

ABC PRE-SCAN: Das aktive Fahrwerk mit Vorausschau

ABC PRE-SCAN: The Active Suspension with Preview

Dr.-Ing. Ralph Streiter

Daimler AG Sindelfingen

Active Suspensions

Group Research & Advanced Engineering

1 Zusammenfassung

PRE-SCAN fasst die Möglichkeiten eines aktiven Fahrwerks mit der lasergestützten Fahrbahnhöhenprofilerkennung durch ein integrales Regel- und Steuerkonzept zu einer einzigartigen Komfortfunktion zusammen. Die Fahrbahnhöhenprofilerkennung basiert auf einem statistischen Verfahren, das durch Scan-Matching die notwendige Beobachtungsgenauigkeit und Robustheit für die Regelung erreicht und die autonome vertikale Fahrzeugaufbaubewegung, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs über Grund sowie verschiedene weitere Sensorkorrekturen rekursiv schätzt. Der Entwurf der PRE-SCAN-Steuerung basiert auf einer modalen Betrachtung des geschlossenen Regelkreises und arbeitet nach dem Kompensationsprinzip harmonisch mit der ABC-Regelung zusammen. Das Ergebnis dieser Synthese ist ein außergewöhnlicher Fahrkomfort. Der Ansatz wurde erstmals in einem Fahrzeug umgesetzt. Messungen auf verschiedenen Fahrbahnen untermauern das Potenzial von PRE-SCAN. Das Konzept wurde anlässlich der IAA 2007 im Forschungsfahrzeug F700 unter dem Namen PRE-SCAN-Fahrwerk der Öffentlichkeit präsentiert und im Juni 2008 in Sevilla auf dem „Mercedes-Benz TecDay 2008“ der internationalen Presse vorgeführt.

Summary

Pre-Scan merges the possibilities offered by active suspension and laser-aided road surface profile sensing into a single function using an integral closed-loop and straightforward control concept. The road surface profile sensing technique is based on a statistical method that uses scan matching to achieve the required degree of observational accuracy and robustness for closed-loop control and that recursively estimates the autonomous vertical vehicle motion, the vehicle velocity and various other sensor corrections. The proposal for the straightforward Pre-Scan control system is based on a modal perspective of the closed control loop and interacts harmoniously with ABC in accordance with the compensation principle. The result of this synthesis is an increase in ride comfort. This approach has been realized in a vehicle for the first time. Measurements and test performed on various road surfaces underscore the potential that Pre-Scan holds. The concept was presented to the public at the IAA 2007 in the F700 research car under the name Pre-Scan Suspension.

2 Einleitung

Vorausschau umgibt uns im täglichen Leben. Der Mensch plant so ziemlich alles im Voraus, um Aufgaben bewältigen zu können, die er ohne Vorbereitung nicht meistern würde. Dies gilt auch für die Koordination der Bewegungsabläufe. Wie wichtig für den Menschen eine vorausschauende Bewegungsregelung ist, merken wir dann, wenn wir im Dunkeln gehen. Die Bewegung wird sofort unsicher und wir verlangsamen

unsere Bewegungsgeschwindigkeit stark. Vorausschau ist aus unserem Leben nicht wegzudenken.

Obwohl ein Fahrzeug ganz ähnliche Herausforderungen bei der Fortbewegung meistern muss, gibt es hier bisher keine Ansätze mit Vorausschau. Um die Analogie mit der menschlichen Bewegung wieder zu bemühen, fährt das Fahrzeug direkt an einen Bordstein, um sich dann quasi „aus dem Stand“ mit Motorkraft hochzudrücken. Es sollte klar sein, dass so etwas wesentlich mehr Kraft kostet und zu höheren Vertikalbeschleunigungen führt als die natürliche Bewegungsform, die schon vorher die Bewegung einleitet.



Bild 1: Natürliche Bewegungsform bei der Überwindung eines hohen Hindernisses. Durch die frühzeitige Einleitung der Bewegung wird die Überwindung des Hindernisses erst möglich

Fig. 1: Natural movement pattern for overcoming a high obstacle. Overcoming the obstacle is only possible through the early initiation of the movement.

Natürlich ist es wenig wahrscheinlich, dass ein Fahrzeug ein Hindernis, wie es in **Bild 1** dargestellt ist, überwinden muss. Das Beispiel erläutert aber, dass eine vorausschauende Bewegungsregelung den natürlichen Bewegungsformen entspricht. Und was im täglichen Leben gilt, ist in der Technik nicht anders. Gerade im Fahrwerksbereich wird es von Nutzen sein, das vorausliegende Straßenprofil zu kennen. Mit einer geeigneten Vorausschau-Strategie kann ein aktives Fahrwerk vorkonditioniert werden. Eine derartige vorausschauende Fahrwerksbeeinflussung ermöglicht es, nicht nur zu reagieren nachdem eine Fahrbahnunebenheit auf das Fahrzeug eingewirkt hat, sondern vielmehr zeitgleich oder sogar proaktiv zu handeln. Dies wird dem Fahrkomfort zugute kommen und die Insassen ein völlig neues Fahrgefühl erleben lassen. Gleichzeitig werden die Ressourcen des Fahrzeugs besser eingesetzt und Materialbelastung reduziert. Trotz der auf der Hand liegenden Vorteile einer vorausschauenden Fahrwerksregelung fehlten im Automobilbereich bisher entsprechende Ansätze. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe.

1. Eine vorausschauende Fahrwerksregelung erfordert aktives Handeln. Das Fahrzeug muss also über ein aktives Fahrwerk mit entsprechender Stellerdynamik verfügen.
2. Das vor dem Fahrzeug befindliche Fahrbahnhöhenprofil muss sicher erkannt werden. Sensoren, die eine Fahrbahnhöhenprofilschätzung ermöglichen, sind aber erst in den letzten Jahren entwickelt worden.

Die Voraussetzungen für die Umsetzung einer Fahrwerksregelung mit Vorausschau (PRE-SCAN) sind nun aber günstig.

Mit ABC [1] (**Bild 2**), dem ersten aktiven Fahrwerk in einem Serienfahrzeug, hat Mercedes-Benz seit 1999 die Möglichkeit, Aufbaubewegungen durch vier Hydraulikzylinder (**Bild 3**) zu regeln. Gleichzeitig nimmt die Qualität der sensorischen Erfassung der Fahrzeugumgebung weiter zu. Treibender Faktor der Tendenz zur perfekten Umfelderkennung ist die Vision vom unfallfreien Fahren [2].



Bild 2: Active Body Control erreicht eine Horizontierung des Fahrzeugs ohne den Vertikalkomfort zu verschlechtern.

Fig. 2: Active Body Control achieves a horizontal positioning of the vehicle without deteriorating the vertical comfort.



Bild 3: Das ABC-Federbein integriert einen Plunger (der auf eine Feder drückt) und einen dazu parallel angeordneten Dämpfer.

Fig. 3: The ABC suspension strut integrates a plunger (which pushes on a spring) and a shock absorber which is arranged in parallel for this purpose.

Im Folgenden wird dargelegt, wie das mit PRE-SCAN bezeichnete und auf der IAA 2007 von Mercedes-Benz erstmalig in dem Forschungsfahrzeug F700 (**Bild 4**) gezeigte aktive Fahrwerk mit Vorausschau eine Straßenerkennung auf Basis von Laserabtastung realisiert und durch einen integralen Entwurf von ABC-Regelung und PRE-SCAN-Steuerung einen außergewöhnlichen Komfort erzielt. In einem Versuchsträger gemessene Ergebnisse werden am Schluss dargestellt.



Bild 4: Das Forschungsfahrzeug F700 zeigte auf der IAA 2007 zum ersten Mal mit PRE-SCAN ein aktives Fahrwerk mit Vorausschau. Im darauf folgenden Jahr wurde PRE-SCAN in Sevilla auf dem „Mercedes-Benz TecDay 2008“ der internationalen Presse vorgeführt.

Fig. 4: The research vehicle F700 with PRE-SCAN presented at the IAA 2007 was the first to exhibit an active chassis with preventative control. In 2008, PRE-SCAN was exhibited to the international press in Seville.

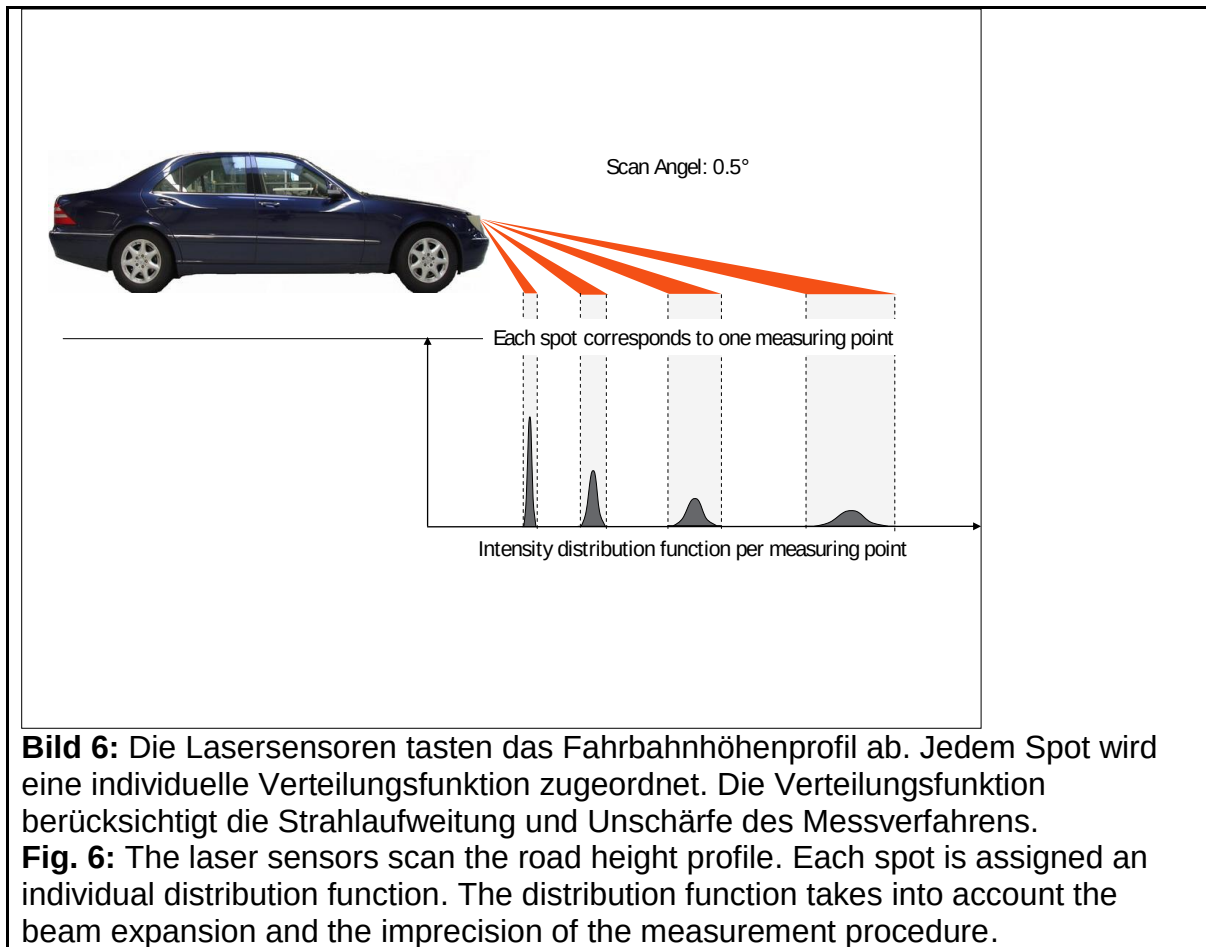
3 Die Höhenprofilschätzung

Die Ermittlung der Fahrbahnhöhenprofile vor den Vorderrädern ist eine Voraussetzung für das PRE-SCAN-Konzept. Zu diesem Zweck sind zwei Lasersensoren (**Bild 5**) in die Frontscheinwerfer des Fahrzeugs eingebaut, die Strahlen (Spots) mit einem Abtastwinkel von 0.5 Grad aussenden (**Bild 6**).



Bild 5: Die Lasersensoren der Firma Sick bieten günstige Voraussetzungen, um die Potenziale eines aktiven Fahrwerks mit Vorausschauregelung zu untersuchen.

Fig. 5: Laser sensors from SICK provide favorable preconditions for examining the potentials of an active chassis with preventative control.



Durch die unterschiedlichen Auftreffwinkel weiten sich die Spots auf der Straße unterschiedlich stark auf. Die Lasersensorik liefert für jeden einzelnen Spot i einen polaren Distanzwert D_i . Da durch Eigenbewegungen des Fahrzeugaufbaus Änderungen der Auftreffwinkel der Spots entstehen und somit die polaren Distanzwerte verändert werden, erfordert der Rekonstruktionsalgorithmus eine exakte Bestimmung der Aufbauposition gegenüber der Fahrbahn, um eine Kompensation dieses Messfehlers zu ermöglichen. Die Orientierung des Sensors in Relation zur Fahrbahn wird mit dem vertikalen Abstand z_{AF} und dem Nickwinkel n_{AF} angegeben. Da diese beiden Größen zu diesem Zeitpunkt unbekannt sind, wird approximativ mit den Ergebnissen aus dem letzten Iterationszyklus gerechnet. Aus einem polaren Entfernungswert D_i und dem zugehörigen Winkel $n_i + n_{AF}(t_0 - \Delta t)$ und der vertikalen Position $z_{AF}(t_0 - \Delta t)$ kann der kartesische Entfernungswert x_i und Höhenwert z_i für den Spot i berechnet werden.

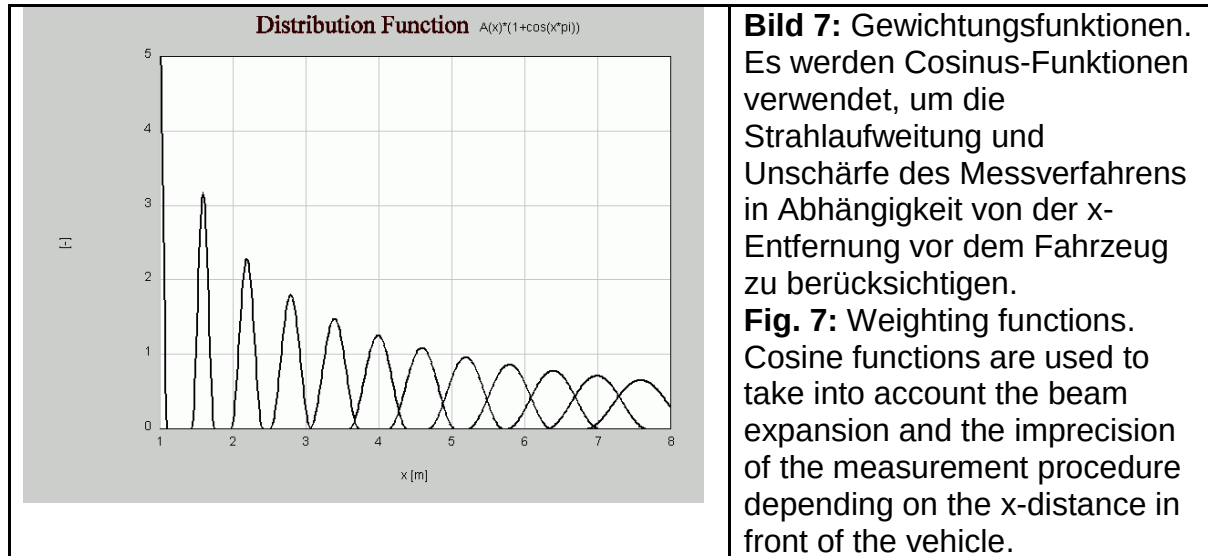
$$\begin{aligned} x_i &= (D_i + D_{Off}) \cdot \cos(n_i + n_{AF}(t_0 - \Delta t)) + x_{Korr}(v_x, \Delta T) \\ z_i &= (D_i + D_{Off}) \cdot \sin(n_i + n_{AF}(t_0 - \Delta t)) + z_{AF}(t_0 - \Delta t) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 1 a/b})$$

Tabelle 1: Variablendeklaration Straßenerkennung

n_i	Abstrahlwinkel des Spots i vom Lasersensor
x_i	Entfernungswerte des Spots i
z_i	Höhenwerte des Spots i

D_i	Polarer Distanzwert des Spots i
$z_{AF}(t)$	vertikaler Abstand des Lasersensors zur Fahrbahn zum Zeitpunkt t
$n_{AF}(t)$	Nickwinkel des Lasersensors in Relation zur Fahrbahn zum Zeitpunkt t
v_x	Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs
ΔT	Zeitverschiebung durch Mess- und Latenzzeiten
$x_{Korr}(v_x, \Delta T)$	Ortskorrekturterm in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Mess- und Latenzzeiten
D_{Off}	Messfehleroffset durch Remissionsänderungen auf unterschiedlich reflektierenden Oberflächen
$\underline{g}_i(x, t)$	Verteilungsfunktion für Spot i für den Messzeitpunkt t
$\hat{\underline{h}}_t(x)$	Höhenprofilschätzung zum Zeitpunkt t
$\hat{\underline{h}}_t^{pred}(x)$	Prediction der Höhenprofilschätzung zum Zeitpunkt t anhand eines Laserscandatenatzes
t_0	aktueller Messzeitpunkt
Δt	Rechnerzykluszeit

Auf diese Weise werden die polaren Daten in ein kartesisches Profil transformiert. Da die notwendige Messgenauigkeit und -sicherheit nur durch statistische Berechnung erreicht werden können, wird in [4] und [5] ein Verfahren vorgeschlagen, das durch gewichtete Mittelung und iterative Rekursionsrekonstruktion das Fahrbahnprofil berechnet. Dazu werden die nicht äquidistanten Entfernungs- und Höhenwerte x_i und z_i auf ein äquidistantes Wegraster verteilt und somit örtlich gerastert. Dem Spot i wird entsprechend seiner zugehörigen x-Koordinate x_i eine entfernungsabhängige und wegäquidistante Verteilungsfunktion $\underline{g}_i(x, t_0)$ (**Bild 7**) zugeordnet, die mit der entsprechenden z-Koordinate z_i verknüpft ist. Um eine Realisierung in Echtzeit gewährleisten zu können, wird eine Cosinus-Funktion gewählt (**Bild 7**), die auf den positiven z-Bereich beschränkt und an den Rändern abgeschnitten ist.



Durch gewichtete Mittelung aneinander grenzender und überlappender Spots entsteht eine erste Schätzung $\hat{h}_{t_0}^{pred}(x)$ für das Höhenprofil.

$$\hat{h}_{t_0}^{pred}(x) = \left(\sum_i g_i(x, t_0) \cdot z_i \right) / \left(\sum_i g_i(x, t_0) \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

Aus dieser Schätzung kann durch Regression mit dem bisher (aus dem vorhergehenden Schritt) beobachteten Höhenprofil eine Höhen- und Nickwinkelkorrektur Δz_{AF} und Δn_{AF} berechnet werden,

$$\hat{h}_{t_0-\Delta t}(x) = \hat{h}_{t_0}^{pred}(x) \cdot \Delta n_{AF} + \Delta z_{AF} \quad (\text{Gl. 3})$$

bzw. aufgelöst mit der Pseudoinversen

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{AF} \\ \Delta z_{AF} \end{bmatrix} = \text{pinv} \left(\begin{bmatrix} \hat{h}_{t_0}^{pred}(x) & \text{ones}(\hat{h}_{t_0}^{pred}(x)) \end{bmatrix} \right) \cdot \hat{h}_{t_0-\Delta t}(x) \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Regression kann durch gewichtete Normierung mit der Summe der Gewichtungsfunktionen $\left(\sum_i g_i(x, t_0) \right)$ gestützt werden.

Somit kann eine Iterationsvorschrift für z_{AF} und n_{AF} mit dem Relaxationskoeffizienten α definiert werden.

$$z_{AF}(t_0) = z_{AF}(t_0 - \Delta t) + \alpha \cdot \Delta z_{AF} \quad \text{mit } 0 < \alpha < 1 \quad \text{und} \quad \alpha = f \left(\sum_x \sum_i g_i(x, t_0) \right) \quad (\text{Gl. 5})$$

$$n_{AF}(t_0) = n_{AF}(t_0 - \Delta t) + \alpha \cdot \Delta n_{AF} \quad (\text{Gl. 6})$$

Mit den Korrekturwerten für $z_{AF}(t_0)$ und $n_{AF}(t_0)$ wird eine verbesserte Schätzung $\hat{h}_{t_0}^{korr}(x)$ des aktuell vorhergesagten Profils $\hat{h}_{t_0}^{pred}(x)$ durchgeführt.

$$\hat{\underline{h}}_{t_0}^{korr}(x) = \hat{\underline{h}}_{t_0}^{pred}(x) \cdot \Delta n_{AF} + \Delta z_{AF} \quad (\text{Gl. 7})$$

Alternativ kann die Iterationsgenauigkeit erhöht werden, indem mit den korrigierten Werten $\underline{z}_{AF}(t_0)$ und $\underline{n}_{AF}(t_0)$ die polaren Distanzwerte D_i erneut ausgewertet und daraus die kartesischen Entfernungswerte x_i und Höhenwerte z_i erneut berechnet werden. Unter Berücksichtigung der Echtzeitanforderungen wird diese Unteriteration bei gegenwärtigen Rechnerleistungen aber eher nicht zum Tragen kommen.

Zusammen mit dem bisher rekonstruierten Höhenprofil $\hat{\underline{h}}_{t_0-\Delta t}(x)$ aus dem letzten Iterationszyklus unter Berücksichtigung der damit verknüpften Gewichtungen kann nun eine neue Profilschätzung durchgeführt werden.

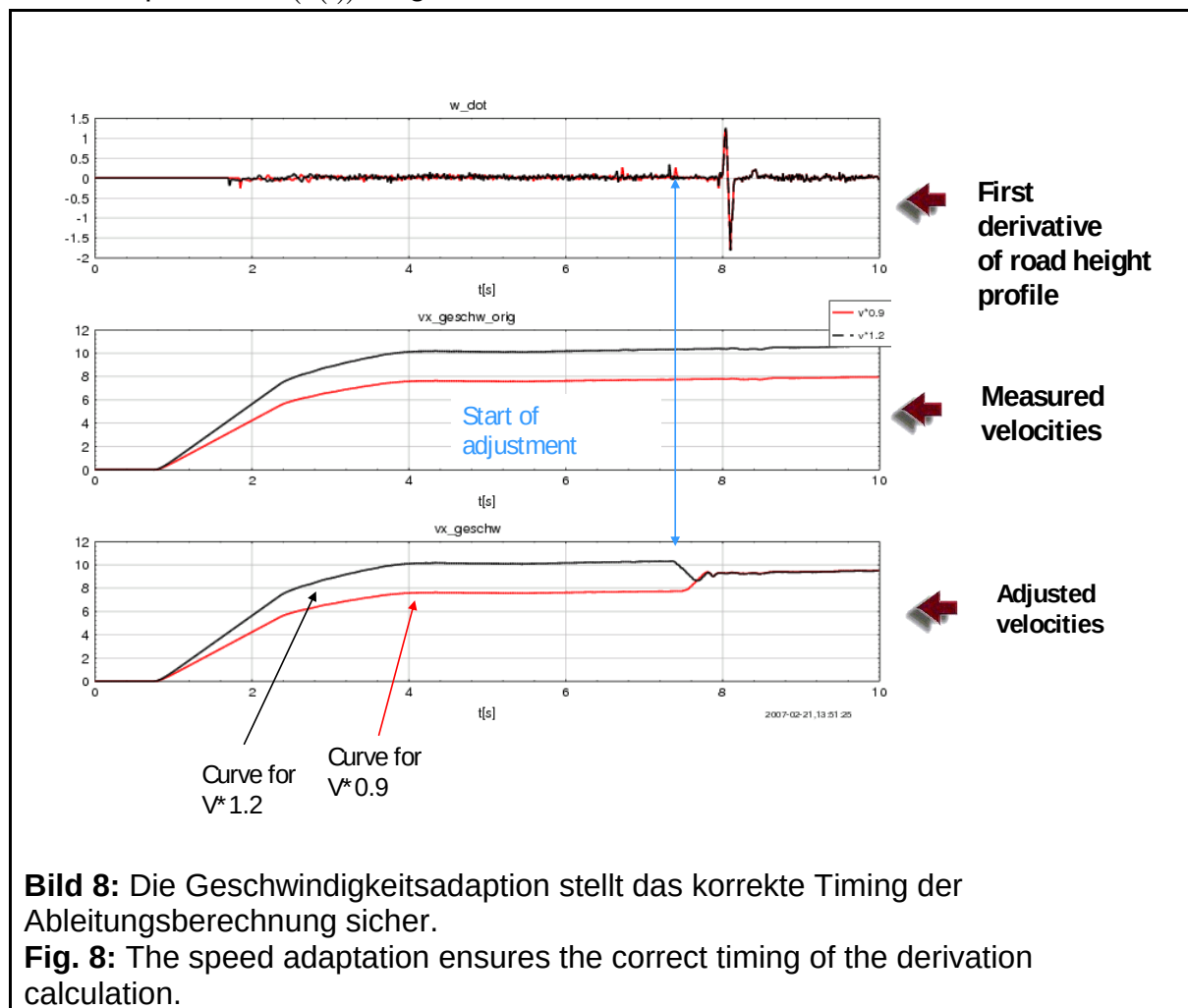
$$\hat{\underline{h}}_{t_0}(x) = \left[\hat{\underline{h}}_{t_0}^{korr}(x) \cdot \left(\sum_i \underline{g}_i(x, t_0) \right) + \hat{\underline{h}}_{t_0-\Delta t}(x) \cdot \left(\sum_{t=0}^{t_0-\Delta t} \sum_i \underline{g}_i(x, t) \right) \right] / \left[\left(\sum_i \underline{g}_i(x, t_0) \right) + \left(\sum_{t=0}^{t_0-\Delta t} \sum_i \underline{g}_i(x, t) \right) \right] \quad (\text{Gl. 8})$$

Hier sind nun die Scandaten aus dem vorhergehenden Messzyklus mit den aktuellen Daten verknüpft. Im nächsten Schritt wird das berechnete Profil entsprechend dem zurückgelegten Weg rechnerisch entgegen der Bewegungsrichtung unter dem Auto durchgeschoben. Ist so viel Weg zurückgelegt worden, dass das Fahrzeug über ein Fahrbahnprofil fährt, das bereits von den Lasersensoren mit ausreichender Genauigkeit erfasst wurde, wird die räumliche Orientierung des berechneten Fahrbahnprofils an die Fahrzeuglage angepasst. Auf diese Weise kann zwischen Fahrbahn- und Fahrzeugneigung unterschieden werden. Nach Beendigung eines Berechnungszyklusses beginnt die Datenakquisition der Lasersensoren von vorne. In dem nachfolgenden Iterationszyklus werden neue Daten zu dem bisherigen Straßenprofil statistisch hinzugefügt und wieder Positionsänderungen des Fahrzeugs durch Eigenbewegung ermittelt und kompensiert. Mit Voranschreiten des Iterationsvorganges steigt die Genauigkeit der Fahrbahnprofilschätzung. Im Ergebnis liefert das Verfahren eine Höhenprofilschätzung mit örtlich verteilten Fehlerangaben, die zur Beurteilung der Datenzuverlässigkeit genutzt werden.

3.1 Geschwindigkeitsadaption durch Korrelationsanalyse

Die Fahrgeschwindigkeit bestimmt das Timing des PRE-SCAN-Eingriffs. Ist dieses Timing fehlerhaft, kann ein möglicher Vorteil durch PRE-SCAN in einen Nachteil umgekehrt werden. Daher ist die Kenntnis der korrekten Geschwindigkeit des Fahrzeugs wesentlich für die Effektivität einer PRE-SCAN-Strategie. Geschwindigkeitsmessungen mit herkömmlichen Systemen wie ABS haben allerdings nur eine eingeschränkte Genauigkeit und können Justagefehler nicht korrigieren. Basierend auf der Überlegung, dass sich in aufeinander folgenden Lasersensordatensätzen das gleiche Fahrbahnprofil abbildet und eine x-Verschiebung der rekonstruierten Fahrbahnprofile von der Fahrgeschwindigkeit abhängen muss, wird eine autonome Geschwindigkeitsadaption in das Rekonstruktionskonzept integriert. Dazu wird die Korrelation zwischen zwei aufeinanderfolgend geschätzten Profilen bei rechnerischer Längsverschiebung untersucht und bei einer eindeutigen Richtungstendenz als Geschwindigkeitskorrekturfaktor für einen Iterationsprozess verwendet. Dabei müssen neben der ermittelten Verschiebungsrichtung die Zyklus- und Latenzzeiten

der Messdatenerfassung berücksichtigt werden. **Bild 8** zeigt exemplarisch an zwei Versuchsszenarien den Iterationsprozess. Die gemessene Fahrgeschwindigkeit ist jeweils mit einem Fehlerfaktor beaufschlagt (**Bild 8** Mitte). Ab Beginn der Adaption konvergieren beide Geschwindigkeiten auf den gleichen korrekten Geschwindigkeitsverlauf (**Bild 8** unten). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die erste Ableitung des Fahrbahnprofils tatsächlich zeitlich synchron berechnet wird (**Bild 8** oben). Die Kenntnis der Fahrgeschwindigkeit ist dabei nicht nur für das Timing des PRE-SCAN-Eingriffs entscheidend, sondern hat auch für die Berechnung der Fahrbahnkrümmung eine außerordentliche Bedeutung, da die Fahrgeschwindigkeit v_x quadratisch in die Berechnung der Krümmung aus dem Fahrbahnprofil $z = z(x(t))$ eingeht.



3.2 Genauigkeit der statistischen Fahrbahnhöhenrekonstruktion

Für die resultierende Performance eines PRE-SCAN-Eingriffs ist auf der einen Seite eine robuste Fahrwerkregelung und effektive PRE-SCAN-Strategie wichtig. Einen ebenso starken Einfluss wird aber auf der anderen Seite die Qualität der Fahrbahnhöhenprofilschätzung haben. Um die Genauigkeit des beobachteten Straßenprofils abschätzen zu können, wird mit einem Versuchsträger in mehreren Versuchen das gleiche Fahrbahnprofil überfahren. **Bild 9** zeigt die Gegenüberstellung von drei resultierenden Höhenprofilschätzungen.

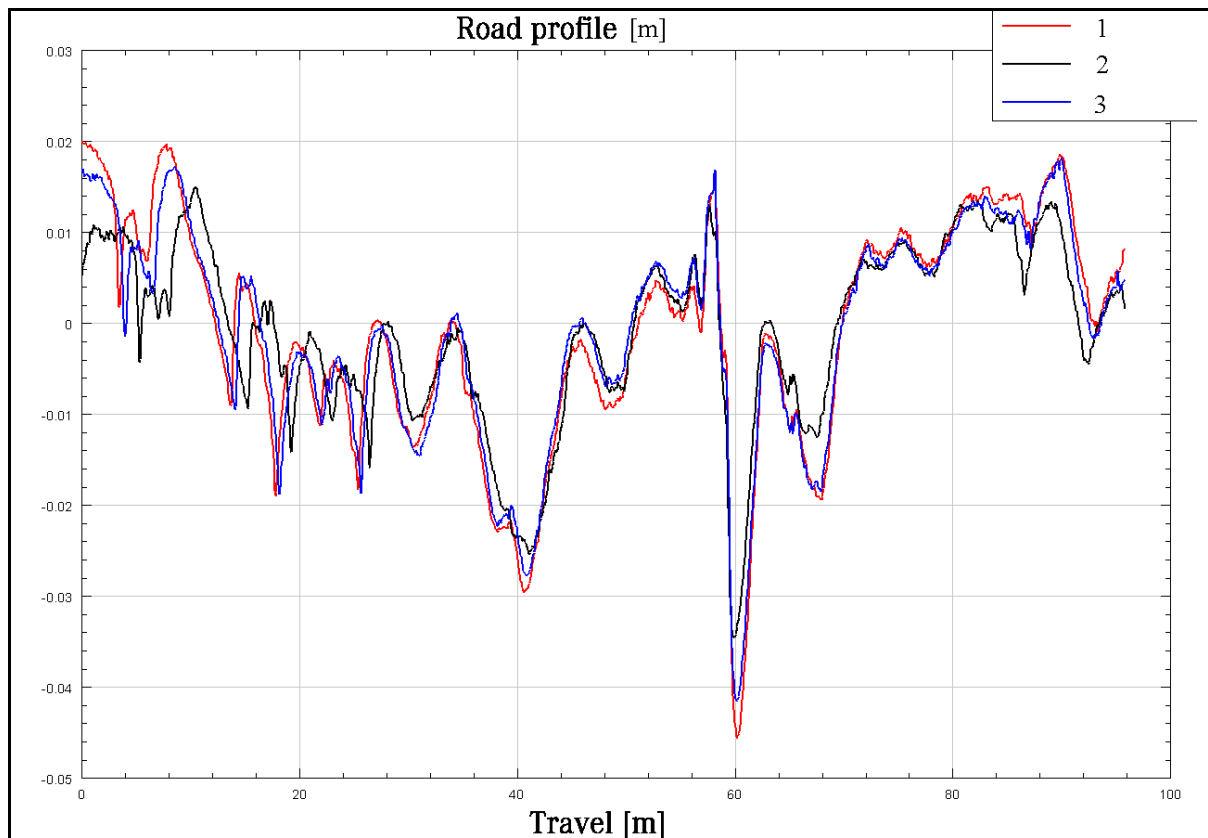


Bild 9: Gegenüberstellung von drei Messungen bei der Überfahrt des gleichen Fahrbahnprofils.

Fig. 9: Comparison of three measurements for driving over the same road profile.

Aus mehreren Messungen wird das Erwartungsintervall für jeden Zeitpunkt gebildet (**Bild 10** oben). Exemplarisch ergibt sich dabei ein Erwartungsintervall von ± 1 cm. Die Häufigkeitsverteilung (**Bild 10** unten) zeigt, dass die meisten Fehler kleiner als 1 mm sind.

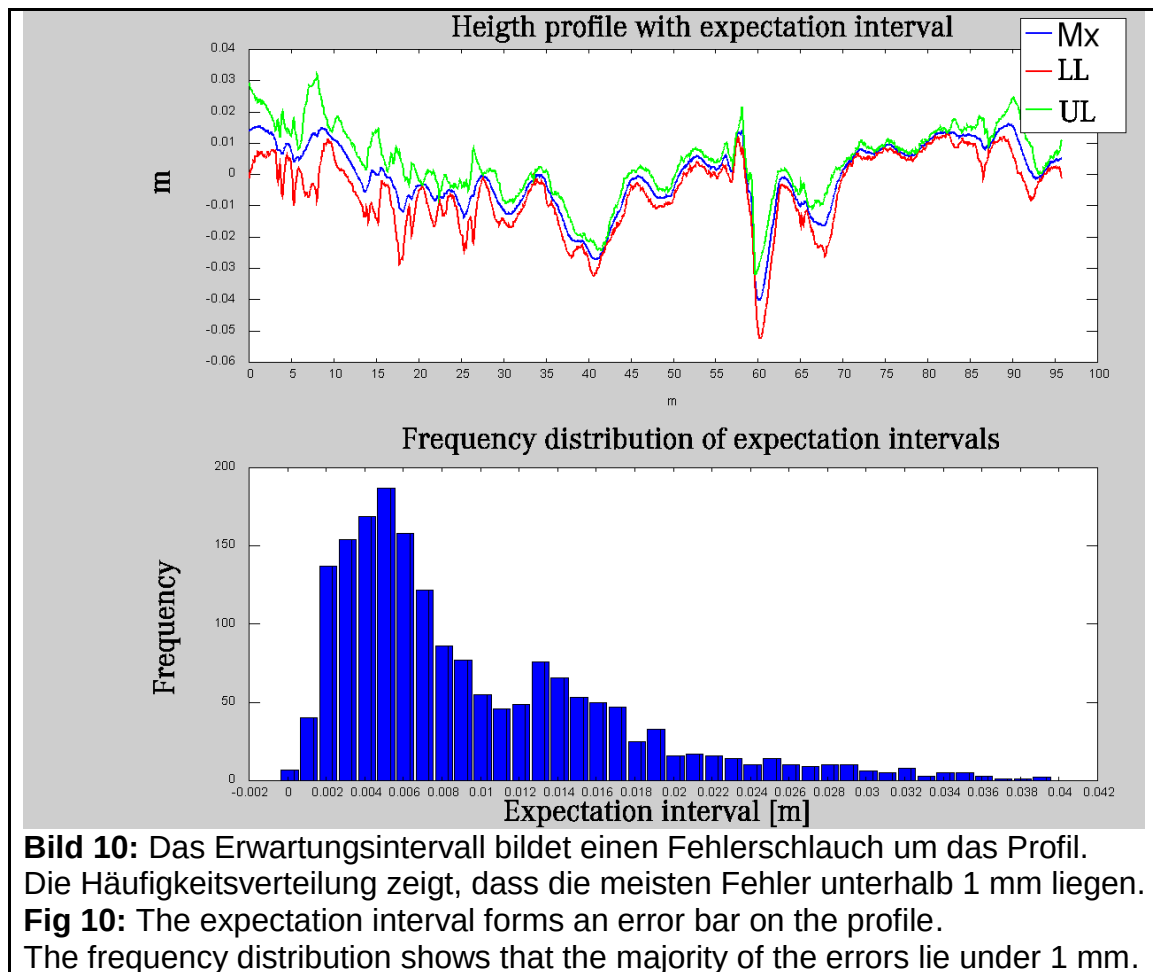
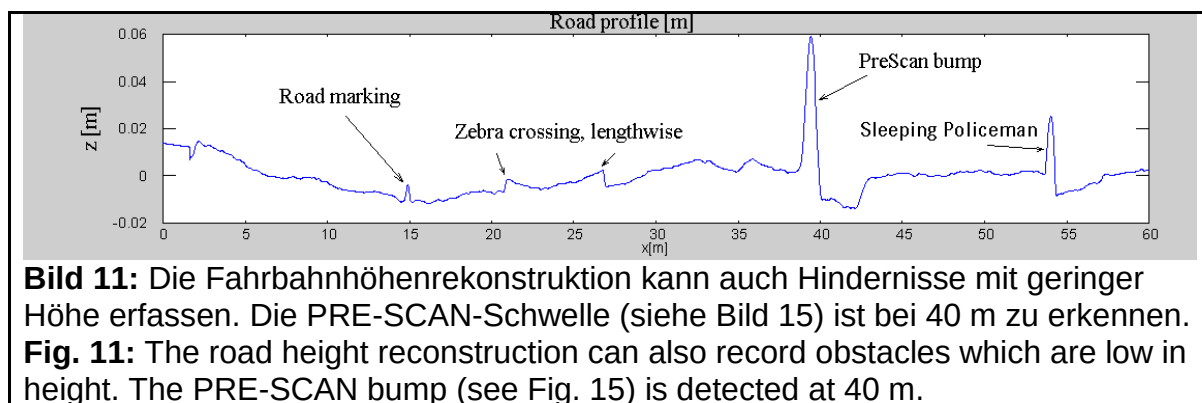


Bild 11 zeigt einen Fahrbahnhöhenverlauf, der durch das beschriebene Verfahren ermittelt wurde.



4 Die Regelung des aktiven Fahrwerks

Der Regelung kommt in zweierlei Hinsicht eine besondere Bedeutung zu. Zum einen bildet die Fahrwerkregelung die Rückfallebene für PRE-SCAN, falls das Fahrbahnhöhenprofil mit zu geringer Genauigkeit erfasst wird. Zum anderen muss die Regelung eine Struktur im geschlossenen Regelkreis realisieren, die für den Entwurf der PRE-SCAN-Strategie einen günstigen Zugang bietet und ein sinnvolles Zusammenwirken zwischen ABC und PRE-SCAN ermöglicht. Dazu muss die Fahrwerkregelung so entwickelt werden, dass eine Frequenzreduktion und modale

Betrachtungsweise des geschlossenen Regelkreises möglich ist. Der Regler soll Filterverhalten aufweisen, stationäre Konvergenz hinsichtlich Sprung-, Rampen- und Steilwandkurvenfahrt erreichen sowie eine vollständige Festlegung des resultierenden Stabilitätsverhaltens ermöglichen.

Aus [3] ist bekannt, dass für ein Fahrzeug mit ABC-Federbeinen das folgende frequenzreduzierte Modell gefunden werden kann:

$$\left(\Theta_A \cdot s^2 + K_D \cdot s + K_F \right) \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix} = \frac{1}{s} \cdot u_{ABC} + (K_D \cdot s + K_F) \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse} \quad (\text{Gl. 9})$$

Tabelle 2: Variablendeklaration Fahrwerkregelung

Θ_A	Massenmatrix
K_D	Dämpfungsmatrix
K_F	Federmatrix
z	absolute Aufbauposition des Fahrzeugs
n	absoluter Nickwinkel des Fahrzeugs
w	absolute Wankposition des Fahrzeugs
$\begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse}$	modale Koordinaten einer Fahrbahnoberfläche
u_{ABC}	Ausgangsgröße der Fahrwerkregelung
u_{prev}	Ausgangsgröße der PRE-SCAN-Steuerung
$\begin{pmatrix} z_{rel} \\ n_{rel} \\ w_{rel} \end{pmatrix}$	gemessene modale Relativkoordinaten des Aufbaus gegenüber einer Fahrbahnausgleichsfläche durch die vier Radaufstandspunkte
$\begin{pmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{n} \\ \ddot{w} \end{pmatrix}$	gemessene modale Beschleunigungen des Aufbaus

Unter Berücksichtigung der oben genannten Konvergenzüberlegungen für den geschlossenen Regelkreis kann die folgende vereinfachte Matrix-Reglerstruktur gewählt werden (weitere Reglerkoeffizientenmatrizen können weitere Freiheitsgrade eröffnen und die Realisierbarkeit des Reglers unterstützen sowie die Einhaltung von Komfortkriterien begünstigen [7]).

$$u_{ABC} = \left[T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I \right]^{-1} \cdot \left[K_{2B_R} \cdot s^2 + K_{B_R} \cdot s \right] \cdot \begin{pmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \\ \ddot{n} \\ \ddot{w} \end{pmatrix} + K_{I_R} \begin{pmatrix} z_{rel} \\ n_{rel} \\ w_{rel} \end{pmatrix}$$

(Gl. 10)

Dies führt zu der folgenden Matrixgleichung für den geschlossenen Regelkreis:

$$\begin{aligned}
 & -K_{I_R}^{-1} \left[(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) (\Theta_A \cdot s^3 + K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{2B_R} \cdot s^4 - K_{B_R} \cdot s^3 - K_{I_R} \right] \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix} = \\
 & = -K_{I_R}^{-1} \left[(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) (K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{I_R} \right] \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse}
 \end{aligned}$$

(Gl. 11)

Der Nenner gibt das Stabilitätsverhalten wieder. Für dieses Matrixpolynom kann nun ein Wunschnopolynom der Form

$$\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I$$

(Gl. 12)

vorgegeben werden. Dieses Wunschnopolynom sollte eine Diagonalstruktur aufweisen und sich gleichzeitig am dynamischen Verhalten des unregulierten Systems orientieren, um ein Zusammenwirken von Regelung und Strecke zu ermöglichen [3]. Für den geschlossenen Regelkreis ergibt sich daraus das Wunschverhalten der Form:

$$\begin{aligned}
 & (\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I) \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix} = \\
 & = -K_{I_R}^{-1} \left[(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) (K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{I_R} \right] \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse}
 \end{aligned}$$

(Gl. 13)

Durch Matrixkoeffizientenvergleich können die Reglerkoeffizientenmatrizen bestimmt werden.

$$\begin{pmatrix} T_4 \\ T_3 \\ T_2 \\ T_1 \\ K_{2B_R} \\ K_{B_R} \\ K_{I_R} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\Theta_A \\ -K_D \\ -K_F \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \Theta_A & K_D & K_F & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Theta_A & K_D & K_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Theta_A & K_D & K_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Theta_A & K_D & K_F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ \mu_7 & \mu_6 & \mu_5 & \mu_4 & \mu_3 & \mu_2 & \mu_1 \end{pmatrix}$$

(Gl. 14)

Der so berechnete Regler erzielt eine Entkopplung der Eigendynamik. Eine Zählerdiagonalisierung wird nur tendenziell erreicht.

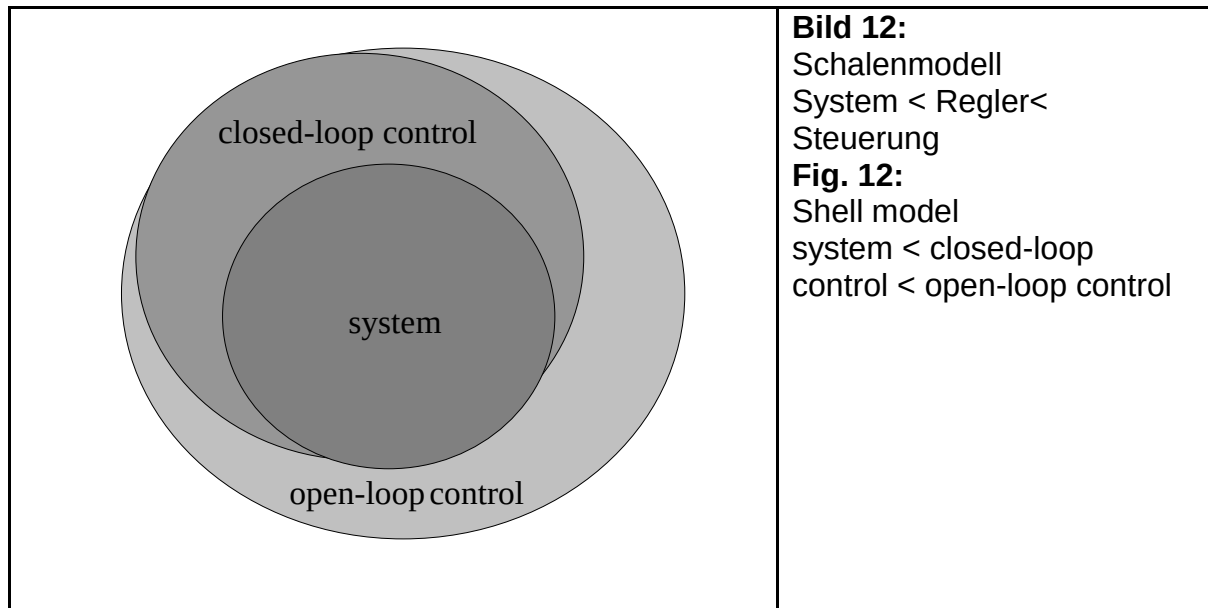
5 Die PRE-SCAN-Steuerung (PSS)

Die Frage nach dem Konzept von PRE-SCAN ist der zentrale Punkt für die Realisierbarkeit des Fahrwerks mit Vorausschau. Naheliegend sind Ansätze, die eine direkte Inversion der Raddynamik beinhalten und so eine Total- oder Teilkompensation der Straßenunebenheit am Rad bewirken wollen. Diese Ansätze sind aber aus mehreren Gründen problematisch.

- Zum einen ist eine solche Kompensation parameterempfindlich. Algebraische Ansätze dieser Art können entgegen der beabsichtigten Wirkung bis hin zur Instabilität das Verhalten verschlechtern, da hier im Sinne einer Regelung Eigenbewegungen des Systems mit dem falschen Vorzeichen rückgekoppelt werden. Solche Ansätze funktionieren daher lediglich in der Simulation bei perfekter Übereinstimmung zwischen Modell und daraus abgeleiteter Kompensationssteuerung. Eine Praxisrelevanz besteht nicht.
- Des Weiteren ist eine sinnvolle Kooperation eines radbezogenen Steuerungskonzeptes mit einem modalen Regelkonzept nur schwer zu organisieren. Es besteht die Gefahr, dass Fahrwerkregelung und PRE-SCAN-Steuerung gegeneinander arbeiten.
- Ein weiterer Grund liegt darin, dass eine radbezogene Kompensation mehr agiert als nötig. Dies ist dadurch begründet, dass der Fahrzeugaufbau drei Freiheitsgrade aufweist, aber durch vier Räder getragen wird. Der daraus resultierende vierte Freiheitsgrad wird als Verspannung [3] bezeichnet und ist für den Aufbaukomfort ohne Belang. Ein Straßenprofil, das derartige Verspannungsanregungen enthält, wird bei einer radbezogenen Kompensation im Vergleich zu einer aufbaubezogenen modalen Strategie Aktivitäten zeigen, ohne einen Benefit für den Komfort zu leisten.

Die modale aufbaubezogene Herangehensweise wird daher aus Gründen der Energieeffizienz und Robustheit den Vorzug gegenüber anderen Ansätzen haben. Aus den genannten Gründen wird eine modale PRE-SCAN-Steuerung (PSS) entworfen.

Insgesamt ergibt sich durch diese Vorüberlegungen eine Vorgehensweise, die durch ein Schalenmodell veranschaulicht werden kann (**Bild 12**).



Wie dargestellt baut die Fahrwerkregelung auf dem zu regelnden System auf und umschließt es, so dass die Gesamtdynamik des neu entstehenden Systems vollständig festgelegt werden kann. Darauf aufsetzend kommt die Steuerung zum Einsatz, die für das geregelte System entworfen werden muss. Die Steuerung wird nicht das ganze System plus Regelung umfassen, sondern nur gewisse Bereiche, an denen weitere Verbesserungen durch die Steuerung erzielt werden sollen. Durch diese Herangehensweise ist sichergestellt, dass

1. die Steuerung mit der Regelung zusammenarbeitet, da sie für das geregelte System entworfen wird, und
2. die Steuerung jederzeit abgeschwächt oder deaktiviert werden kann. Da die Steuerung aufbauend entworfen wird, ist eine Abschaltung der Steuerung unkritisch, da das geregelte System übrig bleibt und sauber weiterarbeiten kann.

Um nach diesem Gedankenmodell die PRE-SCAN-Steuerung (PSS) zu entwerfen, wird die Gleichung des geschlossenen Regelkreises als Grundlage für den Steuerungsentwurf herangezogen. Wird in der Gleichung für das frequenzreduzierte Modell

$$u_{ABC} := u_{ABC} + u_{Prev}$$

gesetzt, ergibt sich für den geschlossenen Regelkreis die Gleichung:

$$\begin{aligned}
 & \left(\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I \right) \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix} = \\
 & = -K_{I-R}^{-1} \left[\left(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I \right) \left(K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s \right) - K_{I-R} \right] \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse} \\
 & - K_{I-R}^{-1} \cdot \left(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I \right) \cdot u_{Prev}
 \end{aligned}$$

(Gl. 15)

Um direkten Zugang zu den Eingangsgrößen $\begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse}$ zu erlangen, wird die

Filterwirkung des Reglers kompensiert:

$$u_{prev} = (T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)^{-1} \cdot K_{I_R} \cdot u_{prev}^* \quad (Gl. 16)$$

Diese Kompensation ist unkritisch, da alle Koeffizienten aus dem Reglerentwurf exakt bekannt sind. Dieser Kompensationsanteil bildet den Nenner der PSS.

Die Gleichung vereinfacht sich zu:

$$\begin{aligned} & (\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I) \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix} = \\ & = -K_{I_R}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)(K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{I_R}] \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse} - u_{prev}^* \end{aligned} \quad (Gl. 17)$$

Diese Matrixgleichung wird als entkoppelbar betrachtet. Durch die Diagonalstrukturvorgabe für das Wunschkpolynom ist dies für den Nenner des Systems richtig. Für den Zähler trifft dies nur näherungsweise zu. Fehler, die hier durch die Forderung nach Entkoppelbarkeit entstehen, beeinträchtigen aber die Stabilität des Systems nicht, da keine Rückwirkung auf den Nenner besteht. Somit kann für Modus $\mathcal{G}_j$ folgende skalare Gleichung angegeben werden:

$$N_{j_Wunsch} \cdot \mathcal{G}_j = Z_{j_Strasse} \cdot \mathcal{G}_{j_Strasse} - u_{prev_Modus_G_j}^* \quad (Gl. 18)$$

Anhand der entkoppelten Gleichungen für das geregelte Fahrzeug kann nun für jeden Modus einzeln eine Pol-Nullstellenkürzung vorgenommen werden. Dieser Maßnahme kommt eine große Bedeutung zu, da sie verhindert, dass PRE-SCAN einer durch die Regelung häufig erzielten Pol-Nullstellenkürzung entgegenwirkt, indem Ableitungsterme des Fahrbahnprofils Verwendung finden, die für eine Pol-Nullstellenkürzung aber notwendig sind. Ohne Pol-Nullstellenkürzung würde ein PRE-SCAN-Eingriff zu einer Verschlechterung des Gesamtverhaltens führen, da bereits eliminierte Bewegungsanteile wieder zum Vorschein kämen. Obwohl eine Pol-Nullstellenkürzung in der Regelungstechnik aus Gründen der Robustheit kritisch gesehen wird, ist dies hier ein günstiger Umstand, da es sich bei den gekürzten Polen ausschließlich um stabile Pole handelt und das resultierende System vom Fahrer angenehmer empfunden wird, da er eine geringere Bewegungskomplexität wahrnimmt. Dabei behält die Gesamtstruktur die vorgesehenen System- und Robustheitseigenschaften.

Es erfolgt zunächst ein Ausklammern des gemeinsamen Polynoms N_{j_g} .

$$(N_{j_g} \cdot N'_{j_Wunsch}) \cdot \mathcal{G}_j = (N_{j_g} \cdot Z'_{j_Strasse}) \cdot \mathcal{G}_{j_Strasse} - u_{prev_Modus_G_j}^* \quad (Gl. 19)$$

Die PSS wird durch Vorgabe eines skalaren Wunschkpolynoms $Z_{j_Strasse}^{Wunsch}$ für den Zählerterm $Z'_{j_Strasse}$ bestimmt.

$$(N_{j-g} \cdot N'_{j-Wunsch}) \cdot \mathcal{G}_j = (N_{j-g} \cdot Z'_{j-Strasse}) \cdot \mathcal{G}_{j-Strasse} - u_{Prev_Modus_G_j}^* \stackrel{!}{=} (N_{j-g} \cdot Z_{j-Strasse}^{Wunsch}) \cdot \mathcal{G}_{j-Strasse} \quad (\text{Gl. 20})$$

Es folgt:

$$u_{Prev_Modus_G_j}^* = N_{j-g} \cdot [Z'_{j-Strasse} - Z_{j-Strasse}^{Wunsch}] \cdot \mathcal{G}_{j-Strasse} \quad (\text{Gl. 21})$$

Im nächsten Schritt wird eine Frequenzreduktion durchgeführt, die unerwünschte PRE-SCAN-Aktivitäten durch hochfrequente Störanteile in $\mathcal{G}_{j-Strasse}$ vermeidet. Die obige Gleichung geht somit über in:

$$u_{Prev_Modus_G_j}^* = N_{j-g}^{red} \cdot [Z'_{j-Strasse} - Z_{j-Strasse}^{Wunsch}]^{red} \cdot \mathcal{G}_{j-Strasse} \quad (\text{Gl. 22})$$

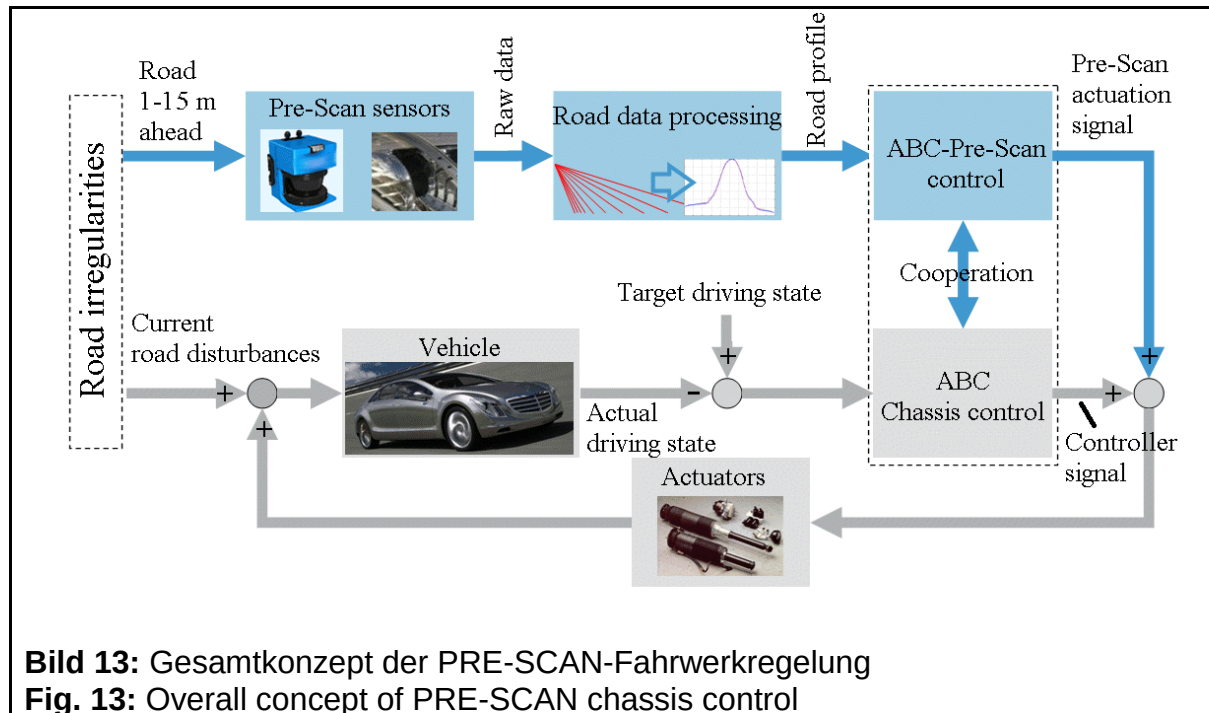
Werden die Kompensationsentwürfe für alle Freiheitsgrade zusammengefasst, kann die PRE-SCAN-Designgleichung in die Ursprungsgleichung eingesetzt werden:

$$u_{Prev} = (T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)^{-1} \cdot K_{I-R} \cdot N_g^{red} \cdot [Z'_{Strasse} - Z_{Strasse}^{Wunsch}]^{red} \cdot \begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse} \quad (\text{Gl. 23})$$

6 Realisierung

Es stellt sich die Frage, wie das Wunschzählerpolynom $Z_{j-Strasse}^{Wunsch}$ sinnvoll definiert werden kann. Randbedingungen bilden Konvergenzforderungen für das Gesamtsystem. Durch die gewählte Reglerstruktur beinhaltet der geschlossene Regelkreis diese Forderungen bereits. Somit müssen die Zählerkoeffizienten von $Z'_{j-Strasse}$, die mit Ableitungspotenzen der nullten, ersten und zweiten Ordnung verknüpft sind, belassen werden bzw. können nur bei sehr kleinen Geschwindigkeiten reduziert werden. Im allgemeinen Fall werden daher die Koeffizienten von $Z_{j-Strasse}^{Wunsch}$ bis zur zweiten oder dritten Ordnung denen von $Z'_{j-Strasse}$ entsprechen müssen. Dies führt für die PSS auf ein Zählerpolynom, das erst ab der zweiten oder dritten Ableitung Signale des Straßenprofils verwendet. Da häufig die Ordnung des Terms $N_{j-g}^{red} \cdot [Z'_{j-Strasse} - Z_{j-Strasse}^{Wunsch}]^{red}$ größer ist als die Ordnung des Nenners $(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)$ und somit die Realisierbarkeit gefährdet ist, kann das Fehlen der Koeffizienten nullter und erster Ordnung günstig ausgenutzt werden. Durch eine phasenfreie Vorwärts-Rückwärtsfilterung des ermittelten Straßenprofils wird die erste und zweite Ableitung an den vier Radaufstandspunkten direkt berechnet. Der Zählergrad der PSS kann daher formal zwei Ordnungen größer sein als der Nennergrad. Reicht die Maßnahme nicht aus, muss der Zählergrad des geschlossenen Regelkreises durch eine modale Anpassung der Frequenzreduktion weiter reduziert werden.

7 Ergebnis



Um das Potenzial von ABC PRE-SCAN untersuchen zu können, wurde das Gesamtkonzept (**Bild 13**) zunächst in einem Prototypen (**Bild 14**) dargestellt. Bei Messfahrten über die sogenannte PRE-SCAN-Schwelle (**Bild 15**) kann PRE-SCAN sein Potenzial voll ausschöpfen.



Bild 14: Überfahrt der PRE-SCAN-Schwelle.

Fig. 14: Driving over the PRE-SCAN bump.



Bild 15: Die PRE-SCAN-Schwelle ist eine 5 cm hohe und 1 m lange sinusähnliche Bodenwelle.

Fig. 15: The PRE-SCAN bump is a 5 cm high and 1 m long sinus-shaped ground wave.

Der Vergleich zwischen den nach [6] bewerteten Frequenzspektren der Fahrersitzbeschleunigung (**Bild 16**) zeigt die Komfortverbesserung durch PRE-SCAN.

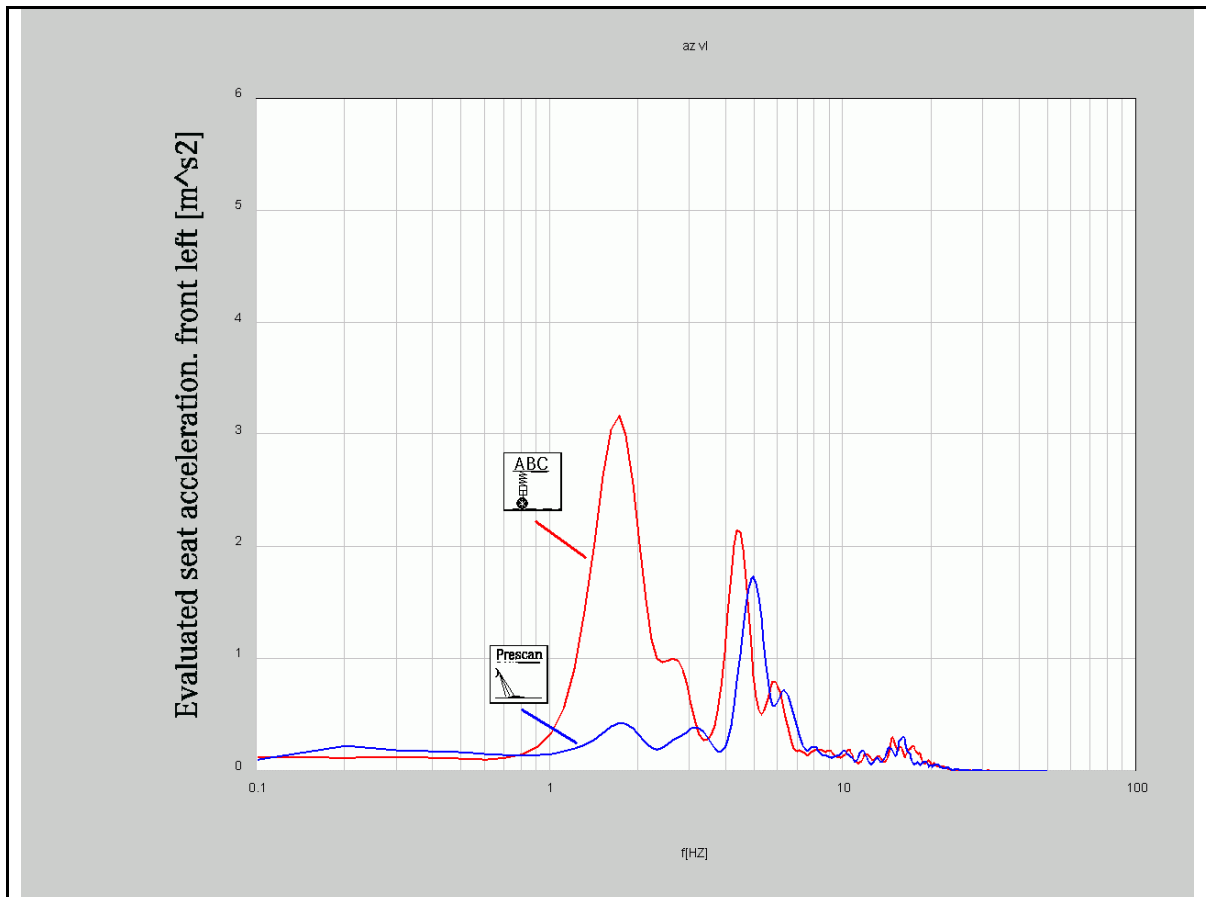
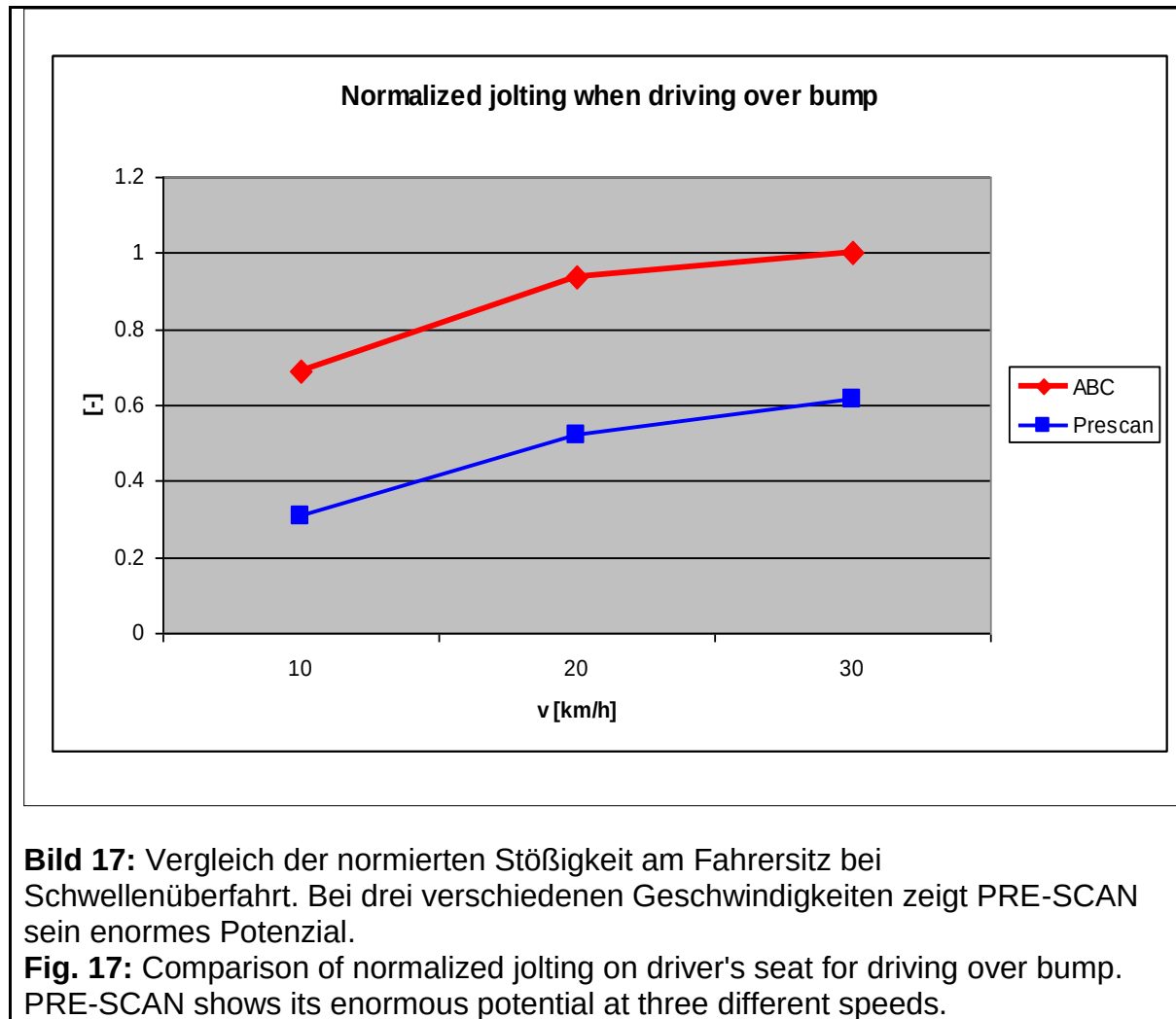


Bild 16: ABC-PRE-SCAN reduziert bei Überfahrt der PRE-SCAN-Schwellen die Beschleunigungen am Fahrersitz erheblich.

Fig. 16: ABC PRE-SCAN significantly reduces the accelerations on the driver's seat when driving over the PRE-SCAN bump.

In **Bild 17** ist die normierte Stößigkeit (Maximalwert der Vertikalbeschleunigung) bei verschiedenen Geschwindigkeiten am Fahrersitz dargestellt. Die Kurven zeigen, dass PRE-SCAN bei der Schwellenüberfahrt mit 30 km/h immer noch eine geringere Stößigkeit aufweist als ABC mit 10 km/h.



Auch auf normalen Fahrbahnen kann PRE-SCAN überzeugen. **Bild 18** zeigt das Frequenzspektrum der Fahrersitzbeschleunigung bei einer Autobahnfahrt mit 100 km/h. PRE-SCAN erzielt gegenüber ABC einen enormen Komfortvorteil.

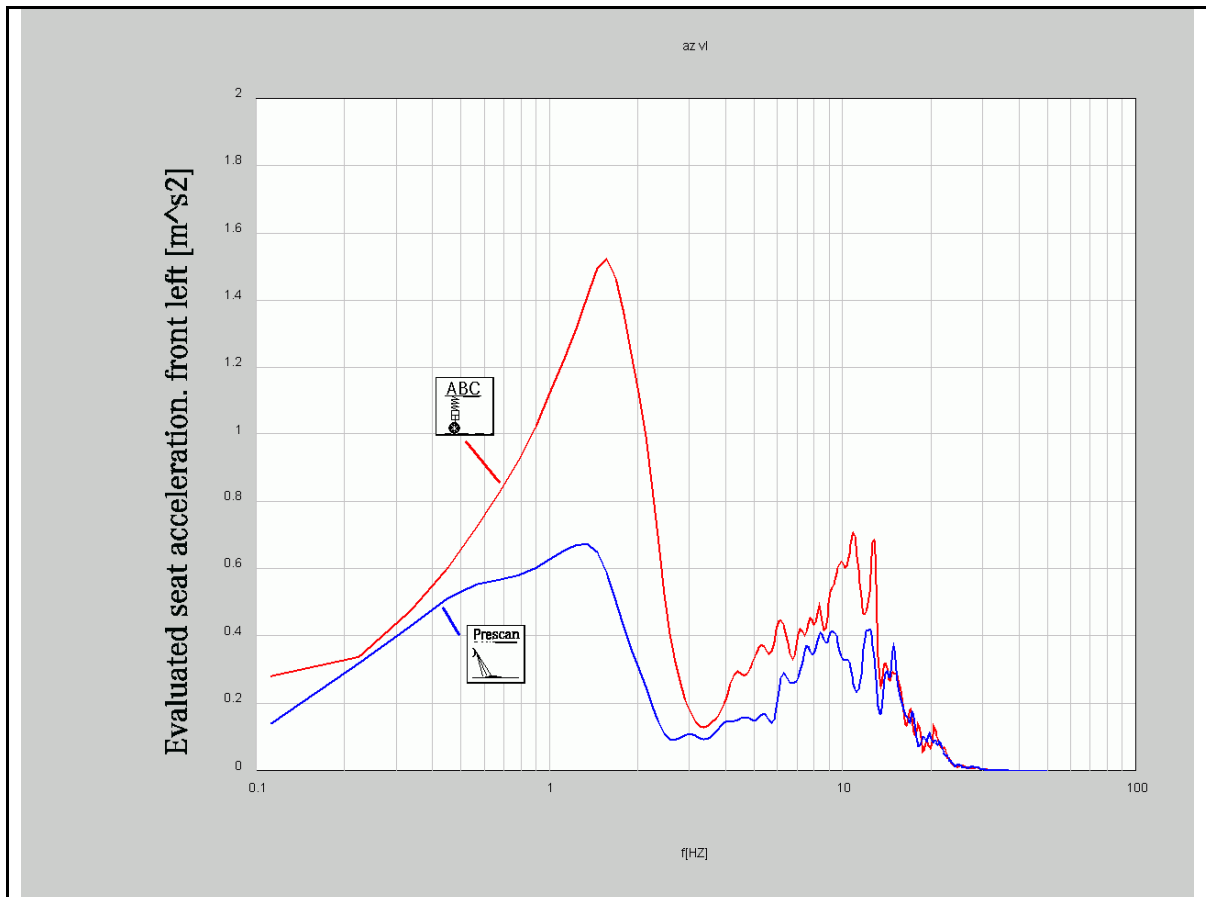


Bild 18: Vergleich der bewerteten Frequenzspektren bei einer Autobahnfahrt mit 100 km/h.

Fig. 18: Comparison of evaluated frequency spectra for a motorway drive at 100 km/h.

Einen ebenso großen Vorteil kann PRE-SCAN auf dem so genannten Freeway-Hop, einer Autobahn mit zyklisch wiederkehrenden Betonplattenschlägen, erzielen. **Bild 19** zeigt die Gegenüberstellung der bewerteten Nickbeschleunigungen an der Fahrerposition. ABC reduziert deutlich die Schwingungen gegenüber dem unregelten Fahrzeug. PRE-SCAN kann die Beschleunigungen noch einmal deutlich verringern.

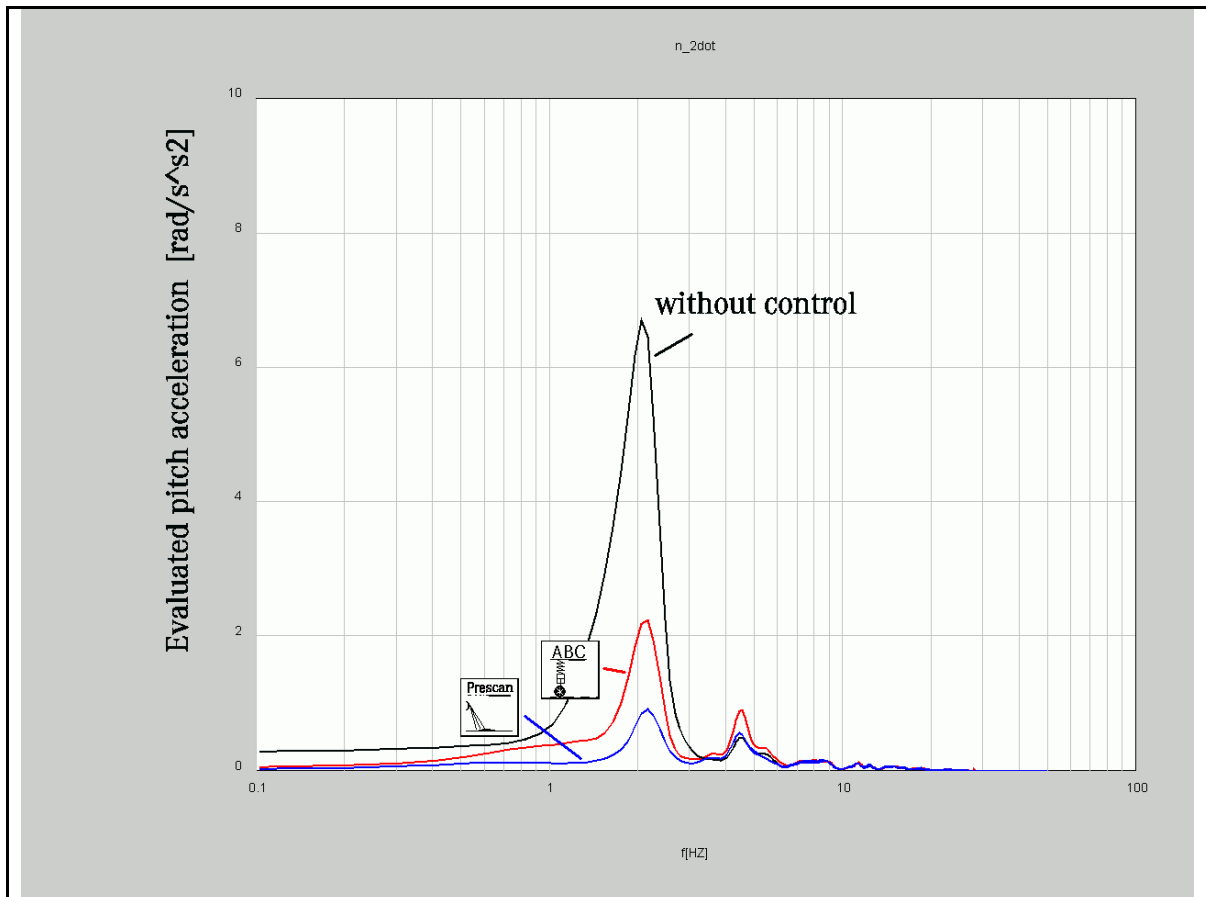


Bild 19: Vergleich der bewerteten Frequenzspektren der Nickbeschleunigung auf dem Freeway-Hop bei 40 km/h.

Fig. 19: Comparison of the evaluated frequency spectra of the pitch acceleration on the motorway hop at 40 km/h.

Im Juni 2008 wurde PRE-SCAN in Sevilla auf dem „Mercedes-Benz TecDay 2008“ der internationalen Presse im F700 und in einem S500-Demonstrator gezeigt (**Bild 20/21**). Etwas verrückt aber wahr: Mit PRE-SCAN schwappt nichts aus dem Weinglas. Ohne PRE-SCAN wäre die Party zu Ende...



Bild 20/21: PRE-SCAN und das Weinglas: Mit 20 km/h wird nichts verschüttet. Ohne PRE-SCAN leert sich das Glas.

Fig. 20/21: PRE-SCAN and the wine glass: At 20 km/h nothing is spilled. Without PRE-SCAN, the glass is emptied.

8 Ausblick

Der dargestellte Entwurf der PRE-SCAN-Steuerung arbeitet nach dem Kompensationsprinzip. Zusammen mit der ABC-Regelung wird eine starke Komfortverbesserung erzielt. Trotzdem schöpft dieser Ansatz noch nicht das gesamte Potenzial einer vorausschauenden Straßenprofilerkennung aus. Im nächsten Schritt ist eine Erweiterung der Strategie durch eine Vorwegnahme des vorausliegenden Straßenprofils sinnvoll. Dieser Ansatz kann als Look-Ahead-Ansatz bezeichnet werden. Wird das vorausliegende sowie das unter dem Fahrzeug

befindliche Straßenprofil beispielsweise einer niederfrequenten Vorwärts-Rückwärtsfilterung unterzogen, können daraus modale Sollwerte für die Koordinaten des Fahrzeugaufbaus abgeleitet werden. Durch eine derartige Vorsteuerung der Aufbauposition kann eine effektiverer Nutzung der Stellwege der Aktoren, sowie ein Abbau der Energiespitzen des aktiven Systems erreicht werden. Gleichzeitig kann eine weitere Komfortverbesserung erreicht werden, da der Energieeintrag der Straße über einen größeren Zeitraum von dem aktiven Fahrwerk abgearbeitet werden kann. Wird der kompensatorische Ansatz mit dem Führungsvorsteueranteil von Look-Ahead kombiniert und einer dynamischen Aktorstellweg- und Energiebeobachtung unter gleichzeitiger Minimierung der Aufbaubeschleunigungen durch Online-Simulation unterzogen, ist ein fließender Übergang zwischen Kompensationsansatz und Führungsvorsteueranteil erreicht. Im Ergebnis wird dann PRE-SCAN in Abhängigkeit von dem Fahrbahnprofil seine Strategie anpassen und stets unter Berücksichtigung aller Restriktionen den maximal möglichen Fahrkomfort gewährleisten. Dann ist der Link zu natürlichen Bewegungsformen (**Bild 1**) tatsächlich geschafft.

9 Literatur

[1]	Wolfsried, S.; Schiffer, W. ActiveBodyControl Das neue aktive Federungs- und Dämpfungssystem des CL-Coupé von Mercedes-Benz VDI-Fachtagung Reifen/Fahrwerk/Fahrbahn, Hannover, 1999
[2]	DaimlerChrysler AG Die Vision vom unfallfreien Fahren Hightech Report 2001
[3]	Streiter, R. Entwicklung und Realisierung eines analytischen Regelkonzeptes für eine aktive Federung Dissertation, TU Berlin, 1996
[4]	Schindler, A. Das vorausschauende Fahrwerk - Konzeption und Realisierung eines aktiven Fahrwerks mit Preview-Strategie Dissertation Karlsruhe, 2008
[5]	Schindler, A. ; Streiter, R. ; Bretthauer, G. Integraler Ansatz für eine Fahrzeugregelung mit Preview chassis.tech München, 2007
[6]	Frank, P. Bewertungsverfahren Schwingempfinden Daimler-Benz AG Forschungsinstitut F1M, 1994 (94-004) Technischer Bericht
[7]	Streiter, R. Modellgestützte methodische Entwicklung aktiver Fahrwerke für Straßenfahrzeuge Magna Steyr /Graz MKS-Simulation in der Automobilindustrie 20.09.2002

[8]	Streiter, R. Fahrwerk mit Vorausschau - ABC Pre-Scan im F700 ATZ Ausgabe Nr.: 2008-05
[9]	Streiter, R. Suspension with Preview - ABC Pre-Scan in the F700 ATZ worldwide Edition: 2008-05