

# Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren

Dipl.-Ing. D. Damböck<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. M. Farid<sup>2</sup>, Dipl.-Sportwiss. L. Tönert<sup>3</sup>, Prof. K. Bengler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, Boltzmannstraße 15, 85747 Garching

<sup>2</sup> BMW Group, Knorrstraße 147, 80788 München

<sup>3</sup> BMW Group Forschung und Technik, Hanauer Straße 46, 80992 München

## Kurzfassung

Der Funktionsumfang moderner Fahrerassistenzsysteme steigt stetig an. Dadurch ist die Erhöhung des Automationsgrades zur Verbesserung der Verkehrssicherheit ein denkbares Entwicklungsszenario. Die Auftrittswahrscheinlichkeit menschlicher Fehler als Unfallursache könnte so verringert werden. Dieses Zukunftsszenario ist mittlerweile angesichts des technischen Fortschritts mehr als reine „Science-Fiction“ und innerhalb bestimmter Systemgrenzen durchaus möglich. Solange jedoch Situationen vorkommen können, die nicht durch das System selbst lösbar sind, muss der Fahrer die Fahraufgabe rechtzeitig und komfortabel übernehmen können. Legt man die Annahme zu Grunde, dass sich Fahrer beim Fahren in hohen Automationszuständen mit tertiären Aufgaben beschäftigen, muss man diesen Aspekt für die Gestaltung solcher Übernahmevorgänge betrachten. Die dann für eine Übernahme benötigte Zeit kann, abhängig von der zu bewältigenden Fahrsituation und des vorhandenen Fahrerzustandes, unterschiedlich lang sein. Es stellt sich also die Frage, zu welchem Zeitpunkt vor dem Erreichen der Systemgrenze der Fahrer zur Übernahme mittels eines Take Over Request (TOR) spätestens aufgefordert werden muss, damit der Übernahmevorgang in einer für den Fahrer komfortablen Art und Weise geschehen kann.

Es wird ein Versuch vorgestellt, der im statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie durchgeführt wurde (N=32,  $\bar{x}$ -Alter 42,5 Jahre, SD=15,8 Jahre). Ziel des Versuches war es, erste Erkenntnisse zu gewinnen, in welchem Zeitbereich vor einer Systemgrenze eine Übernahmeaufforderung zu erfolgen hat. Die Bedingungen sollten dabei eine Aussage für den schwierigsten Fall zulassen. Die Probanden waren während der hochautomatisierten Fahrt durch eine beidhändig auszuführende Nebenaufgabe körperlich, visuell und kognitiv völlig abgelenkt. Alle Versuchspersonen absolvierten eine ca. einstündige Versuchsfahrt wobei Ihnen die Fahraufgabe in weiten Teilen der Strecke durch ein „perfektes“ Assistenzsystem abgenommen wurde. Unter perfekt ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass das System innerhalb seiner Funktionsgrenzen (Führung innerhalb eines gut detektierbaren Fahrstreifens) fehlerfrei arbeitete und jede auftretende Systemgrenze erkennen konnte. In die Strecke eingebaut waren drei Szenarien unterschiedlicher Komplexität. Mittels eines akustischen Signals wurde kurz vor dem Erreichen der Systemgrenze die Fahrerübernahme angefordert. Diese Übernahme musste je nach Situation auf unterschiedlichen Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges [1] bzw. auf den Ebenen des menschlichen Verhaltens nach Rasmussen [2] durchgeführt werden. Zur Identifizierung des Zeitbedarfs für die Übernahme wurde jedes Szenario mit einer TOR-Zeit von jeweils 4s, 6s und 8s bis zum Erreichen der Systemgrenze durchfahren.

## 1 Ausgangssituation: Hochautomatisiertes Fahren

In den vergangenen Jahren haben Hersteller zunehmend Systeme der aktiven Sicherheit in Serienfahrzeuge integriert, die durch aktive Eingriffe in die Fahrzeugregelung gekennzeichnet sind. Man kann dabei von einer Zunahme der Automation im Fahrzeug sprechen. Neben dem Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr ist die Steigerung des Komforts durch Entlastung des Fahrers ein Anwendungsgebiet der steigenden Automation (z.B. ACC S&G). Die Verbreitung und der Grad der Automation nehmen aktuell aus den beiden genannten Gründen tendenziell zu.

Um entscheiden zu können, inwieweit Automation weiteren Zugang in Fahrzeugen findet, ist es notwendig, Erkenntnisse zum Umgang der Fahrer mit verschiedenen Automationsgraden zu sammeln [3], [4]. Dabei sollte man davon ausgehen, dass es trotz der stetigen Entwicklung der Sensorik in absehbarer Zeit immer Szenarien geben kann, an denen die Automation an Grenzen stößt. Solange also Situationen vorkommen können, die durch das System nicht gelöst werden, muss das Fahrzeug die Fahraufgabe rechtzeitig und komfortabel an den Fahrer zurück delegieren. Somit treten die klassischen, aus der Luftfahrt bekannten Automationseffekte [5], [6] auf den Plan.

Die notwendige Übernahmezeit hängt u.a. davon ab, wie lange der Fahrer braucht, sein Umfeld vollständig über Blicke zu erfassen, ein angemessenes Situationsbewusstsein [7] zu erlangen und die Regelung des Fahrzeugs vom System zu übernehmen. Dabei spielen verschiedene Faktoren, wie z.B. die Komplexität der Fahrsituation eine Rolle. Es ist eine Übernahmezeit anzustreben, innerhalb der nicht nur objektiv erfolgreich übernommen werden kann, sondern darüber hinaus die Übernahme als komfortabel wahrgenommen wird. Welche Zeit der Fahrer für derartige Übernahmen benötigt, ist bislang unbekannt. Abbildung 1-1 verdeutlicht den Situationsablauf mit Übergang vom hochautomatisierten zum manuellen Fahren. Es stellt sich also die Frage, zu welchem Zeitpunkt vor dem Erreichen einer Systemgrenze der Fahrer spätestens durch einen Take Over Request (TOR) zur Übernahme aufgefordert werden muss, damit der Übernahmeprozess nicht nur objektiv erfolgreich, sondern auch in einer für den Fahrer komfortablen Art und Weise geschehen kann.

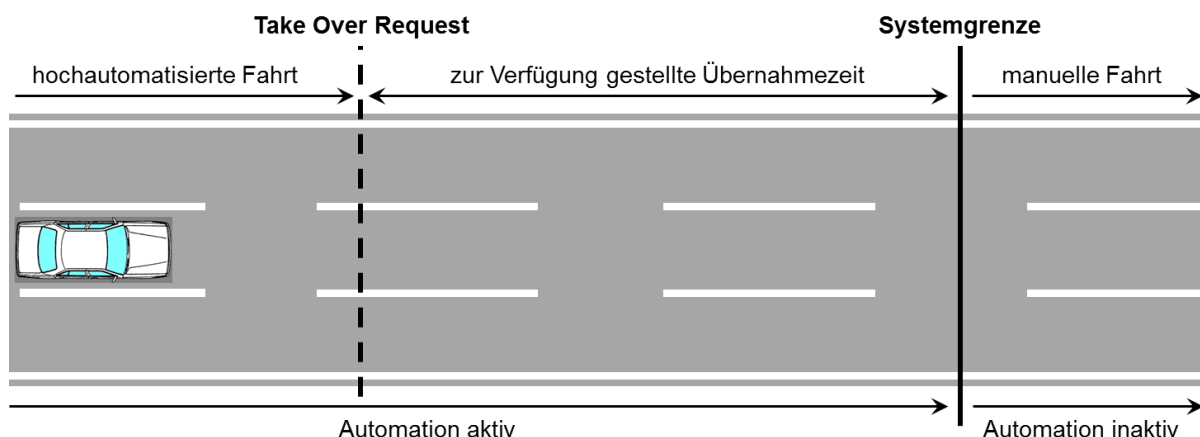


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Ablaufs der Übernahmesituationen

## 2 Ansatz

Um eine Abschätzung von Übernahmezeiten bei hochautomatisiertem Fahren zu erhalten, ist es sinnvoll, den Fahrer maximal aus dem Loop zu nehmen. Dies bedeutet, dass der Fahrer durch geeignete Mittel vollständig von seinen primären Fahraufgaben abgelenkt ist. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die Probanden zur Übernahme lediglich die zur Verfügung stehende Zeit benutzen und die Situation nicht früher erfassen können. Dieser Ansatz wurde in der hier vorgestellten Simulator-Studie mit einer eigens entwickelten Nebenaufgabe verfolgt, um eine erste Aussage über die Mindestzeit für eine sichere und komfortable Übernahme zu erhalten. Betrachtet wurden drei verschiedenen komplexe Prüfzenarien, deren Bewältigung seitens des Fahrers hauptsächlich über die Querführung stattfinden musste. Die Übernahme-situationen wurde darin auf Basis der Ebenen der Fahrzeugführung (Stabilisierung, Führung, Navigation) nach Donges [1] bzw. der menschlichen Verhaltensebenen (wissensbasiert, regelbasiert, fertigkeitbasiert: KRS-Modell) nach Rasmussen [2] kategorisiert.

Einschränkend ist zu beachten, dass eine Verallgemeinerung der gefundenen Übernahmezeit aufgrund methodischer Einschränkungen nicht ohne Validierung in Realfahrten möglich ist. Der Versuch gibt erste Anhaltspunkte für den zeitlichen Rahmen eines primär komfortablen Übernahmeprozess und zeigt dazu einen methodischen Ansatz.

## 3 Methodik

### 3.1 Versuchsaufbau und Probandenkollektiv

Der Versuch wurde im statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie (LfE) der TU München durchgeführt. Als Basis des statischen Simulators dient ein mit der Simulatorumgebung vernetztes BMW 6er Cabrio. Das Fahrzeug ist mit einem simulierten Vier-Gang-Automatikgetriebe ausgestattet. Die Vorderansicht wird über drei in Trapezform angeordnete Leinwände mit einem Sichtbereich von annähernd 180° realisiert. Für die Rückansicht (Innen- und Außenspiegel) findet eine Projektion auf drei Leinwände hinter dem Fahrzeug statt. Die Softwarebasis des Simulators bildet die Simulationsumgebung SILAB™, mit deren Hilfe alle relevanten fahrdynamischen Parameter ausgelesen und aufgezeichnet werden können.

Um den Fahrer maximal aus dem Loop zu nehmen, wurde der Fahrer über eine handlungsregulatorisch möglichst anspruchsvolle Trackingaufgabe abgelenkt (Abbildung 3-1). Dazu wurde ein Laptop auf Höhe des Beifahrersitzes positioniert. Die Nebenaufgabe bestand darin, eine sich zufällig auf dem Bildschirm bewegende Zielscheibe mit einem Fadenkreuz zu verfolgen.



Abbildung 3-1: Darstellung der Nebenaufgabe. Links: Setup im Fahrzeug. Rechts: Zweidimensionaler Trackingtask als Nebenaufgabe

Die Steuerung des Fadenkreuzes erfolgte über einen beidhändig zu bedienenden Spielecontroller. In Übernahmesituationen musste dieser vor dem Gangwahlschalter abgelegt werden. Die Nebenaufgabe wurde kontinuierlich angeboten und war nicht unterbrechbar. Die Probanden wurden instruiert sich während der hochautomatisierten Fahrt vollständig auf die Bearbeitung der Nebenaufgabe zu konzentrieren. Um die Motivation für die Nebenaufgabenbearbeitung zu erhöhen wurde die Versuchspersonenvergütung mit der Leistung in der Nebenaufgabe verknüpft. Durch die Art und Positionierung der Aufgabe sowie die beidhändige Bedienung wurde ein Maximum an Ablenkung erzielt (visuell, mental und körperlich).

Es nahmen 32 Probanden im Alter von 22 bis 73 Jahren an der Simulatoruntersuchung teil. Das Durchschnittsalter der 22 Männer und 10 Frauen betrug 42,5 Jahre (SD=15,8 Jahre). Keiner der Probanden hatte zuvor an Versuchen mit hochautomatisierter Fahrzeugführung teilgenommen.

### **3.2 Automation und Systemgrenzen**

Bei der Automation der Fahraufgabe wurde auf eine am LfE vorhandene Funktion zurückgegriffen. Auf Basis dieser generischen Automation wurde ein hochautomatisiertes System simuliert, das die Längs- wie auch die Querführung innerhalb des aktuellen Fahrstreifens übernahm. Die Funktionalität umfasste dabei eine Regelung der Geschwindigkeit analog eines ACC-Systems mit zusätzlicher Erkennung und Berücksichtigung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. In Querrichtung wurde ein Spurhalteassistent simuliert, welcher das Fahrzeug innerhalb des eigenen Fahrstreifens hielt. Die Führung erfolgte dabei mittenzentriert mit einem V-förmig ansteigenden Lenkmoment, d. h. das System griff korrigierend ein sobald eine Abweichung des Fahrzeugschwerpunktes von der Fahrstreifenmitte auftrat. Die Verfügbarkeit des Systems wurde während der Fahrt über ein Symbol im Kombi-Instrument angezeigt. Das System konnte von den Probanden über eine Taste am Lenkstockhebel eingeschaltet werden.

Um die Übernahmevorgänge speziell an Systemgrenzen untersuchen zu können wurde eine fehler- und ausfallfreie Automation simuliert. Eine Übernahme durch den Fahrer wurde demnach nur aufgrund von Systemgrenzen angefordert. Als Systemgrenzen wurden der Wegfall von Fahrstreifenmarkierungen sowie notwendige Fahrstreifenwechsel (z. B. aufgrund einer sich verengenden Fahrbahn) definiert und implementiert. Auf die konkrete Gestaltung der Systemgrenzen in den Versuchsszenarien wird im folgenden Kapitel eingegangen. Die Automation war in der Lage, diese Grenzen zu erkennen und den Fahrer über ein akustisches Signal, das ihm vertraut war, auf die Notwendigkeit einer Übernahme hinzuweisen. Auch in dieser Hinsicht arbeitete das System fehlerfrei, es wurde jede Grenze erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert. Mit Ausgabe der Übernahmeaufforderung schaltete sich das System nicht ab, sondern regelte bis zum Erreichen der Systemgrenze – nach Ablauf der TOR-Zeit – bzw. bis zur erfolgten Übernahme weiter.

### **3.3 Übernahmeszenarien und Versuchsdesign**

Alle Versuchspersonen absolvierten während des Experiments eine ca. einstündige Versuchsfahrt wobei Ihnen die Fahraufgabe in weiten Teilen der Strecke durch eine Automation abgenommen wurde und sie durch die Nebenaufgabenbearbeitung vollständig abgelenkt waren. In die Strecke eingebaut waren drei Szenarien, in denen das System an seine Grenzen geführt wurde und daher eine Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer anforderte. Diese sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

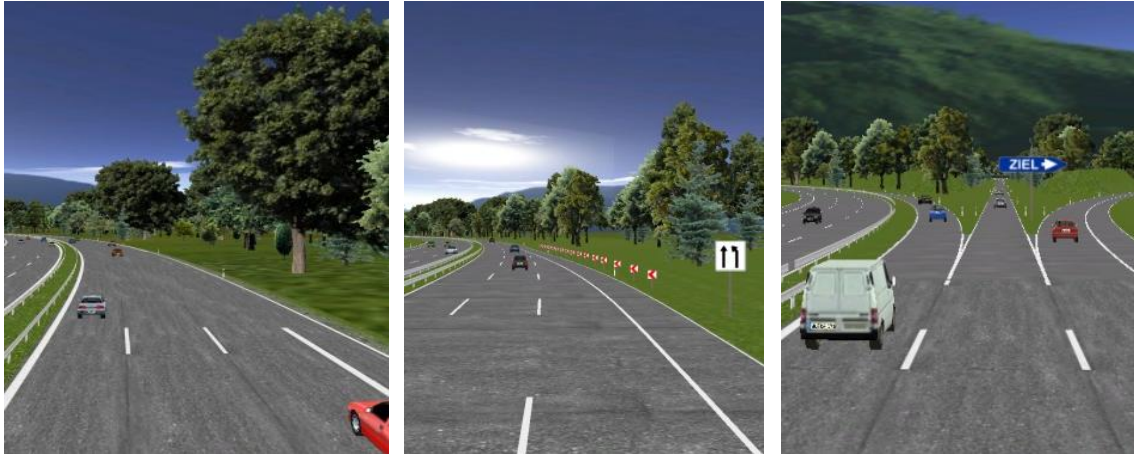


Abbildung 3-2: Darstellung der Übernahmeszenarien. Links: Wegfall der vom System benötigten Fahrstreifenmarkierungen (FBM); Mitte: Fahrstreifenwechsel aufgrund Fahrbahnverengung (FBV); Rechts: Fahrstreifenwechsel mit zusätzlicher Orientierung hinsichtlich des Zielfahrstreifens (über Beschilderung vorgegeben, FBT)

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, musste diese Übernahme je nach Ausprägung des Szenarios auf unterschiedlichen Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges [1] bzw. Ebenen des menschlichen Verhaltens nach Rasmussen [2] erfolgen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Zuordnung der Versuchsszenarien zu den Ebenen der Fahrzeugführung bzw. der Verarbeitungsstufe

	Fertigkeitsbasiert	Regelbasiert	Wissensbasiert
Navigation			Fahrbahnteilung „FBT“
Führung		Fahrbahnverengung „FBV“	
Stabilisierung	Fahrbahnmarkierungen „FBM“		

Im Szenario „Fahrbahnmarkierung“ (FBM) erfolgte eine Übernahmeaufforderung auf der jeweils niedrigsten Ebene der beiden Modelle – fertigkeitstbasiertes Verhalten bzw. Stabilisierungsebene. Ein Wegfall der Fahrbahnmarkierungen auf gesamter Breite der Fahrbahn stellte in diesem Szenario die Systemgrenze dar, die zu einer Kontrollübergabe an den Fahrer führte. Der definierte Ort der Systemgrenze lag auf dem Streckenmeter ab dem keine Fahrstreifenmarkierungen mehr vorhanden waren. Der Streckenabschnitt mit fehlender Markierung lag dabei immer auf einer gekrümmten Fahrbahn, so dass ein Nichteingreifen des Fahrers zum Abdriften führte.

Im Szenario „Fahrbahnverengung“ (FBV) entfiel der eigene (rechte) Fahrstreifen der Autobahn. Der notwendige Fahrstreifenwechsel wurde nicht von der Automation vollzogen, sondern musste vom Fahrer, unter Berücksichtigung der Verkehrsregeln selbst abgesichert und durchgeführt werden. Diese Situation adressierte das regelbasierte Verhalten bzw. die Führungsebene. Die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen betrug 4 Sekunden, um ein sicheres Einscheren zu gewährleisten. Der exakte Ort der Systemgrenze wurde in diesem Szenario definiert als der Streckenmeter, ab dem das Fahrzeug nicht mehr in voller Breite in den sich verengenden Fahrstreifen passte.

Die jeweils höchste Ebene der beiden theoretischen Modelle – wissensbasiertes Verhalten bzw. die Navigationsebene – wurde durch das Szenario „Fahrbahnteilung“ (FBT) repräsentiert.

tiert. Die Fahrbahn teilte sich hier in drei separate Fahrstreifen auf. Auf dem mittleren Fahrstreifen ankommend, wurden die Probanden über eine Beschilderung angewiesen, entweder dem linken oder dem rechten Fahrstreifen weiter zu folgen. Nach der Übernahmeaufforderung mussten die Probanden demnach entscheiden in welche Richtung der Fahrstreifenwechsel zu erfolgen hatte, bevor Sie das eigentliche Manöver ausführen konnten. Auch in diesem Szenario betrug die Zeitlücke zum Einscheren in den Fremdverkehr 4 Sekunden. Der Streckenmeter, ab dem die einzelnen Fahrstreifen von durchgehenden Fahrstreifenbegrenzungen getrennt wurden, wurde als Ort der Systemgrenze definiert.

Nach einer Instruktion zum Fahrsimulator, zur Automation und zur Nebenaufgabe fuhren die Probanden eine zehn-minütige Eingewöhnungsfahrt mit dem Ziel, Lerneffekten während der späteren Messfahrten vorzubeugen. Der Versuch teilte sich in 2 Messfahrten von jeweils ca. 30 Minuten Dauer. Vor jeder Messfahrt wurden die Probanden instruiert, der Beschilderung zu folgen und Fahrstreifenwechsel wie in der Realität abzusichern. Um die Absicherung mit Blicken auch während der Fahrt in Erinnerung zu rufen und um zu verdeutlichen, dass der Spurwechsel nicht immer automatisch bei einer Übernahmeaufforderung eine sichere Handlungsalternative war, wurde zur Hälfte jeder Messfahrt eine Übernahmesituation integriert, in der ein Fahrstreifenwechsel zwar sinnvoll und vom Fahrer gewünscht, aufgrund eines besetzten Zielfahrstreifens aber nicht möglich war.

Während des eigentlichen Versuches durchfuhren die Probanden jedes Szenario mit jeweils drei unterschiedlichen TOR-Zeiten (unabhängige Variable). Der Hinweis auf eine erforderliche Übernahme erfolgte über ein unspezifisches, auditives Signal jeweils mit 4, 6 bzw. 8 Sekunden Abstand zum definierten Ort der Systemgrenze. Die Geschwindigkeit im Moment der Übernahmeaufforderung betrug 100 km/h. Im Anschluss an jede Übernahmesituation wurden die Probanden angewiesen, die Automation wieder in Betrieb zu nehmen und sich mit der Nebenaufgabe zu beschäftigen. Um sicherzustellen, dass sich jede Situation für die Probanden korrekt darstellte, wurden sie hinsichtlich der Wahl des zu befahrenden Fahrstreifens instruiert. Der Zeitraum der automatisierten Fahrt zwischen den einzelnen Situationen betrug 4 Minuten um sicherzustellen, dass sich die Probanden wieder auf die Nebenaufgabe konzentrieren konnten. Als Baselinemessung wurde jedes der drei Szenarien zusätzlich manuell (ohne Ablenkung, ohne Assistenz) durchfahren. Die Reihenfolge der Szenarien, die TOR-Zeiten sowie die Richtung der Fahrstreifenwechsel bei FBT wurden permutiert.

### **3.4 Kriterien für eine erfolgreiche und komfortable Übernahme**

Die Bewertung der Übernahmezeiten erfolgte durch die Auswertung objektiver sowie subjektiver Daten. Der objektive Erfolg bzw. Misserfolg in den einzelnen Situationen wurde anhand der im Folgenden beschriebenen und in Tabelle 3-2 zusammengefassten Pass-/ Fail-Kriterien beurteilt. Je nach Szenario konnten diese Kriterien unterschiedlich definiert sein.

Das Szenario FBM galt als erfolgreich abgeschlossen, wenn das Ego-Fahrzeug innerhalb des gedachten Fahrstreifens gehalten wurde und demzufolge nicht mit dem umgebenden Verkehr kollidierte. Im Szenario FBV war der Beginn des Fahrstreifenwechsels maßgeblich für die Bewertung. Lag der Manöverbeginn vor dem Punkt, an dem das Fahrzeug nicht mehr in voller Breite in den sich verengenden Fahrstreifen passte, wurde die Situation als erfolgreich gewertet. Wurde bis zu diesem Punkt kein Fahrstreifenwechsel eingeleitet bedeutete dies ein Überfahren der Fahrbahnbegrenzung hin zum Standstreifen und damit einen definierten Fehler. Das Manöver wurde als begonnen gewertet, sobald die Außenkante des Fahrzeugs die Leitlinie überschritten hatte. Das Pass-Kriterium für das Szenario FBT war ein

vollständig abgeschlossener Wechsel auf den vorgegebenen Zielfahrstreifen. Dazu musste sich das Ego-Fahrzeug bereits in voller Breite auf dem Zielfahrstreifen befinden, bevor die durchgezogenen Fahrstreifenbegrenzungen begannen. Bezüglich der Manöverausführung konnten in diesem Szenario drei unterschiedliche Fehler auftreten. Neben einem verspäteten Manöver, d. h. einem Überfahren der Fahrstreifenbegrenzungen konnte der Fahrstreifenwechsel in die falsche Richtung erfolgen oder ganz ausgelassen werden. Bei letzterem führen die Probanden auf dem vor der Übernahmeaufforderung aktuellen Fahrstreifen geradeaus durch die Situation.

*Tabelle 3-2: Pass-/Fail-Kriterien der einzelnen Szenarien sowie mögliche Fehler in der Manöverausführung*

	Aufgabe	Pass-Kriterium	mögliche Fehler
FBM	Stabilisierung des Fahrzeugs entlang der Straße	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Kollisionen mit umgebendem Verkehr.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kollisionen mit umgebendem Verkehr</li> </ul>
FBV	Fahrstreifenwechsel auf die Nebenspur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rechtzeitiger Beginn des Fahrstreifenwechsels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ausgelassener Fahrstreifenwechsel</li> <li>verspäteter Beginn des Fahrstreifenwechsels</li> </ul>
FBT	Fahrstreifenwechsel in eine, von einem Straßenschild vorgegebene Richtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>rechtzeitiger Abschluss des Fahrstreifenwechsels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ausgelassener Fahrstreifenwechsel</li> <li>verspäteter Abschluss des Fahrstreifenwechsels</li> <li>Fahrstreifenwechsel in falsche Richtung</li> </ul>

Das subjektive Komfortempfinden wurde über Befragungen der Testpersonen aufgenommen. Dazu wurden die Probanden im unmittelbaren Anschluss an jede Übernahme-situation per Gegensprechanlage gebeten, die soeben erlebte Übernahme auf einer siebenstufigen Skala von stressig (-3) bis komfortabel (+3) zu bewerten.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Objektive Bewertung – Aufgabenbewältigung

Die objektive Bewertung der Übernahme hinsichtlich harter Pass-/Fail-Kriterien erfolgte anhand der Häufigkeiten auftretender Fehler. Für die Auswertung der Aufgabenerfüllung wurde der Q-Test nach Cochran verwendet, wobei die einzelnen TOR-Zeiten unter Anwendung einer  $\alpha$ -Fehler-Korrektur (Bonferroni) paarweise miteinander verglichen wurden.

Im Szenario FBM zeigt sich, dass die Übernahme der Fahrzeugführung auf der Stabilisierungsebene unabhängig von der zur Verfügung stehenden Übernahmezeit sehr einfach zu erfüllen war. Alle 32 Probanden absolvierten das Szenario FBM in allen zur Verfügung stehenden TOR-Zeiten erfolgreich. Für die im Versuch simulierte Übernahme auf der Stabilisierungsebene und damit einer Anwendung fertigkeit-basierter Verhaltens waren demnach – selbst ausgehend von maximaler Ablenkung – bereits 4 Sekunden Übernahmezeit ausreichend. Dies ist darauf zurück zu führen, dass auf dieser Ebene der Fahrzeugführung nur geringe Anforderungen an Denken, Entscheiden und Handeln gestellt werden.

Anders stellen sich die Szenarien FBV und FBT mit einer Übernahme der Fahraufgabe auf der Führungs- bzw. Navigationsebene dar. Abbildung 4-1 zeigt die aufsummierten Fehler in den beiden Szenarien in Abhängigkeit von der TOR-Zeit.

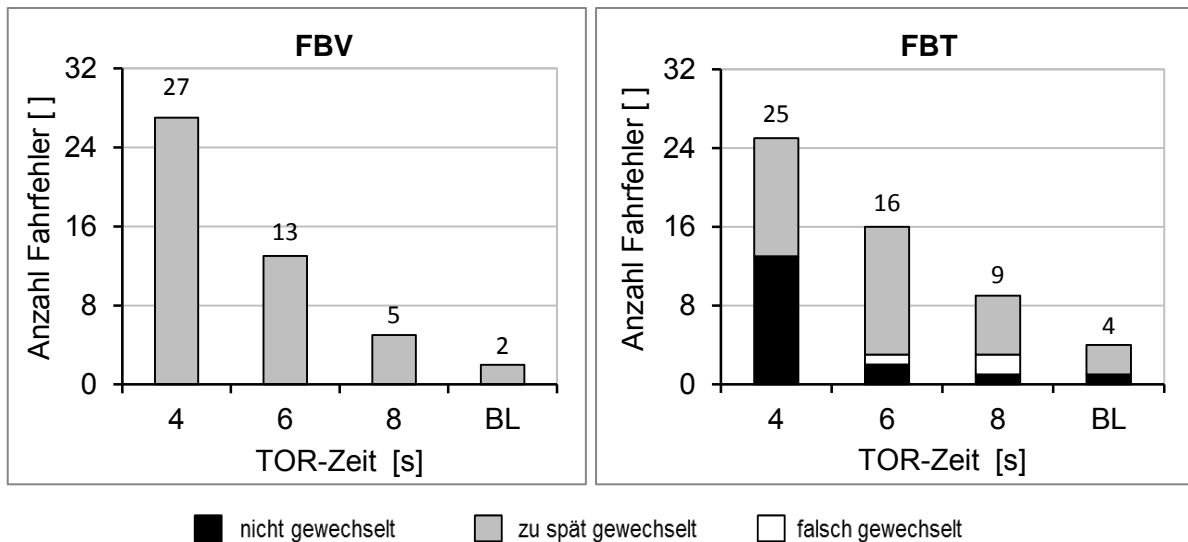


Abbildung 4-1: Anzahl der Versuchspersonen mit Fehler bei der Aufgabenerfüllung in Abhängigkeit von der TOR-Zeit bzw. bei der Baselinefahrt. Links (FBV, N=32): zu spät eingeleiteter Fahrstreifenwechsel. Rechts (FBT, N=32): Fahrstreifenwechsel ausgelassen, zu spät oder in die falsche Richtung.

Sowohl im Szenario FBV ( $Q(3) = 45.42$ ,  $p < .001$ ) wie auch im Szenario FBT ( $Q(3) = 36.91$ ,  $p < .001$ ) nimmt die Gesamtanzahl der Fehler mit zunehmender TOR-Zeit signifikant ab. In beiden Szenarien zeigt der Einzelvergleich der TOR-Zeiten mit der manuellen Fahrt, dass bei 4 Sekunden (FBV:  $Q(1) = 23.15$ ,  $p < .001$ ; FBT:  $Q(1) = 17.64$ ,  $p < .001$ ) wie auch bei 6 Sekunden (FBV:  $Q(1) = 9.31$ ,  $p = .014$ ; FBT:  $Q(1) = 8.00$ ,  $p = .028$ ) noch signifikante Unterschiede in der Situationsbewältigung bestehen. Bei diesen Zeiten werden verglichen mit der Baselinefahrt mehr Fehler gemacht. Erst bei einer TOR-Zeit von 8 Sekunden ist kein signifikanter Unterschied mehr zwischen der manuellen Fahrt und der hochautomatisierten Fahrt nachzuweisen (FBV:  $Q(1) = 1.29$ ,  $p < 1.000$ ; FBT:  $Q(1) = 3.57$ ,  $p < .353$ ). Betrachtet man die angelegten, konservativen Fail-Kriterien, wird unter den gegebenen Versuchsbedingungen für die Übernahme der Fahraufgabe auf der Navigationsebene, wie auch für die Übernahme auf der Führungsebene eine Zeit von 8 Sekunden benötigt, um vergleichbare Leistungen wie in der manuellen Fahrt zu erreichen. Hier zeigt sich die Wichtigkeit des gewählten Kriteriums für die Einschätzung der Ergebnisse. Bei Annahme eines kollisionsorientierten Fail-Kriteriums wie Tönert [8] es vorschlägt, würde ein zu später Fahrstreifenwechsel als Fail-Kriterium ausscheiden, wenn dadurch keine Kollision verursacht würde. Folgt man also der Annahme, dass die Überschreitung der Spurmarkierung kein geeignetes Fail-Kriterium darstellt, so verkürzt sich die TOR-Zeit, mit der eine sichere Übernahme noch möglich ist. Betrachtet man z. B. im Szenario FBT ausschließlich die Tatsache, ob ein Fahrstreifenwechsel in die richtige Richtung ausgeführt wurde, zeigt sich nur bei einer TOR-Zeit von 4 Sekunden ein signifikanter Unterschied ( $Q(1) = 10.29$ ,  $p = .008$ ) zur Baselinefahrt. Bei einer TOR-Zeit von 6 Sekunden ( $Q(1) = 1.00$ ,  $p > .999$ ) bzw. 8 Sekunden ( $Q(1) = 1.00$ ,  $p > .999$ ) hingegen nicht mehr. Entsprechend der obigen Ergebnisse sind auch die von den einzelnen Probanden gefahrenen Trajektorien abhängig von der TOR-Zeit (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3).



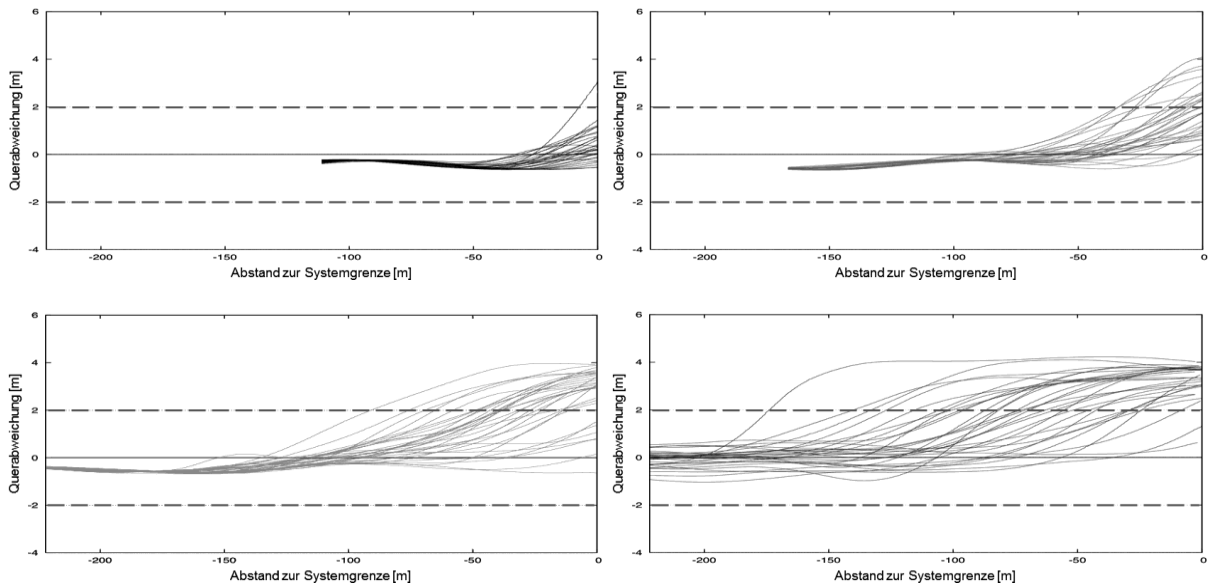


Abbildung 4-2: Von der Übernahmeaufforderung bis zur Systemgrenze gefahrene Trajektorie der einzelnen Probanden bei FBV (N=32). Von links oben nach rechts unten: TOR-Zeiten 4, 6, 8 Sekunden und die Baselinefahrt

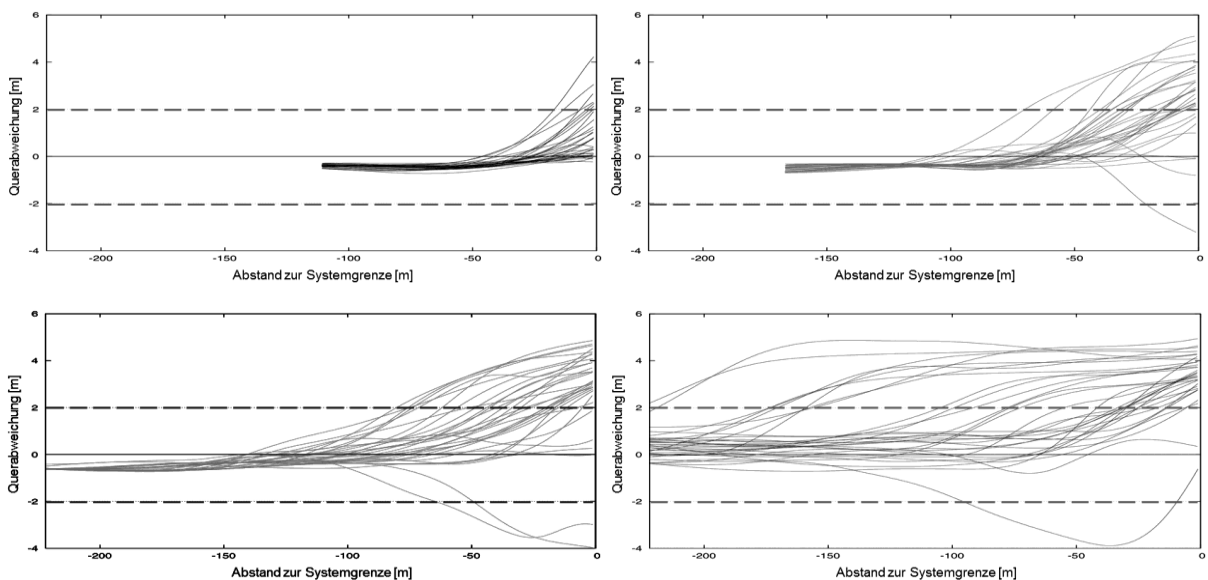


Abbildung 4-3: Von der Übernahmeaufforderung bis zur Systemgrenze gefahrene Trajektorie der einzelnen Probanden bei FBT (N=32). Von links oben nach rechts unten: TOR-Zeiten 4, 6, 8 Sekunden und die Baselinefahrt

## 4.2 Subjektive Bewertung - Komfortempfinden

Für die Auswertung subjektiven Komfortempfindens wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen verwendet. Die Post-Hoc-Tests der einzelnen Faktorstufen wurden unter Anwendung einer  $\alpha$ -Fehler-Korrektur (Bonferroni) durchgeführt. Die Ergebnisse der Befragung zum subjektiven Komfortempfinden, sind in Abbildung 4-4 dargestellt. Das Diagramm zeigt das mittlere Komfortempfinden der 32 Probanden in Abhängigkeit von den beiden Faktoren Szenario und TOR-Zeit. Beide Faktoren haben einen signifikanten Einfluss auf das Komfortempfinden; Szenario:  $F(2, 62) = 66.230$ ,  $p < .001$ ; TOR-Zeit:  $F(2, 62) = 27.660$ ,  $p < .001$ .

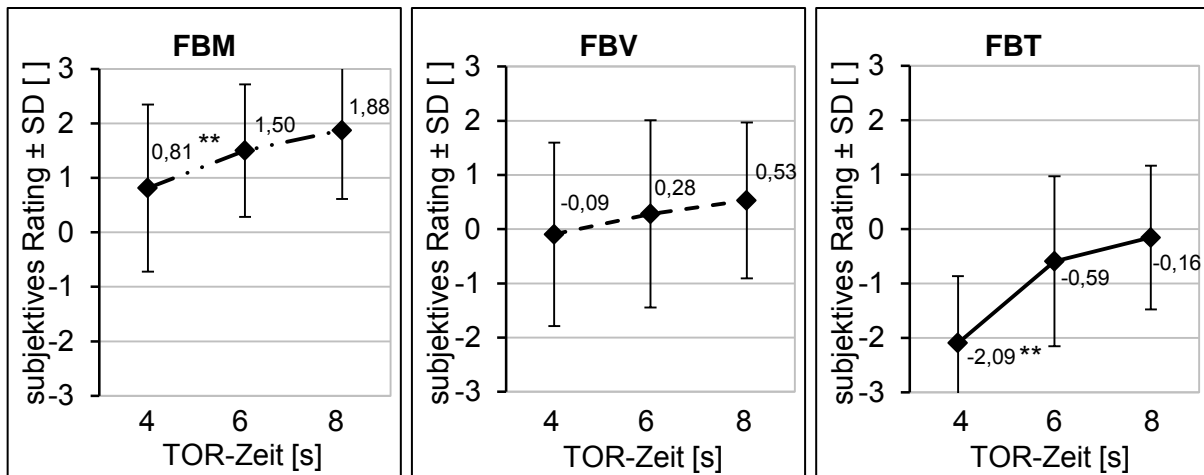


Abbildung 4-4: Subjektives Komfortempfinden von stressig (-3) bis komfortabel (+3) in den unterschiedlichen Szenarien in Abhängigkeit von den TOR-Zeiten (N = 32)

Für den Faktor „Szenario“ zeigen Post-Hoc-Tests, dass sich die einzelnen Szenarien FBM, FBV und FBT signifikant voneinander unterscheiden (jeweils  $p < .001$ ). Die Übernahme aus der automatisierten Fahrt und völliger Ablenkung heraus wird demnach unkomfortabler eingeschätzt, je höher die Ebene der Fahrzeugführung ist, auf der übernommen werden muss, bzw. je komplexer das dafür notwendige Verhalten ist.

Der Faktor „TOR-Zeit“ wirkt sich in den Szenarien FBM ( $F(2, 62) = 26.750, p < .001$ ) und FBT ( $F(2, 62) = 10.652, p < .001$ ) auf das subjektive Komfortempfinden aus. Verglichen mit der kürzesten Übernahmezeit von 4 Sekunden zeigen Post-Hoc-Tests in beiden Szenarien eine komfortablere Bewertung bei 6 Sekunden (FBM:  $p = .019$ ; FBT:  $p < .001$ ). Eine Komfortsteigerung durch Erhöhung der Übernahmezeit von 6 Sekunden auf 8 Sekunden kann sowohl bei FBM ( $p = .189$ ) wie auch bei FBT ( $p = .508$ ) nicht mehr nachgewiesen werden. Im Szenario FBV ist ein Einfluss der TOR-Zeit auf das Komfortempfinden nicht nachzuweisen ( $F(2, 62) = 2.038, p < .139$ ).

Die Interaktion Szenario x TOR-Zeit übt einen signifikanten Effekt auf das Komfortempfinden aus ( $F(4, 124) = 3.642, p = .008$ ). Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass im Szenario FBT die TOR-Zeit von 4 Sekunden im Verhältnis zu den anderen Szenarien nochmals deutlich schlechter bewertet wird. Im Sinne des SRK-Modells und der Ebenen der Fahrzeugführung bedeutet dies, dass sich in komplexeren Situationen kürzere TOR-Zeiten mehr auf das subjektive Empfinden auswirken als in einfacheren Situationen.

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Wie bereits eingangs erwähnt, trifft diese Arbeit keine pauschale Aussage für Realverkehrssituationen bezüglich der gefundenen Übernahmezeit. Der Versuch wurde in einem statischen Fahrsimulator unter Einsatz künstlicher „most-difficult-case“ Szenarien durchgeführt, in denen sich der Fahrer völlig aus der Fahraufgabe zurückzieht. Es ist fraglich, inwiefern dies in einem echten Fahrzeug – selbst beim hochautomatisierten Fahren – mit realem Gefährdungspotential tatsächlich der Fall wäre. Zudem wurden die Probanden zu Beginn des Versuches angewiesen, die Übernahme für sich möglichst komfortabel zu gestalten und Notfallmanöver zu vermeiden. Da der gesamte Versuch darauf ausgelegt war, die für eine komfortable Übernahme notwendigen Zeiten zu messen, ist also damit zu rechnen, dass der Mensch potentiell in der Lage wäre, den Übernahmeprozess schneller durchzuführen. Diese

Annahme ist in künftigen Studien zu überprüfen. Die in diesem Versuch gemessenen Zeiten spiegeln also nicht den Zeitraum wider, den der Fahrer für die Übernahme benötigt, sondern den Zeitraum, den sich der Fahrer für die Übernahme nehmen möchte. Somit liefert der Versuch erste Anhaltspunkte über den zeitlichen Rahmen eines *komfortablen* Übernahme-Prozesses unter Berücksichtigung von Controllability-Aspekten.

### **5.1 Ableitungen aus den objektive Daten**

In den objektiven Daten zeigt sich, dass im einfachsten Szenario bei Übernahme auf Stabilisierungsebene mit einer TOR-Zeit von 4 Sekunden eine fehlerfreie Übernahme problemlos ausgeführt wird. Handlungsregulatorisch anspruchsvoller sind hingegen die Spurwechsel-Szenarien, was sich in nun auftretenden Verhaltensfehlern sowohl beim manuellen durchfahren als auch aus der hochautomatisierten Fahrt heraus zeigt. Hier differenzieren zudem die TOR-Zeiten deutlich die Verhaltensleistungen. Im Szenario FBV führt die Verengung des Fahrstreifens zu einem notwendigen Spurwechsel unter Berücksichtigung des Fremdverkehrs, wohingegen der Fahrer im Szenario FBT die Wahl zwischen 3 Fahrspuren hat, und seine Entscheidung auf der möglichst vollständigen Erfassung aller relevanten Informationen aus seiner Umgebung basiert. Hierzu zählen neben den regelbasierten Entscheidungen auch die Orientierungen auf der Navigationsebene, wie sie in Realität bei der Entscheidung für einen Fahrstreifen am Autobahnkreuz oder vor Straßenkreuzungen vorkommen (wenn auch die konkrete Ausprägung des Szenarios in Realität so nicht vorkommt). Im Extremfall könnten dies auch Stauenden oder Hindernisse auf der Fahrbahn sein. Verglichen mit dem manuellen Durchfahren der beiden Situationen erreichen Fahrer erst mit einer TOR-Zeit von 8 Sekunden gleiche Leistungen. Nimmt man jedoch an, dass nach Toenert et. al [8] ein Überfahren von Spurmarkierungen aus Fahrersicht unkritisch ist, zeigt sich ein etwas anderes Bild. So erklärt sich beispielsweise das Verhalten der Fahrer, die am Autobahnkreuz die Spurmarkierungen überfahren, den Spurwechsel aber noch durchführten, obwohl die instruierte und regelkonforme Wahl das Verbleiben in der eigenen Spur gewesen wäre. Dieses Verhalten zeigten auch 3 der 32 Fahrer beim manuellen durchfahren der Situation. Wertet man die Daten also unter der Annahme aus, dass nur ausgelassene und in die falsche Richtung ausgeführte Fahrstreifenwechsel ein Fail-Kriterium darstellen, so beherrschen die Fahrer den Wechsel auch noch mit einer TOR-Zeit von 6 Sekunden. Erst bei einer TOR-Zeit von 4 Sekunden häufen sich die ausgelassenen Spurwechsel dann signifikant.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zum jetzigen Zeitpunkt nicht klar ist, ob sich Fahrer auch im hochautomatisierten Zustand derart stark aus dem Fahrgeschehen zurückziehen, so wie dies in dieser Untersuchung gezwungener Maßen der Fall war. Daher ist eine TOR-Zeit von 8 Sekunden im Sinne einer sicheren Bereinigung der dargestellten Situationen kein endgültiger minimaler Wert. Eine Verbesserung der Verhaltensleistung mit noch größerer Übernahmezeit ist jedoch nicht zu erwarten. Von diesem Ergebnis ausgehend, müssen verschiedene Szenarien mit verschiedenen TOR-Zeiten berücksichtigt werden, um sinnvolle Systemanforderungen abzuleiten zu können.

### **5.2 Ableitungen aus den subjektiven Daten**

Für die subjektiven Daten zeigt sich ein ähnliches Bild. Komplexere Situationen werden zunehmend als unkomfortabler empfunden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn auf wissensbasierter Ebene ein Fülle von Informationen zu berücksichtigen sind. Dann sinkt mit geringer werdenden Übernahmezeiten das Komfortempfinden besonders stark. Gerade der Abfall des Komfortempfindens von einer TOR-Zeit von 6 Sekunden auf 4 Sekunden ist deut-

lich. Ein Komfortgewinn durch eine Verlängerung der TOR-Zeit auf 8 Sekunden ist jedoch nicht zu finden. Eine Übernahmezeit von 6 Sekunden wird also nicht bedeutend weniger komfortabel empfunden, als dies bei 8 Sekunden Übernahmezeit der Fall ist. Diese Wertung scheint von der jeweiligen Situation abzuhängen. Unterschiedliche Übernahmezeiten haben in manchen Situationen möglicherweise kaum noch Einfluss auf das grundsätzliche Komfortempfinden der Situation selbst. Dies könnte auch die Bewertung für das Szenario der Fahrbahnverengung erklären, in dem sich der vermutete Zeit-Effekt nicht nachweisen ließ. Das zu späte Wechseln von 27 der 32 Fahrer bei 4 Sekunden Übernahmezeit führte nicht zu einer Kollision mit der Leitplanke oder Pylonen im weiteren Fahrbahnverlauf. Den Umständen entsprechend, war die Bereinigung der Situation nie kritisch genug, um sich deutlicher auf das Komfortempfinden auszuwirken.

Auf Basis des Szenarios der Fahrbahnteilung kann nun diskutiert werden, in wie fern ein absoluter Grenzwert gefunden werden kann, der auf der angewendeten Komfortempfindens-Skala für den Fahrer akzeptabel ist. Dieser könnte beispielsweise auf dem Nulldurchgang liegen. Für Szenarien wie das der Fahrbahnteilung führen die vielen Freiheitsgrade in einem Entscheidungsprozess eher zu einer durchweg stressigeren als komfortablen Wertung. Auf dieser Basis kann ein absoluter Grenzwert für den empfundenen Komfort keine Aussagekraft mehr bezüglich der gesuchten TOR-Zeit haben. Viel bedeutender ist also die in dieser Arbeit vorgenommene Relativbewertung, aus der ein Grenzwert von mindestens 6 Sekunden Übernahmezeit aus Komfortsicht abgeleitet werden kann. Ob eine Übernahme mit einer TOR-Zeit von 6 Sekunden ähnlich komfortabel wahrgenommen wird, wie das Erleben der Situation bei manueller Fahrt, müssen weitere Untersuchungen zeigen, die das Ziel verfolgen, Aussagen zum Komfortgewinn während hochautomatisierter Fahrt zu erhalten.

## 6 Literatur

- [1] Donges, E.: *Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. In: *Automobil-Industrie Nr. 2*, S. 183-190, 1982.
- [2] Rasmussen, J.: *Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models*, in: *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics, Volume SMC-13, No. 3, May/June 1983*, pp. 257-266.
- [3] Schieben, A.; Damböck, D.; Kelsch, J.; Rausch, H.; Flemisch, F.: *Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation*. 3. Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“, München, 2008.
- [4] Peterman, I. & Kiss, M.: *Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition*, VDI-Berichte Nr. 2085; *VDI Fahrer im 21. Jahrhundert*, Braunschweig, 2009.
- [5] Bainbridge, L.: *Ironies of automation*, *Automatica*, Vol. 19, No. 6, pp. 775-779, 1983.
- [6] Endsley, M.R., & Kiris, E.O.: *The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation*. *Human Factors*, 37, 381-394, 1995.
- [7] Endsley, M. R. 1995a. *Toward a theory of situation awareness*. *Human Factors*, 37, 32-64.
- [8] Tönert, L.; Farid, M., Bengler, K. ; Schneller, R.: *Wahrnehmungs- und Verhaltensleistung des Fahrers bei einem Fahrzeug-Abdrift mit teil-automatisierter Querführung in unterschiedlich kritischen Fahrsituationen*. *VDI Fahrer im 21. Jahrhundert*, Braunschweig, 2011.