

Entwicklung eines integrierten Quer- und Längsreglers zur Fahrzeugführung

Development of an Integrated Lateral and Longitudinal Automatic Controller for Vehicle Guidance

Dipl.-Ing. Christian **Kölbl**

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München, Garching

Dr. rer. biol. hum. Peter **Zahn**

BMW Group Forschung und Technik, München

Zusammenfassung

Ein Konzept eines Assistenzsystems wird vorgestellt, welches den Fahrer bei Spurwechselforgängen sowohl bei der Verkehrsraumüberwachung als auch bei der Fahrzeuglängs- und -querführung in integrierter Form unterstützt. Das System schließt an das ConnectedDrive-Konzept der BMW Group an, welches durch die intelligente Integration von Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung eine umfassende und ganzheitliche Unterstützung des Fahrers anstrebt. Zu Beginn wird auf die zugrunde liegenden Teilsysteme aus den Bereichen der Längs- und Querführung eingegangen. Danach werden die wesentlichen Fahraufgaben bei Spurwechselforgängen dargestellt, um daraus Anforderungen an das integrierte Regelkonzept abzuleiten. Das Funktionskonzept wird vorgestellt. Simulationswerkzeuge werden angesprochen, die in der frühen Phase zur methodischen Entwicklung und Verifikation des Reglers eingesetzt wurden. Anforderungen an die Sensorik zur Umfelderkennung werden formuliert. Die gewählte Sensorkonfiguration und die prototypische Umsetzung des Reglers im Forschungsfahrzeug werden beschrieben.

Summary

A concept is presented for a driver assistance system providing integrated support to the driver during lane changes by monitoring the vehicle environment as well as by providing longitudinal and lateral vehicle guidance. The system is associated with the ConnectedDrive concept of the BMW Group, which is designed to achieve comprehensive driver support by intelligent integration of driver, vehicle and driving environment. The article begins with a survey of the basic longitudinal and lateral guidance subsystems. In order to derive requirements for the integrated controller concept, the key driving tasks during lane changes are then described. The functional concept is presented, followed by a description of simulation tools which were used during the early phase for a methodical development and verification of the controller. Requirements on sensors performing detection of the driving environment are formulated.

The resulting sensor configuration and the prototypical implementation of the controller within a research vehicle are described.

1 Einführung

Spurwechselforgänge im realen Verkehrsgeschehen stellen hohe Anforderungen an die Aufmerksamkeit des Fahrers. Nicht nur Verkehrsteilnehmer vor dem eigenen Fahrzeug sondern auch seitlich und im Rückraum müssen über mehrere Fahrspuren hinweg beobachtet werden. Aufgrund der großen Anzahl an Interaktionspartnern und des notwendigen großen Überwachungsbereichs kann es leicht passieren, dass andere Verkehrsteilnehmer erst sehr spät wahrgenommen oder übersehen werden. Parallel zu dieser Überwachungstätigkeit dürfen Fahrzeuglängs- und -querführung nicht vernachlässigt werden. Während eines Spurwechsels sind Längs- und Querführung so zu koordinieren, dass das eigene Fahrzeug andere Verkehrsteilnehmer nicht behindert oder gar gefährdet.

Um den Fahrer bei Spurwechselforgängen gezielt zu entlasten, wurden bereits in öffentlich geförderten Projekten wie INVENT („intelligenter Verkehr und nutzergerichte Technik“) prototypische Assistenzsysteme vorgestellt, die den Fahrer bei der Rück- und Seitenraumüberwachung unterstützen [1]. An Assistenzsystemen, die während eines Spurwechsels die Längs- und Querführung des Fahrzeugs aktiv beeinflussen, wird derzeit noch gearbeitet.

Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, das den Fahrer bei Spurwechselforgängen sowohl bei der Verkehrsraumüberwachung als auch bei der Fahrzeuglängs- und -querführung in integrierter Form unterstützt. Neben dem eigentlichen Spurwechselforgang wird durch ein solches System auch die Unterstützung bei der normalen Spurhaltung mit Abstandsregelung zum Vorausfahrzeug nahtlos abgedeckt.

2 Zugrunde liegende Assistenzsysteme zur Längs- und Querführung

Dem Konzept liegen drei Assistenzsysteme zugrunde:

- Längsführung: Active Cruise Control (ACC)
- Querführung: das sog. Heading Control (HC)
- Rück- und Seitenraumüberwachung: die sog. Spurwechselwarnung (SpWarn)

Der Nutzen des jeweiligen Assistenzsystems für den Fahrer und die grundlegende Funktionsweise werden im Folgenden erläutert.

2.1 Active Cruise Control (ACC)

ACC unterstützt den Fahrer bei der Abstands- und Geschwindigkeitsregelung auf vorausfahrende Fahrzeuge. Wird ein langsames Fahrzeug von einem in die Fahrzeugfront integrierten Sensor auf Basis von Radar- oder Lidartechnik erfasst, so wird ein vom Fahrer eingestellter Sollabstand eingeregelt (siehe Abb. 1).

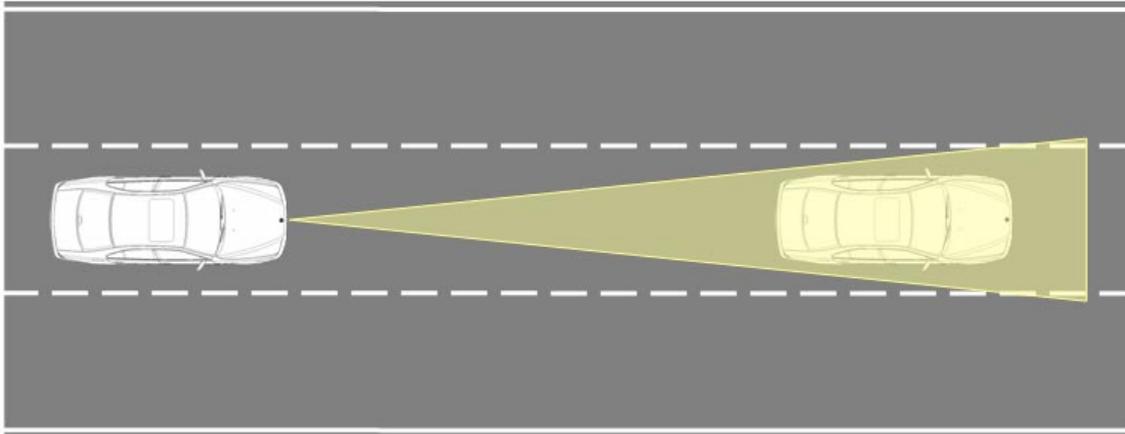


Abb. 1: ACC im Folgebetrieb
ACC in following state

Befindet sich dagegen kein langsames Fahrzeug im Erfassungsbereich des Sensors, so wird auf die vom Fahrer vorgegebene Wunschgeschwindigkeit beschleunigt oder verzögert. Das verwendete ACC ist für den Einsatz auf Autobahnen und gut ausgebauten Land- und Ringstraßen mit einem typischen Geschwindigkeitsbereich von 30 km/h bis 180 km/h konzipiert.

Wechselt der Fahrer im ACC-Betrieb den Fahrstreifen, so wird durch Setzen des Blinkers der vom Fahrer eingestellte Sollabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug je nach Auslegung aufrechterhalten oder um einen bestimmten Betrag reduziert. Während des Ausscherens wird das für die Abstandsregelung maßgebliche „Zielobjekt“, bislang das vorausfahrende Fahrzeug auf der Startspur des Spurwechsels, auf das vorausfahrende Fahrzeug auf der benachbarten Zielspur umgeschaltet. Nachdem die Umschaltung erfolgt ist oder der Fahrer den Blinker zurückgenommen hat, wird der Sollabstand wieder auf den vom Fahrer vorgegebenen Wert vergrößert. Das neue Zielobjekt kann erst dann für die Abstandsregelung berücksichtigt werden, wenn es vom Sensor erfasst und für eine bestimmte Mindestzeit verfolgt wurde.

2.2 Heading Control (HC)

Die Aufgabe des Heading Controls besteht darin, den Fahrer bei der Spurhaltung zu unterstützen. Es wird zwischen zwei verschiedenen Ausprägungen unterschieden:

- Spurverlassenswarnung
- Spurführung

Bei der Spurverlassenswarnung wird bei drohendem Überfahren der Fahrspurmarkierung eine Kombination aus leichtem Zusatzmoment in Richtung Fahrstreifenmitte und Lenkvibration auf das Lenkrad geschaltet. Durch die Vibration soll der Fahrer auf die Situation aufmerksam gemacht werden. Das rückführende Lenkmoment soll dem Fahrer über den haptischen Sinneskanal einen Korrekturvorschlag unterbreiten. Bei der Spurführung wird permanent ein leicht führendes Lenkmoment in Richtung Fahrspurmitte aufgeschaltet, um dem Fahrer eine Lenkempfehlung zu geben. In beiden Fällen sind die Momente allerdings nur so groß, dass sie jederzeit vom Fahrer übersteuert werden können.

Um Heading Control zu realisieren, wird ein Bildverarbeitungssensor, z. B. ein Kameramodul mit nachgeschalteter Datenauswertung, benötigt. Dieser erkennt die Position des eigenen Fahrzeugs in der Fahrspur (siehe Abb. 2) und berechnet daraus die Abweichung des Fahrzeugs von der Fahrspurmitte. Abhängig davon wird ein Moment auf die Lenkung geschaltet.

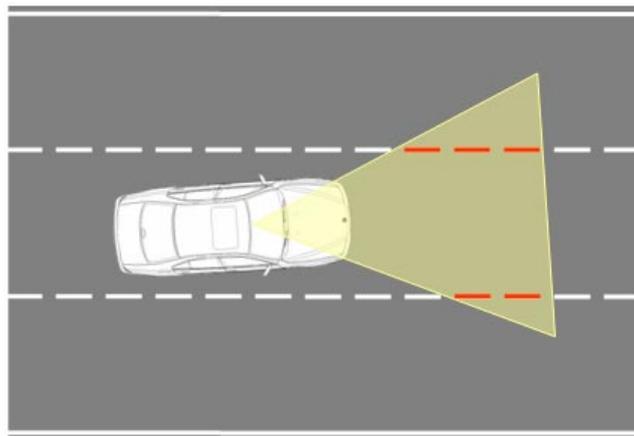


Abb. 2: Fahrspurerkennung durch Heading Control
lane mark detection with Heading Control

Analog zu ACC ist das verwendete Heading Control für den Einsatz auf Autobahnen mit Kurvenradien größer als 500 m vorgesehen. Da es sich um einen optischen Sensor handelt, sind gewisse Einschränkungen bei schlechter Witterung zu berücksichtigen. Bei starkem Regen, dichtem Nebel, schneebedeckter Fahrbahn, extremem Gegenlicht oder aufeinander folgenden Hell-Dunkel-Übergängen z. B. bei Tunnellein- und -ausfahrten ist das Assistenzsystem nur bedingt einsetzbar.

Bei Spurwechselforgängen, welche vom Fahrer durch Setzen des Blinkers initiiert werden, wird das rückführende Lenkmoment beim Verlassen der Fahrspur unterdrückt. Sobald die Fahrstreifenmarkierung vollständig überfahren wurde, wird das System wieder aktiviert. Bei Spurwechselforgängen, die nicht durch das Setzen des Blinkers angekündigt werden, bleibt das rückführende Lenkmoment erhalten. Wird

der Spurwechsel dennoch durchgeführt, wird das Moment nach dem Überfahren der Fahrstreifenmarkierung langsam zurückgenommen und das System erst nach dem Ablauf einer kurzen Standby-Phase wieder aktiv geschaltet.

2.3 Spurwechselwarnung

Bei der Spurwechselwarnung wird der Fahrer auf Straßen mit mindestens zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung vor gefährlichen Spurwechselvorgängen optisch durch rote LEDs in den Außenspiegeln gewarnt. Die Warnung erfolgt entweder permanent oder bedarfsgesteuert bei erkannter Spurwechselabsicht beispielsweise durch Setzen des Blinkers [1].

Nachfolgende und im seitlichen Bereich befindliche Verkehrsteilnehmer werden durch Radar- oder Lidar-Sensoren im entsprechenden Fahrzeugbereich erfasst (siehe Abb. 3).

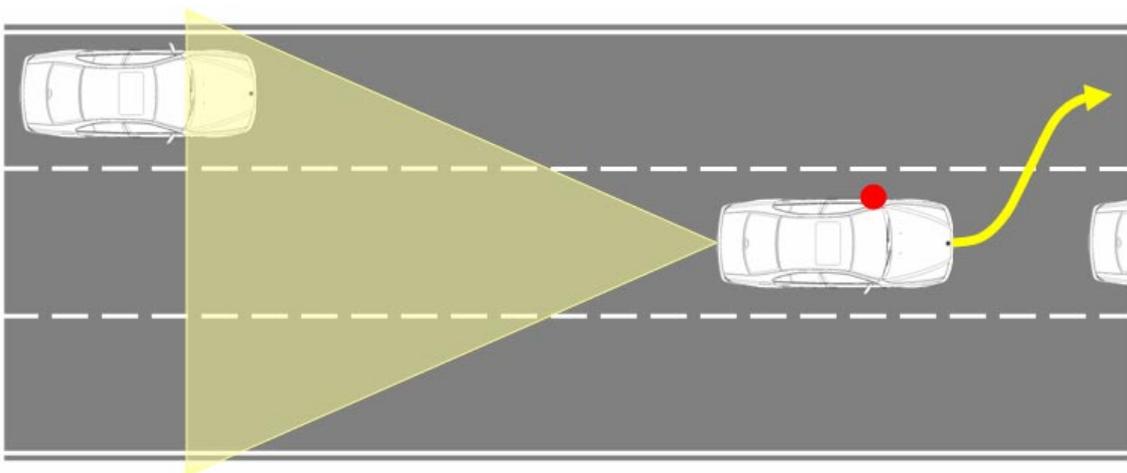


Abb. 3: Überwachung nachfolgender Fahrzeuge durch die Spurwechselwarnung
supervising of following vehicles with lane change warning

Anhand physikalischer Größen wie Abstand, abstandsnormierter Zeitlücke und Time To Collision (TTC) erfolgt die Berechnung eines Risikomaßes. Sofern dieses Maß eine gewisse Schwelle überschreitet, wird die Warnung ausgelöst.

Die Spurwechselwarnung ist primär für den Einsatz auf Autobahnen oder Landstraßen mit mindestens zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung konzipiert. Die erfassbare Differenzgeschwindigkeit ist von der verbauten Sensorik abhängig und liegt typischerweise im Bereich zwischen 60 km/h und 140 km/h.

Bei Spurwechselvorgängen wird der Fahrer in der Entscheidungsfindung, einen Spurwechsel durchführen zu können, unterstützt. Das Assistenzsystem warnt optisch

vor kritischen Spurwechselmanövern, gibt jedoch keine Empfehlung. Die endgültige Entscheidung, einen Spurwechsel durchzuführen, liegt weiterhin beim Fahrer.

3 Integration von Quer- und Längsführung beim Spurwechsel

Active Cruise Control, Heading Control und die Spurwechselwarnung arbeiten bisher unabhängig voneinander. Die drei Assistenzsysteme wurden daher im Rahmen des ConnectedDrive-Projektes der BMW Group zu einem integrierten Quer- und Längsregler zusammengefasst, um den Fahrer auch während eines Spurwechsels gezielt unterstützen zu können. Im Folgenden werden zunächst die Aufgaben des Fahrers während eines Spurwechsels betrachtet, um daraus Anforderungen an den integrierten Regelansatz ableiten zu können.

3.1 Aufgaben des Fahrers bei Spurwechselvorgängen

Um die Aufgaben eines Fahrers bei Spurwechselvorgängen zu ermitteln, wird der Ablauf eines Spurwechsels chronologisch in unterschiedliche Phasen eingeteilt [2]:

- Entstehung eines Spurwechselwunsches aufgrund verschiedener Motivationen wie Routenverfolgung, schnelleres Fortkommen, Ende eines Fahrstreifens, usw.
- Überprüfung der Verkehrssituation vor, neben und hinter dem eigenen Fahrzeug auf potentielle Konflikte
- Entscheidung zur Durchführung des Spurwechsels
- Fahrzeuglängs- und -querführung zur Durchführung des Spurwechsels

Für den integrierten Regelansatz sind überwiegend die drei letzten Phasen relevant. Daher werden diese Phasen anhand einer Beispielsituation mit drei relevanten Verkehrsteilnehmern (siehe Abb. 4) näher betrachtet.

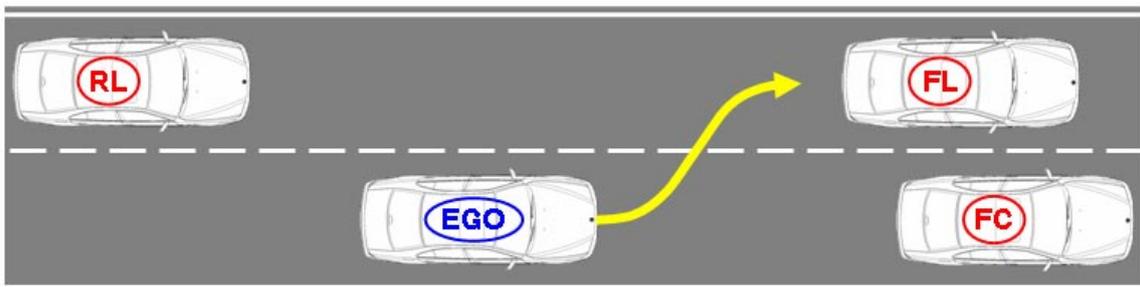


Abb. 4: Relevante Fahrzeuge während eines Spurwechsels
relevant vehicles during lane changing

Unmittelbar vor dem Spurwechsel muss der Fahrer nicht nur den Bereich vor dem eigenen Fahrzeug sondern auch seitlich und im Rückraum über mehrere Fahrspuren hinweg beobachten. Die Aufgabe des Fahrers besteht darin, Abstand und Relativgeschwindigkeit des nachfolgenden Verkehrs abzuschätzen, um, wie in Abb. 4 dargestellt, einen Spurwechsel in die Lücke zwischen den Fahrzeugen RL und FL starten zu können. Parallel dazu darf er die Längs- und Querführung des Fahrzeugs nicht vernachlässigen, um beispielsweise auf ein bremsendes Vorderfahrzeug (FC) rechtzeitig reagieren zu können oder ein langsames Wegdriften aus der eigenen Fahrspur zu verhindern.

Während des Spurwechsels muss er das eigene Fahrzeug beschleunigen, um eine Behinderung des Folgefahrzeugs auf der Zielspur (RL) möglichst gering zu halten. Dieses Fahrzeug bestimmt somit die Mindestbeschleunigung. Parallel dazu müssen auch die beiden Führungsfahrzeuge (FC und FL) berücksichtigt werden. Das nähere Fahrzeug (FL) bestimmt maßgeblich die vom Fahrer vorgegebene Spurwechseltrajektorie, da es während des Wechsels zu keiner Gefährdung durch zu dichtes Aufahren kommen darf. Hinsichtlich der gefahrenen Trajektorie ist zudem darauf zu achten, dass das eigene Fahrzeug nicht Gefahr läuft, durch zu starkes und abruptes Lenkens des Fahrers von der Fahrbahn abzukommen. Auch zum Fahrzeug auf der Startspur (FC) muss während des Wechselvorganges ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden. Grundsätzlich gilt, dass die beiden Vorderfahrzeuge die mögliche Obergrenze der Längsbeschleunigung festlegen und damit erheblichen Einfluss auf die Durchführbarkeit eines Spurwechsels nehmen. Unter der Annahme, dass zu allen relevanten Verkehrsteilnehmern ein gewisser Sicherheitsabstand eingehalten werden muss, kann ein Spurwechsel nur dann durchgeführt werden, wenn die durch die beiden vorderen Fahrzeuge festgelegte Maximalbeschleunigung größer ist als die vom Folgefahrgzeug auf der Zielspur hervorgerufene Mindestbeschleunigung [2].

Es lassen sich folgende Anforderungen an einen integrierten Regler ableiten: Das Assistenzsystem muss in der Lage sein zu beurteilen, wie groß eine Lücke zwischen zwei Fahrzeugen auf der Zielspur sein muss, um überhaupt einen sicheren Spurwechsel durchführen zu können. Das System soll zudem die Möglichkeit bieten, den Fahrer bei der Trajektorienplanung aktiv unterstützen zu können. Des Weiteren muss das Assistenzsystem zu allen relevanten Verkehrsteilnehmern einen bestimmten Sicherheitsabstand aufrechterhalten, um eine potentielle Gefährdung auszuschließen. Dennoch sollte das System in der Lage sein, in enge Lücken beschleunigen zu können.

3.2 Konzept integrierte Quer- und Längsführung

Auf Basis der im letzten Kapitel formulierten Anforderungen wurden zwei unterschiedliche Reglerkonzepte entworfen.

Beim ersten Konzept erhält der Fahrer eine haptische Lenkempfehlung durch das Heading Control, während er bei der zweiten Systemausprägung die Querführung des Fahrzeugs ohne führende Momente vom Assistenzsystem übernimmt. Die Unterstützung durch das Heading Control beschränkt sich auf eine haptische Spurverlassens- und Spurwechselwarnung. Im Bereich der Längsführungsassistenz erfolgt bei beiden Konzepten in Abhängigkeit von der Querbewegung des eigenen Fahrzeugs eine autonome Geschwindigkeits- und Abstandsanpassung an die jeweilige Verkehrssituation. Vor kritischen Spurwechselmanövern wird der Fahrer zudem permanent optisch gewarnt. Den Spurwechselbeginn signalisiert der Fahrer durch das Setzen des Blinkers. Die endgültige Freigabe des Spurwechselforgangs wird von der Spurwechselwarnung erteilt.

Im Folgenden werden die Unterschiede beider Konzepte im Bereich der Querführungsassistenz und das gemeinsame Funktionskonzept im Bereich der Längsführungsassistenz näher betrachtet.

3.2.1 Unterschiedliche Konzepte der Querführungsassistenz

3.2.1.1 Haptische Lenkempfehlung

Bei der Systemausprägung „Haptische Lenkempfehlung“ verspürt der Fahrer sowohl bei der Spurhaltung als auch beim Spurwechsel permanent ein leicht führendes Moment in Richtung Sollkurs. Um die Lenkempfehlung auch während eines Spurwechselforgangs zu gewährleisten, wurde der Querdynamikregler um die Planung einer Spurwechseltrajektorie erweitert.

Die bei Spurhaltung und Spurwechsel aufgeschalteten Lenkmomente sind allerdings nur so groß, dass sie jederzeit vom Fahrer übersteuert werden können. Sobald die Lenkbewegung des Fahrers von der haptischen Vorgabe in größerem Ausmaß abweicht, wird das Lenkmoment dosiert zurückgenommen.

3.2.1.2 Freie Querführung

Im Vergleich zur vorangegangenen Systemausprägung erhält der Fahrer keine permanente Lenkempfehlung. Die Aktivität des Heading Controls beschränkt sich sowohl bei der Spurhaltung als auch beim Spurwechsel auf eine haptische Verlassenswarnung. Diese wird bei ausgelöster optischer Spurwechselwarnung um eine haptische Objektwarnung ergänzt. Beide sind in Form eines rückführenden Lenkmoments mit überlagerter Vibration konzipiert. Sie unterscheiden sich dahingehend, dass das rückführende Moment und die Vibration bei der Objektwarnung geringfügig stärker ausgeprägt sind, um dem Fahrer haptisch die Gefährlichkeit der Situation zu verdeutlichen.

Da ein führendes Moment fehlt, ist der Fahrer bei dieser Systemausprägung selbst für die Gestaltung der Spurwechseltrajektorie zuständig.

3.2.2 Gemeinsames Funktionskonzept der Längsführungsassistenz

Die Längsführungsassistenz in Abhängigkeit der Querbewegung des eigenen Fahrzeugs wurde als Schwerpunkt des integrierten Regelansatzes identifiziert.

Aus diesem Grund wird auf die ACC-Funktionalität während eines Spurwechsels anhand einer Beispielsituation näher eingegangen. Es wird auf das in Kap. 3.1 eingeführte Beispiel zurückgegriffen. Neben dem eigenen Fahrzeug sind drei weitere Verkehrsteilnehmer von Bedeutung: ein Führungsfahrzeug in der Startspur (FC) sowie ein Führungs- (FL) und ein Folgefahrzeug (RL) auf der Zielspur (siehe Abb. 4).

In Anlehnung an Kap. 3.1 wird der Spurwechselvorgang chronologisch in drei Phasen unterteilt:

- Ankündigung des Spurwechsels und Warten auf Freigabe
- Durchführung des Spurwechsels
- Abschluss des Spurwechsels

Die Unterstützung des Fahrers in den drei Phasen des Spurwechsels wird im Folgenden vorgestellt.

3.2.2.1 Ankündigung des Spurwechsels und Warten auf Freigabe

Der Spurwechselwunsch des Fahrers wird durch Setzen des Blinkers angekündigt. Da sich auf der Zielspur ein schnelleres Folgefahrzeug (RL) annähert, ist die optische Spurwechselwarnung ausgelöst. Der Spurwechsel kann daher nicht unmittelbar gestartet werden (siehe Abb. 5).

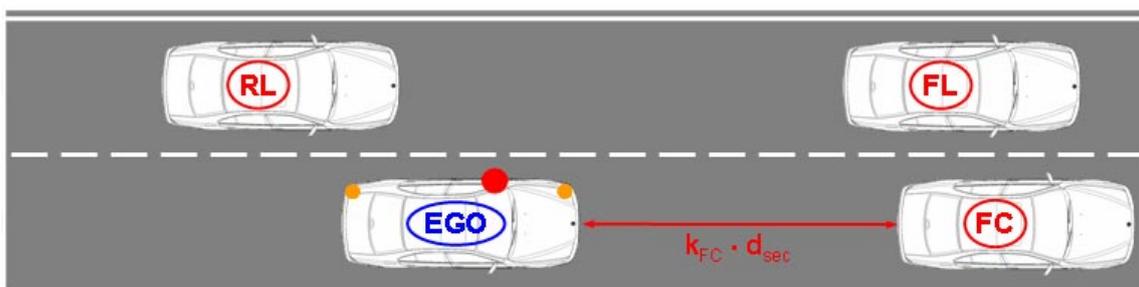


Abb. 5: Warten auf Spurwechselfreigabe
waiting for permission of lane changing

Sobald Verkehrsraumüberwachung und Situationsinterpretation erkennen, dass der Spurwechsel in absehbarer Zeit freigegeben werden kann, schließt das eigene Fahrzeug geringfügig auf den Vordermann in der Startspur auf. Die Reduzierung des Folgeabstandes erfolgt proportional zum vom Fahrer vorgegebenen Sollabstand d_{sec} .

$$d_{FC, \text{soll}} = k_{FC} \cdot d_{sec}, \quad (k_{FC} < 1) \quad (3.1)$$

3.2.2.2 Durchführung des Spurwechsels

Sobald die optische Spurwechselwarnung erloschen ist, kann der Spurwechsel gestartet werden. Das ACC muss dafür sorgen, dass das eigene Fahrzeug während des Wechsels weder mit dem Führungsfahrzeug in der Start- (FC) noch mit dem Führungsfahrzeug auf der Zielspur (FL) zu kollidieren droht. Um ein weiteres Folgefahrzeug auf der Zielspur (RL) möglichst wenig zu behindern, soll das ACC dennoch in die Lücke zwischen RL und FL beschleunigen. Da die beiden Führungsfahrzeuge die Obergrenze der Längsbeschleunigung festlegen (siehe Kap. 3.1), werden beide zunächst getrennt betrachtet und die erarbeiteten Regelstrategien anschließend superpositioniert.

Bezüglich des Führungsfahrzeugs auf der Startspur (FC) wird der Folgeabstand $d_{FC, \text{soll}}$ mit abnehmender Überdeckung in Querrichtung verkürzt (siehe Abb. 6).

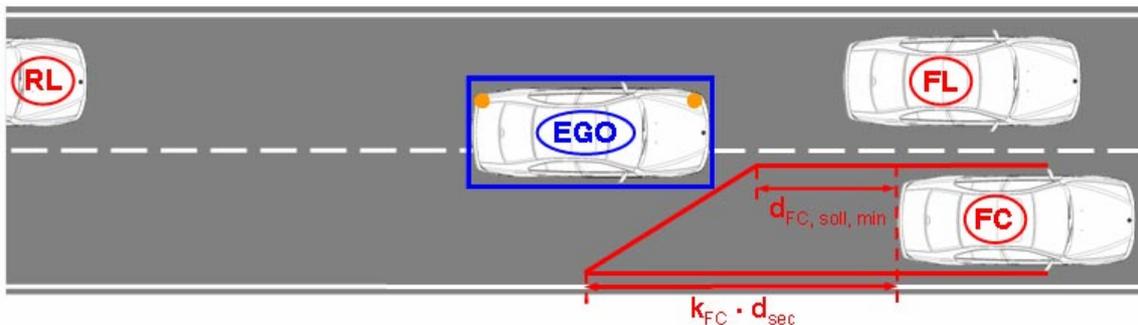


Abb. 6: Längsführung bzgl. des Führungsfahrzeugs in der Startspur
longitudinal guidance according front center vehicle

Die Reduzierung erfolgt in Abhängigkeit der Sollvorgabe d_{sec} , um der Anforderung gerecht zu werden, dass Fahrer mit größerem Sollabstand ein eher komfortableres Systemverhalten wünschen, während dagegen Fahrer mit sehr kurzen Folgeabständen eine eher sportlichere Abstimmung bevorzugen. Trotz der Verkürzung des Folgeabstands darf ein gewisser Mindestabstand $d_{FC, \text{soll, min}}$ nicht unterschritten werden.

$$d_{FC, \text{soll}} = f(\text{„Überdeckung“}) \cdot d_{sec} \quad (3.2)$$

$$d_{FC, \text{soll, min}} = k_{FC, \text{min}} \cdot d_{sec}, \quad (k_{FC, \text{min}} < k_{FC} < 1) \quad (3.3)$$

Das Führungsfahrzeug auf der Zielspur (FL) wird bereits zu Beginn des Spurwechsels berücksichtigt. Um ein Beschleunigen in Lücken zu ermöglichen, wird der Folgeabstand $d_{FL, \text{soll}}$ bezüglich dieses Fahrzeugs ebenfalls verkürzt (siehe Abb. 7).

$$d_{FL, \text{soll}} = k_{FL} \cdot d_{\text{sec}}, (k_{FL} < 1) \quad (3.4)$$

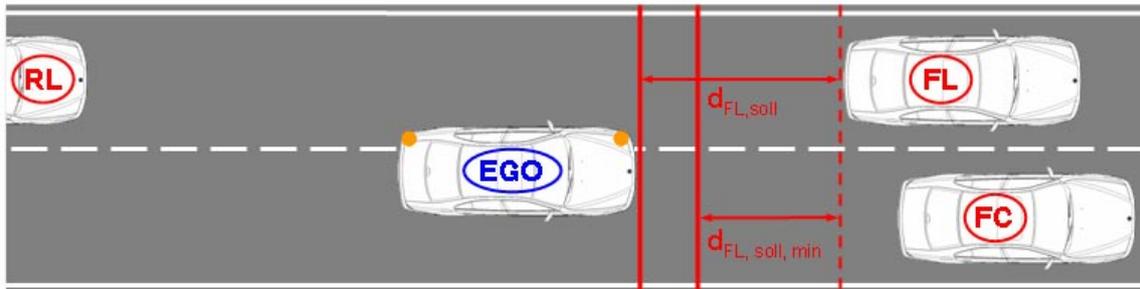


Abb. 7: Längsführung bzgl. des Führungsfahrzeugs auf der Zielspur
longitudinal guidance according front left vehicle

Die Reduzierung wird allerdings nur so groß gewählt, dass der reduzierte Folgeabstand $d_{FL, \text{soll}}$ bei gleichzeitiger Relativgeschwindigkeit von Null durch moderates Verzögern beispielsweise mit Motorschleppmoment erreicht werden kann. Analog zum Führungsfahrzeug in der Startspur darf auch hier ein bestimmter Mindestabstand $d_{FL, \text{soll, \text{min}}}$ nicht unterschritten werden.

$$d_{FL, \text{soll, \text{min}}} = k_{FL, \text{min}} \cdot d_{\text{sec}}, (k_{FL, \text{min}} < k_{FL} < 1) \quad (3.5)$$

Die resultierende Sollbeschleunigung ergibt sich durch Minimumbildung der Sollbeschleunigungen bezüglich der beiden Führungsfahrzeuge. Wie in Abb. 8 ersichtlich, reduziert das ACC zunächst mit abnehmender Überdeckung in Querrichtung den Folgeabstand zum Führungsfahrzeug in der Startspur (FC). Der hinsichtlich dieses Fahrzeugs minimal mögliche Sollabstand wird nicht erreicht, da zum näheren Führungsfahrzeug auf der Zielspur (FL) ein gewisser Folgeabstand eingehalten werden muss.

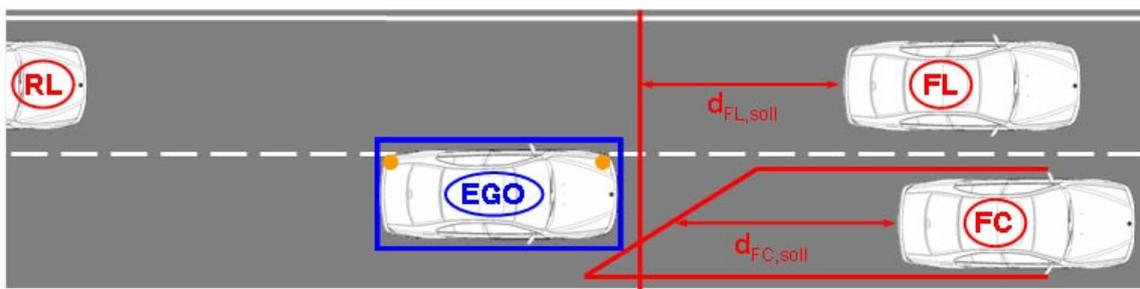


Abb. 8: Längsführung bzgl. beider Führungsfahrzeuge
longitudinal guidance according front center and front left vehicle

3.2.2.3 Abschluss des Spurwechsels

Sobald sich das eigene Fahrzeug vollständig auf der Zielspur befindet, wird der Spurwechsel abgeschlossen. Der zum neuen Führungsfahrzeug (FL -> FC) reduzierte Folgeabstand wird wieder auf den vom Fahrer eingestellten Sollwert d_{sec} vergrößert.

4 Simulationswerkzeuge zur methodischen Entwicklung des Reglers

Bevor der Regler mittels Rapid-Prototyping im Forschungsfahrzeug dargestellt werden konnte, wurde er zunächst in der Simulation entwickelt und eingehend getestet. Es wurden eine Closed-Loop- und eine Open-Loop-Simulationsumgebung auf Basis von Matlab / Simulink eingesetzt.

4.1 Closed-Loop-Simulation

Die verwendete Simulationsumgebung verfügt über sieben verschiedene Teilmodelle (siehe Abb. 9).

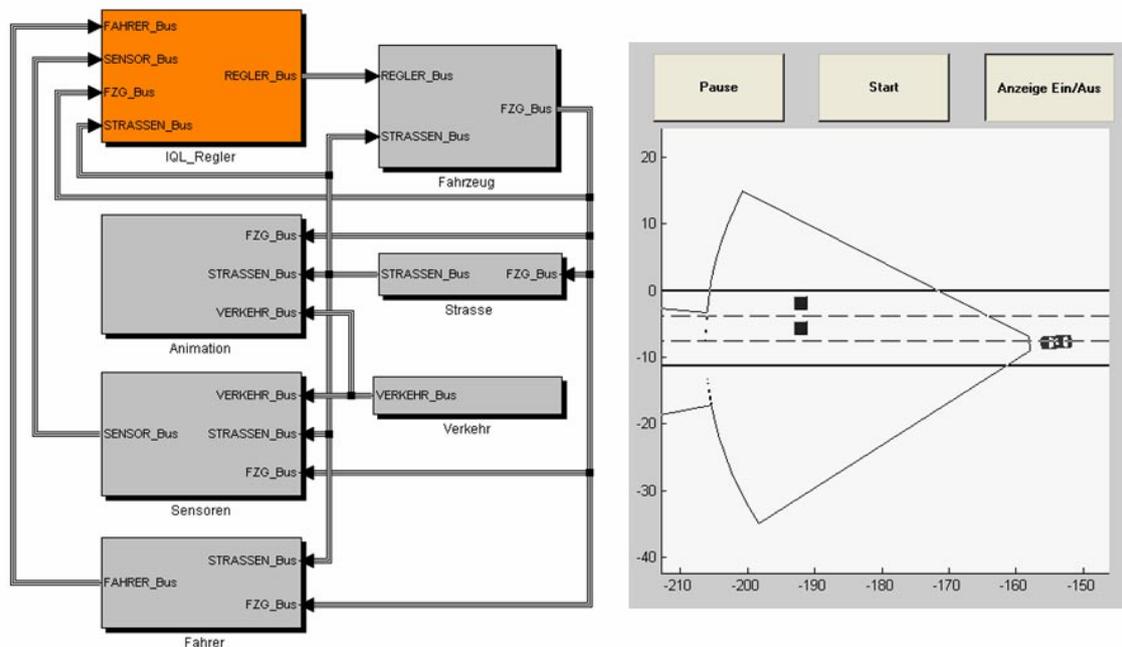


Abb. 9: Modellstruktur und Visualisierung der Closed-Loop-Simulation
model structure and visualisation of the closed loop simulation

Während der Simulation kann das Verhalten des untersuchten Reglers anhand von Zeitschrieben verfolgt werden. Parallel dazu wird die Verkehrssituation um das eigene Fahrzeug in einer Vogelperspektive dargestellt (siehe Abb. 9).

Der integrierte Quer- und Längsregler wurde in dieser Umgebung zunächst in Form eines Simulink-Modells entwickelt und implementiert. Anschließend wurde der Regler in gestellten Verkehrssituationen mit idealen Eingangsdaten auf die gewünschte Funktionalität überprüft sowie eine Erstauslegung der Reglerparameter durchgeführt.

Nach Abschluss der Untersuchungen in der Closed-Loop-Simulation wurde der Reglerblock aus der Simulationsumgebung herausgelöst und in eine Open-Loop-Simulation überführt.

4.2 Open-Loop-Simulation

Die eingesetzte Open-Loop-Simulationsumgebung bietet die Möglichkeit, Regler auf der Basis von Simulink-Modellen mit im Fahrversuch aufgezeichneten verrauschten Messdaten zu untersuchen. Neben den aufgezeichneten Messdaten können vom Regler errechnete Größen in Zeitschrieben sowie analog zur Closed-Loop-Umgebung in einer Vogelperspektive um das eigene Fahrzeug darstellt und analysiert werden (siehe Abb. 10).

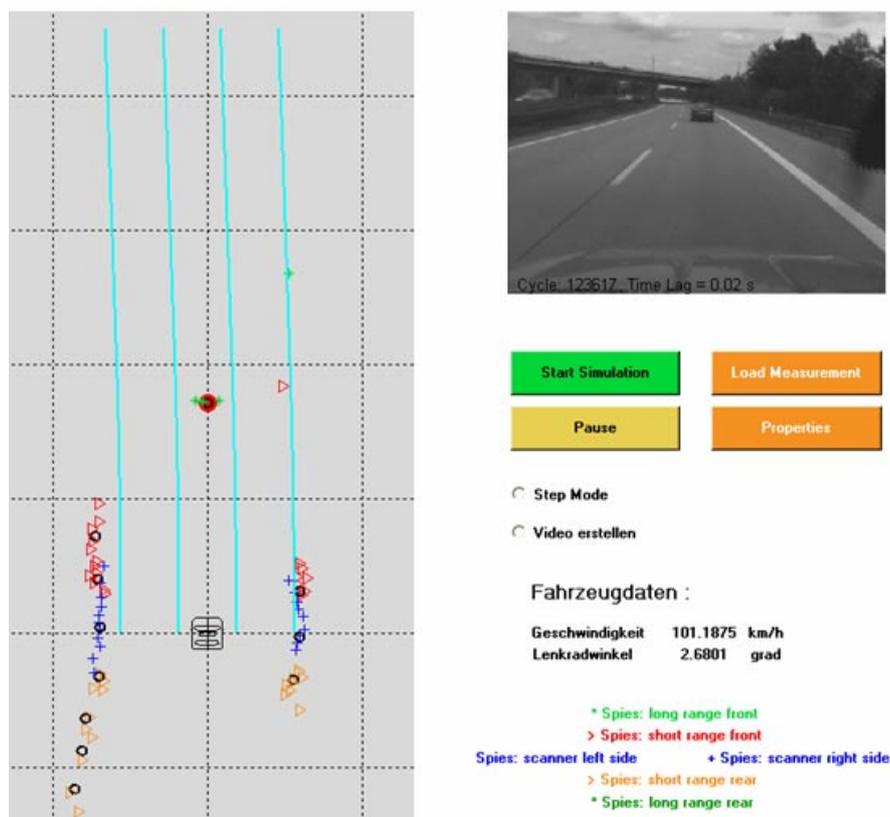


Abb. 10: Visualisierung der Offline-Simulation
visualisation of the offline simulation

Mit Hilfe der Open-Loop-Simulation wurden dem eigentlichen Regler vorgeschaltete Funktionen wie Stabilisierung der Fahrspurdaten, Multiple Target Tracking und die daran anschließende Objektauswahl getestet. Die Untersuchungen erstreckten sich überwiegend auf das Verhalten der angesprochenen Funktionen während eines Spurwechsels, um beispielsweise zu gewährleisten, dass alle relevanten Fahrzeugtracks zuverlässig stabilisiert und ausgewählt wurden. Zudem musste während eines Spurwechsels eine ausreichende Fahrspurerkennung garantiert werden.

5 Verifikation des Reglers in der Simulation

Bei der ausgewählten Verkehrssituation handelt es sich um eine Fahrt auf einer Autobahn mit zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Neben dem eigenen Fahrzeug sind zwei weitere Fahrzeuge zu berücksichtigen: ein Führungsfahrzeug in der Start- (FC) und ein Führungsfahrzeug auf der Zielspur (FL). Beide Fahrzeuge bewegen sich mit jeweils konstanter Geschwindigkeit von 100 km/h. Das Fahrzeug auf der linken Spur befindet sich 15 m vor dem Fahrzeug auf der rechten Spur. Das eigene Fahrzeug folgt dem Führungsfahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen mit einer vom Fahrer vorgegebenen Zeitlücke von 1,5 s (siehe Abb. 11).

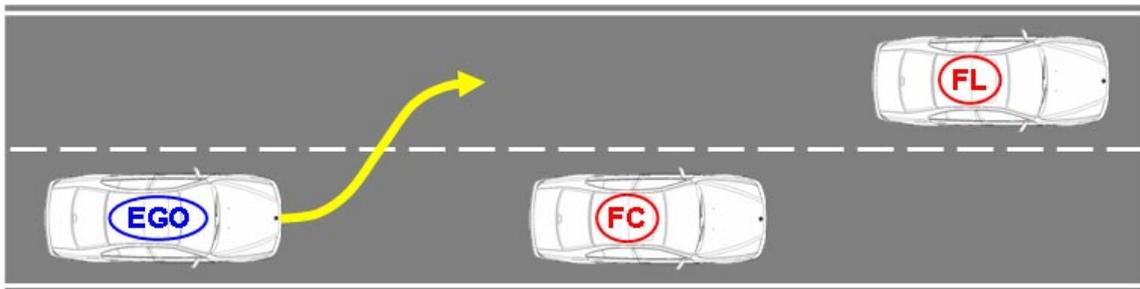


Abb. 11: gestellte Verkehrssituation zur Verifikation des Regelverhaltens
test situation to verify the behaviour of the automatic controller

Neben dem in Kap. 3.2 vorgestellten integrierten Quer- und Längsregler (IQL) wird als Referenz das Regelverhalten eines herkömmlichen ACC-Systems auf Basis eines Fernbereichsradarsensors betrachtet. Der verwendete ACC-Regler verkürzt, wie bereits in Kap. 2.1 erwähnt, beim Setzen des Blinkers den Sollabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug um beispielsweise 20 %. Nachdem das Zielobjekt gewechselt oder der Fahrer den Blinker wieder zurückgenommen hat, wird der Folgeabstand wieder auf den vom Fahrer vorgegebenen Wert vergrößert.

Beim Spurwechsel mit ACC erfolgt zunächst ein rasches Beschleunigen des eigenen Fahrzeugs (siehe Abb. 12 links), was auf das Verkürzen des Folgeabstands zurückgeführt werden kann. Sobald der Fernbereichsradarsensor das Führungsfahrzeug auf der Zielspur erfasst hat, erfolgt eine Umschaltung des Zielobjekts. Dies hat zur Folge, dass der Folgeabstand wieder auf seinen ursprünglichen Wert vergrößert

wird. An die Beschleunigungsphase schließt unmittelbar ein Verzögern des Fahrzeugs mit maximal $1,2 \text{ m/s}^2$ an.

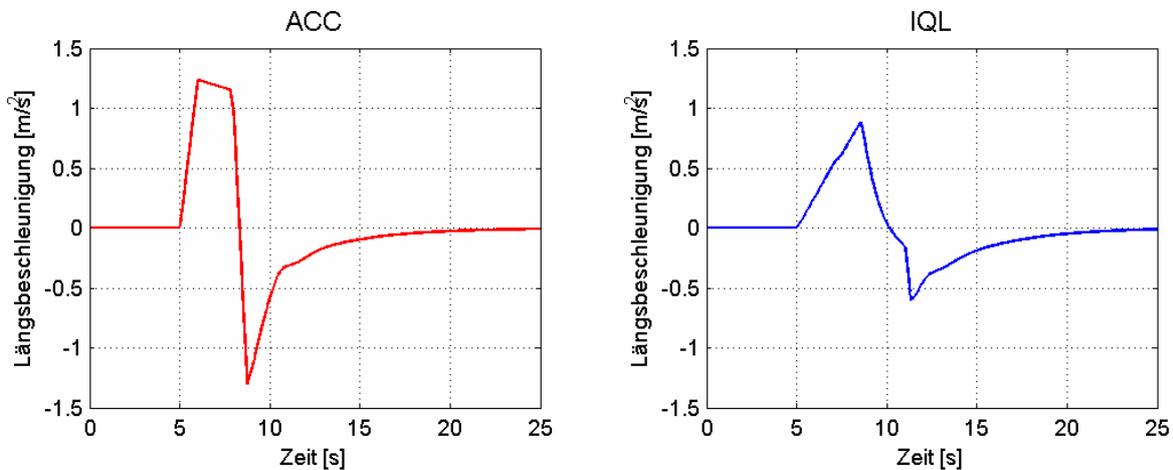


Abb. 12: Spurwechsel mit ACC und IQL
lane change with ACC and IQL

Beim Spurwechsel mit IQL wird das eigene Fahrzeug zu Beginn des Wechsels ebenfalls beschleunigt (siehe Abb. 12 rechts). Der Anstieg der Beschleunigung erfolgt allerdings langsamer als beim konventionellen ACC-System, da die Verkürzung des Sollabstands mit der Querbewegung des eigenen Fahrzeugs verknüpft ist. Die Dauer der Beschleunigungsphase fällt zudem kürzer aus, da das Führungsfahrzeug auf der Zielspur bereits zu Beginn des Spurwechsels berücksichtigt wird. Der zum neuen Vordermann einzuregelnde Folgeabstand kann durch moderates Verzögern mit $0,6 \text{ m/s}^2$ erreicht werden, was in etwa dem Motorschleppmoment entspricht. Ein rasches Beschleunigen des Fahrzeugs mit unmittelbar anschließendem Abbremsen kann im Vergleich zum herkömmlichen ACC-System vermieden werden.

6 Anforderungen an die Sensorik und Sensorkonfiguration

Für die Umsetzung des Systems in einem Forschungsfahrzeug ist es entscheidend, die benötigten Informationen über die Fahrumgebung mit geeigneten Sensoren zeitnah, genau und robust zu erfassen:

- Abstände und Relativgeschwindigkeiten der vorausfahrenden Fahrzeuge FC und FL sowie des Folgefahrzeugs RL in Längs- und Querrichtung
- Spurbreiten und Querablage dieser Fahrzeuge in ihrer jeweiligen Fahrspur
- Querposition und Ausrichtung des eigenen Fahrzeugs in der Fahrspur

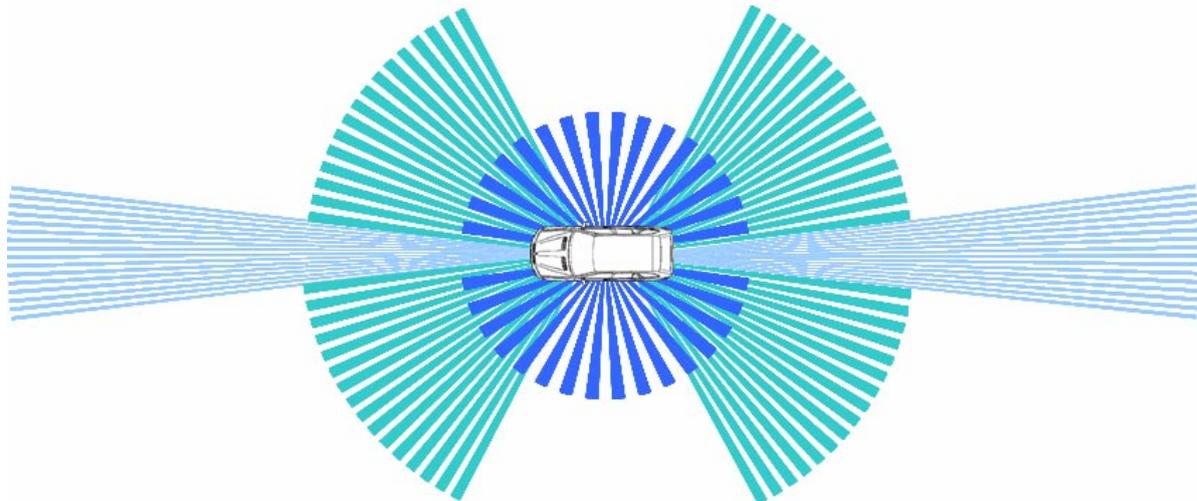
Der ausgedehnte Erfassungsbereich macht den Einsatz mehrerer Sensoren erforderlich. Im Gegensatz zur Applikation von Einzelsensoren, die auf eine dedizierte Funktion wie z. B. Abstandsregelung hin ausgelegt sind, erfordert die integrierte Quer- und Längsregelung eine Sensordatenfusion mit sensorübergreifender Objektverfolgung aller Zielobjekte („Multiple-Target-Tracking“). Um eine störungsrobuste Objektverfolgung bei minimaler Verarbeitungslatenz zu erreichen, werden die Messdaten aller Sensoren zusammen mit den Sensorparametern in ein zentrales Tracking-Modul eingespeist. Im Gegenzug werden die sensorinternen Trackingmechanismen auf ein Minimum reduziert.

Eine vorausgerichtete Kamera erfasst über ein Bildverarbeitungssystem den Fahrbahnverlauf und ermittelt Breite und Krümmung der Fahrspuren. Entsprechende Kameras werden für Assistenzfunktionen wie Spurverlassenswarnung und Spurhalteunterstützung bereits eingesetzt. Die Verwendung beinhaltet dann keinen funktions-spezifischen Mehraufwand für die integrierte Quer- und Längsführung.

Infrarot-Laser weisen ähnliche Ausbreitungseigenschaften wie sichtbares Licht auf. Daher müssen Reflexionen durch Nicht-Fahrzeuge, etwa von der Randbebauung der Straße, der Fahrbahnoberfläche (Bodenechos) sowie witterungsbedingte Reflexionen und Streuungen von der Signalverarbeitung erkannt und klassifiziert werden.

Als Ergebnis wird ein funktionsübergreifendes, zeitlich und örtlich stabilisiertes Fahrumgebungsmodell für alle Applikationen bereitgestellt, wie es etwa auch im Teilprojekt „Fahrumgebungserfassung“ des Förderprojektes INVENT [1] beschrieben wurde.

Im Forschungsfahrzeug wurde eine 360° Rundumerfassung der gesamten Fahrumgebung realisiert. Die Reichweite in Längsrichtung beträgt nach vorn und hinten bis zu 150 m und in Querrichtung über 20 m (siehe Abb. 13).

**Fernbereichslidar**

- 150m
- 14° Öffnungswinkel
- 16 Strahlen

Mittelbereichslidar

- 60m
- 54° Öffnungswinkel
- 32 Strahlen

Nahbereichslidar

- 20m
- 160° Öffnungswinkel
- 16 Strahlen

Abb. 13: Sensorkonfiguration des Forschungsfahrzeugs [3]
sensor configuration of the research vehicle [3]

Um die geforderte hohe Ortsauflösung in Längs- und Querrichtung zu erreichen, wurden hochauflösende Lasersensoren mit einer Winkelauflösung von bis zu 1° verwendet [3]. Alternativ einsetzbare Radarsensoren verfügen über eine geringere Winkel- und damit Querauflösung vor allem bei der Lokalisierung mehrerer benachbarter Ziele („Mehrzielauflösung“ z. B. beider Vorausfahrzeuge FC und FL).

In Kauf genommen wird, dass bei der Verwendung von Lasersensoren die Geschwindigkeitsinformation im Gegensatz zu Radarsensoren nicht direkt gemessen sondern nur durch Ableitung des Abstandssignals in Längs- und Querrichtung gewonnen wird. Daher ist eine möglichst hohe Messrate für die Geschwindigkeitsauflösung und die Vermeidung von Fehlzugeordnungen von großer Bedeutung (Korrespondenzproblem).

Insbesondere an den Nahtstellen der Sensorerfassungsbereiche ist eine sehr gute Abstands- und Winkel-Kalibrierung der Sensorik wichtig, damit durchgehende Linien wie z. B. Leitplanken und Kotflügel auch durchgehend gesehen werden und Scheinbewegungen an den Grenzen der Sensorerfassungsbereiche vermieden werden. Schließlich muss die Sensorik etwa beim Überholtwerden mit sehr nahen und daher starken Reflexionen zurechtkommen. Das bedeutet auf technischer Seite, dass die den Empfangsdioden nachgeschalteten Empfangsverstärker hohe Linearität, hohe Dynamik und hohe Übersteuerungsfestigkeit aufweisen müssen, um Fehlmessungen während und nach der Vorbeifahrt von Nahzielen zu vermeiden.

Die Sensorik ist so zu verbauen, dass die relevanten Fahrzeuge so früh wie möglich erfasst und nicht durch andere Fahrzeuge verdeckt werden. Idealerweise wird etwa

das linke Vorderfahrzeug durch einen Sensor an der linken Fahrzeugseite bzw. am linken vorderen Fahrzeugeck erfasst, während ein entsprechender Sensor an der rechten Seite das rechte Vorderfahrzeug in einem möglichst weiten Bereich erfasst. Damit wird jedoch der Sensoraufwand gegenüber einem fahrzeugmittig angebrachten Sensorsystem verdoppelt, wenn auch der Fernbereich erfasst werden soll. Daher wurde im eingesetzten Versuchsträger die vordere und hintere Sensorik für Fern- und Mittelbereich fahrzeugmittig verbaut. Über die zusätzlichen, seitlich angebrachten Nahbereichssensoren mit einem Erfassungswinkel von fast 180° ist eine ausreichende Sicht nach vorn und hinten an Voraus- und Folgefahrzeugen vorbei gewährleistet.

Über eine funktionspezifische Nachfilterung relevanter Attribute werden die Eingangsdaten für das Regelmodul zur integrierten Quer- und Längsführung bereitgestellt.

7 Umsetzung im Forschungsfahrzeug

Zur Untersuchung des Reglers im Fahrbetrieb wurde ein BMW X5 4,4 i entsprechend umgebaut und erweitert. Abb. 14 zeigt eine schematische Darstellung der realisierten Fahrzeugarchitektur.

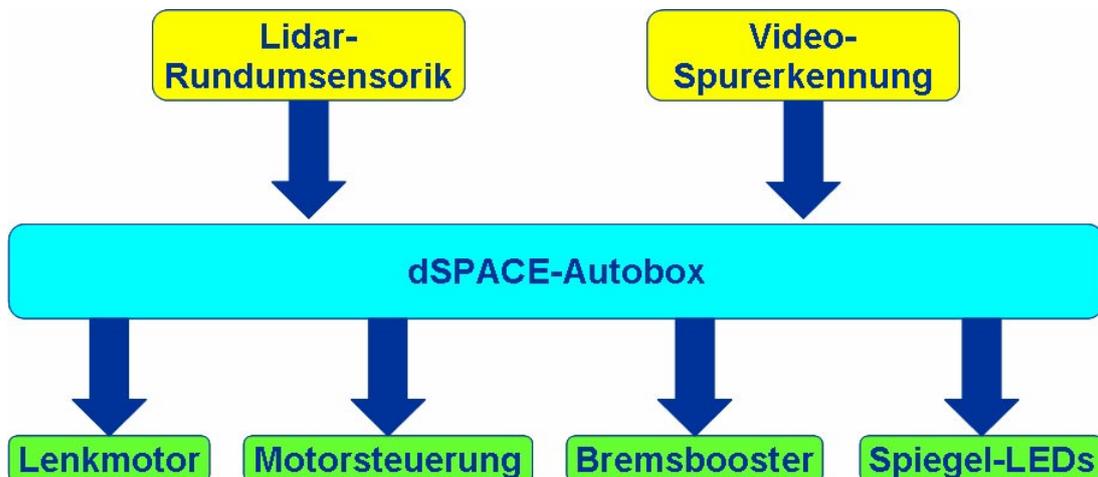


Abb. 14: Schematische Darstellung der Versuchsträgerarchitektur
schematic visualisation of the research vehicle architecture

Die Vernetzung von Lasersensorik, dSPACE-Autobox, Aktuatorik und Mensch-Maschine-Schnittstelle geschieht mittels CAN-Bus. Der vom Bildverarbeitungssystem erfasste aktuelle Fahrbahnverlauf wird per Ethernet übertragen. Durch Speicherung und Fortschreibung dieser Daten ist eine Fahrspurzuordnung und Querablagebestimmung für vorausfahrende wie rückwärtige Objekte möglich.

Die von der Lasersensorik auf insgesamt 128 Messkanälen gelieferten Abstandsdaten (siehe Abb. 13) werden über einen privaten 500 kBaud Highspeed-CAN an die Autobox übertragen. Um Engpässe auf dem Bus zu vermeiden, wurde eine Synchronisierung der Sensoren vorgenommen. Ein Master-Sensor steuert den CAN-Zugriff der anderen Slave-Sensoren so, dass Arbitrierungskonflikte durch die Zuordnung von Zeitscheiben vermieden und so die maximale Transferrate genutzt werden kann.

Die Autobox übernimmt die Signalauswertung, die Umsetzung der Regelfunktionen und die Ansteuerung von Mensch-Maschine-Schnittstelle und Aktuatorik.

Um den Fahrer in Längs- und Querrichtung aktiv unterstützen zu können, wurden zusätzliche Aktuatoren ins Fahrzeug eingebaut. In die Lenksäule wurde ein Hohlwellenmotor integriert, um Lenkmomente aufschalten zu können. Zur Umsetzung von Verzögerungsanforderungen wurde der serienmäßige Bremskraftverstärker durch einen pneumatischen Bremsbooster ersetzt. Für die Realisierung von Beschleunigungsanforderungen wird eine externe Schnittstelle des Motorsteuergeräts verwendet. In die beiden Außenspiegel wurde rote LEDs integriert, um den Fahrer optisch vor gefährlichen Spurwechseln warnen zu können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Herkömmliche Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei einzelnen Fahraufgaben, beispielsweise der Abstandshaltung zum Vorderfahrzeug. Integrierte Assistenzsysteme bieten das Potential, eine an die aktuelle Fahrsituation angepasste, fahrmanöverorientierte Unterstützung realisieren zu können.

Durch die Verknüpfung unterschiedlicher Teilfunktionen zu einem gesamtheitlichen System besteht die Möglichkeit, den Fahrer nicht nur in ausgewählten Fahrsituationen sondern auch bei Übergängen zwischen einzelnen Situationen zu unterstützen.

Im vorliegenden Beitrag wurden zwei unterschiedliche Reglerkonzepte vorgestellt, um den Fahrer bei Spurwechselvorgängen sowohl in Längs- als auch in Querrichtung in integrierter Form zu unterstützen. Beim ersten Konzept erhält der Fahrer eine haptische Lenkempfehlung, während er bei der zweiten Systemausprägung die Querführung des Fahrzeugs ohne führende Momente des Assistenzsystems übernimmt. Die Unterstützung durch die Fahrspurüberwachung des Assistenzsystems beschränkt sich in dieser Ausprägung bewusst auf eine haptische Spurverlassens- und Spurwechselwarnung. Im Bereich der Längsführung erfolgt bei beiden Konzepten in Abhängigkeit von der Querbewegung des eigenen Fahrzeugs eine autonome Geschwindigkeits- und Abstandsanpassung an die jeweilige Fahrsituation. Da im Vergleich zu herkömmlichen ACC-Systemen Verkehrsteilnehmer nicht nur auf der eigenen Fahrspur sondern auch auf benachbarten Fahrstreifen berücksichtigt werden, kann das realisierte Systemverhalten dem menschlichen Fahrverhalten bereits sehr nahe kommen. Trotz des hohen Unterstützungsgrades verbleibt der Fahrer

ganz im Sinne des ConnectedDrive-Konzeptes bei beiden Systemausprägungen mit seinen Fähigkeiten und Freiheiten im Regelkreis der Fahrzeugführung.

In der Vergangenheit wurden Assistenzsysteme weitgehend auf Basis eines Umfeldsensors entwickelt und realisiert, beispielsweise ein ACC-System auf Basis eines dediziert ausgelegten Fernbereichradars. Sowohl die Assistenzfunktion als auch der Einsatzbereich des Systems waren meist unmittelbar mit den Eigenschaften des verwendeten Sensors verknüpft.

Voraussetzung für neue integrierte Systeme ist eine ausreichende sensorische Erfassung aller relevanten Situationsfaktoren. In zukünftigen Assistenzsystemen werden die Daten mehrerer Umfeldsensoren fusioniert werden, um die aktuelle Fahrsituation besser erfassen und interpretieren zu können. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Fahrer auch bei anspruchsvollen Fahrmanövern wie Spurwechselforgängen gezielt, umfassend und nahtlos zu unterstützen.

Weiterhin ist in künftigen Multisensor-Konfigurationen die Schwierigkeit zu berücksichtigen, dass sich die Wahrnehmung des Menschen und die Umfelderkennung mittels Sensorik unterscheiden und ihre spezifischen Stärken und Schwächen aufweisen. Während der Mensch aufgrund seiner Erfahrungen auch auf neue und unvorhergesehene Situationen schnell und flexibel reagieren kann, sind die Stärken der Sensorik bei der genauen, schnellen und ununterbrochenen Erfassung physikalischer Größen wie z. B. Abstände oder Geschwindigkeiten zu sehen. Die Herausforderung von BMW ConnectedDrive besteht darin, die Stärken von Fahrer und Assistenzsystem gezielt zu verknüpfen, um eine möglichst hohe Leistungsfähigkeit des gesamten Systems zu erreichen.

9 Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$d_{FC, \text{ soll}}$	m	Sollabstand zu FC
$d_{FC, \text{ soll, min}}$	m	minimaler Sollabstand zu FC
$d_{FL, \text{ soll}}$	m	Sollabstand zu FL
$d_{FL, \text{ soll, min}}$	m	minimaler Sollabstand zu FL
d_{sec}	m	vom Fahrer vorgegebener Sollabstand
k_{FC}	–	Proportionalitätsfaktor bzgl. des Sollabstands zu FC

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$k_{FC, \min}$	–	minimaler Proportionalitätsfaktor bzgl. des Sollabstands zu FC
k_{FL}	–	Proportionalitätsfaktor bzgl. des Sollabstands zu FL
$k_{FL, \min}$	–	minimaler Proportionalitätsfaktor bzgl. des Sollabstands zu FL

Wichtige Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ACC	Active Cruise Control
FC	front center vehicle
FL	front left vehicle
HC	Heading Control
INVENT	intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
IQL	integrierte Quer- und Längsführung
RL	rear left vehicle
SpWarn	Spurwechselwarnung
TTC	Time To Collision

10 Literatur

- [1] Ergebnisbericht INVENT „erfahren“ – mobil mit 8 Sinnen
Gemeinsamer öffentlicher Abschlussbericht der Projektpartner, 2005
Bezug über: INVENT Büro, Internet: <http://www.invent-online.de> bzw.
<http://www.invent-online.de/de/downloads/INVENT%20Ergebnisbericht.pdf>

- [2] EHMANN, D.
Simulationsmodell des menschlichen Spurwechselverhaltens
Der Fahrer im 21. Jahrhundert
VDI Berichte, Nr. 1613
VDI Verlag
Düsseldorf, 2001

- [3] RASSHOFER, R.; GRESSER, K.
Multifunktionale Fahrumgebungserfassung durch lidarbasierte Rundumsensorik
4. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2006
Löwenstein, 4.-6.10.2006 (in Vorbereitung)

- [4] EHMANN, D.; ZAHN, P.; SPANNHEIMER, H.; FREYMAN, R.
Integrated Longitudinal and Lateral Guidance Control
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift
4/2003 105. Jahrgang April 2003
ISSN 0001-2785
Vieweg Verlag / GWV Fachverlage GmbH
Wiesbaden, 2003

- [5] EHMANN, D.; ZAHN, P.
Konzept einer integrierten Fahrerassistenz am Beispiel eines Querführungsas-
sistenten
11. Aachener Kolloquium für Fahrzeug- und Motorentechnik
Aachen, 2002