen die Fahrer das Fahrerassistenzsystem überhaupt und bringt es ihnen Vorteile?
- In welchen Situationen nutzen die Fahrer das System (z. B. Abhängigkeit der Nutzung von verschiedenen Verkehrssituationen)?
- Wie lange benötigen die Fahrer, um Informationen von dem Display abzulesen, d. h. wie lang sind die Blickabwendungszeiten von der Straße bei der Nutzung des Systems?
- Kommt es durch die Nutzung des Systems, insbesondere im Gewöhnungsprozess, zu einer Gefährdung?
- Hat die Systemnutzung einen Einfluss auf die Fahrerbeanspruchung?

Mittels der empirischen Studien dieser Arbeit sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Forschungsmethoden dafür geeignet sind, solche Fragen im Rahmen einer Evaluation eines neuen Fahrerassistenzsystems zu beantworten. Im Entwicklungsprozess zukünftiger FAS können diese Methoden dann zur Bewertung und Optimierung der Systeme eingesetzt werden.

Wie bereits oben beschrieben, sollen Fahrerassistenzsysteme die Beanspruchung des Fahrers mit dem Ziel einer Komfortsteigerung und einer Sicherheitserhöhung vermindern. Es ist aber davon auszugehen, dass mit der zusätzlichen Informationsaufnahme zumindest in der Gewöhnungsphase an das System eine zusätzliche mentale Beanspruchung des Fahrers entsteht. Dies könnte einerseits zu einem geringeren Komfortempfinden oder sogar zu einer Gefährdung führen. Andererseits könnte bei einer routinierten Nutzung durch die bessere Sicht, die das Infrarot-Nachtsichtsystem ermöglicht, Autofahren in der Dunkelheit als weniger anstrengend empfunden und somit die Beanspruchung beim Fahren geringer werden. Nur durch empirische Studien kann eine Aussage dazu getroffen werden, ob die Systemnutzung zu einer veränderten Beanspruchung führt. Mindestziel bei der Einführung eines neuen Fahrerassistenz-

systems muss sein, dass es durch die Nutzung zu keiner zusätzlichen Beanspruchung und daraus resultierenden Gefährdung durch das System selbst kommt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vier empirische Studien durchgeführt. Zwei beschäftigen sich mit dem Thema *Nutzungsstrategien* und zwei mit *Beanspruchung*:

Die Studien zum Komplex *Nutzungsstrategien* gehen der Frage nach, welche empirischen Forschungsmethoden geeignet sind, die Nutzung eines neuen Assistenzsystems durch den Fahrer zu beschreiben. Hierfür werden die Ausbildung und die Veränderung von Nutzungsstrategien untersucht. Dabei wird insbesondere der Gewöhnungsprozess an ein neues System betrachtet, da valide Evaluationsergebnisse erst dann erhalten werden können, wenn die Fahrer sich an ein neues System gewöhnt und Nutzungsstrategien ausgebildet haben. Eine aussagekräftige Bewertung eines Systems kann nur erfolgen, wenn die Probanden mit der neuen Technologie bereits vertraut sind und somit den Nutzen, die Grenzen und die Probleme dieses Systems kennen. Folglich ist es wichtig, über Methoden zu verfügen, mit denen das Fortschreiten eines Gewöhnungsprozesses betrachtet werden kann. Außerdem muss während dieses Prozesses eine potentiell von der Systemnutzung ausgehende Unfallgefahr angenommen werden. Eventuelle Gefahrenpotentiale sollen beschrieben und Handlungsempfehlungen für deren Minimierung bzw. Vermeidung gegeben werden.

Zur Erfassung der *Fahrerbeanspruchung* steht eine Vielzahl von empirischen Forschungsmethoden zur Verfügung. Diese lassen sich grundsätzlich in subjektive und objektive Methoden unterscheiden. Bei den subjektiven Methoden des Selbstreports bewerten die Fahrer die von ihnen erlebte Beanspruchung selbst, während bei den objektiven Methoden beispielsweise physiologische Parameter wie die Herzfrequenz als Indikator für die Fahrerbeanspruchung herangezogen werden. In den durchgeführten Untersuchungen zur Beanspruchung werden Methoden beider Kategorien angewendet und die damit erhaltenen Ergebnisse miteinander in Beziehung gesetzt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in folgende Kapitel:

Die **Kapitel 2 und 3** geben einen Überblick über die für diese Arbeit relevante Literatur. Dabei beschäftigt sich das Kapitel 2 mit theoretischen Grundlagen und Begriffsdefinitionen. Kapitel 3 stellt die wichtigsten empirischen Forschungsmethoden zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf die Erfassung der Nutzungsstrategien und die Beanspruchung bei der Verwendung eines Infrarot-Nachtsichtsystems dar. Beide Kapitel geben beispielhaft einen Überblick über empirische Studien, die bereits in der Literatur zu der jeweiligen Thematik beschrieben wurden.

Auf Grundlage der vorangegangenen theoretischen Kapitel wird in **Kapitel 4** das Forschungsinteresse dargestellt.

Das **Kapitel 5** beschreibt zwei Untersuchungen zum Thema *Nutzungsstrategien*, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Verwendete Methoden für die Beschreibung der Nutzungsstrategien sowie des Prozesses der Ausbildung derselben sind strukturierte und teilstrukturierte Befragungen, Beobachtungen und Blickbewegungsmessungen.

In **Kapitel 6** werden zwei Beanspruchungsstudien dargestellt. Für die Erfassung der Fahrerbeanspruchung kommen verschiedene subjektive Ratingskalen und physiologische Parameter zum Einsatz. Schwerpunkt der Untersuchungen ist die Erprobung einer neu entwickelten Methode zur Erfassung des kontinuierlichen Blutdrucks.

**Kapitel 7** diskutiert und bewertet die in den empirischen Untersuchungen angewendeten For schungsmethoden im Hinblick auf ihre Einsetzbarkeit in Evaluationsstudien im Rahmen der Entwicklungsprozesse neuer Fahrerassistenzsysteme.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse.

## **2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem völlig neuartigen Fahrerassistenzsystem (FAS) für Kraftfahrzeuge, einem Infrarot-Nachtsichtsystem. Die Hauptforschungsfragen, die sich bei der Evaluation, beispielsweise im Entwicklungsprozess, eines solchen neuen Systems stellen, sind:

- 1) Bringt das System Vorteile für den Fahrer, z. B. einen Sicherheits- oder Komfortgewinn?
- 2) Wie und in welchem Umfang nutzt der Fahrer das neue System?
- 3) Verändert sich das Fahrverhalten des Nutzers durch die Verwendung des neuen Systems?
- 4) Kommt es zu einem erhöhten Sicherheitsrisiko, z. B. während der Gewöhnungsphase an das Fahrerassistenzsystem?
- 5) Verändert sich die Fahrerbeanspruchung durch die Nutzung des Systems? Wird sie reduziert oder steigt sie an?

Aus diesen Fragestellungen ergeben sich zwei Themenschwerpunkte, die im Folgenden theoretisch betrachtet werden: (1) Die Strategien, die sich bei der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems ergeben (Kap. 2.2) und (2) die (potentielle) Beanspruchung durch ein solches System (Kap. 2.3). Kapitel 2.1 gibt zunächst eine Einführung in die Themen *Fahrerassistenzsysteme* und *Infrarot-Nachtsichtsysteme*. Ein Schwerpunkt wird hierbei auf die Argumente für und gegen den Einsatz dieser Systeme gelegt.

### **2.1 Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung in der Dunkelheit**

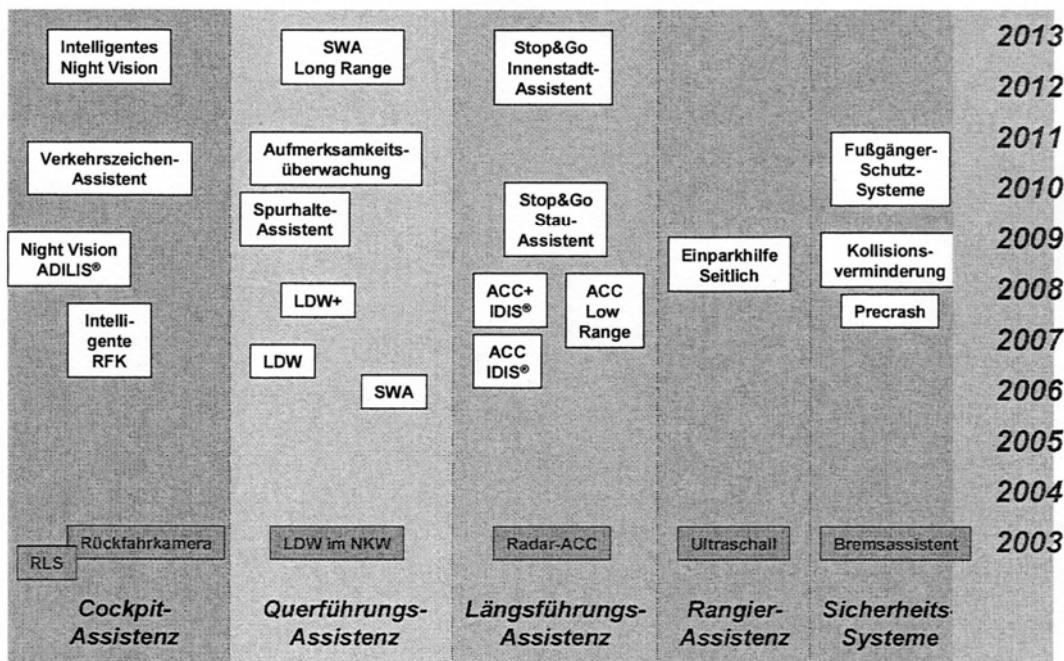
Derzeit wird eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen für das Kraftfahrzeug entwickelt, die dem Fahrer auf unterschiedliche Weise die Fahraufgabe erleichtern und somit das Unfallrisiko minimieren sowie den Komfort steigern sollen. Ein Beispiel für Fahrerassistenzsysteme, welche in den letzten Jahren zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung in der Dunkelheit und damit zur Reduktion der Unfallzahlen bei Nacht entwickelt wurden, sind Nachsichtssysteme. Bei diesen Systemen wird dem Fahrer in der Regel auf einem Display eine erhöhte Sichtweite gegenüber dem Fahren mit Abblendlicht ermöglicht. Somit kann eine schnellere Reaktion auf unerwartete Situationen, wie z. B. Fußgänger auf der Straße, erfolgen. Nachsichtssysteme werden aber auch kontrovers diskutiert, weil befürchtet wird, dass es beim Ablesen der Informationen zu Unaufmerksamkeiten durch eine Abwendung des Blickes von der Fahrbahn und dadurch zu Sicherheitsproblemen kommen könnte. Dieses Kapitel gibt zuerst eine allgemeine Einführung in Fahrerassistenzsysteme und deren Nutzen für die Verkehrssicherheit. Danach erfolgen die Vorstellung der Arbeitsweise von Nachsichtssystemen sowie ein Überblick über die Diskussion dieser Fahrerassistenzsysteme in der Literatur.

### 2.1.1 Definition Fahrerassistenzsysteme

Ein Beispiel für neue Technologien, die momentan eine große Bedeutung in Forschung und Entwicklung im Kraftfahrzeugbereich haben, sind Fahrerassistenzsysteme. In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen, welche Systeme zu Fahrerassistenzsystemen gezählt werden. Beispielsweise unterscheidet Penka (2001)

- Informations- und Warnsysteme, die nicht auf eine Fahraufgabe einwirken (z. B. Navigationssysteme),
- Systeme, die überwiegend im Hintergrund arbeiten und die physikalischen Grenzen des Fahrzeug-Straßen-Systems verbessern (z. B. ABS und ESP),
- Fahrerassistenzsysteme, die auf der Fahrzeugführungsebene eingreifen (z. B. Tempomat).

Andere Autoren fassen alle diese Systeme unter dem Oberbegriff *Fahrerassistenzsysteme* zusammen. Dies entspricht der bei der Hella KGaA Hueck & Co. verwendeten Nomenklatur und wird in dieser Arbeit übernommen. Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht über bereits heute und zukünftig erhältliche Fahrerassistenzsysteme:



**Abb. 2.1 Roadmap heutiger und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme (Belz, Höver, Mühlenberg, Nitsche & Seubert, 2004, S. 445)**

RLS = Regen-Licht-Sensor, RFK = Rückfahrkamera, SWA = Spurwechselassistent, LDW = Lane Departure Warning, ACC = Adaptive Cruise Control

Fahrerassistenzsysteme stellen dem Fahrer Informationen zur Verfügung oder führen Fahrmanöver entsprechend den Vorstellungen des Fahrers durch (Weilkes, 2000). Ziele von Fahrerassistenzsystemen sind:

- Entlastung des Fahrers
- Ausgleich von fahrerspezifischen Defiziten in der Informationsbeschaffung und -verarbeitung
- Vermeidung oder Verringerung von Fehlhandlungen des Fahrers

Dadurch soll ein Sicherheitsgewinn für alle Verkehrsteilnehmer erzielt werden. Jahn, Oehme, Rösler und Krems (2004) formulieren drei Vorteile durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen:

- Höhere Effizienz: Aufgaben des Fahrers werden besser und schneller bewältigt
- Optimierter Komfort: Funktionen sind leichter auszuführen (z. B. Sprachsteuerung gegenüber manueller Steuerung)
- Zusätzliche Funktionen (z. B. Internetzugang)

### **2.1.2 Notwendigkeit des Einsatzes von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung in der Dunkelheit**

Eine Betrachtung der Unfallstatistiken verweist auf die Notwendigkeit, zur Erhöhung der Verkehrssicherheit die visuelle Wahrnehmung in der Dunkelheit zu verbessern. Europäische Statistiken zeigen, dass 37 % aller Unfälle in Europa, die zu insgesamt 50.000 Toten führen, bei reduzierten Sichtbedingungen geschehen (Barham, 2001). Der Anteil von tödlichen Unfällen bezogen auf die gefahrenen Kilometer ist in der Nacht mehr als dreimal höher als bei Tag (Owens & Sivak, 1996). In den USA geschahen 2002 65 % aller Fußgängerunfälle in der Nacht. Auch wenn diese Zahlen teilweise mit Faktoren wie Müdigkeit und Alkoholkonsum zu erklären sind, zeigen systematische Analysen von Unfalldatenbanken dennoch, dass die Anzahl von tödlichen Fußgängerunfällen mit geringerer Beleuchtung zunimmt, auch wenn alle anderen Faktoren konstant gehalten werden (Tyrrell, Patton & Brooks, 2004).

Rumar (1990) geht davon aus, dass Fahren in der Nacht bezogen auf die gefahrenen Kilometer zwei- bis dreimal gefährlicher ist als am Tag. Grund hierfür ist die Verminderung der visuellen Informationsaufnahme bei Nacht. Ein großer Faktor hierbei sind Fußgängerunfälle. Auch de Waard und Brookhuis (1997) formulieren als wichtige Ursachen für Verkehrsunfälle Probleme in der Wahrnehmung, Unaufmerksamkeit sowie Ablenkung.

Eine neuere Studie zum Unfallgeschehen bei Nacht<sup>1</sup> in Deutschland wurde 2005 von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) veröffentlicht (Lerner, Albrecht & Evers, 2005). Seit Mitte der 1980er Jahre ist die Gesamtzahl der Unfälle mit Personenschäden sowohl bei Tag als auch bei Nacht insgesamt gesunken, der Anteil der Nachtunfälle ist jedoch gleich geblieben bzw. gestiegen. Beim Vergleich von Unfällen auf unterschiedlichen Straßentypen erwiesen sich Nachtunfälle auf Landstraßen als besonders schwerwiegend.

Nachtunfälle zeichnen sich durch eine besondere Schwere aus. Dies gilt insbesondere für Fußgängerunfälle: 2002 geschahen 28 % aller Unfälle mit Personenschäden bei Nacht. Der Anteil der Getöteten bei Nachtunfällen an allen tödlich Verunglückten lag mit 42 % deutlich höher. Während 90 % aller beteiligten Fußgänger innerhalb von Ortschaften verunglückten, geschahen ein Drittel der Fußgängerunfälle mit Todesfolge außerhalb von Ortschaften.

In der Literatur sind verschiedene Gründe für die erhöhte Unfallgefahr in der Dunkelheit zu finden:

### **(1) Mangelnde Adaptation des Fahrverhaltens**

Die Fahrer passen sich zu wenig den Sichtbedingungen an: Studien haben gezeigt, dass Fahrer bei schlechten Bedingungen, egal ob Dunkelheit, schlechte Wetterverhältnisse oder unübersichtliche Straßengeometrie, ihre Fahrgeschwindigkeit kaum oder gar nicht reduzieren (Hill, 1980).

### **(2) Nicht ausreichende Verbesserung der Sichtbedingungen durch die Scheinwerfer**

Das Problem der reduzierten Informationsaufnahme bei Nacht resultiert aus dem Kompromiss, der bei der Entwicklung von Scheinwerfern geschlossen werden muss. Gute Sichtbedingungen für den Fahrer müssen mit möglichst geringer Blendung für andere Verkehrsteilnehmer einhergehen.

### **(3) Physiologische Gründe**

Ein Faktor, der zu Wahrnehmungsbeeinträchtigungen führen kann, ist die Zeit, die das menschliche Auge für die Hell-Dunkel-Adaptation benötigt (Heinrich, 1987). Insbesondere bei Blendung kann dies zu einem Problem werden. Außerdem ist die Sehschärfe in der Dunkelheit geringer, was eine verminderte Detailwahrnehmung und eine geringere Erkennungsdistanz zur Folge hat. Hierdurch werden Hindernisse auf der Fahrbahn zu spät erkannt, um noch rechtzeitig reagieren zu können. Auch das Blickverhalten verändert sich in der Nacht. Es kommt zu längeren Fixationszeiten, zu kürzeren Fixationsdistanzen beim Blick auf die Straße,

---

<sup>1</sup> In der BASt-Studie wird als *Nacht* die Zeit von einer halben Stunde nach Sonnenuntergang bis einer halben Stunde vor Sonnenaufgang definiert.

und bei seitlichen Blicken decken die Fixationen einen geringeren Streubereich ab. Dies führt zu einer verminderten Informationsaufnahme. Außerdem empfinden insbesondere ältere Menschen das Fahren bei Nacht als unangenehm. Gründe hierfür sind eine höhere Blendempfindlichkeit und eine generell schlechtere Sicht in der Dunkelheit, verursacht beispielsweise durch eine verringerte Sehschärfe (Barham, Oxley, Thompson, Fish & Rio, 1999).

Es werden verschiedene Lösungen formuliert, um das erhöhte Unfallrisiko bei Nacht zu minimieren (Parks, Ward & Bossi, 1995; Tyrrell et al., 2004):

- Ein Ansatz schlägt eine bessere Ausleuchtung der Straßen vor. Beispielsweise könnte bei normalen Nachtbedingungen durch ein ständiges Fahren mit Fernlicht die Sicht stark verbessert werden. Dies hätte aber negative Folgen für andere Verkehrsteilnehmer, da diese geblendet würden. Außerdem bringt bei schlechten Wetterverhältnissen, wie starkem Niederschlag oder Nebel, Fernlicht keine Sichtverbesserung oder sogar eine Verschlechterung.
- Fußgänger sollten helle und reflektierende Kleidung bei schlechten Sichtbedingungen tragen.
- Schulungen von Fußgängern, die helfen, die eigene Sichtbarkeit in der Dunkelheit besser und realistischer einzuschätzen, um damit das Verhalten der Fußgänger zu ändern.
- In Skandinavien wurden Untersuchungen mit UV-Scheinwerfern durchgeführt. Diese führen zur besseren Sichtbarkeit von Tieren und einigen Kleidungsstücken, da diese eine natürliche Fluoreszenz im UV-Bereich aufweisen.
- Sensoren im Fahrzeug, die Strahlung außerhalb des für den Menschen sichtbaren Bereichs detektieren. Dies kann auf zwei Arten geschehen: Erstens durch das Aussenden von Strahlung definierter Wellenlängen und der Detektion der reflektierten Strahlung und zweitens durch Sensoren, die emittierte Strahlung der Umgebung aufnehmen.

Der letzte Lösungsvorschlag verweist auf die Entwicklung von Infrarot-Nachtsichtsystemen. Aufgabe dieser Systeme ist es nicht, den Blick des Fahrers durch die Windschutzscheibe zu ersetzen, sondern ihn dort mit zusätzlichen Informationen zu unterstützen, wo dies notwendig ist (Rumar, 2003).

Ziel eines Nachtsichtsystems ist es, Unfälle zu reduzieren, die primär durch den Faktor *Dunkelheit* verursacht werden. In der Hauptsache sind dies (Rumar, 2003; Sullivan & Flanagan, 2001):

- Zusammenstöße zwischen Fahrzeugen und Fußgängern als häufigste Unfallart
- Alleinunfälle
- Kollisionen zwischen Fahrzeugen und Fahrrädern
- Wildunfälle
- Auffahrunfälle zwischen Kraftfahrzeugen

Während bei nächtlichen Unfällen mit Fußgängern und Radfahrern *Dunkelheit mit herabgesetzter Sichtbarkeit* eine Hauptrolle spielt, sind bei anderen Unfällen neben der Dunkelheit die Faktoren *Trunkenheit, Müdigkeit und größere Häufigkeit von Wildwechseln* von Bedeutung (Owens & Sivak, 1996; Rumar, 2003).

Die verminderte Sehleistung bei Nacht wird durch eine verminderte Kontrastsensitivität und eine Erhöhung der Blendempfindlichkeit hervorgerufen. Bedingt durch die in der Regel gleich bleibend hohen Fahrgeschwindigkeiten, insbesondere auf gut ausgebauten Landstraßen, resultiert hieraus eine Erhöhung des Unfallrisikos. Untersuchungen zur Erkennbarkeitsentfernung für dunkel gekleidete Fußgänger ergaben mit Abblendlicht Werte von 55 m (Locher & Völker, 2004). Vergleicht man dies mit einem Anhalteweg von ca. 90 m bei 100 km/h und trockener, griffiger Fahrbahn (Lachenmayr, 1995), zeigt sich, dass ein dunkles Objekt bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 100 km/h vom Fahrer nicht rechtzeitig erkannt werden kann, um eine Kollision zu vermeiden. Rumar (2003) postuliert, dass die minimale Sehdistanz, die ein Fahrer benötigt, um ein Objekt beim Fahren bei normaler Geschwindigkeit auf der Landstraße zu erkennen sowie zu identifizieren und dann situationsadäquat zu reagieren bei 150 m liegt. Diese Bedingung wird unter den meisten Abblendlichtbedingungen aber auch bei manchen Fernlichtfahrten nicht eingehalten.

Das Problem verschärft sich nochmals bei älteren Fahrern. Die Ergebnisse einer Studie von Blanco, Hankey und Dingus (2001) zeigen beispielsweise eine signifikant geringere Wahrnehmungs- und Erkennungsdistanz von älteren Probanden (65 Jahre und älter) gegenüber jüngeren Fahrern (18-25 Jahre) beim Fahren in der Dunkelheit. Die jüngeren Fahrer konnten die Objekte aus ungefähr 30 m größerer Entfernung sehen als die älteren Fahrer. Tabelle 2.1 fasst die Ergebnisse von unterschiedlichen Studien zur Altersabhängigkeit von Erkennungsdistanzen von Objekten bei Nachfahrten unter realen Bedingungen zusammen.

**Tab. 2.1: Erkennendistanz für vertikale Objekte (Rumar, 2003)**

Bedingung	Abblendlicht mit entgegen-kommendem Abblendlicht		Fernlicht ohne entgegen-kommende Scheinwerfer	
	Junge Fahrer	Ältere Fahrer	Junge Fahrer	Ältere Fahrer
Dunkle Objekte	40-60 m	30-50 m	150-300 m	120-250 m
Helle Objekte	60-100 m	50-80 m	250-500 m	200-400 m
Dunkle Objekte mit Retroreflektoren	100-200 m	80-160 m	350-700 m	300-600 m

Das Sehen des Fahrers in der Nacht wird von zwei unterschiedlichen Funktionen bestimmt (Leibowitz & Owens, 1997; zitiert nach Rumar, 2003, S. 2):

1. Periphere Prozesse, die für die visuelle Orientierung und somit für Spurhaltung und laterale Kontrolle wichtig sind.
2. Prozesse der zentralen Sicht, die die Objekterkennung und Wahrnehmung leisten.

Während wichtige Faktoren der Objekterkennung wie Kontrast, Tiefe und Distanz beim Fahren in der Dunkelheit stark verschlechtert werden, vermindert sich die Orientierungsleistung nur gering. In dem Rückgang der Objekterkennung liegt die Ursache für die Vielzahl schwerer Unfälle bei Nacht. Dieser Unterschied in der Verschlechterung der beiden Sehprozesse begründet die Tendenz der Autofahrer, eine im Vergleich mit ihren Sehleistungen zu hohe Geschwindigkeit zu wählen: Die Geschwindigkeit entspricht der Sehleistung im Bereich der Orientierung, nicht aber der geringen Objekterkennungsdistanz. Rumar (2003) zieht daraus den Schluss, dass ein Fahrerassistenzsystem zur Verbesserung der nächtlichen Sicht nicht wichtig ist, um den Straßenverlauf zu sehen. Er befürchtet sogar, dass mit einem solchen System die Gefahr steigt, zu schnell zu fahren.

### 2.1.3 Nachtsichtsysteme

Wie bereits oben beschrieben, ist das Nachtsichtsystem ein momentan häufig diskutiertes, visuell arbeitendes Fahrerassistenzsystem. In diesem Kapitel wird nach einem kurzen Überblick über die Historie der Entwicklungsstand von Nachtsichtsystemen dargestellt und dann die Notwendigkeit und Nützlichkeit dieser Systeme anhand der Literatur diskutiert. Rumar (2003) gibt eine detaillierte Übersicht über Nachtsichtsysteme.

### 2.1.3.1 Historische Entwicklung

Nachtsichtsysteme sind seit über einem halben Jahrhundert bekannt, wurden aber die meiste Zeit lediglich für den militärischen Gebrauch eingesetzt. Beispielsweise wurden Nachtsichtbrillen in den 1960er Jahren für Landtruppen, insbesondere im Vietnamkrieg, eingesetzt. Seit den 1970er Jahren wurden sie auch von Hubschrauberpiloten genutzt (Tsimhoni & Green, 2002). In den 1960er Jahren wurden die ersten Nachtsichtsysteme, die auf FLIR-Konzepten (**Forward Looking InfraRed**) basierten, entwickelt.

Seit den 1990er Jahren wird der Einsatz von Nachtsichtsystemen auch im Kraftfahrzeugbereich diskutiert. Seitdem wurde eine Vielzahl von Studien durchgeführt, um die Vor- und Nachteile eines Einsatzes dieses Fahrerassistenzsystems zu untersuchen (z. B. Barham, Oxley & Ayala, 1998; Blanco et al., 2001; Gish, Staplin & Perel, 1999; Mahlke, Rösler, Seifert, Krems & Thüring, 2007; Tsimhoni, Bärgman, Minoda & Flannagan, 2004, siehe Kap. 2.1.3.3).

Das erste zivile Fahrzeug, welches mit einem Nachtsichtsystem ausgestattet wurde, war der GM Cadillac 2000. In Deutschland wurden die ersten beiden käuflich erhältlichen Systeme auf der Internationalen Automobil-Ausstellung 2005 vorgestellt. Dabei handelte es sich um ein passives Infrarot-Nachtsichtsystem (BMW, 7er Reihe) und ein aktives Infrarot-Nachtsichtsystem (Daimler Chrysler, Mercedes S-Klasse) (siehe Kap. 2.1.3.2).

### 2.1.3.2 Stand der Technik

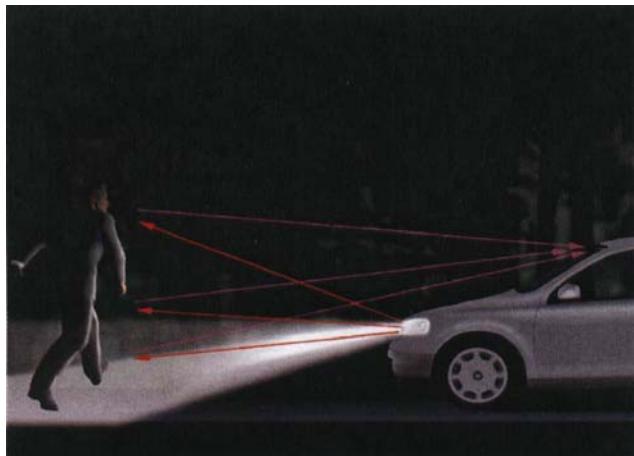
Heute sind für den zivilen Kraftverkehr zwei unterschiedliche Arten von Infrarot-Nachtsichtsystemen erhältlich, die auf verschiedenen Prinzipien beruhen:

#### 1) Aktive Infrarot-Nachtsichtsysteme (**Near Infrared (NIR) Systems**)

Diese Systeme arbeiten im Nahinfrarotbereich (NIR) bei Wellenlängen von 780 bis 1000 nm<sup>2</sup>, indem nichtsichtbare Infrarotstrahlung in einer Fernlichtverteilung ausgesendet wird (Abb. 2.2).

---

<sup>2</sup> Das menschliche Auge ist in der Lage, elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich von ca. 380 nm bis ca. 780 nm wahrzunehmen.



**Abb. 2.2: Funktionsweise eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems (Hella KGaA Hueck & Co.)**

Die reflektierte Strahlung wird von einer im Fahrzeug befindlichen Kamera aufgenommen und nach einem Bildverarbeitungsprozess dem Fahrer auf einem Display als Bild dargeboten (Abb. 2.3). Das Display kann an verschiedenen Stellen im Fahrzeug angebracht sein: Als Head-up Display (HUD) direkt im Blickfeld des Fahrers, als HUD über dem Dashboard, aber nicht im direkten Blickfeld und als konventionelles Display im Dashboard (Head-down Display HDD) (Rumar, 2003).



**Abb. 2.3: Darbietung des Bildes auf dem Display (Head-down Display) (Hella KGaA Hueck & Co.)**

Da für die meisten Sehobjekte die Reflexionseigenschaften im infraroten und im sichtbaren Bereich vergleichbar sind, ist das Bild des aktiven Nachtsichtsystems dem Seheindruck im sichtbaren Bereich sehr ähnlich (Locher, Völker, Bierleutgeb & Kleinkes, 2003). Die dargebotenen Informationen erschließen sich dem Fahrer damit intuitiv. In Einzelfällen gibt es auch

deutliche Unterschiede: Beispielsweise wird schwarze Kleidung teilweise hell wahrgenommen, was zu einer besseren Erkennbarkeit führt. Allgemein kann gesagt werden, dass die meisten Kleidungsstücke im nahen Infrarotbereich sehr hell erscheinen. Abhängig ist dies von dem Stoffmaterial (Tsimhoni et al., 2004).

Problematisch an den aktiven Systemen ist beim momentanen Entwicklungsstand der sogenannte *Bloomingeffekt*. So werden beispielsweise entgegenkommender Verkehr mit Scheinwerferlicht, Straßenbeleuchtung und retroreflektierende Straßenschilder auf dem Bildschirm des Systems teilweise sehr hell dargeboten und können den Nutzer blenden (z. B. Tsimhoni et al., 2004). Durch Weiterentwicklung der Kameratechnik wird aber versucht, dieses Problem zu minimieren.

## **2) Passive Infrarot-Nachtsichtsysteme (Far Infrared (FIR) Systems)**

Passive Infrarot-Nachtsichtsysteme beruhen auf dem Prinzip von Wärmebildkameras. Diese detektieren Wärmestrahlung, die von Objekten im fernen Infrarot-Bereich (FIR) bei einer Wellenlänge von ca. 5.000-15.000 nm ausgestrahlt wird. Somit ist es ihnen nur möglich, Wärme abstrahlende Objekte wie beispielsweise Menschen und Tiere zu detektieren. Eine separate Strahlungsquelle ist nicht notwendig. Das Bild, welches dem Fahrer auf dem Bildschirm dargeboten wird, entspricht nicht dem, was er durch die Windschutzscheibe sieht. Menschen, Tiere oder warme Objekte (z. B. Auspuff eines anderen Kfz) sind heller als in der Realität zu erkennen und werden dadurch im Bild hervorgehoben. Dagegen sind Straßenschilder, Straßenmarkierungen und die Straße selber lediglich kurz nach Einbruch der Dunkelheit, wenn sie noch durch das Tageslicht aufgeheizt sind, sichtbar. Informationen, die zur Spurhaltung notwendig sind, können somit von dem System meistens nicht erhalten werden. Auch kann es zu „Geisterbildern“, beispielsweise durch warme Luft, die aus einem Gully steigt, oder zu einer Hervorhebung von Informationen, die keine Relevanz für die Fahrsituation haben, wie z. B. durch schlecht isolierte Häuser, kommen. Dies führt dazu, dass sich dem Fahrer das Bild nicht sofort erschließt, sondern ein Lernprozess notwendig ist, um die dargebotenen Informationen zu interpretieren. Rumar (2003) formuliert die Befürchtung, dass es für Fahrer problematisch sein könnte, die genaue Position eines Objektes zu bestimmen, wenn sie nicht gleichzeitig den Straßenverlauf dargeboten bekommen. Ein weiterer Nachteil sind die höheren Kosten des passiven Systems. Ein Vorteil von passiven Systemen dagegen ist, dass es nicht zu einer Blendung durch das System selber kommen kann, da keine Strahlung aktiv ausgesandt wird. Passive Systeme haben außerdem eine größere Reichweite als aktive Systeme<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> BMW beispielsweise gibt eine Reichweite von 300 m bei passiven Systemen an. Die Strahlung von aktiven Systemen entspricht der Reichweite von Fernlicht, ca. 150 m (<http://www.7-forum.com/news/2005/nightvision/index2.php>).

Eine vergleichende Bewertung von aktiven und passiven Systemen ist davon abhängig, welchen Nutzen ein solches System hauptsächlich bringen soll. Wird gewünscht, dass der Straßenverlauf durch das System erkennbar wird, ist ein aktives System zu präferieren. Ein deutlicher Vorteil gegenüber dem passiven System ist die einfache Interpretierbarkeit des dargebotenen Bildes, so dass von einem kürzeren Lernprozess bei der Gewöhnung an ein solches System ausgegangen werden kann.

Viele Autoren legen dagegen lediglich Wert auf die frühzeitige Erkennung von Fußgängern in der Nacht, da sie insbesondere in dieser Zeit ein erhöhtes Risiko von Kollisionen mit diesen sehen. Beispielsweise bemerkt Rumar (2002, S. 5):

„Based on the characteristics of night traffic and night crashes, the NVES should primary enhance the visibility of pedestrians, cyclists, and animals. Rear-end crashes should be solved by other means, and single vehicle crashes appear to be more dependent on alcohol and fatigue.“

Diese Meinung würde dafür sprechen, den Einsatz eines passiven Nachtsichtsystems gegenüber einem aktiven zu präferieren.

### **2.1.3.3 Empirische Studien zum Nutzen von Nachtsichtsystemen**

Einige Autoren versuchen generelle Aussagen zu tätigen, welche Verbesserungen in der Verkehrssicherheit zu erwarten sind, wenn Infrarot-Nachtsichtsysteme genutzt würden. Beispielsweise gehen Lunenfeld und Stephens (1991) davon aus, dass durch die Nutzung die Schwere von Nachtunfällen um 20-25 % reduziert werden kann.

Färber (1993) führt aus, dass der Benefit von Systemen, die dem Fahrer lediglich zusätzliche Informationen bereitstellen, nur sehr gering ist. Bei Nachtsichtsystemen erwartet er eine maximale Reduzierung von Unfällen mit verletzten Personen um 7 %, und dass die tatsächliche Veränderung nur bei einer Veränderung zwischen einer Zunahme von einem Prozent und einer Abnahme von 2 % liegt.

Eine der ersten Studien zum Thema Nachtsichtsysteme für den zivilen Kfz-Bereich führten Barham et al. (1998) durch. Sie evaluierten mit 40 Probanden den Prototyp eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems. Das System wurde von einem Militärflugzeug übernommen und in einen Jaguar eingebaut. Ein Ergebnis ihrer Untersuchung war, dass die Erkennungsdistanz von passierenden Fußgängern durch das System stieg: Ohne das System wurden die Fußgänger bei einer Distanz von 50-70 m ( $\bar{x} = 61,1$  m) erkannt, bei der Nutzung des Systems zwischen 90 und 100 m ( $\bar{x} = 95,1$  m). Auch die Erkennungsdistanz von Personen am Straßenrand erhöhte sich. Die Erkennungsdistanz eines Erwachsenendummymys erhöhte sich durch das System von

24 auf 63 m, die eines Kindes von 19 auf 47 m. Dagegen wurden Verkehrszeichen mit dem System nicht früher erkannt. Die Autoren erklären dies mit den optimalen Reflektionseigenschaften der Verkehrsschilder, die dazu führen, dass diese so früh erkannt werden, dass dies auch mit einem Nachtsichtsystem nicht mehr gesteigert werden kann.

In dem EU-Projekt EDEL (Enhanced driver's perception in poor visibility) wurde mit der Durchführung von fünf Fokusgruppen mit potentiellen Nutzern untersucht, welche Vorteile die Probanden hauptsächlich durch ein aktives Infrarot-Nachtsichtsystem erwarteten. Dabei wurden nach einer theoretischen Einführung in das System folgende Benefits durch die Nutzung eines solchen Systems genannt (Mariani & Andreone, 2003):

- Hervorhebung von unerwarteten, plötzlichen Ereignissen
- Erhöhung der Sichtbarkeit von Verkehrszeichen
- Bessere Erkennbarkeit des Straßenverlaufs
- Frühzeitiges Erkennen von Hindernissen

Andere Studien beschäftigten sich experimentell mit der Frage, wie sich Wahrnehmungs- und Erkennendistanz von Objekten beim Fahren in der Dunkelheit durch den Einsatz eines Infrarot-Nachtsichtsystems verändern:

Blanco et al. (2001) verglichen unter diesem Gesichtspunkt elf verschiedene Scheinwerfer wie beispielsweise Halogenscheinwerfer und Gasentladungslampen mit einem passiven Infrarot-Nachtsichtsystem. An der Studie nahmen 30 Probanden teil, die mit einer festgelegten Geschwindigkeit eine Versuchsstrecke abfuhren. Dabei wurden ihnen verschiedene Objekte wie Fußgänger, Radfahrer und statische Objekte an der Versuchsstrecke präsentiert. Durch Pressen eines Buttons sollten die Probanden signalisieren, wann sie ein Objekt wahrnehmen (Wahrnehmungsdistanz) und durch ein weiteres Pressen des Buttons und der Verbalisierung, um was für ein Objekt es sich handelt, die Erkennendistanz anzeigen. Ein Ergebnis dieser Studie war, dass die Wahrnehmungs- und Erkennendistanz beim Infrarot-Nachtsichtsystem größer war als bei allen Scheinwerfern.

Gish et al. (1999) untersuchten, inwieweit Fahrer Objekte früher erkennen, wenn sie ein Nachtsichtsystem nutzen. Weiterer Schwerpunkt ihrer Studie war die Frage, ob Fahrer erkennen, in welchen Situationen die Nutzung eines solchen Systems von Vorteil ist. Acht Versuchspersonen fuhren auf einer Flughafenteststrecke mit einem simulierten aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem. Sie wurden instruiert, möglichst die durch Verkehrszeichen angegebene Höchstgeschwindigkeit zu fahren. Den Probanden wurden grau gestrichene Silhouetten von Fußgängern und eines Rehs sowie eine graue Tafel und eine schwarz-weiß gestreifte Tafel („Gitter“) jeweils mit und ohne vorhandene Blendung statisch präsentiert. Wenn sie ein Objekt sahen, sollten sie zuerst das generelle Wahrnehmen des Objekts möglichst schnell verba-

lisieren und dann angeben, um welches Objekt es sich handelt. Es zeigte sich, dass die jüngeren Probanden (26 bis 36 Jahre) von dem System profitierten. Die Erkennensdistanz der dargebotenen Objekte stieg um 31 m (Reh und Fußgänger) beziehungsweise um 61 m (Tafel und Gitter). Bei den älteren Fahrern (56 bis 70 Jahre) gab es keine signifikanten Unterschiede in der Erkennensdistanz beim Fahren mit oder ohne Unterstützung durch das Nachsichtsystem. Die Aussagen der älteren Fahrer zeigten, dass diese das Display entweder gar nicht nutzten, es nur dafür verwendeten, um Kurven frühzeitig zu erkennen oder das System zwar nutzten, es aber als unkomfortabel empfanden. Außerdem gab es keine signifikanten Unterschiede in den Erkennensleistungen bei Blendung mit und ohne System, da die Beanspruchung der Fahrer durch die Blendung so anstieg, dass sie das System nicht mehr nutzten. Die Kommentare der Probanden zeigten, dass die älteren Fahrer vorsichtiger und zurückhaltender in der Formulierung potentieller Vorteile des Systems waren. Sie fanden die Blickabwendung auf das System unkomfortabel, was möglicherweise durch ein HUD verbessert werden könnte. Des Weiteren trauten die älteren Personen nicht dem auf dem Display Gesehenen, sondern vergewisserten sich zuerst durch einen Blick durch die Windschutzscheibe, bevor sie angaben, ein Objekt erkannt zu haben. Die jüngeren Fahrer hingegen bewerteten das System als sehr nützlich, schauten auf das Display und empfanden die Nutzung als komfortabel. Die Mehrheit aller Fahrer empfand das System als sinnvoll, um den Straßenverlauf frühzeitig zu erkennen.

Gish, Shoulson und Perel (2002, zitiert nach Rumar, 2003, S. 4) untersuchten, wie groß die Sichtweite mit einem passiven Infrarot-Nachtsichtsystem im Vergleich zum Fahren mit Abblendlicht ist. Es zeigte sich, dass sich bei jungen Fahrern die Sichtweite bei der Anwesenheit von Gegenverkehr von 65 m auf 150 m erhöhte, wenn sie das System nutzten. Viele der älteren Probanden nutzten das Nachsichtsystem gar nicht, weil es ihnen schwerfiel, zwei Aufgaben – die normale Fahraufgabe und das Betrachten des Displays – gleichzeitig zu absolvieren.

Tsimhoni et al. (2004) verglichen in einer Studie mit sechzehn Probanden die Erkennensdistanz von Fußgängern bei der Nutzung eines aktiven und eines passiven Infrarot-Nachtsichtsystems. Mit einem Versuchsfahrzeug, das mit beiden Systemen ausgestattet war, wurden verschiedene Strecken befahren, an denen am Fahrbahnrand Fußgänger positioniert waren. Die Videobilder beider Systeme wurden aufgenommen und später im Labor den Probanden präsentiert. Die Versuchspersonen wurden instruiert, sofort einen Knopf zu drücken, wenn sie einen Fußgänger sahen. Es zeigte sich, dass die Erkennensdistanz mit dem passiven Infrarot-Nachtsichtsystem signifikant größer war als die mit dem aktiven System: Im Mittel lag die Erkennensdistanz mit dem passiven System bei 165 m und mit dem aktiven System bei 59 m. Generell sahen jüngere Probanden die Personen aus einer 70 % weiteren Distanz als die älteren. 3,5 % aller dargebotenen Fußgänger wurden von den Probanden übersehen. Der Prozentsatz der mit dem passiven System nicht gesehenen Personen lag bei 1,0 %, bei dem aktiven System bei 6,0 %. Die älteren Versuchspersonen übersahen mit dem aktiven System sehr viel mehr Passanten als die jüngeren Probanden. Subjektiv bewerteten die Probanden das

passive System als effektiver zur Fußgängererkennung und gaben an, das passive System häufiger zu nutzen, wenn es in ihrem Auto eingebaut wäre. Insgesamt wurde in dieser Studie das passive Infrarot-Nachtsichtsystem von den Versuchsfahrern uneingeschränkt als besser bewertet. Einschränkend muss allerdings gesagt werden, dass lediglich ein Vorteil eines solchen Systems – die Fußgängererkennung – betrachtet wurde. Außerdem handelt es sich um ein Laborexperiment, bei dem die Probanden beispielsweise nicht beurteilen können, ob sie die fehlenden Informationen zum Straßenverlauf beim realen Fahren stören würden.

Auch Sullivan, Bärgman, Adachi und Schoettler (2004) untersuchten den Vorteil eines passiven Infrarot-Nachtsichtsystems hinsichtlich Distanz und Genauigkeit von Zielerkennungen. Es zeigte sich eine Steigerung der Erkennensdistanz von dargebotenen Objekten (Reh, Kiste, dunkel gekleideter Fußgänger) bei jungen und alten Versuchsteilnehmern, wobei die jüngeren Probanden einen größeren Vorteil durch das System erlangten. Die Genauigkeit der Objekterkennung war nicht von der Anwesenheit des Systems abhängig.

Hollnagel und Källhammer (2003) zeigten mit einer Simulatorstudie, dass die Probanden mit einem simulierten passiven Nachtsichtsystem einen Elch, der auf der Fahrbahn des Fahrzeugs stand, bereits in 400-500 m Entfernung erkennen konnten und damit eine bessere Kontrolle über das Bremsen und das Ausweichen hatten als ohne das System (Erkennensdistanz unter 50 m). Die zusätzliche Zeit nutzten die Versuchspersonen, um die Situation zu bewerten und angemessen zu reagieren.

Mahlke et al. (2007) verglichen sechs verschiedene Prototypen (Tab. 2.2) von Nachtsichtsystemen mit unterschiedlichen Sensoren, Displays und Bildverarbeitungstechnologien.

**Tab. 2.2: Verwendete Prototypen von Nachtsichtsystemen (Mahlke, Rösler, Seifert, Krems & Thüring, 2007)**

Prototyp	Abkürzung	Fahrzeug
Aktives System mit Head-Down Display	NI-HD	Audi A 8
Passives System mit Head-Down Display	FI-HD	Audi A 8
Passives System mit virtuellem Head-Up Display	FI-VHU	Audi A 8
Aktives System mit Spiegel Head-Up Display	NI-MHU	VW Touareg
Passives System mit automatischer Fußgängererkennung und einem analogen Spiegel Head-Up Display mit Hervorhebung von erkannten Objekten im Videobild	APR-MHU	VW Touareg
Passives System mit automatischer Fußgängererkennung und einem abstrakten eventbasierten LED-Display	APR-LED	VW Touareg

Für die Untersuchung wurden zwei Testfahrzeuge (VW Touareg und Audi A 8) mit einem aktiven und einem passiven Nachtsichtsystem mit verschiedenen Displays ausgestattet. In den VW wurde ein Fußgängererkennungssystem eingebaut. Fünf der Systeme arbeiten mit Videobild, über eine Objekterkennung (APR: Automatic Pedestrian Recognition) verfügten zwei Systeme: in einem System wurden Fußgänger im Bild hervorgehoben, in dem anderen System symbolisierte eine blinkende LED eine Fußgängererkennung. Beide Versuchsfahrzeuge waren mit einem Eye-Tracking-System ausgestattet, um die Blickbewegungen der Probanden bei der Systemnutzung zu erfassen.

Grundlage der Untersuchung war die Fragestellung, welche Systeme für den Fahrer einen Vorteil bieten, ohne gleichzeitig den Grad der Beanspruchung zu erhöhen. Als Kriterien verwenden die Autoren die Usabilitydimensionen *Effektivität* (= Grad der Genauigkeit und Vollständigkeit der Systemnutzung), *Nutzen* (= Wirksamkeit der Systemnutzung im Vergleich zu den Kosten), *Nutzerzufriedenheit* (Komfort und Akzeptanz) und Fahrverhalten. Methodisch war die Untersuchung in zwei Schritte unterteilt,

- 1) eine Expertenevaluation als Basis für den zweiten Untersuchungsschritt bei der mit Hilfe von Ergonomen, Wahrnehmungs- und Verkehrspychologen versucht wurde, einen Überblick über die möglichen Effekte eines Nachtsichtsystems zu erhalten und
- 2) eine Feldstudie mit fünfzehn Versuchsfahrern.

### **Expertenevaluation**

Acht Experten fuhren jeweils drei bis vier Stunden mit den sechs Prototypen und erzählten während dieser Fahrten frei über ihre Eindrücke zu den Systemen. Zusätzlich wurden sie einige Tage nach der Fahrt im Rahmen von halbstrukturierten Leitfadeninterviews befragt. Als Ergebnis zeigte sich, dass das System allgemein als hilfreich bewertet und eine Weiterentwicklung befürwortet wurde. Ein Hauptfokus sollte dabei auf einem System mit einer softwarebasierten Erkennung von kritischen Ereignissen liegen. Dieses wurde gegenüber einem System mit Videopräsentation als besser erachtet. Die unterschiedlichen Systemkonzepte wurden folgendermaßen bewertet:

- Eventbasierte Systeme mit automatischer Objekterkennung haben den Vorteil, dass nur potentielle Gefahrensituationen signalisiert werden und die Augen sonst nicht von der Straße abgewendet werden müssen.
- Systeme mit analoger Videopräsentation werden als ermüdend bewertet und können die Verkehrssicherheit verringern.
- Die Darstellung beim aktiven System wird positiv bewertet. Aber die Möglichkeit, vor Gefahren gewarnt zu werden, wird als unbefriedigend bezeichnet, da es schwierig ist, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf sicherheitsrelevante Objekte zu lenken. Durch Blendung könnten Gefahrenobjekte übersehen werden.
- Passive Systeme erlauben eher den Gewinn zusätzlicher Informationen, da wärmere Objekte herausstechen. Probleme werden jedoch bei der Lernbarkeit gesehen, da die Bilder sehr stark von der Realität abweichen. Eine Interpretation ist schwierig, insbesondere weil die Temperatur während einer Nachtfahrt differiert. Ein gemeinsames Problem aller dieser Systeme ist, dem Fahrer zu zeigen, wann er auf das Display schauen soll. Die Experten gehen davon aus, dass ein solches System nicht genutzt würde, weil es zu groÙe Anstrengung seitens der Fahrer bedürfe.

### **Feldstudie**

Für die zweite Studie fuhren fünfzehn Fahrer (40-65 Jahre) jeweils einmal mit jedem Nachtsichtsystem und zweimal ohne System (Baseline) auf einer festgelegten Teststrecke im realen Straßenverkehr. Jede Fahrt dauerte ca. 20 min. An vier Stellen der Strecke wurden Fußgänger positioniert, auf die reagiert werden sollte.

Die Auswertung der Studie ergab folgende Ergebnisse:

### **Effektivität**

Zur Erfassung der Effektivität der Systeme sollten die Fahrer während der Fahrt so schnell wie möglich die Anwesenheit von Fußgängern, Fahrradfahrern oder Wild verbalisieren. Hierzu wurden bei der Auswertung verschiedene Kriterien herangezogen.

Bei der **Erkennensrate** wurde erfasst, wie viel Prozent der Objekte korrekt erkannt wurden. Bei der Baseline-Fahrt waren dies 58,2 %<sup>4</sup>; mit dem APR-LED 57,7 % und mit den anderen Systemen zwischen 46,6 und 56,9 %. Die Ergebnisse waren statistisch nicht signifikant. So mit erhöhte sich die Erkennensrate durch die Systemnutzung nicht; lediglich mit dem APR-LED-System wurde überhaupt eine vergleichbare Quote erreicht.

Die **Erkennenszeit** lag bei dem LED- und den NIR-Systemen zwischen 4,9 und 6,4 s; die drei anderen Systeme hatten längere Reaktionszeiten (8,6-9,5 s).

Bei der Baseline-Fahrt lag die **Erkennendistanz** der Fußgänger bei 34 m, drei Systeme (NI-MHU; NI-HD, APR-LED) wiesen eine etwas höhere Distanz auf, die anderen Systeme lagen bei 30-32 m. Die Unterschiede waren aber nicht signifikant.

Außerdem wurde erfasst, wie häufig „False alarm“ erfolgte. Die APR-Systeme gaben beide falsche Alarme, deren Häufigkeit mit den jeweiligen Wetterkonditionen variierten. Falsche Alarme durch die Fahrer waren extrem selten.

### Nutzen

Für die Ermittlung des Nutzens wurde erstens die subjektive Beanspruchung u. a. mittels des NASA-TLX erfasst (vgl. Kap. 3.2.1.2). Die Systeme NI-HD und APR-LED wiesen die gleiche mentale Beanspruchung wie die Baselinefahrt auf. Alle anderen Systeme führten zu einer höheren Beanspruchung. Beim NASA-TLX war für die Erhöhung überwiegend die größere visuelle Beanspruchung von Bedeutung. Zweitens wurde die Blickfrequenz und Fixationsdauer aufgezeichnet. Die Blickhäufigkeit unterschied sich kaum zwischen den Systemen, aber die Blickdauer differierte. Die Systeme mit analogen Videos wurden länger fixiert (11-18 % der Fahrzeit) als das APR-LED (6 %). Durch die Blicke auf das Display erfolgten weniger Blicke auf die Straße. Die Blickhäufigkeit auf Instrumente und Spiegel reduzierte sich dagegen nicht.

### Zufriedenheit

Die Probanden sollten bewerten, welches System ihnen am meisten zusagt. Mit einem Systemranking wurde das NI-HD vor FI-HD und APR-LED gesetzt. Diese Reihenfolge war aber statistisch nicht signifikant. Signifikant war dagegen die Reihung des NI-HD vor dem APR-LED mittels eines Akzeptanzfragebogens. Somit kann gesagt werden, dass tendenziell das aktive Infrarot-Nachtsichtsystem von den Versuchspersonen als am besten beurteilt wurde.

---

<sup>4</sup> Die Autoren erklären die geringe generelle Erkennensquote von unter 60 % damit, dass die postierten Fußgänger aus Sicherheitsgründen einen Meter von der Fahrbahn entfernt stehen mussten.

### Fahrverhalten

Die erfassten Parameter *Geschwindigkeit*, *Lenkwinkel* und *Lenkwinkelgeschwindigkeit* wiesen keine Unterschiede zur Basisfahrt auf.

Eine zusammenfassende Betrachtung der Studie von Mahlke et al. (2007) zeigt eine positive Bewertung von Infrarot-Nachtsichtsystemen. Die im ersten Untersuchungsschritt im Rahmen einer Expertenevaluation erhaltenen Ergebnisse zeigten, dass das System allgemein als hilfreich bewertet wurde. Es wurde empfohlen, bei einer Systemweiterentwicklung einen Schwerpunkt auf die softwarebasierte Erkennung von Ereignissen zu legen. Im zweiten Untersuchungsschritt wurden die verschiedenen Nachtsichtsysteme auf einer Teststrecke von Fahrern bewertet. Die Versuchspersonen zogen tendenziell aktive Systeme passiven Systemen vor. Die Studie zeigte aber auch, dass die Erkennungsleistungen der Fahrer durch die Systemnutzung sich nicht signifikant steigerten. Ein Nutzen des Systems konnte dementsprechend mit dieser Untersuchung nicht belegt werden.

Eine weitere wichtige Frage bei der Untersuchung von Nachtsichtsystemen ist, welche Meinung die Versuchspersonen grundsätzlich zu einem solchen System haben. Nur wenn es generell positiv bewertet wird und die Fahrer überhaupt einen Vorteil durch die Nutzung des Systems sehen, werden sie es in der Zukunft auch kaufen und verwenden. Daher gibt es eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zu diesem Thema (z. B. Barham, 2001; Gish et al., 2002; zitiert nach Rumar, 2003, S. 4; Ståhl, Oxley, Berntman & Lind, 1994).

Barham (2001) führte eine Simulatorstudie mit 24 Versuchspersonen durch. Die Probanden wurden aufgefordert, einem Fahrzeug bei reduzierten Sichtbedingungen zu folgen. Dabei fuhren sie einmal mit und einmal ohne ein simuliertes passives Nachtsichtsystem. Auf einer siebenstufigen Skala gaben die Fahrer nach der Fahrt ein Feedback zu dem System. Die Probanden bewerteten das System als nützlich und die meisten empfanden das System als einfach zu nutzen und nicht störend. Außerdem fühlten sie sich mit dem System sicherer.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Mehrzahl der Probanden der Meinung war, dass das Nachtsichtsystem nützlich beim Befahren von geraden, unbekannten und unbeleuchteten Straßen ist. Die meisten empfanden die Nutzung als einfach und sahen kein großes Problem in der Ablenkung durch das System.

Eine resümierende Betrachtung der empirischen Studien zum Nutzen von Nachtsichtsystemen für die Verkehrssicherheit zeigt, dass es sich bei den in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zum größten Teil um Laborstudien oder Studien mit Fahrten auf abgesperrten Strecken, wie beispielsweise Flughäfen, handelt. Hier stellt sich die Frage der Übertragbarkeit der erhaltenen Ergebnisse auf reale Fahrsituationen (vgl. hierzu auch Kap. 3.3). Die Studien be-

beschäftigen sich in der Mehrzahl mit der Frage, wie sich die Nutzung eines Nachtsichtsystems auf die Sichtweite auswirkt. Alle Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass die Wahrnehmungs- und Erkennensdistanz, z. B. von Personen oder Tieren, beim Fahren mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem größer ist als beim Fahren ohne dieses FAS. Lediglich die Untersuchung von Mahlke et al. (2007) beschäftigt sich mit dieser Thematik im Rahmen einer Feldstudie im realen Straßenverkehr. Es zeigten sich aber keine signifikanten Verbesserungen in den Erkennensleistungen beim Fahren mit Nachtsichtsystem. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik fehlen bislang in der Literatur.

#### **2.1.3.4 Probleme durch die Nutzung von Infrarot-Nachtsichtsystemen**

Bei der Einführung eines neuen Fahrerassistenzsystems muss immer davon ausgegangen werden, dass die Nutzung des neuen Systems nicht nur Vorteile hat, sondern auch Risiken bergen kann. Beispielsweise könnte ein Sicherheitsproblem dadurch auftreten, dass der Fahrer sich zuerst an die Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems gewöhnen muss. In dieser Phase kann es zu Unsicherheiten beim Fahren kommen, weil der Nutzer durch die Beschäftigung mit dem System abgelenkt ist. Rumar (2003) sieht zwei Lernaufgaben, die der Fahrer zusätzlich zur Fahraufgabe bei der Gewöhnung an das Nachtsichtsystem bewältigen muss: er muss sein Blickverhalten verändern, um Informationen von dem Display abzulesen und er muss lernen, welche Informationen auf dem Display dargeboten werden und welche nicht. Die zweite Aufgabe ist sicherlich bei passiven Nachtsichtsystemen schwieriger als bei aktiven.

In der Literatur wird eine Reihe von Problemen formuliert, die durch die Nutzung von Infrarot-Nachtsichtsystemen auftreten können (Rumar, 2003; Gish et al., 1999):

- Sieht der Betrachter zu lange auf das Display, werden Informationen, die nur durch direkten Blick durch die Windschutzscheibe oder auf anderem Wege erhalten werden können, übersehen. Insbesondere Objekte im peripheren Sichtfeld könnten aufgrund des bei der Systemnutzung auftretenden Tunnelblicks übersehen werden.
- Bessere Sicht durch das System und ein Gefühl von höherem Komfort können zu höherer Fahrgeschwindigkeit führen (Risikokompensation). Dieser Aspekt beruht auf der von Wilde (Wilde & Kunkel, 1984) formulierten Theorie der Risikohomöostase (siehe Kap. 2.2.2). Wird einem Fahrer zusätzliche Information bereitgestellt, verändert sich seine Risikowahrnehmung. Diesen Vorteil wird er wenigstens teilweise durch ein größeres Risikoverhalten ausgleichen.
- Das System verlangt eine erhöhte mentale Beanspruchung, wodurch geringere Ressourcen für die Fahraufgabe vorhanden sind. Beispielsweise zeigt eine Studie von Ward, Stapleton und Parkes (1994, zitiert nach Rumar, 2003, S. 5), dass sich die mentale Beanspruchung durch die Nutzung eines aktiven Nachtsichtsystems erhöhte.

Rumar (2003) formuliert fünf Forderungen für die Entwicklung von Nachsichtssystemen:

- Die Fahrgeschwindigkeit sollte durch das System nicht erhöht werden.
- Durch das System sollte eine möglichst geringe Ablenkung erfolgen.
- Die Nutzung des Systems sollte nicht zu viele kognitive Ressourcen benötigen.
- Durch das System sollte der Fahrer möglichst gering beansprucht werden.
- Das System sollte insbesondere älteren Fahrern Nutzen bringen.

Einige Autoren sind der Meinung, dass eine zusätzliche Bereitstellung von optischen Informationen im Fahrzeug zu einem Sicherheitsrisiko führt. Beispielsweise postuliert Bielaczek (1999):

„Der optische Sinneskanal ist weitgehend ausgelastet und erlaubt keine zusätzliche Belastung mehr, ohne dass dies negative Folgen für die Sicherheit beim Kraftfahrzeugführen mit sich bringen würde.“ (Bialaczek, 1999, S. 717)

Auch Kiefer (1995) sieht als mögliches Problem bei der Nutzung eines Nachsichtsystems eine verminderte Aufmerksamkeit in Bezug auf Ereignisse, die sich außerhalb des Blickwinkels des Systems ereignen. Der Autor zieht daraus den Schluss, dass der Fahrer wissen muss, in welchen Situationen er das System nutzen sollte und wann ein Blick durch die Windschutzscheibe bessere Informationen liefert:

„Furthermore, in order for drivers to take full advantage of a VES and minimize any potential costs of VES usage, they will need to clearly understand when and how to use the VES, and the important perceptual differences between direct view and thermal imagery.“ (Kiefer, 1995, S. 1100)

Eine Betrachtung der Literatur zeigt also, dass es für den Fahrer und dessen Sicherheit wichtig ist, Strategien zur richtigen Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems auszubilden.

## 2.1.4 Fazit

Die zitierten Studien zeigen eine generelle Akzeptanz von Infrarot-Nachtsichtsystemen durch die Probanden. Hauptfokus der meisten durchgeführten Studien ist die Bewertung der Veränderung der Wahrnehmungs- und Erkennensdistanz von Fußgängern und Objekten durch die Nutzung des Systems. Hier zeigte sich eine Erhöhung der Distanzen durch das FAS. Ein potentieller Nutzen eines solchen Systems für die Verkehrssicherheit konnte somit belegt werden. Fast alle diese Ergebnisse beruhen aber auf Simulatorstudien oder Untersuchungen auf abgesperrten Versuchsstrecken. Es fehlen Feldstudien, die die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf Fahrten im realen Straßenverkehr zeigen.

Die Untersuchungen ergaben aber auch, dass einige, insbesondere ältere Probanden, im Rahmen der Versuchsfahrt das System gar nicht nutzen und somit auch davon nicht profitieren konnten. Hier stellt sich die Frage, ob diese Fahrer generell das Infrarot-Nachtsichtsystem nicht verwendeten oder lediglich eine längere Gewöhnungszeit an das System benötigen, weil sie es beispielsweise in der ersten Zeit aus Unsicherheit nicht wagen, ihren Blick auf das Display zu richten oder die Vorteile des Fahrerassistenzsystems nicht erkennen. Diese Frage ist mit einer einmaligen Versuchsfahrt nicht zu beantworten, sondern die Nutzung muss über mehrere Fahrten hinweg analysiert werden.

Es fehlen bislang Studien, die sich damit beschäftigen, wie die Fahrer ein Infrarot-Nachtsichtsystem nutzen. Interessant ist hierbei beispielsweise die Fragestellung, in welchen Situationen (z. B. Abhängigkeit der Systemnutzung vom Straßentyp und vom Streckenverlauf) das FAS genutzt wird.

Wichtig ist hierbei die Analyse der Nutzungsstrategien (siehe Kap. 2.2) nicht nur im Rahmen einer einmaligen Versuchsfahrt, sondern über einen längeren Zeitraum. Es ist davon auszugehen, dass die Fahrer diese erst im Rahmen des Gewöhnungsprozesses an ein neues Fahrerassistenzsystem ausbilden und verändern.

Eine Bewertung der potentiellen Sicherheitsgefährdung durch die Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems im Rahmen einer Evaluationsstudie ist nur durch die Erhebung quantitativer Daten der Systemnutzung möglich. Bei einem visuellen Fahrerassistenzsystem wie dem Infrarot-Nachtsichtsystem ist es wichtig, die Dauer zu untersuchen, die der Fahrer benötigt, um Informationen von dem Display abzulesen. Lange Blickabwendungen von der Fahrbahn können zu einer Gefährdung durch die Systemnutzung führen. Daher müssen Blickabwendungszeiten und Häufigkeit der Systemnutzung quantitativ erfasst werden. Hierzu fehlen bisher empirische Forschungen.

Für die Beantwortung der beschriebenen offenen Forschungsfragen sind geeignete empirische Forschungsmethoden notwendig. Bislang gibt es keine Ergebnisse dazu, welche Forschungsmethoden zur Untersuchung der Gewöhnungsprozesse an ein neues Fahrerassistenzsystem sowie der Nutzung eines solchen Systems im Straßenverkehr geeignet sind. Zwei empirische Studien der vorliegenden Arbeit beschäftigen sich daher mit der Frage, mit welchen Methoden die Strategien bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems erfasst werden können.

## 2.2 Nutzungsstrategien

Hersteller von Infrarot-Nachtsichtsystemen beurteilen die Auswirkungen dieses Fahrerassistenzsystems auf den Straßenverkehr euphorisch und prognostizieren eine Änderung des Fahrverhaltens durch dessen Verwendung:

„[...] Night Vision has made an historic milestone in vehicle safety. Night Vision is truly changing the way people drive at night.“ (Klapper, Kyle, Nicklin & Kormos, o. J., S. 5)

Es stellt sich die Frage, inwieweit eine solche Einschätzung realistisch ist. Antworten darauf, ob Fahrer tatsächlich ihre Fahrweise durch die Verwendung eines neuen Systems so ändern, dass dies für sie und für andere Verkehrsteilnehmer zu einer Verbesserung der Verkehrssicherheit führt, können nur durch aufwendige empirische Untersuchungen gegeben werden.

Gegenstand einer solchen Studie sollten die Strategien zur Nutzung des neuen Fahrerassistenzsystems sein. Zu beantworten ist beispielsweise, ob und in welchen Situationen der Fahrer das System verwendet, wie lange er benötigt, um Informationen abzulesen und ob es zu Problemen beim Umgang mit dem FAS kommt. Somit wird unter dem Begriff *Nutzungsstrategie* die Verwendung des Infrarot-Nachtsichtsystems verstanden (siehe Kap. 2.2.1). Interessant ist hierbei insbesondere auch die Frage, wie sich Strategien bei der Nutzung eines neuen Assistenzsystems herausbilden, da es in dieser Lernphase möglicherweise zu einer Sicherheitsgefährdung kommen kann.

Von den Nutzungsstrategien muss das in der Literatur häufig verwendete Konstrukt *Verhaltensadaptation* begrifflich abgegrenzt werden (siehe Kap. 2.2.2). Hierunter wird in der Regel die aus der Nutzung beispielsweise eines neuen Fahrerassistenzsystems resultierende Verhaltensänderung in Bezug auf die Fahraufgabe selber verstanden. Untersucht wird in diesem Kontext z. B. wie sich Fahrgeschwindigkeit oder Abstandsverhalten durch ein neues System im Fahrzeug verändern. Die Untersuchung der Verhaltensadaptation ist somit ein wichtiger Aspekt bei der Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme insbesondere im Hinblick auf deren positiven oder negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Auf Verhaltensadaptationen im Kontext der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen wird in Kapitel 2.2.2 eingegangen.

### 2.2.1 Ausbildung von Strategien bei der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems

Es liegen derzeit wenige Untersuchungen zur Ausbildung von Nutzungsstrategien beim Umgang mit Fahrerassistenzsystemen vor. Bereits durchgeführte Studien beschäftigen sich beispielsweise mit der Erlernbarkeit von Menüsystemen (Totzke, Meilinger & Krüger, 2003) und

dem Kompetenzerwerb im Umgang mit Navigationssystemen im Kraftfahrzeug (Jahn et al., 2004).

Da bislang keine empirischen Untersuchungen zu Nutzungsstrategien bei Infrarot-Nachtsichtsystemen veröffentlicht wurden, werden im Folgenden beispielhaft Ergebnisse von Studien zu anderen Fahrerassistenzsystemen dargestellt.

Die Nutzung von visuellen Fahrerassistenzsystemen ist eine komplexe kognitive Aufgabe. Das Erlernen einer solchen Fähigkeit kann durch eine Potenzfunktion beschrieben werden (Anderson 2000). Newell und Rosenbloom (1981) bezeichnen die Funktion der Übung der Gedächtnisleistung als *Potenzgesetz der Übung (Law of Practice)*. Mit fortschreitender Übung verringert sich die Zeit, die für die Aufgabenbearbeitung benötigt wird. Zu Übungsbeginn ist dieser Effekt noch hoch, im Verlauf der Übung verringert er sich jedoch, d. h. der Übungseffekt pro Einheit wird im Laufe des Lernprozesses immer geringer.

Nach dem Potenzgesetz der Übung gilt für die Bearbeitungszeit T einer Aufgabe:

$$T = BN^{-\alpha}$$

N = Anzahl der Wiederholungen

B = Geschwindigkeit der ersten Bearbeitung

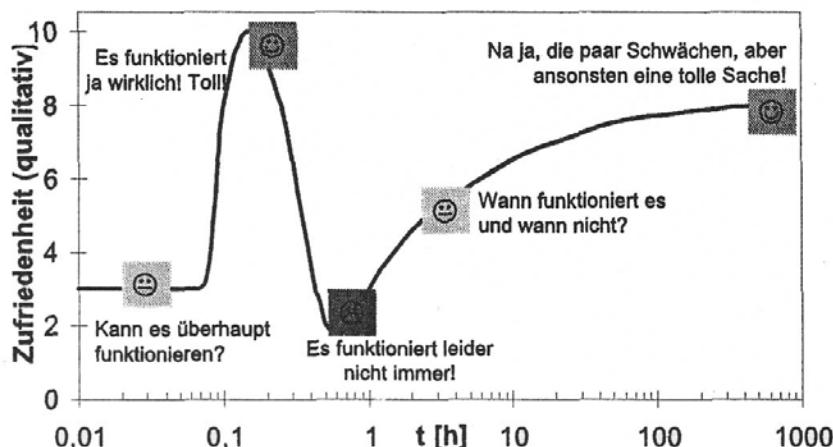
$\alpha$  = Steigung der Funktion

Die bereits oben genannten Studien zur Erlernbarkeit von Menüsystmenen (Totzke et al., 2003) und zum Kompetenzerwerb beim Umgang mit Navigationssystemen (Jahn et al., 2004) beschreiben eine Eignung des Potenzgesetzes der Übung zur Beschreibung von Kompetenzerwerbsverläufen von Fahrerinformationssystem-Funktionen. Ob sich diese Ergebnisse auch auf Infrarot-Nachtsichtsysteme übertragen lassen, wurde noch nicht untersucht.

Dingus, Hulse, Mollenhauer, Fleischman, McGehee & Manakkal (1997) betrachteten in einer Feldstudie die Auswirkungen eines Gewöhnungsprozesses auf den Umgang mit einem Navigations- und Informationssystem. Bei der ersten Versuchsfahrt nutzten die Versuchspersonen erstmalig das System. Bei der zweiten Versuchsfahrt hatten die Probanden bereits durch die erste Fahrt und dadurch, dass sie das System sechs Wochen lang jeden Tag privat nutzen konnten, Erfahrungen gesammelt und sich an den Gebrauch des Navigations- und Informationssystems gewöhnt. Die Nutzungsdauer des Systems in den sechs Wochen lag zwischen 41 min und 28 h. Die zweite Versuchsfahrt zeigte, dass die Probanden sich inzwischen an das System gewöhnt und Nutzungsstrategien für einen effizienteren Umgang entwickelt hatten.

Die erfahrenen Fahrer schauten seltener auf das System und die Blickdauer war signifikant geringer als bei den unerfahrenen Versuchspersonen. Dingus et al. erwähnen zusätzlich, dass die geringere Nutzungshäufigkeit und -dauer auch dadurch bedingt sein könnte, dass das System beim ersten Mal aus Neugierde genutzt wurde. Später, wenn dieser Neuigkeitseffekt abgeklungen ist, kam es dann zu einer geringeren Nutzung. Die Autoren gehen bei den beobachteten Veränderungen von einer Kombination aus beiden Effekten aus.

Winner, Bartheneier, Fecher und Luh (2003) formulierten die in Abb. 2.4 dargestellte subjektive Lernkurve bei der Gewöhnung an ein Fahrerassistenzsystem, das ACC<sup>5</sup> (Adaptive Cruise Control). Probanden zeigen zu Beginn von Versuchsfahrten zuerst eine skeptische Haltung gegenüber der neuen Technik. Diese weicht einer „euphorischen“ Phase, wenn die Versuchspersonen die neuen Funktionalitäten des Systems zum ersten Mal kennen lernen. In einem nächsten Schritt erfahren sie dann die Grenzen und eventuelle Mängel des Systems, so dass die Zufriedenheit sinkt. Dem schließt sich eine Lernphase an, in der die Probanden Feinheiten des Systems erkennen und Nutzungsstrategien ausbilden. In diesem Gewöhnungsprozess steigt die Zufriedenheit wieder an.



**Abb. 2.4: Subjektive Lernkurve bei der Gewöhnung an ein Fahrerassistenzsystem**  
(Winner, Bartheneier, Fecher & Luh, 2003, S. 4)

Eine weitere Studie zu Lerneffekten wurde im Projekt Seneca (Speech control modules for Entertainment, Navigation and communication Equipment in CArS) zur Evaluation eines Spracheingabesystems für Kraftfahrzeuge durchgeführt (Engeln, 2003). Für die Längsschnittbeobachtung fuhren die Probanden viermal mit einem Versuchsfahrzeug. Zwischen den Un-

<sup>5</sup> Beim ACC handelt es sich um einen Abstandsregeltempomat. Mittels eines Sensors wird Position und Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs ermittelt und dann die Geschwindigkeit und der Abstand adaptiv mit Motor- und Bremseingriff geregelt. Eine andere Bezeichnung ist automatische Distanzregelung (ADR).

tersuchungen lag je eine Woche, in denen die Probanden das Fahrzeug zur Nutzung ein bis zwei Tage zur Verfügung hatten. Die Ergebnisse zeigten bei manueller Systembedienung eine klassische Lernkurve mit zunächst stark abnehmendem und dann asymptotisch geringer werdendem Zeitbedarf. Die sprachliche Eingabe zeigte diesen Effekt nicht. Dies lag darin begründet, dass bei der letzten Versuchsfahrt die Spracheingabe durch starken Regen gestört war, wodurch sich der Zeitbedarf für die Aufgabe erhöhte. Problematisch bei der Verallgemeinerung dieser Ergebnisse ist zudem, dass die Studie mit lediglich zwei Probanden durchgeführt wurde, da eine größere Stichprobe aufgrund des Untersuchungsaufwandes nicht möglich war.

Sullivan et al. (2004) formulieren zwei mögliche Nutzungsstrategien, die Fahrer bei der Verwendung eines Infrarot-Nachtsichtsystems aufweisen könnten:

- Der Fahrer schaut in Abhängigkeit von der jeweiligen Situation ins Display, wenn die Sichtweite eingeschränkt ist. Problem bei dieser Strategie ist, dass der Fahrer registrieren muss, wann die Sichtweite eingeschränkt ist oder Gefahrensituationen auftauchen könnten.
- Der Fahrer schaut periodisch und situationsunabhängig ins Display. Diese Strategie würde wahrscheinlich mehr Blicke auf das Display erfordern, aber dazu führen, dass von den gesamten Vorteilen des Systems profitiert werden könnte.

Eine resümierende Betrachtung der Literatur zur Ausbildung von Nutzungsstrategien zeigt, dass bislang keine empirischen Studien zum Prozess der Gewöhnung an ein Infrarot-Nachtsichtsystem vorliegen. Bereits durchgeführte Untersuchungen beschäftigen sich mit dem ACC sowie Navigations-, Informations- und Kommunikationssystemen. Einige Autoren versuchen den Lernprozess der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems quantitativ zu beschreiben und geben bei der manuellen Bedienung von FAS eine klassische Lernkurve an bzw. stellen die Eignung des Potenzgesetzes der Übung zur Beschreibung des Prozesses des Kompetenzverlaufs dar. Andere empirische Studien beschäftigen sich mit der Beschreibung der Ausbildung von Strategien bei der Nutzung von Assistenzsystemen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Nutzungsstrategien erst im Rahmen der Gewöhnung an das neue FAS ausbilden.

## 2.2.2 Verhaltensadaptation

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Definition des Begriffs *Verhaltensadaptation*. Danach werden verschiedene Theorien und Modelle zu dieser Thematik vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über empirische Studien zur Verhaltensadaptation gegeben.

Ein wichtiger Aspekt bei der Evaluation von neuen Systemen für das Fahrzeug ist die Frage, wie ein Fahrer sein Fahrverhalten bei der Nutzung der neuen Technologie ändert bzw. welche Auswirkungen ein FAS auf das Verhalten des Fahrers hat (Parks et al., 1995). In der Verkehrpsychologie wird für diesen Vorgang häufig der Begriff *Adaptation* verwendet. Dabei wird dieser Begriff lediglich auf den Straßenverkehr bezogen und zumeist deskriptiv und nicht im Sinne eines theoretischen Konzeptes oder erklärenden Konstruktes verwendet (Pfafferott & Huguenin, 1991). Die OECD definiert 1990 den Vorgang der Anpassung wie folgt:

„Adaptation ist untendiertes Verhalten, das auftreten kann, wenn im Mensch-Straße-Fahrzeug-System Veränderungen eingeführt werden. Adaptation tritt als Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf Veränderungen im Verkehrssystem auf; dabei werden persönliche Bedürfnisse befriedigt, was zu Wirkungen führen kann, die sich auf einem Kontinuum von positiv bis negativ auf die Sicherheit lokalisieren lassen.“ (Pfafferott & Huguenin, 1991, S. 71f.)

Adaptationsprozesse bei der Einführung neuer Fahrerassistenzsysteme können sich dieser Definition entsprechend sowohl positiv als auch negativ auf die Verkehrssicherheit auswirken. Zur Erklärung dieses Phänomens wurden in der Literatur verschiedene Theorien zur Verhaltensadaptation aufgestellt, von denen einige in den folgenden Kapiteln kurz dargestellt werden.

### Theorie der Risikohomöostase

In seiner Theorie der Risikohomöostase geht Wilde (Wilde & Kunkel, 1984) davon aus, dass Fahrer versuchen, ein Gleichgewicht zwischen der objektiven Unfallrate und jener Unfallrate zu erreichen, die sie auf der Grundlage ihres „Niveaus des tolerierten Risikos“ (Wilde & Kunkel, 1984, S. 54) für akzeptabel halten. Im Hinblick auf Unfallzahlen bedeutet dies, dass Maßnahmen zur Reduktion des objektiven Risikos nicht unweigerlich zu einer erhöhten Sicherheit führen, sondern durch Verhaltensänderung lediglich das bisherige Risikomaß wiederhergestellt wird. Folglich müssen zu einer Reduktion der Unfalldaten neben der Einführung von technischen Verkehrssicherheitsmaßnahmen auch Maßnahmen zur Veränderung der Risikobereitschaft und Risikoeinschätzung durchgeführt werden.

### Zero-risk theory of driver behavior

Nääätänen und Summala (1976) gehen in ihrer Theorie des Risikoverhaltens davon aus, dass Fahrer allgemein Verhaltensweisen meiden, die bei ihnen Furcht auslösen. Menschen wollen durch das Autofahren ihre Mobilitätsmotive durch schnelles und teilweise gefahrvolles Autofahren befriedigen. Eingeschränkt wird die Befriedigung dieser Motive, indem die Fahrer ihre Fahrweise so wählen, dass sie ihres Erachtens dabei kein Unfallrisiko eingehen. Laut des Modells geschehen Unfälle deshalb, weil die Fahrer ihre eigenen Fähigkeiten zu hoch einschätzen und somit von einem zu geringen persönlichen Risiko ausgehen. Außerdem nehmen Personen häufig ihre gefahrene Geschwindigkeit zu gering wahr und unterschätzen die Stärke

der Auswirkung eines potentiellen Unfalls. Die Einführung von Fahrerassistenzsystemen kann nach dieser Theorie also auch zu einer Erhöhung des subjektiven Eindruckes der eigenen Fähigkeiten beim Fahren führen und bei einer falschen Einschätzung und einhergehender Verhaltensadaptation somit auch zu einem höheren Unfallrisiko führen.

### **Modell der subjektiven und objektiven Sicherheit**

Klebelsberg (1982) geht in seinem Modell der subjektiven und objektiven Sicherheit von einer Differenzierung des Sicherheitsbegriffs aus. Dabei stellt er die subjektiv erlebte Sicherheit (Sicherheitsgefühl) physikalisch messbaren Formen der Sicherheit, wie beispielsweise Beschleunigungskräfte und Haftriebung, gegenüber. Grundlage des Modells sind folgende Postulate:

- Sicherheit hängt weder allein von der subjektiven noch von der objektiven Sicherheit ab, sondern von der Beziehung der beiden zueinander.
- Richtiges Fahrverhalten liegt dann vor, wenn die objektive Sicherheit mindestens gleich groß ist wie die subjektive.

Verhaltensadaptation kann nach diesem Modell als eine „Auseinandersetzung zwischen der Kognition des objektiven und dem subjektiven Risiko interpretiert werden“ (Pfafferot & Huguenin, 1991, S. 78). Bei einer Weiterentwicklung des Fahrzeugs ist somit immer auch der Faktor Mensch zu berücksichtigen, da sich sonst der Begriff „das sichere Fahrzeug“ als Fiktion erweisen [wird]“ (Klebelsberg, 1982). Problematisch ist es auch, wenn durch falsche oder ungenügende Darstellung der Wirkungsweise eines neuen Systems die subjektive Sicherheit zu stark erhöht wird und es damit zu einer unangemessenen Verhaltensadaptation kommt.

Allen Modellen gemeinsam ist, dass als zentraler Punkt für eine Verhaltensänderung die Motivation in Zusammenhang mit einem veränderten Risiko beziehungsweise einer veränderten Risikowahrnehmung anzusehen ist. Weller und Schlag (2004) resümieren bei der Betrachtung verschiedener Modelle zur Verhaltensadaptation, dass keine dieser Theorien in der Lage ist, die Verhaltensadaptation an ein neues System ausreichend zu erklären. Insbesondere kann keines dieser Modelle Verhaltensadaptationen prognostizieren, was für die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen im Entwicklungsprozess von großer Bedeutung wäre.

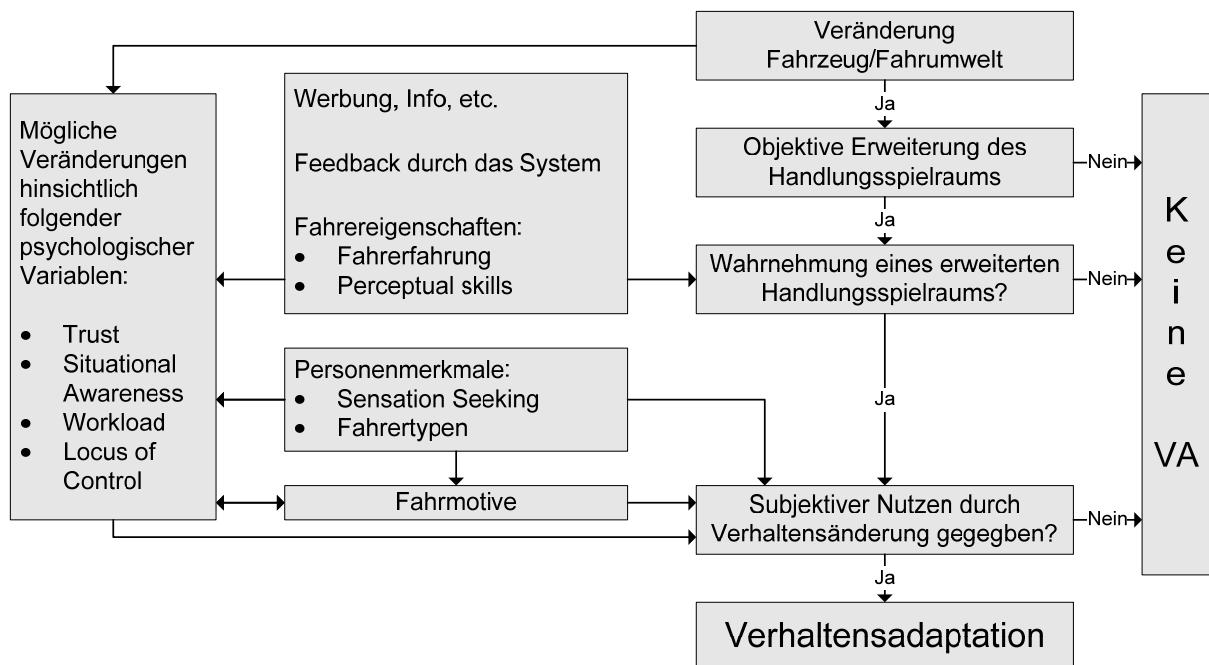
Einige Autoren versuchen aber, Variablen zu beschreiben, die den Prozess der Verhaltensadaptationen beeinflussen. Beispielsweise formulieren Stanton und Young (1998) sieben psychologische Parameter, die einen Einfluss auf die Vorhersage von Adaptionen und die Bewertung von neuen Systemen haben:

- *Locus of Control*: Ist der Fahrer der Meinung, dass er weiterhin die Kontrolle hat oder dass das Fahrzeug teilweise die Kontrolle übernimmt?
- *Trust*: Vertraut der Fahrer dem System und entspricht dieses Vertrauen den realen System-eigenschaften?
- *Situational Awareness*: In welchem Ausmaß verfügt der Fahrer über Situationsbewusstsein, weiß der Fahrer beispielsweise, wann er in einer bestimmten Situation eingreifen muss?
- *Mentale Repräsentationen*: Stimmen die Vorstellungen des Fahrers über die Eigenschaften des Systems mit den realen Eigenschaften überein?
- *Workload*: Wie hoch ist das Ausmaß der Beanspruchung durch das System?
- *Feedback*: Informiert das System den Fahrer über seine Aktionen und wie wird diese Rückmeldung gegeben?
- *Stress*: Unterforderung führt zu einer schlechteren Fahrperformance als Überforderung. Erreicht der Fahrer den optimalen Stresslevel beim Fahren?

Außerdem haben folgende Größen einen Einfluss auf den Prozess der Verhaltensadaptation an eine neue Technik (Weller & Schlag, 2004):

- *Soziale und verkehrsdemographische Merkmale*, beispielsweise Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung
- *Persönlichkeitsmerkmale* wie beispielsweise *Sensation Seeking*
- *Situative Gegebenheiten* wie Zeitdruck und Müdigkeit

Weller und Schlag (2004) formulierten basierend auf bisherigen Forschungsergebnissen ein zusammenfassendes Prozessmodell der Verhaltensadaptation (Abb. 2.5).



**Abb. 2.5:** Prozessmodell der Verhaltensadaptation (Weller & Schlag, 2004, S. 357)  
 VA = Verhaltensadaptation

Dieses Modell berücksichtigt den Einfluss verschiedener Variablen auf eine mögliche Verhaltensadaptation. Ausgangspunkt ist eine Veränderung am Fahrzeug, wodurch es zu einer objektiven Erweiterung des Handlungsspielraums kommt. Das Modell zeigt, dass es für eine Adaptation des Fahrverhaltens bei der Verwendung eines neuen Fahrerassistenzsystems neben dieser objektiven Erweiterung des Handlungsspielraums auch zu einer Wahrnehmung desselben sowie eines nutzungsbedingten Benefits durch den Fahrer kommen muss. Ob es zu dieser Wahrnehmung kommt, hängt von unterschiedlichen Parametern, wie beispielsweise Fahrereigenschaften und dem Fahrer bereitgestellte Informationen über die Veränderungen, ab. In welchem Ausmaß der Fahrer einen subjektiven Nutzen in der Verhaltensadaptation sieht, wird von Personenmerkmalen des Fahrers, von der Fahrmotivation und von der psychologischen Systemwirkung (z. B. Veränderung des Vertrauens in das System) beeinflusst.

Es wurden bereits einige Untersuchungen zur Verhaltensadaptation bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen durchgeführt. Ein sehr häufig untersuchtes System (z. B. Hoedemaeker & Brookhuis, 1998; Hogema, van Arem, Smulders & Coëmet, 1997) ist das ACC (Adaptive Cruise Control), da dieses bereits seit einigen Jahren im Handel erhältlich ist. Im Folgenden werden beispielhaft einige Studien zur Verhaltensadaptation dargestellt:

Hoedemaeker und Brookhuis (1998) gingen der Frage nach, wie sich das Fahrverhalten durch das Vorhandensein eines ACC-Systems verändert. Zur Klärung dieser Frage führten sie eine Simulatorstudie mit 38 Versuchspersonen durch. Die Ergebnisse zeigten, dass die mittlere Fahrgeschwindigkeit ohne ACC 107 km/h betrug, während die Fahrer mit dem System im

Mittel 115 km/h fuhren. Auch bei Fahrern, die normalerweise bereits eher schnell fahren, nahm die Geschwindigkeit mit ACC nochmals zu. Eine weitere Auswirkung der Nutzung des ACC-Systems zeigte sich in der Zeitspanne, die die Fahrer auf der linken Fahrspur verweilten. Fahrer mit ACC benutzen einen höheren Prozentsatz der Fahrzeit die linke Fahrspur als Fahrer ohne ACC und zeigten eine höhere Standardabweichung der lateralen Position auf dem rechten Fahrstreifen. Außerdem waren beim Fahren mit ACC im Falle einer Notbremsung eine höhere maximale Bremsung und ein geringerer Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu beobachten.

In einer Feldstudie von Sagberg, Fosser und Saetermo (1997) mit 213 Taxis zeigte sich, dass Fahrer mit ABS kürzere zeitliche Abstände zum Vordermann hielten als Fahrer ohne ABS. Es wurden keine Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit gefunden. Die Autoren bemerken aber, dass aufgrund des starken Verkehrs während des Untersuchungszeitraums die Fahrer vielleicht gar nicht die Möglichkeit hatten, so schnell zu fahren, wie sie gerne gewollt hätten.

Nilsson und Alm (1996) untersuchten im Rahmen einer Simulatorstudie die Auswirkungen eines Vision Enhancement Systems (VES) auf das Fahrverhalten bei Nebel. Dabei betrachteten sie die Parameter *Geschwindigkeit*, *Spurhaltung*, *Reaktionszeit* und *Abstand*. Außerdem wurde die Beanspruchung beim Fahren bei klarer Sicht und bei Nebel verglichen. 24 Versuchspersonen fuhren bei unterschiedlichen Sichtbedingungen: (1) Gute Sichtbedingungen (480 m), (2) Nebel mit einer Sichtweite von 50 m und (3) Nebel mit einer Sichtweite von 50 m und Unterstützung eines VES. In der dritten Bedingung wurde den Probanden ein Schwarz-weißbild der Fahrszenerie auf einem Display präsentiert, auf dem dieselben Sichtbedingungen wie unter den Versuchsbedingungen (1) simuliert wurden. Bei der Studie wurden Veränderungen im Fahrverhalten durch den Computer des Simulators erfasst. Darüber hinaus wurde die subjektive Beanspruchung durch den NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration-Task Load IndeX) erhoben. Die Ergebnisse zeigten folgende Änderungen des Fahrverhaltens:

- Die Fahrgeschwindigkeit lag beim Fahren mit dem Vision Enhancement System zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit bei der Versuchsbedingung *Fahren bei klarer Sicht* und der Versuchsbedingung *Fahren bei Nebel ohne Vision Enhancement System*.
- Beim Fahren mit dem System gab es die größten Variationen in der lateralen Fahrposition.
- Die Probanden waren beim Fahren mit Unterstützung in der Lage, schneller zu reagieren als bei der Nebelfahrt ohne Hilfe.
- Eine Verlängerung der Reaktionszeit beim Fahren mit dem System im Vergleich zum Fahren bei klarer Sicht wurde nicht beobachtet.
- Der Grad der Beanspruchung erhöhte sich durch die Nutzung des Systems nicht.

Kritisch muss zu dieser Studie angemerkt werden, dass es mit einem realen aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem nicht möglich ist, bei Nebel mehr zu sehen als durch die Windschutzscheibe, da durch den Nebel eine Blendung auftritt, die einer Nebelfahrt mit Fernlicht entspricht. Eine bessere Sicht bei Nebel durch ein Infrarot-Nachtsichtsystem ist sicherlich auch nicht wünschenswert, da ein hohes Gefahrenpotential zu befürchten wäre, wenn im Straßenverkehr bei sehr schlechten Sichtbedingungen ein Verkehrsteilnehmer mit einem Fahrerassistenzsystem sehr viel besser sehen könnte als Fahrer ohne System. Dies würde die Gefahr bergen, dass die Person mit der besseren Sicht zu schnell für die anderen Verkehrsteilnehmer fahren würde.

Eine häufig geäußerte Befürchtung bei der Diskussion über Nachtsichtsysteme ist die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit als Resultat der erhöhten Sichtweite. Hollnagel und Källhammar (2002) beobachteten in ihrer Simulatorstudie keine höhere Fahrgeschwindigkeit bei der Nutzung dieses Fahrerassistenzsystems.

Färber und Färber (2004) führten eine Feldstudie mit 36 Probanden zu Auswirkungen verschiedener Informationsmanagement-Systeme auf das Verhalten und die Verkehrssicherheit durch. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Entlastung durch Unterstützungsmanagement oder Unterstützungssysteme wie ACC zu einer Verhaltensadaptation führt. Von den Fahrern wird ein konstantes Beanspruchungsniveau hergestellt und sie nutzen die Entlastung, die durch Informationsmanagement- und Unterstützungssysteme geboten wird, für eine Veränderung ihres Verhaltens. Beispielsweise führt die Entlastung durch Informationsmanager teilweise zu höheren Fahrgeschwindigkeiten auf Autobahnen. Aber Verstöße gegen Verkehrsregeln nehmen durch Verwendung eines Informationsmanagers ab, so dass trotzdem von einem Sicherheitsgewinn ausgegangen werden kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zur Beschreibung der Verhaltensadaptation bei der Nutzung neuer Technologien verschiedene Theorien und Modelle existieren. Dabei haben unterschiedliche Parameter, wie beispielsweise Persönlichkeitsmerkmale, einen Einfluss auf das Ausmaß der durch die Nutzung resultierenden Adaptation. Die zitierten empirischen Studien zeigen, dass die durch die Einführung von neuen Assistenzsystemen einsetzenden Adaptationsprozesse sowohl zu positiven als auch zu negativen Auswirkungen auf das Fahrverhalten und damit auch auf die Verkehrssicherheit führen können.

### 2.2.3 Fazit

Es gibt bislang wenige Untersuchungen zur Ausbildung von Nutzungsstrategien bei Fahrerassistenzsystemen. Insbesondere fehlen Studien, die die Veränderung von Nutzungsstrategien im Rahmen eines Gewöhnungsprozesses an ein neues System über mehrere Fahrten untersuchen.

Empirische Studien beispielsweise zum Umgang mit Navigationssystemen zeigen eine Eignung des Potenzgesetzes der Übung zur Beschreibung des Kompetenzerwerbs beim Umgang mit Fahrerassistenzsystemen.

Im Verlauf des Gewöhnungsprozesses an ein FAS entwickelt sich eine effizientere Nutzung eines Informationssystems: Die Blickhäufigkeit und die Blickdauer zur Informationsaufnahme werden geringer.

Es existieren noch keine Studien, die sich mit einer Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Nutzung von Infrarot-Nachtsichtsystemen beschäftigen. Hier besteht Forschungsbedarf.

Die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems kann Auswirkungen auf das Verhalten des Fahrers haben. Diese Verhaltensadaptation kann positive oder negative Konsequenzen für die Verkehrssicherheit haben. Die wenigen Studien mit Nachtsichtsystemen zu diesem Thema befassen sich beispielsweise mit dem Einfluss der Systemnutzung auf die Fahrgeschwindigkeit. Da es sich bei diesen Studien um Simulatorstudien handelt, ist eine Übertragbarkeit auf das Fahren im realen Straßenverkehr ungeklärt. Es besteht somit die Notwendigkeit der Durchführung von Feldstudien zur Auswirkung der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems auf das Fahrverhalten.

## 2.3 Beanspruchung

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Definition der Begriffe *Beanspruchung* (Kap. 2.3.1) und *Komfort* (Kap. 2.3.2). Danach werden in Kapitel 2.3.3 zwei Modelle zum Einfluss der Beanspruchung auf das Fahrverhalten vorgestellt. Das Kapitel 2.3.4 stellt die Rolle der visuellen Beanspruchung beim Fahren eines Kfz dar. Für dieses für die Bewertung von Fahrerassistenzsystemen wichtige Konstrukt liegen bisher nur wenige Forschungsergebnisse bei Infrarot-Nachtsichtsystemen vor. Daher werden auch in diesem Kapitel zunächst Erkenntnisse, die aus empirischen Studien mit anderen FAS gewonnen wurden, herangezogen. Studien zur Beanspruchung durch Infrarot-Nachtsichtsysteme werden in Kapitel 2.3.5 beschrieben.

Wie bereits in der Einleitung des zweiten Kapitels dargestellt, ist die Frage der Veränderung der Beanspruchung durch die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems eine wichtige Forschungsfrage bei der Evaluation dieses Systems. Ein Argument für die Einführung von FAS ist der durch eine Reduzierung der Beanspruchung resultierende Komfortgewinn. Außerdem wird davon ausgegangen, dass durch eine geringere Beanspruchung Unfälle vermieden werden können.

Jedoch kann die Einführung eines neuen Fahrerassistenzsystems aufgrund der Darbietung zusätzlicher Informationen durch das System auch zu einer Erhöhung der mentalen Beanspruchung des Fahrers führen. Somit würde ein solches System nicht zu der intendierten Beanspruchungsreduktion, sondern sogar zu einem Anstieg der Beanspruchung führen. Daraus würde ein erhöhtes Sicherheitsrisiko resultieren. Dies muss bei der Entwicklung eines neuen Fahrerassistenzsystems vermieden werden. Daher ist es wichtig, bei der Evaluation die Beanspruchung zu erfassen.

### 2.3.1 Allgemeine Definition von Beanspruchung

Grundsätzlich wird nach dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept begrifflich zwischen *Belastung* und *Beanspruchung* unterschieden. Dabei wird als *Belastung* der Reiz, der aus der Umwelt auf eine Person einwirkt und als *Beanspruchung* die Reaktion der Person darauf verstanden (Richter & Hacker, 1998; Rohmert, 1984). Die DIN EN ISO 10075-11 standardisiert die Begriffe *Psychische Belastung* und *Psychische Beanspruchung* folgendermaßen:

#### *Psychische Belastung (stress)*

Die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken.

#### *Psychische Beanspruchung (strain)*

Die zeitlich unmittelbare und nicht langfristige Auswirkung der psychischen Belastung auf die Einzelperson in Abhängigkeit von ihren eigenen habituellen und augenblicklichen Voraussetzungen einschließlich der individuellen Auseinandersetungsstrategien. Belastungen sind unabhängig vom Individuum und objektiv und direkt messbar. Beanspruchung dagegen hängt vom Individuum ab.

Wichtig zu beachten ist, dass somit Beanspruchung nicht nur aufgaben- sondern auch individuumspezifisch ist (Pauzié & Pachiaudi, 1997). Auch die jeweiligen situativen Bedingungen spielen eine Rolle:

„[...] workload is not an inherent property, but rather it emerges from the interaction between the requirements of a task, the circumstances under which it is performed, and the skills, behaviors, and perceptions of the operator.“ (Hart & Staveland, 1988, S. 140)

Im Bereich der Verkehrspychologie spielt die *mentale Beanspruchung* eine zentrale Rolle. Unter *mental* versteht man Beanspruchungen,

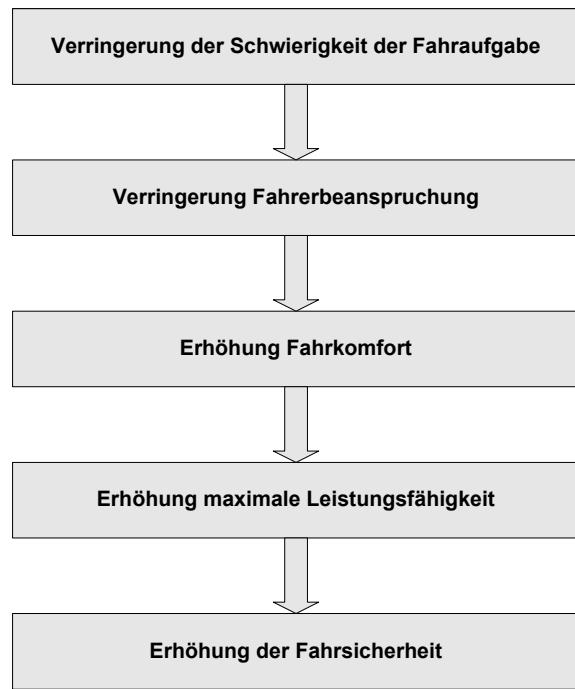
„die mit der Aktivierung verschiedenster Leistungsfunktionen des menschlichen Informationsverarbeitungssystems zusammenhängen und die die Grundlage für das subjektive Gefühl des Angestrengtseins bei der Bewältigung primär geistiger Leistungsanforderungen [...] liefern.“ (Manzey, 1998, S. 799)

Inhaltlich wird die mentale Beanspruchung von der physischen und der emotionalen Beanspruchung abgegrenzt. Gemeinsam ergeben die drei Faktoren die Gesamtbeanspruchung. Es besteht insbesondere bei der Differenzierung der mentalen von der emotionalen Beanspruchung eine Schwierigkeit, die dadurch gelöst wird, dass als mentale Beanspruchung nur der Teil der Gesamtbeanspruchung bezeichnet wird, der von einer aufgabenspezifischen Anforderung und somit von der Schwierigkeit einer Aufgabe bestimmt wird (Manzey, 1998).

Beim Führen eines Kraftfahrzeugs und bei der Betrachtung von zusätzlichen Beanspruchungen durch die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems muss in der Hauptsache die mentale Beanspruchung betrachtet werden. Physische Beanspruchungen, beispielsweise durch das Lenken, die Bedienung des Fahrerassistenzsystems etc., spielen eine untergeordnete Rolle.

### 2.3.2 Der Komfortbegriff

Fahrerassistenzsysteme sollen die Beanspruchung des Fahrers mit dem Ziel einer Komfortsteigerung und einer Sicherheitserhöhung vermindern. Vor diesem Hintergrund wird bei einer psychologischen Definition des Fahrens als Arbeitshandlung, die energetische Kosten verursacht, von der in Abbildung 2.6 dargestellten Argumentationskette ausgegangen (Hargutt & Krüger, 2001):



**Abb. 2.6:** Argumentationskette *Verringerung der Fahrerbeanspruchung*

Es ist aber davon auszugehen, dass mit der zusätzlichen Informationsaufnahme zumindest in der Gewöhnungsphase an das System eine zusätzliche mentale Beanspruchung des Fahrers entsteht (Parks et al., 1995). Dies könnte zu einem geringeren Komfortempfinden oder sogar zu einer Gefährdung führen.<sup>6</sup>

Einer Messung von Komfort muss zuerst eine Definition des Komfortbegriffs vorangehen. Grundsätzlich müssen hierbei die Konstrukte *Komfort* und *Diskomfort* betrachtet werden: In früheren wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurde unter Komfort und Diskomfort eine gegensätzliche Ausprägung auf derselben Skala verstanden. Diese Skala erstreckte sich von extremem Komfort über einen neutralen Status bis zu extremem Diskomfort.

Andere Autoren definieren Komfort als die Abwesenheit von Diskomfort (Hertzberg, 1972; zitiert nach Zhang, 1996, S. 377). Komfort ist damit ein neutrales Gefühl mit zwei diskreten Ausprägungen: Anwesenheit von Komfort oder Abwesenheit von Komfort (= Diskomfort).

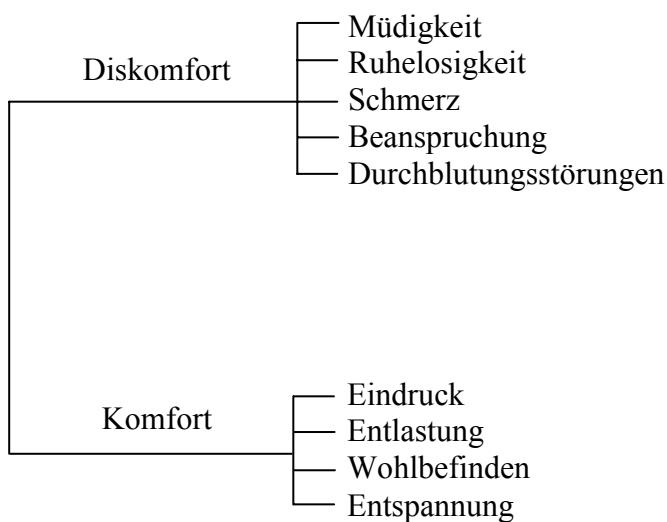
---

<sup>6</sup> Eine weitere Gefahr auf die an dieser Stelle nicht eingegangen wird, ist das Problem der Unterforderung des Fahrers durch eine Verringerung der Aufgabenschwierigkeit. Infolge der Monotonie kann es zu Vigilanzproblemen kommen. Folgen könnten Sicherheitsprobleme durch verminderte Aufmerksamkeit durch Müdigkeit oder eine Risikokompensation sein (siehe Kap. 2.2.2).

Neuere Studien verstehen unter *Komfort* ein multidimensionales Konstrukt und nicht das Gegenteil von *Diskomfort*. Beispielsweise definiert Slater (1985) *Komfort* als

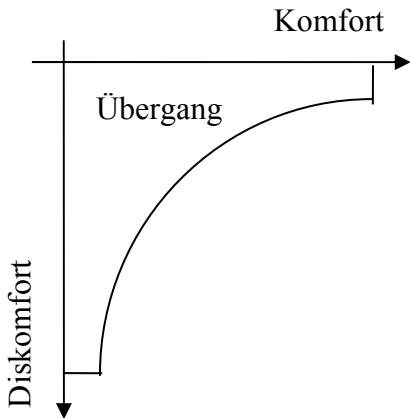
*„a pleasant state of physiological, psychological and physical harmony between a human being and the environment.“* (Slater, 1985, S. 4)

Eine Weiterentwicklung des Komfortbegriffs wurde durch Zhang, Helander und Drury (1996) geleistet. Die Autoren zeigen anhand einer empirischen Untersuchung, dass Komfort und Diskomfort nicht auf der Achse eines Kontinuums angeordnet sind. Nach ihrer Clusteranalyse von Begrifflichkeiten ist Komfort mit dem Aspekt des Gefallens, Diskomfort mit dem Aspekt des Erleidens verbunden (Abb. 2.7).



**Abb. 2.7: Vereinfachte Struktur der Cluster-Analyse (Zhang, Helander und Drury, 1996)**

Auf der Grundlage dieser Cluster-Analyse formulierte Zhang et al. (1996) ein Komfort-Diskomfort-Modell (Abb. 2.8). Nach diesem Modell ist es möglich, Komfort und Diskomfort zur gleichen Zeit zu erfahren. Ein Transfer von Diskomfort zu Komfort ist im Übergang der beiden Achsen möglich. Durch eine Reduktion von Diskomfort kann Komfort erst wahrgenommen werden. Während gute biomechanische Eigenschaften nicht zu einer Erhöhung des Komfortgrads führen, würde eine schlechte Biomechanik Komfort zu Diskomfort umwandeln. Es wird also davon ausgegangen, dass hohe Komfortwerte nur bei geringem Diskomfort erreicht werden können (Helander, 2003).



**Abb. 2.8: Komfort-Diskomfort-Modell (Zhang, Helander und Drury, 1996)**

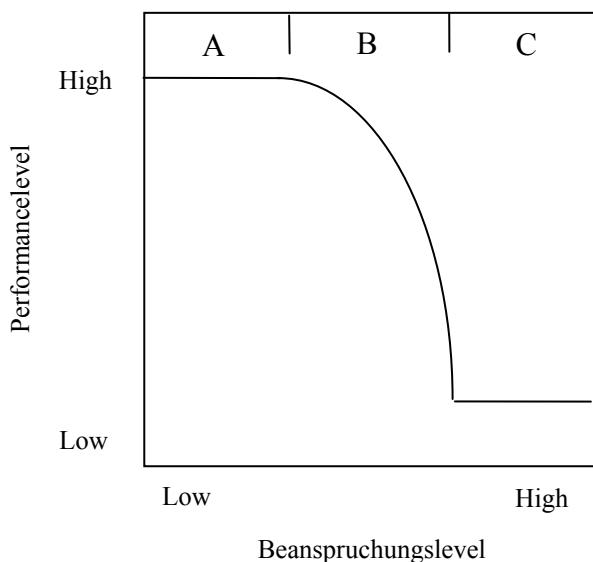
Bubb (2003a) gibt als Beispiel für das gleichzeitige Vorhandensein von Komfort und Diskomfort das Fahren eines Sportwagens an: Objektiv herrscht im Vergleich zu einer Limousine bedingt durch beispielsweise harte Sitze, Schwingungen und Lärm hoher Diskomfort. Subjektiv empfindet der Fahrer, resultierend aus dem „Image“ des Fahrzeuges aber Gefallen am Fahren des Sportwagens, wodurch ein hohes Komfortniveau erreicht wird. Somit treten Komfort und Diskomfort zur gleichen Zeit auf. Der Begriff *Diskomfort* beschreibt damit Faktoren der Ermüdung und Biomechanik, der Begriff *Komfort* Wohlbefinden und Ästhetik (Helander & Zhang, 1997).

Bei der Wahl einer Erhebungsmethode muss beachtet werden, dass Komfort und Diskomfort mit unterschiedlichen empirischen Forschungsmethoden erfasst werden: Komfort ist ein subjektives Konstrukt und kann somit durch eine Befragung ermittelt werden. Diskomfort dagegen ist objektiv, beispielsweise durch die Messung physiologischer Parameter, erfassbar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese objektiv gemessenen Werte nicht mit dem Gefallen eines Probanden übereinstimmen müssen (Bubb, 2002).

### 2.3.3 Modelle zum Einfluss der Beanspruchung auf das Fahrverhalten

Es stellt sich die Frage, wie sich eine Beanspruchung auf das Fahrverhalten des Fahrers auswirkt. Ein Modell von O’Donell und Eggemeier (1986) geht davon aus, dass die von einer Beanspruchung bewirkte Veränderung des Fahrverhaltens von dem Grad der Beanspruchung abhängt. Die Autoren formulieren drei unterschiedliche Kategorien des Beanspruchungslevels (Abb. 2.9):

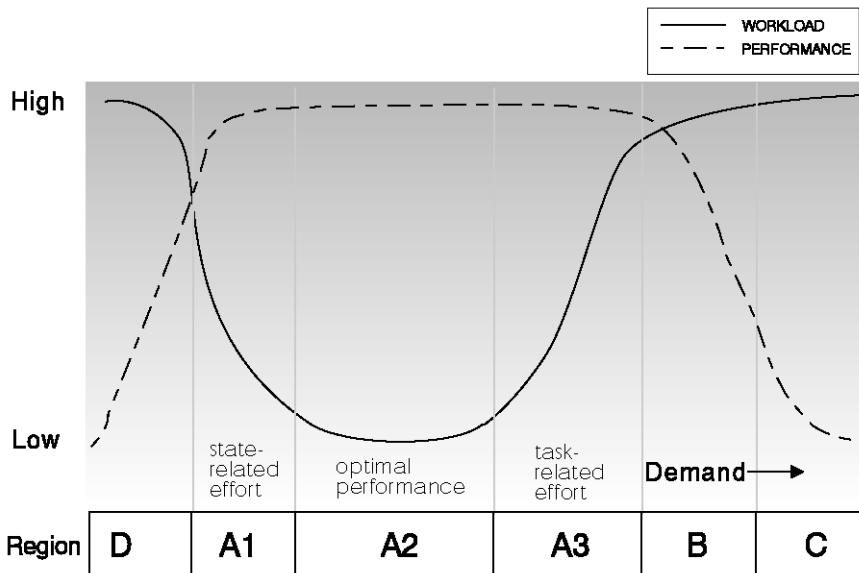
- *Region A (Geringer Beanspruchungslevel)*: Der Fahrer hat noch ausreichende Ressourcen, um einen Anstieg der Beanspruchung zu kompensieren, so dass es noch zu keiner Verschlechterung des Fahrverhaltens kommt.
- *Region B (Höherer Beanspruchungslevel)*: Eine Erhöhung der Beanspruchung übersteigt die Ressourcen des Fahrers, es kommt zu einer Verschlechterung der Performance.
- *Region C (Sehr hohe Beanspruchung)*: Der Fahrer ist nicht mehr in der Lage, die Beanspruchung zu kompensieren und es kommt zu einer starken Verschlechterung des Fahrverhaltens.



**Abb. 2.9: Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Fahrperformance (O'Donell & Eggemeier, 1986)**

Nach diesem Modell kann der Fahrer also problemlos in einem gewissen Rahmen die Beanspruchung kompensieren, die durch die zusätzliche Informationsdarbietung eines neuen Fahrerassistenzsystems entsteht. Erst wenn die Beanspruchung zu hoch wird, hat dies negative Auswirkungen auf das Fahrverhalten und damit auch auf die Sicherheit (O'Donell und Eggemeier, 1986).

De Waard (1996) formuliert in seinem Modell des Zusammenhangs zwischen Beanspruchung und Performance sechs verschiedene Regionen (Abb. 2.10).



**Abb. 2.10: Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Performance (De Waard, 1996)**

Die Anforderungen an eine Person steigen von der Region D bis zur Region C. In der Region D ist trotz der geringsten Anforderung die subjektiv empfundene Beanspruchung hoch und somit die Leistung gering. Dies ist beispielsweise bei monotonen Aufgaben der Fall. Bei erhöhter Anforderung sinkt die Beanspruchung und die Performance steigt, ist aber immer noch vermindert (A1). In der Region A 2 entspricht die Leistung den Anforderungen optimal und die Beanspruchung ist am geringsten. Steigt dann die Anforderung weiter an, ist die Person zuerst noch in der Lage, dies zu kompensieren. Die Leistung bleibt auf gleichem Niveau und die Beanspruchung steigt (A3). Kommt es nun zu noch höheren Anforderungen, resultiert daraus ein weiterer Anstieg der Beanspruchung. Diese kann nicht mehr ausgeglichen werden und es kommt zu einer geringeren Performance (B). In der sechsten Region (C) ist die Person überfordert und die Leistung am schlechtesten.

### 2.3.4 Visuelle Beanspruchung beim Fahren eines Kfz

Das Fahren eines Kfz ist eine komplexe Aufgabe, die mentale Ressourcen des Fahrers beansprucht. Nach einer Lernphase sind aber viele Fahrtätigkeiten automatisch auszuführen, so dass der Fahrer freie Ressourcen hat, die für andere Dinge, wie beispielsweise Nahrungsaufnahme, Telefongespräche, Gespräche mit anderen Fahrzeuginsassen, verwendet werden können (Rößger, 2005). Durch diese Tätigkeiten werden Ressourcen gebunden, die bei Bedarf für die Fahraufgabe nicht zur Verfügung stehen. Dies wird als *Fahrerablenkung* bezeichnet. In der Literatur werden verschiedene Fahrerablenkungsarten differenziert (Rößger, 2005):

- Visuelle Ablenkung (z. B. durch den Blick auf ein Navigationssystem)
- Akustische Ablenkung (z. B. Telefongespräche)
- Physische (manuelle) Ablenkung (z. B. Einstellen eines Radiosenders)
- Kognitive Ablenkung (durch kognitive Aufgaben, die nicht zur Fahraufgabe gehören)

Vollrath und Totzke (2000) untersuchten im Fahrimulator den Einfluss von verschiedenen Ablenkungsarten auf das Fahrverhalten. Den Probanden wurden drei verschiedene Kommunikationsaufgaben gestellt: Eine überwiegend manuelle Aufgabe, eine überwiegend visuelle Aufgabe sowie eine überwiegend akustische Aufgabe. Die Ergebnisse zeigten, dass bei der manuellen Aufgabe sich die longitudinale und die laterale Kontrolle des Fahrzeugs sowohl auf geraden als auch auf kurvigen Straßen verschlechterten. Die visuelle Aufgabenbearbeitung hatte dagegen lediglich Einfluss beim Fahrverhalten auf kurviger Strecke. Aber auch hier verschlechterten sich die longitudinale und die laterale Fahrzeugführung. Bei der akustischen Informationsverarbeitung war dies nicht zu beobachten. Es zeigte sich nur eine Erhöhung der Geschwindigkeitsschwankungen. Somit sollten Informationen im Fahrzeug, wenn möglich, akustisch dargeboten werden, da dies das Fahrverhalten am wenigsten negativ beeinflusst.

Synonym zum Begriff *Fahrerablenkung* wird in der Literatur häufig der Begriff *Fahrerbeanspruchung* verwendet. Gelau (2004) problematisiert, dass es in der Literatur noch keine verwendbare Definition des Begriffs *Fahrerablenkung* gibt. Er schlägt vor, zur Beschreibung der Auswirkung von Informations- und Kommunikationstechnologien auf den Fahrer, das Belastungs- und Beanspruchungskonzept aus der Ergonomie heranzuziehen:

„Wenn [...] der Begriff *Fahrerablenkung* verwendet wird, sind damit *durch Eigenschaften der Person vermittelte Wirkungen von Belastungen* – also Beanspruchungen – gemeint, die aus den Anforderungen der Aufgaben entstehen, die dem Fahrer neben der reinen Fahrtätigkeit im Fahrzeug gestellt werden oder die er sich selbst stellt.“ (Gelau, 2004, S. 299)

Diese Definition wird auch in dieser Arbeit verwendet.

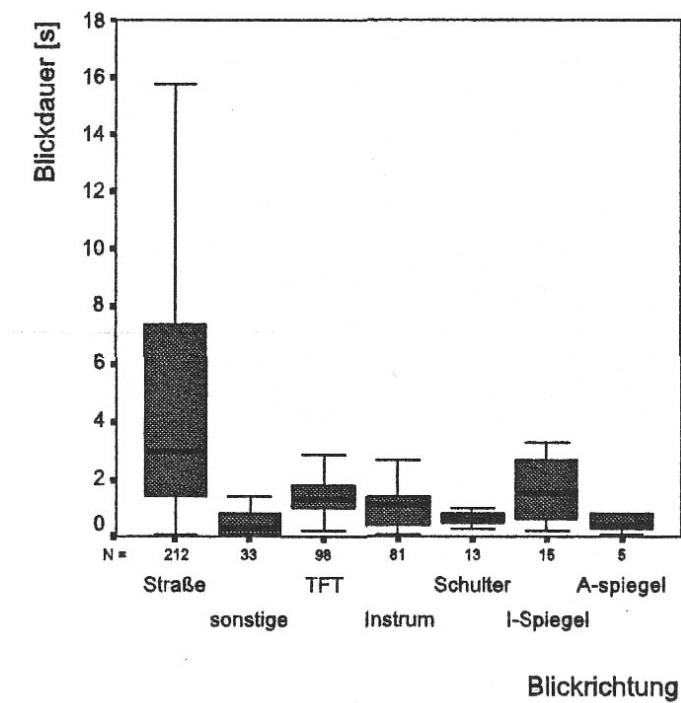
Die Beanspruchungsart, welche die größte Relevanz bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems hat, ist die visuelle Beanspruchung. Daher soll diese Beanspruchung hier näher betrachtet werden. Die Ressourcen, die durch eine visuelle Beanspruchung gebunden werden, konkurrieren direkt mit den für die Ausführung der primären Fahraufgabe notwendigen Ressourcen:

„Driving consists of a set of task and activities [...] the driver must often choose between attending to the roadway cues needed for vehicle control and other information sources competing for visual attention [...].“ (Green, 1993, S. 5)

Wierwille und Tijerina (1997, 1998) gehen davon aus, dass die Dauer und die Häufigkeit visueller Aufmerksamkeit bezüglich der Nutzung von Geräten im Fahrzeuginneren, wie beispielsweise Tachometer, Spiegel und Radio, direkt sicherheitsrelevant sind. Mit Hilfe der Analyse von Unfalldaten belegten sie einen direkten Zusammenhang zwischen den Blickzuwendungen zur Betätigung von Systemen im Fahrzeug und der Unfallwahrscheinlichkeit.

Auch Bertholomäi, Becker, Schneider und Walter (1990) betonen die große Bedeutung der Blickdauer und der Blickhäufigkeit auf ein Instrument im Fahrzeug, da es durch die Blickzuwendung zu einer Reduzierung der Aufmerksamkeit für die Straße kommt. Eine 0,1 s längere Blickdauer führt bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h im Notfall zu einer Anhaltewegverlängerung von sechs Metern. Fahrer schauen durchschnittlich fünf- bis sechsmal in der Minute auf den Tachometer. Die Blickhäufigkeit ist abhängig von der jeweiligen Verkehrssituation: Beispielsweise kommt es bei Autobahnausfahrten zu bis zu 30 Blickzuwendungen pro Minute.

Landau, Abendroth, Meyer und Ackert (2003) untersuchten die Blicke von Fahrern während einer 50-minütigen Autofahrt. Sie unterteilten die Blicke in die Kategorien Blicke auf die Straße, auf den TFT-Monitor, auf das Instrumentenpanel, Schulterblick und Blicke in den Innen- sowie den Außenspiegel. Andere Blickziele wurden in der Kategorie „Sonstige“ summiert. Dabei zeigte sich die in Abbildung 2.11 dargestellte durchschnittliche Blickdauer für die verschiedenen Blickrichtungen während der Autofahrt.



**Abb. 2.11: Statistische Verteilung der Blickdauer eines Fahrers auf verschiedene Objekte während einer 50-minütigen Autofahrt (Landau, Abendroth, Meyer & Ackert 2003, S. 50)**

TFT = TFT(Thin-Film Transistor)-Monitor, Instrum = Instrumentenpanel,  
I-Spiegel = Innenspiegel, A-Spiegel = Außenspiegel

### 2.3.4.1 Visuelle Beanspruchung als Unfallursache

Interessant für das Thema der vorliegenden Arbeit sind Statistiken, die aufzeigen, inwieweit eine visuelle Ablenkung im Fahrzeug Ursache für einen Unfall ist, da es sich bei dem betrachteten Infrarot-Nachtsichtsystem um ein visuell arbeitendes FAS handelt. Beispielsweise geht Verwey (1993) davon aus, dass Unaufmerksamkeit bei 30-50 % aller Unfälle eine Ursache ist. Mit dieser Problematik beschäftigen sich auch Wierwille und Tijerina (1995) in ihrer Betrachtung von Unfalldaten, bei der sie Unfallberichte analysierten. Relevant waren für sie Unfälle, bei denen erstens der Blick des Fahrers vom Verkehrsgeschehen abgelenkt war und zweitens die visuelle Beanspruchung die Hauptursache für den Unfall war. Dabei wurden bei 189.464 Berichten 2.816 relevante Einträge gefunden, davon war in 1.562 Fällen eine visuelle Aufmerksamkeit auf Objekte innerhalb des Kraftfahrzeugs Unfallursache. Die Tabelle 2.3 stellt dar, auf welche Gegebenheiten sich diese Unfälle verteilten.

**Tab. 2.3: Unfalldatenanalyse – Unfallursache in der Kategorie *Ursache innerhalb des Fahrzeugs* (Wierwille & Tijerina, 1995)**

Unfallursache	Anzahl
Objekte im Fahrzeug (z. B. Rauchen, Insekt, Trinken)	549
Interaktion mit einer anderen Person oder einem Tier im Fahrzeug	210
Armaturenbrett, Lenkrad, Bedieninstrumente	203
Sichtbehinderung	172
Spiegelbenutzung	101
Lesen im Fahrzeug	40
Sitz/Sicherheitsgurt	23
Türen/Seitenfenster	10
Einstellen der Sonnenblende	5
Unspezifische Unfallursache	249

Die Kategorie *Armaturenbrett, Lenkrad und Bedieninstrumente* wurde nochmals genauer betrachtet (Tab. 2.4).

**Tab. 2.4: Unfalldatenanalyse – Unfallursache durch Ablenkung in den Kategorien *Armaturenbrett, Lenkrad und Bedieninstrumente* (Wierwille & Tijerina, 1995)**

Unfallursache	Anzahl
Standard Radio	104
Instrumentierung	25
Schalthebel	17
HVAC (Heizung, Lüftung, Klimaanlage)	15
Scheibenwischer, Scheibenwaschanlage	12
Telefon	11
Two-way Radio (Radio mit CB-Funk)	8
Pedalerie und Fußboden	7
Verschiedene bzw. nicht näher gekennzeichnete Ursachen	4

Die Analyse der Unfallzahlen ergab, dass visuelle Beanspruchung durch die Bedienung verschiedener Systeme im Fahrzeug ein bedeutsames Unfallrisiko darstellt. Ein von den Autoren durchgeföhrter Vergleich der Daten mit älteren Zahlen zu Unfallursachen zeigte beispielsweise einen Anstieg der Ursache *Telefone*. Dies ist mit der steigenden Verbreitung dieses Systems im Kraftfahrzeug zu erklären und macht deutlich, wie wichtig die Betrachtung der potentiellen visuellen Ablenkung durch ein neues Assistenzsystem bei der Entwicklung und Einführung einer neuen Technik im Kraftfahrzeug ist.

Bei der Evaluation von neuen Fahrerassistenzsystemen wird diskutiert, welche Blickabwendungszeiten akzeptabel sind, ohne zu einer Sicherheitsgefährdung zu führen. Häufig wird bei der Bewertung von neuen Systemen davon ausgegangen, dass Blickabwendungen von der primären Fahraufgabe bis zu zwei Sekunden tolerierbar sind (Bubb, 2002). Ob dieser Grenzwert tatsächlich sicherheitsunkritisch ist, hängt von der Komplexität der jeweiligen Verkehrssituation ab. Da der Fahrer während der Blickabwendungszeit davon ausgeht, dass „alles so weiterläuft wie bisher“ (Bubb, 2002, S. 12) kann es beim Eintreten eines unerwarteten Ereignisses zu einer verlängerten Reaktionszeit kommen.

### **2.3.4.2 Studien zur visuellen Beanspruchung durch die Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen**

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über empirische Untersuchungen in der Literatur zum Einfluss der Nutzung von FAS auf die visuelle Beanspruchung. Ein Schwerpunkt von Forschungsarbeiten zur Beanspruchung im Kraftfahrzeug der letzten Jahre ist die Frage nach der Gefahr durch die Nutzung von Mobiltelefonen während des Fahrens (z. B. Mayser, Piechulla, Weiss & König, 2003). Auch ist in der Literatur eine Vielzahl von Untersuchungen zur visuellen Beanspruchung durch die Nutzung von Assistenzsystemen beschrieben (z. B. Piechulla, Mayser, Gehrke & König, 2002). Am häufigsten wurde die Wirkung von Navigationssystemen untersucht, da diese bereits seit einigen Jahren erhältlich sind.

In einer schwedisch-kanadischen Untersuchung wurde mit insgesamt 119 Probanden in zwei Simulator- und einer Feldstudie der Einfluss einer auf einem Display präsentierten Aufgabe auf das Blickverhalten untersucht (Victor, Harbluk & Engström, 2005). Mit steigendem Schwierigkeitsgrad der Aufgabe zeigte sich, dass die Versuchspersonen häufiger und länger auf das Display und dafür weniger voraus auf die Fahrbahn schauten. Dabei stieg der Prozentsatz der sicherheitsrelevanten Blicke mit einer Dauer über zwei Sekunden bei der Aufgabenbearbeitung mit der Aufgabenschwierigkeit an.

In der Literatur häufig diskutiert wird der Einfluss der Fahrerfahrung auf das Fahrverhalten insbesondere bei (visueller) Beanspruchung durch die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems

(z. B. Dewar, 1988; Heinrich, 1987; Lansdown, Parks, Fowkes & Comte, 1999; Mourant, 1972; Wikman, Nieminen & Summala, 1998).

Wikman et al. (1998) führten eine Feldstudie mit 47 Versuchspersonen zum Einfluss der Fahrerfahrung<sup>7</sup> und der Bearbeitung einer Sekundäraufgabe auf das Blickverhalten durch. Während der Fahrt mussten die Probanden drei Aufgaben bearbeiten: (1) Suchen eines Radiosenders, (2) Wählen einer Telefonnummer und (3) Wechseln einer Radiokassette. Es zeigte sich eine signifikante Abhängigkeit der Blickabwendungszeit von der Aufgabenart. Die Blickabwendungen waren bei der Radioaufgabe am längsten (1,02 s) und am kürzesten bei der Kassettenaufgabe (0,91 s). Es war keine signifikante Interaktion der Fahrerfahrung und des Aufgabentyps zu beobachten. Dagegen korrelierte die Fahrerfahrung mit der Standardabweichung der Blicklängen zu der ZweitAufgabe: Für die Fahrer mit geringer Fahrerfahrung war diese größer. Fahranfänger zeigten eine größere Anzahl von kurzen (< 0,5 s) und langen (> 2 s) Blicken. Bei kurzen Blickzuwendungen gehen die Autoren davon aus, dass diese nicht zielgerichtet sind und zur Informationsaufnahme nicht ausreichen. Aus Sicherheitsgründen sind insbesondere die langen Blicke von Interesse. Beispielsweise zeigten 29 % der unerfahrenen Fahrer Blickabwendungen über drei Sekunden, bei den erfahrenen Fahrern traten diese gar nicht auf.

### 2.3.5 Studien zur Beanspruchung bei der Nutzung von Nachtsichtsystemen

Es gibt bisher sehr wenig veröffentlichte Studien zum Thema *Beanspruchung beim Umgang mit einem Nachtsichtsystem*. Dies liegt möglicherweise darin begründet, dass, obwohl Studien durchgeführt werden, die Ergebnisse aufgrund der Neuigkeit des Systems nicht veröffentlicht werden. Sullivan et al. (2004) untersuchten die Auswirkung der Nutzung eines passiven Infrarot-Nachtsichtsystems auf folgende Beanspruchungsparameter:

- Longitudinale und laterale Fahrzeugkontrolle
- Subjektive Beanspruchung

Insgesamt wurden pro Proband vier Fahrten durchgeführt. Bei drei Runden mit unterschiedlichen Fahrbedingungen wurden Sehobjekte präsentiert, die entweder mit dem passiven Nachtsichtsystem (mit HDD oder HUD) oder ohne System erkannt werden sollten. Bei der vierten Fahrt mussten keine Sehobjekte erkannt werden. Die Effekte des Systems auf die Beanspru-

---

<sup>7</sup> Als erfahrene Fahrer wurden Personen mit einer Gesamtlebensfahrleistung von 50.000-2.000.000 km und als unerfahrenen Fahrer wurden Personen mit einer Fahrleistung von 400-15.000 km definiert.

chung wurden indirekt durch die Messung von Geschwindigkeit und Lenkung sowie direkt durch die Erhebung der subjektiv empfundenen Beanspruchung mittels des NASA-TLX (Task Load Index) ermittelt (Hart & Staveland, 1988).

Die mit dem NASA-TLX erfassste subjektive Beanspruchung zeigte keinen Unterschied beim Fahren mit und ohne Nachtsichtsystem. Auch bei der Lenkbewegung als objektiv messbarem Parameter für Beanspruchung zeigten sich keine signifikanten Differenzen beim Fahren mit oder ohne Infrarot-Nachtsichtsystem.

Außerdem erhoben die Autoren die objektive Beanspruchung anhand der gefahrenen Geschwindigkeit. Es wird einerseits davon ausgegangen, dass Fahrer in Situationen mit erhöhter Beanspruchung die Geschwindigkeit vermindern (Lansdown, Brook-Carter & Kersloot, 2004) und andererseits bei geringerem Risiko schneller fahren (Stanton & Pinto, 2000). Da die Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems beide Effekte haben kann, ist es schwierig, den Einfluss des Systems zu analysieren. Die Probanden fuhren beim Fahren ohne zu erkennende Sehobjekte ein bis zwei mph schneller als bei den anderen drei Bedingungen, zwischen denen aber keine Unterschiede zu erkennen waren. Es zeigte sich eine Interaktion zwischen den Fahrbedingungen und dem Geschlecht: Die Männer fuhren mit dem Nachtsichtsystem (HDD und HUD) schneller, die Frauen bei den beiden Bedingungen ohne Nachtsichtsystem.

Barham (2001) untersuchte die Auswirkungen der Nutzung eines Nachtsichtsystems auf die Spurhaltung. Die Studie zeigte, dass die Nutzung eines FIR-Nachtsichtsystems das Fahrverhalten im Hinblick auf die Fahrspurhaltung positiv beeinflusste: Bei schlechten Sichtbedingungen fuhr eine größere Anzahl von Versuchspersonen häufiger auf die Gegenfahrbahn, wenn sie kein FIR-Nachtsichtsystem zur Verfügung hatten als Probanden mit dem Fahrerassistenzsystem. Weiterhin zeigten mehr Versuchspersonen ohne das System eine größere absolute Abweichung von der Fahrbahnmitte. Somit ist davon auszugehen, dass die Beanspruchung durch die Nutzung des Fahrerassistenzsystems verringert wurde.

### **2.3.6 Fazit**

Bei Fahren eines Kfz spielt die mentale Beanspruchung des Fahrers eine wichtige, sicherheitsrelevante Rolle. Die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems kann theoretisch sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Verringerung der Fahrerbeanspruchung führen. Aus einer erhöhten mentalen Beanspruchung kann ein verminderter Komfortempfinden oder eine Sicherheitsgefährdung resultieren.

Daher ist eine Untersuchung der Auswirkungen eines neuen Assistenzsystems auf die Fahrerbeanspruchung im Entwicklungsprozess von großer Bedeutung. Die meisten bereits durchgeführten empirischen Studien zu diesem Thema beschäftigten sich mit dem Einfluss von In-

formations-, Navigations-, Kommunikations- und Entertainmentsystemen auf die Beanspruchung. Zu den Auswirkungen der Nutzung von Infrarot-Nachtsichtsystemen auf die Fahrerbeanspruchung liegen bisher nur wenige Forschungsergebnisse vor. Die visuelle Beanspruchung hat dabei die größte Bedeutung.

Als objektive Parameter für die Fahrerbeanspruchung wurden dabei zumeist Parameter der Fahrperformance wie beispielsweise die longitudinale und laterale Fahrzeugkontrolle (vgl. Kap. 3.2.2) herangezogen. Die subjektiv empfundene Beanspruchung wurde beispielsweise mit dem NASA-TLX erhoben. Die in anderen Forschungskontexten häufig zur Beanspruchungsmessung verwendeten physiologischen Parameter, z. B. Herzfrequenz und Hautleitwert, wurden noch nicht in Studien mit Infrarot-Nachtsichtsystemen eingesetzt. Hier besteht Forschungsbedarf, ob diese Methoden zur Evaluation dieses Fahrerassistenzsystems eingesetzt werden können.



### **3 Methoden zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen**

Bei der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen im Entwicklungsprozess werden verschiedene Konstrukte wie beispielsweise *Nutzerakzeptanz*, *Sicherheit* und *Beanspruchung* untersucht. Für die Erfassung der Konstrukte werden unterschiedliche empirische Forschungsmethoden herangezogen. Ein wichtiger Schritt bei der Konzeption einer Evaluationsstudie ist die Wahl der geeigneten Methoden.

Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt sind zwei zentrale Fragestellungen bei der Evaluation eines neuen Fahrerassistenzsystems, wie Menschen ein neues System nutzen und welche Nutzungsstrategien sie dabei ausbilden. Außerdem ist es sehr wichtig zu betrachten, welche Auswirkungen ein neues System auf die Beanspruchung des Fahrers hat. Wünschenswert wäre dabei eine Reduktion der Beanspruchung durch die Systemnutzung, zumindest sollte es aber aus Sicherheitsgründen zu keiner Beanspruchungserhöhung kommen. Bei der Bewertung einer neuen Technik bereits im Entwicklungsprozess ist daher eine Betrachtung dieser beiden Themenkomplexe wichtig.

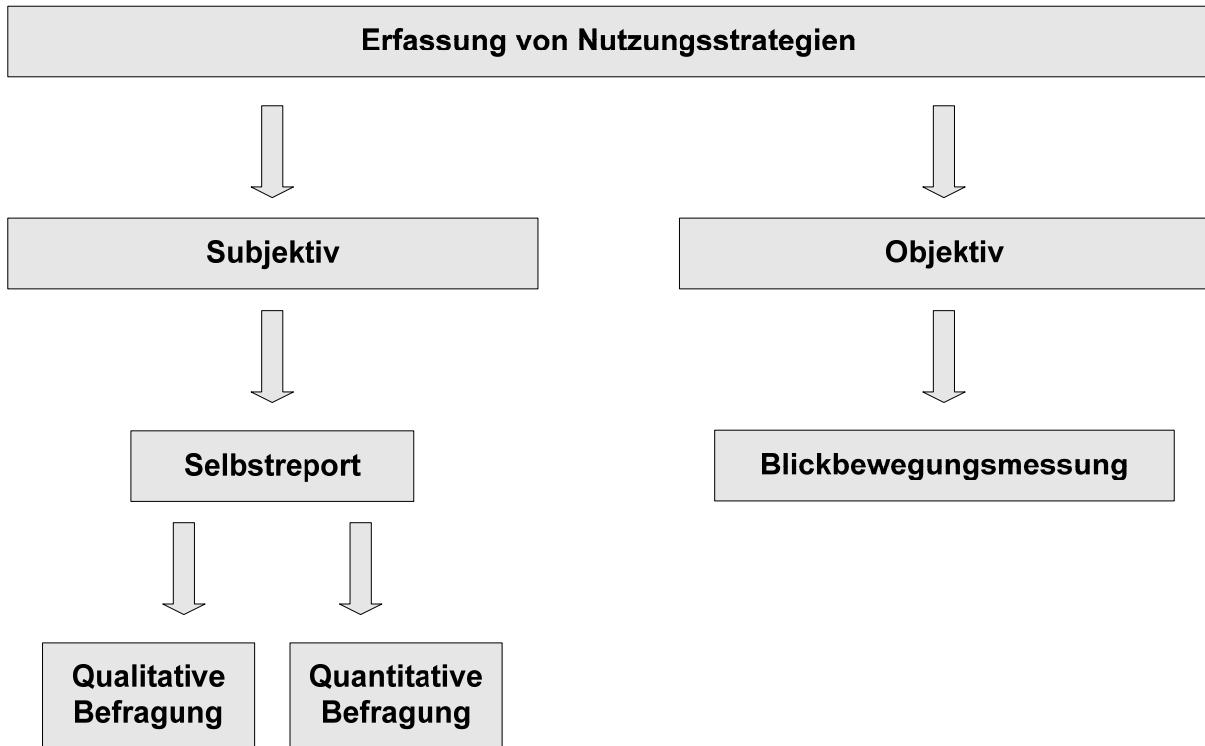
Dieses Kapitel beschäftigt sich damit, welche empirischen Forschungsmethoden für die Bearbeitung dieser Fragestellung im Rahmen der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen zur Verfügung stehen. Kapitel 3.1 behandelt Forschungsmethoden zur Erhebung von Strategien bei der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems und Kapitel 3.2 Methoden zur Beanspruchungsmessung im Kraftfahrzeug. Der Fokus wird dabei auf die Evaluation visuell arbeitender Fahrerassistenzsysteme gelegt. Viele Forschungsmethoden wurden nicht für die Evaluation von Systemen im Kraftfahrzeug, sondern beispielsweise für den Flugkontext oder für den arbeitswissenschaftlichen Bereich entwickelt. Hier wird daher ein Schwerpunkt auf Studien, die in der Kraftfahrzeugforschung oder in vergleichbaren Gebieten durchgeführt wurden und deren Ergebnisse im Hinblick auf die Einsetzbarkeit der Methoden, gelegt. In Kapitel 3.3 werden die Vor- und Nachteile von Simulator- und Feldstudien diskutiert.

#### **3.1 Methoden zur Erhebung von Nutzungsstrategien bei Fahrerassistenzsystemen**

Eine Forschungsfrage bei der Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme ist, wie die Fahrer mit einem solchen System umgehen. Beispielsweise ist es wichtig, welche Nutzungsstrategien sie ausbilden und wie dieser Prozess abläuft. Mittels der Ergebnisse kann beurteilt werden, ob es zu Sicherheitsproblemen durch die Verwendung kommt, z. B. wenn bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems der Fahrer fast nur noch nach Display fährt. Auch kann betrachtet werden, ob es während des Gewöhnungsprozesses zu einer Gefährdung des Nutzers oder an-

derer Teilnehmer kommt. Nicht zuletzt ist die Art der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems auch wichtig für dessen Hersteller, weil sich daraus Schlüsse für die Akzeptanz und somit auch für die zukünftige Kaufbereitschaft ziehen lassen.

Die Strategien zur Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems können mit verschiedenen empirischen Methoden erfasst werden. Grundsätzlich lassen sich diese in subjektive und objektive Methoden unterteilen und in folgendes Kategorienschema<sup>8</sup> einordnen (Abb. 3.1):



**Abb. 3.1:** Kategorienschema *Erfassung von Nutzungsstrategien*

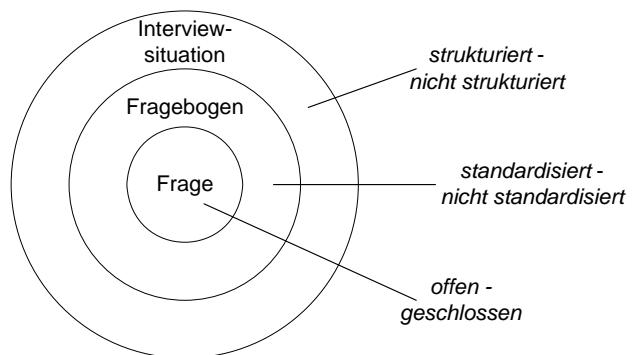
<sup>8</sup> Die Blickbewegungsmessung ist nur ein Beispiel für eine objektive Methode zur Erfassung von Nutzungsstrategien. Sie wurde in das Kategorienschema aufgenommen, weil sie die beste Methode zur Strategienerfassung bei visuellen FAS darstellt. Weitere, hier nicht aufgeführte Methoden zur Erfassung von Nutzungsstrategien sind beispielsweise die Verhaltensbeobachtung und die Aufzeichnung von Fahrparametern.

### 3.1.1 Selbstreport

Eine Möglichkeit der Erfassung von Nutzungsstrategien bei Fahrerassistenzsystemen ist, den Fahrer selbst berichten zu lassen, wie und in welchen Situationen er das System verwendet. Methodisch kann dies mit einem klassischen Instrument der empirischen Sozialforschung, der Befragung, durchgeführt werden. In diesem Kapitel wird zuerst allgemein die Methode der Befragung vorgestellt und dann auf ihren Einsatz bei der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen eingegangen.

#### 3.1.1.1 Die Methode der Befragung

Eine klassische Methode der empirischen Sozialforschung, die auch zur Erfassung von Nutzungsstrategien im Kraftfahrzeug eingesetzt werden kann, ist die Befragung. Eine Befragung ist eine Methode, mit der subjektive Meinungen von Versuchspersonen erfasst werden können. Bei der Befragung unterscheidet man verschiedene Bezugspaare, durch welche unterschiedliche Methoden charakterisiert sind. Nach Atteslander (1995) werden strukturierte von nicht strukturierten und standardisierte von nicht standardisierten Befragungen unterschieden. Dabei bezieht sich der Grad der Strukturierung auf die Situation und die Standardisierung auf das Instrument der Befragung, also beispielsweise den Fragebogen. Weiterhin wird auch noch zwischen offener und geschlossener Fragestellung differenziert (Abb. 3.2).



**Abb. 3.2: Zuordnung gebräuchlicher Bezugssysteme (Atteslander, 1995, S. 179)**

Grundsätzlich wird zwischen qualitativen und quantitativen Befragungen unterschieden:

### ***Qualitative Befragungen***

Qualitative Befragungen sind meist mündlich geführte Einzelinterviews (Atteslander, 1995). Es wird mit wenig oder teilstrukturierten Verfahren gearbeitet und die Fragen werden offen gestellt, so dass die Befragten die Möglichkeit haben, alles für sie Relevante zum Interviewthema mitzuteilen. Somit werden die subjektiven Konstrukte der Befragten durch die Vorgabe eines groben Kontextes erfasst, ohne konkrete inhaltliche Vorgaben durch die Versuchsleitung zu machen.

### ***Quantitative Befragungen***

Hierbei handelt es sich um stark strukturierte, standardisierte Befragungen. Die Durchführung geschieht meist mit einem Fragebogen, bei dem die Anzahl der Fragen, die Reihenfolge und die genauen Formulierungen bereits vorgegeben sind. Es werden geschlossene Fragen gestellt, d. h. es werden verschiedene Antworten vorgegeben, zwischen denen sich die befragte Person entscheiden kann.

Es gibt verschiedene Argumente, die bei der Entscheidung für die Durchführung einer qualitativen oder quantitativen Befragung abgewogen werden müssen. Prinzipiell kann gesagt werden, dass bei einer wenig oder teilstrukturierten Befragung eher die Meinungen der Personen in ihrer ganzen Breite erfasst werden können. Die Untersuchungsleitung hat die Möglichkeit, spontan auf die Äußerungen einzugehen, auch wenn sie im Rahmen der Vorbereitung der Befragung an bestimmte Themen bzw. Aspekte nicht gedacht hat. Durch die Vorgabe von Antwortkategorien, wie dies in der strukturierten Befragung üblich ist, werden nur Alternativen abgefragt, die der Versuchsleiter bereits vorformuliert hat. Somit sind die Antwortmöglichkeiten des Befragten eingeschränkt. Als Extremformen sollen im Folgenden der Fragebogen mit vorgegebenen Antwortkategorien und das wenig strukturierte oder das teilstrukturierte Interview gegenübergestellt werden (Tab. 3.1). Es sind aber auch Zwischenvarianten einsetzbar. Beispielsweise werden in Fragebögen häufig offene und geschlossene Fragen kombiniert, um die Vorteile einer leichten Auswertbarkeit und interindividuellen Vergleichbarkeit mit der Möglichkeit der Erfassung der Antwortbreite zu kombinieren.

**Tab. 3.1: Gegenüberstellung Fragebogen (standardisiert) und Interview (wenig strukturiert/teilstrukturiert)**

	<b>Fragebogen (standardisiert)</b>	<b>Interview (wenig strukturiert/ teilstrukturiert)</b>
<b>Vorbereitungsaufwand</b>	Sehr hoch	Hoch
<b>Durchführungsaufwand</b>	Gering	Hoch
<b>Auswertungsaufwand</b>	Gering	Sehr hoch
<b>Art der Durchführung</b>	Schriftlich <sup>9</sup>	Mündlich
<b>Erhaltene Daten</b>	Quantitativ	Qualitativ
<b>Stichprobe</b>	Große Stichprobe möglich	Eher kleine Stichprobe

### 3.1.1.2 Die Befragung als Methode zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen

Hatakka, Keskinen, Katika & Laapotti (1997) betonen die Wichtigkeit von Probandenbefragungen in der Verkehrspychologie:

„But if we look at self-reports from the viewpoint of cognitive psychology, it is easy to see the value. It is extremely difficult to get valid information on e. g., meta-cognition or motivation without asking the subject. ‘Objective observation’ leads to loose speculation when we want to know what the driver thinks.” (Hatakka et al., 1997, S. 296)

Wie bereits dargestellt, sind Fragebogen und Interview zwei typische empirische Forschungsmethoden, die bei der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen bei der Betrachtung von Nutzungsstrategien zum Einsatz kommen. Beide Methoden und die Expertenbefragung als ein Spezialfall der Befragung sowie einige Studien, bei denen diese Methoden eingesetzt wurden, sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

#### Fragebogen

Das am häufigsten in der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen verwendete Befragungsinstrument ist der Fragebogen. Typischerweise wird dieser beispielsweise nach einer Versuchsfahrt eingesetzt, damit die Probanden einzelne Systemparameter, das ganze System etc. bewerten können. Zwei Beispielitems eines Fragebogens zur Systembewertung sind in Abbil-

---

<sup>9</sup> Es besteht auch die Möglichkeit, dass der Interviewer die Fragen vorliest.

dung 3.3 dargestellt. Die Probanden werden aufgefordert, diese auf einer Skala von 1 bis 6 zu beantworten.

**Wie gefällt Ihnen das Fahrerassistenzsystem insgesamt?**

sehr schlecht      sehr gut

**Wie gut waren für Sie die Darstellungen auf dem Display zu erkennen?**

sehr schlecht      sehr gut

**Abb. 3.3: Beispielitems eines Fragebogens zur Systembewertung**

Diese Nachbefragung kann mit einem Fragebogen vor der ersten Versuchsfahrt verknüpft werden. Somit kann dann die Erwartung des Fahrers, die sich nur aus der theoretischen Kenntnis des Systems ergibt, mit der Beurteilung des Systems nach einer praktischen Erprobung verglichen werden. Eine typische Frage bei der Evaluation eines neuen Fahrerassistenzsystems ist beispielsweise, wie stark die Probanden dem System vertrauen. Üblicherweise wird eine solche Einschätzung durch eine Ratingskala erhoben (z. B. Rudin-Brown & Parker, 2004; Weller & Schlag, 2004).

Samper und Kuhn (2001) evaluierten mit einem Fragebogen ein Assistenzsystem, welches eine verbrauchsoptimale Fahrstrategie berechnet und diese dann dem Fahrer auf einer Anzeige darstellt. Mit dem Fragebogen wurden z. B. Fragen zur Akzeptanz und zur Systemnutzung gestellt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Probanden mit dem System entspannter fuhren und es häufig nutzen würden. Es wurden auch Aussagen darüber getroffen, in welchen konkreten Verkehrssituationen sie das Assistenzsystem nutzen würden. Somit war es möglich, durch den Fragebogen (potentielle) Nutzungsstrategien zu erheben.

Schweigert, Bubb und Wohlfarter (2005) führten eine Langzeituntersuchung mit elf Probanden zur Nutzung eines Head-Up Display durch. Dazu wurden die Meinungen der Versuchspersonen mit einem Erwartungsfragebogen vor der ersten Fahrt und mit einem Fragebogen nach jeder Fahrt erhoben. Es zeigte sich, dass schon vor der ersten Fahrt das HUD als bevorzugter Anzeigeort erwartet wurde. Die Fragebögen ergaben weiterhin, dass bereits zu Beginn der Fahrten das HUD bevorzugt wird und diese Bevorzugung über die Versuchsfahrten weiter steigt bis nach der letzten Fahrt von keiner Versuchsperson mehr eine Präferenz für das Kombiinstrument angegeben wird. Diese subjektiven Ergebnisse wurden durch objektiv mittels Aufzeichnungen des Blickverhaltens erhaltene Daten bestätigt (siehe Kap. 3.1.2.2).

## Interview

In einem sehr viel geringeren Ausmaß als der Fragebogen werden unstrukturierte und teilstrukturierte Interviews in der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen eingesetzt. Begründet liegt dies in dem hohen Durchführungs- und Auswertungsaufwand sowie der schlechten Vergleichbarkeit und damit problematischeren Möglichkeit der Verallgemeinerung der durch Interviews erhaltenen Daten. Bei der Evaluation eines Fahrerassistenzsystems könnten beispielweise die Fragen „*Was gefällt Ihnen an dem System?*“ und „*Was stört Sie an dem System und was könnte man besser machen?*“ gestellt werden.

Sprenger (1993) untersuchte mit einem teilstrukturierten Interview die Nutzungsstrategien von Versuchspersonen beim Geschwindigkeitsablesen von einem digitalen Head-up Display im Vergleich zu einem konventionellen analogen Tachometer. Dabei gab die Mehrheit der Befragten an, dass das Ablesen bei dem digitalen Display für sie einfacher war und sie eine kürzere Zeit dafür benötigten. Die Mehrzahl der Personen war der Meinung, dass die Gewöhnung an das neue System weniger als 20 min dauerte. Diese subjektiven Ergebnisse konnten durch die mittels Augenbewegungsmessungen erhaltenen objektiven Daten bestätigt werden (vgl. Kap. 3.1.2.2).

Um die Erfahrungen der Fahrer direkt während einer Systemnutzung zu erfassen, können unstrukturierte oder teilstrukturierte Interviews während der Versuchsfahrt durchgeführt werden. Es werden die spontanen Eindrücke während des Fahrens aufgenommen und es entsteht keine Zeitverzögerung bis zur Erfassung der Daten (z. B. Mahlke et al., 2007, siehe Kap. 2.1.3.3). Hier kann beispielsweise die Methode des *Lauten Denkens* (Ericsson & Simon, 1993) bzw. eine Variante zum Ausdruck kommen: Die Probanden werden aufgefordert bei einer Versuchsfahrt mit einem neuen Fahrerassistenzsystem alles zu berichten, was ihnen zu dem System und dessen Nutzung einfällt. Die Versuchsleitung notiert diese Äußerungen oder nimmt sie auf und wertet sie nach der Fahrt inhaltsanalytisch aus.

Meinungen und Einstellungen können nicht nur durch mündlich geführte Einzelinterviews, sondern auch in der Gruppe in Form einer *Gruppendiskussion* erhoben werden (Lamnek, 1998; Mayring, 1996). Die Versuchspersonen machen sich zuerst mit einem neuen System vertraut und diskutieren dann in der Gruppe über das Erlebte. Der Vorteil einer Gruppendiskussion ist, dass den einzelnen Teilnehmern durch die Äußerungen der übrigen anderen Perspektiven eröffnet werden. Angewendet wird diese Methode eher für Systembeurteilungen oder in einer sehr frühen Entwicklungsphase. Der Interviewer verwendet wie beim teilstrukturierten Interview einen Leitfaden, um die Diskussion zu steuern.

Eine häufiger als die Gruppendiskussion im Kontext der Evaluation neuer technischer Systeme angewendete Methode ist die Durchführung einer *Fokusgruppe* (Focus group) (Caplan, 1990; Mariani & Andreone, 2003). Auch sie gehört zu den Methoden der qualitativen Sozial-

forschung, bei der mehrere Personen in einer Gruppe zu einem Thema (= Fokus) diskutieren. Der Forscher nimmt aber im Unterschied zu einer Gruppendiskussion – mit Ausnahme einer Einführung in die Thematik – keinen Einfluss auf den Diskussionsprozess. Fokusgruppen arbeiten explorativ, d. h. Ziel ist durch die Diskussion neue Perspektiven zu erhalten. In der Literatur werden die Begriffe *Fokusgruppe* und *Gruppendiskussion* teilweise auch synonym verwendet (Lamnek, 1998).

Mariani und Andreone (2003, vgl. Kap. 2.1.3.3) verwendeten Fokusgruppen, um potentielle Vorteile eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems zu erheben. Sie bezeichneten diese Methode als den kosteneffektivsten Weg, um Nutzerbedürfnisse bei der Entwicklung neuer Systeme zu erfassen und zu berücksichtigen.

In einer anderen Untersuchung mit zwei Fokusgruppen älterer Fahrer (Charles River Associates, 1998) zeigte sich, dass die Probanden Interesse äußerten, in ihrem nächsten Fahrzeug ein Vision Enhancement System zu besitzen. Auch die Autoren dieser Studie betonen die Notwendigkeit der Anwendung von Methoden wie Fokusgruppen bei der Entwicklung von innovativen Systemen:

„[T]alking with a relatively small number of people in considerable depth from counting simplified responses from larger, more representative samples of general population – is a necessary first step towards understanding public reactions to new product concepts that differ significantly from anything now available on the marketplace.”  
(Charles River Associates, 1998, S. 13)

Methodisches Problem bei beiden Studien war, dass das neue Fahrerassistenzsystem den Probanden im Vorfeld lediglich theoretisch vorgestellt wurde und daher hinterfragt werden muss, inwieweit die Aussagen einer Bewertung eines Systems entsprechen, welches in Versuchsfahrten genutzt werden kann. Trotzdem kann die Durchführung einer Fokusgruppe in einem sehr frühen Entwicklungsstadium eines neuen Assistenzsystems wichtige Hinweise beispielsweise über die allgemeine Akzeptanz des Systems geben und richtungweisend für weitere Schritte sein, wenn verschiedene Entwicklungsalternativen zur Diskussion stehen.

## **Expertenbefragung**

Ein Spezialfall der Befragung, der ebenfalls in der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen zur Anwendung kommt, ist die Expertenbefragung (z. B. Mahlke et al., 2007, siehe Kap. 2.1.3.3). Hierbei werden Experten, beispielsweise Entwicklungsingenieure, Verkehrspsychologen, Ergonomen etc. zu ihrer Meinung zu einem neuen System befragt. Weller und Schlag (2004) führten eine Expertenbefragung zur Verhaltensadaptation u. a. bei einem Vision Enhancement System durch. Mit einem Fragebogen mit offenen und geschlossenen Fragen wurde die Meinung von Experten aus dem Bereich Verkehrspsychologie zur potentiellen Verhal-

tensadaptation nach einer Einführung der Systeme erfragt. Die Experten befürchteten, dass durch den Einsatz des Vision Enhancement Systems die mentale Beanspruchung geringer wird und es zu einem Kompensationsverhalten der Fahrer in Form eines schnelleren Fahrens und häufigerer Überholvorgänge kommt. Die Befragten gehen außerdem davon aus, dass die Verhaltensadaptation vom Fahrertyp abhängig ist und sportliche Fahrer die größten Verhaltensänderungen zeigen werden. Es wurde eine hohe Nutzungsbereitschaft des Systems und eine mittlere Kaufbereitschaft prognostiziert. Methodisch muss an dieser Studie kritisch angemerkt werden, dass das System zum Zeitpunkt der Betrachtung noch nicht realisiert war und den Experten theoretisch und idealtypisch vorgestellt wurde. Es stellt sich die Frage, ob auf der Grundlage dieses Wissens valide Aussagen über die Nutzung gemacht werden können.

Ein Problem der Methode *Befragung* ist die soziale Erwünschtheit (Hatakka et al., 1997). Sicherlich besteht die Gefahr, dass Probanden beispielsweise bei Testfahrten mit einem neuen Fahrerassistenzsystem, welches vielleicht sogar von der Versuchsleitung mitentwickelt wurde, eher positiv auf das System reagieren. Diese Fehlerquelle kann aber durch eine gute Instruktion bei Untersuchungsbeginn, bei der explizit darauf hingewiesen wird, dass auch Kritik an dem System erwünscht und hilfreich ist, minimiert werden.

Die zitierten empirischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Methode der Befragung geeignet ist, im Rahmen von Evaluationen neue Fahrerassistenzsysteme zu bewerten und Nutzungsstrategien zu erfassen.

### **3.1.2 Blickbewegungsmessungen**

Im Kapitel 3.1.1 wurde der Selbstreport als subjektive Methode der Erfassung von Nutzungsstrategien beschrieben. Obwohl einige Studien eine Übereinstimmung von mittels Befragung erhaltenen Ergebnissen und objektiven Daten zeigen (z. B. Schweigert et al., 2005; Sprenger, 1993) kann und muss bei einer subjektiven Bewertung der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems diskutiert werden, inwieweit ein Proband in der Lage ist, sein Nutzungsverhalten quantitativ zu beurteilen. Es stellt sich die Frage, wie aussagekräftig der Bericht einer Versuchsperson, er sei mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem „fast nur nach Display gefahren“ oder habe „bei dieser Versuchsfahrt das System häufiger genutzt als bei der letzten“, ist.

Eine geeignete Methode zur quantitativen Erfassung der Strategien bei der Nutzung eines visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystems ist die Blickbewegungsmessung. Mit ihr ist es möglich, die Häufigkeit einer Systemnutzung und die Zeit, die beispielsweise für die Aufnahme von Informationen von einem Display benötigt wird, zu ermitteln. Im folgenden Kapi-

tel wird zuerst die Methode vorgestellt (Kap. 3.1.2.1) und dann anhand von in der Literatur berichteten Studien ihr Einsatzbereich vorgestellt (Kap. 3.1.2.2).

### 3.1.2.1 Die Methode der Blickbewegungsmessung (Eye-Tracking)

Eine Erforschung der visuellen Wahrnehmung ist für die Verkehrssicherheit sehr wichtig, da Probleme mit dieser als Ursache für Unfälle angegeben werden (Koornstra, 1993). In der Literatur (z. B. Dewar, 1988; Hills, 1980; Hoeppe, 2004) wird teilweise davon ausgegangen, dass durch den Sehsinn bis zu 90 % der für den Straßenverkehr relevanten Wahrnehmung erfolgt. Diese Zahl wird zwar von anderen Autoren (z.B. Gale, 1997; Sivak, 1996) als zu hoch bzw. zu ungenau bewertet, unstrittig ist aber, dass beim Autofahren der größte Teil der Informationen visuell aufgenommen wird. Somit obliegt dem optischen Sinneskanal eine große Bedeutung im System Fahrer-Fahrzeug-Fahrumwelt (Hills, 1980).

Blickbewegungen zum Erkennen und Wahrnehmen von Objekten setzen sich aus *Fixationen* und *Sakkaden* zusammen:

- Um Objekte exakt sehen zu können, müssen sie in den Bereich des scharfen Sehens, der *Fovea centralis* („gelber Fleck“) gerückt werden. Dies geschieht durch ruckartige Blickbewegungen. Diese Augenbewegungen zwischen zwei Fixationen werden als *Sakkaden* bezeichnet.
- Bei der *Fixation*, der relativen Bewegungslosigkeit des Augapfels, kommt es zur Informationsaufnahme durch das Auge. Als unterste Grenze für eine Fixation werden 150 ms festgelegt (Hoeppe, 2004). Unterhalb dieses Grenzwerts ist keine kognitive Verarbeitung möglich.

Da, wie oben beschrieben, beim Autofahren der größte Teil der Informationen visuell aufgenommen wird, obliegt dem optischen Sinneskanal eine große Bedeutung. Das menschliche Auge kann nur in einem Bereich von ungefähr 2° bis 3° scharf sehen. Somit ist es möglich, von der Blickrichtung auf die in dem Moment vorhandene Aufmerksamkeitszuwendung zu schließen (Bubb, 2002). Damit kommt der Betrachtung von Blickbewegungen eine große Bedeutung bei der Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme zu.

In der Literatur wird aber auch problematisiert, dass die foveale Fixation eines Objektes nicht automatisch mit dessen Wahrnehmung gleichgesetzt werden kann. Crundall und Underwood (1997) schlagen vor, Blickbewegungsmessungen mit der Methode der gleichzeitigen Verbalisation („concurrent verbalisation“) zu kombinieren, bei der die Probanden aufgefordert werden auszusprechen, was sie tun oder was gerade ihre Aufmerksamkeit erregt.

Mit Blickbewegungsmessungen wird das Blickverhalten des Fahrers in der Regel in Bezug auf folgende Parameter untersucht (z. B. Fairclough & Maternaghan, 1993; Landau et al., 2003; Reeves & Stevens, 1996; Rockwell, 1988; Wikman et al., 1998):

- *Blickrichtung*: Wohin schaut der Fahrer?
- *Blickdauer*: Wie lange schaut er auf einen bestimmten Ort?
- *Blickhäufigkeit bzw. Blickfrequenz*: Wie häufig schaut der Fahrer auf einen bestimmten Ort?

Nach Fairclough und Maternaghan (1993) ist die Blickdauer ein Maß für die Schwierigkeit der Aufnahme einer Information. Die Blickfrequenz beschreibt die Kontrolle der Fahrsituation, d. h. je schwieriger die dargebotenen Zusatzinformationen vom Fahrer verarbeitet werden können, um so seltener kann er auf die Fahrbahn oder beispielsweise in die Spiegel schauen.

Die am häufigsten angewendete Methode zur Messung von Blickbewegungen ist das Eye-Tracking. Dabei wird grundsätzlich zwischen *Head-mounted-* und *Remote-Systemen* unterschieden. Beide Systeme arbeiten nach dem Prinzip der cornealen Reflexion. Dabei wird das Auge des Probanden von einer Infrarot-Strahlungsquelle angestrahlt und dadurch zwei Reflexpunkte auf der Hornhaut erzeugt. Diese Punkte werden von einer Kamera aufgenommen und aus dem Abstand der IR-Reflexe zu dem Pupillenmittelpunkt kann auf die Blickrichtung geschlossen werden.

### ***Head-Mounted-Systeme***

Bei diesen Systemen wird die Messeinrichtung mit einem Helm auf dem Kopf des Probanden angebracht, was bei längeren Versuchsfahrten zu Kopfschmerzen führen kann. Außerdem empfinden die Probanden das Fahren mit einem Helm als unnatürlich, was insbesondere bei Feldversuchen zu einer geringen Akzeptanz dieser Methode führen kann. Ein Hauptnachteil dieser Systeme ist, dass sich durch Kopfbewegungen der Probanden das Sichtfeld der untersuchten Person verändert und damit die Kalibrierung der erhaltenen Blickpunkte verloren geht. Um dieses Problem zu lösen, kann ein magnetischer Headtracker zur Bestimmung der Kopfposition eingesetzt werden. Da dessen Messung aber durch die Metallkarosserie gestört wird, ist dies in Fahrzeugen nicht möglich. *Head-Mounted-Systeme* haben aber den Vorteil der größeren Messgenauigkeit gegenüber *Remote-Systemen*.

### ***Remote-Systeme***

Die *Remote-Systeme* arbeiten kontaktlos zu den Versuchspersonen, was zu einer geringeren Störung der Messung durch die Apparatur führt. Für die Versuchspersonen ist diese Messung nicht unangenehm. Kopfbewegungen der Probanden führen lediglich zu einer kurzen Unterbrechung der Aufzeichnung und nicht zu einem möglichen Verlust der Kalibrierung wie bei den *Head-Mounted-Systemen*. Die durch die Messung erhaltenen Blickkoordinaten können dann quantitativ ausgewertet werden. Beispielsweise kann bei der Beurteilung der Nutzung

eines Displays ein *Area of Interest* festgelegt werden und alle Blicke auf diesen Ort betrachtet werden, um somit Blickdauer und Blickhäufigkeiten zu ermitteln. Gleichzeitig zur Aufnahme des Auges wird ein Videobild von der durchfahrenen Szenerie aufgenommen. Anhand dieses Videobildes ist dann eine qualitative Auswertung möglich, z. B. kann untersucht werden bei welchen Verkehrsbedingungen auf das Display geschaut wird.

### 3.1.2.2 Die Blickbewegungsmessung als Methode zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen

Lansdown und Fowkes (1998) untersuchten in einer Feldstudie mit achtzehn Versuchspersonen Unterschiede im Blickverhalten beim Fahren ohne ein System im Vergleich zur Nutzung eines Entertainmentsystems und eines Stauwarnassistenten. Während der Fahrt wurden die Blickbewegungen der Fahrer mit Hilfe einer Videoaufzeichnung festgehalten und die Videos später ausgewertet. Parameter zur Bewertung des Blickverhaltens waren die *Häufigkeit der Blickabwendung* von der Straße, die *Blickabwendungszeit* über die ganze Fahrzeit (Mittelwert aller Blickabwendungszeiten von der Straße, z. B. Blicke in die Seitenspiegel, Rückspiegel, Instrumentenanzeige) und der *Prozentsatz der Blickabwendungszeit* von der Fahrbahn bezogen auf die Gesamtfahrzeit. Es zeigten sich signifikante Unterschiede im Blickverhalten beim Fahren mit den Informationssystemen im Vergleich zur Kontrollfahrt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Die Häufigkeit der Blickabwendungen bei der Nutzung des Stauwarnassistenten war signifikant höher als bei einem Entertainmentsystem und den Kontrollbedingungen ohne System. Auch der Mittelwert der Blickabwendungszeiten und der Anteil der Blickabwendungen von der Gesamtfahrtzeit waren beim Stauwarnassistenten am größten.

**Tab. 3.2: Unterschiede im Blickverhalten beim Fahren mit und ohne Informationssystem (Lansdown & Fowkes, 1998)**

	Kontrollbedingung	Entertainmentsystem	Stauwarnassistent
<b>Häufigkeit der Blickabwendung</b>	185 ( $\sigma = 47,80$ )	226 ( $\sigma = 54,90$ )	270 ( $\sigma = 61,90$ )
<b>Blickabwendungszeit</b>	0,63 s ( $\sigma = 0,05$ )	0,88 s ( $\sigma = 0,13$ )	1,07 s ( $\sigma = 0,20$ )
<b>Prozentsatz der Blickabwendungszeit</b>	10 % ( $\sigma = 2,60$ )	14 % ( $\sigma = 3,20$ )	18 % ( $\sigma = 3,60$ )

Im Hinblick auf eine Sicherheitsrelevanz ist es insbesondere wichtig, die Anzahl der längeren Blicke zu betrachten. Daher werten die Autoren aus, wie viel Prozent der Blickabwendungen eine bestimmte Dauer überschritten. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.3.

**Tab. 3.3: Prozentsatz der Blicke > eine Sekunde (Lansdown & Fowkes, 1998)**

	Kontrollbedingung (%; n = 2244)	Entertainmentsystem (%; n = 881)	Stauwarnassistent (%; n = 1686)
<b>1 s und größer</b>	3,88	58,12	68,68
<b>1,5 s und größer</b>	1,02	11,92	24,61
<b>2 s und größer</b>	0,58	4,65	12,10
<b>2,5 s und größer</b>	0,36	0,57	2,19

Zwahlen, Adams und de Bald (1988) forderten eine maximale Blickzuwendung von zwei Sekunden bei der Nutzung eines Fahrerinformationssystems, um eine Gefährdung zu vermeiden. Dieser Grenzwert wurde beim Stauwarnassistenten in 12,10 % aller Blicke überschritten und beim Entertainmentsystem auch noch in 4,65 % aller Blicke.

Weitere Untersuchungen zum Blickverhalten bei der Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationen im Kraftfahrzeug wurden beispielsweise durchgeführt von Rockwell (1988), Wierwille, Antin, Dingus & Hulse (1988) und Wikman et al. (1998, vgl. Kap. 2.3.4.2).

Es gibt erst wenige Untersuchungen dazu, wie sich das Blickverhalten im Rahmen des Gewöhnungsprozesses an ein System im Kraftfahrzeug verändert. Grund hierfür ist, dass eine solche Studie sehr aufwendig ist. Schweigert et al. (2005) führten eine Langzeituntersuchung mit elf Probanden zum Blickverhalten auf ein Head-Up Display durch. Zu Beginn der Studie wurden eine einstündige Referenzfahrt ohne HUD und dann vier einstündige Messfahrten mit HUD, jeweils im Abstand von einer Woche, durchgeführt. Zwischen den Messfahrten konnten die Probanden das Versuchsfahrzeug frei nutzen. Die Fahrten enthielten jeweils 51 ACC-Aufgaben und Abschnitte mit freiem Fahren. Um eine Gewöhnung an die Versuchsstrecke auszuschließen, wurden jeweils andere Versuchsstrecken mit ähnlichem Profil gewählt. Zur Analyse des Blickverhaltens wurden drei Blickorte erfasst: Das HUD, das Kombi-Instrument und das CID (Central Information Display). Bereits ab der ersten Fahrt mit HUD wurde dieses bei den ACC-Aufgaben zu 96 % genutzt. Dieses Verhältnis änderte sich bei den späteren Fahrten fast nicht mehr und zeigte sich auch bei der freien Fahrt. Bei der Nutzung des HUD wurde tendenziell eine geringere Blickdauer beobachtet. Auch die mittlere Blickanzahl bei

den ACC-Aufgaben reduzierte sich und die Blickanzahl war nach der ersten Woche stabil. Die mittlere Blickabwendungszeit von der Fahrbahn<sup>10</sup> stieg bei der erstmaligen Nutzung des HUD gering an, reduzierte sich aber dann im Gewöhnungsprozess. Die Autoren bemerken zu diesen Ergebnissen, dass die Reduktion der Blickanzahl und der Blickabwendungszeit aber auch – zumindest teilweise – aus der Gewöhnung an das Fahrerassistenzsystems selbst resultieren kann. Wie bereits in Kapitel 3.1.1.2 dargestellt, entsprachen auch die parallel durch einen Fragebogen erfassten subjektiven Einschätzungen der Probanden zu ihrem Nutzungsverhalten den Blickdaten.

Sprenger (1993) zeigte mit Hilfe eines Elektrookulogramms (EOG), dass eine Geschwindigkeitsanzeige in Form eines digitalen Head-up Displays (HUD) im Vergleich zu einem analogen Tachometer häufiger und schneller abgelesen wurde. Dies entsprach auch den mit einer Befragung erhaltenen Daten (vgl. Kap. 3.1.1.2)

Meitzler et al. (2001) führten eine Simulatorstudie mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem durch, bei dem der Fahrer die Informationen auf einem HUD dargeboten wurden. Ziel war es herauszufinden, ob die Probanden den Blick auf das Display oder den direkten Blick durch die Windschutzscheibe auf die Straße bevorzugen. Die mit einem Eye-Tracking-System erhaltenen Ergebnisse zeigten, dass die Versuchspersonen über die Hälfte der Zeit auf das Display schauten. Die Autoren schließen daraus auf eine Präferenz der Informationsaufnahme der Probanden über das Display gegenüber dem Blick durch die Windschutzscheibe.

Die Ergebnisse der dargestellten Studien zeigen eine sehr gute Eignung der Blickbewegungsmessung, um Nutzungsstrategien und den Prozess der Gewöhnung beim Umgang mit einem neuen Fahrerassistenzsystem abzubilden.

### 3.1.3 Fazit

Für die Erfassung von Nutzungsstrategien stehen unterschiedliche empirische Forschungsmethoden zur Verfügung. Diese lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: subjektive und objektive Methoden.

Subjektiv werden Nutzungsstrategien durch Methoden des Selbstreports erfasst. Dabei werden zur Evaluation von FAS am häufigsten Fragebögen eingesetzt. Unstrukturierte und teilstrukturierte Interviews sind geeignet, Nutzungsstrategien bereits während der Versuchsfahrt zu erfassen.

---

<sup>10</sup> Eyes-off-the-road-time

Bei der subjektiven Erfassung von Nutzungsstrategien besteht die Unsicherheit, ob die Versuchspersonen auch wirklich in der Lage sind, diese richtig einzuschätzen. Deshalb ist es wichtig, über objektive empirische Forschungsmethoden für die Erhebung dieses Konstruktions zu verfügen. Zur objektiven Erfassung der Strategien bei der Nutzung eines visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystems ist die Methode der Blickbewegungsmessung geeignet. Bislang durchgeführte Studien mit dieser Methode beschäftigen sich überwiegend mit dem Fahrerblickverhalten bei Entertainment-, Informations- und Kommunikationssystemen.

Es liegen nur sehr wenige Langzeitstudien zur Ausbildung und Veränderung von Nutzungsstrategien vor. Da davon auszugehen ist, dass sich die Strategien im Gewöhnungsprozess an ein neues System verändern, besteht hier Forschungsbedarf. Daher ist es wichtig, im Rahmen von empirischen Studien Erkenntnisse zu gewinnen, mit welchen Forschungsmethoden die Ausbildung von Nutzungsstrategien an ein Fahrerassistenzsystem untersucht werden kann.

## 3.2 Methoden zur Erhebung der Fahrerbeanspruchung

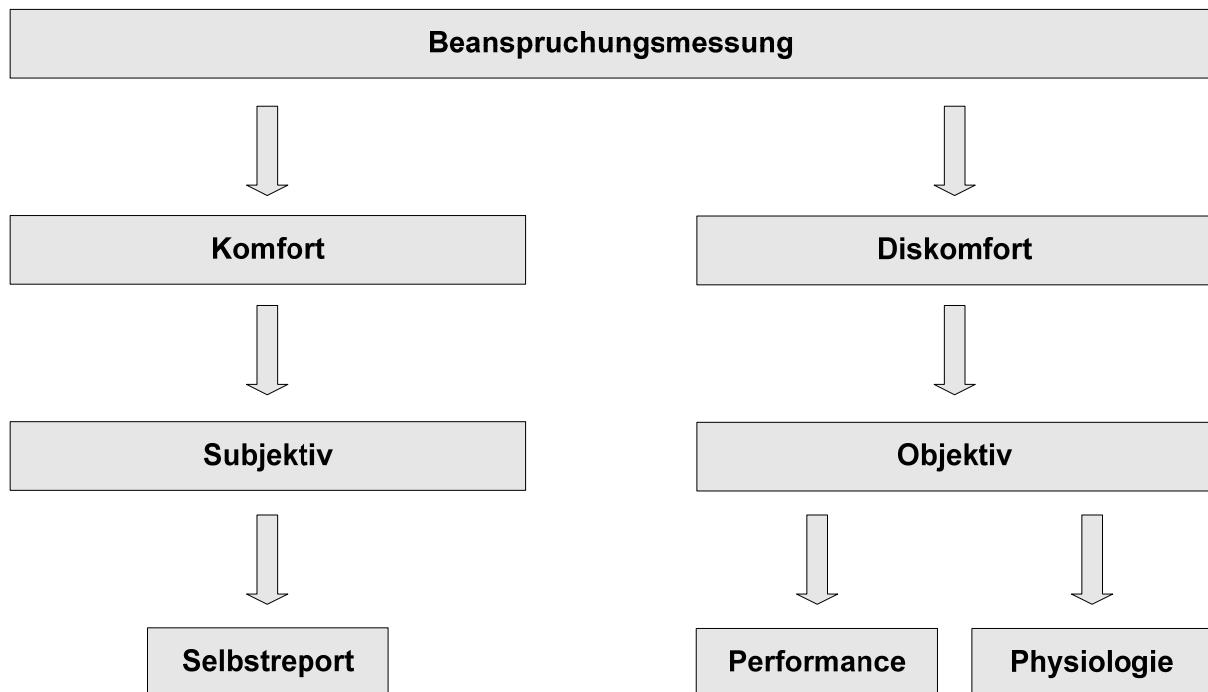
Ziel neuer Fahrerassistenzsysteme ist die Erhöhung der Fahrsicherheit und des Komforts. Aber durch ein neues, zusätzliches System wird auch die auf den Fahrer einwirkende Belastung erhöht. Dies kann zu einer erhöhten Beanspruchung und einer geringeren Fahrsicherheit führen. Bei einem Infrarot-Nachtsichtsystem ist insbesondere eine visuelle Beanspruchung durch die Blickzuwendung zum Display zu erwarten (Krems, Keinath, Baumann & Jahn, 2004).

Somit spielt die Erhebung der Beanspruchung bei der Evaluation von neuen Fahrerassistenzsystemen eine große Rolle. Hierfür steht in der empirischen Forschung eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung. Ein guter Überblick über die Messung der mentalen Beanspruchung des Fahrers ist in de Waard (1996) zu finden. O'Donell & Eggemeier (1986) formulieren drei Kategorien zur Einordnung der Methoden zur Erfassung von Beanspruchung bzw. deren Auswirkungen:

- 1) Subjektive Messmethoden (Selbstreport): Erfassung von subjektiven Theorien des Fahrers, der sein eigenes Erleben berichtet und bewertet, z. B. durch Ratingskalen.
- 2) Performancebasierte Messmethoden: Das Fahrverhalten wird als Indiz für eine Beanspruchung herangezogen. Unterkategorien dieser Messmethoden sind Messungen der primären Fahraufgabe und Messungen der Sekundäraufgabe. Ein Beispiel für eine performancebasierte Messmethode ist die Erhebung der Qualität der Spurhaltung.
- 3) Physiologische Messmethoden: Ableitung verschiedener physiologischer Parameter als Beanspruchungsindikatoren, ein verwendeter Parameter ist beispielsweise die Herzfrequenz.

Nach Bubb (2002, vgl. Kap. 2.3.2) werden mit den oben beschriebenen Forschungsmethoden unterschiedliche Konstrukte erfasst: Mit dem Selbstreport wird der *Komfort*, den eine Person empfindet, gemessen. Das objektive Konstrukt *Diskomfort* dagegen ist durch die performancebasierten und physiologischen Messmethoden erhebbar. Dabei muss beachtet werden, dass diese objektiv gemessenen Werte nicht mit den subjektiven identisch sein müssen.

Die Abbildung 3.4 gibt einen Überblick über die kategoriale Einordnung der verschiedenen Messmethoden in der vorliegenden Arbeit.



**Abb. 3.4: Kategorienschema Beanspruchungsmessung**

Es stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung, die helfen, eine Methode im Hinblick auf ihre Einsetzbarkeit für eine bestimmte Forschungsfrage zu bewerten. An erster Stelle sind hier die Hauptgütekriterien der klassischen Testtheorie zu nennen (Bortz & Döring, 1995):

### **Validität (validity)**

Grad der Genauigkeit eines Verfahrens, das Merkmal zu messen, welches gemessen werden soll

### **Reliabilität (reliability)**

Grad der Messgenauigkeit eines Instruments (unabhängig davon, ob dieses Merkmal auch erfasst werden soll)

### **Objektivität (objectivity)**

Ausmaß für die Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Untersuchungsleitung

Neben diesen Hauptgütekriterien werden in der Literatur verschiedene Nebengütekriterien beschrieben, die bei der Auswahl einer Methode für die Erfassung von Beanspruchung berücksichtigt werden sollten (De Waard, 1996; Manzey, 1998; O'Donnell & Eggemeier, 1986):

#### **Sensitivität (sensitivity)**

Fähigkeit einer Methode, Beanspruchungsunterschiede zu differenzieren, die durch die Bearbeitung von Aufgaben unterschiedlicher Komplexität auftreten.

#### **Spezifität (diagnosticity)**

Ausmaß der selektiven Reaktion der Methode auf unterschiedliche Beanspruchungsarten, beispielsweise mentale gegenüber physischer Beanspruchung

#### **Reaktivität (intrusiveness)**

Die Reaktivität gibt den Grad des Einflusses der angewendeten Methode auf die Primäraufgabe an. Die Erhebung der Beanspruchung sollte die Fahraufgabe möglichst wenig oder gar nicht stören.

#### **Anforderungsvoraussetzungen (implementation requirements)**

Dieses Kriterium betrachtet, wie aufwendig die Anwendung der Methode sowohl für die Untersuchungsleitung als auch für den Probanden ist. Beispielsweise könnte der Einbau der technischen Geräte für eine Blickbewegungsmessung so aufwendig sein, dass die Methode nur im Simulator und nicht im Feld eingesetzt werden kann. Außerdem muss berücksichtigt werden, inwieweit eine Probandenschulung vor der Untersuchung notwendig ist. Einige Methoden können im Rahmen einer Untersuchung gar nicht angewendet werden, da die technischen Voraussetzungen und finanziellen Rahmenbedingungen nicht gegeben sind.

#### **Akzeptanz (operator acceptance)**

Dieses Nebengütekriterium gibt das Ausmaß der Akzeptanz der Versuchspersonen im Hinblick auf die Methode an. Die Bewertung eines Messinstruments durch eine Person, insbesondere bei der Methode des Selbstreports, hängt stark mit der Güte der Ergebnisse zusammen. Eine hohe Augenscheininvalidität und eine ausführliche Instruktion der Probanden führen in der Regel zu einer hohen Akzeptanz einer Methode.

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten und am häufigsten verwendeten Methoden der Fahrerbeanspruchungsmessung und ihr Einsatz in empirischen Untersuchungen vorgestellt (Kap. 3.2.1-3.2.4).

### 3.2.1 Selbstreport

Die unter dieser Kategorie zusammengefassten Methoden werden häufig auch als subjektive Methoden bezeichnet. Gemein ist diesen Methoden die Annahme, dass niemand eine bessere Aussage über eine Beanspruchung einer Person machen kann als die Person selbst.

„If the person feels loaded and effortful, he is loaded and effortful whatever the behavioural and performance measures may show.“ (Johanssen, Moray, Pew, Rasmussen, Sanders & Wickens, 1979, S. 101)

Voraussetzung für den Einsatz subjektiver Methoden zur Messung von Beanspruchung ist somit die Annahme, dass Personen Beanspruchungen wahrnehmen und bewerten können. Vorteile dieser Methoden sind, dass sie in der Regel leicht anwendbar sind und nur niedrige Kosten verursachen. Schütte (1986) geht davon aus, dass Beanspruchungen, die aus der Aufnahme, Verarbeitung und Umsetzung von Informationen resultieren, sich eher über subjektive als über physiologische Parameter differenzieren lassen. Hicks und Wierwille (1979) kommen nach ihrer Studie zu dem Schluss, dass Stressfragebögen zur Beanspruchungsmessung im Kraftfahrzeug eine geeignete Methode sind.

Schmidtke (2002) sieht sogar die objektiven Messmethoden, insbesondere die physiologischen Parameter, als so unzuverlässig an, dass die beste Quelle für Beanspruchungsdaten noch immer die Meinung der Person ist, auf die eine Belastung einwirkt:

„Wenn wir nicht genau wissen, was psychische Beanspruchung eigentlich ist und dieses Phänomen darüber hinaus auch mit naturwissenschaftlichen Methoden nicht zu quantifizieren vermögen, dann liegt es doch nahe, einfach die Menschen zu befragen, wie sie die Beanspruchung [...] subjektiv beurteilen.“ (Schmidtke, 2002, S. 6)

Zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung kann auf eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, in der Regel sind dies Ratingskalen, zurückgegriffen werden. Der generelle Vorteil von Ratingskalen zur Beanspruchungserfassung ist deren hohe Augenscheininvalidität.

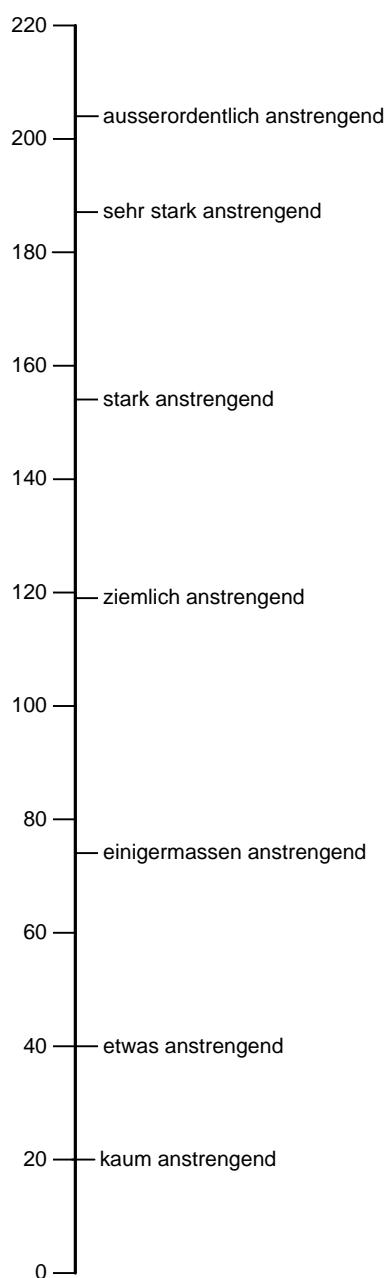
Einige häufig verwendete Verfahren werden im Folgenden dargestellt.

#### 3.2.1.1 Eindimensionale Skalen

Mit eindimensionalen Ratingskalen wird die Gesamtbeanspruchung einer Person erfasst. Es stehen viele unterschiedliche Skalen zur Beanspruchungserhebung zur Verfügung. Beispielsweise werden an dieser Stelle drei häufig in der Kraftfahrzeugforschung angewendete Instrumente vorgestellt.

### Rating Scale of Mental Effort (RSME)

Diese eindimensionale Skala wurde von Zijlstra (1993) entwickelt. Die Skala besteht in der Originalversion aus einem Kontinuum zwischen 0 und 150 mm mit Skalenabschnitten alle 10 mm. Auf der Skala sind verschiedene Ankerpunkte zwischen 3 (absolutely no effort) und 112 (extreme effort) zur empfundenen Beanspruchung angegeben. Die Skala misst die investierte Anstrengung, die zum Bewältigen einer Aufgabe, z. B. der Fahraufgabe, aufgewendet werden musste. Eine überarbeitete deutschsprachige Fassung (Anstrengungsskala, Abb. 3.5) verwendet eine Skala von 0 bis 220 (Eilers, Nachreiner & Hänecke, 1986). Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Durchführungsökonomie (Schütte, 2002).



**Abb. 3.5:** Anstrengungsskala (Eilers, Nachreiner & Hänecke, 1986, S. 217)

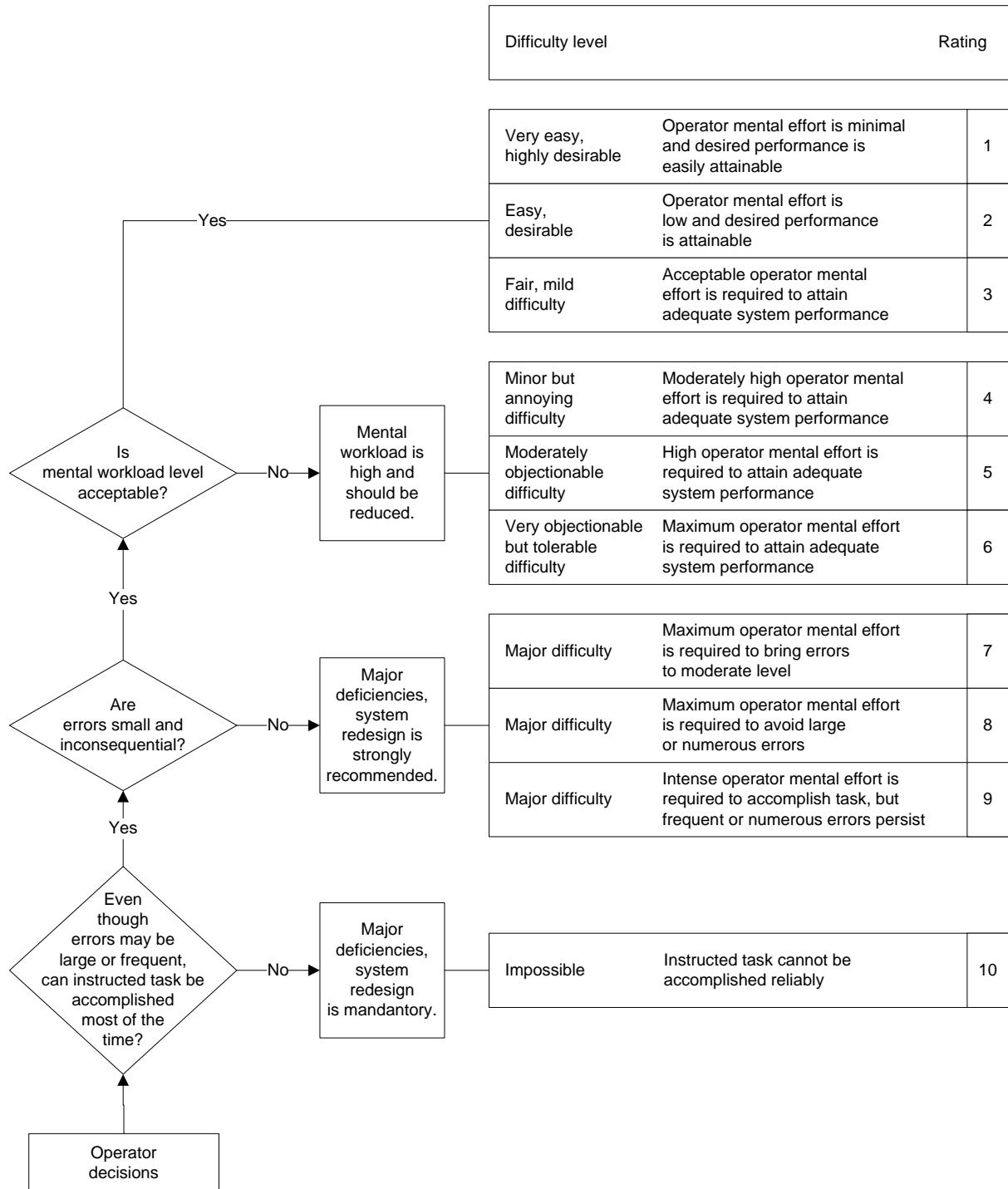
Verschiedene Studien, beispielsweise zum Fahren mit und ohne Autotelefon, belegten die Fähigkeit der RSME, zwischen Situationen mit und ohne Beanspruchung zu unterscheiden (De Waard, 1996). Zijlstra (1993) kommt zu dem Schluss:

„The Rating Scale Mental Effort proved to be a reliable and valid instrument for measuring psychological costs.“ (Zijlstra, 1993, S. 139) „[...] the RSME appears to provide very reliable estimations of differences in task demands both in laboratory research situations and in field studies.“ (Zijlstra, 1993, S. 149)

Andere von Eilers et al. (1986) durchgeführte Studien konnten nicht belegen, dass mit dieser Skala zwischen verschiedenen Beanspruchungsniveaus differenziert werden kann. Schütte (2002) gibt bei einer Betrachtung der Studien von Eilers et al. zu bedenken, dass die dort betrachtete Sensitivität sich lediglich auf Vigilanzsituationen bezieht und nicht die generelle Ungeeignetheit zur Diagnostizierbarkeit von Beanspruchungen belegt. Die Skala kann seines Erachtens nach eine visuelle Beanspruchung generell diagnostizieren, ist aber nicht in der Lage, geringe Beanspruchungsniveauunterschiede voneinander zu unterscheiden.

### **Modifizierte Cooper-Harper Skala (MCH)**

Ein sehr häufig eingesetztes Instrument zur Messung der Beanspruchung ist die von Cooper und Harper zur Beurteilung von Flugeigenschaften von Flugzeugen entwickelte Ratingskala (Casali & Wierwille, 1983; Wierwille & Connor, 1983). Auf der eindimensionalen 10-Punkte-Ratingskala können die Versuchspersonen in Form eines Entscheidungsbaums ihre Beanspruchung angeben. Ergebnis des Ratings ist die Gesamtbeanspruchung durch eine Aufgabe. Die modifizierte Skala (Abb. 3.6) wurde in Weiterentwicklung der Cooper-Harper-Skala so verändert, dass diese in erster Linie kognitive (in Abgrenzung zu physischer) Beanspruchung misst. Nach einer Evaluationsstudie von Hill, Iavecchia, Byers, Bittner, Zakland und Christ (1992) reagiert die Cooper-Harper-Skala sensitiv auf verschiedene Beanspruchungslevel. Die Skala wurde aber von den Probanden im Vergleich zu anderen Ratingskalen (z. B. NASA-TLX, SWAT) schlecht bewertet: Sie war schwierig auszufüllen und hatte eine geringe Augenscheininvalidität.

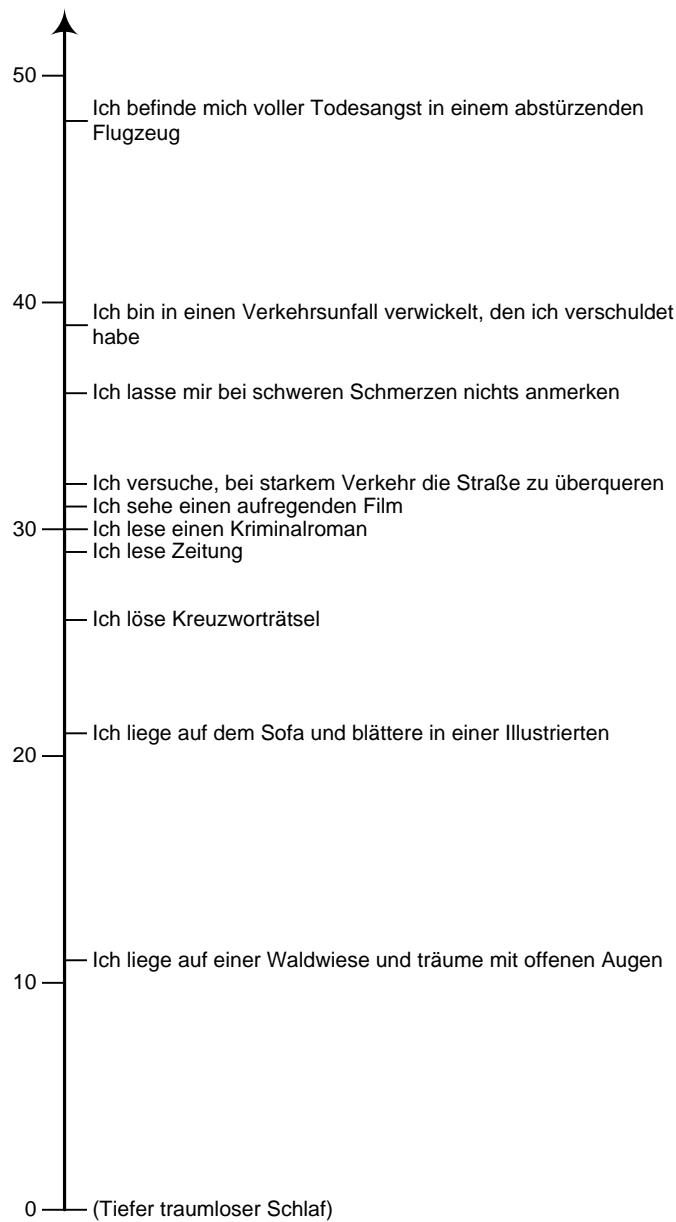


**Abb. 3.6: Modifizierte Cooper-Harper Skala (O'Donnell & Eggemeier, 1986, S. 42-10)**

### Skala der allgemeinen zentralen Aktiviertheit (AZA)

Die von Bartenwerfer (1969) entwickelte eindimensionale Skala der allgemeinen zentralen Aktiviertheit (AZA) besteht aus einer Achse mit zehn Ankerpunkten. Als Ankerpunkte sind Vergleichssituationen wie beispielsweise „Ich versuche, bei starkem Verkehr die Straße zu überqueren“ oder „Ich befindet mich voller Todesangst in einem abstürzenden Flugzeug“ vorgegeben (Abb. 3.7). Die Probanden werden aufgefordert, auf der Skala die Position mit einem Kreuz zu kennzeichnen, welche den Grad ihrer Aktiviertheit durch die durchgeföhrte Aufgabe

entspricht. In der Verkehrsorschung wurde die Skala beispielsweise zur Erfassung des Einflusses von Medikamenten auf die Aktiviertheit eingesetzt (De Waard, 1996).



**Abb. 3.7: Skala der AZA (Bartenwerfer, 1969, S. 206)**

Küting (1976) nahm eine Analyse von unterschiedlichen Forschungsmethoden, die in Studien im Straßenverkehr eingesetzt wurden, vor. Er kommt zu dem Schluss, dass die Skala von Bartenwerfer „für die Beanspruchungsmessung bei Fahrversuchen nicht sehr informativ zu sein [scheint].“ (Küting, 1976, S. 70).

De Waard und Brookhuis (1997) sind der Meinung, dass grundsätzlich eine eindimensionale Skala von Vorteil ist, wenn lediglich die Erhebung der Gesamtbeanspruchung von Interesse ist. Die Gesamtbeanspruchungsmessung mit diesen Instrumenten ist reliabler als die Erfassung auf der Grundlage von summierten Werten, die mit mehrdimensionalen Skalen erhoben wurden.

### 3.2.1.2 Mehrdimensionale Skalen

Sind bei der Erhebung der Beanspruchung nicht nur die Gesamtbeanspruchung, sondern auch Teilbeanspruchungen in Unterkategorien (z. B. visuelle Beanspruchung) von Interesse, kommen mehrdimensionale Skalen zum Einsatz (De Waard & Brookhuis, 1997). Eilers et al. (1986) hinterfragen sogar, ob die Erhebung einer psychischen Beanspruchung mit einer eindimensionalen Skala überhaupt sinnvoll ist. Sie resümieren, dass „mehrdimensionale Konstrukte und entsprechende Skalen zu deren Erfassung angemessener [sind].“ (Eilers et al., 1986, S. 223). Auch Hill et al. (1992) gehen von einer höheren Diagnostizität mehrdimensionaler gegenüber eindimensionaler Skalen aus. Eindimensionale Skalen sind nach Hendy, Hamilton und Landry (1993) bei einer Erfassung der Gesamtbeanspruchung von Vorteil, weil diese eine höhere Sensitivität bei der Messung verschiedener Aufgabenschwierigkeiten aufweisen. Außerdem sind diese Skalen einfacher in der Durchführung und der Auswertung. Auf sie sollte zurückgegriffen werden, wenn die Aussagekraft der mit dieser Methode erhaltenen Ergebnisse für die Fragestellung ausreichend groß ist (De Waard, 1996).

Zwei häufig in Kontext der Fahrerbeanspruchung verwendete mehrdimensionale Ratingskalen sind der NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration-Task Load IndeX) und die SWAT (Subjektive Workload Assessment Technique).

#### NASA-TLX

Der NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) ist eine weit verbreitete Methode zur Messung der subjektiven Beanspruchung (z. B. Hankins & Wilson, 1998; Jordan & Johnson, 1993; Nilsson & Alm, 1996; Piechulla et al., 2002; Rudin-Brown & Parker, 2004; Sullivan et al., 2004). Der ursprünglich für die Luftfahrt entwickelte Test wird häufig in Beanspruchungsuntersuchungen im Kfz-Bereich eingesetzt. Die multidimensionale Skala (siehe A.2.2) wurde 1988 von Hart und Staveland entwickelt und evaluiert. In einem ersten Schritt geben die Testpersonen ihre Beanspruchung anhand der folgenden sechs Subskalen an:

- Mental demand (Skalenendpunkte low/high)
- Physical demand (Skalenendpunkte low/high)
- Temporal demand (Skalenendpunkte low/high)
- Performance (Skalenendpunkte good/poor)

- Effort (Skalenendpunkte low/high)
- Frustration level (Skalenendpunkte low/high)

In einem zweiten Schritt bewerten die Personen in einem Paarvergleich, welche Faktoren den meisten oder den wenigsten Anteil an ihrer Gesamtbeanspruchung haben. Mit den Ergebnissen der Paarvergleiche werden die einzelnen Faktoren gewichtet und eine Gesamtbeanspruchung berechnet.

Evaluationsstudien (z. B. Hart & Staveland, 1988; Pfendler & Schütte, 2002) haben die Eignung des NASA-TLX als Methode zur Beanspruchungsmessung überprüft und belegt.

Pfendler & Schütte (2002) untersuchten die Abhängigkeit des Ergebnisses des NASA-TLX von dem dargebotenen Schwierigkeitsgrad einer simulierten Flugaufgabe. Sie kamen zu dem Schluss, dass mit dem NASA-TLX gut zwischen unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus differenziert werden kann. Hill et al. (1992) zeigten in ihrer Vergleichsstudie vier verschiedener Ratingskalen beim NASA-TLX eine hohe Sensitivität und Akzeptanz der Versuchspersonen gegenüber dem Instrument.

Einige Studien verwenden eine verkürzte Fassung dieses Fragebogens, den RTlx (**R**aw **T**ask **L**oad **I**ndex) (z. B. Byers, Bittner & Hill, 1989; Lansdown, 1997). Um eine kürzere und damit weniger zeitaufwendige Alternative zum NASA-TLX zu haben, wird bei dieser Version auf den Paarvergleich verzichtet und die Gesamtbeanspruchung aus dem Mittelwert der Beanspruchungen der Subskalen gebildet.

Eine Vergleichsstudie von Byers et al. (1989) bescheinigte dem RTlx, valide Ergebnisse zu liefern. Dagegen berichtete Piechulla (2004), dass der RTlx in einer Studie zur Beanspruchung im realen Straßenverkehr ungeeignet zur Differenzierung zwischen verschiedenen Verkehrsbedingungen war. Er unterschied lediglich zwischen Versuchspersonen mit verschiedenen Fahrerfahrungen: Führerscheinneulinge gaben ihre subjektive Beanspruchung generell – unabhängig von den Verkehrsbedingungen – höher an als erfahrene Fahrer.

Lansdown und Fowkes (1998) verwendeten den RTlx um den Beanspruchungsunterschied bei der Nutzung eines Entertainmentsystems, eines Stauwarnsystems und dem Fahren ohne Fahrerinformationssystems zu untersuchen. Es zeigte sich eine signifikant höhere mentale Gesamtbeanspruchung bei der Nutzung der beiden Systeme: Die Kontrollfahrt ohne System wies einen Beanspruchungswert von 24,0<sup>11</sup> ( $\sigma = 23,6$ ), die Fahrt mit Entertainmentsystem von 37,7 ( $\sigma = 18,6$ ) und mit Stauwarnsystem von 56,3 ( $\sigma = 18,7$ ) auf. Die Autoren führten außer-

---

<sup>11</sup> Es wurde eine Skala von 1-100 verwendet.

dem als Referenzmessung zu der mit dem NASA-RTLX ermittelten Beanspruchung eine Analyse des Blickverhaltens mittels Videoaufzeichnung der Versuchsfahrt durch. Es zeigten sich mit der Ratingskala gleiche Ergebnisse wie die mittels der zeitlich sehr aufwendig ermittelten Daten der visuellen Beanspruchung durch die Videoanalyse. Die Autoren resümieren, dass der NASA-RTLX eine einfacher durchzuführende und somit mit geringeren Kosten verbundene Alternative zur Beanspruchungsmessung mit Videoanalyse ist.

Eine Übereinstimmung der subjektiven Einschätzung der visuellen Ablenkung mit der Blickbewegungserfassung durch einen Versuchsleiter, der mit einem Spiegel die Blickhäufigkeit erfassen konnte, erbrachte auch eine Studie von Bertholomäi et al. (1990).

## SWAT

Diese Methode wurde auf der Grundlage des Conjoint-Managements für die Beanspruchungsmessung entwickelt (Reid, Shingledecker & Eggemeier, 1981). Per Definition setzt sich subjektive Beanspruchung in erster Linie aus drei Dimensionen zusammen:

- Zeitliche Beanspruchung (time load)
- Mentale Beanspruchung (mental effort load)
- Psychologischer Stress (psychological stress load)

Jede dieser Dimensionen besteht aus drei Ausprägungen (Abb. 3.8).

**Time Load**

1. No or very few interruptions in the planning, execution, or monitoring of tasks. Spare time exists between many tasks.
2. Task planning, execution and monitoring are often interrupted. Little spare time. Tasks occasionally occur simultaneously.
3. Task planning, execution and monitoring are interrupted most of the time. No spare time. Tasks frequently occur simultaneously. Considerable difficulty in accomplishing all tasks.

**Mental Effort Load**

1. Little conscious mental effort or planning required. Low task complexity such that tasks are often performed automatically.
2. Considerable conscious mental effort or planning required. Moderately high task complexity due to uncertainty, unpredictability, or unfamiliarity.
3. Extensive mental effort and skilled planning required. Very complex tasks demanding total attention.

**Psychological Stress Load**

1. Little risk, confusion, frustration, or anxiety exists and can be easily accommodated.
2. The degree of risk, confusion, frustration, or anxiety noticeably adds to workload and requires significant compensation to maintain adequate performance.
3. The level of risk, confusion, frustration, or anxiety greatly increases workload and requires tasks to be performed only with the highest level of determination and self-control.

**Abb. 3.8: Dimensionen und Ausprägungen des SWAT (Reid, Shingledecker & Eggemeier, 1981, S. 523)**

Die Durchführung untergliedert sich in zwei Schritte: In einem ersten Schritt, der Entwicklungsphase, werden dem Probanden mit einer dreidimensionalen Matrix alle möglichen 27 Kombinationen der Dimensionen und ihrer Ausprägungen präsentiert. Diese werden von den Probanden in eine Rangfolge gebracht und daraus die Beanspruchungsskala entwickelt. Im zweiten Schritt, der Bewertungsphase, wird dann eine erfolgte Beanspruchung anhand ihrer Ausprägung in den Dimensionen bewertet und dann mittels der im ersten Schritt erhaltenen Skala die Gesamtbeanspruchung ermittelt.

Die Eignung der SWAT zur Beanspruchungsmessung wurde in vielen Studien untersucht und belegt (siehe z. B. Hill et al., 1992; O'Donell & Eggemeier, 1986). Beispielsweise zeigten Verwey und Veltman (1996), dass die SWAT in der Lage ist, zwischen verschiedenen Beanspruchungsarten zu unterscheiden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die subjektiven Methoden des Selbstreports geeignet sind, die Fahrerbeanspruchung zu erfassen. Sie sind leicht anwendbar und erzeugen wenig Kosten. In der Regel kommen eindimensionale oder mehrdimensionale Ratingskalen, z. B. die RSME, die MCH und der NASA-TLX zum Einsatz. Die Entscheidung, welche Skala eingesetzt wird, muss auf der Grundlage der jeweiligen Fragestellung getroffen werden.

### 3.2.2 Performance

Bei diesen Methoden wird davon ausgegangen, dass die Steigerung einer Beanspruchung, die zusätzliche Ressourcen vom Fahrer benötigt, zu einer Veränderung des Fahrverhaltens – normalerweise zu einer Verschlechterung – führt (O'Donell & Eggemeier, 1986). Somit kann aus der Qualität der Leistung einer Person auf ihre Beanspruchung geschlossen werden. Beispielsweise zeigten Hicks und Wierwille (1979) in ihrer Studie, dass die *Performance bei der Primäraufgabe* empfindlich gegenüber der Messung der Beanspruchung war.

Grundsätzlich wird bei der Messung der Performance zwischen Maßen der Primäraufgabe (Kap. 3.2.2.1) und Maßen der Sekundäraufgabe (Kap. 3.2.2.2) unterschieden.

#### 3.2.2.1 Maße der Primäraufgabe

Bei den Maßen der Primäraufgabe geht es um die Erfassung der Leistung des Fahrers im Bezug auf eine Aufgabe, beispielsweise die Fahraufgabe, selbst. Da die Ergebnisse einer solchen Untersuchung eine direkte Relevanz aufweisen, werden Maße der Primäraufgabe häufig in der Evaluation von neuen Systemen für das Kraftfahrzeug eingesetzt (z. B. Dingus et al., 1997; Sullivan et al., 2004). Die Verschlechterung der Fahrperformance durch die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems hat einen unmittelbaren Einfluss auf den weiteren Entwicklungsprozess bzw. die Einführung eines solchen Systems.

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 dargestellt, kann die Primäraufgabe eine Erhöhung der Beanspruchung nur dann messen, wenn die Ressourcen des Fahrers nicht mehr ausreichen, um die zusätzliche Beanspruchung zu kompensieren. Nur dann kommt es zu einer Verschlechterung der Primäraufgabe. Somit kann auch nicht unterschieden werden, ob einer der Probanden sich bereits am äußersten Limit seiner Kapazitäten befindet, während ein anderer Proband nur sehr

wenig beansprucht ist, da beide noch in der Lage sind, die Primäraufgabe zu bewältigen (De Waard, 1996). O'Donnell und Eggemeier (1986) gehen dagegen davon aus, dass Maße der Primäraufgabe nur auf sehr hohe Beanspruchungen reagieren. De Waard (1996) fordert, bei Verwendung der Primäraufgabe als Beanspruchungsmaß immer noch weitere Methoden der Beanspruchungsmessung ergänzend heranzuziehen, um valide Ergebnisse zu erhalten.

Zur Messung der Fahrperformance werden verschiedene Parameter wie *Spurhaltung*, *Abstandsverhalten* (zu vorausfahrenden Fahrzeugen), *Fahrgeschwindigkeit* und *Lenkverhalten* untersucht. Erfasst werden diese beispielsweise durch das Abgreifen allgemeiner Fahrzeugdaten.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhebung dieser Parameter ist die Beobachtung während der Fahrt durch die Untersuchungsleitung, die das Fahrverhalten bewertet. Außerdem können „Experten“ wie beispielsweise Fahrlehrer zur Beurteilung der Performance herangezogen werden (z. B. Kostka, Dahmen-Zimmer, Piechulla & Zimmer, 2001; Engeln, König & Wittig, 2004). In der Feldforschung werden Fahrlehrer teilweise aus Sicherheitsgründen eingesetzt, da diese in der Lage sind, während der Versuchsfahrt einzugreifen, um einen Unfall zu verhindern. Diese Fahrlehrer können Leistungen in der Primäraufgabe beurteilen. Vorteile hierbei sind die große Erfahrung von Fahrlehrern im Straßenverkehr und ihre Fähigkeit, in der Regel die Performance besser bewerten zu können als ein Laie. Außerdem können Fahrlehrer durch ihre Erfahrung und die Möglichkeit, in die Fahrt des Probanden einzugreifen, Fehler bis zu einem gewissen Punkt zulassen. Ein Nachteil der Beobachtung ist mangelnde Objektivität durch die individuelle Einschätzung des Fahrverhaltens durch eine Person. Wie bei allen qualitativen Forschungsmethoden sind daher eine gute Versuchsplanung mit standardisierten Beobachtungskategorien sowie eine Schulung des durchführenden Beobachters unerlässlich. Ein für diese Zwecke anwendbares Instrument ist das Regensburger Fahrfehlerbeobachtungsinventar, welches zur Beobachtung sieben Fehlerkategorien vorgibt. Beispielsweise sind dies eine falsch gewählte Fahrgeschwindigkeit (zu hoch oder zu niedrig) sowie Probleme im Abstand bzw. der Spurhaltung (mangelnder oder stark schwankender Längs- oder Querabstand) (siehe auch Kostka et al., 2001). Die Fehler werden jeweils mit einer sechsstufigen Skala gewichtet<sup>12</sup>. Eine Evaluation des Fahrfehlerbeobachtungsbogens von Kostka et. al. (2001) ergab, dass mit der Beobachtung zusätzliche Beanspruchungen im Kfz ermittelt werden können. Da aber nur Fahrfehler detektiert werden können und diese relativ selten sind, empfehlen die Autoren dieses Verfahren nur zur Ergänzung zu anderen Methoden, wie beispielsweise zur Fahrdatenerfassung, anzuwenden.

---

<sup>12</sup> Skala von 1 (Auffälligkeit) bis 6 (Eingriff erforderlich)

Die oben bereits genannten Parameter der Fahrperformance, die durch objektive Fahrdaten ermittelt werden, können in die Kategorien *Maße der Querregulation* und *Maße der Längsregulation* eingeordnet werden. Im Folgenden werden die in der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen gebräuchlichsten Parameter dargestellt und Beispiele für Studien gegeben, in denen diese Methoden angewendet wurden.

## **Maße der Querregulation**

### (1) Spurhaltemaße

Ein häufig in der Kraftfahrzeugforschung untersuchtes Maß der Primäraufgabe ist die laterale Abweichung (*Lateral deviation*) (z. B. Barham, 2001; Dingus et al., 1997; Engström, Johansson & Östlund, 2005; Rudin-Brown & Parker, 2004; Zwahlen et al., 1988). Grundlage ist die Annahme, dass die Beanspruchung des Fahrers eine Auswirkung auf die Qualität der Spurhaltung hat.

Der am häufigsten verwendete Parameter ist die *Standardabweichung der lateralen Position* (*Standard Deviation of Lateral Position, SDLP*). Dabei wird in der Regel die Standardabweichung aller gemessenen Abstände vom Mittelpunkt des Fahrzeugs zum linken oder rechten Fahrbahnrand ermittelt. Die SDLP steht in direktem Zusammenhang zur Fahrerbeanspruchung. Beispielsweise zeigte eine Studie (De Waard & Brookhuis, 1997) ein Ansteigen dieses Parameters bei Fahrten auf einer stark befahrenen Straße, wenn gleichzeitig telefoniert wurde. Rudin-Brown & Parker (2004) fanden eine größere Varianz der lateralen Abweichung bei der Nutzung von ACC als beim Fahren ohne das System. Auch Engström et al. (2005) beobachteten eine höhere Standardabweichung der lateralen Position bei der Bearbeitung einer visuellen Aufgabe auf einem Display.

Ein weiterer, seltener herangezogener Parameter der lateralen Abweichung ist die *Spurüberschreitung* (LANEX). Diese ist beispielsweise definiert als der Anteil der Fahrzeit, an dem ein Fahrzeugteil sich außerhalb der Fahrbahn befindet. Das Fahrzeugteil kann je nach Definition z. B. die Außenseite eines Reifens oder die Hälfte des Fahrzeugs sein (Knappe, Keinath & Meinecke, 2006). Dingus et al. (1997) zeigten, dass es bei Fahrern, die erstmalig ein Navigations- und Informationssystem nutzen, zu einem häufigeren ungeplanten Verlassen der Fahrbahn kam als bei Fahrern, die im Umgang mit dem System geübt waren. Engström et al. (2005) fanden dagegen keinen Effekt der Beanspruchung durch eine Aufgabenbearbeitung und diesem Parameter. Barham (2001) beschrieb eine geringere Anzahl von Spurüberschreitungen bei der Nutzung eines passiven Nachtsichtsystems als beim Fahren ohne System, so dass die Nutzung das Fahrverhalten im Hinblick auf die Fahrspurhaltung positiv beeinflusste: Bei schlechten Sichtbedingungen fuhren eine größere Anzahl von Versuchspersonen häufiger auf die Gegenfahrbahn wenn sie kein FIR-Nachtsichtsystem zur Verfügung hatten als Pro-

banden mit dem Fahrerassistenzsystem. Des Weiteren zeigten mehr Versuchspersonen ohne das System eine größere absolute Abweichung von der Fahrbahnmitte.

Dieser Parameter weist eine hohe Augenscheininvalidität auf, da hier der direkte Zusammenhang zwischen Beanspruchung und einer konkreten Gefährdungssituation (Verlassen der Fahrbahn) gemessen wird (Knappe et al., 2006).

## (2) Lenkmaße

Weitere Maße der Querregulation ergeben sich aus dem Lenkverhalten des Fahrers. Das am häufigsten verwendete Maß des Lenkverhaltens ist die *Standardabweichung des Lenkwinkels* (*Standard Deviation of Steering Angle, SDST*), bei der die Standardabweichung über alle aufgezeichneten Lenkwinkel bestimmt wird. In Abhängigkeit der Anwesenheit von zusätzlichen Aufgaben oder Ablenkungen schenken Fahrer der Lenkaufgabe nicht genügend Aufmerksamkeit. So kann es zu Phasen ohne eine Veränderung des Lenkmoments kommen. Die Standardabweichung des Lenkmoments ist somit ein Indikator für mentale Beanspruchung (De Waard, 1996). Brookhuis, de Vries und de Waard (1991) untersuchten den Zusammenhang zwischen dem Führen von Telefongesprächen während der Fahrt und der Standardabweichung des Lenkwinkels. Das Ergebnis zeigte, dass es während des Wählens zu einer signifikant höheren Standardabweichung des Lenkwinkels kam. Der Parameter ist stark von der gefahrenen Versuchsstrecke abhängig. Somit ist eine Interpretation des Absolutwertes der SDST oder ein Vergleich unterschiedlicher Strecken nicht möglich (Knappe et al., 2006).

Ein weiteres Maß des Lenkverhaltens ist die *Rate der Lenkwinkelrichtungsänderungen* (*Steering Wheel Reversal Rate, SRR*). Sie ist definiert als die Anzahl der Richtungsänderungen in der Lenkradbewegung ab einer bestimmten Winkeldifferenz, der Abstandsgröße (engl. gap size) pro Zeiteinheit. (Knappe et al., 2006) Beispielsweise fanden McLean und Hoffmann (1975) eine Erhöhung der Rate der Lenkbewegungen bei höheren Aufgabenschwierigkeiten. Spätere Untersuchungen (z. B. Macdonald & Hoffmann, 1980) bestätigten diesen Zusammenhang nicht. Hier führten stärkere Beanspruchungen im Sinne einer Überlastung, wie bereits oben beschrieben, auch zu weniger Lenkbewegungen. Die Autoren gehen davon aus, dass die Richtung der Veränderung von der Aufgabenschwierigkeit und der Kapazität des Fahrers, diese zu bewältigen, abhängt. Dieses Maß weist eine geringere Streckenabhängigkeit auf als die SDST, da die Extrempunkte in einem definierten Zeitintervall bestimmt werden.

## Maße der Längsregulation

Ein in der empirischen Forschung zur Beanspruchungsmessung verwendetes Maß der Längsregulation ist das *Abstandsverhalten* des Fahrers zu einem vorausfahrenden Fahrzeug (z. B.

Brookhuis, De Waard & Mulder, 1994; Hoedemaeker & Brookhuis, 1998; Lansdown et al., 2004).

Lansdown et al. (2004) zeigten, dass die Beanspruchung durch eine Zusatzaufgabe beim Fahren im Simulator zu einer Verminderung des Abstands zu einem anderen Fahrzeug führte. Mit dem Parameter *Abstandsverhalten* war es möglich, zwischen verschiedenen Aufgabentypen zu differenzieren.

Auch die *Fahrgeschwindigkeit* kann als Maß der Längsregulation für den Grad einer Beanspruchung herangezogen werden (z. B. Cnossen, Rothengatter & Meijman, 2000; Dingus et al., 1997; Engström et al., 2005; Labiale, 1996; Richter, Wagner, Heger & Weise, 1998; Sullican et al., 2004). Beispielsweise steigern Fahrer bei geringerer Beanspruchung (und aufkommender Müdigkeit) die Fahrgeschwindigkeit, um ihren Level der Aufmerksamkeit konstant zu halten. Bei einer höheren Beanspruchung, beispielsweise beim Telefonieren im Fahrzeug, wird dagegen die Geschwindigkeit reduziert (De Waard & Brookhuis, 1997; Dingus et al., 1997). Auch bei einer Befragung gaben die Probanden an, ihre Geschwindigkeit zu reduzieren, wenn die Beanspruchung durch eine komplexe Streckeninformation, die ihnen auf einem Bildschirm dargeboten wird, zu hoch wird (Labiale, 1996).

Richter et al. (1998) zeigten, dass die Fahrgeschwindigkeit sehr gut auf der Landstraße zwischen verschiedenen Streckenschwierigkeiten differenzierte. Dagegen fanden Verwey und Veltman (1996) keinen Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit und Beanspruchung. Engström et al. (2005) untersuchten den Einfluss einer visuellen Beanspruchung in Form einer Aufgabe, die auf einem Display im Fahrzeug dargeboten wurde, auf die Fahrgeschwindigkeit. Es zeigte sich eine signifikante Geschwindigkeitsreduktion bei der Aufgabenbearbeitung.

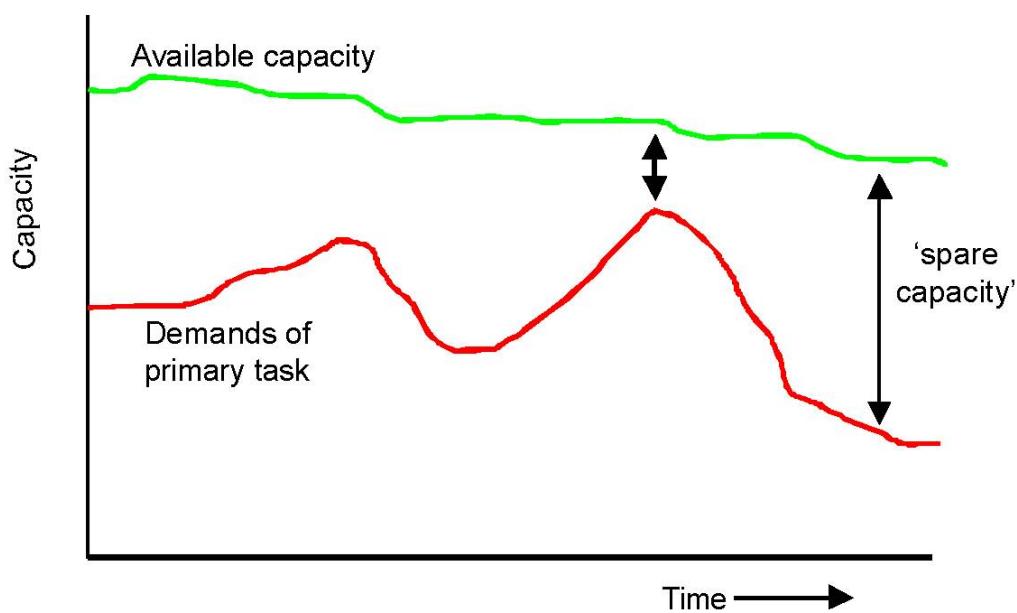
Auch das *Bremsverhalten* bzw. die *Varianz der longitudinalen Beschleunigung* kann als Beanspruchungsparameter herangezogen werden (Dingus et al., 1997; Lansdown et al., 2004). Bei starker Beanspruchung, insbesondere wenn ihr Blick von der Straße gelenkt wird, sind Fahrer weniger aufmerksam, was zu härterem Bremsen bei unerwarteten Situationen führt. Somit ist die Geschwindigkeitsabnahme größer als in Situationen mit normaler Aufmerksamkeit. Auch eine hohe Varianz der Beschleunigung steht im Zusammenhang mit erhöhter Aufgabenschwierigkeit, da geringere Ressourcen für die Geschwindigkeitsüberwachung zur Verfügung stehen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts ADAM (Advanced Driver Attention Metrics) wurden in einem Feldversuch mit 30 Probanden die Auswirkungen verschiedener Nebenaufgaben, wie beispielsweise Navigationsziel eingeben, Kassette wechseln, Klimaanlage einstellen, Kaugummi auspacken, auf unterschiedliche Parameter des Fahrverhaltens untersucht (Heß, 2005).

Es zeigte sich, dass Kriterien für die *Spurhaltung* sehr gut zwischen den verschiedenen Nebenaufgaben differenzierten. Dagegen waren die Parameter *Abstandshaltung* und *Fahrgeschwindigkeit* als Kriterien nicht geeignet.

### 3.2.2.2 Maße der Sekundäraufgabe

Ein ebenfalls häufig angewendetes Verfahren zur Beanspruchungsmessung ist die Sekundäraufgabenmethode, bei welcher der Fahrer neben der primären Fahraufgabe eine zweite Aufgabe ausführen muss (z. B. Bengler, Praxenthaler, Theofanou & Eckstein, 2004; Harms, 1991; Harms & Patten, 2003; Jahn, Oehme, Krems & Gelau, 2005; Verwey, 2000). In der Regel ist die Primäraufgabe die Aufgabe von zentralem Interesse. Die Beanspruchung durch diese Aufgabe wird anhand der Leistung in der Bearbeitung der Sekundäraufgabe, beispielsweise eine Rechenaufgabe, eine Trackingaufgabe, eine Aufgabe zur Reaktionszeit oder eine Gedächtnisaufgabe, erfasst. Die Leistung in einer Sekundäraufgabe spiegelt die Restkapazität wider, die neben der Bewältigung der Primäraufgabe zur Verfügung steht (O'Donell & Eggermeier, 1986). Abbildung 3.9 zeigt den Zusammenhang der Beanspruchung durch die Primäraufgabe und die durch die Sekundäraufgabe gemessene Restkapazität.



**Abb. 3.9: Nutzung einer Sekundäraufgabe zur Messung der Restkapazität (Farmer & Brownson, 2003, S. 5)**

Grundsätzlich wird bei der Durchführung einer Untersuchung mit der Methode der Sekundäraufgabe zwischen zwei Prinzipien unterschieden, dem *Paradigma der Sekundäraufgabe (Lo-*

*ading Task Paradigma) und dem Paradigma der Primäraufgabe (Subsidiary Task Paradigma):*

- *Paradigma der Sekundäraufgabe:* Der Proband wird aufgefordert, die Sekundäraufgabe zu bearbeiten auch wenn dadurch die Bearbeitung der Primäraufgabe leidet.
- *Paradigma der Primäraufgabe:* Der Proband wird instruiert, die Primäraufgabe zu bearbeiten. Falls die Ressourcen für die gleichzeitige Bearbeitung der Sekundäraufgabe nicht ausreichen, soll diese schlechter ausgeführt werden.

Das häufiger angewendete Prinzip ist das *Paradigma der Primäraufgabe*. Insbesondere bei Feldstudien im Kraftfahrzeugbereich ist eine Versuchsdurchführung nach dem *Paradigma der Sekundäraufgabe* aus Sicherheitsgründen überhaupt nicht möglich.

Rockwell (1988) geht davon aus, dass die Anzahl der Blickzuwendungen pro Zeit ein sensitives Maß für die Beanspruchung ist. Entsprechend des Paradigmas der Primäraufgabe würde somit die Erhöhung der Beanspruchung durch die Fahraufgabe zu einer Reduktion der Blicke auf die Sekundäraufgabe führen.

Da Autofahren überwiegend eine visuelle Aufgabe ist, fordert de Waard (1996) bei Untersuchungen im Kraftfahrzeug visuelle Sekundäraufgaben darzubieten. Die Validität beispielsweise einer auditiven Aufgabe wird angezweifelt.

Harms (1991) untersuchte mit einer Rechenaufgabe als Sekundäraufgabe den Einfluss der Verkehrssituation auf die Fahrerbeanspruchung. Es zeigte sich, dass es bei erhöhter Beanspruchung (Fahren in Ortschaften) sowohl zu einer reduzierten Fahrgeschwindigkeit als auch zu einer längeren Bearbeitungszeit der Sekundäraufgabe kam. Eine geringe Beanspruchung (Fahren auf einem Highway) führte zu schnellen Fahrgeschwindigkeiten und zu einer hohen Performance in der Rechenaufgabe. Die Autorin resümiert, dass die Sekundäraufgabenmethode sensitiv auf Variationen in der Fahrerbeanspruchung, die durch Unterschiede in der Schwierigkeit der Fahraufgabe resultieren, reagiert.

Eine längere Bearbeitungszeit der Sekundäraufgabe sollte zu beobachten sein, wenn durch die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems eine reduzierte Beanspruchung durch die Primäraufgabe erreicht wird. Dies beobachteten Rudin-Brown & Parker (2004) bei der Nutzung von ACC.

Ein Sonderfall der Sekundäraufgabe ist das Heranziehen einer Teilaufgabe der Primäraufgabe mit geringerer Priorität als so genannte eingebettete Sekundäraufgabe („embedded secondary task“). Beim Fahren kann dies beispielsweise die Häufigkeit der Blicke in den Rückspiegel sein. Diese sollten bei höherer Beanspruchung geringer werden.

Bei der Anwendung der Sekundäraufgabe zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, von denen zwei häufig in Labor- und Simulatorstudien eingesetzte, die Peripheral Detection Task (PDT) und die Okklusionsmethode, im Folgenden dargestellt werden. Beide Methoden werden aus Sicherheitsgründen in der Regel nicht in Feldstudien angewendet. Ein Beispiel für den Einsatz der PDT im Feld wird bei deren Darstellung beschrieben.

### **Peripheral Detection Task (PDT)**

Die PDT wurde von Martens und van Winsum (2000) als Sekundäraufgabe zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung entwickelt und in vielen empirischen Studien angewendet (z. B. Harms & Patten, 2003; Jahn et al., 2005; Rösler, Oehme, Jahn, Baumann & Krems, 2004). Den Probanden werden während einer Fahrt Reize, meist rot leuchtende Dioden, in ihrem peripheren Blickfeld dargeboten. Wenn sie diese wahrnehmen, sollen sie möglichst schnell auf einen Taster drücken. Dabei werden richtige Treffer und Reaktionszeit erfasst. Eine höhere Beanspruchung führt zu einer geringeren Anzahl richtig detekter Reize und zu längeren Reaktionszeiten (Martens & van Winsum, 2000).

Martens und van Winsum (2000) zeigten mit einer Simulatorstudie, dass die PDT sensitiv auf Beanspruchungen sowohl durch Veränderungen der Aufgabenschwierigkeit der primären Fahraufgabe (z. B. Überholvorgänge, Bremsen eines vorausfahrenden Fahrzeugs) als auch durch ein Fahrerassistenzsystem reagierte.

Jahn et al. (2005) führten eine Feldstudie mit 49 Taxifahrern durch. Es wurden lediglich professionelle Fahrer ausgewählt, da von ihnen ein sicheres Fahren auch bei Fahren nach einem Navigationssystem und dem gleichzeitigen Leisten einer visuellen Sekundäraufgabe erwartet werden konnte. Um die Sensitivität der PDT zu untersuchen, fuhren die Probanden Streckenabschnitte mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad und nutzten zwei Navigationsgeräte, die sich in der Displaygröße und in der Art der Informationsdarstellung unterschieden. Es zeigte sich die Sensitivität der PDT zu den Anforderungen der Fahraufgabe. Zusätzlich reagierte die PDT sensitiv auf Beanspruchungsspitzen. Die Navigationsgeräte hatten einen geringeren Einfluss auf die Beanspruchung als die Verkehrssituationen. Mit Hilfe der PDT konnte nicht zwischen den beiden Displayarten unterschieden werden.

### **Okklusionsmethode**

Die Okklusionsmethode ist eine häufig verwendete Methode zur Messung der visuellen Ablenkung im Labor (z. B. Gelau, Keinath, Baumann, Bengler & Krems, 1999; Hicks & Wierwille, 1979; Krems et al., 2004; Rösler et al., 2004). Mit der Methode wird die durch die Fahraufgabe (Primäraufgabe) resultierende Unterbrechung der Bearbeitung einer Sekundär-

aufgabe simuliert. Die Methode variiert systematisch zwei Parameter: Erstens die Zeit, in der eine relevante Information sichtbar ist (Betrachtungszeit) und zweitens die Zeit, in der sie nicht zu sehen ist (Okklusionszeit). Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Versuchsdurchführung:

- 1) Die Probanden entscheiden selbst, wie viel Betrachtungszeit sie für eine fehlerfreie Informationsaufnahme benötigen (selbstgewählte Präsentationszeit).
- 2) Die dargebotenen Informationen werden zeitlich limitiert in mehreren Präsentations- und Okklusionszyklen dargeboten und die Genauigkeit und Güte der Informationsaufnahme erfasst (vorgegebene Präsentationszeit).

Beispielsweise könnten Versuchspersonen unterschiedliche Displays dargeboten werden, von denen sie Informationen ablesen müssen. Die selbstgewählte Präsentationszeit der Probanden gibt Auskunft darüber, wie viel Zeit sie zur Erfassung der Informationen benötigen. Damit können die Displays im Hinblick auf ihre Sicherheitsrelevanz bewertet werden.

In Studien untersuchten Gelau et al. (1999), ob mit der Okklusionsmethode zwischen unterschiedlichen komplexen Displaydarbietungen Unterschiede gemacht werden kann. Die Ergebnisse zeigten eine Auswirkung von Präsentationsdauer und Komplexitätsgrad auf die Fehlerwahrscheinlichkeit. Somit war es möglich, zwischen verschiedenen Komplexitäten zu differenzieren.

In einer weiteren Validierungsstudie wurden die mittels Okklusionsmethode erhaltenen Ergebnisse mit einer realen Fahrsituation bzw. mit der PDT verglichen. Es ergab sich eine hohe Korrelation zwischen Okklusionsmethode und PDT. Der Vergleich der Bearbeitung einer Aufgabe im Stand und während der Fahrt ergab ähnliche Ergebnisse. Die Autoren folgerten daher, dass mit der Okklusionsmethode reale Fahrbedingungen abgebildet werden können (Krems et al., 2004). Sie bewerten die Methode als geeignet, reale Fahrbedingungen zu simulieren und Displays zu bewerten. Problematisch ist, dass es in der Okklusionsphase lediglich zu einer Unterbrechung des Wahrnehmungsvorgangs, nicht aber zu einer Zuwendung zu einem anderen Objekt kommt. Somit wird eine reale Fahrt nur in Teilen simuliert. Die Autoren empfehlen darum, die Methode lediglich als Screening-Verfahren einzusetzen. Damit könnten dann große Unterschiede identifiziert und ungeeignete MMI-Displays aussortiert werden.

De Waard (1996) problematisiert allgemein die Anwendung von Sekundäraufgaben zur Beanspruchungsmessung. Seiner Meinung nach ist die Darbietung einer Sekundäraufgabe dann problematisch, wenn die Anforderungen der Primäraufgabe so hoch sind, dass eine Bearbeitung der Sekundäraufgabe gar nicht möglich ist. Dies kann sicherlich zu einem Problem bei Feldversuchen werden, insbesondere wenn die Fahrer noch nicht an das Versuchsfahrzeug bzw. an ein neues Fahrerassistenzsystem gewöhnt sind. Eine Beschäftigung mit einer weiteren Aufgabe wäre für die Versuchspersonen ein Sicherheitsrisiko. Eine gegensätzliche Wirkung

könnte eine Sekundäraufgabe im Simulatorversuch haben: So kann entsprechend dem Paradigma der Primäraufgabe eine Versuchsperson aufgefordert werden, die Sekundäraufgabe nur dann zu bearbeiten, wenn dies nicht zur Verschlechterung der Fahraufgabe führt. Trotzdem ist es denkbar, dass der Proband dennoch versucht, eine möglichst gute Leistung in der Sekundäraufgabe zu bringen, insbesondere weil eine schlechte Performance in der Primäraufgabe im Fahrsimulator keine Relevanz im Hinblick auf die Sicherheit hat.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen zu performancebasierten Methoden zeigen eine generelle Eignung dieser Verfahren zur Erhebung der Fahrerbeanspruchung. Bei der Erfassung der Performance können Maße der Primäraufgabe und Maße der Sekundäraufgabe herangezogen werden. Häufiger werden bei Evaluationsstudien im Kfz-Bereich die Maße der Primäraufgabe verwendet, bei denen die Leistung des Fahrers, z. B. bei der Fahraufgabe, erfasst wird. Bei den Maßen der Sekundäraufgabe muss der Fahrer neben der primären Fahraufgabe eine weitere Aufgabe ausführen und die Leistung in dieser Aufgabe wird zur Erfassung der Gesamtbeanspruchung herangezogen. Aus Sicherheitsgründen werden diese Methoden nicht in Feldstudien im realen Straßenverkehr eingesetzt.

### 3.2.2.3 Referenzmessungen

Eine weitere Möglichkeit der Erhebung der Beanspruchung ist die Messung der Leistung in der Bearbeitung einer Aufgabe vor und nach der Beanspruchung. Ein Beispiel hierfür ist die Messung der Flimmerverschmelzungsfrequenz. Veränderungen in der Leistung der Aufgabe sind ein Indikator für die Beanspruchung durch die Primäraufgabe. Referenzmessungen werden aber in der Kraftfahrzeugforschung nur sehr selten eingesetzt und sind eher in der Arbeits- und Organisationspsychologie von Bedeutung (De Waard, 1996).

## 3.2.3 Physiologie

Es existiert eine Vielzahl physiologischer Parameter, die für eine Beanspruchungsmessung herangezogen werden können. Es ist nicht möglich, mit diesen Verfahren eine Beanspruchung direkt zu messen, sondern es wird davon ausgegangen, dass aus einer Beanspruchung eine Veränderung der physiologischen Messwerte resultiert. Physiologische Parameter können somit als Indikatoren für eine Beanspruchung verstanden werden. Wichtig bei der Erhebung physiologischer Parameter ist die Notwendigkeit, mehrere Maße gleichzeitig zu erfassen, um richtig interpretierbare Ergebnisse zu erhalten (Frieling & Sonntag, 1987).

Im Folgenden (Kap. 3.2.3.1-3.2.3.5) werden die physiologischen Maße vorgestellt, die häufig in der Beanspruchungsforschung im Kfz eingesetzt werden. Eine theoretische Einführung in

die Zusammenhänge menschlichen Verhaltens und physiologischer Prozesse und eine Übersicht über Messmethoden der Psychophysiologie ist in Schandry (1989) zu finden.

### 3.2.3.1 Kardiovaskuläre Aktivität

Aufgabe des Herzkreislaufsystems ist der Bluttransport zu den Organen. Unterschiedliche Beanspruchungen des Körpers führen auch zu einem veränderten Versorgungsbedarf der einzelnen Organe und somit auch zu einer Änderung der Arbeitsleistung des Herzkreislaufsystems (Schandry, 1989).

Aufgezeichnet wird bei dieser Methode das Elektrokardiogramm (EKG), welches aus einer Wellenform besteht, die sich bei jedem Herzzyklus wiederholt. Aus dem EKG lassen sich verschiedene kardiologische Parameter wie beispielsweise die Herzratenvariabilität und das inter-beat intervall (ibi) bestimmen. Das am häufigsten verwendete Maß ist die Herzfrequenz, die „als der klassische Beanspruchungsparameter der Verkehrspychologie angesehen werden [kann].“ (Hering, 1999, S. 48).

#### Herzfrequenz

Ein sehr häufig in der Beanspruchungsmessung erfasster Parameter ist die *Herzfrequenz* (auch *Herzrate*), bei der die Herzschläge pro Minute (engl.: bpm = beats per minute) ermittelt werden. Sowohl eine Veränderung von physischer als auch psychischer Beanspruchung führt zu einer Änderung der Herzfrequenz. Gründe der häufigen Anwendung dieser Methode liegen in der geringen Artefaktanfälligkeit und der einfachen Durchführung. Zur Erfassung der Herzfrequenz können verschiedene Verfahren angewendet werden (Schandry, 1989):

- 1) Brustableitung durch Anbringen von Elektroden auf der Brust (in der Regel Einthoven-Ableitung II)
- 2) Einsatz eines Photoplethysmographen, der in Form eines Clips am Ohrläppchen angebracht wird

Die beiden Verfahren haben verschiedene Vorteile. Bei der Brustableitung ist ein festeres Anbringen der Elektroden möglich, so dass es zu keinen Störungen der Elektroden durch Bewegungen kommt. Beim Ohrclip sind Störungen möglich, da bei Bewegungen die Gefahr eines Verrutschens vorhanden ist. Ein großer Vorteil des Clips ist dagegen die einfache Befestigung am Ohr. Somit muss im Gegensatz zur Brustableitung nichts unter der Kleidung angebracht werden, was angenehmer für die Versuchspersonen ist.

Viele Untersuchungsergebnisse belegen die Eignung der kardiologischen Parameter für die Beanspruchungserhebung bei Studien im Kraftfahrzeugsbereich (z. B. De Waard & Brookhuis,

1997; Felnémenti & Boon-Heckel, 1986; Fengler, 1972; Noguchi, 1997; Richter et al., 1998). Diese Parameter sind die bedeutsamsten Biosignale der empirischen Forschung:

„Without no doubt, heart rate and some derived parameters (heart rate variability) have proven to be most useful in the field.“ (De Waard & Brookhuis, 1997, S. 165)

Andere Untersuchungsergebnisse finden keinen oder nur einen geringen Zusammenhang zwischen verschiedenen Beanspruchungssituationen und der Herzfrequenz bzw. der Herzfrequenzvariabilität (z. B. Engström et al., 2005; Helander, 1978; Hicks & Wierwille, 1979; Nickel, Nachreiner, Zdobych & Yanagibori, 1998; Nickel, Eilers, Seehase & Nachreiner, 2002; Veltman & Gaillard, 1996). Ein Problem der Herzfrequenz ist, dass sie zur Messung kurzzeitiger Beanspruchungen nicht gut geeignet ist, da sie träge reagiert und auch nur langsam wieder auf das Ausgangsniveau zurückgeht. Nickel et al. (2002) gehen davon aus, dass mit der Herzfrequenz bzw. der Herzfrequenzvariabilität „eher unterschiedliche Personen als unterschiedliche Belastungsbedingungen differenziert werden können.“ (Nickel et al., 2002, S. 22). Die Parameter messen weniger aufgabenspezifische Ergebnisse als Effekte, die beispielsweise durch die jeweilige Tageszeit bedingt sind.

Beeinflusst wird das Signal bei der Ableitung u. a. durch Bewegungsartefakte und durch Störsignale anderer physiologischer Größen, beispielsweise der Atmung (vgl. Kap. 3.2.3.5).

## Blutdruck

Ein weiterer Parameter der kardiovaskulären Aktivität, welcher zur Beanspruchungsmessung herangezogen wird, ist der Blutdruck. Studien belegen einen Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Blutdruck (z. B. Gruber, Scheuch, Reuschel, Schreinicke, Schmidt & Hentschel, 1986). Bis vor einiger Zeit war eine kontinuierliche Blutdruckmessung nur invasiv möglich, d. h. der Druck wurde mittels einer in eine Arterie eingebrachten Kanüle gemessen (Schandry, 1989). Somit war dieses Verfahren für psychophysiologische Studien im Kfz ungeeignet. Möglich war dagegen der Einsatz diskontinuierlich arbeitender Messmethoden, durch die aber eine kurzfristige Änderung des Blutdrucks nicht erfasst werden kann. Die am häufigsten verwendete Methode zur diskontinuierlichen Blutdruckmessung ist das Riva-Rocci-Verfahren, bei der über eine Manschette am Arm unterschiedlicher Druck auf die Arterie ausgeübt wird und dann der systolische<sup>13</sup> und diastolische<sup>14</sup> Wert des Blutdrucks abgelesen werden kann.

Seit den 1960er Jahren wurden verschiedene Möglichkeiten der kontinuierlichen, nichtinvasiven Blutdruckmessung entwickelt und evaluiert. Es konnte sich bisher aber noch keine Me-

---

<sup>13</sup> Systolischer Blutdruck: Blutdruck während der Auswurfphase des Herzens (Normwert ca. 120 mmHg)

<sup>14</sup> Diastolischer Blutdruck: Blutdruck während der Erschlaffungsphase des Herzens (Normwert ca. 80 mmHg)

thode etablieren. Barschdorff und Bauch (2005) entwickelten in den letzten Jahren ein neues Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung des Blutdrucks. Grundprinzip dieser Methode ist, dass durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Pulswellenlaufzeit der systolische Blutdruck berechnet werden kann. Da die Pulswellenlaufzeit in direktem Zusammenhang zum Blutdruck steht, kann von dem einen Wert der andere abgeleitet werden.

Mit einer Laborstudie (Bauch & Barschdorff, 2006) wurde die Möglichkeit gezeigt, mit diesem Verfahren Stresssituationen zu diagnostizieren. Eine erste Validierungsstudie im Fahrsimulator ergab einen Zusammenhang zwischen dem kontinuierlich gemessenen Blutdruck und verschiedenen Verkehrssituationen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das neu entwickelte Verfahren erprobt und auf seine Anwendbarkeit im Rahmen von Evaluationsstudien im Kfz-Bereich getestet (siehe Kap. 6).

### 3.2.3.2 Elektrodermale Aktivität

Eine ebenfalls große Bedeutung bei der Beanspruchungsmessung durch physiologische Parameter in der Forschung hat neben der kardiovaskulären Aktivität die elektrodermale Aktivität (EDA) (Boucsein, 1988). Grundlage dieser Messung ist der Zusammenhang zwischen psychischen Prozessen und Leistungsfähigkeits- bzw. Potentialänderungen der Haut. Studien belegen diesen Zusammenhang (z. B. Föckeler, 1988; Helander, 1977; Helander, 1978; Richter et. al., 1998; Verwey & Veltman, 1996). Beispielsweise belegte Helander (1978) mit seiner Studie die Eignung der EDA zur Erfassung von Beanspruchung im Kraftfahrzeug. Vorteil ist die schnelle Reaktion des Parameters auf Situationsänderungen. Die Untersuchung Helanders ist ausführlicher in Kapitel 3.2.3.6 dargestellt.

Artefakte können bei der Messung der EDA durch die Atmung (vgl. Kap. 3.2.3.5) und durch Reizungen der Haut auftreten. Die Temperatur hat einen Einfluss auf den Hautleitwert, so dass eine stabile Umgebungstemperatur bei der Untersuchung von Bedeutung ist. Auch Bewegungen stören die Ableitung des Biosignals. Daher muss darauf geachtet werden, dass der Körperteil, an dem das Signal abgeleitet wird (in der Regel Hand oder Fuß), während der Messung möglichst ruhig gehalten wird. Diese Forderung stellt ein Problem in der Verwendung dieses Parameters für die Beanspruchungsmessung im Kraftfahrzeug dar. Da eine Ableitung am Fuß nicht möglich ist, wird zumeist in der Handfläche abgeleitet. Da die Hand mindestens für das Lenken benötigt wird, ist ein Ruhigestellen dieses Körperteils nicht möglich. Auch Veränderungen der Elektrodenoberfläche durch Lenkbewegungen können nicht vermieden werden. Vorstudien im Rahmen dieser Arbeit haben aber gezeigt, dass trotz dieser Problematik die Messwerte beim Fahren nicht beeinflusst wurden.

### 3.2.3.3 Elektrische Muskelaktivität

Da ein direkter Zusammenhang zwischen dem Grad der psychophysischen Aktiviertheit und der Muskelspannung besteht, ist die Elektromyographie ein weiteres wichtiges Verfahren zur Beanspruchungsmessung (Schandry, 1989). Die aufgezeichnete Kurve wird als Elektromyogramm (EMG) bezeichnet. Problem bei dieser Methode ist die Entstehung von Bewegungsartefakten. Dies führt zu einer im Vergleich zu den in den Kapiteln 3.2.3.1 und 3.2.3.2 dargestellten Parametern geringeren Bedeutung dieser Messgröße für Untersuchungen im Kfz-Bereich.

Petit, Capparon, Roch und Priez (2002) führten eine Simulatorstudie mit 30 Probanden durch. Die Versuchspersonen fuhren 45 min und wurden während dieser Zeit verschiedenen beanspruchenden Situationen ausgesetzt (z. B. Objekte auf der Fahrbahn, Anruf auf dem Mobiltelefon des Fahrers, Einlegen einer CD in den CD-Player). Die Ergebnisse zeigten die Selektivität der elektrodermalen Reaktionen für die verschiedenen Beanspruchungssituationen.

### 3.2.3.4 Augenfunktionen

Auch aus Blickdaten können Rückschlüsse auf die Beanspruchung gezogen werden. Da das Auge eine wichtige Rolle bei der Informationsaufnahme spielt und es relativ einfach zu beobachten ist, sind eine Vielzahl von Messgrößen, die am Auge aufgenommen werden können, als physiologische Parameter zur Beanspruchungsmessung erprobt worden. Am meisten angewendet werden *Augenbewegungen*, *Pupillenreaktionen* und *Lidschlag* (O'Donell & Eggermeier, 1986; Schandry, 1989).

Studien haben gezeigt, dass die Messung von *Augenbewegungen* sensitiv auf visuelle Aufgaben im Fahrzeug und auf Aufgaben der Fahraufgabe reagiert (z. B. Lansdown, 1997; Victor et al., 2005). Als Parameter für den Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe im Fahrzeug können die *Blickbewegungsfrequenz*, die *Blickdauer* und *Gesamtblickdauer* herangezogen werden. Am sensitivsten zur Aufgabenschwierigkeit war der Prozentsatz der Blicke zur Fahrbahn (Victor et al., 2005, siehe Kap. 2.3.4.2). Außerdem ist in der Literatur ein Zusammenhang zwischen den Sakkaden und dem Aktivierungsniveau beschrieben (Schandry, 1989).

Zur Erfassung der *Augenbewegung* wird am häufigsten die Elektrookulographie angewendet. Die dabei erhaltene Kurve wird als Elektrookulogramm (EOG) bezeichnet. Da zur Messung Elektroden in Augennähe angebracht werden müssen, ist dieses Verfahren unangenehm für Probanden. Die Methode wird häufig im Labor eingesetzt, um Blickbewegungen zu messen. In Feldstudien wird sie nur selten eingesetzt (Galley, 1993).

Bei der Messung der *Pupillenreaktion* macht man sich die Veränderung der Pupillenweite bei mentalen Beanspruchungen zunutze (Schandry, 1989). Die Pupillenweite kann mit Hilfe verschiedener Verfahren erfasst werden, beispielsweise durch Filmaufnahmen von der Pupille.

Die Anzahl der *Lidschläge* pro Zeiteinheit ist ein guter Indikator für die Aktivierung (Schandry, 1989). Die Lidschläge können beispielsweise durch EMG-Messungen ober- und unterhalb des Auges erfasst werden. Auch bei dieser Methode muss erwähnt werden, dass sie unangenehm für die Versuchspersonen ist und nicht angewendet werden sollte, wenn andere potentielle Methoden zur Verfügung stehen. Ein Bewertungskriterium für psychologische Methoden ist, dass die Beeinträchtigung der Versuchspersonen durch die Methode selber möglichst gering sein sollte („Nicht-Intrusivität“). Dies ist nicht gegeben, wenn sich die Probanden beispielsweise durch das Anbringen von Elektroden stark beeinträchtigt fühlen.

Der Parameter *Lidschlag* ist sensitiv zu visueller Beanspruchung (Hankins & Wilson, 1998; Veltman & Gaillard, 1996). Außerdem ist die Lidschlagfrequenz ein guter Indikator für die Schwierigkeit einer Fahraufgabe, z. B für die gefahrenen Streckenbedingungen. (Richter et al., 1998)

### **3.2.3.5 Weitere physiologische Parameter zur Beanspruchungsmessung**

Eine in geringerer Häufigkeit zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung eingesetzte Methode ist die Elektroenzephalographie. Mit diesem Verfahren wird die hirnelektrische Aktivität an der Schädeloberfläche in Form eines Elektroenzephalogramms (EEG) aufgezeichnet (Schandry, 1989). Gründe für die geringe Bedeutung dieses Parameters liegen in der aufwendigen Versuchsdurchführung, der hohen Artefaktanfälligkeit der Methode und insbesondere in der für die Probanden unangenehmen und beim Fahren störenden Befestigung der Apparatur am Kopf.

In der Regel nicht als Reaktionsmaß sondern lediglich als Vergleichsparameter wird die *Atmung* (*Atemfrequenz*) erhoben. Bei einer Erhebung der kardiovaskulären Parameter, elektrodermaler Größen und des EEGs können damit atembedingte Artefakte erkannt werden (Schandry, 1989). Als eigenständiges Reaktionsmaß wird die Atmung selten verwendet, da ein Nachteil dieses Parameters die Möglichkeit der Beeinflussung dieses Maßes durch die Versuchsperson selbst ist, so dass eine willentliche oder unbewusste Beeinflussung der Daten nicht ausgeschlossen werden kann.

### 3.2.3.6 Studien mit Einsatz mehrerer physiologischer Parameter

Eine Interpretation physiologischer Daten ist in der Regel nur bei der Erfassung verschiedener Parameter sinnvoll, da einige Parameter sich gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise übt die Atmung einen Einfluss auf das EKG aus. Außerdem können meist mit dem gleichen Messgerät verschiedene physiologische Parameter abgeleitet werden, so dass eine Erhebung verschiedener Signale gleichzeitig nur einen geringen Mehraufwand bedeutet. Aus diesem Grund werden in den meisten Studien entweder mehrere Parameter zur Beantwortung einer Frage oder zumindest ein Hauptparameter gleichzeitig mit einigen Vergleichsparametern erhoben. An dieser Stelle werden empirische Studien, bei denen verschiedene Biosignale zum Einsatz kamen, vorgestellt und diskutiert.

Helander (1978) untersuchte in einer Feldstudie mit 60 Probanden den Zusammenhang der Ergebnisse einer EDA-Messung mit dem Schwierigkeitsgrad einer Verkehrssituation. Die Versuchspersonen fuhren eine vorgegebene Strecke auf einer Landstraße und es wurde untersucht, wie die EDA sich bei verschiedenen Situationen, z. B. *Zusammentreffen mit einem Fahrradfahrer, einem Fußgänger und einem anderem Fahrzeug, ein anderes Fahrzeug überholt das eigene Fahrzeug oder parkendes Fahrzeug* reagierte. Als Vergleichsparameter wurden der *Bremsdruck* am Bremspedal und die physiologischen Parameter *EKG (Herzfrequenz)* und *EMG* aufgezeichnet. Die EDA besaß eine hohe Augenscheininvalidität zur Aufgabenschwierigkeit. Die Verkehrssituation *Zusammentreffen mit einem Fahrradfahrer, einem Fußgänger und einem anderem Fahrzeug* erzeugte die höchste EDA-Veränderung und das geparkte Fahrzeug die niedrigste. Außerdem war eine hohe Korrelation zwischen den Parametern *EDA* und *Bremsdruck* zu beobachten. Geringer war der Zusammenhang zwischen EDA und EMG und sehr klein die Korrelation zur Herzfrequenz. Der Autor formuliert als Fazit, dass die EDA ein geeigneter Parameter zur Messung mentaler Beanspruchung im Kraftfahrzeug ist. Im Vergleich zur Herzfrequenz ist die EDA ein sehr dynamischer Parameter, der damit in der Lage ist, schnell auf Verkehrssituationen zu reagieren.

Veltman und Gaillard (1996) führten in einem Flugsimulator eine Studie mit sechzehn Versuchspersonen durch, um verschiedene physiologische Verfahren zur Beanspruchungsmessung zu validieren. Die Probanden absolvierten eine Flugaufgabe, deren Schwierigkeit im Verlauf der Untersuchung variiert wurde. Als Zweitaufgabe wurde während des Flugs ein Gedächtnistest (CMT) dargeboten. Nach dem Flug schätzten sie auf der Ratingskala RSME ihre subjektive Beanspruchung ein. Außerdem wurden die Biosignale *Blutdruck*, *Herzrate*, *EOG* (Augenzwinkern) und *Atmung* erhoben. Die physiologischen Parameter wurden zu folgenden Messzeitpunkten erfasst: *Erholungsphase vor dem Flug, im Flug, vor, während und nach dem Gedächtnistest, nach der Landung und nach einer Erholungsphase nach der Landung*. Die Ergebnisse zeigten, dass der Blutdruck sensiv auf die verschiedenen Schwierigkeitslevel der Aufgabenschwierigkeit reagierte. Dagegen zeigte sich die Herzratenvariabilität

bedingt durch Atmungsartefakte und die Ergebnisse des subjektiven Ratings als nicht sensitiv. Das EOG mit dem Parameter Augenzwinkern ist sensitiv zu visueller aber nicht zu kognitiver Beanspruchung. Abschließend bewerteten die Autoren, dass mentale Beanspruchung durch eine Kombination verschiedener physiologischer Parameter erfasst werden kann.

### **3.2.4 Vergleichsstudien zwischen verschiedenen Methoden zur Erfassung der Beanspruchung**

In diesem Kapitel werden einige Studien vorgestellt, die verschiedene empirische Forschungsmethoden in einer Untersuchung einsetzen und sie im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit zur Beanspruchungserhebung bewerten.

Eine der ersten Vergleichsstudien zu verschiedenen Methoden zur Messung mentaler Beanspruchung führten Hicks und Wierwille (1979) durch. In der Simulatorstudie fuhren 30 Probanden jeweils dreimal. Ihre Hauptaufgabe war die Fahraufgabe, bei der sie die rechte Spur halten und eine konstante Geschwindigkeit einhalten sollten. Zur Erhebung der Beanspruchung wurden folgende Methoden angewendet:

1. Primäraufgabe: Laterale Position, Kursabweichung, Lenkbewegung (Performance)
2. Okklusion (Performance)
3. Bearbeitung Sekundäraufgabe: Ablesen von Zahlen von einem Display (Performance)
4. EKG: Herzratenvariabilität (Physiologie)
5. Ratingskala – 11stufige Likertskaala (Selbstreport)

Die Methoden *Performance der Primäraufgabe* und *Ratingskala* waren am empfindlichsten und am wenigsten störanfällig bei der Messung der Beanspruchung. Keinen signifikanten Zusammenhang zur Beanspruchung zeigten die *Sekundäraufgabe*, sowie der physiologische Parameter *Herzratenvariabilität*. Angemerkt werden muss hierzu, dass die Entwicklung physiologischer Messmethoden zum Zeitpunkt der Studie – 1979 – noch nicht sehr weit fortgeschritten war und dies ein Grund für die schlechte Beurteilung dieser Methode sein könnte.

Verwey und Veltman (1996) führten eine Feldstudie mit zwölf Probanden durch, um die *Sensitivität* (Unterscheidung zwischen verschiedenen Beanspruchungslevels) und *Diagnostizität* (Unterscheidung zwischen Beanspruchungsarten) neun verschiedener üblicher Beanspruchungserfassungsmethoden gegenüber kürzeren und längeren Perioden visueller und mentaler Beanspruchung zu vergleichen. Die Probanden fuhren mit einem Versuchsfahrzeug auf einer vorgegebenen Autobahnstrecke und wurden neben der normalen Fahraufgabe mit einer mentalen sowie einer visuellen Zusatzaufgabe konfrontiert. Als Parameter für die Beanspruchung wurden herangezogen:

1. Fahrgeschwindigkeit (Performance)
2. Intervalle zwischen Lenkbewegungen (Performance)
3. Bearbeitung Sekundäraufgabe (Performance)
4. EKG: inter-beat-intervall (Physiologie)
5. EKG: Herzratenvariabilität (Physiologie)
6. EOG: Zwinkerrate (Physiologie)
7. EDA: Intervall zwischen zwei Hautleitreaktionen (Physiologie)
8. SWAT (Selbstreport)
9. RSME (Selbstreport)

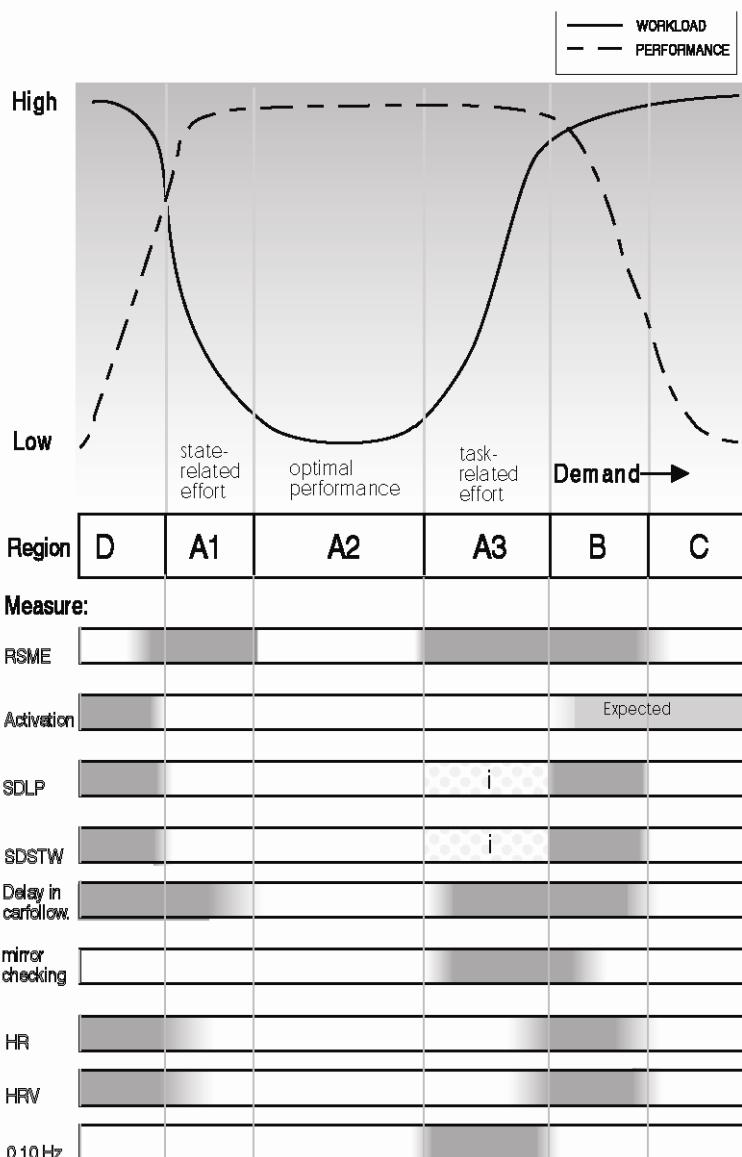
Im Ergebnis war bei der Performance die Lenkbewegung empfindlich gegenüber der Sekundäraufgabe. Die Intervalle zwischen den einzelnen Lenkvorgängen waren bei deren Bearbeitung länger als bei der reinen Fahraufgabe. Die Geschwindigkeit hingegen wurde hiervon nicht beeinflusst. Auch die Selbstreportmethoden reagierten empfindlich auf die Nebenaufgaben. Sie sind beide geeignet, um Maximalwerte visueller und mentaler Beanspruchung zu erfassen. Die Autoren resümieren, dass eine eindimensionale Skala (RSME) zur Bewertung der subjektiven Beanspruchung ausreichend ist. Die Herzratenvariabilität erwies sich als sensitiv gegenüber längeren Perioden erhöhter Beanspruchung, war aber nicht in der Lage, Beanspruchungserhöhungen von unter einer Minute Dauer zu erfassen. Das EOG war sensitiv zu visueller Beanspruchung. Die EDA reagierte hingegen schwach auf die mentale Beanspruchung und gar nicht auf die visuelle. Eine Faktorenanalyse ergab zwei unabhängige Faktoren:

- 1) Der erste Faktor beinhaltet die subjektiven Ratingskalen und die Performance der Zweitaufgabe, die nach Ansicht der Autoren die Komplexität einer Aufgabe bewerten.
- 2) Der zweite Faktor vereinigt die physiologischen Parameter und misst den Aufwand, der bei der Bearbeitung einer Aufgabe geleistet werden muss und möglicherweise den Stress, welcher durch diese induziert wird.

Richter et al. (1998) führten eine Feldstudie mit 31 Probanden mit dem Ziel durch, eine Messmethode zur Bewertung von Fahransforderungen auf der Landstraße zu entwickeln und zu evaluieren. Als unabhängige Variable formulierten sie die Summe der Winkel aller Richtungswechsel („CCR“ = curvature change rate) im Verhältnis zur Straßenlänge als Kriterium für die Schwierigkeit der gefahrenen Strecke. Als abhängige Variablen wurden die physiologischen Parameter EKG (Herzrate und Herzratenvariabilität), EOG (Lidschlagfrequenz) und EDA (Hautleitwert) gemessen sowie die Geschwindigkeit als Performanceparameter eingesetzt. Es zeigte sich ein hoher Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Messung physiologischer Parameter und der Streckenschwierigkeit. Auch die Fahrgeschwindigkeit differenzierte zwischen den unterschiedlichen Bedingungen.

De Waard (1996) untersuchte verschiedene Methoden der Beanspruchungsmessung in Bezug auf ihre Sensitivität. Er kommt zu dem Schluss, dass die unterschiedlichen Methoden in ver-

schiedenen Regionen seines Modells zum Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Performance (siehe Kap. 2.3.3) sensitiv und damit einsetzbar sind (Abb. 3.10).



**Abb. 3.10: Beanspruchung in sechs Regionen und Sensitivität verschiedener Methoden der Beanspruchungserhebung (De Waard, 1996, S. 101)**  
i = improvement possible

Nach de Waard (1996) sind somit beispielsweise Beanspruchungsveränderungen in der Region D und B durch Maße der Primäraufgabe (SDLP, SDSTW, Abstandsverhalten) und kardiovaskulärer Parameter (HF, HRV) erfassbar. In der Region A1 ist dies durch die eindimensionale Ratingskala RSME möglich. Der Autor empfiehlt bei der Erhebung von Beanspruchung immer Methoden der drei verschiedenen Kategorien (Selbstreport, Performance, Physiologie) miteinander zu kombinieren. Falls möglich sollten auch mehrere Methoden einer Kategorie eingesetzt werden.

Die in den Kapiteln 3.2.3 und 3.2.4 dargestellten empirischen Untersuchungen zeigen eine Einsetzbarkeit physiologischer Parameter zur Beanspruchungsmessung im Kraftfahrzeug. Problematisch beim Einsatz dieser Methoden ist die schwierige und aufwendige Interpretation physiologischer Daten. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, sollten immer mehrere physiologische Maße gleichzeitig erfasst werden.

### 3.2.5 Fazit

Neue Assistenzsysteme im Kfz können zu einer zusätzlichen Beanspruchung für den Fahrer führen. Daher ist es wichtig, im Rahmen von Evaluationsstudien im Entwicklungsprozess von neuen Systemen den Einfluss der Systemnutzung auf die Fahrerbeanspruchung zu untersuchen.

Grundsätzlich steht zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung eine Vielzahl von empirischen Forschungsmethoden zur Verfügung. Diese lassen sich in die Kategorien *subjektive Messmethoden* (Selbstreport), *performancebasierte Messmethoden* und *physiologische Messmethoden* unterteilen. Bubb (2002) geht davon aus, dass mit den Methoden des Selbstreports das Konstrukt *Komfort* und mit den objektiven Methoden das Konstrukt *Diskomfort* erfasst wird.

In der Kategorie *Selbstreport* stehen ein Vielzahl eindimensionaler und zweidimensionaler Skalen zur Beanspruchungserhebung zur Verfügung, die bereits in der Kraftfahrzeugforschung angewendet wurden. Auch die Anwendbarkeit performancebasierter Methoden für die Erfassung der Fahrerbeanspruchung wurde durch empirische Studien belegt. Außerdem erwiesen sich physiologische Parameter als geeignet zur Beanspruchungsmessung. Hierbei wurden am häufigsten die Herzfrequenz und der Hautleitwert verwendet. Der physiologische Parameter *Blutdruck* kam bislang noch nicht im Rahmen von Evaluationsstudien im Kfz-Bereich zum Einsatz, da in der Vergangenheit eine kontinuierliche Blutdruckmessung nur invasiv möglich war. Barschdorff und Bauch (2005) entwickelten ein Verfahren zur kontinuierlichen Blutdruckmessung. Es liegen bislang keine Studien zur Anwendbarkeit dieser empirischen Methode in der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen vor. Hier besteht Forschungsbedarf.

### 3.3 Feld- versus Simulatorstudien

Eine Vielzahl von Evaluationsstudien neuer Systeme für Kraftfahrzeuge wird in Fahrsimulatoren durchgeführt. Diskutiert wird bei Simulatorstudien immer die Übertragbarkeit der dort erhaltenen Ergebnisse auf reale Fahrten. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Diskussion.

Es gibt verschiedene Gründe, die für die Durchführung von Simulatorstudien in diesem Bereich sprechen:

- Studien können auch dann im Fahrsimulator durchgeführt werden, wenn dies aus ethischen Gründen im Feld nicht möglich ist, weil eine Durchführung beispielsweise zu einer Sicherheitsgefährdung führen könnte.
- Bereits in einer frühen Entwicklungsphase eines neuen Systems ist es möglich, Prototypen zu simulieren, bevor sie in reale Kraftfahrzeuge eingebaut werden können. Durch eine Bewertung bereits in dieser Phase können falsche Entwicklungsschritte frühzeitig erkannt und verhindert werden.
- Fahrsituationen (z. B. Wetter, Lichtverhältnisse, Verkehrsdichte) können kontrolliert werden, so dass alle Probanden unter gleichen Bedingungen fahren. Fahrten in der Dunkelheit können zu jeder Tageszeit durchgeführt werden.
- Experimentelle Studien mit einer kontrollierten Manipulation von Variablen können durchgeführt werden.
- Es können unterschiedliche Strecken- und Verkehrsbedingungen, beispielsweise verschiedene Straßentypen und unterschiedlich großes Verkehrsaufkommen, simuliert werden.
- Wenn bereits ein Fahrsimulator vorhanden ist, sind Studien in der Regel kostengünstiger. Neue Fahrerassistenzsysteme sind nicht aufwendig in ein reales Versuchsfahrzeug einzubauen, sondern können im Labor simuliert werden.

In einer Feldstudie sind viele Bedingungen nicht kontrollierbar. Insbesondere bei Untersuchungen im realen Straßenverkehr wird jede Versuchsperson mit anderen Verkehrssituationen konfrontiert. Auch Wetterbedingungen differieren, was bei der Bewertung von neuen Systemen im Kfz, deren Performance wetterabhängig ist, zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Die erhaltenen Untersuchungsergebnisse sind somit die Summe aus der Wirkung verschiedener Variablen die weder bekannt sind noch kontrolliert werden können. Der wesentliche Vorteil einer Feldstudie ist hingegen, dass ein System in der Umgebung getestet wird, in der es später auch verwendet wird. Die Frage nach der Validität der erhaltenen Daten stellt sich somit weniger als bei Untersuchungsergebnissen, die im Rahmen von Simulatorstudien erhalten wurden.

Der Einsatz von Fahrsimulatoren zur Evaluation von Systemen für das Kraftfahrzeug wird begleitet von einer Diskussion der Validität der im Fahrsimulator erhaltenen Untersuchungsergebnisse. In der Literatur sind eine Vielzahl von Studien zu dieser Thematik zu finden (z. B. Blaauw, 1982; Blana & Golias, 1999; Engström et al., 2005; Pinto, Cavallo, Ohlmann, Espié & Rogé, 2004; Reed & Green, 1999; Ruspa, Scheuchenplug & Quattrocolo, 2002). Die Ergebnisse sind teilweise widersprüchlich, was unter anderem mit der Art des verwendeten Simulators zu erklären ist. Beispielsweise werden unterschiedliche Resultate erhalten, je nachdem ob der Simulator mit einem Bewegungssystem ausgestattet ist oder nicht.

Tendenziell lassen sich folgende Auswirkungen auf das Fahrverhalten bei der Nutzung eines Simulators beobachten (Reed & Green, 1999; Chanton, Sauvage, Kassaagi & Coratte, 2002; Pinto et al., 2004):

- Höhere Fahrgeschwindigkeit, größere Probleme, eine konstante Geschwindigkeit zu halten
- Anderes Bremsverhalten, beispielsweise späteres und stärkeres Abbremsen
- Schlechtere Spurhaltung; Spurversatz zum rechten Fahrbahnrand
- Größere Anzahl von Lenkbewegungen

Besonders problematisch ist die Nachbildung der Fahrdynamik im Simulator, insbesondere des Lenkens und Bremsens, da hier eine Kraftrückmeldung an den Fahrer fehlt. Studien ergaben, dass aufgrund des Fehlens vestibularen und taktilen Feedbacks insbesondere bei dem Parameter *Spurhaltung* eine geringe absolute Validität bei Simulatorfahrten gegenüber Realfahrten zu beobachten ist (Reed & Green, 1999). Fahrneulinge haben größere Probleme bei der Spurhaltung als erfahrene Fahrer (Jamson, 1999). Die Probanden reagieren auf Schwierigkeiten in der Spurhaltung häufig mit zu starken Lenkbewegungen. Durch die fehlende Rückmeldung auftretende Probleme können mit Üben des Simulatorfahrens und den Einsatz von Simulatoren mit Bewegungssystemen minimiert werden. Die Notwendigkeit des Einsatzes eines solchen Systems muss immer vor dem Hintergrund der zu behandelnden Fragestellung betrachtet werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine relative Validität, d. h. eine Übereinstimmung der Richtung von Effekten, gegeben ist.

Beispielsweise führte Blaauw (1982) eine Evaluationsstudie mit 24 erfahrenen und 24 unerfahrenen Fahrern durch, die jeweils Feld- und Simulatorfahrten mit unterschiedlichen Aufgabenschwierigkeiten (reines Fahren, Fahren mit möglichst geringer lateraler Abweichung, Fahren mit möglichst konstanter Geschwindigkeit) absolvierten. Es waren Effekte der Fahrerfahrung und der Aufgabenschwierigkeit in Bezug auf die laterale sowie die longitudinale Fahrzeugkontrolle sowohl im Simulator als auch auf der Straße zu beobachten. Eine absolute Validität beim Vergleich der Simulatorfahrten und der Fahrten im realen Straßenverkehr war nur bei der longitudinalen Fahrzeugkontrolle gegeben.

Auch Reed und Green (1999) verglichen Fahrten im Simulator und in der Realität und zeigten ebenfalls eine gute absolute Validität der Geschwindigkeitskontrolle. Außerdem beobachteten sie eine relative Validität des Einflusses einer Sekundäraufgabe (Wählen einer Telefonnummer) auf das longitudinale und das laterale Fahrverhalten: Sowohl die Spurhaltung als auch die Geschwindigkeitskontrolle waren während der Simulator- und der Realfahrt beim Wählen schlechter, die Leistungsabnahme war jedoch im Simulator größer.

Vergleichbare Ergebnisse erzielten auch Blana und Golias (1999). Sie verglichen die Fahrdaten von 100 Fahrten im realen Straßenverkehr und 100 Versuchspersonen im Simulator. Es zeigte sich eine absolute Validität im Hinblick auf die Fahrgeschwindigkeit und eine relative Validität in Bezug auf die laterale Kontrolle.

Da für die Studien dieser Arbeit Simulatorfahrten in der Dunkelheit benötigt werden, ist neben einem vergleichbaren Fahrverhalten auch wichtig, dass die Sichtbedingungen im Fahrsimulator denen im realen Straßenverkehr entsprechen. Weber, Plattfaut, Kleinkes und Bersenbrügge (2002) führten eine Studie durch, in der 124 Probanden im Feld und 20 Probanden im Labor 21 Scheinwerfer im Hinblick auf Faktoren wie Homogenität, Helligkeit und Lichtverteilung bewerten sollten. Es zeigte sich eine hohe gemeinsame Korrelation der Ergebnisse beider Studien.

Neben vergleichbaren Lichtverhältnissen durch Scheinwerferlichtverteilungen in der Realität und im Simulator spielt auch die Vergleichbarkeit des Blickverhaltens des Fahrers eine wichtige Rolle bei der Evaluation von visuellen Fahrerassistenzsystemen wie z. B. dem Infrarot-Nachtsichtsystem, um die bei Simulatorfahrten erhaltenen Blickdaten auf Fahrten im realen Straßenverkehr übertragen zu können. Stahl und Kleinkes (2005) führten eine Validierungsstudie durch, bei der Probanden mit einem realen Fahrzeug im Feld und im Simulator die gleichen Teststrecken fuhren. Dabei wurden die Augenbewegungen der Versuchspersonen mit einem Eye-Tracking-System aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigten ein vergleichbares Blickverhalten im Simulator und im realen Straßenverkehr. Die einzige beobachtete Differenz war eine vertikale Verschiebung der Blickschwerpunkte von  $0,6^\circ$  nach unten bei der Simulatorfahrt. Die Autoren erklären dies mit im Vergleich zur Realität schlechteren Kontrasten im Simulator. Der Unterschied lag zudem innerhalb der Messgenauigkeit des Eye-Tracking-Systems.

Carter und Laya (1998) führten eine Vergleichsstudie mit zehn Probanden unterteilt in zwei Versuchsgruppen durch. Eine Gruppe setzte sich aus unerfahrenen Fahrern (18-21 Jahre) und die andere Gruppe aus erfahrenen Fahrern (30-50 Jahre, mindestens acht Jahre Fahrerfahrung, Fahrleistung mindestens 6.000 Meilen pro Jahr) zusammen. Die Versuchspersonen fuhren im Fahrsimulator und im Feld, wobei ihre Augenbewegungen betrachtet wurden. Die Ergebnisse ergaben keine Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Blickzuwendungen und in der

mittleren Fixationszeit. Im Simulator kam es zu insgesamt mehr Fixationen pro Sekunde und damit zu einer geringeren Sakkadendauer. Durch die Abwesenheit von peripheren Reizen in der Simulatorumgebung konnte eine höhere Anzahl von Fixationen auf das Tachometer beobachtet werden.

Eine Evaluationsstudie eines Fahrsimulators von Duncan (1998) ergab, dass Probanden beim Fahren im Feld ihren Blick signifikant häufiger und somit bezogen auf die Gesamtzeit länger von der Straße abwendeten als im Simulator.

Nach Piechulla (2004) entspricht eine Fahrt im Simulator nie einer Fahrt im realen Straßenverkehr. Als Hauptgrund gibt er an, dass „den Probanden das ‘existenzielle Engagement’ der Realfahrt fehlt, wo Fehler ganz reale Gefahren für Leib und Leben bedeuten können.“ (Piechulla, 2004, S. 8). Dies bestätigt eine Studie von Engström et al. (2005) die die Beanspruchung durch ein Informationssystem im Fahrzeug im Simulator und im Feld mit verschiedenen Messmethoden untersuchten. Es zeigten sich höhere physiologische Daten und eine größere Lenkaktivität im realen Straßenverkehr. Die Autoren interpretieren dies ebenfalls mit dem höheren Sicherheitsrisiko bei Realfahrten.

Ein weiteres Problem bei Simulatorstudien ist die bei einigen Personen auftretende *Simulator Sickness*. Die *Simulator Sickness* entsteht nach der sensorischen Konflikttheorie dadurch, dass man Signale aus dem visuellen und dem vestibulären System erhält, die nicht übereinstimmen und nicht den Erfahrungen entsprechen (Hoffmann, Krüger & Buld, 2003). Dadurch kann es zu Übelkeit, Schwindel, Kopfschmerzen und ähnlichen Beschwerden kommen, was oftmals zum Versuchsabbruch durch die Probanden führt. In der Literatur wird von einer Ausfallrate von fünf bis zehn Prozent ausgegangen (Knappe et al., 2006). Eigene Studien haben gezeigt, dass der Prozentsatz insbesondere bei älteren Probanden sehr viel höher liegen kann. Zu den gleichen Erkenntnissen kam auch eine Studie von Delorme und Marin-Lamellet (1999). Somit wird für eine gleich große auswertbare Stichprobe meist eine größere Anzahl von Versuchspersonen benötigt. Die *Simulator Sickness* kann durch Adaptation an die Simulatorsituation vermindert oder vermieden werden (Hoffmann & Buld, 2006; Hoffmann et al., 2003).

Resümierend kann gesagt werden, dass bei Simulatoruntersuchungen in der Regel keine absolute Validität der Ergebnisse gegeben ist. Für viele Studien ist eine relative Validität jedoch ausreichend.

Es kann nicht grundsätzlich von einer Übertragbarkeit der im Simulator erhaltenen Ergebnisse auf Fahrten im realen Straßenverkehr (externe Validität) ausgegangen werden. Somit sind die Ergebnisse von Simulatorstudien für die Beantwortung einer Reihe von Fragestellungen nicht hinreichend. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass die Beurteilung der Höhe der Beanspruchung durch die Nutzung eines Fahrerassistenzsystems nur im realen Straßenverkehr

möglich ist, da dort ein höheres Sicherheitsrisiko besteht. Für andere Fragestellungen, z. B. bei der Bewertung einzelner Systemparameter, besteht diese Problematik nicht.

Ist aber eine Feldstudie nicht möglich, können im Simulator wichtige Ergebnisse für die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen gewonnen werden. Insbesondere die Möglichkeiten, Systeme bereits dann zu testen, wenn sie noch nicht den Entwicklungsstand haben, um in ein reales Versuchsfahrzeug eingebaut werden zu können, und kontrollierbare Versuchsbedingungen sind große Vorteile des Simulators. Außerdem können im Labor Studien durchgeführt werden, die aus Sicherheitsgründen im Straßenverkehr nicht durchführbar sind.

Die Entscheidung für die Durchführung einer Simulatorstudie oder einer Feldstudie sollte auf der Grundlage der jeweiligen Fragestellung, der generellen Realisierbarkeit und einer Kosten-Nutzen-Abwägung getroffen werden.



## **4 Forschungsinteresse**

Die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen im Entwicklungsprozess ist von großer Bedeutung für den späteren Einsatz eines solchen Systems im Straßenverkehr. Potentielle Sicherheitsprobleme durch die Systemnutzung können damit ausgeschlossen oder durch Systemverbesserungen vermieden werden. Außerdem hängt die Akzeptanz eines neuen Systems in hohem Maße von einer optimalen Systemgestaltung ab: Bereits suboptimale Systemparameter können bei einem ansonsten guten System zu einer niedrigen Kundenakzeptanz und damit zu geringerem Kaufinteresse führen.

Das Kapitel 3 hat gezeigt, dass für die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen eine Vielzahl empirischer Forschungsmethoden zur Verfügung steht. Trotzdem ist die Wahl geeigneter Forschungsmethoden in der Konzeption eines Untersuchungsdesigns schwierig, da bei der Evaluation von FAS zumeist sehr spezifische Fragestellungen bearbeitet werden und unterschiedliche Systeme auch nur mit unterschiedlichen Methoden untersucht werden können. Somit kommen im konkreten Fall häufig nur wenige Verfahren für die Untersuchung in Frage.

Ein weiteres Problem ist die Operationalisierung der zu betrachtenden Konstrukte wie beispielsweise Nutzerakzeptanz, Fahrerbeanspruchung, Sicherheit etc., die sich häufig sehr schwierig gestaltet (Bortz & Döring, 1995). Für die Untersuchung dieser Konstrukte ist daher häufig eine Mehrfachoperationalisierung über verschiedene Indikatoren notwendig, deren Erfassung unterschiedliche empirische Forschungsmethoden verlangt (Schnell, Hill & Esser, 2005).

Forschungsinteresse der vorliegenden Arbeit ist die Frage, mit welchen empirischen Forschungsmethoden neu entwickelte Fahrerassistenzsysteme für Kfz im Entwicklungsprozess evaluiert werden können.

Explorativ soll dies anhand von empirischen Studien untersucht werden. Wie bereits im zweiten Kapitel dargestellt, sind zwei wichtige Themenbereiche in Evaluationsstudien von Fahrerassistenzsystemen im Entwicklungsprozess die Strategien und die Fahrerbeanspruchung bei der Nutzung der Systeme. Mit mehreren empirischen Studien wird untersucht, welche Forschungsmethoden zu deren Erfassung geeignet sind.

Betrachtet wird dies beispielhaft an einem neu entwickelten FAS, einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem. Die erhaltenen Forschungsergebnisse können mehrheitlich auf andere Fahrerassistenzsysteme übertragen werden. Das herangezogene Nachtsichtsystem arbeitet visuell, d. h. es stellt dem Fahrer auf einem Display Informationen zur Verfügung. Um die Nutzung eines solchen Systems zu untersuchen, sind spezifische Methoden notwendig. Diese lassen

sich teilweise nur für die Evaluation von anderen, ebenfalls visuell arbeitenden Systemen, verwenden. Dagegen lassen sich andere Erkenntnisse, beispielweise hinsichtlich der Anwendbarkeit verschiedener empirischer Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung bei der Systemnutzung, generalisieren und damit auch auf Studien mit anderen Fahrerassistenzsystemen übertragen.

## **5 Empirische Studien zu Nutzungsstrategien**

Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt bei der Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme ist – wie im Kapitel 2 dargestellt – welche Nutzungsstrategien die Fahrer im Umgang mit dem neuen System ausbilden. Unter dem Begriff *Strategie* wird in dieser Arbeit die Art der Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems durch den Fahrer verstanden, d. h. ob und in welchen Situationen er das System verwendet, wie häufig er es nutzt und wie lange er benötigt, um Informationen von dem Display abzulesen etc.

Hierbei stellt sich die Frage, mit welchen empirischen Forschungsmethoden diese erhoben werden können. Das folgende Kapitel stellt zwei Studien zur Erfassung der Strategien bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems dar. In der ersten Studie (Kap. 5.1) werden verschiedene Methoden des Selbstreports verwendet. Die objektive Forschungsmethode der Blickbewegungsmessung wird in der zweiten Studie (Kap. 5.2) zur Erhebung der Nutzungsstrategien herangezogen und mit subjektiven Methoden des Selbstreports kombiniert. Beide Studien legen einen Fokus auf die Gewöhnung an das Infrarot-Nachtsichtsystem und die Veränderungen der Nutzungsstrategien in diesem Prozess.

### **5.1 Studie 1: Methoden des Selbstreports zur Erfassung der Ausbildung von Nutzungsstrategien**

Um zu untersuchen, mit welchen empirischen Methoden des Selbstreports betrachtet werden kann, wie Probanden mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem umgehen und wie sie es bewerten, wurde eine Feldstudie durchgeführt. Die folgenden zwei Kapitel beschreiben das Untersuchungsdesign (Kap. 5.1.1) und präsentieren die wichtigsten Ergebnisse der Studie (Kap. 5.1.2).

#### **5.1.1 Untersuchungsdesign**

Die Kapitel 5.1.1.1 bis 5.1.1.5 geben einen Überblick über das Untersuchungsziel, das Versuchsfahrzeug, die Stichprobe, die eingesetzten empirischen Forschungsmethoden sowie die Versuchsfahrten und die Versuchsstrecken der Studie 1.

### 5.1.1.1 Untersuchungsziel

Ziel dieser Untersuchung war es, herauszufinden, mit welchen subjektiven Selbstreport-Methoden der empirischen Sozialforschung die Nutzungsstrategien und der Gewöhnungsprozess an ein Fahrerassistenzsystem erfasst werden können.

Hierfür sollte inhaltlich untersucht werden, welche Strategien die Probanden bei der Nutzung eines für sie neuen Fahrerassistenzsystems, eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems, ausbilden. Neben den Nutzungsstrategien sollte die grundsätzliche Akzeptanz des FAS sowie die Bewertung von einzelnen Systemparametern betrachtet werden. Dabei war ein Schwerpunkt der Untersuchung die Betrachtung des Gewöhnungsprozesses, d. h. wie sich die Nutzungsstrategien ausbilden bzw. im Laufe der Gewöhnung verändern und ob die Bewertung des Nachtsichtsystems von der Vertrautheit mit dem System abhängt.

### 5.1.1.2 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug wurde ein Mercedes der S-Klasse verwendet. Dieser war mit einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem ausgestattet. Zur Bilddarstellung war rechts vom Fahrer auf dem Armaturenbrett ein 5,6 Zoll TFT-Display mit QVGA-Auflösung (320 x 240 Pixel) angebracht (Abb. 5.1). Der Bildwinkel der Kamera, die die reflektierte Infrarotstrahlung aufnimmt, betrug 17° horizontal und 13° vertikal (Bildseitenverhältnis B:H = 4:3).

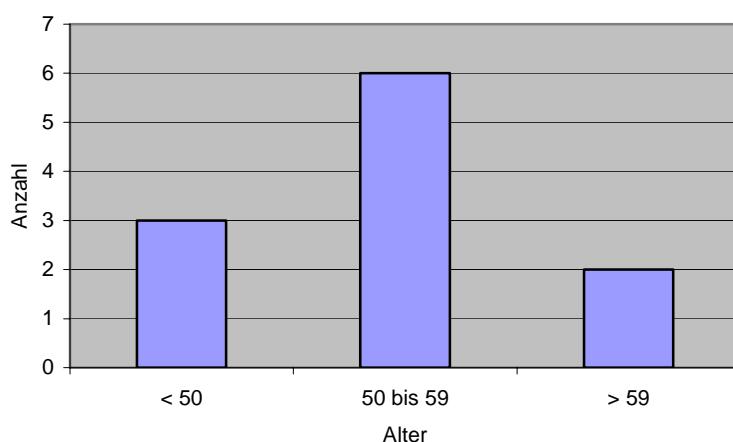


**Abb. 5.1: Display des Infrarot-Nachtsichtsystems im Versuchsfahrzeug**

### 5.1.1.3 Stichprobe

Die Studie wurde mit insgesamt elf Versuchspersonen durchgeführt. Eine Versuchsperson fiel nach der dritten Versuchsfahrt aus gesundheitlichen Gründen aus, so dass zehn Personen alle Versuchsfahrten durchführten. Es wurden Probanden ausgewählt, die über keine Erfahrungen mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem verfügten. Dies ist wichtig, da die Ergebnisse von „Lai-

en“ eine größere Aussagekraft über das Verhalten und die Meinungen späterer Kunden haben als die von „Experten“, wie beispielsweise Entwicklungsingenieuren oder professionellen Testfahrern (Bubb, 2003b). Die Versuchspersonen waren zwischen 27 und 62 Jahren alt. Da Infrarot-Nachtsichtsysteme nach ihrer Einführung zuerst in Oberklassefahrzeugen erhältlich sein werden und damit von einem eher älteren potentiellen Kundenkreis ausgegangen werden kann, wurden überwiegend Probanden über 50 Jahre rekrutiert. Außerdem sollten gerade ältere Fahrer aufgrund ihrer im Vergleich zu jüngeren Personen geringeren Sehleistung in der Nacht (siehe Kap. 2.1.2) besonders von einem Nachtsichtsystem profitieren. Die Altersverteilung der Versuchspersonen ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Probanden aller im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien wurden für ihre Teilnahme nicht bezahlt, sondern erhielten Präsente.



**Abb. 5.2: Altersverteilung der Versuchspersonen**

Für die Untersuchung wurden „erfahrene Autofahrer“ als Probanden ausgewählt. In der Literatur gibt es unterschiedliche Definitionen von erfahrenen Fahrern. Beispielsweise geht Bartmann (1995) davon aus, dass Fahrer hierfür mindestens fünf Jahre im Besitz des Führerscheins sein und mindestens 5.000 Kilometer im Jahr fahren müssen. Andere Autoren gehen von sechs Jahren aktivem Führerscheinbesitz und mindestens 100.000 km Fahrpraxis aus (Fastenmeier, 2005). Alle rekrutierten Versuchspersonen waren erfahrene Fahrer nach beiden Definitionen.

#### 5.1.1.4 Empirische Forschungsmethoden

Zur Erfassung der Nutzungsstrategien und der Evaluation des Systems wurden zwei empirische Forschungsmethoden aus der Kategorie *Selbstreport* eingesetzt:

- 1) Während der Versuchsfahrten wurde eine Variante des *Lauten Denkens* verwendet (siehe Kap. 3.1.1.2). Dazu wurden die Probanden instruiert, alles, was ihnen während der Fahrt zu

dem Infrarot-Nachtsichtsystem sowie dessen Nutzung auffällt, zu artikulieren. Alle thematisch relevanten Äußerungen wurden von der Versuchsleitung notiert und die erhaltenen Protokolle nach den Versuchsfahrten inhaltsanalytisch ausgewertet. Veränderungen in der Nutzung sowie der Bewertung des Systems wurden teilweise, wenn sie nicht von den Versuchspersonen selbst angesprochen wurden, in späteren Fahrten gezielt nachgefragt. Beispielsweise wurde, wenn in einer Fahrt eine Versuchsperson äußerte, dass das System in Ortschaften keinen Vorteil bringt, in einer der letzten Fahrten nachgefragt, ob der Proband immer noch dieser Meinung sei. Neben der Versuchsleitung, die auf dem Rücksitz saß, wurden die Fahrten von einem Beifahrer begleitet, um den Probanden die Tätigung von Äußerungen zu erleichtern. Damit sollten die Fahrer zu einem „normalen“ Gespräch über das Infrarot-Nachtsichtsystem angeregt werden.

2) Nach jeder Versuchsfahrt erfolgte eine Fragebogenerhebung, mit der die Probanden das Nachsichtsystem und einzelne Systemparameter bewerteten. Außerdem sollten mit dem Fragebogen die Nutzungsstrategien sowie deren Ausbildung im Gewöhnungsprozess erfasst werden. Hierfür füllten die Versuchspersonen jeweils einen Fragebogen aus (siehe A.1.1). Die Fragebögen waren mit Ausnahme einer Frage, die nach der ersten Fahrt eingefügt wurde, nach jeder Fahrt identisch. Der Fragebogen bestand überwiegend aus geschlossenen Fragen, die auf einer 7-stufigen Skala beantwortet werden sollten. Ergänzt wurden diese Fragen durch einige offene Fragen und zwei Fragen mit geschlossenen Antwortkategorien. Die Antworten auf die geschlossenen Fragen wurden quantitativ, die auf die offenen Fragen inhaltsanalytisch ausgewertet. Ein Beispielitem aus dem Fragebogen ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

**In welchen Situationen würden Sie das System nutzen?**

- Ich würde bei schlechten Sichtverhältnissen ganze Streckenabschnitte nach Display fahren.
- Ich würde mir mit dem System in spezifischen Situationen (z. B. Blendung durch den Gegenverkehr) punktuell Informationen einholen.
- Ich würde das System überhaupt nicht nutzen.

**Abb. 5.3: Beispielitem aus dem Fragebogen der Untersuchung**

Ergänzt wurden diese beiden Methoden des Selbstreports durch Beobachtungen der im Fond sitzenden Versuchsleitung. Verkehrssituationen, Wetterbedingungen und eventuelle Gefah-

rensitionen wurden notiert. Diese Beobachtungen wurden später den getätigten Äußerungen zugeordnet.

### 5.1.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecken

Jede Person fuhr an fünf Abenden jeweils eine Stunde mit dem System. Die Anzahl der Versuchsfahrten wurde erst im Laufe der Untersuchung festgelegt, da die Fahrten bis zu einer Gewöhnung an das System erfolgen sollten. Es zeigte sich, dass fünfmaliges Fahren mit dem Infrarot-Nachtsichtsystem ausreichte (vgl. Kap. 5.1.2.3) und weitere Versuchsfahrten im Rahmen dieser Studie<sup>15</sup> keine weiteren Erkenntnisse gebracht hätten. Es wurde ein Untersuchungsdesign mit mehreren Versuchsfahrten gewählt, da davon ausgegangen wurde, dass es bei der Nutzung eines neuen Systems zuerst zu einem Gewöhnungsprozess kommt, so dass die Untersuchungsergebnisse nur einer Versuchsfahrt das Nutzungsverhalten der Fahrer nicht valide abbilden würden. Winner et al. (2003, 5) resümieren auf der Grundlage verschiedener Probandenversuche mit ACC, dass „in Langzeitversuchen eindeutig Lerneffekte festgestellt werden konnten, die die Ergebnisse der Kurzzeitversuche in Zweifel ziehen lassen.“

Es wurde darauf geachtet, dass die Versuchsfahrten möglichst nur einige Tage auseinander lagen und dass jede Person bei möglichst vielen unterschiedlichen Wetterbedingungen (z. B. *kein Niederschlag, starker Regen, schwacher Regen*) fuhr, da die Systemperformance in dem Entwicklungsstand des genutzten Systems wetterabhängig war.

Da die Versuchspersonen aus unterschiedlichen Gegenden rekrutiert wurden, fuhren nicht alle Personen identische Versuchsstrecken. Es wurde aber darauf geachtet, dass alle Strecken vergleichbare Profile aufwiesen und jede Person vergleichbare Anteile an Fahrten durch kleine Ortschaften und durch Städte, sowie auf kleinen und ausgebauten Landstraßen sowie Autobahnen absolvierte.

## 5.1.2 Ergebnisse

In die Auswertung wurden die Äußerungen aller Probanden während der Versuchsfahrten aufgenommen. Die Protokolle der Fahrten sowie die Antworten auf offene Fragen auf dem Fragebogen wurden inhaltsanalytisch analysiert. Bei den Fragebögen wurden nur die derjenigen zehn Personen ausgewertet, die alle fünf Versuchsfahrten durchführten. Falls quantitative

<sup>15</sup> Weitergehende Erkenntnisse wären lediglich durch eine sehr viel längere Studie zu erhalten. Beispielsweise wenn Probanden über mehrere Wochen oder Monate privat ein System nutzen könnten und danach befragt würden. Dies war im Rahmen dieser Studie aber nicht möglich.

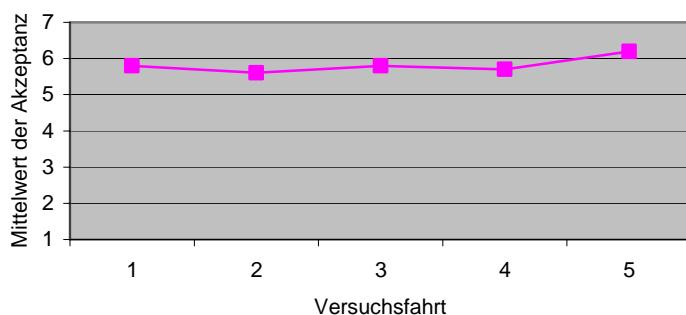
Gewichtungen von Aussagen sinnvoll waren, wurde die Anzahl der Personen, die diese Meinung äußerten, sowie die Anzahl der Nennungen angegeben. Zur inhaltlichen Strukturierung der Ergebnisse wurden die Auswertungskategorien *Allgemeine Bewertung des Systems* (Kap. 5.1.2.1), *Bewertung von Systemparametern* (Kap. 5.1.2.2) und *Nutzungsstrategien* (Kap. 5.1.2.3) formuliert.

### 5.1.2.1 Allgemeine Bewertung des Systems

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse dargestellt, welche die allgemeine Bewertung des Infrarot-Nachtsichtsystems betreffen. Diese Kategorie gibt Auskunft darüber, wie hoch die allgemeine Akzeptanz des Systems bei den Probanden ist und ob sie einen Nutzen in der Verwendung dieses Fahrerassistenzsystems sehen.

#### Akzeptanz

Bei der Fragebogenerhebung wurde auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 7 (sehr gut) erfragt, wie den Probanden das System insgesamt gefällt. Es zeigte sich eine hohe, über die Versuchsfahrten stabile Akzeptanz des Systems im Allgemeinen. Der Mittelwert der Beurteilung des Systems lag nach der ersten Fahrt bei 5,80 ( $\sigma = 1,033$ ) und nach der letzten Versuchsfahrt bei 6,20 ( $\sigma = 0,789$ ) (Abb. 5.4).



**Abb. 5.4: Veränderung der Mittelwerte der Akzeptanz im Verlauf der Versuchsfahrten, Skala von 1 (sehr schlecht) bis 7 (sehr gut)**

Die hohe Akzeptanz des Systems zeigte sich auch in den Äußerungen, die von den Versuchspersonen während der Versuchsfahrten getätigt wurden. Während im Rahmen der ersten Versuchsfahrten eher eine allgemeine Nützlichkeit des Systems ausgedrückt wurde, beurteilten einige Probanden das System bei späteren Versuchsfahrten differenzierter: der Nutzen wurde in bestimmten Situationen hervorgehoben oder aber verneint (5 Personen, 6 Nennungen). Als vorteilhaft wurde das System z. B. auf dunklen Strecken, in Kreuzungsbereichen, auf Straßen ohne Mittellinien und Begrenzungen angesehen sowie in Situationen, in denen kein Fernlicht verwendet werden konnte. Als eher schlecht oder unnütz wurde das System dagegen in Kur-

ven, beim Kolonnenfahren oder bei ausreichender Helligkeit aufgrund anderer Lichtquellen beurteilt. Zwei Versuchspersonen standen dem System eher skeptisch gegenüber. Diese Meinung blieb über alle Versuchsfahrten relativ stabil, lediglich die Ausprägung der Skepsis wurde etwas geringer.

Als besonders positiv wurde eine *Bessere Erkennbarkeit* durch das Nachtsichtsystem bewertet. Insgesamt 35 Anmerkungen (8 Personen) wurden hierzu im Rahmen der Fragebogenerhebung niedergeschrieben. Die Aussagen während der Fahrten zu diesem Themenkomplex lassen sich in die Bereiche *Allgemeine Erkennbarkeit* (10 Personen, 27 Nennungen), *Erkennbarkeit von Personen* (11 Personen, 54 Nennungen) und *Erkennbarkeit von Objekten* (8 Personen, 31 Nennungen) kategorisieren.

### Anstrengung

Durch den Fragebogen wurde erfragt, ob das Fahren mit oder ohne Infrarot-Nachtsichtsystem als anstrengender empfunden wurde. Es zeigte sich, dass das Fahren mit dem System nach der fünften Fahrt nicht als anstrengender als ohne System bezeichnet wurde. Während der vorherigen Fahrten wurde lediglich von zwei Personen (3 Nennungen) das Fahren mit dem System als anstrengender empfunden. Vier Personen charakterisierten das Fahren mit dem Infrarot-Nachtsichtsystem als weniger anstrengend. Während der Versuchsfahrten gab es zu dieser Thematik nur eine Äußerung, diese bei der ersten Versuchsfahrt, was ebenfalls zeigte, dass die zu vermutende erhöhte Anstrengung durch das System kein Thema für die Versuchspersonen war.

### Sicherheitsgewinn

Die Probanden sollten angeben, ob sie durch das System das Gefühl eines Sicherheitsgewinns hatten. Hier zeigte sich eine Steigerung des Sicherheitsgefühls durch mehrmaliges Fahren. Der Mittelwert lag nach der ersten Fahrt noch bei *häufig* (5,1), ab der dritten Fahrt und dann konstant bis zur letzten Fahrt lag er bei *sehr häufig* (5,9).<sup>16</sup> Zu Beginn der Fahrten ist noch eine hohe Streuung bei Skalenwerten von 2 bis 7 ( $\sigma = 1,792$ ) zu beobachten; bei den letzten Fahrten wurden nur noch die Skalenwerte 5 bis 7 ( $\sigma = 0,876$ ) angekreuzt.

### Irritationen durch das System

Es wurde die Frage gestellt, ob die Versuchspersonen während der Fahrt durch das System irritiert wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass es große inter- und intraindividuelle Unterschiede in den Antworten gab. Einige Personen wurden während keiner Versuchsfahrt durch das System irritiert, bei anderen schwankten die Antworten stark, weil z. B. eine Irritation nicht

---

<sup>16</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (Ja, absolut)

zu Beginn, sondern erst bei einer späteren Fahrt auffiel. Trotzdem zeigte der Mittelwert von 1,94<sup>17</sup>, dass die Probanden über alle Fahrten sehr wenig von dem System irritiert wurden.

Im Verlauf der Versuchsfahrten gaben dagegen alle elf Personen (49 Äußerungen) an, dass es während der Fahrt zu Irritationen gekommen ist. Diese Äußerungen verteilten sich auf alle Versuchsfahrten, d. h., die Problempunkte verringerten sich teilweise nicht durch mehrmaliges Fahren. Als Probleme wurden genannt:

- *Unsicherheit bei der Reaktion auf die im Display gesehenen Objekte* (5 Personen, 12 Nennungen)
- *Verwechslung Display mit Rückspiegel* (5 Personen, 10 Nennungen)
- *Probleme bei der Informationsaufnahme* (3 Personen, 6 Nennungen)
- *Probleme bei der Unterscheidung von vorausfahrenden Fahrzeugen und Gegenverkehr* (3 Personen, 5 Nennungen,)
- *Schwierigkeiten beim Spurhalten, insbesondere in Kurven* (4 Personen, 4 Nennungen)
- *Probleme, mit dem System Entfernungen einzuschätzen* (3 Personen, 3 Nennungen)

### Gefahrensituationen

Ein Ziel des Infrarot-Nachtsichtsystems ist das frühzeitige Erkennen von Gefahrensituationen. Es trat während der Versuchsfahrten nur eine geringe Anzahl von konkreten Gefahrenmomenten auf. Dennoch beschrieben die Probanden potenzielle Gefahrensituationen, die durch das System früher eingeschätzt werden konnten. Am häufigsten wurden die bessere und frühere Erkennung von Personen und Objekten (auch Tiere) auf und neben der Fahrbahn genannt (8 Personen, 19 Nennungen). Außerdem konnten Kurven (4 Personen, 11 Nennungen), der Straßenverlauf (2 Personen, 3 Nennungen) und die Fahrbahnbeschaffenheit (1 Person, 2 Nennungen) frühzeitig und besser erkannt werden.

### Gefährdung durch das System

Die Probanden sollten auf dem Fragebogen angeben, ob es durch das System zu einer Gefährdung gekommen ist und falls ja, sollte diese geschildert werden. Auf dem Fragebogen wird lediglich von einer Person bei zwei Fahrten eine Gefährdung genannt: Das über das Display angebotene Bild wurde nicht sofort als Realität erkannt, so dass es zu verspäteten Reaktionen kam. Als Beispiel wird angeführt, dass im Display das Bremsen eines vorausfahrenden Autos gesehen wurde. Darauf wurde aber nicht sofort reagiert, sondern erst nach einem kontrollierenden Blick durch die Windschutzscheibe. Dieses Problem wurde jeweils bei den letzten beiden Fahrten beschrieben.

---

<sup>17</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (sehr häufig)

## Kaufinteresse

Die Antworten auf die Frage, ob die Versuchspersonen das System besitzen möchten, wiesen eine starke Streuung auf und reichten vom Skalenwert 1 bis zum Skalenwert 7.<sup>18</sup> Lediglich zwei Probanden hatten wenig bis kein Interesse am Besitz des Systems; alle anderen wollten das System *eher gerne* bis *unbedingt* besitzen. Nach der fünften Versuchsfahrt waren die Versuchspersonen bereit, durchschnittlich 1233 Euro für das System auszugeben. Dieser Wert änderte sich während der gesamten Versuchsfahrten kaum (Mittelwert nach der 1. Fahrt 1210 Euro). Von den Versuchspersonen waren lediglich zwei nicht bereit, überhaupt etwas für das System auszugeben.

### 5.1.2.2 Bewertung von Systemparametern

Die Bewertung und Optimierung von Systemparametern ist ein wichtiger Faktor im Entwicklungsprozess von neuen Systemen. Bereits die Falschauslegung eines Details kann dazu führen, dass ein ansonsten gutes System nicht genutzt wird. Bei einem Infrarot-Nachtsichtsystem haben die Position des Displays sowie das dargebotene Bild einen starken Einfluss auf den Nutzen des Systems.

## Display

Die Erkennbarkeit der Darstellung auf dem Display wurde über alle Versuchsfahrten als *gut* bezeichnet (Mittelwert aller Werte 5,98<sup>19</sup>). Zwei Versuchspersonen merkten auf dem Fragebogen an, dass ihre Bewertungen der Darstellung auf dem Display durch die derzeitigen schlechten Wetterverhältnisse negativ beeinflusst wurden. Es gab keine signifikanten Änderungen über die Zeit. Während die allgemeine Bilddarstellung auf dem Display als prinzipiell gut beurteilt wurde, wurde auf dem Fragebogen die Position des Displays (7 Personen, 18 Nennungen) als verbesserungswürdig genannt. Diese Kritik entsprach auch den – während der Fahrten – geäußerten Meinungen der Probanden zur Position des Displays auf dem Armaturenbrett. Von den insgesamt 24 Äußerungen (8 Personen) zu dieser Thematik kritisierten 23 (8 Personen) die momentane Displayposition. Die Position des Displays wurde schnell als störend empfunden: Bereits nach der ersten Fahrt äußerten dies fünf Personen. Durch die Displayposition kam es bei einigen Versuchsfahrern zu Irritationen, insbesondere zu einer Verwechslung zwischen Display und Rückspiegel.

---

<sup>18</sup> Skala von 1 (kein Interesse) bis 7 (unbedingt)

<sup>19</sup> Skala von 1 (sehr schlecht) bis 7 (sehr gut)

### Bildwinkel

Auch der Bildwinkel, d. h. der Bereich des Sichtfelds der durch die Kamera erfasst und auf dem Display dargestellt wird, wurde als nicht optimal bezeichnet (6 Personen, 14 Nennungen). Zu dieser Thematik wurden während der Versuchsfahrten 50 Äußerungen (10 Personen) getätigt. Die meisten Äußerungen bewerteten den Bildwinkel als zu klein, insbesondere bei Kurvenfahrten und in Ortschaften, weil dadurch Fußgänger auf dem Bürgersteig nicht erkannt wurden. Die Kritik wurde überwiegend nicht zu Anfang der Fahrten geäußert. Lediglich eine Versuchsperson gab dies nach der ersten Fahrt als störend an, eine weitere nach der zweiten Fahrt.

### Sichtweite

Die Sichtweite des Systems wurde auf dem Fragebogen als ausreichend bezeichnet. Sie lag über alle Versuchsfahrten oberhalb des zweithöchsten Skalenwerts (Mittelwert aller Werte: 6,28<sup>20</sup>). Es gab keine bemerkenswerten Veränderungen im Verlaufe der Versuchsfahrten. Auch während der Versuchsfahrten hoben neun Personen (13 Nennungen) die durch das System erhaltene größere Sichtweite hervor, mit der man einen guten Überblick über die Straße erhält.

#### 5.1.2.3 Nutzungsstrategien

Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden ihre Nutzungsstrategien äußeren Faktoren wie Dunkelheitsgrad, Strecken- und Verkehrsbedingungen anpassten. Die Strategien bildeten sich mit zunehmender Gewöhnung aus. Als problematisch erwies sich lediglich eine Versuchsperson, die fast ausschließlich nach Display fuhr. Während der Versuchsfahrten gab es zu diesem Themenkomplex insgesamt 81 Äußerungen (9 Personen). Die Nutzungshäufigkeit war abhängig von folgenden Faktoren:

- **Dunkelheitsgrad** (6 Personen, 10 Nennungen): Dabei wird der Nutzungsgrad des Systems beim Fahren auf dunklen Straßenabschnitten hervorgehoben. Bei ausreichender Helligkeit, beispielsweise durch vorausfahrende Fahrzeuge oder durch Straßenbeleuchtung, wird das System nicht genutzt.
- **Streckenbedingungen** (6 Personen, 20 Nennungen): Das System wird auf gerader Straße viel häufiger genutzt als auf kurvigen Streckenabschnitten, da man sich dort zu sehr auf den Straßenverlauf konzentrieren muss.

---

<sup>20</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (Ja, absolut)

- **Verkehrsbedingungen** (5 Personen, 9 Nennungen): Bei geringer Verkehrsdichte wird das System häufig genutzt. Dagegen bringt es keine Vorteile, wenn vorausfahrende Fahrzeuge vorhanden sind.

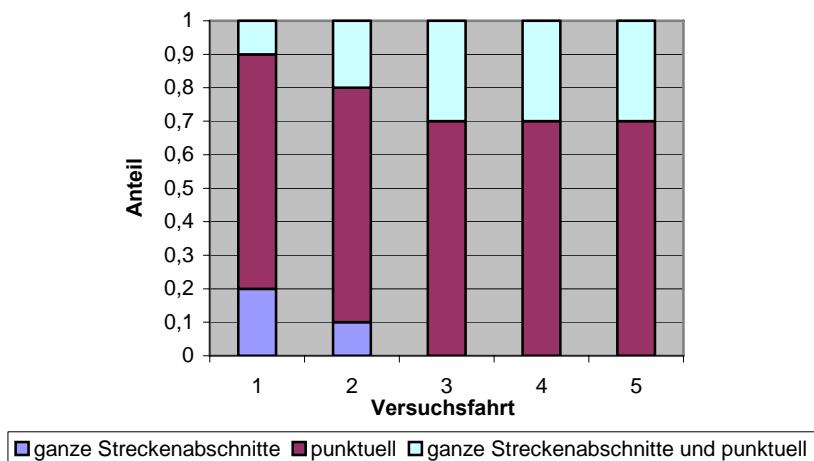
### Nutzungshäufigkeit

Bei einigen Versuchspersonen war der Nutzungsgrad bei den ersten Fahrten noch relativ gering, weil sie Unsicherheiten bei der Systemnutzung hatten (5 Personen, 5 Nennungen). Diese Aussagen wurden überwiegend während der ersten drei Fahrten getätigt, lediglich eine Person äußerte dies noch bei der letzten Fahrt. Einige Personen versuchten im Laufe der Versuchsfahrten, insbesondere den ersten Fahrten, bewusst Nutzungsstrategien auszubilden (3 Personen, 4 Nennungen). Die Nutzungshäufigkeit war außerdem abhängig von der Gewöhnung an das System und an das Versuchsfahrzeug (4 Personen, 10 Nennungen). Ab der zweiten Versuchsfahrt bemerkten die ersten Versuchspersonen eine einsetzende Gewöhnung, woraus zumeist eine Erhöhung der Nutzungshäufigkeit resultierte. Dies setzte sich im Laufe der weiteren Fahrten fort. Die eingetretene Gewöhnung führte aber teilweise auch zu einer geringeren Nutzung, beispielsweise auf bekannten Strecken.

Die Probanden wurden mittels Fragebogen gefragt, in welchen Situationen sie das System nutzen würden. Zur Beantwortung gab es drei vorgegebene Antwortkategorien:

- 1) Ich würde bei schlechten Sichtverhältnissen ganze Streckenabschnitte nach Display fahren.
- 2) Ich würde mit dem System in spezifischen Situationen (z. B. Blendung durch den Gegenverkehr) punktuell Informationen einholen.
- 3) Ich würde das System überhaupt nicht nutzen.

Die Kategorie 3 wurde keinmal angekreuzt, d. h. alle Probanden würden das System nutzen. Die Anzahl der Versuchspersonen, die mit dem System punktuell Informationen einholten, war über alle Versuchsfahrten konstant. Die einzige Veränderung war, dass es im Laufe der Fahrten weniger Personen gab, die nur Kategorie 1 ankreuzten. Dafür stieg die Anzahl der Personen, die die Kategorien 1 und 2 gleichzeitig ankreuzten (Abb. 5.5).

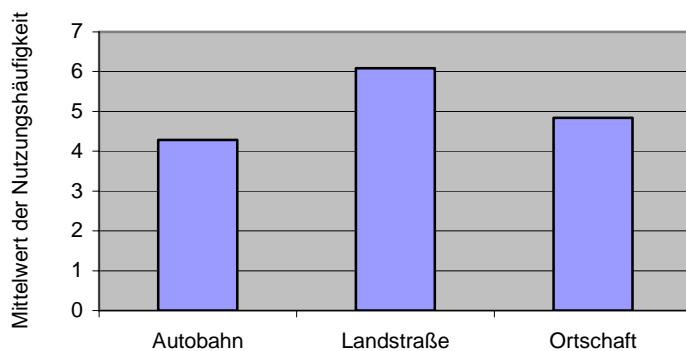


**Abb. 5.5:** Situationsabhängige Nutzung des Systems

70 % der Befragten gaben an, mit dem System punktuell Informationen einzuholen. Dies entsprach der intendierten Nutzung des Systems. Obwohl den Probanden vor der ersten Fahrt erklärt wurde, dass das System zur punktuellen Informationsaufnahme verwendet werden soll, nutzten 30 % der Befragten es zeitweise auch, um ganze Streckenabschnitte nach Display zu fahren. Diese Nutzungsstrategie wurde überwiegend auf dunklen Landstraßen mit wenig Verkehr ausgebildet.

### Streckenbedingungen

Im Fragebogen wurde die Frage gestellt, wie häufig die Versuchspersonen auf einer siebenstufigen Skala<sup>21</sup> das System auf den Straßentypen *Autobahn*, *Landstraße* und *geschlossene Ortschaft* nutzen würden. Die Mittelwerte der Antworten über alle Fahrten zeigten eine Bevorzugung des Systems auf Landstraßen (Abb. 5.6).



**Abb. 5.6:** Mittelwerte der Nutzungshäufigkeit auf verschiedenen Straßentypen über alle Fahrten, Skala von 1 (gar nicht) bis 7 (sehr häufig)

<sup>21</sup> Skala von 1 (gar nicht) bis 7 (sehr häufig)

Bei den Antworten zur Nutzungshäufigkeit auf der Autobahn und in Ortschaften waren während aller Versuchsfahrten hohe Standardabweichungen zu beobachten. Darin zeigte sich die hohe Situationsabhängigkeit der Nutzungshäufigkeit auf diesen Straßen. Dagegen wird die Standardabweichung bei den Antworten zur Nutzung auf der Landstraße mit steigender Zahl der Versuchsfahrten immer geringer. Bei der letzten Versuchsfahrt wurden nur noch die Skalenwerte zwischen 5 (eher häufig) und 7 (sehr häufig) angekreuzt, während bei der ersten Fahrt noch die Werte 2 (sehr selten) bis 7 (sehr häufig) vorkamen.

Auch in den Äußerungen während der Versuchsfahrten spiegelte sich die Abhängigkeit der Bewertung und der Nutzung des Systems von den Streckenbedingungen wider. Insgesamt gab es 55 Äußerungen von elf Personen zum Thema *Ortschaft*. Diese unterteilten sich in 34 positive Äußerungen (11 Personen) und 21 Äußerungen zur eingeschränkten bzw. fehlenden Nutzbarkeit des Systems in geschlossenen Ortschaften. Als positiv hervorgehoben wird die bessere Sicht mit dem System (10 Personen, 19 Nennungen) und das bessere und frühere Erkennen von Personen (8 Personen, 10 Nennungen). Acht Versuchspersonen (21 Nennungen) gaben an, dass sie das System in geschlossenen Ortschaften, insbesondere im Vergleich zu Landstraßen, weniger oder gar nicht nutzten. Gründe hierfür sind die ausreichende Helligkeit und die hohe Informationsmenge, die in geschlossenen Ortschaften verarbeitet werden muss.

Bei den Aussagen der Versuchspersonen hinsichtlich Fahrten auf Landstraßen musste bei der Auswertung zwischen engen und gut ausgebauten Landstraßen/Bundesstraßen unterschieden werden. Die Probanden bewerteten das System beim Einsatz auf kleinen Landstraßen als sehr gut. Von den 53 Äußerungen (10 Personen) zu diesem Thema waren 48 (10 Personen) positiv. Lediglich vier Personen (5 Nennungen) gaben Einschränkungen bei der Nutzung auf kleinen Landstraßen an. Als Grund wurde die benötigte Konzentration der Versuchspersonen auf die Straße genannt. Dies verstärkte sich noch durch schlechte Wetterbedingungen.

Nicht ganz so eindeutig bewerteten die Probanden den Systemnutzen auf gut ausgebauten Landstraßen/Bundesstraßen, wenngleich auch hier die positiven Äußerungen überwogen. Sieben Versuchspersonen (13 Nennungen) empfanden das System hier als nützlich. Hervorgehoben wurden die Sichtweite, das frühzeitige Erkennen des Straßenverlaufs, der ausreichende Bildwinkel auf gerader Straße und die Kompensation der Blendung durch den Gegenverkehr. Positiv wurde auch die einfachere Nutzung (2 Personen, 3 Nennungen) des Systems auf einer breiten Straßen gesehen. Zwei Personen (7 Nennungen) gaben während verschiedener Fahrten an, auf ausgebauten Landstraßen/Bundesstraßen das System nicht zu benötigen. Sie schauten lediglich aus Interesse bzw. aus Langeweile auf das Display.

Relativ ausgewogen waren die positiven und negativen Meinungen zum Fahren auf der Autobahn mit dem Nachtsichtsystem. Von den 27 getätigten Äußerungen (9 Personen) zu diesem

Thema waren 14 positiv (6 Personen) und 13 negativ (7 Personen). Als Vorteile für die Autobahn wurde die größere Sichtweite, insbesondere zum früheren Erkennen des Straßenverlaufs und des Straßenverkehrs, genannt. Dies spielte auch deshalb eine große Rolle, weil auf der Autobahn Fernlicht nur selten genutzt werden kann. Die Nutzbarkeit des Systems auf der Autobahn war abhängig von der Verkehrsdichte (3 Personen, 3 Nennungen). Je stärker der Verkehr, um so weniger wurde das System benötigt. Sechs Personen (11 Nennungen) bezeichneten das System auf der Autobahn, insbesondere bei starkem Verkehr, als wenig bis gar nicht nutzbar bzw. nicht notwendig. Gründe waren

- die hohe Fahrgeschwindigkeit, welche die Konzentration auf andere Fahraufgaben verlangt,
- die fehlende Blendung durch den Gegenverkehr,
- die ausreichende Ausleuchtung durch andere Fahrzeuge.

Eine Person sagte hingegen, dass sie das System auf der Autobahn relativ häufig verwendet, da auf der Autobahn keine überraschenden Verkehrssituationen eintreten und sie sich dadurch häufiger erlaubt, den Blick von der Straße abzuwenden. Diejenige Person, die bei allen Versuchsfahrten angab, nur nach Display zu fahren, behielt dies auch auf der Autobahn bei.

### Situationsabhängigkeit der Systemnutzung

Da das Infrarot-Nachtsichtsystem nicht so genutzt werden soll, dass nur nach Display gefahren wird, muss der Nutzer lernen, in welchen Situationen es hilfreich ist. Nach einem Gewöhnungsprozess sollte der Fahrer dann nur noch gezielt Informationen von dem Display ablesen.

Die Probanden waren der Meinung, dass das System sehr hilfreich zur Erkennung des Straßenverlaufs auf dunklen Straßen ist. Bei der Beantwortung des Fragebogens wurde von der ersten Versuchsfahrt an häufig eine bessere Erkennbarkeit des Straßenverlaufs aufgrund des Systems angegeben. Der Mittelwert lag über alle Fahrten bei einem Skalenwert von 6,04<sup>22</sup>. Die gute Bewertung der Erkennbarkeit des Straßenverlaufs mit dem System spiegelte sich auch in den Erläuterungen während der Versuchsfahrten wider. Insbesondere auf Landstraßen wurden Aussagen zu diesem Themenkomplex getätigt, die alle eine Verbesserung des Erkennens des Straßenverlaufs durch das System beschreiben (17 Äußerungen, 5 Personen). Auch wurde der große Nutzen des Systems beim frühzeitigen Erkennen von Kurven hervorgehoben (6 Personen, 10 Nennungen). Überwiegend kritisch wurde das System dagegen im Bereich des Fahrens in der Kurve gesehen. Lediglich zweimal (2 Personen) wurde auch der Nutzen des Systems im Hinblick auf das Kurvenfahren genannt. Dagegen gaben sechs Personen (12 Nennungen) an, das System in Kurven gar nicht zu nutzen. Die Nutzung des Systems beim Durchfahren von Kurven barg ein Gefahrenpotential (2 Personen, 2 Nennungen). Sechs Per-

---

<sup>22</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (sehr häufig)

sonen (12 Nennungen) gaben an, dass der Bildwinkel für Kurvenfahrten, insbesondere in engen Kurven, zu klein ist. Dies führte zu einer geringen Nutzung des Systems in Kurven.

Die Auswertung der Fragebogen ergab, dass die Probanden häufig mit dem System die Blendung durch den Gegenverkehr kompensieren konnten. Dies zeigte sich schon während der ersten Versuchsfahrt und blieb dann nahezu konstant. Der Mittelwert über alle Fahrten lag bei 5,3<sup>23</sup>. Die Standardabweichung war bei dieser Frage durchgängig relativ hoch ( $\sigma = 1,269$  bis 1,619). Dies lag insbesondere in den Antworten einer Versuchsperson begründet, die die Kompensation bei Blendung während aller Versuchsfahrten als schlecht bewertete.

Dass das Thema *Blendung* für die Probanden wichtig war, zeigte sich darin, dass während der Versuchsfahrten von allen elf Personen zusammen 48 Aussagen hierzu getätigt wurden. Sieben Personen hoben positiv hervor, dass sie mit dem System bei Gegenverkehr weniger geblendet wurden. Dieser Vorteil des Systems wurde teilweise erst bei späteren Fahrten registriert. Auch wurde das System als positiv für den Gegenverkehr bezeichnet, da dieser nicht mehr durch Fernlicht geblendet wird.

Sechs Personen (20 Nennungen) berichteten dagegen von einer Blendung durch das Display des Systems, wenn andere Lichtquellen, insbesondere Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge, vorhanden waren. Weitere Blendquellen sind Verkehrsschilder. Die meisten Probanden nannten diese Probleme, empfanden sie aber nicht als störend.

Während der Fahrten zeigte sich eine große Wetterabhängigkeit der Blendung durch das Display (7 Personen, 7 Nennungen). Aufgrund von IR-Reflexionen an starkem Regen, Nebel oder Schneefall kam es zu einer Blendung, ausgelöst durch das System selbst, die teilweise dazu führte, dass das System nicht mehr nutzbar war.

### **Veränderung der Systemnutzung**

Die Veränderungen durch mehrmalige Versuchsfahrten wurden durch die offene Frage *Haben Sie bei dieser Fahrt beim Umgang mit dem System eine Veränderung zur letzten Fahrt bemerkt?* auf dem Fragebogen erfragt. Schon nach der zweiten Versuchsfahrt gaben einige Personen an, das System im Vergleich zu früheren Fahrten häufiger zu nutzen (5 Personen, 8 Nennungen). Zwei Versuchspersonen berichteten dagegen nach der dritten Versuchsfahrt von einer verringerten Nutzungshäufigkeit, da nicht mehr aus Interesse an einem neuen System, sondern nur noch dann, wenn es benötigt wurde, auf das Display geschaut wurde. Ab der zweiten Versuchsfahrt berichteten die Versuchspersonen (5 Personen, 12 Nennungen) von einer Gewöhnung an die Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems und einer größeren Ver-

---

<sup>23</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (Ja, absolut)

trautheit im Umgang damit. Dies zog sich bis zur letzten Versuchsfahrt durch. Das System wurde nach mehreren Versuchsfahrten positiver bewertet und vorherige Irritationen traten seltener auf (4 Personen, 4 Nennungen). Im Laufe der Versuchsfahrten kam es zur Veränderung der Nutzungsstrategien (3 Personen, 5 Nennungen), beispielsweise zu einer gezielten Nutzung bei schlecht einsehbarem Straßenverlauf.

Auch während der Versuchsfahrten wurden schon ab der zweiten Versuchsfahrt Äußerungen zu eingetretenen Veränderungen getätigt. Die einsetzende Gewöhnung führte zu einer häufigeren Nutzung (3 Personen, 7 Nennungen) und zu einer größeren Sicherheit beim Umgang mit dem System. Eine Person gab dagegen an, durch die Gewöhnung das System nicht mehr so häufig zu nutzen. Außerdem verringerten sich bei einigen Probanden Probleme beim Umgang mit dem System bzw. sie störten nicht mehr so stark wie bei früheren Versuchsfahrten. Beispiele hierfür sind die mangelnde Unterscheidbarkeit von Scheinwerfern und Rückleuchten, die Blendung durch das System sowie die Verwechslung von Display und Rückspiegel.

Acht Personen (17 Nennungen) äußerten während ihrer Versuchsfahrten, dass sie noch kein ausreichendes Vertrauen in das System hatten. Dies führte dazu, dass das System weniger genutzt wurde oder Informationen vom Display durch einen Windschutzscheibenblick vor einer Reaktion überprüft wurden. Dreizehn dieser Aussagen wurden während der ersten beiden Versuchsfahrten getätigt, lediglich vier im Laufe der letzten drei Fahrten, was auf eine Gewöhnung an das System hinweist. Diese Gewöhnung zeigte sich auch bei geäußerten Problemen bei der Blickabwendung von der Straße (3 Personen, 3 Nennungen). Dieses Problem wurde nur während der zweiten Versuchsfahrt genannt und bei späteren nicht mehr.

Die Anzahl der Versuchsfahrten die benötigt wurden, um sich an das System zu gewöhnen, ist interindividuell unterschiedlich. Insbesondere Versuchspersonen die überwiegend Kleinwagen fuhren brauchten länger. Spätestens nach der fünften Versuchsfahrt sagten alle Versuchspersonen, dass aus weiteren Fahrten lediglich eine größere Routine im Umgang mit dem System resultieren würde, diese aber keine neuen Erkenntnisse bringen würden. Die Ergebnisse zeigten eine sehr schnelle Gewöhnung an das untersuchte System. Nach der fünften Fahrt war der Gewöhnungsprozess weitgehend abgeschlossen.

Insgesamt wurden während der Fahrten 14 Äußerungen (10 Personen) zur Fahrgeschwindigkeitsänderung durch die Systemnutzung getätigt. Drei Personen bemerkten keine Veränderung der Fahrgeschwindigkeit. Insgesamt äußerten 5 Personen, mit dem System auf dunklen Landstraßen schneller zu fahren als ohne das System. Als Begründungen werden die größere Sichtweite und die daraus resultierende bessere Erkennung des Straßenverlaufs genannt. Zwei Personen verringerten durch das System ihre Geschwindigkeit, insbesondere wenn sie Streckenabschnitte nach Display fuhren. Als Erklärung für eine Geschwindigkeitsverlangsamung

wurde der Ort des Displays, der sich außerhalb des normalen Blicks auf die Straße befand, herangezogen. Diese Aussagen zur Fahrgeschwindigkeit waren subjektive Einschätzungen der Probanden die durch objektive Geschwindigkeitsmessungen überprüft werden müssten.

### 5.1.3 Methodisches Fazit

An dieser Stelle erfolgt ein kurzes Fazit zu den in dieser Studie eingesetzten empirischen Forschungsmethoden. Eine ausführliche Diskussion und ein Vergleich aller im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Methoden erfolgt in Kapitel 7.

Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, welche Strategien die Fahrer bei der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems, einem Infrarot-Nachtsichtsystem, verwenden. Dabei wurde betrachtet, ob es möglich ist, mit subjektiven Methoden des Selbstreports (vgl. Kap. 3.1.1) die Nutzungsstrategien und insbesondere auch den Prozess der Ausbildung derselben im Gewöhnungsprozess zu beschreiben.

Es zeigte sich, dass durch die nach jeder der fünf Versuchsfahrten durchgeführte Fragebogen-erhebung insbesondere bei den geschlossenen Fragen nur wenige Unterschiede über die Zeit erkennbar waren. Grund hierfür war möglicherweise die Verwendung von siebenstufigen Ratingskalen, die nur eine geringe Varianz der Ergebnisse zulassen. Dies gilt insbesondere bei einer bereits relativ guten Bewertung des Systems nach der ersten Versuchsfahrt.

Besser wurden die Veränderungen in den Einschätzungen der Probanden dagegen durch die während der Versuchsfahrten getätigten und protokollierten Äußerungen abgebildet. Durch Nachfragen konnten hier Veränderungen gezielt erhoben werden. Auch die offenen Fragen des Fragebogens waren zur Erfassung eines Gewöhnungsprozesses geeignet.

Ein Vorteil der Verwendung der Methoden des Selbstreports ist der geringe Durchführungs-aufwand, wodurch jede Versuchsfahrt inklusive der Nachbefragung nur eineinhalb Stunden dauerte. Dies war wichtig, da jeder Proband fünf Versuchsfahrten absolvierte.

Trotzdem besteht die Notwendigkeit, nach weiteren empirischen Forschungsmethoden zur Beschreibung der Ausbildung von Nutzungsstrategien an ein neues System im Kraftfahrzeug zu suchen. Insbesondere sind dabei die objektive Erfassung von Nutzungsstrategien sowie der Vergleich von objektiv und subjektiv erhobenen Daten von Interesse.

## 5.2 Studie 2: Blickbewegungsmessungen zur Erfassung der Nutzungsstrategien

Das Infrarot-Nachtsichtsystem ist ein visuell arbeitendes Fahrerassistenzsystem, d. h. es kann im derzeitigen Entwicklungsstand<sup>24</sup> nur genutzt werden, indem der Fahrer seinen Blick auf das Display richtet, um Informationen abzulesen. Da das menschliche Auge nur einen kleinen Bereich scharf abbildet, kann aus der Blickrichtung auf die aktuelle Aufmerksamkeitszuwendung geschlossen werden (Bubb, 2002). Schaut ein Fahrzeugführer auf den Monitor des Nachtsichtsystems, so kann davon ausgegangen werden, dass er dabei die dargebotene Szenerie wahrnimmt. Damit können mit der Methode der Blickbewegungsmessung die Strategien bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems objektiv erfasst werden.

### 5.2.1 Untersuchungsdesign

Die Kapitel 5.2.1.1 bis 5.2.1.5 geben einen Überblick über das Untersuchungsziel, das Versuchsfahrzeug, die Stichprobe, die eingesetzten empirischen Forschungsmethoden sowie die Versuchsfahrten und die Versuchsstrecken der Studie 2.

#### 5.2.1.1 Untersuchungsziel

Die in Kapitel 5.1 dargestellte Studie zu den Strategien bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems hat die Notwendigkeit aufgezeigt, für die Untersuchung dieser Strategien über objektive empirische Forschungsmethoden zu verfügen.

Eine mögliche Methode für die objektive Erfassung der Nutzung eines visuell arbeitenden FAS ist die Blickbewegungsmessung (vgl. Kap. 3.1.2.1). Ob sich diese Methode zur Erhebung der Strategien bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems eignet, sollte mit Hilfe einer Evaluationsstudie geklärt werden. Dafür wurde folgenden inhaltlichen Fragestellungen nachgegangen:

- Welche Strategien verwenden die Fahrer bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems?

---

<sup>24</sup> Weiterentwicklungen streben eine Objekterkennung und eine, beispielsweise akustische, Warnung des Fahrers bei auftauchenden Objekten an.

- Wie bilden sich diese Strategien im Rahmen eines Gewöhnungsprozesses aus bzw. wie verändern sie sich?
- In welchen Situationen wird ein Infrarot-Nachtsichtsystem genutzt?

Es wurde methodisch untersucht, ob es möglich ist, die oben genannten inhaltlichen Fragestellungen mit der Methode der Blickbewegungsmessung zu bearbeiten. Außerdem wurde betrachtet, inwieweit die mit dieser objektiven Methode erfassten Nutzungsstrategien mit denen durch Selbstreport erhobenen subjektiven Einschätzungen der Probanden hinsichtlich ihres Nutzungsverhaltens übereinstimmen.

### 5.2.1.2 Versuchsfahrzeug

Für diese Studie stand als Versuchsfahrzeug ein BMW E60 545i zur Verfügung. Das Fahrzeug verfügte über ein aktives Infrarot-Nachtsichtsystem. Das Bild des Nachsichtsystems wurde dem Fahrer über einen TFT-Monitor dargeboten, der rechts vom Fahrer vor dem serienmäßigen Control Display angebracht war (Abb. 5.7). Er hatte eine VGA-Auflösung von 640 x 480 Pixel bei einer Bildschirmdiagonale von 6,5''. Die Helligkeit war individuell dimmbar von 5 bis 400 cd/qm.



**Abb. 5.7: Display des Nachsichtsystems im Versuchsfahrzeug**

### 5.2.1.3 Stichprobe

An der Studie nahmen sechs Probanden teil. Eine größere Stichprobe war nicht realisierbar, da aufgrund der teilweise langwierigen Kalibrierung des Eye-Tracking-Systems nur eine Versuchsfahrt pro Abend durchgeführt werden konnte.

Als Versuchspersonen wurden lediglich erfahrene Fahrer (vgl. Kap. 5.1.1.3) rekrutiert, da Untersuchungen gezeigt haben, dass unerfahrene Fahrer signifikant andere Blickbewegungen aufweisen als erfahrene Fahrer (Lansdown et al., 1999; Wikman et al., 1998). Beispielsweise zeigen Untersuchungen, dass Fahrpraxis zu einem größeren Sehfeldumfang führt (Heinrich, 1987). Unerfahrene Fahrer fixieren eher in der Nähe des Fahrzeugs sowie an der rechten Fahrbahnseite und weisen einen relativ engen Bereich der Blickzuwendungen auf (Dewar, 1988). Außerdem schauen unerfahrene Fahrer weniger in die Spiegel (Mourant, 1972). Erfahrene Fahrer haben größere Kapazitäten zur Nutzung von zusätzlichen Systemen zur Verfügung, da sie weniger Aufmerksamkeit für die Fahraufgabe benötigen. Eine Studie von Summala, Nieminen und Punto (1996) zeigt, dass Fahranfänger zu Beginn noch das foveale Sehen für die Spurhaltung benötigten; bei steigender Fahrpraxis wird hierfür immer mehr das peripherie Sehen genutzt.

Es wurden lediglich männliche Versuchspersonen rekrutiert, um die Stichprobe möglichst homogen zu gestalten. Das Alter der Probanden lag zwischen 39 und 67 Jahren ( $\bar{x} = 51,3$  Jahre), der aktive Führerscheinbesitz bei durchschnittlich 32,8 Jahren und die jährlich gefahrenen Kilometer zwischen 13.000 und 30.000 km ( $\bar{x} = 17.167$  km).

Außerdem war wichtig, dass die Probanden noch keine Erfahrungen mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem hatten.

#### 5.2.1.4 Empirische Forschungsmethoden

Zur Erfassung der Nutzungsstrategien der Versuchsfahrer wurde die Methode der Blickbewegungsmessung, das Eye-Tracking, gewählt. Ergänzend zu den Blickbewegungsmessungen wurden die subjektiven Einschätzungen der Probanden mittels einer Fragebogenerhebung (siehe A.1.2) nach jeder Versuchsfahrt erfasst. Abbildung 5.8 zeigt ein Beispielitem des Fragenbogens.

**In welchen Fahrsituationen haben Sie das Nachtsichtsystem benutzt?**

---

---

---

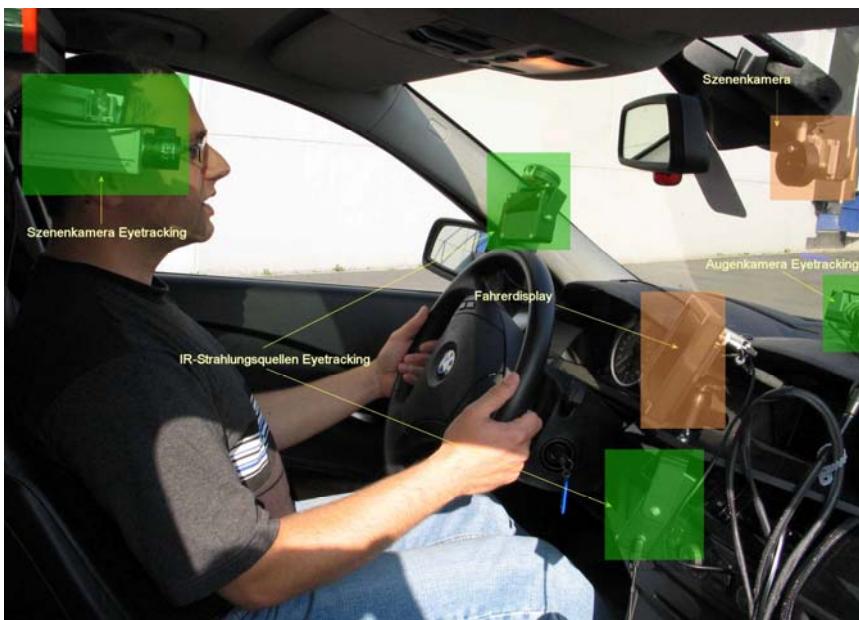
**Abb. 5.8:** Beispielitem aus dem Fragebogen der Untersuchung

Die subjektiven Befragungsdaten der Probanden wurden mit den objektiven Eye-Tracking-Daten dahingehend verglichen, ob die Versuchsfahrer ihre individuelle Nutzungsweise richtig einschätzten. Ergänzt wurde dies wie bereits in der Studie 1 durch die Mitschrift aller relevanten Äußerungen der Probanden zum System und dessen Nutzung während der Fahrt (siehe Kap. 5.1.1.4).

Die Blickbewegungen der Probanden wurden mit dem Remote Eye-Tracking-System *ETS-PC II* der Firma *ASL (Applied Science Laboratories)* aufgezeichnet. Dieses System arbeitet nach dem Prinzip der cornealen Reflexion. Zwei Infrarot-Strahlungsquellen erzeugen auf der Hornhaut (Cornea) des Probanden Reflexe, die von einer Kamera aufgenommen werden. Die Blickrichtung des Probanden wird aus dem Abstand der Pupille zu den Reflexpunkten berechnet. Dieser berechnete Blickpunkt wird in einem Koordinatensystem hinterlegt und in Form eines Fadenkreuzes auf ein Videobild gelegt, welches die Sicht des Probanden in der jeweiligen Situation abbildet. Somit ist es möglich, zu bestimmen, wohin die Versuchspersonen schauen.

Für die Untersuchung ist es wichtig zu erfassen, wie lange die Fahrer brauchen, um Informationen vom Display abzulesen. Hierfür sind zwei Messdaten von Bedeutung, Fixationen und Sakkaden. Um ein Objekt genau wahrnehmen zu können, muss es in den Bereich des schärfsten Sehens im Auge, der Fovea centralis, gebracht werden. Dies geschieht durch ruckartige Rotationsbewegungen des Augapfels, den Sakkaden. Danach erfolgt bei einer relativen Bewegungslosigkeit des Augapfels die Fixation des Objektes, bei der es zu einer Informationsaufnahme kommt. Um Aussagen über die Blickdauer bei der Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems treffen zu können, müssen die Zeiten einer Fixation mit der doppelten Sakkadendauer (Sakkade zum Display hin und vom Display weg) summiert werden. Dieser Wert ergibt dann die Blickabwendungszeit von der Straße. Für weitere Informationen zur Physiologie des Auges und zur Methode des Eye-Tracking wird auf Metker (1997) und Diem (2005) verwiesen.

Das Eye-Tracking-System und die im Innenraum sichtbaren Komponenten des Infrarot-Nachtsichtsystems im Versuchsfahrzeug zeigt Abbildung 5.9.



**Abb. 5.9: ETS-Komponenten im Versuchsfahrzeug**

grün markiert = ETS, braun markiert = Nachtsichtsystem

### 5.2.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecken

Wie Kapitel 5.1 zeigt, kann von einer Gewöhnung an das neue System spätestens nach der fünften Versuchsfahrt ausgegangen werden. Daher absolvierte jede Versuchsperson fünf ungefähr einstündige Versuchsfahrten im realen Straßenverkehr.

Es wurden für alle Probanden identische Versuchsstrecken gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Blickdaten zu erhalten. Die Routen wurden so ausgewählt, dass sie aus unterschiedlichen Straßentypen bestehen auf denen eine Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems hilfreich sein könnte. Da die Nutzung eines Nachtsichtsystems von der Verkehrssituation abhängt (vgl. Kap. 5.1.2.3), war ein Fahren sowohl auf Landstraßen mit unterschiedlichen Streckenprofilen (gut ausgebaut, kurvig, beleuchtet, unbeleuchtet etc.) als auch in Ortschaften wichtig. Dadurch, dass das System auf Autobahnen wenig Vorteile bringt und daher dort auch wenig genutzt wird, wurde nur ein kurzer Abschnitt Autobahn in die Strecke integriert.

Ein Vorteil des Systems ist das frühzeitige Erkennen des Straßenverlaufs, so dass bekannte Strecken zu einer geringeren Nutzung des Systems führen könnten. Um einen unerwünschten Übungseffekt zu vermeiden, konnte daher nicht bei allen Versuchsfahrten dieselbe Strecke gefahren werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der Daten im Hinblick auf einen Gewöhnungseffekt wurden dennoch die erste und die letzte Versuchsstrecke identisch gewählt. An den übrigen drei Terminen wurden andere Strecken gefahren. Die Reihenfolge der Versuchsstrecken wurde nicht variiert.

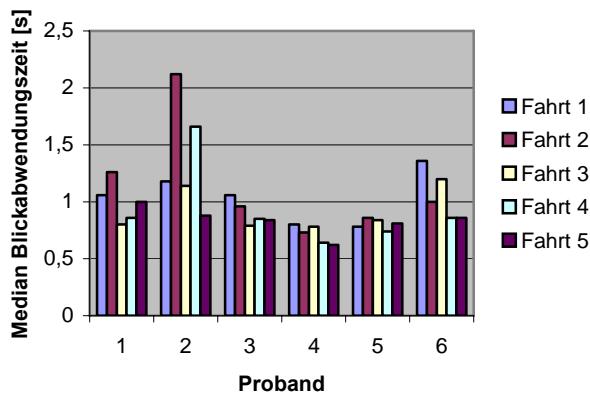
Die Fahrten fanden jeweils mit einigen Tagen Abstand statt. Die Teilnehmer wurden im Vorfeld nicht aufgeklärt, in welchen Verkehrssituationen eine Nutzung des Systems sinnvoll ist, sondern sollten dies selbst herausfinden.

## 5.2.2 Ergebnisse

Zur Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Strategien zur Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems wurden die Parameter *Blickabwendungszeit*, *Häufigkeit der Blickzuwendung* und *situationsabhängige Nutzung* formuliert. Die Parameter *Blickabwendungszeit* und *Häufigkeit der Blickzuwendung* werden in der Literatur darüber hinaus als notwendige Parameter für die Einschätzung der visuellen Beanspruchung durch die Bedienung eines System bezeichnet (Wiewille & Tijerina, 1997). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Feldstudie in Bezug auf diese Parameter dargestellt.

### 5.2.2.1 Blickabwendungszeiten

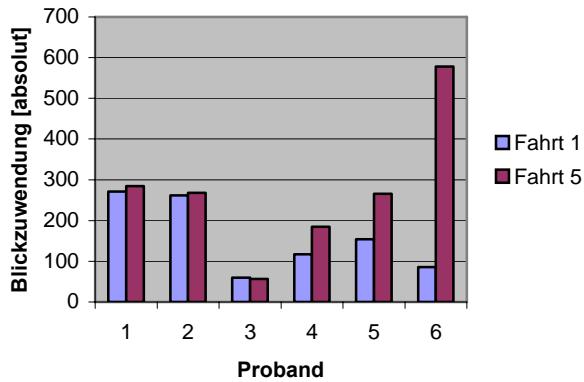
Zur Auswertung der Blickbewegungen wurde das Display des Infrarot-Nachtsichtsystems mit Hilfe der Software *Eyenal* als *Area of Interest* (AOI) definiert. Damit war es möglich, alle Fixationen auf das Display herauszufiltern. Abbildung 5.10 stellt die Mediane der Blickabwendungszeiten aller Versuchspersonen gegenüber. Es zeigt sich, dass die Zeiten bei fast allen Probanden im Laufe der Versuchsfahrten abnehmen und am Ende einen Wert von einer Sekunde nicht überschreiten. Nur bei einem Probanden sind die Werte der ersten und letzten Versuchsfahrt nahezu identisch, hier befindet sich aber die Blickabwendungszeit schon bei der ersten Fahrt auf niedrigem Niveau. Bei allen anderen Teilnehmern ist im Vergleich der ersten und letzten Fahrt, die beide aus identischen Fahrtstrecken bestanden, eine Verringerung der Blickabwendungszeit zu beobachten. Bei einer Analyse der Mittelwerte der Blickabwendungszeiten muss beachtet werden, dass in diese Werte auch lange Blickabwendungszeiten, beispielsweise durch eine Betrachtung des Displays im Stand vor einer Ampel, eingehen. Solche Blicke aus Neugierde gab es insbesondere in den ersten Versuchsfahrten mit dem Ziel, das System kennen zu lernen.



**Abb. 5.10: Mittlere Blickabwendungszeiten aller Probanden und Versuchsfahrten**

### 5.2.2.2 Häufigkeit der Blickzuwendung

Die Betrachtung der erhaltenen Eye-Tracking-Daten zeigt, dass die Probanden interindividuell unterschiedliche Nutzungsstrategien in Bezug auf die Nutzungshäufigkeit des Infrarot-Nachtsichtsystems entwickelten. In Abbildung 5.11 sind die Blickhäufigkeiten für alle Probanden während der Versuchsfahrten 1 und 5 dargestellt. Diese beiden Fahrten lassen sich am besten vergleichen, da bei ihnen die gleiche Versuchsstrecke gefahren wurde. Bei keinem Probanden ist eine deutliche Verringerung der Blickanzahl im Vergleich der ersten und letzten Fahrt zu beobachten. Wie in Kapitel 2 beschrieben, war zu vermuten, dass einige Probanden während ihrer ersten Fahrt das System häufiger nutzen, um herauszufinden in welchen Verkehrssituationen eine Nutzung sinnvoll ist. Ein Gewöhnungsprozess würde dann zu einer Verminderung der Nutzung führen, weil der Fahrer im Verlauf der Versuchsfahrten lernt, in welchen Situationen ihm das System hilft und es dann nur noch gezielt nutzt. Blicke in das Display aus Neugierde, die nur getätigter werden, um die Funktion des Infrarot-Nachtsichtsystems kennen zu lernen, wären dann nicht mehr nötig. Folglich müsste die Anzahl der Blickzuwendungen sinken. Dies ist aber nicht zu beobachten, sondern bei den meisten Probanden nehmen die Häufigkeit der Blickzuwendungen zu oder sind vergleichbar mit dem Niveau der ersten Fahrt.



**Abb. 5.11: Blickzuwendungen zum Display aller Probanden (Versuchsfahrten 1 und 5)**

Es zeigt sich, dass auch während der fünften Versuchsfahrt das Infrarot-Nachtsichtsystem häufig genutzt wurde. Hieraus lässt sich schließen, dass die Probanden das System nach dem Gewöhnungsprozess als sinnvoll erachteten. Dies entspricht den Ergebnissen der Nachbefragung: Lediglich einmal nach der ersten und einmal nach der zweiten Fahrt wurde das System jeweils von einem Probanden als nicht hilfreich eingeschätzt. Ab der dritten Fahrt wurde das System von allen Versuchspersonen als nützlich bewertet.

In diesem Zusammenhang ist die Fragestellung interessant, inwieweit die Probanden in der Lage sind, die Nutzungshäufigkeit und deren Veränderung im Verlauf der Versuchsfahrten selbst richtig einzuschätzen. Daher wurde ihnen im Rahmen der Nachbefragung die Frage gestellt, ob sich die Nutzung des Nachsichtsystems im Vergleich zu früheren Fahrten geändert hat. Die Probanden antworteten auf diese Frage häufig mit Angaben zur veränderten Nutzungshäufigkeit: Es wurde sowohl von einer geringeren Anzahl von Blicken zu dem Display als auch von höheren Blickzuwendungszahlen im Vergleich zu früheren Fahrten berichtet. Ein Vergleich mit den durch das Eye-Tracking erhaltenen objektiven Blickdaten zeigt, dass diese subjektiven Einschätzungen in den meisten Fällen nicht den tatsächlichen Veränderungen entsprachen, d. h. die Versuchspersonen konnten diese nicht richtig einschätzen. Eine quantitative Bewertung der Nutzungshäufigkeit und deren Veränderung im Gewöhnungsprozess ist somit nur durch die Methode der Blickbewegungsmessung und nicht durch Methoden des Selbstreports erfassbar.

### 5.2.2.3 Situationsabhängige Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems

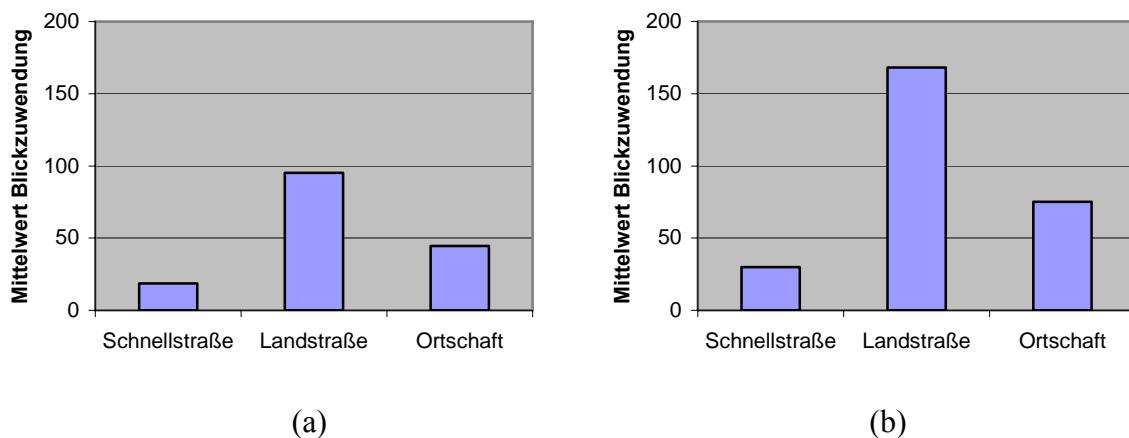
Ein einheitliches Bild zeichnen die am Ende jeder Versuchsfahrt durchgeführten Nachbefragungen im Hinblick auf den Parameter der situationsabhängigen Nutzung. Die Probanden gaben zumeist dieselben Verkehrssituationen an, in denen sie das Infrarot-Nachtsichtsystem

nutzten, beispielsweise um den Straßenverlauf zu erkennen, die Blendung des Gegenverkehrs zu kompensieren und zum frühzeitigen Erkennen von Fußgängern und Radfahrern. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Hinblick auf die Systemnutzung in Abhängigkeit vom Straßentyp und Streckenverlauf sowie bei Gegenverkehr analysiert.

### Systemnutzung in Abhängigkeit vom Straßentyp

In der in Kapitel 5.1 beschriebenen Studie wurde eine Abhängigkeit der Nutzungshäufigkeit von der jeweiligen Verkehrssituation festgestellt. Mit einem Fragebogen wurde die Frage gestellt, wie häufig die Versuchspersonen auf einer siebenstufigen Skala das System auf den Straßentypen *Autobahn*, *Landstraße* und *geschlossene Ortschaft* nutzen würden. Die Probanden gaben an, das System am häufigsten auf Landstraßen zu verwenden (vgl. Kap. 5.1.2.3, Abb. 5.6).

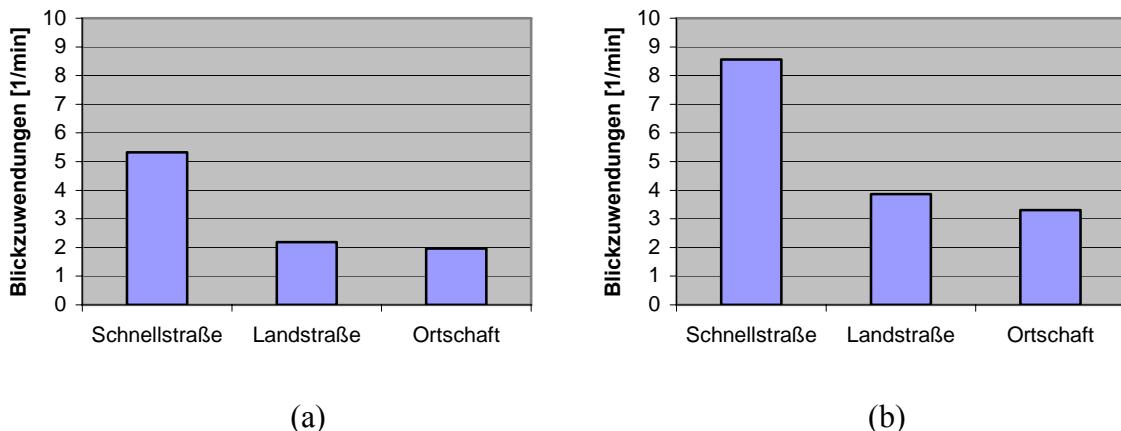
In der Nachfolgestudie konnte durch den Einsatz der Methode der Blickbewegungsmessung untersucht werden, inwieweit die Einschätzungen der Probanden hinsichtlich der Nutzungshäufigkeit bei verschiedenen Straßentypen mit der objektiv gemessenen Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems übereinstimmen. Als Referenz sollten die Probanden im Rahmen einer Nachbefragung ihr Nutzungsverhalten einschätzen. Die Probanden gaben wie in der Vorgängerstudie an, das System überwiegend auf Landstraßen zu nutzen. Diese subjektive Einschätzung der Probanden kann durch die objektiven Videodaten in Bezug auf die absolute Nutzungshäufigkeit bestätigt werden. Abbildung 5.12 zeigt, dass sowohl während der ersten als auch der letzten Fahrt das Infrarot-Nachtsichtsystem am häufigsten auf der Landstraße genutzt wurde.



**Abb. 5.12: Mittelwerte der Blickzuwendungen zum Display in Abhängigkeit vom Straßentyp, (a) erste und (b) fünfte Versuchsfahrt**

Es besteht die Möglichkeit, dass die Einschätzung der Probanden hinsichtlich der Blickhäufigkeit davon beeinflusst wurde, dass die Versuchsstrecke zum größten Teil aus Landstraße bestand. Daher müssen die ermittelten absoluten Blickzuwendungszahlen entsprechend dem

Anteil der Fahrstrecke, den der jeweilige Streckentyp an der Versuchsstrecke einnimmt, relativiert werden. Die Fahrstrecke setzte sich in Bezug auf die Fahrzeit zu ca. 32,5 % aus Ortsdurchfahrten, zu 62,5 % aus Landstraße und zu 5,0 % aus Schnellstraße (definiert als vierstrigige Straße mit baulich getrennten Fahrstreifen) zusammen. Daraus ergibt sich die in Abbildung 5.13 dargestellte Häufigkeit der Blickzuwendungen zum Display pro Minute:



**Abb. 5.13: Mittelwerte der Blickrate in Abhängigkeit vom Straßentyp, (a) erste und (b) fünfte Versuchsfahrt**

Es zeigt sich, dass das Display am häufigsten auf der Schnellstraße verwendet wurde. Dies lässt sich damit erklären, dass auf diesen gut ausgebauten Strecken die Probanden problemlos ihren Blick von der Straße abwenden konnten, um Informationen abzulesen. Da davon auszugehen ist, dass die Versuchspersonen in der Nachbefragung sprachlich nicht zwischen Schnell- und Landstraße unterschieden, entsprechen die objektiven Daten den subjektiven Einschätzungen, in denen die Landstraße als Ort der häufigsten Nutzung genannt wurde. Interessant ist, dass sich die prozentuale Verteilung der Blicke in Abhängigkeit vom Straßentyp im Vergleich der ersten und der fünften Versuchsfahrt nicht ändert. Lediglich die absolute Blickhäufigkeit steigt im Laufe des Gewöhnungsprozesses. Die noch sehr hohe Nutzungshäufigkeit in Ortschaften, obwohl diese überwiegend über eine Straßenbeleuchtung verfügen, erklärt sich durch den von den Probanden geäußerten Vorteil der besseren Erkennbarkeit von Fußgängern und Radfahrern durch das Infrarot-Nachtsichtsystem.

Die inhaltsanalytische Auswertung der Äußerungen der Probanden während der Versuchsfahrt spiegelt nicht die quantitative Verteilung der Blickzuwendungen im Hinblick auf den Straßentyp wider. In den subjektiven Einschätzungen der Versuchsfahrer spielt die Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems in Ortschaften eine viel geringere Rolle als in der Realität. Inhalt der meisten Aussagen zu diesem Thema (5 Personen, 9 Nennungen) ist, dass das System in Ortschaften keinen Vorteil bringt und nicht genutzt wird, da ausreichend Licht vorhanden ist. Teilweise wurde sogar von einer Störung durch die städtischen Lichtquellen im Display gesprochen und ein Proband äußerte den Wunsch, das System in der Stadt abzustellen.

Lediglich eine Person erwähnte einmalig, dass das System auch innerorts vorteilhaft ist, weil z. B. Mülltonnen oder Personen viel früher wahrgenommen werden können. Die Blickbewegungsmessungen zeigen hingegen, dass die Probanden zwar das System in Ortschaften am wenigsten nutzten, aber nicht so selten, wie es den Äußerungen entsprechen würde. Eindeutig ist die Bewertung von dunklen Landstraßen als Haupteinsatzbereich des Infrarot-Nachtsichtsystems (6 Personen, 15 Nennungen).

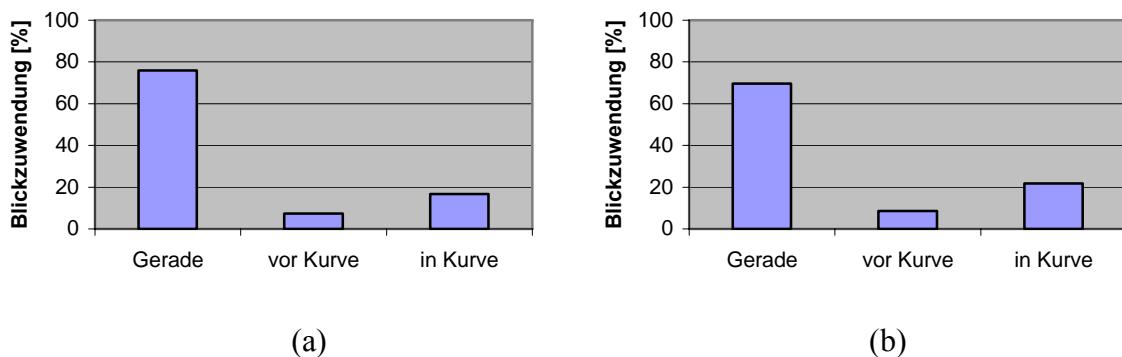
### **Systemnutzung in Abhängigkeit vom Streckenverlauf**

Ein weiterer in Studie 1 genannter Vorteil des Infrarot-Nachtsichtsystems ist das frühzeitige Erkennen von Kurven. Dagegen wurde von den meisten Probanden gesagt, dass das System in der Kurve selbst keinen Nutzen bringt und sie deshalb in diesen nicht auf das Display schauen. Nur zwei Versuchspersonen gaben auch bei Kurvenfahrten einen Nutzen des Systems an. Diese Ergebnisse entsprechen den Äußerungen der Probanden der Studie 2 während der Versuchsfahrten. Lediglich zweimal wurde während der ganzen Fahrten gesagt, dass das System auch in der Kurve genutzt wird. Dagegen wurde sehr häufig geäußert (6 Personen, 13 Nennungen), dass das System beim Kurvenfahren keinen Vorteil bringt und daher auch nicht verwendet wird. Als größter Vorteil wird in der Studie 2 genau wie in der Vorgängerstudie das frühzeitige Erkennen des Straßenverlaufs gesehen.

Diese Aussagen konnten anhand der Blickbewegungsvideos überprüft und quantifiziert werden. Für diese Analyse wurden die Blickzuwendungen der Probanden auf das Display hinsichtlich dreier Kategorien differenziert: Blicke auf geraden Streckenabschnitten, Blicke vor einer Kurve und Blickzuwendungen beim Fahren in der Kurve. Über alle Versuchspersonen wurde der Prozentsatz der Blicke an den Gesamtblicken auf das Display bestimmt. Für diese Auswertung wurden erneut die Fahrten 1 und 5 betrachtet, da diese aufgrund der identischen Streckenführung Aussagen über einen eventuellen Gewöhnungseffekt erlauben.

Die Abbildung 5.14 zeigt, dass entsprechend der Aussagen der Probanden das Display am häufigsten auf geraden Strecken genutzt wurde. Bei der ersten Versuchsfahrt wurden durchschnittlich 75,87 % der Blicke auf gerader Strecke, 7,36 % vor einer Kurve und 16,77 % in der Kurve auf das Display gerichtet. Die im Selbstreport häufig getätigte Aussage, dass das System in der Kurve gar nicht genutzt wurde, konnte dementsprechend nicht bestätigt werden. Es wäre auch möglich, dass lediglich in der ersten Versuchsfahrt das System in Kurven verwendet wird, da die Probanden zuerst lernen müssen, in welchen Situationen der Blick in das Display sinnvoll ist. Dies sollte sich in einer Abnahme der Blickzuwendungen in Kurven im Gewöhnungsprozess äußern. Die Analyse der Blicke zum Display zeigt, dass dies nicht der Fall war: Bei der Versuchsfahrt 5 wurden durchschnittlich 57,99 % aller Blicke auf Geraden, 5,84 % vor Kurven und 36,17 % in Kurven getätigten. Dieses Ergebnis muss aber relativiert

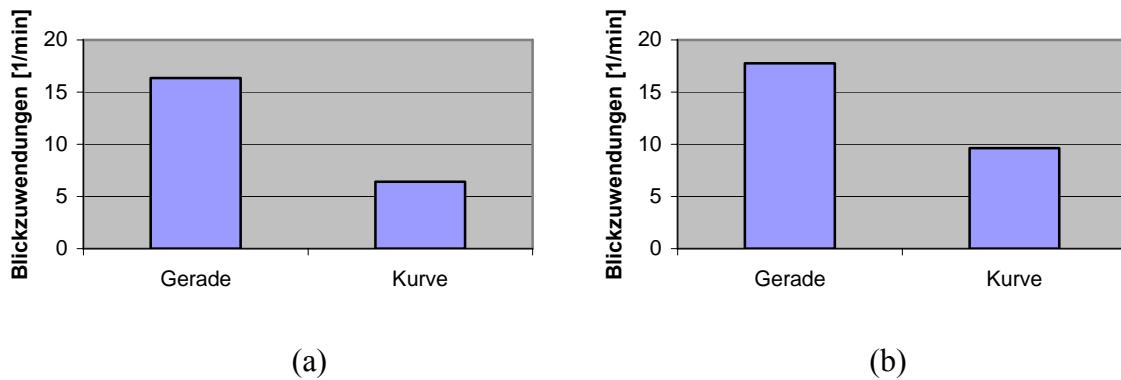
werden, da die Mittelwerte durch eine Versuchsperson, die in der letzten Fahrt sehr viel häufiger auf das Display geschaut hatte als die anderen Probanden, verfälscht wurden. Berücksichtigt man diese Person nicht, liegt der Nutzungsanteil bei 69,63 % auf Geraden, bei 8,62 % vor Kurven und 21,74 % in der Kurve und somit auf dem gleichen Niveau wie bei der ersten Versuchsfahrt.



**Abb. 5.14: Prozentsatz der Blickbewegungen in Abhängigkeit vom Streckenverlauf, (a) erste und (b) fünfte Versuchsfahrt (eine Versuchsperson unberücksichtigt)**

Um die Blickbewegungen quantitativ exakt bewerten zu können, muss der Anteil des jeweiligen Streckenverlaufs an der Gesamtstrecke betrachtet werden. Eine Analyse der Videos ergab, dass die Versuchsstrecke zu 66,08 % aus gerader Strecke und zu 33,92 % aus Kurven bestand. Daraus konnte dann die Blickrate pro Zeiteinheit auf Geraden und in Kurven berechnet werden. Hierfür wurden die Kategorien *Gerade* und *vor Kurve* zusammengefasst, weil die Blicke in beiden Situationen zur Erkennung des Straßenverlaufs getätigten werden. Die Blickraten auf geraden Streckenabschnitten lag bei der ersten Versuchsfahrt bei 16,36 Blickzuwendungen pro Minute und in Kurven bei 6,42 Blickzuwendungen pro Minute. Bei der fünften Versuchsfahrt wurden 17,77 Blicke pro Minute auf gerader Straße und 9,62 Blicke pro Minute in der Kurve auf das Display getätigten (Abb. 5.15)<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> In die Auswertung wurden wiederum nur die Werte von fünf Probanden aufgenommen, da die im Vergleich zu den anderen Versuchspersonen sehr hohe Blickhäufigkeit einer Versuchsperson die Zahlen verfälschte. Bei Einbeziehung der sechsten Versuchsperson ergaben sich folgende Zahlen: 22,34 Blicke pro Minute auf geraden Straßenabschnitten, 24,66 Blicke pro Minute in Kurven.



**Abb. 5.15: Blickrate in Abhängigkeit vom Streckenverlauf, (a) erste und (b) fünfte Versuchsfahrt (eine Versuchsperson unberücksichtigt)**

### Systemnutzung in Abhängigkeit von entgegenkommenden Fahrzeugen

In der Studie 1 (siehe Kapitel 5.1.2.3) wurde von den Versuchspersonen angegeben, dass ein Vorteil des Infrarot-Nachtsichtsystems die Kompensation der Blendung durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs ist. Auch die Auswertung der Fragebögen ergab, dass die Probanden häufig die Blendung durch die Nutzung des Systems kompensierten. Der Mittelwert der Antworten auf der siebenstufigen Ratingskala über alle Fahrten lag bei 5,3<sup>26</sup>. Die Antwortwerte waren über alle Versuchsfahrten relativ konstant.

Mit der Methode der Blickbewegungsmessung war es nun möglich, die erhaltenen Ergebnisse zu quantifizieren. Mittels der Betrachtung der Blickbewegungsvideos wurde ausgewertet, wie häufig die Versuchspersonen bei Gegenverkehr in das Display schauten. Als Bezugsgröße wurde dafür die Anzahl der Autos, die dem Probanden während der Fahrt entgegen kamen, ermittelt. Als Gegenverkehr wurde jedes Auto gezählt, welches mindestens im Abstand von einer Sekunde von anderen Fahrzeugen getrennt fuhr. Mehrere Fahrzeuge mit geringerem Abstand zueinander wurden jeweils als ein Fahrzeug gewertet.

Die Auswertung ergab, dass über alle Versuchspersonen betrachtet bei der Versuchsfahrt 1 in 19,42 % aller Fälle, in denen Gegenverkehr zu beobachten war, die Probanden das Infrarot-Nachtsichtsystem nutzten. Diese Werte sind vergleichbar mit der fünften Versuchsfahrt, in der bei 22,47 % aller Situationen mit Gegenverkehr in das Display geschaut wurde. Die quantitativen Ergebnisse der Blickbewegungsmessung bestätigen also die in der Studie 1 durch die Methode des Selbstreports erhaltenen Einschätzungen der Probanden. Die Strategie der Nutzung des Systems zur Blendungskompensation bildet sich schon in der ersten Versuchsfahrt heraus und verändert sich auch im Laufe des Gewöhnungsprozesses nicht mehr wesentlich. In der Studie 2 wurde mit einer offenen Frage erhoben, in welchen Situationen das System ge-

<sup>26</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (Ja, absolut)

nutzt wurde und sich als hilfreich gezeigt hat. Lediglich zwei der Probanden gaben bereits nach der ersten Versuchsfahrt, eine weitere nach der letzten Fahrt, die Kompensation bei Blendung als Nutzungsstrategie an. Bei den anderen Versuchspersonen wurde diese situationsabhängige Strategie bei keiner Befragung erwähnt. Eine Person erwähnte explizit, dass sie das System nur nutzte, wenn kein Gegenverkehr anwesend war, obwohl die Blickbewegungsdaten zeigten, dass sie sehr häufig in das Display schaute, wenn ihr andere Fahrzeuge entgegenkamen (in 51 von 131 Fällen). Bei dieser Fragestellung hätte die Erhebung lediglich mit einer offenen Frage zu einem falschen Ergebnis geführt.

Bei der subjektiven Bewertung des Systems bei entgegenkommendem Verkehr wurden in der zweiten Studie sowohl positive als auch negative Aspekte der Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems in diesen Verkehrssituationen gesehen: Viele Äußerungen der Versuchspersonen beschäftigten sich mit dem Nutzen des Systems bei Gegenverkehr (3 Personen, 10 Nennungen). Die Probanden berichteten, dass sie mit dem System das „schwarze Loch“, welches durch die Blendung der entgegenkommenden Scheinwerfer entsteht, kompensieren konnten und somit die Fahrbahn besser einsehen konnten. Negativ wurde hingegen beurteilt, dass es durch entgegenkommende Fahrzeuge zu einer Überstrahlung, dem Blooming-Effekt<sup>27</sup>, kommen kann, der zu einer Blendung durch das System selbst führt (5 Personen, 14 Nennungen).

#### 5.2.2.4 Sicherheitsgefährdung durch die Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems

Eine wichtige Fragestellung bei der Evaluation von neuen Fahrerassistenzsystemen sind potentielle Sicherheitsgefährdungen, die durch die Systemnutzung, insbesondere in der Gewöhnungsphase, entstehen können.

Es zeigte sich, dass alle Probanden schon nach wenigen Fahrten in der Lage waren, die Vor- und Nachteile eines Infrarot-Nachtsichtsystems zu erkennen und es so zu nutzen, dass sie sich sicherer im Straßenverkehr bewegen konnten. Während keiner der Versuchsfahrten kam es zu sicherheitskritischen Situationen, wie beispielsweise mangelnder Spurhaltung, durch die Nutzung des Systems.

Eine häufig in der Diskussion über Nachsichtsysteme geäußerte Befürchtung ist, dass die Fahrer mit dem System eventuell nur noch nach Display fahren würden. Eine ständige Ab-

---

<sup>27</sup> Als *Blooming* (engl. bloom = Blüte) wird die Überstrahlung heller Bildstellen bezeichnet. Ursache ist die begrenzte Aufnahmefähigkeit lichtempfindlicher Elemente (Pixel) eines Sensors. Wird diese Ladungsmenge überschritten, gibt die Zelle die übrigen Ladungen an die Nachbarzellen ab.

wendung des Blicks von der Straße kann zu Gefährdungen führen, da mit dem Display ein geringerer Bildwinkel erfasst wird als mit dem Blick durch die Windschutzscheibe. Bei der ersten Studie gaben die meisten Versuchspersonen an, mit dem System punktuell Informationen einzuholen. Diese Angaben wurden durch die Analyse der Blickbewegungsmessung bestätigt. Einige gaben auch an, insbesondere auf dunklen Landstraßen ganze Streckenabschnitte nur nach Display zu fahren und eine Person sagte sogar, dass sie fast nur noch nach Display fuhr und kaum noch durch die Windschutzscheibe schaute. Die Betrachtung der Blickbewegungsdaten konnte diese Aussagen nicht belegen: Keiner der Probanden fuhr ausschließlich oder längere Streckenabschnitte nach Display, so dass keine Sicherheitsgefährdung durch dauerhafte Blickabwendungen von der Straße bei der Einführung von Infrarot-Nachtsichtsystemen zu erwarten ist.

Problematisch bei der Einführung von Fahrerassistenzsystemen wird auch die Gefahr der Risikokompensation (vgl. Kap. 2.2.2) gesehen. Bei einem Infrarot-Nachtsichtsystem wird befürchtet, dass die Fahrer durch die erhöhte Sichtweite ihre Fahrgeschwindigkeit erhöhen könnten. Daher wurden alle Versuchsfahrer zum Ende ihrer letzten Versuchsfahrt gefragt, ob sich durch die Nutzung des Nachtsichtsystems ihre Fahrgeschwindigkeit verändert hat. Die Hälfte der Probanden verneinte dies, die andere Hälfte war der Meinung, dass sie in Situationen, in denen sie den Straßenverlauf weiter einsehen konnten als ohne das System, schneller gefahren waren. Dies bestätigt die Ergebnisse der Studie 1. Ob dies zu einer Sicherheitsgefährdung führt, kann aus diesen Ergebnissen nicht geschlossen werden, da durch die bessere Sicht vielleicht eine höhere Fahrgeschwindigkeit situationsangemessen sein könnte. Im Rahmen dieser Studie war die objektive Erfassung der Fahrgeschwindigkeit technisch nicht realisierbar. Um aussagekräftigere Ergebnisse zur Fahrgeschwindigkeit zu erhalten, sollte im Rahmen zukünftiger Studien zu diesem Thema die Geschwindigkeit aus der Fahrzeugelektronik ausgelesen werden.

Die Probanden wurden mit dem Fragebogen nach jeder Fahrt gefragt, ob sie das Gefühl eines Sicherheitsgewinns hatten. Der subjektiv empfundene Sicherheitsgewinn erhöhte sich bei allen Teilnehmern bis zum Ende der Versuchsreihe. Während bei der ersten Versuchsfahrt auf einer siebenstufigen Skala<sup>28</sup> im Mittel eine 3,67 ( $\sigma = 1,37$ ) angekreuzt wurde, betrug der Mittelwert nach der fünften Fahrt 4,5 ( $\sigma = 1,38$ ).

---

<sup>28</sup> Skala von 1 (überhaupt nicht) bis 7 (sehr hoher Gewinn)

### 5.2.3 Methodisches Fazit

Wie in der Studie 1 (vgl. Kap. 5.1) war ein Untersuchungsziel der in diesem Kapitel dargestellten zweiten Studie die Beschreibung der Strategien bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems sowie deren Ausbildung und Veränderung im Rahmen des Gewöhnungsprozesses an dieses FAS. Als neue Forschungsmethode wurde hierzu in der zweiten Untersuchung die Blickbewegungsmessung herangezogen.

Die Studie 2 hat gezeigt, dass die Methode der Blickbewegungsmessung sehr gut geeignet ist, um die Strategien bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems zu erfassen. Insbesondere war es möglich, Blickabwendungszeiten, die Häufigkeit und die Situationsabhängigkeit der Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems quantitativ zu erfassen.

Dagegen ergab ein Vergleich der subjektiven Einschätzungen der Probanden mit den Daten der Blickbewegungserfassung, dass die eingesetzten Methoden des Selbstreports teilweise problematisch bei der quantitativen Bewertung von Nutzungsstrategien waren. Beispielsweise waren die Probanden nicht in der Lage, Veränderungen in der Nutzungshäufigkeit des Systems über die Versuchsfahrten oder die Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems in geschlossenen Ortschaften richtig einzuschätzen.

Im Hinblick auf eine qualitative Beschreibung der Nutzungsstrategien bestätigten die Ergebnisse der Blickbewegungsmessungen die mit den Methoden des Selbstreports erhaltenen Einschätzungen der Probanden. Beispielsweise gaben die Probanden in der ersten Studie an, dass sie das Infrarot-Nachtsichtsystem nutzten, um Blendungen durch den Gegenverkehr zu kompensieren. Dies konnte durch das Eye-Tracking bestätigt werden.

Nachteil der Methode der Blickbewegungsmessung ist der hohe Durchführungsaufwand. Die Kalibrierung des Systems dauerte im Extremfall bis zu zwei Stunden, wodurch nur eine Fahrt pro Abend möglich war. Außerdem bedeutete die aufwendige Kalibrierung eine hohe Beanspruchung für die Probanden, insbesondere da diese im Rahmen dieser Studie jeweils fünf Fahrten absolvieren mussten. Da bislang keine wissenschaftlichen Untersuchungen zum Gewöhnungsprozess an ein Infrarot-Nachtsichtsystem durchgeführt wurden, rechtfertigen die neuartigen Ergebnisse aber den hohen Durchführungsaufwand.

Resümierend kann gesagt werden, dass die Blickbewegungsmessung eine wichtige Methode zur Beschreibung von Strategien bei der Nutzung von visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystem sowie deren Ausbildung und Veränderung im Gewöhnungsprozess an ein neues System ist. Insbesondere sind Ergebnisse im Hinblick auf die quantitative Nutzung dieser Systeme nur mit dieser empirischen Forschungsmethode zu erhalten.



## **6 Empirische Studien zur Beanspruchung**

Wie in Kapitel 3 dargestellt, steht zur Analyse der aus einem neuen Fahrerassistenzsystem resultierenden Beanspruchung des Fahrers eine Vielzahl von empirischen Forschungsmethoden zur Verfügung. Eine bislang wenig untersuchte physiologische Methode ist die kontinuierliche Messung des Blutdrucks. Ursache ist das bisherige Fehlen eines Instruments, mit dem eine nicht-invasive Messung möglich ist. Ein solches System wurde von Barschdorf und Bauch (2005) entwickelt. Ein Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Studien ist es, dieses System auf seine Einsetzbarkeit für empirische Untersuchungen im Straßenverkehr zu überprüfen und die mit diesem Messverfahren erhaltenen Daten mit Ergebnissen etablierter Methoden zu vergleichen.

In der dritten Studie der vorliegenden Arbeit wurde die generelle Eignung der Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung anhand einer Simulatorstudie untersucht (Kap. 6.1). Darauf aufbauend wurde in der vierten Untersuchung die kontinuierliche Blutdruckmessung bei der Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems im Straßenverkehr eingesetzt (Kap. 6.2).

### **6.1 Studie 3: Simulatorstudie zur Beanspruchungserhebung**

Gegenstand der dritten Studie war die Validierung der kontinuierlichen Blutdruckmessung als neuartige Forschungsmethode zur Beanspruchungsmessung im Kfz. Im Rahmen einer Untersuchung im Fahrsimulator sollte die generelle Einsetzbarkeit dieser Methode für Evaluationsstudien im Straßenverkehr überprüft werden. Die nachfolgenden Unterkapitel stellen das Untersuchungsdesign (Kap. 6.1.1) und die Ergebnisse der Studie (Kap. 6.1.2) dar.

#### **6.1.1 Untersuchungsdesign**

Die Kapitel 6.1.1.1 bis 6.1.1.5 geben einen Überblick über das Untersuchungsziel, das Versuchsfahrzeug, die Stichprobe, die eingesetzten empirischen Forschungsmethoden sowie die Versuchsfahrten und die Versuchsstrecke der Studie 3.

##### **6.1.1.1 Untersuchungsziel**

Ziel dieser Untersuchung ist es, zu betrachten, ob das von Barschdorf und Bauch (2005) entwickelte Messgerät zur kontinuierlichen Blutdruckmessung geeignet ist, um die Fahrerbean-

spruchung zu erfassen. Hierzu wurden folgende Nullhypthesen und Alternativhypthesen formuliert:

$H_0$ : Der Blutdruck ist kein geeigneter physiologischer Indikator, um die Beanspruchung von Kfz-Fahrern zu messen.

$H_1$ : Der Blutdruck ist ein geeigneter physiologischer Indikator, um die Beanspruchung von Kfz-Fahrern zu messen.

Als geeigneter physiologischer Indikator wird im Kontext dieser Arbeit ein Indikator definiert, der in der Lage ist, zwischen beanspruchenden und nicht beanspruchenden Situationen zu differenzieren.

Außerdem sollte untersucht werden, inwieweit die gemessenen objektiven Daten mit subjektiven Beanspruchungseinschätzungen der Probanden übereinstimmen. Aus dieser Fragestellung ergaben sich die Hypothesen:

$H_0$ : Es ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen der objektiven und der subjektiv empfundenen Beanspruchung feststellbar.

$H_1$ : Es ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen der objektiven und der subjektiv empfundenen Beanspruchung feststellbar.

### 6.1.1.2 Versuchsfahrzeug

Für diese Studie wurde der Fahrsimulator *Lightdriver* des L-LAB eingesetzt, da für eine Validierung einer neuen Messmethodik eine standardisierte Versuchsdurchführung mit einer Variablenkontrolle von großer Bedeutung ist. Dies ist im Feld nicht möglich. Ein weiterer Grund für eine Entscheidung gegen eine Feldstudie war, dass bei einem ersten Einsatz des Messgerätes im realen Straßenverkehr eine Gefährdung der Probanden nicht ausgeschlossen werden konnte, da nicht bekannt war, inwieweit das Messgerät die Bewegungsfreiheit der Fahrer einschränkt oder zu Irritationen führt.

Der Fahrsimulator *Lightdriver* ermöglicht eine Echtzeitsimulation verschiedener Fahrstrecken, bei denen die Fahrer mit dem System in Form von Beschleunigungen, Bremsvorgängen und Lenkbewegungen interagieren können. Die Streckensimulation erfolgt über drei Projektoren, welche die Fahrumgebung auf drei  $5 \text{ m}^2$  große Leinwände projizieren. Der Simulator ist ein Fix-Base Aufbau. Für einen möglichst realitätsgenauen Fahreindruck wird ein modifiziertes reales Fahrzeug (Smart) verwendet (Abb. 6.1).



**Abb. 6.1: Fahrimulator *Lightdriver***

Der Vorteil des *Lightdrivers* gegenüber anderen Fahrsimulatoren ist die Möglichkeit, Fahrten in der Dunkelheit physikalisch korrekt und realitätsnah simulieren zu können (Abb. 6.2). Für die exakte Ausleuchtung des Verkehrsraums wurde von der Hella KGaA Hueck & Co. eine Software entwickelt, mit der Lichtverteilungen unterschiedlicher Scheinwerfer dargestellt werden können.



**Abb. 6.2: Fahrt im Simulator *Lightdriver* bei Nachtbedingungen**

Somit ist es möglich, im Simulator Nachtfahrten unter kontrollierten Versuchsbedingungen durchzuführen.

#### 6.1.1.3 Stichprobe

Der Stichprobenumfang wurde auf  $n = 24$  (zwölf Frauen und zwölf Männer) festgelegt. Um diese Stichprobengröße zu erreichen, wurden insgesamt 34 Personen rekrutiert, da zehn Per-

sonen die Untersuchung nicht vollständig durchführen konnten, weil bei ihnen während der Fahrt die *Simulator Sickness* (vgl. Kap. 3.3) auftrat.

Alle Probanden waren zwischen 23 und 35 Jahren alt. Die Untergrenze wurde deshalb gewählt, damit eine durch geringe Fahrpraxis resultierende Beanspruchung ausgeschlossen werden konnte. Bartmann (1995) definiert Fahrer als Experten, wenn sie seit mindestens fünf Jahren im Besitz des Führerscheins sind und mindestens 5000 Kilometer im Jahr fahren. Da Heck, Rost und Hollmann (1984) unregelmäßige Blutdruckschwankungen bei Probanden bis 35 Jahre ausschließen, wurde diese Obergrenze formuliert. Um die physiologischen Parameter nicht zu verfälschen, war ein Ausschlusskriterium für die Teilnahme an der Studie die Einnahme von Medikamenten, welche den Blutdruck oder die Herzfrequenz beeinflussen.

Ein weiteres Kriterium für eine Teilnahme an der Studie war, dass die Probanden weder den Fahrimulator noch die Fahrtstrecke kannten. Somit war ein vergleichbares Vorwissen auf dieser Ebene gewährleistet.

#### **6.1.1.4 Empirische Forschungsmethoden**

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben gibt es allgemein drei Kategorien, mit denen sich Methoden zur Erfassung von Beanspruchung zusammenfassen lassen:

1. Performance (objektiv)
2. Selbstreport (subjektiv)
3. Physiologie (objektiv)

Da in dieser Studie sowohl objektiv messbare als auch die subjektiv empfundene Beanspruchung erfasst werden sollte, wurden physiologische Messungen und Selbstreport als Methodenkategorien gewählt. Aus diesen Kategorien kamen folgende Methoden in dieser Studie zum Einsatz:

##### **Erfassung der objektiven Beanspruchung**

Ein direktes Messen objektiver Beanspruchung ist nicht möglich. Physiologische Reaktionen des Körpers können als Parameter für eine Beanspruchung herangezogen werden. Beispiele für diese sind die elektrodermale Aktivität, die elektrische Muskelaktivität und Reaktionen des kardiovaskulären Systems (siehe Kap. 3.2.3). Vorstudien haben gezeigt, dass Hautleitwert und Herzfrequenz geeignete Parameter zur Messung der Beanspruchung beim Fahren darstellen.

Ein bisher wenig untersuchter Parameter ist der Blutdruck, da dieser bisher nicht-invasiv nur diskontinuierlich gemessen werden konnte. Das von Barschdorff und Bauch (2005) entwi-

ckelte System zur kontinuierlichen, nicht-invasiven Blutdruckmessung wurde erstmalig in der hier beschriebenen Untersuchung an einer größeren Probandenstichprobe getestet. Als Vergleichsmessung wurden parallel dazu die etablierten Parameter *elektrodermale Aktivität* und *Herzfrequenz* erhoben.

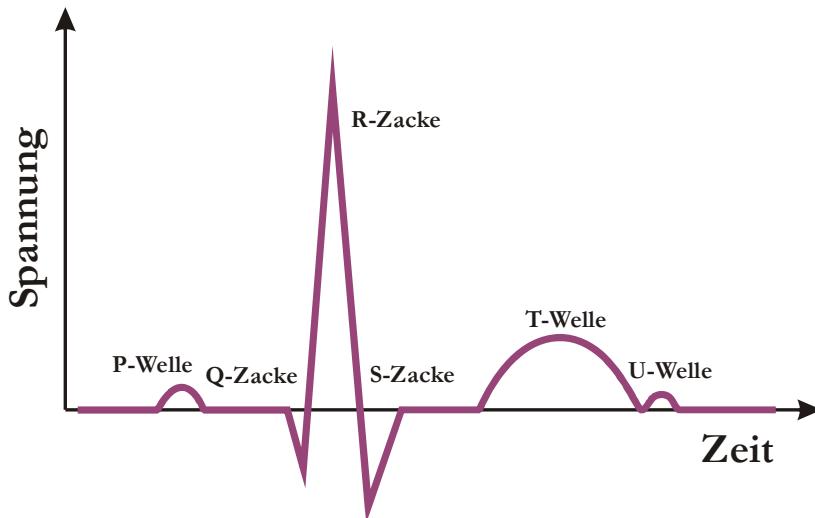
### **1) Erfassung des Blutdrucks und der Herzfrequenz**

Beim Blutdruck wird zwischen dem systolischen Blutdruck in der Auswurfphase des Herzens (Normwert ca. 120 mmHg) und dem diastolischen Blutdruck während der Erschlaffungsphase des Herzens (Normwert ca. 80 mmHg) unterschieden. In der psychophysiologischen Forschung wird in der Regel der systolische Blutdruck als Beanspruchungsparameter herangezogen (Heck et al., 1984).

In der Studie 3 kam das von Barschdorff und Bauch (2005) entwickelte Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung des Blutdrucks zum Einsatz. Grundprinzip dieser Methode ist die kontinuierliche Aufzeichnung der Pulswellenlaufzeit. Da diese in direktem Zusammenhang zum Blutdruck steht, kann von dem einen Wert mit Hilfe eines mathematischen Modells der andere abgeleitet werden.

Zur Bestimmung der Pulswellenlaufzeit wird das EKG durch einen Brustgurt, wie er im Sportbereich verwendet wird, abgeleitet. Die Messung startet mit dem Auftreten des höchsten Wertes des EKG, der R-Zacke (Abb. 6.3). Außerdem wird zur Berechnung der Pulswellenlaufzeit ein peripheres Pulssignal benötigt, welches durch einen photoplethysmographischen Sensor erfasst wird. In diesem Fall wurde er in Form eines Clips am Ohrläppchen der Versuchsperson angebracht. Für die Messung der Pulswellenlaufzeit wird die Zeit zwischen dem Auftreten der R-Zacke im EKG und dem folgenden Anstieg des Ohrpulssignals erhoben. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens der kontinuierlichen Blutdruckmessung ist in Barschdorff und Bauch (2005) zu finden.

Durch die Messung des EKGs mit dem Brustgurt ist auch die Berechnung der Herzfrequenz möglich, die in der Studie als Vergleichsparameter herangezogen wurde.



**Abb. 6.3: Schematische Darstellung des EKG (nach Schandry, 1989)**

Zur Kalibrierung und zur Kontrolle der Messwerte des kontinuierlichen Blutdruckmessgerätes wurde das diskontinuierliche Blutdruckmessgerät *Omron 705IT Automatic-IS* der Firma *Omron Healthcare* verwendet.

## 2) Erfassung des Hautleitwerts

Als weiterer physiologischer Vergleichsparameter wurde der Hautleitwert abgeleitet. Hierfür kam das Messgerät *PAR-PORT/F* der *PAR Medizintechnik GmbH* zur Anwendung.

In der Literatur wird als Ableitort für den Hautleitwert das mittlere Glied des Zeige- und Mittelfingers an den Handinnenflächen empfohlen (Schandry, 1989). Da Vorstudien ergeben haben, dass die Lenkbewegungen beim Fahren nicht zu einer Störung der Messung beim Anbringen der Elektroden an der Handinnenfläche führten, wurden diese Ableitorte für die Studie übernommen.

## Erfassung der subjektiven Beanspruchung

Zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung wurden zwei Instrumente ausgewählt: Der NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index, siehe A.2.2) und die Anstrengungsskala (siehe A.2.3), eine Variante der RSME (Rating Scale of Mental Effort) (vgl. Kap. 3.2.1).

Der von der NASA zur Erfassung der Beanspruchung von Piloten entwickelte mehrdimensionale NASA-TLX besteht aus sechs Subskalen zu den Bereichen *Geistige Anforderung*, *Visuelle Anforderung*, *Zeitliche Anforderung*, *Anstrengung*, *Frustration* und *Ausführung*. Auf den

bipolaren Skalen soll das Ausmaß der Beanspruchung in dem jeweiligen Bereich angegeben werden. Danach erfolgt eine Gewichtung der Subskalen. Mit einem Paarvergleich bewerten die Versuchspersonen, welche der Teilbeanspruchungen für die absolvierte Fahraufgabe wichtiger war. Ergebnis dieser Gewichtung ist das Gesamtmaß der subjektiven Beanspruchung.

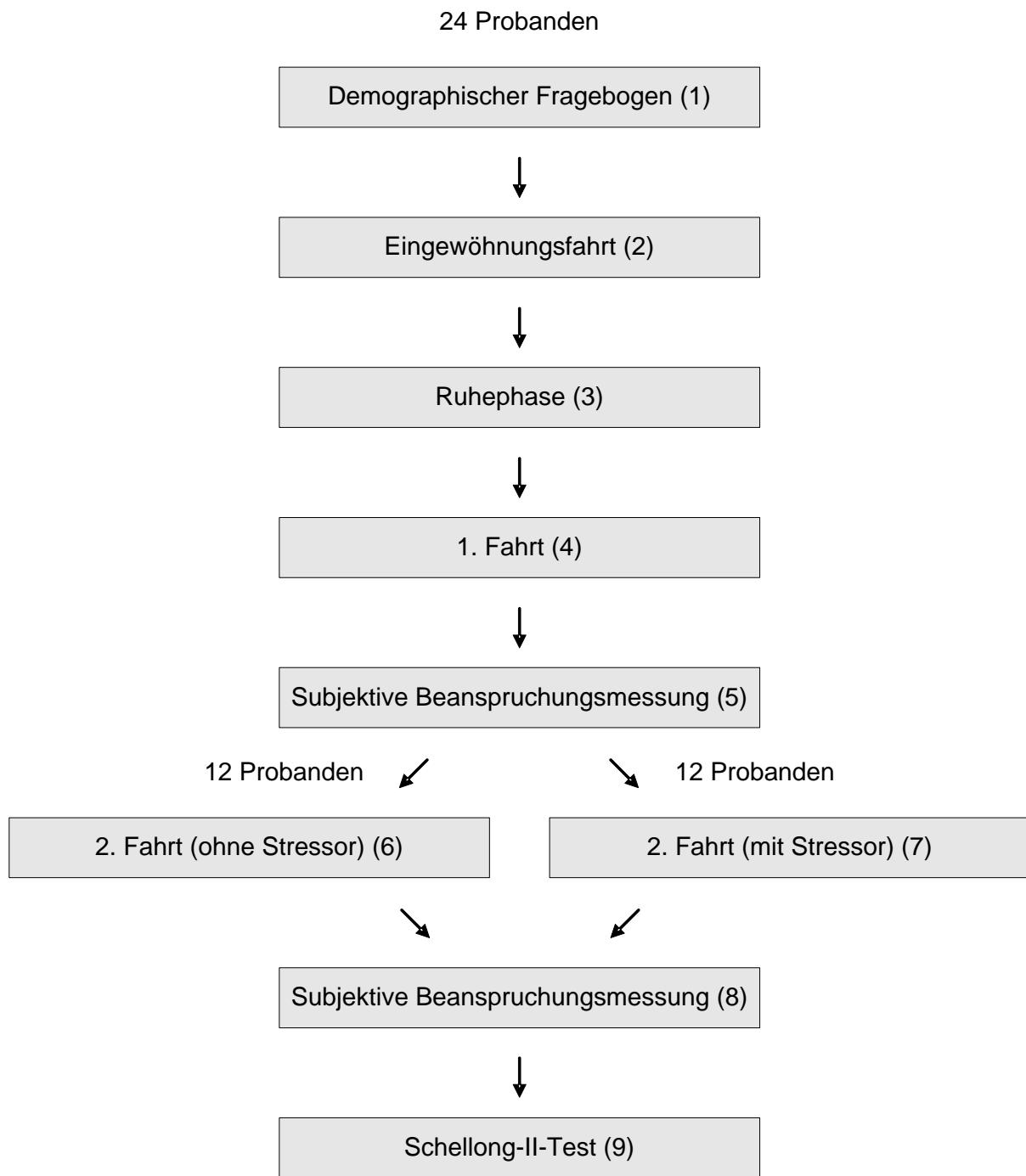
Zum Vergleich wurde außerdem die Anstrengungsskala, eine überarbeitete deutschsprachige Fassung der eindimensionalen Ratingskala RSME verwendet. Bei diesem Instrument wird auf einer Skala von 0 bis 220 angegeben, wie anstrengend eine bearbeitete Aufgabe empfunden wird. Als Hilfsmittel sind auf der Skala sieben Ankerreize angegeben, beispielsweise wird der Wert 20 als *kaum anstrengend*, der Wert 40 als *etwas anstrengend* und der Wert 119 als *ziemlich anstrengend* bezeichnet.

Durch den Einsatz dieser beiden Erhebungsinstrumente ist es möglich, sowohl die Korrelation der objektiven mit den subjektiven Daten zu untersuchen als auch zu überprüfen, inwieweit mit den beiden subjektiven Methoden dieselben Ergebnisse erhalten werden.

#### **6.1.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecke**

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde folgender Ablauf der Untersuchung konzeptioniert (Abb. 6.4):

Zunächst wurden mit einem Fragebogen (1) die demographischen Daten und die Fahrerfahrung der Versuchspersonen erfasst (siehe A.2.1). Außerdem wurde die Frage gestellt, ob die Probanden Medikamente einnehmen, die den Blutdruck beeinflussen, um falsche Ergebnisse zu vermeiden. Nach Beendigung dieser Befragung wurden den Probanden die Messgeräte zur Erfassung der physiologischen Parameter angelegt. Dafür wurden zur Aufnahme des kontinuierlichen Blutdrucks und der Herzfrequenz Brustgurt und Ohrclip sowie für die Messung der elektrodermalen Aktivität Elektroden an den Fingern der Personen angebracht. Zur Vergleichsmessung wurde die Manschette eines Messgerätes zur diskontinuierlichen Blutdruckmessung am Oberarm befestigt.



**Abb. 6.4: Untersuchungsablauf Studie 3**

Die Versuchsfahrten wurden im Simulator *Lightdriver* des L-LAB durchgeführt. Fahrsimulatoren haben andere Fahreigenschaften als reale Fahrzeuge (vgl. Kap. 3.3). Der Simulator *Lightdriver* verfügt weder über eine Bewegungsplattform noch über ein Force-Feedback-Lenkrad. Dies führt dazu, dass die Fahrer über ihren visuellen Eindruck hinaus keine Rückmeldung über Brems- und Beschleunigungskräfte sowie Lenkkräfte erhalten. Daraus resultierend ist es wichtig, dass Probanden vor einer Versuchsfahrt ausreichend Gelegenheit gegeben wird, sich an das Fahrverhalten des Simulators zu gewöhnen. Diese Eingewöhnungsphase (2)

wurde zeitlich nicht begrenzt. Die Probanden sollten selbst entscheiden, wie lange sie brauchen, um die Fahreigenschaften des Simulators kennen zu lernen um dann fehlerfrei mit diesem fahren zu können. Bei allen Probanden war diese Phase nach spätestens 15 Minuten abgeschlossen. Um Lerneffekte auszuschließen, fand die Eingewöhnungsfahrt nicht auf der eigentlichen Versuchsstrecke statt, sondern auf der sogenannten *Standard-Szenerie*. Ein weiteres Ziel der Gewöhnungsphase war, zu erkennen, welche Probanden an der *Simulator Sickness* leiden und dadurch die Versuchsfahrten nicht absolvieren können. Diese konnten dann an der Untersuchung nicht teilnehmen. Andere Personen merkten an, dass das Fahren aufgrund der geringen Rückmeldung des Fahrzeuges für sie ungewohnt sei. Sie waren aber dennoch in der Lage, die Versuchsfahrt durchzuführen.

Im nächsten Teil der Untersuchung folgte eine fünfminütige Ruhephase (3). Diese war notwendig, um nach der Eingewöhnungsfahrt wieder ein Ruheniveau der physiologischen Parameter zu erreichen. Der Blutdruck wurde in dieser Zeit durch drei diskontinuierliche Messungen überprüft.

Für die Versuchsfahrten wurde die *Rüthen-Szenerie* verwendet. Bei dieser Fahrstrecke handelt es sich um eine auf der Grundlage digitaler Karten und GPS-Daten digitalisierte Form einer realen Versuchsstrecke in der Nähe der Stadt Rüthen. Somit war es möglich, für nachfolgende Feldstudien eine Vergleichbarkeit im Hinblick auf das Streckenprofil zu erhalten. Dieser Rundkurs ist ungefähr acht Kilometer lang und besteht sowohl aus engen als auch aus gut ausgebauten Landstraßenabschnitten sowie Ortsdurchfahrten. Neben der reinen Fahrbahn sind Objekte wie Verkehrsschilder, Häuser, Bäume und Felder vorhanden, um einen realitätsnahen Eindruck zu vermitteln.

Die erste Versuchsfahrt wurde von allen Versuchspersonen auf die gleiche Weise absolviert: Jeder Proband fuhr die *Rüthen-Szenerie* einmal (4). Um eine möglichste hohe Standardisierung der Fahrgeschwindigkeit und der Streckeninstruktion zu gewährleisten, wurde ein vorausfahrendes Fahrzeug in die Szenerie eingefügt, dem die Versuchspersonen folgen sollten (Abb. 6.5).

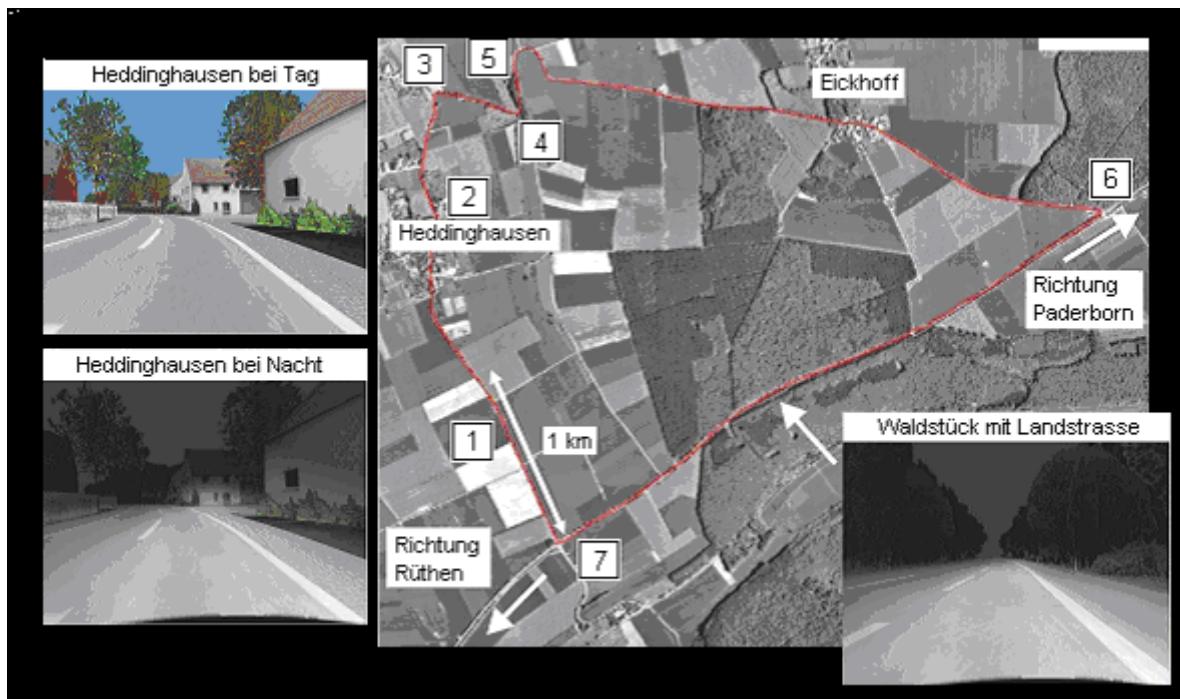


**Abb. 6.5: Simulatorfahrt mit vorausfahrendem Fahrzeug**

Durch das vorausfahrende Fahrzeug konnte während der Versuchsfahrt auch auf weitere Anweisungen hinsichtlich der zu fahrenden Strecke verzichtet werden, was zu einer Störung der Versuchspersonen geführt hätte. Im Rahmen einer Vorstudie (Illigens, 2005) waren Abschnitte dieser Fahrstrecke als beanspruchend definiert worden. Es sollte untersucht werden, ob mit dem Messgerät zur kontinuierlichen Blutdruckmessung diese beanspruchenden Situationen detektiert werden können. Dafür wurden folgende Streckenpunkte (Abb. 6.6) markiert:

- 1 Start/Ende der Rundstrecke
- 2 Kurve 1
- 3 Abbiegevorgang 1
- 4 Kurve 2
- 5 Kurve 3
- 6 Abbiegevorgang 2
- 7 Abbiegevorgang 3

Als fahrerbeanspruchend wurden die Markierungen 3 (Abbiegevorgang1), 4 (Kurve 2) und 6 (Abbiegevorgang 2) definiert und in die Auswertung aufgenommen.



**Abb. 6.6: Versuchsstrecke: *Rüthen-Szenerie***

Nachdem der Rundkurs einmal absolviert wurde, wurden die Probanden beim Wiedererreichen des Startpunkts gebeten, am Straßenrand anzuhalten.

Im Anschluss an die erste Fahrt wurde die subjektive Beanspruchung mit Hilfe der Ratingskalen NASA-TLX und Anstrengungsskala erhoben (5). Dabei ist zu beachten, dass mit diesen Fragebögen lediglich das Beanspruchungsempfinden für die gesamte Versuchsfahrt erfasst werden kann. Eine spezifische Einschätzung der Beanspruchung im Hinblick auf die oben beschriebenen beanspruchenden Streckenabschnitte ist nicht möglich.

Da ein Ziel dieser Studie ein Vergleich der subjektiv empfundenen Beanspruchung und der erhobenen objektiven physiologischen Daten war, wurde eine zweite Versuchsfahrt durchgeführt. Hierfür wurde die Stichprobe in zwei Gruppen unterteilt: Die erste Gruppe (6) fuhr die identische Strecke ein weiteres Mal. Bei der zweiten Gruppe (7) wurden zusätzliche Stressoren (Beispiel siehe Abbildung 6.7) in die Versuchsfahrt eingebaut, die zu einer erhöhten Beanspruchung führen sollten. Als Stressoren wurden herangezogen:

- Stressor 1 (S1): Das vorausfahrende Fahrzeug bremst plötzlich.
- Stressor 2 (S2): Es steht ein Fahrzeug quer auf der eigenen Fahrspur.
- Stressor 3 (S3): Das vorausfahrende Fahrzeug erhöht die Geschwindigkeit.



**Abb. 6.7: Stressor 2**

Nach dem erneuten Abfahren der Strecke wurde zur Kontrolle der Übereinstimmung mit dem kontinuierlich erfassten Wert noch einmal der Blutdruck mit dem diskontinuierlichen Messgerät erhoben sowie die subjektive Beanspruchung mit den oben genannten Erhebungsinstrumenten erfasst (8). Es wurde untersucht, ob es durch die zusätzlichen Stressoren zu einer erhöhten subjektiven und objektiven Beanspruchung kommt. Durch die Bildung von zwei Probandengruppen war ein Vergleich zwischen den Versuchsbedingungen *Fahrt 1* und *Fahrt 2 mit zusätzlichen Stressoren* sowie *Fahrt 1* und *Fahrt 2 ohne zusätzliche Stressoren* und der jeweiligen subjektiv empfundenen Beanspruchung möglich. Anschließend wurden die Elektroden für die Erfassung des Hautleitwerts entfernt und die Probanden verließen den Simulator.

Mit dem Schellong-II-Test (Schellong, 1954) wurde als letzter Schritt der Untersuchung die Kalibrierung des kontinuierlichen Blutdruckmessgerätes durchgeführt (9). Hierbei erfolgten zunächst in einer Ruheposition im Abstand von je einer Minute drei Blutdruckmessungen mit dem diskontinuierlichen Messgerät der Firma *Omron Healthcare*. Danach folgte eine Belastungsphase in der die Probanden eine Stufe dreißigmal auf- und absteigen. Zehn Sekunden nach dieser Beanspruchung wurden in Ruheposition fünf weitere Blutdruckmessungen im Abstand von je einer Minute durchgeführt.

Die Gesamtdauer der Untersuchung betrug pro Versuchsperson ungefähr 90 Minuten.

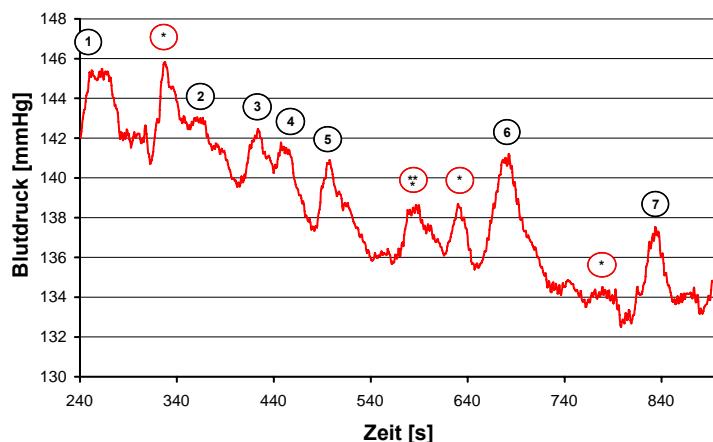
## 6.1.2 Ergebnisse

Die erhaltenen physiologischen Messergebnisse werden im Folgenden zunächst deskriptiv (Kap. 6.1.2.1) und dann inferenzstatistisch (Kap. 6.1.2.2) ausgewertet. In Kapitel 6.1.2.3 erfolgt dann die Analyse der Ergebnisse der subjektiven Beanspruchungsmessung.

### 6.1.2.1 Deskriptive Analyse der physiologischen Messergebnisse

Ziel dieser Studie war herauszufinden, ob der physiologische Parameter *Blutdruck* ein geeigneter Parameter zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung ist und ob die Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung in der Forschung im Kraftfahrzeugkontext einsetzbar ist. Dafür wurden bei einer Simulatorfahrt beanspruchende Streckenabschnitte definiert. Im Falle einer Eignung dieses Parameters sollte es möglich sein, anhand der Messwerte beanspruchende von nicht beanspruchenden Situationen zu unterscheiden. Im Folgenden erfolgt exemplarisch eine deskriptive Analyse der Daten einer Versuchsfahrt im Hinblick auf diese Fragestellung. Eine größere Beanspruchung sollte sowohl zu einem Anstieg des Blutdrucks als auch zu einer Erhöhung der Vergleichsparameter *Herzfrequenz* und *Hautleitwert* führen (vgl. Kap. 3.2.3).

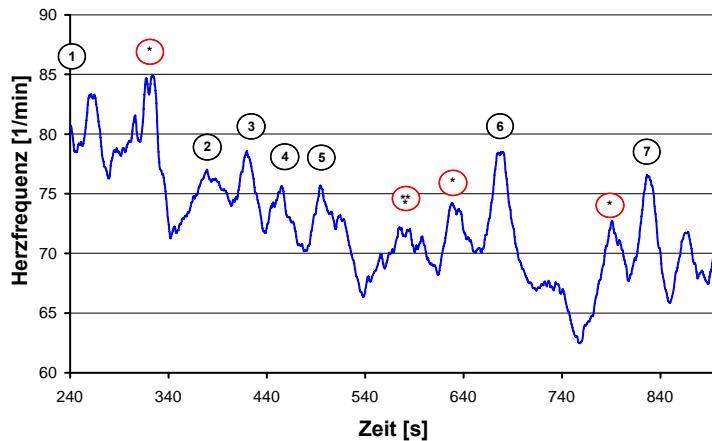
Die Abbildung 6.8 zeigt den Verlauf des Blutdrucks eines Probanden während der ersten Versuchsfahrt. In der Kurve sind der Startpunkt der Fahrt (1) und die in Kapitel 6.1.1.5 definierten beanspruchenden Situationen (2-7) abgetragen. Es zeigte sich, dass die meisten Anstiege des Blutdrucks den beanspruchenden Situationen zugeordnet werden können.



**Abb. 6.8:** Verlaufskurve des Blutdrucks einer Versuchsperson (Fahrt 1)

Außerdem wies die Verlaufskurve einen Anstieg des Blutdrucks an Stellen auf, die nicht im Zusammenhang mit den vorher definierten Situationen standen, aber kleinen Kurven (\*) und Bodenwellen(\*\*) zugeordnet werden konnten.

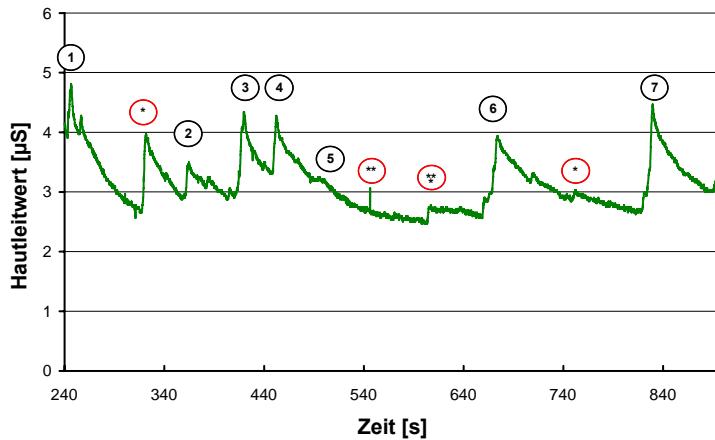
Vergleichbare Ergebnisse zeigten die zusätzlich erhobenen physiologischen Parameter *Herzfrequenz* und *Hautleitwert*. Die vorher definierten beanspruchenden Streckenabschnitte fanden sich in den Daten wieder (Abb. 6.9 und Abb. 6.10).



**Abb. 6.9: Verlaufskurve der Herzfrequenz einer Versuchsperson (Fahrt 1)**

In den Daten des Hautleitwerts (Abb. 6.10) zeigte sich lediglich in der Sekunde 540 ein Anstieg (\*\*), der keiner beanspruchenden Situation zugeordnet werden konnte. Dieser dauerte nur eine Sekunde und kann somit als Messfehler interpretiert werden, insbesondere da er in den Daten der anderen physiologischen Parameter nicht ablesbar ist. Hier zeigt sich die bereits beschriebene Notwendigkeit der gleichzeitigen Erhebung mehrere Biosignale, um aussagekräftige Daten zu erhalten.

Zusätzlich lässt sich erkennen, dass der Hautleitwert in den gekennzeichneten Situationen schneller anstieg als der Blutdruck und die Herzfrequenz (Abb. 6.10). Dies spricht für die Aussage von Helander (1978), dass der Hautleitwert im Gegensatz zur Herzfrequenz eine höhere Dynamik aufweist und somit zur Erfassung kurzzeitiger Beanspruchungsunterschiede gut geeignet ist.



**Abb. 6.10: Verlaufskurve des Hautleitwerts einer Versuchsperson (Fahrt 1)**

Wie bereits in Kapitel 6.1.1.5 beschrieben, wurden in der zweiten Versuchsfahrt zusätzlich bei der Hälfte der Versuchspersonen drei Stressoren (S1-S3) integriert (Abb. 6.11), um einen Beanspruchungsunterschied zur ersten Simulatorfahrt zu induzieren.

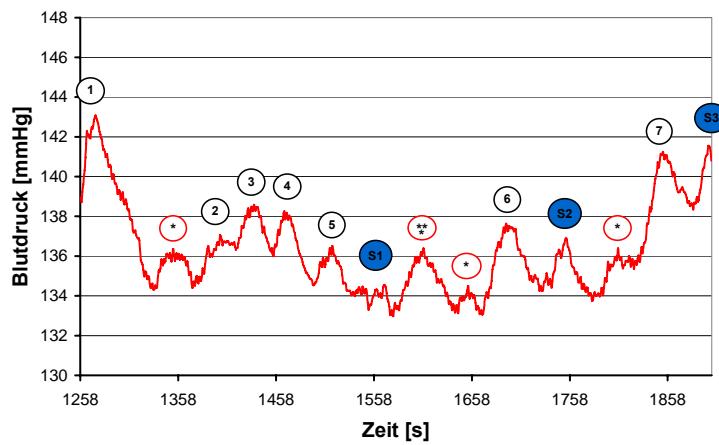


**Abb. 6.11: Rüthen-Szenerie mit integrierten Stressoren**

S 1: Vorausfahrendes Fahrzeug bremst plötzlich; S 2: Querstehendes Fahrzeug auf der Fahrspur; S 3: Vorausfahrendes Fahrzeug beschleunigt

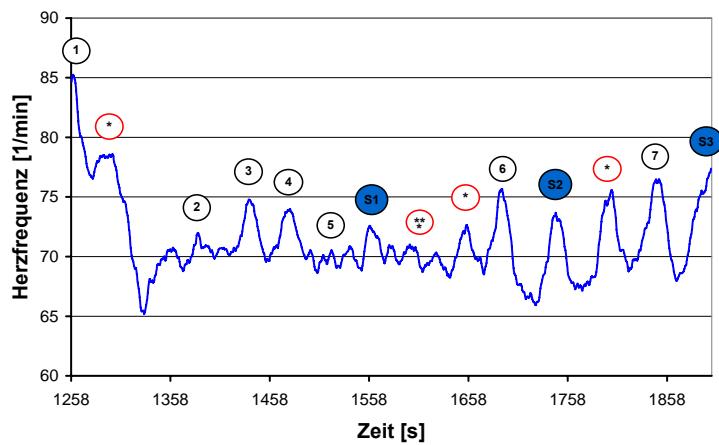
Auch bei den Stressoren reagierte der Blutdruck mit einem Anstieg (Abb. 6.12) und detektierte somit eine erhöhte Beanspruchung. Die geringste Reaktion ist bei Stressor 1, dem Bremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs zu beobachten. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der Abstand zu diesem Fahrzeug von der Versuchsleitung nicht kontrolliert werden

konnte und somit der Bremsvorgang vielleicht durch einen noch ausreichenden Abstand für die Versuchsperson wenig beanspruchend war.

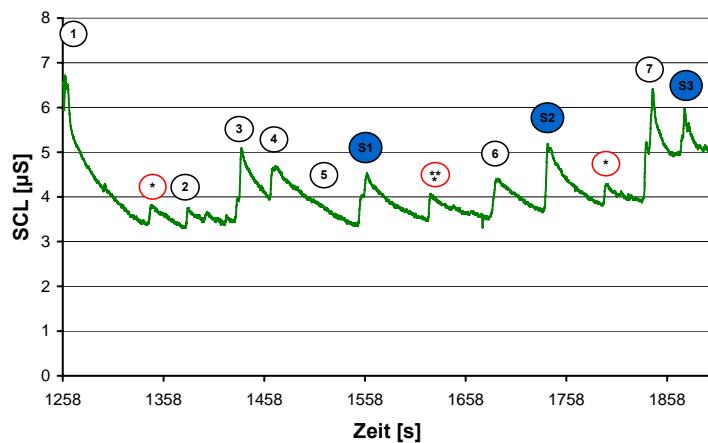


**Abb. 6.12: Verlaufskurve des Blutdrucks einer Versuchsperson (Fahrt 2)**

Vergleichbare Ergebnisse lieferte die Erfassung der Herzfrequenz (Abb. 6.13) und des Hautleitwerts (Abb. 6.14).



**Abb. 6.13: Verlaufskurve der Herzfrequenz einer Versuchsperson (Fahrt 2)**



**Abb. 6.14: Verlaufskurve des Hautleitwerts einer Versuchsperson (Fahrt 2)**

Auf Grundlage der deskriptiven Analyse der physiologischen Daten einer Versuchsperson kann resümiert werden, dass diese Einzelfallanalyse ein erster Anhaltspunkt dafür ist, dass der Blutdruck ein geeigneter Parameter und die kontinuierliche Blutdruckmessung eine geeignete Methode zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung ist. Die als beanspruchend definierten Verkehrssituationen führten zu einer Erhöhung des Blutdrucks. Der Blutdruck zeigte vergleichbare Reaktionen zu den zusätzlich erhobenen physiologischen Parametern *Herzfrequenz* und *Hautleitwert*. Da in der Regel eine Erhöhung der Messwerte auch einer bestimmten Verkehrssituation zugeordnet werden konnte, ist davon auszugehen, dass die Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung auch zur Erfassung unbekannter, nicht induzierter Beanspruchungsreaktionen eingesetzt werden kann. In Kapitel 6.1.2.2 wird der Versuch unternommen, diese auf der Grundlage eines Einzelfalls erhaltenen Ergebnisse zu generalisieren.

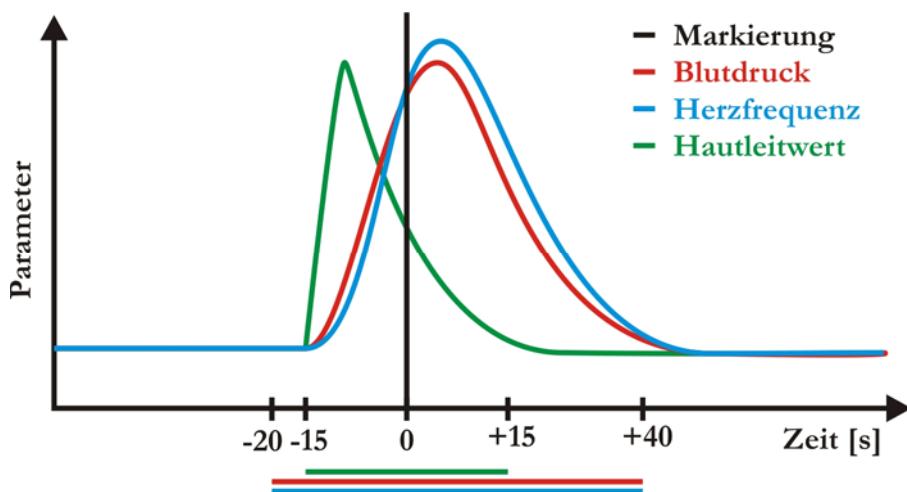
### 6.1.2.2 Inferenzstatistische Analyse der physiologischen Messergebnisse

Nach der deskriptiven Analyse der Untersuchungsergebnisse am Beispiel einer Versuchsfahrt erfolgte in einem nächsten Schritt die inferenzstatistische Analyse der Daten aller Probanden. Zur Auswertung lagen die physiologischen Messergebnisse von 24 Versuchspersonen vor. Ziel der inferenzstatistischen Analyse war es zu betrachten, in welchem Umfang die gemessenen Werte einer beanspruchenden Situation zugeordnet werden konnten, d. h. wie gut die Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung geeignet ist, zwischen beanspruchenden und nicht beanspruchenden Fahrsituationen zu differenzieren.

Die als beanspruchend definierten drei Streckenabschnitte wurden bei der Erhebung der Biосignale durch das Setzen eines Markers gekennzeichnet. Für die Auswertung wurden den Daten von diesen drei als beanspruchend definierten Streckenabschnitten Daten von drei Ab-

schnitten gegenübergestellt, in denen kein beanspruchendes Ereignis im Sinne einer Abwesenheit von Kurven, Abbiegevorgängen, Bodenwellen etc. vorlag.

Aufgrund der Trägheit der kardiovaskulären Parameter (Schandry, 1989) wurde für die Auswertung der Herzfrequenz und des Blutdrucks ein Messintervall von 20 s vor dem Marker und 40 s nach dem Marker betrachtet. Da der Hautleitwert schneller auf Belastungen reagiert, wurde bei diesem Parameter ein kürzeres Messintervall von 15 s vor und nach der Markierung gewählt (Abb. 6.15).



**Abb. 6.15: Messintervalle der physiologischen Parameter**

Aus der Differenz des Signalmaximums im Messintervall nach der Markierung und des Signalminimums vor dem Marker wurde die Spannweite des Signals für jeden Abschnitt berechnet. Dieser Wert wurde für die weitere Auswertung herangezogen.

### t-Test

Mittels eines t-Tests für abhängige Stichproben wurde untersucht, ob sich auf Grund der Messdaten der jeweiligen physiologischen Parameter der ersten Fahrt beanspruchende Situationen von nicht beanspruchenden signifikant voneinander unterscheiden lassen. Für die Berechnung des t-Tests wurden die Mittelwerte der Spannweiten der Messdaten ohne beanspruchendes Ereignis mit den Mittelwerten der Daten mit beanspruchendem Ereignis über jede Person miteinander verglichen. Die Voraussetzung einer annähernden Normalverteilung für den t-Test wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test überprüft, bei dem bei  $p < 0,05$  von einer signifikanten Abweichung von der Normalverteilung ausgegangen wird. Die Testergebnisse ergaben für den Parameter Blutdruck  $p_{BP} = 0,153$ , für die Herzfrequenz  $p_{HF} = 0,348$  und für den Hautleitwert  $p_{SCL} = 0,190$  und damit keine signifikanten Werte für die untersuchten physiologischen Parameter. Somit kann eine Abweichung von der Normalverteilung nicht angenommen und damit der t-Test angewendet werden.

Der t-Test ergab, dass sich die Blutdruckwerte in den Verkehrssituationen *mit Beanspruchung* ( $\bar{x} = 6,76 \text{ mmHg}$ ;  $\sigma = 3,88$ ) statistisch hoch signifikant ( $t = -7,96$ ;  $df = 23$ ;  $p < 0,001$ ) von den Werten in den Situationen *ohne Beanspruchung* ( $\bar{x} = 2,27 \text{ mmHg}$ ;  $\sigma = 2,19$ ) unterschieden. Vergleichbare Ergebnisse zeigten sich bei der Analyse der Daten der Vergleichsparameter *Herzfrequenz* und *Hautleitwert*. Die Herzfrequenz war in den beanspruchenden Situationen ( $\bar{x} = 12,29 \text{ 1/min}$ ;  $\sigma = 4,28$ ) hoch signifikant ( $t = -9,58$ ;  $df = 23$ ,  $p < 0,001$ ) höher als in den Situationen ohne zusätzliche Beanspruchung ( $\bar{x} = 3,88 \text{ 1/min}$ ;  $\sigma = 2,08$ ). Auch bei den Messergebnissen des Hautleitwerts zeigte sich eine hoch signifikante ( $t = -5,74$ ;  $df = 23$ ;  $p < 0,001$ ) Differenz der Mittelwerte des Hautleitwertes bei Situationen *mit Beanspruchung* ( $\bar{x} = 1,46 \mu\text{S}$ ;  $\sigma = 0,95$ ) und *ohne Beanspruchung* ( $\bar{x} = 0,62 \mu\text{S}$ ;  $\sigma = 0,39$ ).

Es kann resumiert werden, dass die inferenzstatistische Auswertung der Ergebnisse aller Versuchsfahrten die in Kapitel 6.1.2.1 durchgeführte deskriptive Analyse der Daten am Beispiel einer Versuchsfahrt bestätigt. Sowohl hinsichtlich des Parameters *Blutdruck* als auch der zum Vergleich herangezogenen Parameter *Herzfrequenz* und *Hautleitwert* lassen sich beanspruchende von weniger beanspruchenden Fahrsituationen unterscheiden. In Situationen erhöhter Fahrerbeanspruchung reagierte der Blutdruck mit einem Anstieg. Somit ist die Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung geeignet.

### Die Nullhypothese

$H_0$ : Der Blutdruck ist kein geeigneter physiologischer Indikator um die Beanspruchung von Kfz-Fahrern zu messen.

kann somit verworfen werden. Um valide Ergebnisse zu erhalten und die Daten im Hinblick auf Messfehler zu analysieren sowie richtig interpretieren zu können, sollte eine kontinuierliche Blutdruckmessung immer mit weiteren physiologischen Parametern kombiniert werden. Besonders empfehlenswert ist hierbei die Erhebung der Herzfrequenz, da diese gleichzeitig mit demselben Messequipment abgeleitet werden kann. Somit führt eine parallele Erfassung nicht zu einer weiteren Beeinträchtigung und damit zu keiner zusätzlichen Beanspruchung der Versuchspersonen.

Für zukünftige Studien, bei denen es im Gegensatz zu dieser Studie nicht darum geht, im voraus definierte Beanspruchungssituationen zu detektieren, sondern unbekannte Beanspruchungen zu erfassen, ist es wichtig, über ein allgemeingültiges Kriterium zur Differenzierung von beanspruchenden und nicht beanspruchenden Situationen zu verfügen. Dieses Kriterium sollte in der Lage sein, möglichst viele Messdaten richtig in die Kategorien *beanspruchend* und *nicht beanspruchend* einzufügen.

In der Literatur wurden verschiedene Grenzwerte zur Trennung von beanspruchenden und nicht beanspruchenden Situationen formuliert. Beispielsweise gehen Heck et al. (1984) von

einer Beanspruchung aus, wenn ein Blutdruckanstieg von 5 mmHg gemessen wird. Eine andere Studie definierte den Wert von 23 mmHg als Diskriminanzkriterium (Lympius, 2000).

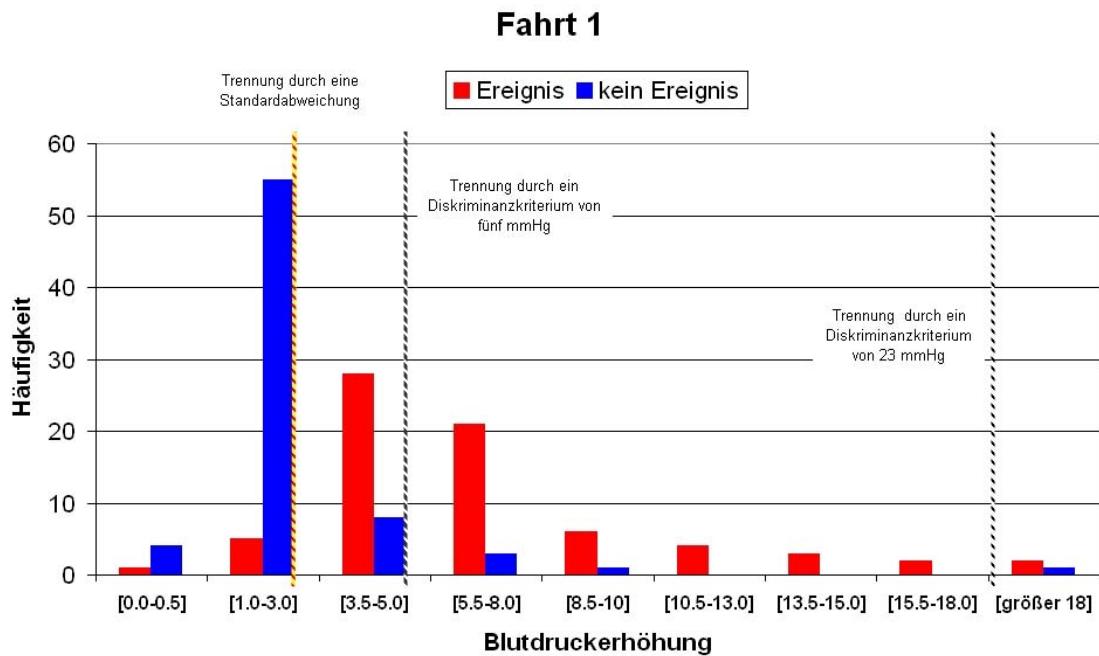
In der vorliegenden Arbeit wurde ein anderes Maß als Diskriminanzkriterium herangezogen: die Standardabweichung. Die Auswertung der Daten aller Versuchspersonen ergab beim Blutdruck eine Standardabweichung von  $\sigma = 2,82$  mmHg. Per Definition wurde festgelegt, dass alle Messwerte unter dieser Grenze den nicht beanspruchenden Situationen und alle Werte, die über der Standardabweichung lagen, beanspruchenden Situationen zugeordnet wurden. Wie oben beschrieben, wurden für die Auswertung die Messergebnisse von jeweils drei als beanspruchend und drei als nicht beanspruchend definierten Situationen herangezogen. Für jede Kategorie lagen somit aus Fahrt 1 bei insgesamt 24 Probanden 72 Messwerte vor. Diese Messwerte wurden mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums in eine Vierfeldertafel eingeordnet (Tab. 6.1).

**Tab. 6.1: Klassifikation des Anstiegs des Blutdrucks – Diskriminanzkriterium *eine Standardabweichung***

<b>Definierte Gruppenzugehörigkeit</b>	<b>Gemessene Gruppenzugehörigkeit</b>		<b>Gesamt</b>
	<b>Nicht beanspruchend</b>	<b>Beanspruchend</b>	
<b>Nicht beanspruchend</b>	59	13	72
<b>Beanspruchend</b>	4	68	72

Anhand der Vierfeldertafel kann abgelesen werden, wie viele Messwerte korrekt klassifiziert wurden. Außerdem ist zu sehen, wie viele Werte falsch positiv (keine Beanspruchung wurde vorhergesagt, der Blutdruckanstieg war aber höher als eine Standardabweichung) bzw. falsch negativ (Beanspruchung wurde vorhergesagt, der Blutdruckanstieg war aber kleiner als eine Standardabweichung) eingeordnet wurden.

Das Ergebnis zeigt, dass 88,2 % aller Messwerte richtig eingeordnet werden konnten. Zum Vergleich wurden die in der Literatur formulierten Cut-off-Werte von 5 mmHg (Heck et al., 1984) und 23 mmHg (Lympius, 2000) auf die Messergebnisse der vorliegenden Studie angewendet (Abb. 6.16). Beide Grenzwerte ergaben eine schlechtere Klassifikationsquote als die Standardabweichung: Beim Grenzwert 5 mmHg wurden 77,7 % der Messwerte richtig eingeordnet, beim Kriterium 23 mmHg sogar lediglich 50,7 %. Somit war das hier angewendete Diskriminanzkriterium deutlich besser zur Differenzierung von beanspruchenden und nicht beanspruchenden Situationen geeignet.



**Abb. 6.16: Häufigkeitsverteilung der Blutdruckerhöhung**

Auch die Messergebnisse der Vergleichsparameter *Herzfrequenz* ( $\sigma = 3,84 \text{ 1/min}$ ) und *Hautleitwert* ( $\sigma = 0,64 \mu\text{S}$ ) wurden mit dem Diskriminanzkriterium von einer Standardabweichung hinsichtlich ihrer richtigen Klassifikationsquote betrachtet. Es zeigte sich, dass bei der Herzfrequenz 84,7 % der Messergebnisse richtig klassifiziert wurden (Tab. 6.2).

**Tab. 6.2: Klassifikation des Anstiegs der Herzfrequenz – Diskriminanzkriterium eine Standardabweichung**

Definierte Gruppenzugehörigkeit	Gemessene Gruppenzugehörigkeit		Gesamt
	Nicht beanspruchend	Beanspruchend	
<b>Nicht beanspruchend</b>	50	22	72
<b>Beanspruchend</b>	1	71	72

Beim Hautleitwert wurden dagegen nur 72,9 % der Werte richtig eingeordnet (Tab. 6.3). Wie bei den beiden anderen physiologischen Parametern überwogen bei den falsch klassifizierten Messwerten die falsch positiven Fälle.

**Tab. 6.3: Klassifikation des Anstiegs des Hautleitwerts – Diskriminanzkriterium *eine Standardabweichung***

Definierte Gruppenzugehörigkeit	Gemessene Gruppenzugehörigkeit		Gesamt
	Nicht beanspruchend	Beanspruchend	
Nicht beanspruchend	49	23	72
Beanspruchend	16	56	72

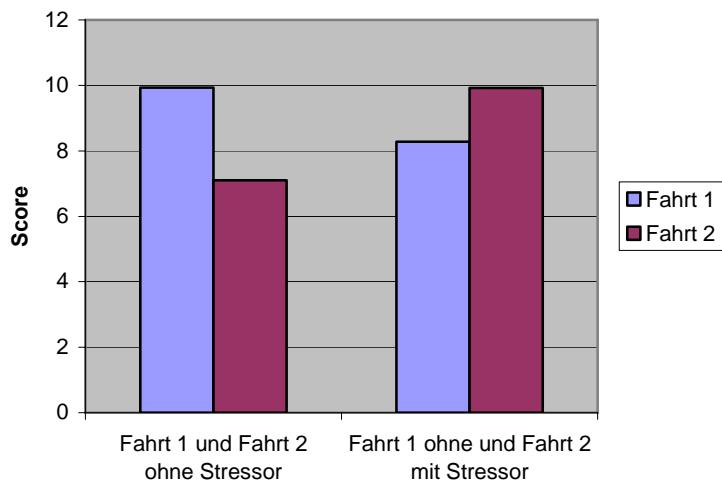
In dieser Studie wurde keine qualitative Gewichtung hinsichtlich der falsch positiven bzw. falsch negativen Einordnungsfehler vorgenommen. Je nach Fragestellung einer Untersuchung kann es sinnvoll sein, das Diskriminanzkriterium so festzulegen, dass eine Klassifikation zu Gunsten der falsch positiven oder falsch negativen Einordnung geschieht. In der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen wird, falls eine Gewichtung durchgeführt würde, sicherlich zu Gunsten der falsch positiven Fehlerwahrscheinlichkeit entschieden werden. Eine falsch negative Einordnung würde eine Nichtdetektion einer Beanspruchung und somit ein Sicherheitsrisiko bedeuten. Eine größere Anzahl positiver Fehler würde zu einer zu schlechten Bewertung des Systems führen, was bedeuten würde, dass es sicherer wäre als die Ergebnisse aussagen.

Bei der zweiten Versuchsfahrt wurde die Stichprobe in zwei Gruppen eingeteilt: Während die erste Gruppe dieselbe Versuchsstrecke ein zweites Mal fuhr, wurden bei der zweiten Gruppe zusätzliche Stressoren in die Strecke eingebaut (vgl. Kap. 6.1.1.5). Eine Analyse der physiologischen Parameter hinsichtlich der Beanspruchungsunterschiede über die gesamte Fahrt zwischen den Versuchsgruppen ergab keine signifikanten Differenzen. Blutdruck und Herzfrequenz sanken bei beiden Gruppen von Fahrt 1 zu Fahrt 2, so dass von einem Gewöhnungseffekt an die Strecke ausgegangen werden kann. Beim Hautleitwert war ein Anstieg zur zweiten Fahrt zu beobachten. Dies kann mit einer Erhöhung der Umgebungstemperatur im Simulator durch die Beamer erklärt werden, die einen Einfluss auf den Hautleitwert hat.

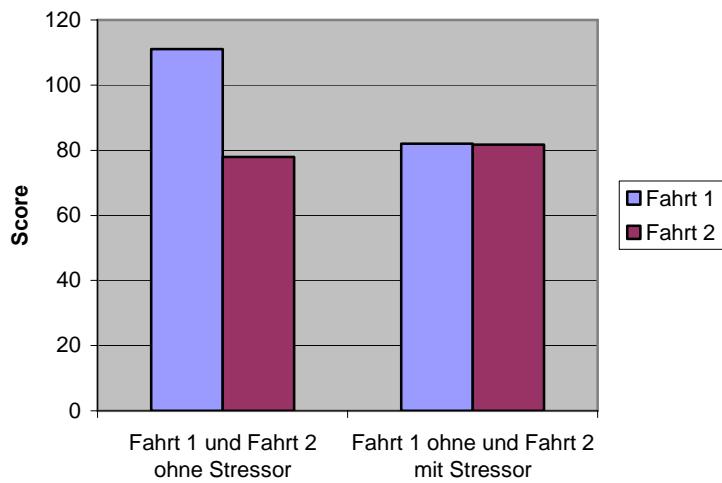
### 6.1.2.3 Ergebnisse der subjektiven Beanspruchungsmessung

Nach jeder Simulatorfahrt füllten die Probanden zwei Fragebögen zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung aus. Wie oben beschrieben, war die Versuchsfahrt 1 für alle Probanden identisch. Bei der zweiten Fahrt wurde die Gesamtstichprobe in zwei Gruppen aufgeteilt: Die eine Gruppe fuhr die gleiche Strecke unverändert ein zweites Mal, die andere Gruppe wurde mit drei zusätzlichen Stressoren konfrontiert. Die Mittelwerte des Ratings nach den Fahrten sind für den NASA-TLX in Abbildung 6.17 und für die Anstrengungsskala in Abbildung 6.18 grafisch dargestellt. Es zeigte sich eine Verminderung der subjektiven Beanspruchung bei

einer zweiten Fahrt unter gleichen Bedingungen (Fahrt 2 ohne Stressor) im Vergleich zu der ersten Fahrt (Fahrt 1). Mit dem NASA-TLX war bei der zweiten Fahrt mit induzierten Stressoren ein Anstieg der Beanspruchung zu beobachten. Das Ergebnis des Ratings auf der Anstrengungsskala bestätigte dies nicht. Sowohl bei der Fahrt 2 ohne Stressor als auch bei der mit Stressor wurde eine geringere Beanspruchung angegeben als bei der ersten Fahrt. Die Beanspruchungsreduzierung war bei der Fahrt mit Stressor lediglich ein wenig geringer.



**Abb. 6.17: Mittelwert des Ratings des NASA-TLX, differenziert nach Versuchsgruppen**



**Abb. 6.18: Mittelwert des Ratings der Anstrengungsskala, differenziert nach Versuchsgruppen**

Die Analyse der Ratingergebnisse durch einen t-Test ergab beim NASA-TLX einen signifikanten Unterschied ( $t = 3,06$ ;  $df = 11$ ;  $p < 0,05$ ) der Fahrten 1 ( $\bar{x} = 9,93$ ;  $\sigma = 4,12$ ) und 2 ohne

Stressor ( $\bar{x} = 7,1$ ;  $\sigma = 4,33$ ). Die Differenz der Fahrten 1 ( $\bar{x} = 8,28$ ;  $\sigma = 2,11$ ) und 2 mit Stressor ( $\bar{x} = 9,92$ ;  $\sigma = 3,42$ ) war dagegen nicht signifikant ( $t = -1,71$ ;  $df = 11$ ;  $p = 0,057$ ). Bei der zweiten Fahrt zeigte die Versuchsgruppe mit zusätzlichen Stressoren eine höhere Beanspruchung ( $\bar{x} = 9,92$ ;  $\sigma = 3,42$ ) als die Gruppe, die die Fahrt ohne diese absolvierte. Diese Differenz war statistisch signifikant ( $t = -1,77$ ;  $df = 21$ ;  $p < 0,05$ ).

Bei der Anstrengungsskala zeigt der t-Test eine hoch signifikante Differenz ( $t = 5,40$ ;  $p < 0,001$ ) der Fahrt 1 ( $\bar{x} = 111,08$ ;  $\sigma = 59,3$ ) und der Fahrt 2 ohne Stressor ( $\bar{x} = 77,92$ ;  $\sigma = 53,02$ ). Dagegen war der Unterschied der Fahrt 1 ( $\bar{x} = 82,00$ ;  $\sigma = 45,75$ ) und der Fahrt 2 mit Stressor ( $\bar{x} = 81,75$ ;  $\sigma = 46,02$ ) nicht signifikant ( $t = 0,02$ ;  $p = 0,49$ ). Auch die Differenz der zweiten Fahrt ohne Stressor ( $\bar{x} = 77,92$ ;  $\sigma = 53,02$ ) und der zweiten Fahrt mit Stressor ( $\bar{x} = 81,75$ ;  $\sigma = 46,02$ ) war statistisch nicht signifikant ( $t = 0,19$ ;  $p = 0,43$ ).

Die Ergebnisse der statistischen Analyse zeigen, dass mit der mehrdimensionalen Ratingskala NASA-TLX stärker zwischen den unterschiedlichen Versuchsbedingungen unterschieden werden konnte. Lediglich die Differenz der Fahrten 1 und 2 mit zusätzlichen Stressoren war, wenn auch knapp, nicht signifikant.

Beide Methoden zeigen einen statistischen Unterschied bei den beiden Versuchsfahrten der Probanden, die beide Fahrten unter denselben Bedingungen absolvierten. Die Beanspruchung war bei der zweiten Fahrt signifikant geringer, so dass bereits bei der zweiten Fahrt von einem Gewöhnungseffekt an die Versuchsstrecke ausgegangen werden kann.

Um zu betrachten, ob die beiden verwendeten Ratingskalen NASA-TLX und Anstrengungsskala analoge Ergebnisse lieferten wurden die Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Bei der ersten Fahrt betrug der Korrelationskoeffizient 0,776 ( $p < 0,001$ ) und bei der zweiten Fahrt 0,738 ( $p < 0,001$ ). Es zeigte sich, dass die Ratingskalen vergleichbare Ergebnisse erbrachten.

Zur Überprüfung der in Kapitel 6.1.1.1 formulierten Hypothesen wurde untersucht, ob die erfassste subjektive Beanspruchung einen statistisch signifikanten Zusammenhang mit den Ergebnissen der Beanspruchungsmessung mittels der physiologischen Beanspruchungsparameter aufweist. Es war mit den Ratingskalen, im Gegensatz zu der Messung der Biosignale, nicht möglich, Beanspruchung während der Versuchsfahrt zu erfassen und damit Ergebnisse, die bestimmten Situationen zuordenbar sind, zu erhalten. Eine Erhebung während der Fahrt würde die Versuchsfahrt stark stören und die Messung selbst würde eine Beanspruchung darstellen. Somit ist ein Vergleich der subjektiv und objektiv gemessenen Werte nur über die gesamte Versuchsfahrt und nicht in Bezug auf einzelne Situationen möglich.

Für den Vergleich wurden die Mittelwerte der physiologischen Parameter der ersten und zweiten Versuchsfahrt gebildet. Die Mittelwerte der Fahrten wurden dann mit den Scores der Ratingskalen der entsprechenden Fahrten in Beziehung gesetzt. Zur Analyse des Zusammenhangs wurden die Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet (Tab. 6.4 und Tab. 6.5).

**Tab. 6.4: Korrelation der Beanspruchungsparameter, Fahrt 1**

	NASA-TLX	Anstrengungs-skala	
<b>Blutdruck</b>	0,270	0,202	<b>Pearson</b>
	0,202	0,343	<b>p</b>
<b>Herzfrequenz</b>	0,370	0,353	<b>Pearson</b>
	0,076	0,091	<b>p</b>
<b>Hautleitwert</b>	0,095	0,011	<b>Pearson</b>
	0,659	0,959	<b>p</b>
<b>NASA-TLX</b>		0,772	<b>Pearson</b>
		0,000	<b>p</b>

**Tab. 6.5: Korrelation der Beanspruchungsparameter, Fahrt 2**

	NASA-TLX	Anstrengungs-skala	
<b>Blutdruck</b>	0,141	0,006	<b>Pearson</b>
	0,511	0,977	<b>p</b>
<b>Herzfrequenz</b>	0,167	0,286	<b>Pearson</b>
	0,435	0,175	<b>p</b>
<b>Hautleitwert</b>	0,172	0,131	<b>Pearson</b>
	0,421	0,542	<b>p</b>
<b>NASA-TLX</b>		0,740	<b>Pearson</b>
		0,000	<b>p</b>

Die höchste Korrelation trat sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Fahrt erwartungsgemäß bei den beiden Methoden des Selbstreports auf. Die Analyse der Korrelationen ergab keinen statistisch bedeutsamen Zusammenhang zwischen den physiologischen Beanspruchungsergebnissen und den Ergebnissen der Ratingskalen. Die in Kapitel 6.1.1.1 formulierte These

*H<sub>1</sub>: Es ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen der objektiven und der subjektiv empfundenen Beanspruchung feststellbar*

kann somit nicht bestätigt werden. Dies entspricht den in Kapitel 2.3.2 dargestellten Aussage von Bubb (2002), dass mit subjektiven und objektiven Beanspruchungsmessungen unterschiedliche Konstrukte erfasst werden: Mit den Methoden des Selbstreports wird der *Komfort*, mit den physiologischen der *Diskomfort* gemessen. Die hier eingesetzten Methoden stellen somit keine Alternativen dar. Je nach Fragestellung sollte somit bei zukünftigen Untersuchungen die Wahl auf eine der beiden Methodenkategorien fallen oder eine Kombination aus subjektiven und objektiven Erhebungsmethoden zum Einsatz kommen.

### 6.1.3 Methodisches Fazit

Mit der Studie 3 konnte gezeigt werden, dass die kontinuierliche Blutdruckmessung eine geeignete Methode zur Erfassung der Beanspruchung im Kfz darstellt. Die Methode war in der Lage, zwischen verschiedenen Beanspruchungsniveaus zu unterscheiden (*Sensitivität*, vgl. Kap. 3.2).

Ein Vorteil des im Rahmen dieser Studie erprobten von Barschdorff und Bauch (2005) neu entwickelten Messinstrumenten zur kontinuierlichen Blutdruckmessung ist die für die Probanden wenig störende Ableitung des Biosignals. Für die Messung sind lediglich ein Brustgurt, welcher von den Probanden selber angelegt werden kann, und ein Ohrsensor notwendig. Auf die Anbringung von Sensoren durch die Versuchsleitung, wie es beispielsweise für die Erhebung des Hautleitwerts notwendig ist, kann verzichtet werden. Dies führt dazu, dass im Hinblick auf die in Kapitel 3.2 formulierten Nebengütekriterien *Reaktivität*, *Anforderungsvoraussetzungen* und *Akzeptanz* diese Methode als geeignet bewertet werden kann. Die Simulatorstudie zeigte, dass es durch die Messinstrumente nicht zu einer Bewegungseinschränkung oder anderen Irritationen der Probanden kam. Somit ist der Einsatz des Messinstrumentes auch in einer Feldstudie möglich.

Entsprechend der Theorie von Bubb (2002) wird mit der Erhebung des physiologischen Parameters *Blutdruck* der *Diskomfort* des Fahrers erfasst.

Mit den verwendeten Methoden des Selbstreports konnte der empfundene *Komfort* (Bubb, 2002) der Probanden erfasst werden. Generell kann gesagt werden, dass diese Methoden über eine hohe Akzeptanz der Probanden und geringe Anforderungsvoraussetzungen verfügen. Dadurch, dass sie im Anschluss an die Versuchsfahrt angewendet werden, beeinflussen sie die Fahraufgabe nicht. Der mehrdimensionale NASA-TLX war im Vergleich zur eindimensionalen Anstrengungsskala besser in der Lage, zwischen den verschiedenen Versuchsbedingungen zu unterscheiden. Daher sollte dieser bei zukünftigen Studien, trotz des höheren zeitlichen Durchführungsaufwandes, bevorzugt werden.

Eine ausführlichere Diskussion der eingesetzten empirischen Forschungsmethoden erfolgt in Kapitel 7.

## 6.2 Studie 4: Feldstudie zur Beanspruchungserhebung

Auf der Grundlage der positiven Ergebnisse der Simulatorstudie wurde eine Feldstudie zur Erprobung der Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung und der subjektiven Beanspruchungsmessung bei Fahrten im realen Straßenverkehr durchgeführt. Erstmals wurde das System zur Blutdruckmessung auch zur Evaluation eines Fahrerassistenzsystems verwendet. Es wurde die Beanspruchung bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems untersucht.

### 6.2.1 Untersuchungsdesign

Die Kapitel 6.2.1.1 bis 6.2.1.5 geben einen Überblick über das Untersuchungsziel, das Versuchsfahrzeug, die Stichprobe, die eingesetzten empirischen Forschungsmethoden sowie die Versuchsfahrten und die Versuchsstrecke der Studie 4.

#### 6.2.1.1 Untersuchungsziel

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, wurde in der Studie 3 im Rahmen einer Simulatorstudie die Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung im Hinblick auf ihre Eignung zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung im Kfz validiert.

Ziel der Studie 4 war es, zu erproben, inwieweit sich diese neue Methode zur Beanspruchungsmessung sowie Methoden der subjektiven Beanspruchungsmessung bei der Evaluation eines Fahrerassistenzsystems im realen Straßenverkehr eignen. Hierfür wurde in einer Feld-

studie der Einfluss der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems auf die Fahrerbeanspruchung untersucht.

### 6.2.1.2 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug wurde wie in der Studie 2 der BMW E60 545i mit einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem verwendet (vgl. Kap. 5.2.1.2).

### 6.2.1.3 Stichprobe

Der Stichprobenumfang dieser Teilstudie betrug  $n = 12$ . Es nahmen neun Männer und drei Frauen an der Untersuchung teil. Um eine ausreichende Fahrpraxis zu gewährleisten und damit die Gefahr zu minimieren, dass das Fahren des Versuchswagens allein zu einer Beanspruchung der Probanden führt, wurden bei der Auswahl der Versuchspersonen dieselben Kriterien herangezogen wie bei der in Kapitel 6.1 beschriebenen Simulatorstudie: Die Probanden mussten bei einer Mindestfahrleistung von 5.000 km pro Jahr mindestens fünf Jahre im Besitz des Führerscheins sein. Ausschlusskriterium war die Kenntnis der Versuchsstrecke, sowohl in der Realität als auch im Fahrsimulator, sowie die Einnahme von Medikamenten, die die erfassten physiologischen Parameter beeinflussen könnten. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 25,3 Jahre und die durchschnittliche Jahresfahrleistung 13.000 km.

Die Versuchspersonen wurden per Zufall in zwei Gruppen geteilt:

- *Versuchsgruppe 1* fuhr die ganze Versuchsfahrt ohne Infrarot-Nachtsichtsystem.
- *Versuchsgruppe 2* fuhr einen Teil der Versuchsfahrt mit dem Infrarot-Nachtsichtsystem.

### 6.2.1.4 Empirische Forschungsmethoden

Wie in der Studie 3 (vgl. Kap. 6.1.1.4) wurden wiederum folgende Forschungsmethoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung verwendet:

- Zur Erfassung der objektiven Beanspruchung wurde der kontinuierliche Blutdruck gemessen. Vergleichsparameter waren die Herzfrequenz und der Hautleitwert.
- Die subjektive Beanspruchung wurde mit dem NASA-TLX (siehe A.2.2) und der Anstrengungsskala (siehe A.2.3) erhoben.

Eine Beschreibung dieser Methoden ist in Kapitel 6.1.1 zu finden.

### 6.2.1.5 Versuchsfahrten und Versuchsstrecke

Es wurde ein experimenteller Forschungsansatz mit zwei Versuchsgruppen gewählt: Die eine Probandengruppe absolvierte eine Versuchsfahrt ohne Nachtsichtsystem, die andere Gruppe fuhr einen Teil der Fahrt mit einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem.

Wie bereits beschrieben (vgl. Kap. 6.1.1.2), verfügt der Fahrsimulator *Lightdriver* über die digitalisierte Form einer realen Straßenszenerie, die *Rüthen-Szenerie*. Als Versuchsstrecke für die Feldstudie wurde die „reale Rüthen-Strecke“ gewählt. Das Streckenprofil besteht in großen Teilen aus unbeleuchteter, sowohl enger als auch gut ausgebauter Landstraße. Außerdem werden zwei Ortschaften durchfahren. Somit ist die Strecke auch im Hinblick auf die Nutzung eines Infrarot-Nachtsichtsystems gut geeignet. Alle wichtigen Anwendungssituationen des Systems sind in der Streckenführung enthalten.

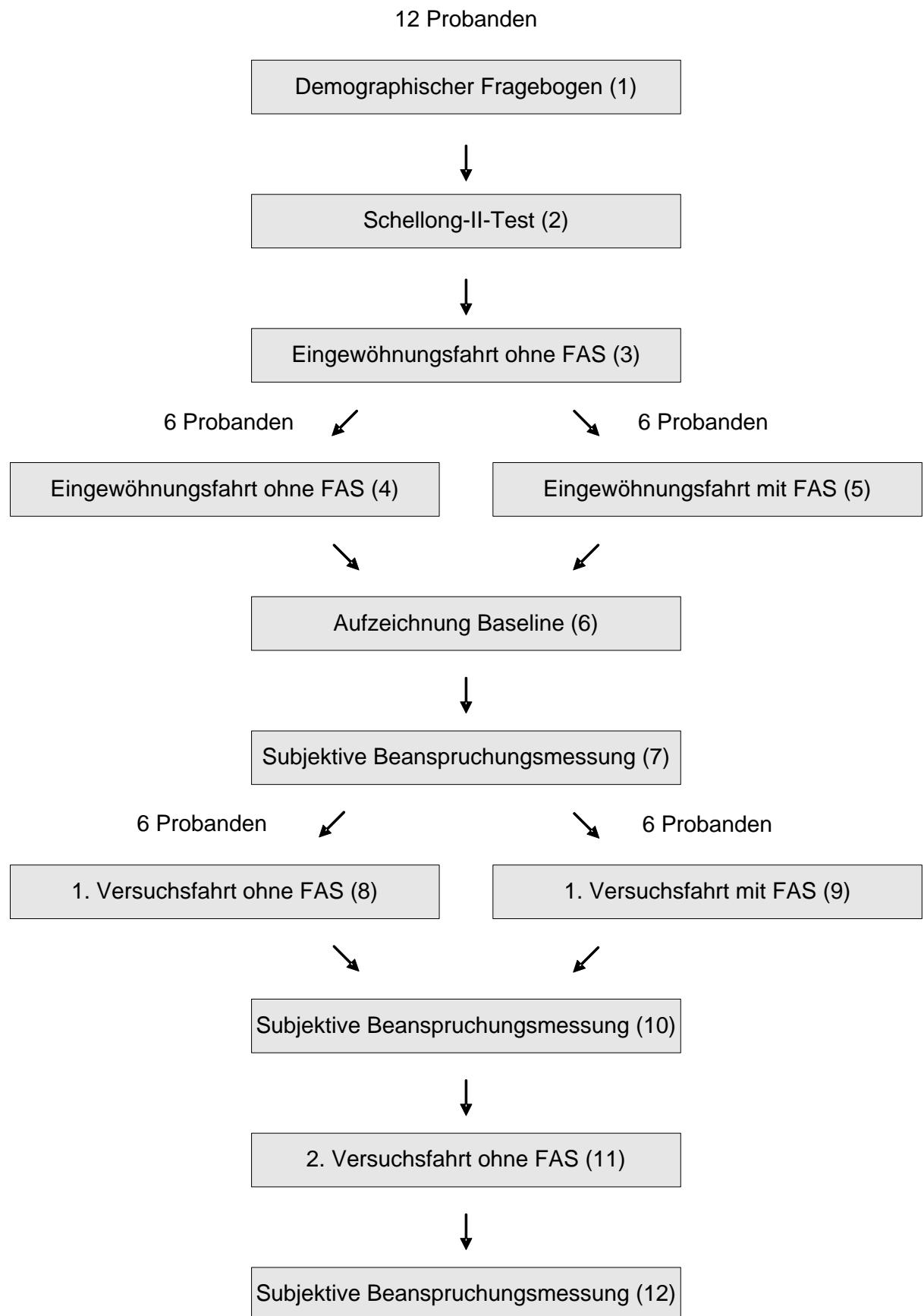
Aus der Stichprobe mit  $n = 12$  wurden per Zufall die in Kap. 6.2.1.3 beschriebenen zwei Versuchsgruppen mit je sechs Personen gebildet.

Es war wichtig, bei allen Probanden möglichst identische Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Da davon auszugehen ist, dass Wetterbedingungen einen Einfluss auf die durch das Fahren entstehende Beanspruchung haben, sollten diese bei allen Probanden gleich sein. Alle Versuchsfahrten wurden deshalb an Abenden ohne Niederschlag durchgeführt. Außerdem fuhren alle Versuchspersonen, auch diejenigen, die kein Infrarot-Nachtsichtsystem zur Verfügung hatten, bei Dunkelheit, da auch die herrschenden Lichtbedingungen wahrscheinlich einen Einfluss auf die Beanspruchung haben.

Für die Untersuchung wurde der in Abbildung 6.19 dargestellte Ablauf konzeptioniert: Zu Beginn der Untersuchung füllten alle Versuchspersonen zur Erfassung ihrer statistischen Daten einen demographischen Fragebogen aus (1, siehe A.2.4). Danach führten sie den Schel-long-II-Test (vgl. Kap. 6.1.1.5) zur Kalibrierung des kontinuierlichen Blutdruckmessgeräts durch (2).

Die Fahrt zur Versuchsstrecke begann für beide Probandengruppe zur Gewöhnung an das Versuchsfahrzeug ohne Infrarot-Nachtsichtsystem (3). Danach fuhr die Probandengruppe 1 weiterhin ohne das Fahrerassistenzsystem (4), während die Probandengruppe 2 eine Eingewöhnungsfahrt mit dem Infrarot-Nachtsichtsystem absolvierte (5). Nach dem Erreichen der Rüthen-Strecke wurde im Stand die Baseline der physiologischen Parameter der Probanden erfasst (6). Die Probanden füllten den NASA-TLX und die Anstrengungsskala aus (7) und es erfolgte eine zweimalige diskontinuierliche Blutdruckmessung zur Kontrolle des kontinuierlich gemessenen Wertes.

Dann fuhr die erste Probandengruppe die Versuchsstrecke ohne Infrarot-Nachtsichtsystem (8) und die zweite Gruppe mit dem Fahrerassistenzsystem (9). Am Startpunkt erfolgte erneut die subjektive Beanspruchungsmessung mit den beiden Ratingskalen (10). Zusätzlich wurde die Probandengruppe, die das Infrarot-Nachtsichtsystem genutzt hatte, zu dem System befragt (siehe A.2.5). Anschließend fuhren alle Versuchspersonen unter den gleichen Bedingungen ohne Fahrerassistenzsystem dieselbe Versuchsstrecke ein zweites Mal (11). Die Versuchsfahrt endete mit einer weiteren Erhebung der subjektiven Beanspruchung am Ende des Rundkurses (12).

**Abb. 6.19: Versuchsablauf Studie 4**

Idealerweise sollte das nächtliche Fahren mit einem Infrarot-Nachtsichtsystem weniger beanspruchend sein als das Fahren ohne dieses System. Beim Fahren ohne das System wurde daher eine höhere Beanspruchung erwartet, deren Erfassung über die Parameter *Blutdruck*, *Herzfrequenz* und *Hautleitwert* erfolgte. Außerdem sollte das Rating der subjektiven Beanspruchungsmessung bei dieser Gruppe höhere Skalenwerte ergeben. In jedem Fall ist aber zu fordern, dass es durch die Nutzung des FAS nicht zu einer sicherheitskritischen Beanspruchungserhöhung kommt.

## 6.2.2 Ergebnisse

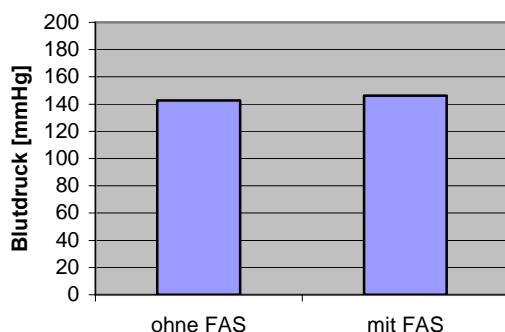
Die Untersuchungsergebnisse wurden im Hinblick auf die physiologischen Parameter (Kap. 6.2.2.1) und die subjektiv empfundene Beanspruchung (Kap. 6.2.2.2) ausgewertet.

### 6.2.2.1 Ergebnisse der physiologischen Beanspruchungsmessung

In diesem Kapitel erfolgt eine deskriptive Analyse der im Rahmen der Versuchsfahrten erfassten physiologischen Parameter. Aufgrund der geringen Stichprobe – jede Versuchsgruppe bestand aus sechs Probanden – wurde auf eine inferenzstatistische Auswertung, beispielsweise in Form eines t-Tests, verzichtet.

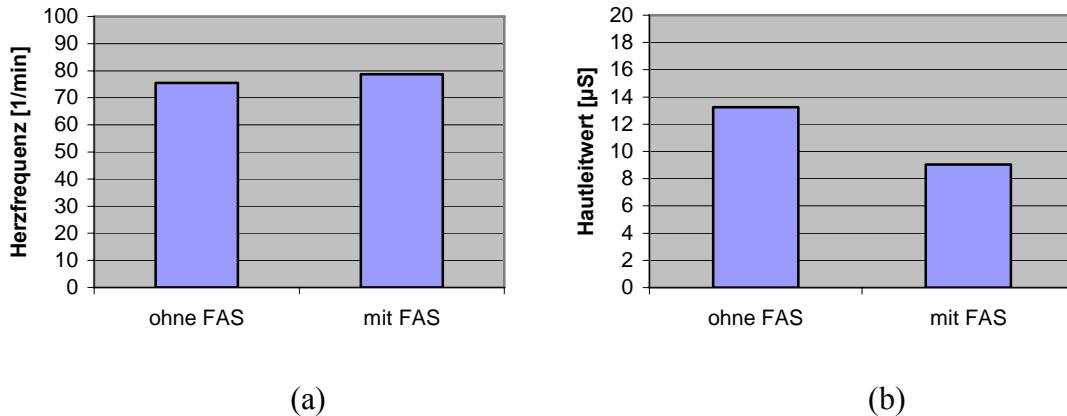
Zuerst erfolgt eine Betrachtung der Daten der ersten Versuchsfahrt. Diese Fahrt wurde, wie in Kapitel 6.2.1.5 dargestellt, von der Probandengruppe 1 ohne und von der Gruppe 2 mit einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem absolviert.

Der Mittelwert des Blutdrucks der Versuchspersonen, die mit Nachsichtsystem fuhren, lag über die ganze Fahrt bei 146,35 mmHg ( $\sigma = 11,16$ ) und der Blutdruck der Personen ohne FAS bei 142,64 mmHg ( $\sigma = 12,27$ ) (Abb. 6.20).



**Abb. 6.20: Mittelwert des Blutdrucks, erste Versuchsfahrt, Fahrt ohne und mit Infrarot-Nachtsichtsystem**

Als Vergleichsparameter wurden die Herzfrequenz (HF) und der Hautleitwert (SCL) erfasst. Während der ersten Fahrt der Gruppe 1 ohne FAS lagen diese im Mittel bei HF = 75,48 ( $\sigma = 14,23$ ) und SCL = 13,24 ( $\sigma = 5,63$ ), bei der Gruppe 2 mit Infrarot-Nachtsichtsystem bei HF = 78,71 ( $\sigma = 7,22$ ) und SCL = 9,04 ( $\sigma = 4,21$ ) (Abb. 6.21).



**Abb. 6.21: Mittelwert der Vergleichsparameter (a) Herzfrequenz und (b) Hautleitwert, erste Versuchsfahrt, Fahrt mit und ohne Infrarot-Nachtsichtsystem**

Die Differenzen sind zu gering, um von einem Beanspruchungsunterschied durch die Nutzung des aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems auszugehen. Eine wichtige Frage bei der Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme für Kraftfahrzeuge ist, ob es durch die Nutzung eines neuen Systems zu einer höheren Beanspruchung und dadurch zu einer potenziellen Gefährdung für den Fahrer kommt. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass dieses Sicherheitsproblem bei einem Nachtsichtsystem nicht vorliegt.

Während der zweiten Versuchsfahrt fuhren alle Probanden ohne Nachtsichtsystem. Für die Auswertung wurde die Differenz der erfassten Beanspruchungsmaße der beiden Fahrten betrachtet. Bei der Versuchsplanung wurde davon ausgegangen, dass die Nutzung des Fahrerassistenzsystems zu einer geringen Beanspruchung führt. Damit sollte bei den Fahrern der Gruppe, die die erste Fahrt mit Infrarot-Nachtsichtsystem absolvierten, bei der zweiten Fahrt eine zusätzliche Beanspruchung zu beobachten sein. Dies würde sich in einem um den Lerneffekt reduzierten Anstieg der Messwerte der physiologischen Parameter äußern. Bei der anderen Versuchsgruppe, die beide Fahrten ohne Nachtsichtsystem absolvierten, sollte es zu einer geringen Beanspruchung und damit zu einer Verringerung der physiologischen Messwerte kommen, da die Versuchsstrecke für sie nun bekannt ist.

Die Untersuchung ergab keine bedeutsamen Differenzen der physiologischen Parameter der ersten und der zweiten Versuchsfahrt (Tab. 6.6).

**Tab. 6.6: Vergleich der Mittelwerte der physiologischen Parameter, Fahrt 1 und Fahrt 2**

	<b>Versuchsgruppe 1 (ohne/ohne FAS)</b>		<b>Versuchsgruppe 2 (mit/ohne FAS)</b>	
	<b>Fahrt 1</b>	<b>Fahrt 2</b>	<b>Fahrt 1</b>	<b>Fahrt 2</b>
<b>Blutdruck [mmHg]</b>	142,64	136,19	146,35	140,48
<b>Herzfrequenz [1/min]</b>	75,48	76,52	78,71	76,13
<b>Hautleitwert [<math>\mu</math>S]</b>	13,24	17,27	9,04	13,4

Diese Ergebnisse können auf zwei Arten interpretiert werden:

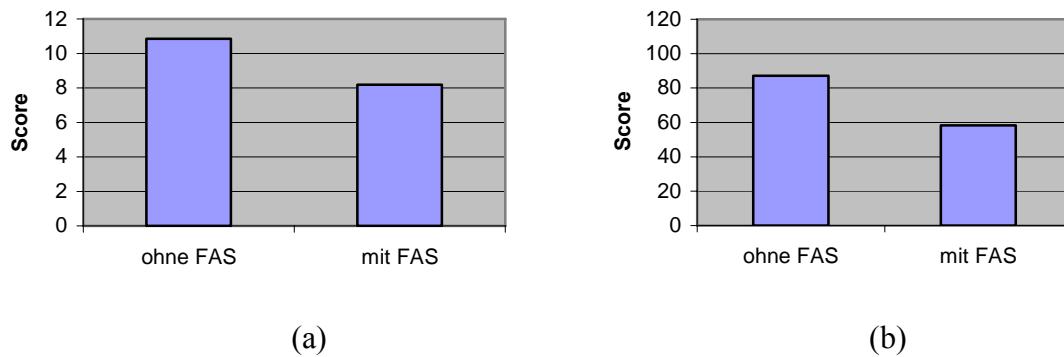
- 1) Es liegen keine bedeutsamen Differenzen zwischen dem Fahren mit bzw. ohne aktivem Infrarot-Nachtsichtsystem vor.
- 2) Die verwendeten physiologischen Parameter sind nicht in der Lage, die Beanspruchungsunterschiede zu erfassen.

Da die Studie 3 (vgl. Kap. 6.1.2.2) gezeigt hat, dass mit der Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung zwischen verschiedenen Beanspruchungen unterschieden werden kann, kann davon ausgegangen werden, dass nur kleine Beanspruchungsdifferenzen zwischen dem Fahren mit und ohne aktivem Infrarot-Nachtsichtsystem vorhanden waren. Somit kann resümierend gesagt werden, dass durch die Nutzung des FAS im Rahmen dieser Feldstudie keine Beanspruchung durch das System selbst induziert wurde.

### 6.2.2.2 Ergebnisse der subjektiven Beanspruchungsmessung

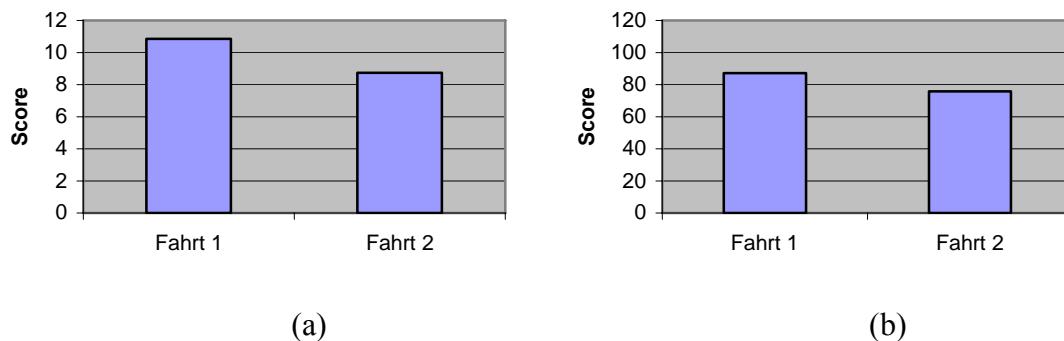
Wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, wurden für diese Studie zwei Probandengruppen gebildet: Die erste Gruppe fuhr die vorgegebene Versuchsstrecke zweimal unter den gleichen Bedingungen ohne Unterstützung durch ein Nachtsichtsystem. Die zweite Gruppe nutzte bei der ersten Fahrt ein aktives Infrarot-Nachtsichtsystem und absolvierte die zweite Versuchsfahrt ohne dieses Fahrerassistenzsystem. Nach beiden Fahrten wurden die Probanden mit dem NASA-TLX und der Anstrengungsskala zur ihrer subjektiv erlebten Beanspruchung befragt.

Eine Betrachtung der Untersuchungsergebnisse zeigt, dass die Versuchsgruppe, die beide Fahrten ohne Nachtsichtsystem absolvierte, die erste Versuchsfahrt als beanspruchender empfand als die Probanden, die das Fahrerassistenzsystem nutzten (Abb. 6.22).



**Abb. 6.22: Vergleich der Ratingergebnisse, erste Versuchsfahrt (ohne und mit Nutzung Infrarot-Nachtsichtsystem), (a) NASA-TLX, (b) Anstrengungsskala**

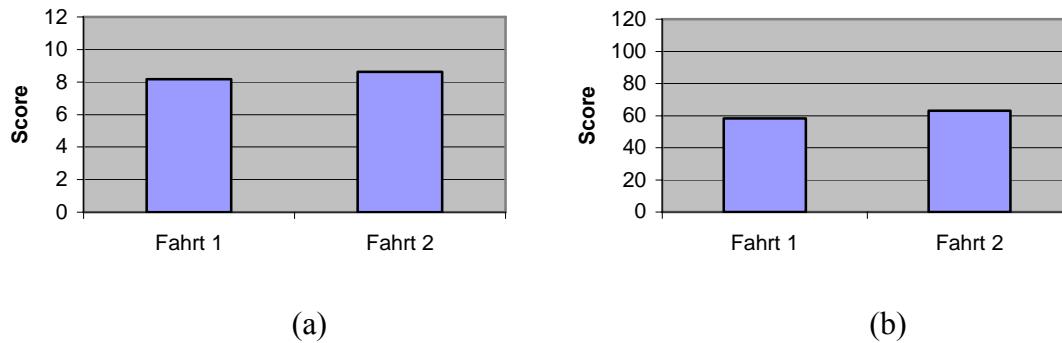
Bei den Versuchspersonen, die beide Fahrten ohne Nachsichtsystem absolvierten, sank die subjektive Beanspruchung bei der zweiten Versuchsfahrt (Abb. 6.23).



**Abb. 6.23: Mittelwert der Ratingergebnisse, Versuchsgruppe 1 (ohne Nachsichtsystem), (a) NASA-TLX, (b) Anstrengungsskala**

Dieses Ergebnis entspricht dem der in Kapitel 6.1 dargestellten Simulatorstudie: Fahren die Versuchspersonen eine identische Strecke zweimal, kommt es zu einem Gewöhnungseffekt und die erlebte Beanspruchung sinkt.

Bei der zweiten Versuchsgruppe zeigte sich das entgegengesetzte Bild: Die zweite Versuchsfahrt ohne Infrarot-Nachtsichtsystem wurde trotz des ebenfalls zu erwartenden Gewöhnungseffektes an die Strecke als beanspruchender erlebt als die erste Fahrt mit dem Fahrerassistenzsystem (Abb. 6.24). Dies Ergebnis entspricht den im Vorfeld der Untersuchung formulierten Erwartungen.



**Abb. 6.24: Mittelwert der Ratingergebnisse, Versuchsgruppe 2 (erste Fahrt mit Nachsichtsystem), (a) NASA-TLX, (b) Anstrengungsskala**

Die Ergebnisse der subjektiven Beanspruchungsmessung mit den Methoden des Selbstreports zeigen, dass die Versuchspersonen, die mit dem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem fuhren, einen Komfortanstieg durch die Nutzung des FAS empfanden.

### 6.2.2.3 Nutzung des aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems

Die Beantwortung der Fragen zur Nutzung des Infrarot-Nachtsichtsystems bestätigten die Ergebnisse der Studien 1 und 2. Alle Probanden, die mit dem Assistenzsystem einen Teil der Versuchsfahrt absolviert hatten, gaben an, das System während der Fahrt genutzt zu haben. Am häufigsten wurde das System aus Neugierde eingesetzt und um den Straßenverlauf besser einzusehen. An zweiter Stelle wurde es verwendet, um Abbiegevorgänge frühzeitig zu erkennen. Nur selten wurde es zur besseren Wahrnehmung von Hindernissen genutzt. Da die Fahrt lediglich acht Kilometer lang war, sind diese Aussagen aber nur bedingt interpretierbar, weil unerwartete Objekte auf dieser kurzen Strecke nur sehr selten auftreten. Im Hinblick auf die Nutzungshäufigkeit gab eine Person an, es fünf- bis zehnmal genutzt zu haben, alle anderen Personen schauten häufiger als zehnmal auf das Display. Den meisten Versuchspersonen bereitete die Nutzung des Systems keine Probleme. Sie gaben an, dass sie in kürzester Zeit alle für sie relevanten Informationen von dem Display ablesen konnten, so dass es durch die Systemnutzung nicht zu Sicherheitsproblemen kam. Diese Aussagen sind natürlich nur bedingt aussagekräftig, da die Probanden nur einmalig eine kurze Zeit mit dem Infrarot-Nachtsichtsystem fuhren. Eine Bewertung eines solchen neuartigen Systems ist, wie die ersten beiden Studien zeigen, nur nach einer längeren Gewöhnungsphase sinnvoll. Die Erhebung dieser Daten erfolgte nur zum Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen der ersten Studien.

### 6.2.3 Methodisches Fazit

In der Studie 4 wurde erstmalig das von Barschdorff und Bauch (2005) entwickelte Verfahren zur kontinuierlichen Blutdruckmessung in einer Feldstudie angewendet. Es gab durch das verwendete Messequipment keine Beeinträchtigung der Probanden in der Erfüllung ihrer Fahraufgabe. Somit ist diese neue Methode zur Erfassung der Beanspruchung prinzipiell für den Einsatz in Evaluationsstudien im Kfz-Bereich geeignet.

Ein Fazit zur Eignung der Methode der kontinuierlichen Blutdruckmessung zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung findet sich bereits in Kapitel 6.1.3.

Mit den eingesetzten Methoden des Selbstreports, dem NASA-TLX und der Anstrengungs-skala war es möglich, subjektive Beanspruchungsunterschiede beim Fahren mit einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem im Vergleich zum Fahren ohne das FAS zu ermitteln. Dadurch, dass sie nicht während der Fahrt, sondern im Anschluss daran angewendet werden, geht von diesen Methoden keine Sicherheitsgefährdung aus. Somit eignen sich diese empirischen For-schungsmethoden des Selbstreports zur Erfassung des Konstrukts *Komfort* (vgl. Bubb, 2002) in Studien zur Evaluation von Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr.

Eine ausführliche Diskussion der im Rahmen der vier Studien dieser Arbeit angewendeten empirischen Forschungsmethoden erfolgt im nachfolgenden Kapitel 7.



## **7 Diskussion der eingesetzten Evaluationsmethoden**

In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten vier empirischen Studien zur Evaluation eines neuen Fahrerassistenzsystems kamen verschiedene Forschungsmethoden zur Anwendung. In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse dieser Methoden im Hinblick auf ihre Eignung für die Evaluation neuer Systeme für den Kraftfahrzeubereich im Entwicklungsprozess.

Kapitel 7.1 beschäftigt sich mit den Methoden zur Erhebung der Strategien bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems und Kapitel 7.2 mit den angewendeten Forschungsmethoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung bei der Nutzung dieses neuen Fahrerassistenzsystems.

### **7.1 Methoden zur Erfassung von Nutzungsstrategien**

In den beiden im fünften Kapitel dargestellten Untersuchungen zu Strategien bei der Nutzung eines neuen, visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystems, einem aktiven Infrarot-Nachtsichtsystem, wurden folgende empirische Forschungsmethoden eingesetzt:

- Zur Erfassung der Nutzungsstrategien wurden in beiden Studien die Selbstreport-Methoden qualitative und quantitative Befragung herangezogen. Hierzu kamen eine Variante des *Lauten Denkens* und eine Fragebogenerhebung zum Einsatz (vgl. Kap. 5.1.1.4 und 5.2.1.4).
- In der Studie 2 wurden ergänzend dazu mit der Methode der Blickbewegungsmessung die Strategien bei der Nutzung des FAS objektiv erfasst (vgl. Kap. 5.2.1.4).

Ein Gegenstand der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen im Entwicklungsprozess sind die Nutzungsstrategien der Fahrer. Zur Beurteilung, ob es während einer Gewöhnungsphase an das System zu einer Gefährdung durch die Nutzung kommt, ist es außerdem wichtig, zu untersuchen, wie diese Strategien ausgebildet werden. Für eine möglichst optimale Systemauslegung ist die Bewertung einzelner Systemparameter schon im Entwicklungsprozess von großer Bedeutung. Die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten empirischen Forschungsmethoden sind in unterschiedlicher Weise für die Bearbeitung dieser Forschungsfragen geeignet.

#### **(1) Erhebung von Nutzungsstrategien**

Alle eingesetzten Methoden waren zur Erfassung der Strategien bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems geeignet.

Sowohl im Rahmen ihrer Äußerungen während der Fahrt als auch bei der Nachbefragung mittels Fragebogen gaben die Probanden an, in welcher Weise sie das neue System nutzten. Beispielsweise wurden Informationen über Situationen gegeben, in denen das System genutzt wurde.

Als sehr gut geeignet für die Erhebung der Strategien bei der Nutzung des visuell arbeitenden aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems erwies sich in der Studie 2 die Methode der Blickbewegungsmessung. Dies entspricht den Ergebnissen der in Kapitel 3.1.2.2 dargestellten Studien von Lansdown und Fowkes (1998), Meitzler et al. (2001) und Schweigert et al. (2005), die eine sehr gute Einsetzbarkeit des Eye-Trackings zur Beschreibung von Nutzungsstrategien beim Umgang mit einem neuen FAS zeigen. Ein großer Vorteil dieser Methode gegenüber dem Selbstreport ist die Möglichkeit, Blickabwendungszeiten von der Straße bei der Systemnutzung sowie Häufigkeit und Situationsabhängigkeit der Nutzung des Fahrerassistenzsystems quantitativ zu erfassen. Es konnte bestimmt werden, wie häufig die Fahrer den Blick von der Straße zum Display wendeten und wie lange sie zur Informationsaufnahme benötigten. Diese Daten sind wichtig, um bei der Systementwicklung einschätzen zu können, in welchem Ausmaß es durch das System zu einer visuellen Ablenkung des Fahrers und daraus resultierenden Sicherheitsgefährdung kommt. Durch eine Analyse der erhaltenen Videodaten war es möglich, zu untersuchen, in welchen Verkehrssituationen und bei welchen Streckenbedingungen das Infrarot-Nachtsichtsystem genutzt wird. Bislang wurden noch keine vergleichbaren Studien zu dieser Thematik in der Literatur beschrieben.

Ein Vergleich dieser objektiv erhaltenen Ergebnisse mit den subjektiven Einschätzungen der Probanden zeigte, dass die Versuchspersonen nicht immer in der Lage waren, ihre Nutzungsstrategien quantitativ richtig anzugeben. Die in Kapitel 3.1.1.2 zitierten Untersuchungen von Sprenger (1993) und Schweigert et al. (2005) betrachteten ebenfalls die Strategien bei der Nutzung eines Displays im Kfz. In diesen Studien wurden die subjektiv erhobenen Nutzungsstrategien durch objektive Blickdaten, welche durch Augenbewegungsmessungen erhalten wurden, bestätigt. Dies entspricht nicht den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Mit den vorliegenden Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung subjektive Forschungsmethoden zur Beschreibung der Strategien bei der Nutzung von FAS nicht ausreichend sind.

Somit ist die Evaluation eines neuen visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystems im Hinblick auf die notwendige Blickabwendungszeit von der Fahrbahn sowie die Häufigkeit der Blickzuwendungen bei dessen Nutzung und damit einhergehendem Gefährdungspotenzial durch das System nur mit der Methode der Blickbewegungsmessung möglich.

## (2) Ausbildung von Nutzungsstrategien

Eine Forschungsfrage der Studien war, inwieweit sich die eingesetzten Methoden zur Erhebung der Ausbildung der Nutzungsstrategien im Gewöhnungsprozess an das Infrarot-Nachtsichtsystem eigneten.

Hier zeigte sich, dass die geschlossenen Fragen der Fragebogenerhebung wenig geeignet waren, Veränderungen über die Zeit anzuzeigen, da die siebenstufigen Skalen nur geringe Differenzierungen zuließen. Durch die offene Frage nach Veränderungen beim Umgang mit dem System im Vergleich zur letzten Versuchsfahrt konnte dagegen der Gewöhnungsprozess abgebildet werden.

Die eingesetzte Variante des *Lauten Denkens* war gut geeignet, um Veränderungen über die Versuchsfahrten abzubilden. In ihren Äußerungen während der Versuchsfahrt gaben die Probanden ihre Nutzungsstrategien an und kommentierten deren Veränderungen im Vergleich zu früheren Fahrten. Im Rahmen der letzten Fahrten wurde von der Versuchsleitung außerdem gezielt nachgefragt, ob Meinungsausserungen der ersten Fahrten immer noch Bestand hätten oder ob sich Einschätzungen durch die Gewöhnung an das System verändert haben. Auf diese Weise konnten Veränderungen in der Systembewertung und -nutzung erhoben werden.

Auch durch die Methode der Blickbewegungsmessung konnten Veränderungen in der Systemnutzung, beispielsweise in der Nutzungsdauer und der Nutzungshäufigkeit, über die Zeit untersucht werden. Somit war es möglich, den Gewöhnungsprozess an das neue Fahrerassistenzsystem sowie daraus resultierende potentielle Gefährdungen quantitativ zu beschreiben. Dies bestätigt die Ergebnisse der Studie von Schweigert et al. (2005, vgl. Kap. 3.1.2.2), die ebenfalls eine Langzeituntersuchung zum Blickverhalten auf ein Head-up Display durchführten. Auch diese Studie zeigte eine Eignung des Eye-Trackings zur Erfassung des Blickverhaltens im Rahmen eines Gewöhnungsprozesses.

## (3) Bewertung von Systemparametern

Ein wichtiger Faktor bei der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen ist die Bewertung von Systemparametern durch die Versuchspersonen. Bereits kleine Fehler in der Systemgestaltung, wie beispielsweise eine suboptimale Displayposition, können zu einer geringeren Nutzung eines Systems führen. Für die Bewertung von Systemparametern erwies sich insbesondere die Fragebogenerhebung im Anschluss an die Versuchsfahrten als geeignet. Mit den geschlossenen Fragen konnte gezielt nach einer Bewertung der Parameter, wie beispielsweise Displayposition und Bildwinkel, gefragt werden. Auch die in Kapitel 3.1.1.2 zitierten Untersuchungen von Rudin-Brown und Parker (2004) sowie Schweigert et al. (2005) zeigen eine Eignung der Methode der Fragebogenerhebung.

Die verwendete Variante des *Lauten Denkens* und die offenen Fragen des Fragebogens waren ebenfalls für die Bewertung von Systemparametern geeignet, haben aber den Nachteil, dass nicht gezielt nach bestimmten Parametern gefragt werden kann.

Auch die Methode der Blickbewegungsmessung könnte hierfür eingesetzt werden, indem beispielsweise die Blickbewegungen bei verschiedenen Displaypositionen analysiert werden. Dies war aber nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Einen Überblick über die Eignung der eingesetzten Forschungsmethoden zur Bearbeitung der verschiedenen Forschungsschwerpunkte gibt Tabelle 7.1.

**Tab. 7.1: Bewertung der eingesetzten Methoden für die Erhebung von Nutzungsstrategien**

	<b>Lautes Denken</b>	<b>Fragebogen (geschlossene Fragen)</b>	<b>Fragebogen (offene Fragen)</b>	<b>Blickbewegungsmessung</b>
<b>Bewertung von Systemparametern</b>	+	+++	+	Nicht untersucht
<b>Qualitative Erhebung von Nutzungsstrategien</b>	+++	++	++	+++
<b>Quantitative Erhebung von Nutzungsstrategien</b>	+	++	+	+++
<b>Erhebung von Veränderungen</b>	++	-	+	+++

+++ sehr gut geeignet; ++ gut geeignet; + geeignet; - wenig geeignet

Entscheidungskriterien für die Auswahl einer empirischen Forschungsmethode für die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen sind der jeweilige Vorbereitungs-, Durchführungs- und Auswertungsaufwand. Die Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die Anforderungsvoraussetzungen der verwendeten Methoden.

Ein Vorteil der Verwendung der Methoden des Selbstreports ist der geringe Durchführungs aufwand. Die angewendete Variante des *Lauten Denkens* verlangt keine Zeit zusätzlich zur Versuchsfahrt, weil sie parallel durchgeführt wird.

Für die Nachbefragung mittels Fragebogen wurde je nach Proband und Versuchsfahrt bis zu 15 Minuten benötigt. Dies ist ein für die Versuchspersonen akzeptabler Zeitaufwand.

Unterschiede weisen die Selbstreportmethoden im Vorbereitungs- und Auswertungsaufwand auf. Insbesondere die inhaltsanalytische Auswertung der während der Versuchsfahrten von den Probanden getätigten Äußerungen ist sehr zeitaufwendig.

**Tab. 7.2: Anforderungsvoraussetzungen der eingesetzten Methoden für die Erhebung von Nutzungsstrategien**

	<b>Lautes Denken</b>	<b>Fragebogen (geschlossene Fragen)</b>	<b>Fragebogen (offene Fragen)</b>	<b>Blickbewegungsmessung</b>
<b>Vorbereitungsaufwand</b>	-	++	++	++
<b>Durchführungsaufwand</b>	--	-	-	++
<b>Auswertungsaufwand</b>	++	-	o	- bis ++*
<b>Kosten</b>	-	-	-	++

++ sehr hoch; + hoch; o mittel; - gering; -- sehr gering

\* Abhängig von der Fragestellung

Nachteile der Methode der Blickbewegungsmessung sind die hohen Anschaffungskosten des Geräts und ein hoher einmaliger Vorbereitungsaufwand beim Einbau des Messinstruments in das Versuchsfahrzeug. Der Umgang mit dem Eye-Tracking-System erfordert eine erhebliche Einarbeitungszeit. Außerdem ist der sehr hohe Durchführungsaufwand problematisch. Die Kalibrierung des Eye-Trackings benötigte bei einigen Probanden bis zu zwei Stunden, was sowohl von der Versuchsleitung als auch von den Fahrern große Geduld erforderte.

Der Auswertungsaufwand der Blickbewegungsdaten variiert je nach Fragestellung: Blickzurwendungen auf ein definiertes Areal und Blickhäufigkeiten können softwaregestützt automatisiert ausgewertet werden. Sollen dagegen Aussagen über eine situationsabhängige Nutzung eines Fahrerassistenzsystems getätigt werden, erfordert dies eine aufwendige Analyse der Videodaten.

Bei der Durchführung einer Blickbewegungsmessung muss beachtet werden, dass es zu Störungen durch das Messinstrument kommen kann. Das in dieser Studie verwendete Remote Eye-Tracking-System funktioniert weitgehend fehlerfrei, wenn der Proband den Kopf mög-

lichst wenig bewegt. Natürlich wurden die Versuchspersonen aus Sicherheitsgründen darauf hingewiesen, dass sie den Kopf so weit bewegen dürfen, wie es zum Fahren notwendig ist. Trotzdem ist davon auszugehen, dass sich die Fahrer durch die Apparatur gestört fühlen. Auch durch andere Systemteile kann die Fahraufgabe beeinträchtigt werden. Beispielsweise ist die Videokamera rechts neben dem Fahrer angebracht und verhindert einen störungsfreien Blick nach hinten, so dass der Rückspiegel nicht verwendet werden kann. Eine Kombination der Blickbewegungserfassung mit einer Beanspruchungsmessung in einer Evaluationsstudie ist sicherlich nicht sinnvoll, weil von einer Beanspruchung durch das Eye-Tracking ausgegangen werden muss.

Die Entscheidung, welche der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten empirischen Forschungsmethoden in zukünftigen Evaluationsstudien zur Erfassung von Strategien bei der Nutzung von visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystemen gewählt werden sollten, hängt von der jeweiligen konkreten Fragestellung ab. Bei der Entscheidung muss jeweils eine Kosten-Nutzen-Überlegung durchgeführt werden. Handelt es sich bei dem zu untersuchenden Fahrerassistenzsystem um eine völlig neuartige Technologie für Kfz, wie beispielsweise bei dem in dieser Arbeit verwendeten Nachtsichtsystem und liegen noch keine Untersuchungen über die Nutzung dieses Systems durch die Fahrer vor, sollten Blickbewegungsmessungen durchgeführt werden, um beispielsweise die visuelle Ablenkung durch die Systemnutzung quantitativ beschreiben zu können. Ist eine Sicherheitsgefährdung durch bereits erfolgte empirische Studien auszuschließen, kann zu einer qualitativen Untersuchung von Nutzungsstrategien auf die weniger aufwendigen Methoden des Selbstreports zurückgegriffen werden.

## 7.2 Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung

Zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung wurden die im sechsten Kapitel beschriebenen Studien durchgeführt. In den Untersuchungen wurden folgende empirische Forschungsmethoden (vgl. Kap. 6.1.1.4 und 6.2.1.4) verwendet:

- Aus der Methodenkategorie *Selbstreport* wurden die Ratingskalen *NASA-TLX* und *Anstrengungsskala* zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung herangezogen.
- Aus dem Bereich *Physiologie* zur Erfassung der objektiven Beanspruchung erfolgte eine kontinuierliche Blutdruckmessung. Als Vergleichsparameter wurden die *Herzfrequenz* und der *Hautleitwert* erhoben.

Sowohl die Ratingskalen als auch die physiologischen Parameter waren in der Lage, Beanspruchungsunterschiede des Fahrers zu erheben und verfügen somit über eine ausreichend hohe *Sensitivität*, um in Evaluationsstudien eingesetzt zu werden. Bei den beiden verwendeten Ratingskalen war der multidimensionale NASA-TLX besser in der Lage, zwischen verschie-

denen Beanspruchungsniveaus zu differenzieren als die eindimensionale Anstrengungsskala und sollte daher dieser vorgezogen werden. Dies entspricht den Ergebnissen vieler Untersuchungen (vgl. Kap. 3.2.1.2), beispielsweise von Hill et al. (1992) sowie Pfendler und Schütte (2002), die zeigten, dass der NASA-TLX gut zwischen verschiedenen Beanspruchungsniveaus differenzieren kann.

Entsprechend der Literatur (Bubb, 2002) wurden mit diesen beiden Methodenkategorien unterschiedliche Konstrukte erfasst: Mit den Methoden des Selbstreports wurde der *Komfort* und mit den Biosignalen der *Diskomfort* erhoben. Somit stellt sich bei der Auswahl der Methode zur Beanspruchungsmessung die Frage, welches Konstrukt erfasst werden soll. Ist lediglich die Messung potentieller Komfortunterschiede bei der Nutzung eines FAS von Interesse, empfiehlt sich die weniger aufwendige Verwendung der Methoden des Selbstreports. Vorbereitungs-, Durchführungs- und Auswertungsaufwand sind bei den beiden Ratingskalen NASA-TLX und Anstrengungsskala gering und stellen somit sowohl für die Versuchsleitung als auch für die Probanden kein Problem dar.

Dagegen werden für die Messung der physiologischen Parameter *Blutdruck*, *Herzfrequenz* und *Hautleitwert* technische Instrumente benötigt, die eine längere Einarbeitungszeit für die Durchführung der Untersuchung und die Auswertung der Messergebnisse erfordern. Für eine Erhebung des Konstrukts *Diskomfort* ist eine Beanspruchungserhebung mit diesen objektiven Messmethoden nicht durch die Methoden des Selbstreports ersetzbar. Bei der Evaluation von neuen Fahrerassistenzsystemen für Kraftfahrzeuge im Entwicklungsprozess ist die Erfassung von Diskomfort unabdingbar, da hoher Diskomfort zu einer Sicherheitsgefährdung führen kann.

Hohes Komfortempfinden des Fahrers bei der Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems führt zu einer hohen Akzeptanz dieses Systems. Somit ist auch die Erhebung des Komforts wichtig. Daher sollten im Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen zur Erhebung der Beanspruchung immer Methoden des Selbstreports mit objektiven Beanspruchungsmethoden kombiniert werden, um beide Konstrukte zu erfassen.

Eine Betrachtung der Beanspruchungsstudien in der Literatur zeigt, dass bei der Wahl der Forschungsmethode meist nicht zwischen den Konstrukten *Komfort* und *Diskomfort* unterschieden wird. Damit besteht die Gefahr, dass falsche Konstrukte erhoben wurden.

Bei der Wahl einer empirischen Forschungsmethode für Studien im Straßenverkehr muss außerdem beachtet werden, inwieweit sie die Fahraufgabe selbst und damit die Untersuchungsergebnisse beeinflusst (Reaktivität). Die Beanspruchungserhebung durch die Ratingskalen findet im Anschluss an die Versuchsfahrt statt und beeinflusst daher die Probanden und die

Untersuchungsergebnisse nicht. Das Anbringen von Elektroden, wie sie z. B. für die Erfassung des Hautleitwerts notwendig sind, ist für die Probanden unangenehm, so dass die Messung beanspruchend für die Versuchspersonen sein kann. Außerdem besteht die Gefahr der Bewegungseinschränkung durch die Elektrodenkabel, was bei Untersuchungen im Straßenverkehr zu Sicherheitsgefährdungen führen kann. Bei dem von Barschdorff und Bauch (2005) entwickelten Verfahren zur kontinuierlichen Erhebung des Blutdrucks, mit dem auch die Herzfrequenz erfasst werden kann, erfolgt die Signalmessung über einen Brustgurt und einen Ohrclip. Diese Methode ist für die Versuchspersonen nicht störend und führt nicht zu Bewegungseinschränkungen, was eine hohe Akzeptanz der Methode bei den Probanden schafft. Somit konnte mit der vorliegenden Arbeit die Anwendbarkeit dieses neuen Forschungsinstruments für Evaluationsstudien im Kfz-Bereich erstmalig untersucht und bestätigt werden. Für Beanspruchungsmessungen im Rahmen von Evaluationsstudien im Kfz wird daher empfohlen, den Blutdruck und die Herzfrequenz als physiologische Parameter heranzuziehen und auf die Ableitung des Hautleitwerts zu verzichten.

### **7.3 Konsequenzen für die Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme**

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich auf die Evaluation anderer, zukünftiger Fahrerassistenzsysteme übertragen. Somit können hieraus Erkenntnisse für die Konzeptionierung des Untersuchungsdesigns von Evaluationsstudien neuer FAS im Entwicklungsprozess gewonnen werden.

Die durchgeführten Studien haben gezeigt, dass mit qualitativen Befragungsmethoden die Strategien bei der Nutzung eines Fahrerassistenzsystems erfasst werden können. Je nach Fragestellung können hierfür die in dieser Arbeit verwendete Variante des *Lauten Denkens* oder eine Fragebogenerhebung im Anschluss an die Nutzung des Systems, beispielsweise im Rahmen einer Versuchsfahrt, eingesetzt werden (vgl. Kap. 7.1, Tab. 7.1). Da die Variante des *Lauten Denkens* keinen zusätzlichen Durchführungsaufwand benötigt, ist in der Regel eine Kombination beider Methoden zu empfehlen.

Zur objektiven Erhebung der Nutzungsstrategien wurde die Methode der Blickbewegungsmessung herangezogen. Diese Methode ist eine sehr gute Methode zur Erfassung der Nutzungsstrategien bei allen Fahrerassistenzsystemen, die eine visuelle Informationsaufnahme benötigen. Obwohl der Einsatz der Blickbewegungsmessung einen sehr hohen Vorbereitungs-, Durchführungs- und Auswertungsaufwand bedeutet, ist die Anwendung dieser Methode bei der Evaluation von neuen Systemen, bei denen bisher keine Kenntnisse über deren Nutzung vorliegen, aus Sicherheitsgründen unerlässlich, da lange und häufige Blickabwen-

dungen von der Straße zu Gefährdungen führen können. Für die Untersuchung nicht visuell arbeitender FAS ist die Methode ungeeignet. Zur objektiven Erhebung der Nutzungsstrategien dieser Systeme müssen daher andere empirische Methoden erprobt werden.

Die verwendeten empirischen Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung durch die Nutzung eines neuen Fahrerassistenzsystems sind zur Evaluation aller Fahrerassistenzsysteme geeignet. Soll das Konstrukt *Komfort* erfasst werden, können hierfür Methoden des Selbstreports herangezogen werden. Mit diesen Methoden ist es auch möglich, Beanspruchungsänderungen im Rahmen eines Gewöhnungsprozesses an ein neues FAS zu erfassen. Physiologische Parameter wie beispielsweise *Herzfrequenz* und *Blutdruck*, mit denen der *Diskomfort* erhoben werden kann, sind hierfür nicht geeignet, weil Biosignale von Faktoren wie Tageszeit, Temperatur etc. beeinflusst werden (Schandry, 1989) und somit ein Vergleich der Messwerte über mehrere Versuchsfahrten nicht möglich ist. Als geeignet hierfür erscheinen performancebasierte Methoden, die als Indikator für die Fahrerbeanspruchung das Fahrverhalten heranziehen (vgl. Kap. 3.2.2). Der Gewöhnungsprozess an ein neues System sollte sich in einer Verbesserung der Fahrperformance, beispielsweise der Spurhaltung, widerspiegeln. Diese Methoden wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit aber nicht eingesetzt und erprobt.

Resümierend kann gesagt werden, dass für die Evaluation neuer Fahrerassistenzsysteme im Entwicklungsprozess grundsätzlich eine Vielzahl empirischer Forschungsmethoden zur Verfügung steht. Generelle Empfehlungen, welche Methoden verwendet werden sollen, sind aber nicht möglich. Je nach Fragestellung und FAS muss eine Untersuchung mit spezifischen Methoden konzeptioniert werden.

Bei der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen werden häufig sehr schwer erfassbare hypothetische Konstrukte wie *Akzeptanz*, *Sicherheit* und *Beanspruchung* betrachtet. Um geeignete Indikatoren für die Erfassung dieser Konstrukte zu finden ist eine Operationalisierung notwendig. Die durchgeführten empirischen Studien haben gezeigt, dass teilweise auch Mehrfachoperationalisierungen notwendig sind. Nur durch die Kombination verschiedener Indikatoren, die mit unterschiedlichen empirischen Methoden erhoben werden, können valide Ergebnisse erhalten werden.

Im konkreten Fall muss bei der Untersuchungsplanung anhand der Fragestellung entschieden werden, welche Methode oder Methodenkombination angemessen ist. Hierfür ist vor dem Hintergrund des Untersuchungsgegenstands immer auch eine Kosten-Nutzen-Abwägung notwendig. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit helfen, bei der Konzeptionierung von Evaluationsstudien neuentwickelter FAS Entscheidungen hinsichtlich der Methodenwahl zu treffen.



## 8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersuchte und bewertete die Eignung verschiedener empirischer Forschungsmethoden für die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen. Hierfür wurde beispielhaft die Erfassung der Strategien und der Fahrerbeanspruchung bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems analysiert.

Mit Hilfe der eingesetzten Methoden des Selbstreports, der Fragebogenerhebung und einer Variante des *Lauten Denkens* konnten die Nutzungsstrategien der Fahrer qualitativ erhoben werden. Dagegen waren die geschlossenen Fragen des Fragebogens nicht geeignet, um Veränderungen im Rahmen eines Gewöhnungsprozesses abzubilden. Hierfür konnten die offenen Fragen der Nachbefragung und die Äußerungen der Fahrer während der Versuchsfahrten herangezogen werden.

Mit der Methode der Blickbewegungsmessung war es möglich, die Strategien der Fahrer bei der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems quantitativ zu erfassen. Zur Beschreibung der Nutzungsstrategien wurden die Parameter *Blickabwendungszeit*, *Häufigkeit der Blickzuwendung* und *situationsabhängige Nutzung* herangezogen. Die definierten Parameter konnten auch zur Beschreibung des Gewöhnungsprozesses an das neue Fahrerassistenzsystem verwendet werden.

Die Resultate der Blickbewegungsmessung bestätigten die mit den Methoden des Selbstreports erhobenen qualitativen Ergebnisse. Dagegen stimmten die mit den Methoden des Selbstreports erhaltenen quantitativen Nutzungsdaten nicht immer mit den objektiven Ergebnissen der Blickbewegungsmessung überein. Die Probanden waren nur teilweise in der Lage, ihre Nutzungsstrategien quantitativ richtig einzuschätzen. Somit ist bei einer quantitativen Analyse der Nutzung eines visuell arbeitenden Fahrerassistenzsystems die Anwendung des Eye-Trackings unverzichtbar. Sind qualitative Aussagen über Nutzungsstrategien ausreichend, sollte bei Evaluationsstudien im Entwicklungsprozess aufgrund des sehr viel geringeren Vorbereitungs- und Durchführungsaufwandes auf Methoden des Selbstreports zurückgegriffen werden.

In Evaluationsstudien im Entwicklungsprozess neuer Fahrerassistenzsysteme ist die Betrachtung der durch das System selbst induzierten Beanspruchung von großer Bedeutung, da diese zu einer Sicherheitsgefährdung durch die Systemnutzung selbst führen kann. In einer Feldstudie wurde daher untersucht, ob der Einfluss der Nutzung eines aktiven Infrarot-Nachtsichtsystems auf die Fahrerbeanspruchung durch die verwendeten empirischen Methoden erfasst werden kann.

Zur Erhebung der Fahrerbeanspruchung wurden aus der Methodenkategorie *Selbstreport* die Ratingskalen *NASA-TLX* und *Anstrengungsskala* herangezogen. Beide Skalen waren in der Lage, den *Komfort* des Fahrers zu messen. Der mehrdimensionale NASA-TLX war besser zur Differenzierung verschiedener Beanspruchungsniveaus geeignet als die eindimensionale Anstrengungsskala und wird daher für den Einsatz in Evaluationsstudien empfohlen.

Der physiologische Parameter *Blutdruck* wurde als Indikator für den *Diskomfort* genutzt. Dabei kam erstmalig in einer größeren Validierungsstudie sowie einer Feldstudie als Messinstrument die von Barschdorff und Bauch (2005) neu entwickelte kontinuierliche Blutdruckmessung zum Einsatz. Als Vergleichsparameter wurden die *Herzfrequenz* und der *Hautleitwert* erfasst. Es zeigte sich, dass mit Hilfe der kontinuierlichen Blutdruckmessung zwischen verschiedenen Beanspruchungsniveaus Unterschiede werden konnten und diese somit eine geeignete Methode zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung darstellt. Ein großer Vorteil dieser Methode ist die einfache, für den Probanden störungsfreie Ableitung des Biosignals. Da die Herzfrequenz mit demselben Instrument erfasst werden kann, ist es sinnvoll, diese als Vergleichsparameter aufzuzeichnen. Die Messung des Hautleitwerts als Parameter erbrachte keine zusätzlichen Informationen. Da für die Erhebung dieses Vergleichsparameters ein weiteres Messinstrument benötigt wird und die Ableitung durch Sensoren an den Händen eine potentielle Störung für den Fahrer bedeutet, sollte bei zukünftigen Evaluationsstudien auf eine Erfassung des Hautleitwerts verzichtet werden.

## **A Anhang**

### **A.1 Empirische Studien zu Nutzungsstrategien**

#### **A.1.1 Fragebogen Studie 1**

**Proband:**

**Fahrt:**

**Datum:**

#### **Persönliche Angaben**

(nur nach der ersten Versuchsfahrt)

**Alter:** \_\_\_\_ Jahre

**Geschlecht:**  Weiblich

Männlich

**Welches Fahrzeug fahren Sie momentan? Marke/Typ:** \_\_\_\_\_  
**Baujahr:** \_\_\_\_\_

**Jährliche Fahrleistung:** \_\_\_\_\_ km

---

**Wie gefällt Ihnen das System insgesamt?**

sehr schlecht       sehr gut

**Wie gut waren für Sie die Darstellungen auf dem Display zu erkennen?**

sehr schlecht       sehr gut

**Ist die Sichtweite des Nachsichtsystems ausreichend?**

überhaupt nicht       Ja, absolut

**Gelingt es Ihnen, mit dem Nachsichtsystem bei Blendung durch den Gegenverkehr die eigene Fahrbahn besser einzusehen als ohne das System?**

überhaupt nicht       Ja, absolut

**Hatten Sie das Gefühl eines Sicherheitsgewinns?**

überhaupt nicht       Ja, absolut

**Konnten Sie mit dem System den Straßenverlauf besser erkennen?**

überhaupt nicht       sehr häufig

**Konnten Sie durch das Nachsichtsystem eine Gefahrensituation früher einschätzen?**

überhaupt nicht       sehr häufig

Falls Sie Gefahrensituationen früher einschätzen konnten, können Sie diese bitte kurz beschreiben?

---

---

---

**Hat Sie das System während der Fahrt irritiert?**

überhaupt nicht       sehr häufig

**Wenn Sie das Fahren mit dem Nachtsichtsystem mit dem Fahren ohne das System vergleichen, empfinden Sie das Fahren mit dem Nachtsichtsystem als weniger anstrengend oder als anstrengender?**

weniger anstrengend       anstrengender  
genauso  
anstrengend

**Ist es durch das Nachtsichtsystem zu einer Gefährdung gekommen?**

- Ja  
 Nein

Falls ja, können Sie die Situation bitte kurz schildern?

---

---

---

**Wie häufig würden Sie das System auf folgenden Straßentypen nutzen:**

Auf der Autobahn

gar nicht       sehr häufig

Auf der Landstraße

gar nicht       sehr häufig

In geschlossenen Ortschaften

gar nicht       sehr häufig

**In welchen Situationen würden Sie das System nutzen?**

- Ich würde bei schlechten Sichtverhältnissen ganze Streckenabschnitte nach Display fahren.
- Ich würde mir mit dem System in spezifischen Situationen (z. B. Blendung durch den Gegenverkehr) punktuell Informationen einholen.
- Ich würde das System überhaupt nicht nutzen.

**Möchten Sie ein solches System zukünftig besitzen?**

kein Interesse       unbedingt

**Wie viel würden Sie für ein optional angebotenes Nachsichtsystem ausgeben?**

\_\_\_\_\_ EUR

**Was gefällt Ihnen an dem System?**

---

---

---

---

**Was stört Sie an dem System und was könnte man besser machen?**

---

---

---

---

**Ab der 2. Fahrt:**

**Haben Sie bei dieser Fahrt beim Umgang mit dem System eine Veränderung zur letzten Fahrt bemerkt?**

---

---

---

---

---

**Gibt es sonst noch etwas, was Sie zu dem Thema anmerken möchten?**

---

---

---

---

---

### A.1.2 Fragebogen Studie 2

Proband:

Fahrt:

Datum:

**Bitte vergleichen Sie die eben absolvierte Nachtfahrt mit Nachtsichtsystem mit einer Ihnen bekannten Nachtfahrt in Ihrem eigenen Pkw.**

**Hat sich das Nachtsichtsystem beim Fahren hilfreich gezeigt?**

Ja

Nein

Wenn ja, in welchen Situationen? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Haben sich durch die Nutzung des Systems Nachteile für Sie ergeben?**

Ja

Nein

Wenn ja, welche? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Wie häufig haben Sie das Nachtsichtsystem genutzt?**

gar nicht       ständig

**In welchen Fahrsituationen haben Sie das Nachsichtsystem benutzt?**

---

---

---

**Hat sich die Nutzung des Nachsichtsystems im Verlauf der Fahrt verändert?**

- Ja  
 Nein

Wenn ja, wie? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Ab der 2. Fahrt:****Hat sich die Nutzung des Nachsichtsystems im Vergleich zu früheren Fahrten geändert?**

- Ja  
 Nein

Wenn ja, wie? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Hat sich die Ablesezeit – die Zeit, die Sie tatsächlich benötigen, um die gewünschte Information zu erhalten – während der Fahrt geändert?**

- Ja  
 Nein

Wenn ja, wie? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**War die Ablesezeit abhängig von der jeweiligen Verkehrssituation? Bitte bringen Sie die vorhin genannten Situationen, in denen Sie das Nachsichtsystem nutzten, in eine Rangreihe. Beginnen Sie mit der Situation, in der die Ablesezeit am kürzesten war.**

---

---

---

**War die Nutzung des Nachsichtsystems – im Vergleich zum Fahren ohne das System – anstrengend für Sie?**

überhaupt nicht       sehr anstrengend

Warum? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Hatten Sie das Gefühl eines Sicherheitsgewinns?**

überhaupt nicht       sehr hoher Gewinn

Warum? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Hatten Sie das Gefühl eines Komfortgewinns?**

überhaupt nicht       sehr hoher Gewinn

Warum? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Haben Sie noch sonstige Anmerkungen?**

---

---

---

## A.2 Empirische Studien zur Beanspruchung

### A.2.1 Fragebogen und Instruktion Studie 3

**Proband:**

**Datum:**

**Sehr geehrter Versuchsteilnehmer,**

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben an unserer Untersuchung teilzunehmen. Bevor wir beginnen, brauchen wir aus statistischen Gründen einige Angaben zu Ihrer Person. **Die Auswertung Ihrer Daten erfolgt selbstverständlich anonym.**

---

#### Persönliche Angaben

**Alter:** \_\_\_\_ Jahre

**Geschlecht:**

Weiblich

Männlich

**Jährliche Fahrleistung:** \_\_\_\_\_ km

**Wie lange sind Sie bereits im Besitz Ihres Führerscheins?** \_\_\_\_\_ Jahre

**Treiben Sie regelmäßig Sport (mindestens 2 x pro Woche)?**

Ja

Nein

**Konsumieren Sie Medikamente, die Ihren Blutdruck beeinflussen?** Ja Nein**Wenn ja, welche Auswirkung auf Ihren Blutdruck haben die Medikamente?** Beruhigend Anregend**Haben Sie Erfahrung mit Fahrsimulationen am Computer (z. B. „Need for Speed“)?** Ja Nein**Wenn ja, wie häufig spielen Sie entsprechende Spiele am Computer? \_\_\_\_\_**

---

---

**Instruktion**

Ziel unserer Untersuchung ist es herauszufinden, wie stark Sie durch eine Fahraufgabe beansprucht werden. Dazu werden Sie im Simulator zwei Mal eine vorgegebene Strecke fahren. Während der Fahrt wird mit Hilfe eines Biosignalerfassungsgeräts Ihre Beanspruchung gemessen. Zusätzlich wird nach jeder Fahrt die von Ihnen empfundene Beanspruchung mit der Hilfe von Beurteilungsskalen ermittelt.

Bevor die eigentlichen Versuchsfahrten beginnen, haben Sie jetzt Gelegenheit sich mit dem Simulator vertraut zu machen. Hierzu sollen Sie zunächst ca. 10-15 Minuten lang auf einer einfachen, kurzen Strecke Erfahrung mit dem System sammeln.

**Die weiteren Instruktionen erhalten Sie direkt von der Versuchsleitung.**

### A.2.2 NASA-TLX Studien 3 und 4

**Proband:**

**Fahrt:**

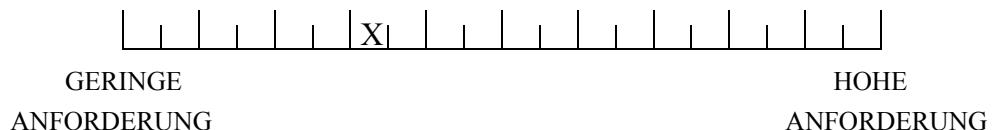
**Datum:**

#### **Durchführung der Bewertung der subjektiven Beanspruchung**

Ihre Erfahrungen während der Simulatorfahrt sollen mit sechs Beurteilungsskalen untersucht werden. Bitte lesen Sie sich die Skalenbeschreibungen und die Skalenbeschriftungen sorgfältig durch. Wenn Sie Fragen zu den Skalen haben, stellen Sie diese bitte der Versuchsleitung. Es ist sehr wichtig, dass Sie die Skalen richtig verstehen.

Bitte bewerten Sie die empfundene Beanspruchung jeder Teilbeanspruchung, indem Sie die Skala an der Stelle markieren, die Ihren Beanspruchungsempfindungen entspricht.

Beispiel:



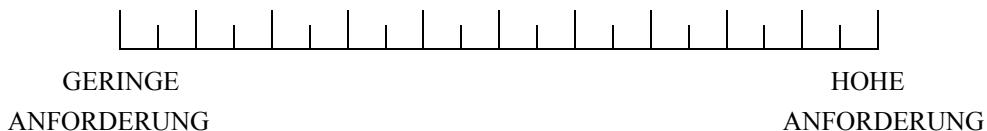
## Beanspruchungshöhe

Bitte kreuzen Sie auf den Skalen an, welche Beanspruchungshöhe Sie durch die Simulatorfahrt in der jeweiligen Teilbeanspruchung empfunden haben.

### **Geistige Anforderung**

Wie viel geistige Anstrengung zur Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung war notwendig (z. B. Denken, Entscheidungen treffen, Erinnern, Hinsehen, Suchen)?

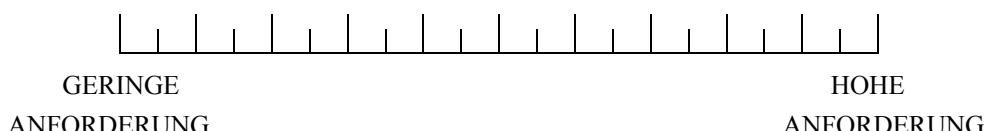
War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex?



### **Visuelle Anforderung**

Wie viel visuelle Anstrengung war erforderlich?

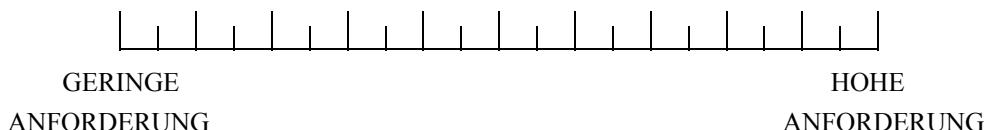
Konnten Sie die notwendigen Informationen leicht und schnell erkennen? Oder mussten Sie sich sehr anstrengen, um die Informationen zu erhalten?



### **Zeitliche Anforderung**

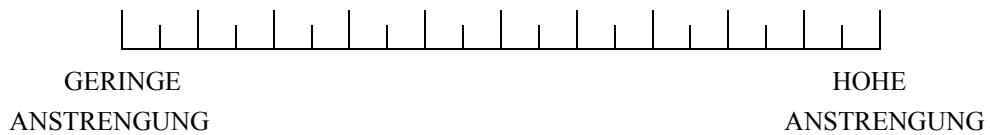
Wie viel Zeitdruck empfanden Sie während der Fahrt?

War die Aufgabe langsam und gemächlich oder schnell und rasant?



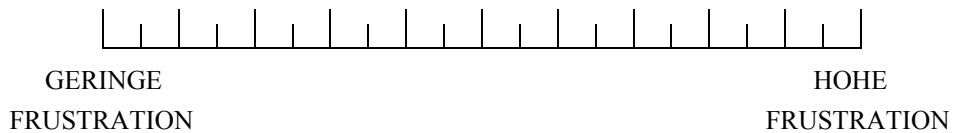
### Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten (mental und visuell), um Ihren Grad der Aufgabenerfüllung zu erreichen?



### Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (im Gegensatz zu sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und selbstzufrieden) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



### Ausführung

⇒ **Bitte beachten Sie die im Gegensatz zu den anderen Teilbeanspruchungen abweichende Skalenbeschriftung!**

Was glauben Sie wie erfolgreich Sie darin waren, die gesetzte Aufgabe zu erfüllen?

Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Ausführung bei der Erfüllung dieser Aufgabe?



## Gewichtung der subjektiven Beanspruchung

Nun erhalten Sie eine Reihe von Begriffspaaren der unterschiedlichen Teilbeanspruchungen, z. B. Anstrengung versus geistige Anforderung, und sollen wählen, welcher dieser Begriffe für Ihre empfundene Beanspruchung in der Fahraufgabe jeweils wichtiger war.

Wenn Sie diese Bewertung durchgeführt haben, können wir mit den Ergebnissen Ihre vorher angegebenen Bewertungen gewichten, um dann ein Gesamtbeanspruchungsmaß zu erhalten. Bitte wählen Sie sorgfältig aus und verwenden Sie die Beanspruchungsbegriffe so, wie Sie sie während ihrer Skalenbewertung verwendet haben. Es gibt keine „richtigen“ oder „falschen“ Antworten, wir sind lediglich an Ihrer Meinung interessiert. Wenn Sie irgendwelche Fragen haben, bitte stellen Sie sie.

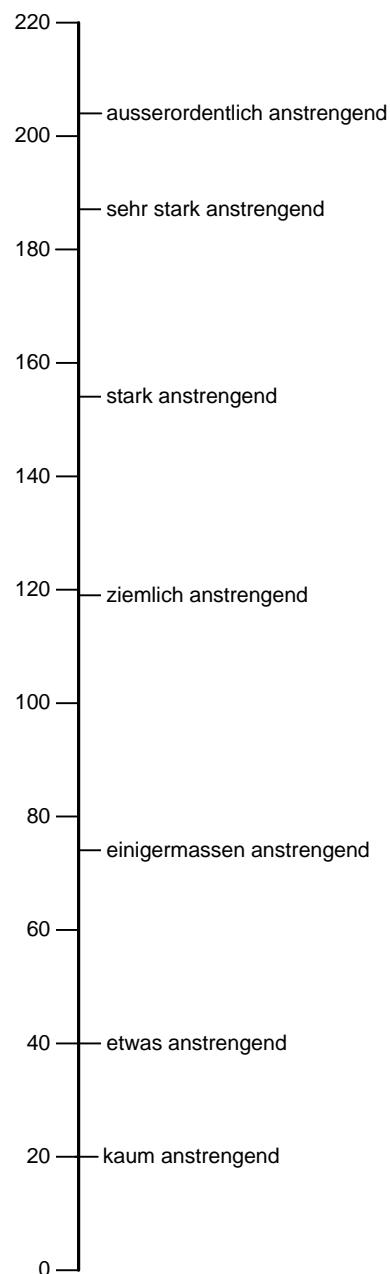
### Vergleich der Beanspruchungsfaktoren

Hier werden jeweils zwei der sechs Beanspruchungen in unterschiedlichen Kombinationen vorgestellt. Wählen Sie bitte die Beanspruchung jedes Paares, die den höheren Anteil an der Gesamtbeanspruchung bei Ihrer Simulatorfahrt ausmacht.

Visuelle Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Geistige Anforderung
Zeitliche Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Geistige Anforderung
Ausführung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Geistige Anforderung
Frustration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Geistige Anforderung
Anstrengung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Geistige Anforderung
Zeitliche Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Visuelle Anforderung
Ausführung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Visuelle Anforderung
Frustration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Visuelle Anforderung
Anstrengung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Visuelle Anforderung
Zeitliche Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ausführung
Zeitliche Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Frustration
Zeitliche Anforderung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Anstrengung
Ausführung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Frustration
Ausführung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Anstrengung
Anstrengung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Frustration

### A.2.3 Anstrengungsskala Studien 3 und 4

Geben Sie bitte auf der untenstehenden senkrechten Linie an (mit einem Kreuzchen oder Strich), wie anstrengend Sie die gerade bearbeitete Aufgabe empfunden haben.



**Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Untersuchung!**

**A.2.4 Fragebogen *Persönliche Angaben* und Instruktion Studie 4****Proband:****Datum:****Persönliche Angaben****Alter:** \_\_\_\_\_ Jahre**Geschlecht:**

- Weiblich  
 Männlich

**Wie lange sind Sie bereits im Besitz Ihres Führerscheins?** \_\_\_\_\_ Jahre**Jährliche Fahrleistung:** \_\_\_\_\_ km**Treiben Sie regelmäßig Sport (mindestens 2 x pro Woche)?**

- Ja  
 Nein

**Konsumieren Sie Medikamente, die Ihren Blutdruck beeinflussen?**

- Ja  
 Nein

**Wenn ja, welche Auswirkung auf Ihren Blutdruck haben die Medikamente?**

- Beruhigend
- Anregend

**Welches Fahrzeug fahren Sie momentan? Marke/Typ:** \_\_\_\_\_

**Sind Sie schon einmal Automatikgetriebe gefahren?**

- Ja
- Nein

**Verfügt Ihr Fahrzeug über ein Display (z. B. ein Navigationsdisplay)?**

- Ja
- Nein

**Wenn ja, wie häufig nutzen Sie dies?**

**Bitte beurteilen Sie Ihre Nutzungshäufigkeit auf der folgenden sechsstufigen Skala:**

gar nicht      sehr häufig

**Haben Sie schon Erfahrungen mit einem Nachtsichtsystem gemacht?** Ja Nein**Wenn ja, welche?**

---

---

---

**Instruktion**

Ziel unserer Untersuchung ist es herauszufinden, wie stark Sie durch eine Fahraufgabe beansprucht werden. Dazu werden Sie eine Versuchsstrecke mit einem PKW fahren. Während der Fahrt wird mit Hilfe eines Biosignal erfassungsgerätes Ihre Beanspruchung gemessen. Zusätzlich wird nach jeder Fahrt die von Ihnen empfundene Beanspruchung mit der Hilfe von Beurteilungsskalen ermittelt.

Bevor die eigentlichen Versuchsfahrten beginnen, haben Sie jetzt Gelegenheit sich mit dem Fahrzeug vertraut zu machen. Hierzu absolvieren Sie eine Übungsfahrt.

**Die weiteren Instruktionen erhalten Sie direkt von der Versuchsleitung.**

**A.2.5 Fragebogen *Nutzung Nachtsichtsystem Studie 4*****Proband:****Datum:****Haben Sie das Nachtsichtsystem während der Fahrt genutzt?**

- Ja
- Nein

**Falls ja, in welchen Situationen?**

- Um Hindernisse besser zu erkennen
- Um den Straßenverlauf besser einsehen zu können
- Um frühzeitig zu erkennen, wann/wo ich abbiegen muss
- Aus Neugierde
- Sonstige: \_\_\_\_\_

**Wie häufig haben Sie das Nachtsichtsystem ungefähr während der Fahrt genutzt?**

- Weniger als 5 Mal
- 5-10 Mal
- Häufiger als 10 Mal

**Wie haben Sie das Nachtsichtsystem während der Fahrt genutzt?**

- Ich musste länger auf das Display schauen, als dies mit meinem üblichen Sicherheitsbedürfnis im normalen Straßenverkehr vereinbar wäre.
- Um genug erkennen zu können, hätte ich länger auf das Display schauen müssen, habe dies aber nicht getan, da es mir zu unsicher erschien.
- Ich hatte keine derartigen Probleme und konnte binnen kürzester Zeit alle für mich relevanten Details auf dem Display erkennen.



# Literaturverzeichnis

- Anderson, J. R. (2000). *Kognitive Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Atteslander, P. (1995). *Methoden der empirischen Sozialforschung*. Berlin: de Gruyter.
- Barham, P., Oxley, P., Ayala, B. (1998). Evaluation of the human factors implications of Jaguar's first prototype near infrared night vision system. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VI* (pp. 177-185). Amsterdam: Elsevier.
- Barham, P., Oxley, P., Thompson, C., Fish, D. & Rio, A. (1999). Jaguar cars' near infrared night vision system – overview of human factors research to date. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VII* (pp. 21-31). Amsterdam: Elsevier.
- Barham, P. (2001). The effect of an infrared vision support system on driver behaviour. In D. Harris (Ed.), *Aerospace and transportation systems. International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 407-413). Aldershot: Ashgate.
- Barschdorff, D. & Bauch, C. (2005). Diagnostics of the human circulatory system: High resolution beat-to-beat measurement of systolic blood pressure using personalized model. *Proceedings 10th IMEKO TC10 International Conference on Technical Diagnostics, Budapest, Hungary, 9-10 June* (pp. 103-108).
- Bartenwerfer, H. (1969). Einige praktische Konsequenzen aus der Aktivierungstheorie. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 16, 195-222.
- Bartmann, A. (1995). *Zur Erfassung von kognitiver Beanspruchung beim Führen von Kraftfahrzeugen – Eine Feldstudie*. Aachen: Shaker Verlag.
- Bauch, C. & Barschdorff, D. (2006). Continuous Blood Pressure Measurements in Stress Situations. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Biosignal Processing and Classification – BPC 2006, Setubal, Portugal, 1-2 August, 2006* (pp. 126-134).
- Belz, J., Höver, N., Mühlenberg, M., Nitsche, B. & Seubert, T. (2004). Fahrerassistenz im Spannungsfeld zwischen Komfort- und Sicherheitsanforderungen. *VDI-Berichte 1864. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* (S. 441-468). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Bengler, K., Praxenthaler, M., Theofanou, D. & Eckstein, L. (2004). Investigation of Visual Demand in Different Simulators within the ADAM Projekt. *DSC 2004* (pp. 91-104). Paris, France, 08.-10. September 2004.
- Bertholomäi, G., Becker, O., Schneider, W. & Walter, W. (1990). Ergonomische Bewertung der Ablesbarkeit digitaler Instrumente bei verschiedenen Lichtverhältnissen. In H. Derkum (Hrsg.), *Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr – Beiträge zur interdisziplinären Diskussion* (S. 153-170). Aachen: Verlag TÜV Rheinland.

- Bielaczek, C. (1999). Die Auswirkung der aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 101 (9), 714-724.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car: A Validation Study. *Human Factors*, 24 (4), 473-486.
- Blana, E. & Golias, J. (1999). Behavioural Validation of a Fixed-Base Simulator. *DSC 1999* (pp. 227-240). Paris, France, 07.-08. Juli 1999.
- Blanco, M., Hankey, J. M. & Dingus, T. A. (2001). Evaluating New Technologies to enhance night vision by looking at detection and recognition distances of non-motorists and objects. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th annual meeting*, 1612-1616.
- Bortz, J. & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation*. Berlin: Springer.
- Boucsein, W. (1988). *Elektrodermale Aktivität: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin: Springer.
- Brookhuis, K. A., de Vries, G. & De Waard, D. (1991). The effects of mobile telephoning on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 23 (4), 309-316.
- Brookhuis, K. A., de Waard, D. & Mulder, B. (1994). Measuring driving performance by car-following in traffic. *Ergonomics*, 37 (3), 427-434.
- Bubb, H. (2002). Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 48, 8-15.
- Bubb, H. (2003a). Komfort und Diskomfort – Definition und Überblick. *Ergonomie Aktuell*, 4, 5-8.
- Bubb, H. (2003b). Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug*, Technische Universität Darmstadt, 3./4. April 2003 (S. 26-39). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Byers, J. C., Bittner, A. C. Jr., & Hill, S. G. (1989). Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary? In: A. Mital (Ed.), *Advances in Industrial Ergonomics and Safety I* (pp. 481-485). London: Taylor & Francis.
- Caplan, S. (1990). Using focus group methodology for ergonomic design. *Ergonomics*, 33 (5), 527-533.
- Carter, C. J. & Laya, O. (1998). Drivers' visual search in a field situation and in a driving simulator. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VI* (pp 21-31). Amsterdam: Elsevier.
- Casali, J. G. & Wierwille, W. W. (1983). A Comparison of Rating Scale, Secondary-Task, Physiological, and Primary-Task Workload Estimation Techniques in a Simulated Flight Task Emphasizing Communications Load. *Human Factors*, 25 (6), 623-641.

- Chanton, O., Sauvage, J., Kassaagi, M., Coratte, J.-F. (2002). Study of Car Loss of Control: a Comparison Between an Experiment on the Dynamic Simulator of Renault and a Test Track Study. *DSC 2002* (pp. 213-225). Paris, France, 11.-13. September 2002.
- Charles River Associates Inc. (1998). *Consumer acceptance of automotive crash avoidance devices – A report of qualitative research*. Interim Report Boston: US Department of Transportation ([http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS\\_TE/5264.pdf](http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/5264.pdf)).
- Cnossen, F., Rothengatter, T. & Meijman, T. (2000). Strategic changes in task performance in simulated car driving as an adaptive response to task demand. *Transportation Research Part F*, 3, 123-140.
- Crundall, D. & Underwood, G. (1997). Concurrent Verbalisation during Drivers' Visual Search and Hazard Perception. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 121-135). Amsterdam: Pergamon.
- Delorme, D. & Marin-Lamellet, C. (1999). Integration of field observation and driving simulator experimentation: an application to the study of drivers' psychological mechanisms. *DSC 1999* (pp. 213-226). Paris, France, 07.-08. Juli 1999.
- De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload*. PhD Thesis, University of Groningen. Haren: University of Groningen, Traffic Research Centre.
- De Waard, D. (1997) & Brookhuis, Karel A. (1997). On The Measurement Of Driver Mental Workload. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 161-171). Amsterdam: Pergamon.
- Dewar, R. E. (1988). In-vehicle information and driver overload. *International journal of vehicle design*, 9, 557-564.
- Diem, C. (2005). *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. München: Utz.
- DIN EN ISO 10075-1 Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeines und Begriffe (2005). In DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), *Anwendung von Ergonomie Normen bei der Gestaltung von Maschinen. DIN Taschenbuch 352*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dingus, T. A., Hulse, M. C., Mollenhauer, M. A., Fleischman, R. N., McGehee, D. V. & Manakkal, N. (1997). Effects of Age, System Experience, and Navigation Technique on Driving with an Advanced Traveler Information System. *Human Factors*, 39 (2), 177-199.
- Duncan, B. (1998). Calibration Trials OF TRL Driving Simulator. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VI* (pp. 105-113). Amsterdam: Elsevier.
- Eilers, K., Nachreiner, F. & Hänecke, K. (1986). Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 40 (12 NF) (4), 215-224.

- Engeln, A. (2003). Qualität und Quantität der Ergebnisse aus Fahrversuchen am Beispiel des Projekts Seneca. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt, 3./4. April 2003* (S. 56-77). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Engeln, A., König, W. & Wittig, T. (2004). Seneca: Evaluation einer Sprachbedienung im Kfz. In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 171-183). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Engström, J., Johansson, E. & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F*, 8, 97-120.
- Ericsson, K. A. & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: verbal reports as data*. Cambridge: A Bradford Book.
- Fairclough, S. & Maternaghan, M. (1993). Changes in drivers' visual behaviour due to the introduction of complex versus simple route navigation information. In D. Brogan, A. G. Gale & K. Carr (Eds.), *Visual Search 2 – Proceedings of the 2nd International Conference on Visual Search* (pp. 419-431). London: Taylor & Francis.
- Färber, B. (1993). Determining information needs of the driver. In A. Parks & S. Franzén (Eds.), *Driving future vehicles*. London: Taylor & Francis.
- Färber, B. & Färber, B. (2004). Mehr Verkehrssicherheit durch intelligente Steuerung von Telematik-Systemen? In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 317-333). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Farmer, E. & Brownson, A. (2003). *Review of Workload measurement, Analysis and Interpretation Methods*. European Organisation for the safety of air navigation ([http://www.eurocontrol.int/integra/gallery/content/public/documents/expt\\_def\\_wp2\\_final.pdf](http://www.eurocontrol.int/integra/gallery/content/public/documents/expt_def_wp2_final.pdf)).
- Fastenmeier, W. (2005). *Das Fahrverhalten in Kreuzungen: Welche Fehler begehen ältere Autofahrer*. Vortrag auf dem deutschen Psychologentag, 10.-12.11.2005 in Potsdam ([http://www.mensch-verkehr-umwelt.de/Downloads%20Alert/bdp2005\\_Fastenmeier.pdf](http://www.mensch-verkehr-umwelt.de/Downloads%20Alert/bdp2005_Fastenmeier.pdf)).
- Felnémenti, A. & Boon-Heckel, U. (1985). Belastungsuntersuchung an Salzburger Busfahrgätern. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 31 (1), 16-21.
- Fengler, U. (1972). *Untersuchung über die physische Belastung von Kraftfahrern durch hohe Geschwindigkeiten*. Unveröffentlichte Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main.
- Föckeler, W. (1988). *Messung und Interpretation individueller Hautwiderstandssignale von Autofahrern*. Unveröffentlichte Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn.
- Frieling, E. & Sonntag, K. (1987). *Lehrbuch Arbeitspsychologie*. Bern: Huber.

- Gale, A. (1997). Drivers' Visual Search of In-Vehicle Infomatic Devices. In T. Rothengatter & E.C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 208-214). Amsterdam: Pergamon.
- Galley, N. (1993). Traffic relevant behavior monitored by the electrooculogram (EOG) as a psychophysical measuring instrument. In A. G. Gale. (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 189-196). Amsterdam: Elsevier.
- Gelau, C., Keinath, A., Baumann, M., Bengler, K. & Krems, J. F. (1999). Die Okklusionsmethode als Verfahren zur Bewertung von visuellen Displaydarstellungen in Kraftfahrzeugen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 53, 41-57.
- Gelau, C. (2004). Fahrerablenkung durch Informations- und Kommunikationssysteme im Fahrzeug: Auswirkungen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit. In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspsychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 297-316). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Gish, K. W., Staplin, L. & Perel, M. (1999). Human factors issues related to use of vision enhancement systems. *Transportation research record* 1694, 1-9.
- Green, P. (1993). *Measures and Methods used to assess the safety and usability of driver information systems* (UMTRI-93-12). Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.
- Gruber, G., Scheuch, K., Reuschel, I., Schreinicke, G., Schmidt, B. & Hentschel, E. (1986). Parameter der akralen Vasomotorik – sensible Beanspruchungsvariablen unter psychischer Belastung. *Zeitschrift für die gesamte innere Medizin und ihre Grenzgebiete*, 41 (6), 177-179.
- Hankins, T. C. & Wilson, G. F. (1998). A Comparison of Heart Rate, Eye Activity, EEG and Subjective Measures of Pilot Mental Workload During Flight. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69 (4), 360-367.
- Hargutt, V. & Krüger, H.-P. (2001). Die Gefahr der Unterforderung? Selbstregulation der Aktivierung in der Fahrsimulation. *VDI-Berichte 1613. Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (S. 33-48). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Harms, L. (1991). Variation in drivers' cognitive load. Effects of driving through village areas and rural junctions. *Ergonomics*, 34, (2), 151-160.
- Harms, L. & Patten, C. (2003). Peripheral detection as a measure of driver distraction. A study of memory-based versus system-based navigation in a built-up area. *Transportation Research Part F*, 6, 23-36.
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Advances in psychology: human mental workload* (pp. 139-183). Amsterdam: Elsevier.

Hatakka, M., Keskinen, E., Katika, A. & Laapotti, S. (1997). Self-Reported Driving Habits Are Valid Predictors Of Violations And Accidents. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 295-303). Amsterdam: Pergamon.

Heck, H., Rost, R. & Hollmann, W. (1984). Normwerte des arteriellen Blutdruckverhaltens während fahrradergometrischer Belastung. In M. Anlauf & K. D. Bock (Hrsg.), *Blutdruck unter körperlicher Belastung* (S. 49-62). Darmstadt: Steinkopff Verlag.

Heinrich, H. C. (1987). Aspekte der visuellen Wahrnehmung im Straßenverkehr. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 33 (1), 42-45.

Helander, M. (1977). Vehicle control and driving experience: A psychophysiological approach. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 23 (1), 6-10.

Helander, M. (1978). Applicability of Drivers' Electrodermal Response to the Design of the Traffic Environment. *Journal of Applied Psychology*, 63 (4), 481-488.

Helander, M. G. & Zhang, L. (1997). Field Studies of comfort und discomfort in sitting. *Ergonomics*, 40 (9), 895-915.

Helander, M. G. (2003). Forget about ergonomics in chair design? Focus on aesthetics and comfort! *Ergonomics*, 46 (13-14), 1306-1319.

Hendy, K. C., Hamilton, K. M. & Landry, L. N. (1993). Measuring Subjective Workload: When Is One Scale Better Than Many? *Human Factors*, 35 (4), 579-601.

Hering, K. (1999). *Situationsabhängiges Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr: Literaturübersicht im Straßenverkehr*. Aachen: Shaker Verlag.

Heß, M. (2005). Bewertung von HMI-Konzepten in der Mercedes-Benz PKW-Entwicklung. *CTI Fachkonferenz Innovative Bedienkonzepte im Fahrzeug-Human-Machine-Interface benutzerfreundlich gestalten, Stuttgart 26.-28.09.2005*.

Hicks, T. G. & Wierwille, W. W. (1979). Comparison of Five Mental Workload Assessment Procedures in a Moving-base Driving Simulator. *Human Factors*, 21 (2), 129-143.

Hill, S., Iavecchia, H. P., Byers, J., Bittner, A. C., Zaklad, A. L. & Christ, R. E. (1992). Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *Human Factors*, 34 (4), 429-439.

Hills, B. L. (1980). Vision, visibility, and perception in driving. *Perception*, 9, 183-216.

Hoedemaeker, M. & Brookhuis, K. A. (1998). Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F, 1*, 95-106.

Hoeppe, E. (2004). Wohin sehen Radfahrer in Knoten? Konfliktpunktwahrnehmung von Radfahrern. In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 281-296). Lengerich: Pabst Science Publishers.

- Hoffmann, S., Krüger, H.-P. & Buld, S. (2003). Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation. *VDI-Berichte 1745, Simulation – Mobilität virtuell gestalten* (S. 385-404). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Hoffmann, S. & Buld, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. *VDI-Berichte 1960, Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsystem* (S. 113-132). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Hogema, J. H., van Arem, B., Smulders, S. A. & Coëmet, M. J. (1997). Modelling Changes In Driving Behaviour: On The Effects Of Autonomous Intelligent Cruise Control. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 238-246). Amsterdam: Pergamon.
- Hollnagel, E. & Källhammer, J.-E. (2003). Effects of a night vision enhancement system (NVES) on driving: Results from a simulator study. *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment Training and Vehicle Design, 2002*. Park City, Utah.
- Illigens, M. (2005). *Psychophysiologische Untersuchungen zur Fahrerbeanspruchung im Kraftfahrzeug*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Wuppertal.
- Jahn, G., Oehme, A., Rösler, D. & Krems, J. F. (2004). *Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerassistenzsystemen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Jahn, G., Oehme, A., Krems, J. F. & Gelau, C. (2005). Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in driving study. *Transportation Research Part F, 8*, 255-275.
- Johanssen, G., Moray, N., Pew, R., Rasmussen, J., Sanders, A. & Wickens, C. (1979). Final Report of Experimental Psychology Group. In N. Moray (1979), *Mental workload. Its Theory and measurement*. Proceedings of the NATO Symposium on Theory and Measurement of Mental Workload (pp. 101-114). New York: Plenum Press.
- Jamson, H. (1999). Curve negotiation in the Leeds Driving Simulator: a validation Study. *DSC 1999* (pp. 241-249). Paris, France, 07.-08. Juli 1999.
- Jordan, P. W. & Johnson, Graham I. (1993). Exploring Mental Workload via TLX: The case of Operating a Car Stereo whilst Driving. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 255-262). Amsterdam: Elsevier.
- Kiefer, R. J. (1995). Human Factors issues surrounding an automotive vision enhancement system. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics society, 39<sup>th</sup> annual meeting, Volume 2. Oktober 9-13, 1995* (1097-1102). San Diego.
- Klapper, S., Kyle, R., Nicklin, R. & Kormos, A. (o. J.). *Night Vision – Changing the Way We Drive*. Raytheon Commercial Electronics.
- Klebelsberg, D. (1982). *Verkehrspychologie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

- Knappe, G., Keinath, A. & Meinecke, C. (2006). Empfehlungen für die Bestimmung der Spurhaltegüte im Kontext der Fahrsimulation. *MMI-Interaktiv*, 11, 3-13, <http://useworld.net>.
- Koornstra, M. (1993). Safety relevance of vision research and theory. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 3-13). Amsterdam: Elsevier.
- Kostka, M., Dahmen-Zimmer, K., Piechulla, W. & Zimmer, A. C. (2001). Fehlerbeobachtung durch Experten. Eine Methode zur Evaluierung von Belastung und Ablenkung des Fahrers. In A. C. Zimmer & K. Lange, K. et al. (Hrsg.), *Experimentelle Psychologie im Spannungsfeld von Grundlagenforschung und Anwendung. Proceedings 43. Tagung experimentell arbeitender Psychologen* (CD-ROM). Regensburg: Universitätsbibliothek ([http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2001\\_kostka\\_fehler.pdf](http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2001_kostka_fehler.pdf)).
- Krems, J. F., Keinath, A., Baumann, M. & Jahn, G. (2004). Die Okklusionsmethode: Ein einfaches und valides Verfahren zur Bewertung der visuellen Beanspruchung zur Bewertung einer Zweitaufgabe? In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 336-349). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Küting, H. J. (1976). *Belastung und Beanspruchung des Kraftfahrers – Literaturübersicht*. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung.
- Lachenmayr, B. J. (1995). *Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr*. Aachen: Shaker.
- Labiale, G. (1996). Complexity of In-car Visual Messages and Drivers' Performances. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles V* (pp. 187-194). Amsterdam: Elsevier.
- Lamnek, S. (1998). *Gruppendiskussion: Theorie und Praxis*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Landau, K., Abendroth, B., Meyer, O. & Ackert, H. (2003). MEPEF – Methoden zur polygraphischen Erfassung des Fahrerverhaltens. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt, 3./4. April 2003* (S. 40-65). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Lansdown, T. C. (1997). Visual Allocation and the Availability of Driver Information. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 215-223). Amsterdam: Pergamon.
- Lansdown, T. C. & Fowkes, M. (1998). An Investigation into the Utility of Various Metrics for the Evaluation of Driver Information Systems. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VI* (pp. 215-224). Amsterdam: Elsevier.
- Lansdown, T. C., Parkes, A. M., Fowkes, M. & Comte, S. (1999). Visual Allocation of Expert and Novice Drivers. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VII* (pp. 393-402). Amsterdam: Elsevier.

- Lansdown, T., Brook-Carter, N. & Kersloot, T. (2004). Distraction from multiple in-vehicle secondary tasks: vehicle performance and mental workload implications. *Ergonomics*, 47 (1), 91-104.
- Lerner, M., Albrecht, M. & Evers, C. (2005). *Das Unfallgeschehen bei Nacht*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 172, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Locher, J. & Völker, S. (2004). The influence of vehicle beam patterns on safety and acceptance. In *Lighting SP 1875* (pp. 227-231). SAE World Congress, Detroit.
- Locher, J., Völker, S., Bierleutgeb, G. & Kleinkes, M. (2003). Night Vision: Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Infrarot-Nachtsichtsysteme. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. *VDI-Berichte 1731. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* (S. 173-183). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Lunenfeld, H. & Stephens, B. W. (1991). Human Factors Considerations in the Development of an IVHS System. In *Institute of Transportation Engineers Sixty-First Annual Meeting, Compendium of technical papers* (pp. 120-124). Washington.
- Lympius, D. (2000). *Kardiovaskuläre Reaktivität bei Ruhe und Belastung am Tage im Vergleich zum Ausmaß der obstruktiven Schlafapnoe*. Unveröffentlichte Dissertation, Philipps-Universität Marburg.
- Macdonald, W. A. & Hoffmann, E. R. (1980). Review of Relationships Between Steering Wheel Reversal Rate and Driving. *Human Factors*, 22 (6), 733-739.
- Mahlke, S., Rösler, D., Seifert, K., Krems, J. F. & Thüring, M. (2007). Evaluation of six night vision enhancement systems: Qualitative und quantitative support for intelligent image processing. *Human Factors*, 49, 518-531.
- Mariani, M. & Andreone, L. (2003). User Requirements and Customer Benefit Analysis in the Design of a Novel Driver Support System for Night Vision. In C. Stephanidis & J. Jacko (Eds.), *Human-Computer Interaction: Theory and Practice (Part II)* (pp. 163-167). Mahway: Erlbaum.
- Manzey, D. (1998). Psychophysiolgie mentaler Beanspruchung. In F. Rösler (Hrsg.), *Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiolgie (Enzyklopädie der Psychologie: Themenbereich C, Theorie und Forschung: Serie 1, Biologische Psychologie; 5 )* (S. 799-864). Göttingen: Hogrefe.
- Martens, M. H. & van Winsum, W. (2000). *Measuring distraction: the peripheral detection task*. Soesterberg: TNO Human Factors (<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/PDF/34.PDF>).
- Mayring, P. (1996). *Einführung in die qualitative Sozialforschung: Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.

- Mayser, C., Piechulla, W., Weiss, K.-E. & König, W. (2003). Driver workload monitoring. In H. Strasser, K. Kluth, H. Rausch & H. Bubb (Eds.), *Quality of Work and Products in Enterprises of the Future. Proceedings of the 50th-Anniversary Conference of the GfA and the XVII Annual ISOES Conference in Munich, 07.-09. Mai 2003* (pp. 41-44). Stuttgart: Ergonomia.
- McLean, J. R. & Hoffmann, E. R. (1975). Steering Reversals as a Measure of Driver Performance and Steering Task Difficulty. *Human Factors*, 17 (3), 248-256.
- Meitzler, T., Lane, K., Bryk, D., Sohn, E. J., Jusela, D., Ebenstein, S. et al. (2001). Eyetracker analysis of fixation points using an IR HUD in an automobile. *International Journal Vehicle Design (Special Issue)*, 26 (4), 374-384.
- Metker, T. (1997). *Visuelle Informationsaufnahme älterer Autofahrerinnen und Autofahrer*. Münster: Lit.
- Mourant, R. R. (1972). Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers. *Human Factors*, 14 (4), 325-335.
- Nääätänen, R. & Summala, H. (1976). *Road-user behavior and traffic accidents*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- Newell, A. & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanism of Skill Acquisition and the Law of Practice. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive Skills and their Acquisition* (pp. 1-55). Hillsdale: Erlbaum.
- Nickel, P., Nachreiner, F., Zdobych, A. & Yanagibori, R. (1998). Zur Beurteilung der psychischen Beanspruchung mit Hilfe der 0,1 Hz-Komponente der Herzfrequenzvariabilität – einige methodische und analysetechnische Probleme. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, 42 (N. F. 16) (4), 205-212.
- Nickel, P., Eilers, K., Seehase, L. & Nachreiner, F. (2002). Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz- und Herzfrequenzvariabilitäts-Maßen als Indikatoren psychischer Beanspruchung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56 (1-2), 22-36.
- Nilsson, L. & Alm, H. (1996). Effects of a vision enhancement system on drivers' ability to drive safely in fog. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles V* (pp. 263-271). Amsterdam: Elsevier.
- Noguchi, Y. (1997). Vehicle Evaluation by measuring physiological reactions: using the HRV index. *Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design*, 4, (2-4), 323-339.
- O'Donell, R. D. & Eggemeier, F. T. (1986). Workload assessment methodology. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance. Volume II, cognitive processes and performance* (pp. 24/1-42/49). New York: Wiley.
- Owens, D. A. & Sivak, M. (1996). Differentiation of Visibility and Alcohol as Contributors to Twilight Road Fatalities. *Human Factors*, 38 (4), 680-689.

- Parks, A. M., Ward, N. J. & Bossi, L. L. M. (1995). The potential of vision enhancement systems to improve driver safety. *The travail humain*, 58, 151-169.
- Pauzié, A. & Pachiaudi, G. (1997). Subjective Evaluation Of The Mental Workload In The Driving Context. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 173-202). Amsterdam: Pergamon.
- Penka, A. (2001). *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. Unveröffentlichte Dissertation, TU München.
- Petit, C., Capparon, S., Roch, H. & Priez, A. (2002). Driver Electrodermal Responses on a Dynamic Driving simulator. *DSC 2002* (pp. 259-267). Paris, France, 11.-13. September 2002.
- Pfafferott, I. & Huguenin, R. D. (1991). Adaptation nach Einführung von Sicherheitsmaßnahmen. Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus einer OECD-Studie. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 37 (1), 71-83.
- Pfendler, C. & Schütte, M. (2002). Untersuchung der Sensitivität des NASA-TLX und NASA-TLX-Zeis bei einer Flugführungsaufgabe. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56, 46-54.
- Piechulla, W., Mayser, C., Gehrke, H. & König, W. (2002). Online-Fahrerbeanspruchungsschätzung. *Proceedings 38. BDP-Kongress für Verkehrspychologie*, 12.-14.09.2002 ([www.walterpiechulla.de/onlinePapers/bdpvp2002\\_PiechullaMayserGehrkeKoenig.pdf](http://www.walterpiechulla.de/onlinePapers/bdpvp2002_PiechullaMayserGehrkeKoenig.pdf)).
- Piechulla, W. (2004). Ambulantes Psychophysiologisches Monitoring im Straßenverkehr. *Symposium Ambulantes Psychophysiologisches Monitoring, Gruppenbeitrag auf dem 44. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (DGPs)*. Göttingen, 26.-30. September 2004.
- Pinto, M., Cavallo, V., Ohlmann, T., Espié, S. & Rogé, J. (2004). The perception of longitudinal accelerations: What factors influence braking manoeuvres in driving simulators? *DSC 2004* (pp. 139-151). Paris, France, 08.-10. September 2004.
- Reed, M. P. & Green, P. A. (1999). Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialling task. *Ergonomics*, 42 (8), 1015-1037.
- Reeves, J., & Stevens, A. (1996). A Practical Method for Comparing Driver Distraction Associated with In-vehicle Equipment. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles V* (pp. 171-178). Amsterdam: Elsevier.
- Reid, G. B., Shingledecker, C. A. & Eggemeier, F. T. (1981). Application of conjoint measurement to workload scale development. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> Annual Meeting of the Human Factors Society*, 522-526.
- Richter, P. & Hacker, W. (1998). *Belastung und Beanspruchung: Stress, Ermüdung und Burn-out im Arbeitsleben*. Heidelberg: Asanger.

Richter, P., Wagner, T., Heger, R. & Weise, G. (1998). Psychophysiological analysis of mental load during driving on rural roads – a quasi-experimental field study. *Ergonomics*, 41 (5), 593-609.

Rockwell, T. H. (1988). Spare visual capacity in driving-revisited: New Empirical Results for an Old Idea. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles II* (pp. 317-324). Amsterdam: North-Holland.

Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38 (10 NF), 193-200.

Rößger, P. (2005). Fahrer-Informations-Systeme: Situationen und Perspektiven. In K. Karrer, B. Gauss & C. Steffens (Hrsg.), *Beiträge zur Mensch-Maschine Systemtechnik aus Forschung und Praxis. Festschrift für Klaus-Peter Timpe* (S. 149-161). Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH.

Rösler, D., Oehme, A., Jahn, G., Baumann, M., & Krems, J. F. (2004). Empirische Methoden zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung. In C. Steffens, M. Thüring & L. Urbas (Hrsg.), *Entwerfen und Gestalten. 5. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (S. 307-321). Düsseldorf: VDI Verlag.

Rudin-Brown, C. M. & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F*, 7, 59-76.

Rumar, K. (1990). The basic error: late detection. *Ergonomics*, 33, 1281-1290.

Rumar, K. (2002). *Night vision enhancement systems: what should they do and what more do we need to know?* (UMTRI-2002-12) Ann Arbor: The University of Michigan Transportation Research Institute.

Rumar, K. (2003). *Infrared Night Vision Systems and Driver Needs*. SAE Technical Paper 2003-01-0293.

Ruspa, C., Scheuchenplug, R. & Quattrocolo, S. (2002). Ergonomic Assessment in Virtual Reality Driving Simulators. *DSC 2002* (pp. 319-328). Paris, France, 11.-13. September 2002.

Sagberg, F., Fosser, S. & Saetermo, I.-A. F. (1997). An Investigation of behavioural adaptation to airbags and antilock brakes among taxi drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 29 (3), 293-302.

Samper, K. & Kuhn, K.-P. (2001). Reduktion des Kraftfahrstoffverbrauchs durch ein vorausschauendes Assistenzsystem. *VDI-Berichte 1613. Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (S. 79-83). Düsseldorf: VDI Verlag.

Schandry, R. (1989). *Lehrbuch Psychophysiologie: körperliche Indikatoren psychischen Geschehens*. München, Weinheim: Psychologie Verlags Union.

- Schellong, F. & Lüderitz, B. (1954). *Regulationsprüfung des Kreislaufes – Funktionelle Differentialdiagnose von Herz- und Gefäßstörungen*. Darmstadt: Verlag von Dr. Dietrich Stein-kopff.
- Schmidke, H. (2002). Vom Sinn und Unsinn der Messung psychischer Belastung und Beanspruchung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56 (1-2), 4-8.
- Schnell, R., Hill, P. & Esser, E. (2005). *Methoden der empirischen Sozialforschung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Schütte, M. (1986). Zusammenstellung von Verfahren zur Ermittlung des subjektiven Beanspruchungserlebens bei informatorischer Belastung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 40 (12 NF) (2), 83-89.
- Schütte, M. (2002). Bestimmung der bedingungsbezogenen Messgenauigkeit der Anstrengungsskala. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56 (1-2), 37-45.
- Schweigert, M., Bubb, H. & Wohlfarter, M. (2005). *Langzeituntersuchung des Blickverhaltens auf Fahrerassistanzanzeigen im Head-Up Display*. Unveröffentlichter Vortrag Tagung „Der Fahrer im 21. Jahrhundert“, Braunschweig, 22.-23.11.2005.
- Sivak, M. (1996). The information the drivers use: is it indeed 90 % visual? *Perception*, 25, 1081-1089.
- Slater, K. (1985). *Human comfort*. Springfield: Charles C Thomas Publisher.
- Sprenger, A. (1993). In-Vehicle Displays: Head-up Display field tests. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 301-309). Amsterdam: Elsevier.
- Stahl, F. & Kleinkes, M. (2005). Eye-Tracking as a method for determining the quality of headlamp light distributions? *ISAL 6th International Symposium on Automotive Lighting* (pp. 912-920). München: Utz.
- Ståhl, A., Oxley, P., Berntman, M., Lind, L. (1995). The use of vision enhancement to assist elderly drivers. In ERTICO (Ed.), *Towards an intelligent transport system – proceedings of the 1. World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, Vol. 5, 30 nov - 3 dec 1994, Paris, France (pp. 1999-2007). Boston: Artech House.
- Stanton, N. A. & Pinto, M. (2000). Behavioural compensation by drivers of a simulator when using a vision enhancement system. *Ergonomics*, 43 (9), 1359-1370.
- Stanton, N. A. & Young, M. S. (1998). Vehicle automation and driving performance. *Ergonomics*, 41, (7), 1014-1028.
- Sullivan, J. M., Bärgman, J., Adachi, G. & Schoettler, B. (2004). *Driver performance and workload using a night vision system* (UMTRI-2004-8). Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.

- Sullivan, J. M. & Flannagan, M. J. (2001). *Characteristics of Pedestrian Risk in Darkness* (UMTRI-2001-33). Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.
- Summala, H., Nieminen, T. & Punto, M. (1996). Maintaining Lane Position with Peripheral Vision during In-Vehicle Tasks. *Human Factors*, 38 (3), 442-451.
- Tsimhoni, O. & Green, P. (2002). *Night Vision Enhancement Systems for Ground Vehicles: The Human Factors Literature* (UMTRI-2002-05). Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.
- Tsimhoni, O., Bärgman, J., Minoda, T. & Flannagan, M. J. (2004). *Pedestrian detection with near and far infrared night vision enhancement* (UMTRI-2004-38). Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.
- Totzke, I., Meilinger, T. & Krüger, H.-P. (2003). Erlernbarkeit von Menüsystmen im Fahrzeug – mehr als "nur" eine Lernkurve. *VDI-Berichte 1768. Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (S. 171-195). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Tyrrell, R. A., Patton, C. W. & Brooks, J. O. (2004). Educational Interventions Successfully Reduce Pedestrians' Overestimates of Their Own Nighttime Visibility. *Human Factors*, 46 (1), 170-182.
- Veltman, J. A. & Gaillard, A. W. K. (1996). Physiological indices of workload in a simulated flight task. *Biological Psychology*, 42, 323-342.
- Verwey, W. B. (1993). How can we prevent overload of the driver? In A. M. Parkes & S. Franzén. (Eds.), *Driving Future Vehicles* (pp. 235-244). London: Taylor & Francis.
- Verwey, W. B. & Veltman, H. A. (1996). Detecting Short Periods of Elevated Workload: A Comparison of Nine Workload Assessment Techniques. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2 (3), 270-285.
- Verwey, W. B. (2000). On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures. *Ergonomics*, 43, (2), 187-209.
- Victor, T. W., Harbluk, J. L. & Engström, J. A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transportation Research Part F*, 8, 167-190.
- Vollrath, M. & Totzke, I. (2000). In-vehicle communication and driving: an attempt to overcome their interference. *Driver Distraction Internet Forum sponsored by the United States Department of Transportation* ([http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2000\\_vollrath\\_totzke\\_In\\_vehicle\\_communication\\_and\\_driving.pdf](http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden/texte/2000_vollrath_totzke_In_vehicle_communication_and_driving.pdf)).
- Weber, T., Plattfaut, C., Kleinkes, M. & Berssenbrügge, J. (2002). Virtual Night Drive. *DSC 2002* (pp. 259-267). Paris, France, 11.-13. September 2002.
- Weilkes, M. (2000). *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystem mittels Simulation*. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbh.

- Weller, G. & Schlag, B. (2004). Verhaltensadaptation nach Einführung von Fahrerassistenzsystemen: Vorstellung eines Modells und Ergebnisse einer Expertenbefragung. In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 351-370). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Wierwille, W. W. & Connor, S. A. (1983). Evaluation of 20 Workload Measures Using a Psychomotor Task in a Moving-Base Aircraft Simulator. *Human Factors*, 25 (1), 1-16.
- Wierwille, W. W., Antin, J. F., Dingus, T. A. & Hulse, M. C. (1988). Visual Attentional Demand of an In-Car Navigation System. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles II* (pp. 307-316). Amsterdam: North-Holland.
- Wierwille, W. W. & Tijerina, L. (1995). Eine Analyse von Unfallberichten als Mittel zur Bestimmung von Problemen, die durch die Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit und der visuellen Belastung innerhalb des Fahrzeugs verursacht werden. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 41 (4) 164-168.
- Wierwille, W. W. & Tijerina, L. (1997). Darstellung des Zusammenhangs zwischen der visuellen Beanspruchung des Fahrers im Fahrzeug und dem Eintreten eines Unfalls. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 43 (2), 67-74.
- Wierwille, W. W. & Tijerina, L. (1998). Modelling the relationship between driver in-vehicle visual demands and accidents occurrence. In A. G. Gale. (Ed.), *Vision in Vehicles VI* (pp. 233-243). Amsterdam: Elsevier.
- Wikman, A.-S., Nieminen, T. & Summala, H. (1998). Driving experience and time-sharing during in-car tasks on roads of different width. *Ergonomics*, 41 (3), 358-372.
- Wilde, G. J. S. & Kunkel, E. (1984). Die begriffliche und empirische Problematik der Risikokompensation! Eine Erwiderung auf Dr. R. D. Huguenin. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 30 (2), 52-61.
- Winner, H., Bartheneier, T., Fecher, N. & Luh, S. (2003). Fahrversuche mit Probanden zur Funktionsbewertung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In K. Landau & H. Winner (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt, 3./4. April 2003* (S. 1-25). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Zijlstra, F. R. H (1993). *Efficiency in Work Behaviour; A Design Approach for Modern Tools*. Delft: Delft University Press.

Zwahlen, H. T., Adams, C. C. & de Bald, D. P. (1988). Safety aspects of CRT touch panel controls on automobiles. In A. G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles II* (pp. 335-344). Amsterdam: North-Holland.

Zhang, L., Helander, M. G. & Drury, C. G. (1996). Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors*, 38 (3), 377-389.