

# Der BMW TrackTrainer – automatisiertes Fahren im Grenzbereich auf der Nürburgring Nordschleife.

---

Dr.-Ing. Peter Waldmann, Dipl.-Ing. Daniel Niehues  
BMW Group Forschung und Technik  
Hanauer Straße 46, 80992 München, Tel.: 089 38260749  
{Peter.WA.Waldmann, Daniel.Niehues}@bmw.de

## Kurzfassung

Neben der regelungstechnischen Beherrschbarkeit des automatisierten Fahrens im Grenzbereich ist die Bestimmung einer cm-genauen Fahrzeugposition die Schlüsseltechnologie vieler zukünftiger Fahrerassistenzfunktionen. In diesem Beitrag wird am Beispiel der automatisierten Umrundung der Nürburgring Nordschleife das große Potential eines Algorithmus zur hochgenauen Fahrzeugpositionierung und eines Regelungskonzeptes zum Fahren auf vorgegebenen Bahnen vorgestellt.

## 1. Einleitung und Motivation

Der von der BMW Group Forschung und Technik entwickelte und im BMW Fahrertraining eingesetzte TrackTrainer ist ein modernes Assistenzsystem, mit dessen Hilfe der Fahrer an die Ideallinie unterschiedlichster Rennstrecken herangeführt werden soll. Realisiert wird dies durch einen mehrstufigen assistenzgestützten Lernprozesses (Bild 1).



Bild 1: Die drei Lernphasen des TrackTrainers. Der Grad der Unterstützung nimmt beginnend von Phase 1 kontinuierlich ab [1].

In der ersten Phase umrundet das Fahrzeug die Rennstrecke auf der Ideallinie völlig autonom. Der Fahrer sitzt dabei hinter dem Steuer und kann so die Ideallinie aus der richtigen Perspektive erleben. In der zweiten Phase lenkt der Fahrer das Fahrzeug selbst und erhält haptische, akustische und optische Informationen über die aktuelle Güte der Fahrt. In einer dritten und letzten Phase fährt der Fahrer völlig frei und ohne Unterstützung auf der Strecke. Dabei werden alle für eine objektive Beurteilung der Fahrt benötigten Daten aufgezeichnet. Im Anschluss an diese Fahrt werden die Daten von einem Trainer am Computer in Form einer Offline-Animation ausgewertet und mit dem Fahrer detailliert analysiert.

Die regelungstechnische Beherrschbarkeit des automatisierten Fahrens im Grenzbereich und die Bestimmung einer cm-genauen Fahrzeugposition in Bezug zur hinterlegten Solltrajektorie bilden nicht nur die technologische Basis für den TrackTrainer, sondern auch für die Entwicklung weiterer hochautomatisierter Fahrfunktionen, wie beispielsweise dem Nothalteassistenten [2], der bei plötzlich auftretendem körperlichen Unvermögen des Fahrers die Kontrolle über das Fahrzeug übernimmt und ein abgesichertes Anhaltemanöver durchführt.

Die Nürburgring Nordschleife zählt zu den anspruchsvollsten Strecken der Welt. Sie stellt aufgrund der unebenen Fahrbahn, der überhöhten Steilkurven und des breiten Geschwindigkeitsspektrums nicht nur extreme Anforderungen an die Regelung, sondern wegen der mangelhaften GPS-Verfügbarkeit auch die höchsten Anforderungen an die Positionsbestimmung. Aus diesem Grund wurde die Nordschleife gezielt als Referenzstrecke gewählt und alle Algorithmen dort appliziert und getestet.

## **2. Positionsbestimmung**

In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen des TrackTrainers an die Positionsbestimmung abgeleitet. In einem nächsten Schritt wird das derzeit verwendete Verfahren, die Fusion von hochgenauen GPS-Daten mit inertialen Fahrzeugdaten, kurz beschrieben und die damit verbundenen Grenzen des TrackTrainers der ersten Generation aufgezeigt. Anschließend wird der Einsatz einer videobasierten Spurerkennung auf der Nürburgring Nordschleife diskutiert und das große Potential der Sensordatenfusion vorgestellt.

### **2.1 Anforderungen an die Positionsbestimmung**

Analog zur Reproduzierbarkeit von Fahrten professioneller Fahrer soll die maximale Abweichung quer zur Fahrtrichtung während der automatisierten Umrundung nicht mehr als 40 cm betragen. Basierend auf dieser maximal tolerierbaren Abweichung lässt sich die erforderliche Genauigkeit der Positionsbestimmung sehr leicht ermitteln. Geht man davon aus, dass die Abweichung des geregelten Fahrzeuges quer zur Sollvorgabe im mitteldynamischen Bereich nicht mehr als 30 cm beträgt, darf der restliche Fehler nicht

größer als 10 cm sein. Darin enthalten ist sowohl der Fehler beim Aufzeichnen der Sollvorgabe, als auch der Fehler beim automatisierten Abfahren. Das Positionsbestimmungsverfahren muss folglich eine Genauigkeit kleiner als 5 cm bezogen auf die Querabweichung der Sollvorgabe aufweisen. In Längsrichtung kann ein größerer Fehler toleriert werden. Damit der Übergang von Gerade zu Kurve beziehungsweise die Fahrt durch eine Kurve mit ausreichender Genauigkeit dargestellt werden kann, benötigt man eine Updaterate des Positionssensors von 25 Hz. Analog dazu darf die Totzeit nicht mehr als 40 ms betragen. Darüberhinaus muss die Positionierung auch im fahrphysikalischen Grenzbereich (Querbeschleunigung =  $10 \text{ m/s}^2$ ) und bei hohen Geschwindigkeiten (bis 250 km/h) fehlerfrei arbeiten.

## 2.2 GPS gestützte Inertialplattform

Die Positionsbestimmung des TrackTrainers wird derzeit noch ausschließlich über die Kopplung von inertialen Fahrzeugdaten mit cm-genauen GPS-Messungen realisiert. Einen Überblick über die Vor- und Nachteile der Einzelsysteme gibt Bild 2. Nach heutigem Stand der Technik werden beide Verfahren in einem Kalman-Filter fusioniert [3] und damit die Vorteile beider Verfahren in einer so genannten GPS gestützten Inertialplattform [4] miteinander kombiniert.

	hochgenaues GPS (CDPGS)	Inertialsystem (INS)	= GPS gestützte Inertialplattform
langzeitstabil	✓	✗	✓
robust	✗	✓	✓
Genauigkeit < 5 cm	2 cm	driftet stark	2 cm
Abtastzeit > 25 Hz	20 Hz	bis zu 1000 Hz	100 Hz
Totzeit < 40 ms	min. 50 ms	bis zu 1 ms	4 ms

Bild 2: Vergleich der Satellitennavigation mit der Integration der Beschleunigungen und Drehraten eines Inertialsystems. Beide Systeme ergänzen sich optimal.

Wie aus Bild (2) ersichtlich erfüllt eine GPS gestützte Inertialplattform alle unter 2.1 beschriebenen Anforderungen. Bei langen oder immer wiederkehrenden GPS-Ausfällen, wie dies auf der Nürburgring Nordschleife der Fall ist, kommt sie allerdings schnell an ihre Grenzen (siehe Bild 3). Darüberhinaus können Reflexionen der GPS-Signale an Bäumen oder Gebäuden zu einer fehlerhaften Positionsberechnung führen. Der TrackTrainer der ersten Generation kann zwar auf Rennstrecken mit guter GPS-Abdeckung eingesetzt werden, auf der Nordschleife ist dies allerdings aufgrund der schlechten GPS-Bedingungen nicht möglich.

Um diese Grenzen aufzuheben und den TrackTrainer der zweiten Generation ohne Einschränkungen einsetzen zu können, bedarf es deshalb der Einbindung weiterer redundanter und heterogener Sensoren, die analog zu GPS-Systemen, zu jedem Zeitschritt ohne Kenntnis der zeitlichen Historie eine absolute Position ermitteln können.

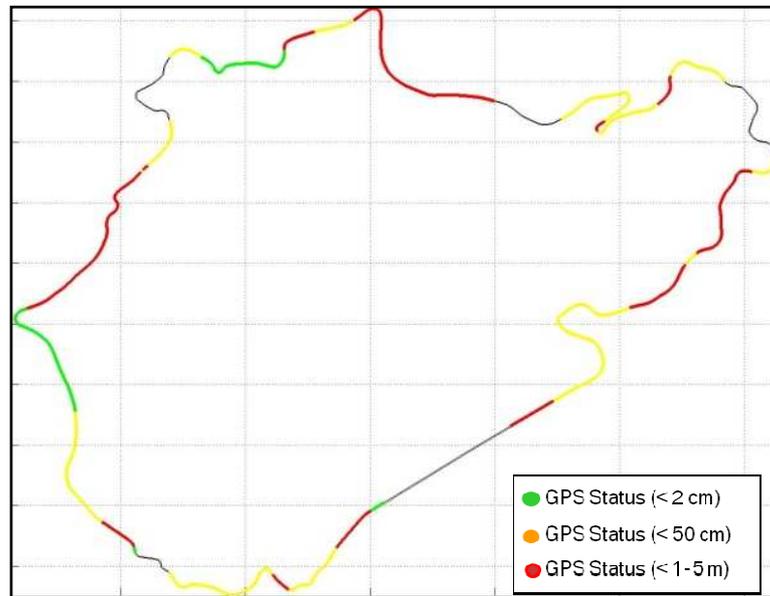


Bild 3: Die Güte der Positionsbestimmung einer GPS gestützten Inertialplattform [4] bei einer Fahrt auf der Nürburgring Nordschleife.

### 2.3 Videobasierte Spurerkennung und digitale Karte

Einen Überblick relevanter Signalquellen zur Erweiterung der Positionsbestimmung gibt Niehues in [5]. Das größte Potential für den Einsatz auf der Nürburgring Nordschleife besitzt demnach eine videobasierte Spurerkennung in Verbindung mit einer hochgenauen digitalen Karte.

Die videobasierte Spurmarkierung liefert eine Querablage und eine Kurswinkeldifferenz zur Spurmarkierung. Beide Größen sind relative Messgrößen, die lediglich die Lage des Fahrzeuges bezüglich der Fahrbahnmarkierung beschreiben. Ist die absolute Position der Spurmarkierung bekannt, können die relativen Größen einfach in absolute Größen umgerechnet werden. Auf diese Weise erhält man wie unter 2.3 gefordert eine zu GPS-Systemen redundante Information, die ohne Kenntnis der zeitlichen Historie zu beliebigen Zeitschritten bestimmt werden kann.

Die absoluten Positionsdaten der Spurmarkierungen werden im Vorfeld vermessen und in Form einer hochgenauen digitalen Karte abgespeichert. Hierfür wird die Strecke zunächst mit einem Versuchsfahrzeug abgefahren und die GPS-Rohwerte sowie die Beschleunigungs- und Drehrateninformationen eines Inertialsystems [6] wie auch die Daten der videobasierten

Spurerkennung aufgezeichnet. In einem zweiten Schritt wird die Fahrlinie in einem komplexen Post-Processing Verfahren [7] ermittelt. Durch das Post-Processing Verfahren können auch bei schlechten GPS-Bedingungen ausreichend gute Genauigkeiten erzielt werden. Dieses Verfahren ist allerdings nicht echtzeitfähig. In einem zweiten Schritt werden die Messdaten des Kamerasystems mit den prozessierten Positionsdaten synchronisiert, in absolute Koordinaten umgerechnet und in einer digitalen Karte abgelegt.

Einen Überblick über die Verfügbarkeit der Bildverarbeitung auf der Nürburgring Nordschleife gibt Bild 4. Auf Grund der schlecht gezeichneten und stark verschmutzten Spurmarkierungen sieht die Kamera diese nicht überall. Weitere Einflüsse, die die Erkennung der Fahrbahnmarkierungen negativ beeinflussen, sind die engen Kurvenradien, die Breite der Fahrbahn und die Dynamik des Fahrzeuges beziehungsweise die damit verbundenen Aufbaubewegungen.

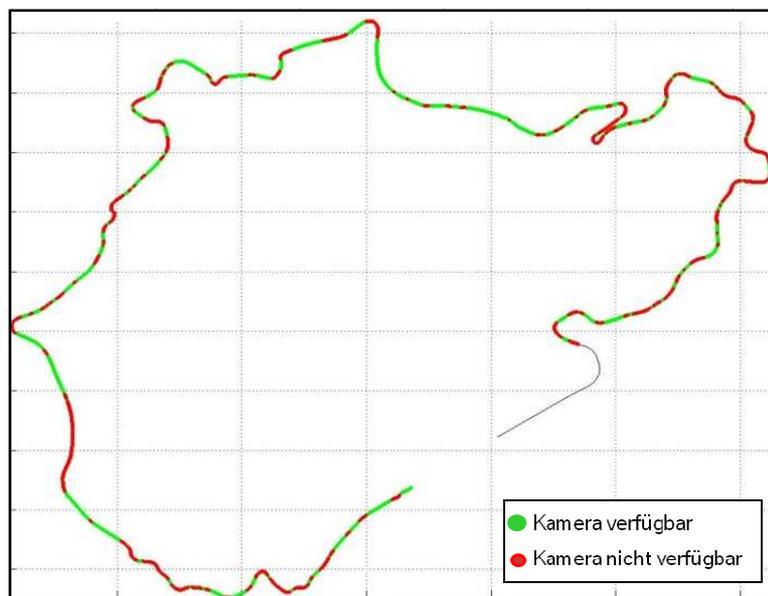


Bild 4: Die Güte der videobasierten Spurerkennung bei einer Fahrt auf der Nürburgring Nordschleife.

Das eingesetzte Bildverarbeitungssystem wurde ursprünglich für den Einsatz auf Autobahnen konzipiert. Für den Einsatz auf Rennstrecken könnte man durch Erweiterungen der Algorithmen die Verfügbarkeit der Spurerkennung noch deutlich steigern. Beispielsweise ließe sich mit Hilfe der Karteninformationen eine ‚Region of interest‘ bestimmen, in der die Fahrbahnmarkierung vermutet wird. Weiteres Potential liefert die Kompensation der Aufbaubewegung.

## 2.4 Sensordatenfusion

Wie aus Bild 3 und Bild 4 deutlich hervorgeht reicht weder die Verfügbarkeit einer GPS gestützten Inertialplattform noch die Verfügbarkeit einer videobasierten Spurerkennung aus, eine flächendeckende Positionsbestimmung auf der Nürburgring Nordschleife zu gewährleisten. Fusioniert man jedoch alle Signalquellen in einem Kalman-Filter (siehe Bild 5) erreicht man die erforderliche Verfügbarkeit bei Einhaltung der unter 2.1 beschriebenen Anforderungen.

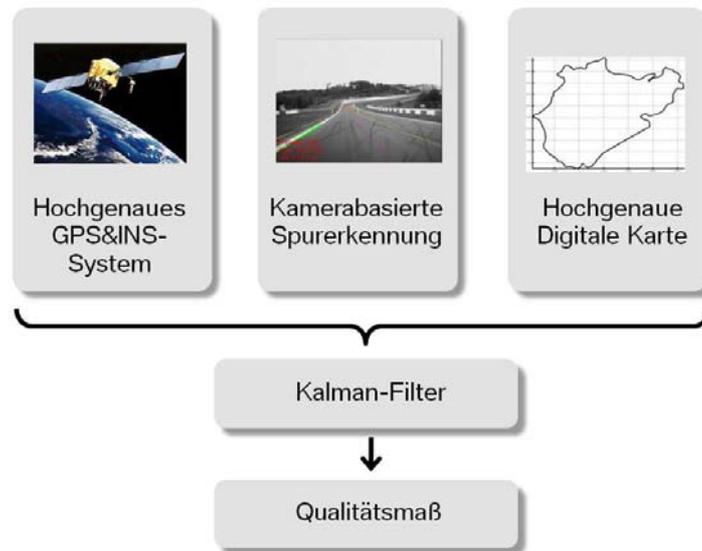


Bild 5: Architektur des für den Einsatz auf der Nordschleife entwickelten Positionsfilters

Um die Sicherheit beim automatisierten Fahren auf der Ideallinie zu gewährleisten wird kontinuierlich ein Qualitätsmaß der Positionsbestimmung berechnet. Dieses bildet die Basis für eine von der Positionsgüte abhängigen Online-Trajektorienplanung. Bei einer Verschlechterung des Qualitätsmaßes wird die Ideallinie in Richtung Fahrbahnmitte verschliffen und der Fahrer gewarnt.

Auf der Nürburgring Nordschleife beträgt die Verfügbarkeit der Einzelsysteme rund 50 Prozent. Es liegen folglich sehr selten die Informationen beider Einzelsysteme vor. Fehler der Einzelsysteme wirken sich schnell negativ auf das fusionierte Ergebnis aus. Wirft man hingegen einen Blick auf die Verfügbarkeit der Einzelsysteme auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen, so steigt der Wert schnell auf über 90 Prozent. Nun wird auch das große Potential des in Bild 5 dargestellten Fusionskonzeptes für automatisierte Fahrfunktionen wie beispielsweise dem Nothalteassistenten [2] deutlich. Ein Fehler in einem der Einzelsysteme kann durch die Fusion der redundanten Informationen kompensiert werden. Für Autobahnen und autobahnähnliche Straßen erhält man mit dem oben beschriebenen Ansatz folglich eine redundante und damit auch sehr robuste Positionsbestimmung. Voraussetzung hierfür ist natürlich das Vorhandensein einer hochgenauen digitalen Karte.

### 3. Fahrzeugregelung

Für die automatisierte Umrundung der Nordschleife bedarf es sowohl eines Querreglers, der das Fahrzeug kontinuierlich auf der Ideallinie führt, als auch eines Längsreglers, der die Geschwindigkeitsvorgabe umsetzt. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Anforderungen und Randbedingungen an die Regelung zusammengefasst. Anschließend werden die eingesetzten Algorithmen vorgestellt.

#### 3.1 Anforderungen und Randbedingungen an die Regelung

Analog der Ergebnisse eines Fahrversuches mit professionellen Fahrern (siehe Kapitel 2.1) sollen die Querablagen bei der automatisierten Umrundung kleiner als 30 cm sein und die Geschwindigkeitsabweichung nicht mehr als 5 km/h betragen. Obwohl der TrackTrainer ausschließlich im mitteldynamischen Bereich bis Querbeschleunigungen kleiner  $7 \text{ m/s}^2$  eingesetzt wird, soll die Funktionalität der Querführung bis zum fahrphysikalischen Grenzbereich bei eingeschalteten Stabilisierungssystemen stabil gewährleistet sein. Hierbei können auch größere Querablagen als 30 cm toleriert werden, sie sollten aber dennoch nicht größer als 50 cm sein.

Die Solltrajektorie liegt in Form einer hochgenauen digitalen Karte vor. Krümmung, Steigung, Fahrbahnneigung, Sollgeschwindigkeit und Sollbeschleunigung sind bekannt.

#### 3.2 Querregelung

Um das Wissen aus der digitalen Karte, optimal zu nutzen werden schon bei der Beschreibung des dynamisch Zustandsmodells die Störgrößen  $s$  (Fahrbahnneigung und Fahrbahnkrümmung) berücksichtigt (siehe Bild 6). Hinter der Eingangsgröße  $u$  verbirgt sich der Lenkwinkel, als Ausgangsgrößen  $y$  werden Querablage und Winkelfehler festgelegt. Der Zustandsvektor  $z$  setzt sich zusammen aus Winkelfehler, Querablage, Schwimmwinkel und Gierrate.

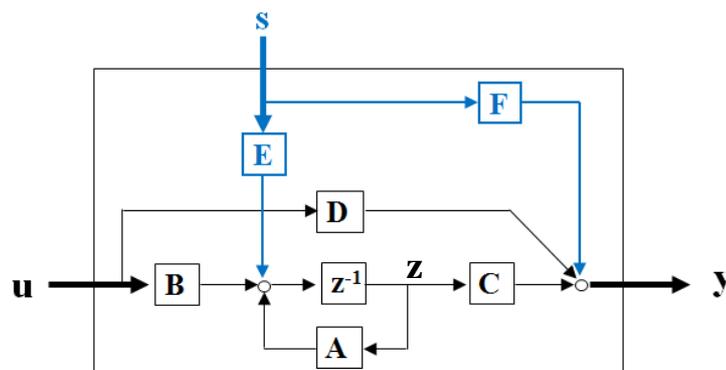


Bild 6: Dynamisches Zustandsmodell mit Störgrößenaufschaltung

Nach der Beschreibung des Zustandsmodells wird das Regelziel in Form des Gütefunktionals  $J$  mit den Gewichtungsmatrizen  $\mathbf{Q}$  und  $\mathbf{S}$  beschrieben.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=k}^K \left( \mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{y}_i + \mathbf{u}_i^T \mathbf{S}_i \mathbf{u}_i \right) \quad (1)$$

Hieraus erkennt man schnell den Unterschied zum klassischen Entwurf nach Riccati, wie er beispielsweise in [8] beschrieben ist. Der erste quadratische Term enthält ein Maß für die Abweichung zur Ausgangsgröße  $\mathbf{y}$ , jeweils gegeben zu den Diskretisierungspunkten  $i$ . Der zweite quadratische Term unterscheidet sich nicht vom klassischen Entwurf und beschreibt die Bestrafung des Stellaufwandes. Im Gegensatz zum Entwurfsverfahren nach Riccati, besitzt das Gütefunktional einen begrenzten Optimierungshorizont  $K$ . Das bedeutet für die Regelung, dass das Ergebnis nicht in unendlicher Zeit, sondern schon zu einem definierbaren Zeitpunkt optimal ist. Da es sich um ein zeitdiskretes Optimierungsproblem handelt, kann für die Lösung das Prinzip der dynamischen Programmierung von Bellman [9] gewinnbringend eingesetzt werden. Auf diese Weise erhält man einen, wie in Bild 7 dargestellten, optimalen Zustandsregler mit instationärer Vorsteuerung der Störgrößen für einen gegebenen Optimierungshorizont. Die Informationen der digitalen Karte werden dabei optimal genutzt.

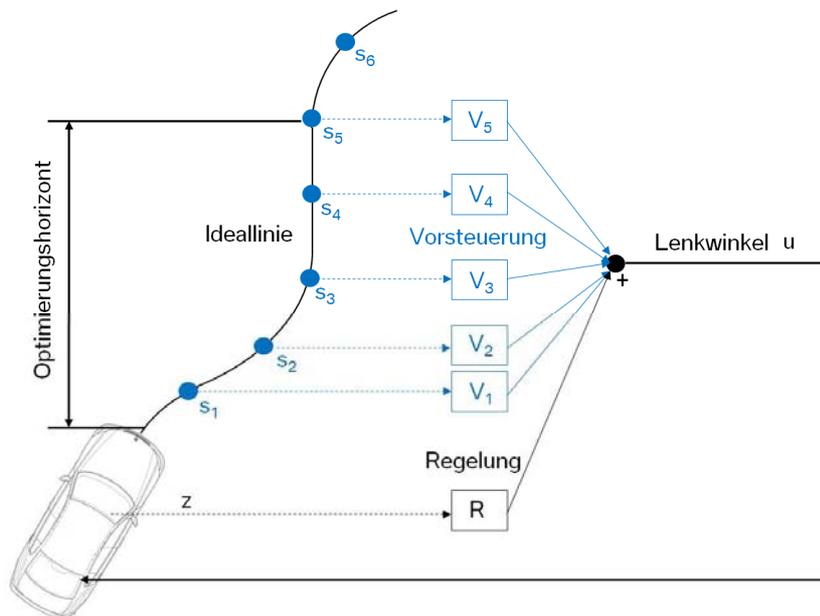


Bild 7: Optimaler Zustandsregler mit instationärer Vorsteuerung der Störgrößen

Fahrversuche auf der Nürburgring Nordschleife zeigten, dass der vorgestellte Querregler alle Anforderungen erfüllt (siehe Bild 8). Im mitteldynamischen Bereich beträgt die Querabweichung zur Sollvorgabe weniger als 30 cm. Die Querabweichungen werden auch im Grenzbereich bei Eingriffen der Stabilitätskontrolle nicht größer als 50 cm.

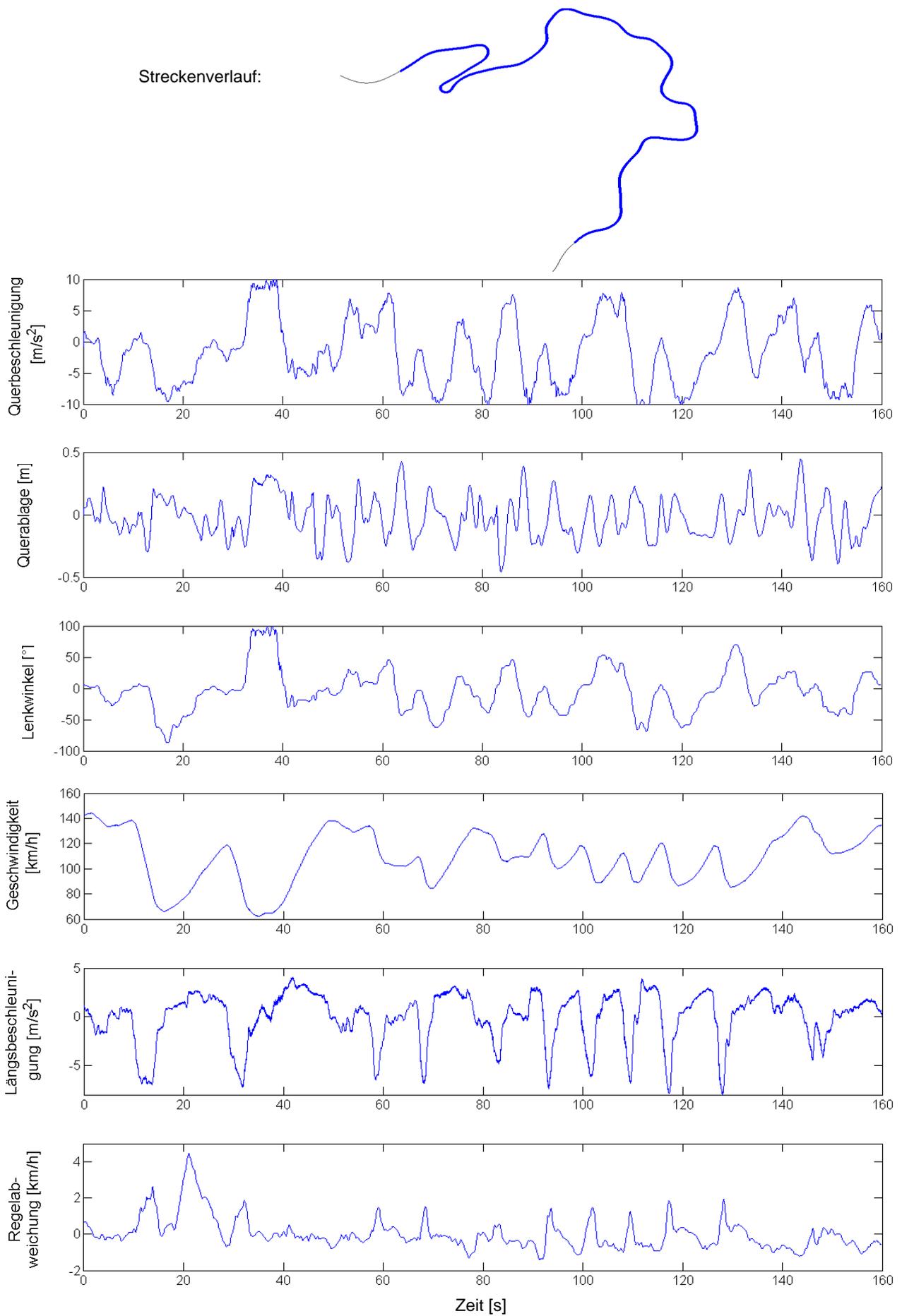


Bild 8: Messdaten einer automatisierten Fahrt auf der Nürburgring Nordschleife (Klostertal – Karussell – Hohe Acht – Wippermann – Eschbach – Brünchen – Pflanzgarten)

### 3.3 Längsregelung

Analog zu dem Entwurf des Querreglers soll auch für die Längsregelung das in der digitalen Karte enthaltene Wissen über die gespeicherte Solltrajektorie optimal genutzt werden. Die Sollbeschleunigungen und die Steigungen der Fahrbahn lassen sich einfach in Antriebskräfte umrechnen und mit der Luft- und Rollwiderstandskraft zusammen vorsteuern. Die Geschwindigkeitsdifferenz wird von einem klassischen PD-Regler ausgeregelt. Um die Latenz  $t_{komp}$  der Aktuatoren zu kompensieren, werden nicht die Daten für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung an dem aktuellen Wegpunkt  $s_{ist}$  aus der Karte entnommen, sondern die Daten für den um die Vorausschauzeit  $t_{komp}$  prädierten Wegpunkt  $\tilde{s}$ . Das Blockschaltbild des eingesetzten Längsreglers zeigt Bild 9. Wie aus Bild 8 deutlich hervorgeht liegen die Geschwindigkeitsdifferenzen wie gefordert auch bei starken Verzögerungen und Beschleunigung unter 5 km/h.

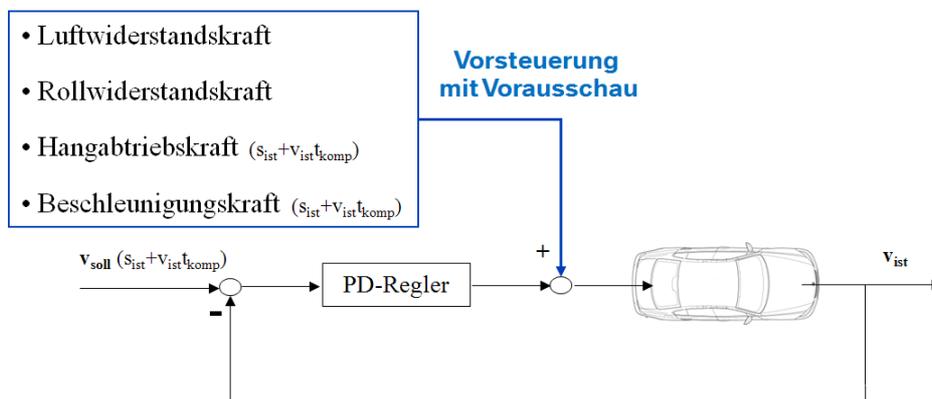


Bild 9: Längsregelung mit prädiktiver Vorsteuerung zur Kompensation von Latenzen

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf den in diesem Beitrag vorgestellten Verfahren zur Fahrzeugpositionierung und Fahrzeugregelung konnte am 21.10.2009 zum ersten Mal in der Geschichte des Nürburgrings die Nordschleife nahe dem fahrphysikalischen Grenzbereiches automatisiert umrundet werden [10].

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die Entwicklung zukünftiger hochautomatisierter Systeme der aktiven Sicherheit, die in einer Notsituation die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Diese Systeme stellen vor allem neue Anforderungen an die Robustheit und die Genauigkeit der Fahrzeuglokalisierung. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden bedarf es der Einbindung weiterer redundanter und heterogener Sensorkonzepte wie beispielsweise eine lidarbasierte Randbebauungserkennung [11].

## 5. Literatur

- [1] Waldmann, P.: Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems zum Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken, Shaker Verlag, Band 1,2009
- [2] Waldmann, P; Kaempchen, N.; Ardelt, M.; Homm, F.: Der Nothalteassistent – abgesichertes Anhalten bei plötzlicher Fahruntfähigkeit des Fahrzeugführers, Ambient Assisted Living Forum, Berlin, 2010
- [3] Niehues, D.: Untersuchung zur präzisen und zuverlässigen Bestimmung der Fahrzeugposition und –ausrichtung. Diplomarbeit Institut für Verkehrsinformationssysteme der TU Dresden, Dresden, 2006
- [4] Firma Oxford Technical Solutions: Datenblatt GPS-gestützte Inertialplattform: RT3002, <http://oxts.co.uk>
- [5] Niehues, D.: Methoden zur hochgenauen Positionsbestimmung von Fahrzeugen im Bereich Fahrerassistenzsysteme durch Sensordatenfusion von GPS und weiterer Sensorik, 42. Regelungstechnisches Kolloquium, Boppard, 2008
- [6] Firma iMar: Datenblatt iTraceRT-F200, <http://imar-navigation.de>
- [7] Kennedy, S; Cosandier, D.; Hamilton, J.: GPS/INS Integration in Real-Time and Post-processing with Novatel’s SPAN System; IGNSS Symposium, Sydney, 2007
- [8] Föllinger, O.: Regelungstechnik-Einführung in die Methoden und ihre Anwendung, Hüthig Buch Verlag 7. Auflage, Heidelberg 1992F
- [9] Bellman, R. E.: Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957
- [10] Thomas J.: ‚Höllens-Trip‘, Auto Motor und Sport Magazine, Heft 25, November 2009, <http://www.auto-motor-und-sport.de>
- [11] Homm, F.; Duda, A.; Kaempchen, N.; Waldmann, P.; Ardelt, M.: Lidarbasierte Fahrstreifen- und Randbebauungserkennung mit Occupancy Grids für Spurhalte- und Spurwechselfunktionen, 4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2010