



## ABC Pre-Scan im F700

# Das vorausschauende aktive Fahrwerk von Mercedes-Benz

Es ist gut zu wissen was kommt. Dies entspricht dem, was wir im täglichen Leben erfahren: wissen, was auf uns zukommt, hilft besser planen und Ressourcen intelligenter einsetzen. Das gilt auch für die Technik: Im Fahrwerksbereich ist es nützlich, das vorausliegende Straßenprofil zu kennen. Folgend wird dargelegt, wie das mit Pre-Scan bezeichnete und auf der IAA 2007 von Mercedes-Benz erstmalig im F700 gezeigte aktive Fahrwerk mit Vorausschau eine Straßenerkennung auf Basis von Laserabtastung realisiert.

## 1 Einleitung

Mit einer geeigneten Vorausschaustrategie kann ein aktives Fahrwerk vorkonditioniert werden. Eine derartige, vorausschauende Fahrwerkbeeinflussung ermöglicht es, nicht nur zu reagieren, nachdem eine Fahrbahnunebenheit auf das Fahrzeug eingewirkt hat, sondern zeitgleich oder sogar proaktiv zu handeln. Dies kommt dem Fahrkomfort zugute und lässt die Insassen ein völlig neues Fahrgefühl erleben. Die Voraussetzungen für die Umsetzung einer Fahrwerkregelung mit Vorausschau (Pre-Scan) sind günstig. Mit Active-Body-Control (ABC) [1], dem ersten aktiven Fahrwerk in einem Serienfahrzeug, ist es seit 1999 möglich, Aufbaubewegungen durch vier Hydraulikzylinder zu regeln. Gleichzeitig nimmt die Qualität der sensorischen Erfassung der Fahrzeugumgebung zu. Treibender Faktor der Tendenz zur perfekten Umfelderkennung ist die Vision vom unfallfreien Fahren [2]. Zunächst wird dargelegt, wie das als Pre-Scan bezeichnete, und auf der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) 2007 in Frankfurt erstmalig in dem Forschungsfahrzeug F700 gezeigte aktive Fahrwerk mit Vorausschau eine Straßenerkennung auf Basis von Laserabtastung realisiert und durch einen integralen Entwurf von ABC-Regelung und Pre-Scan-Steuerung gesteigerten Komfort erzielt. Am Schluss werden Ergebnisse vorgestellt, die mit einem Prototyp gewonnen worden sind.

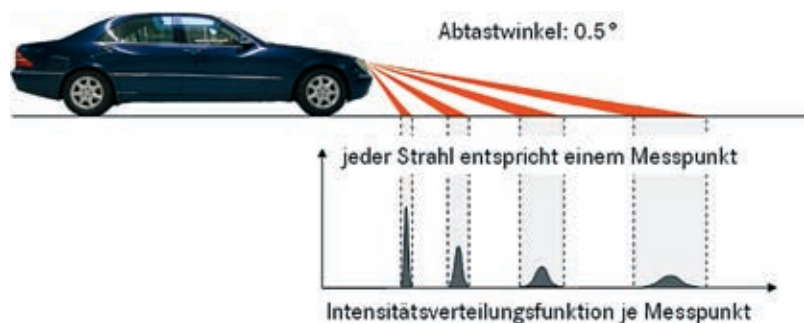
## 2 Die Höhenprofilanschätzung

Die Ermittlung der Fahrbahnhöhenprofile vor den Vorderrädern ist eine Voraussetzung für das Pre-Scan-Konzept. Zu diesem Zweck sind zwei Lasersensoren in die Frontscheinwerfer des Fahrzeugs eingebaut, die Strahlen (Spots) mit einem Abtastwinkel von 0.5 Grad aussenden. **Bild 1.** Durch die unterschiedlichen Auftreffwinkel weiten sich die Spots auf der Straße unterschiedlich stark aus. 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. Aus einem polaren Entfernungswert  $D_i$  und dem zugehörigen Winkel  $n_i + n_{AF}$  kann der kartesische Entfernungswert  $x_i$  und Höhenwert  $z_i$  für den Spot  $i$  berechnet werden, Gl. (1), Gl. (2), **Tabelle:**

$$x_i = (D_i + D_{off}) \cdot \cos(n_i + n_{AF}) + x_{Korr}(v_x, \Delta T) \quad \text{Gl. (1)}$$

$$z_i = (D_i + D_{off}) \cdot \sin(n_i + n_{AF}) + z_{AF} \quad \text{Gl. (2)}$$



**Bild 1:** Die Lasersensoren tasten das Fahrbahnhöhenprofil ab, wobei jedem Spot eine individuelle Verteilungsfunktion zugeordnet wird

**Tabelle:** Variablendeklaration

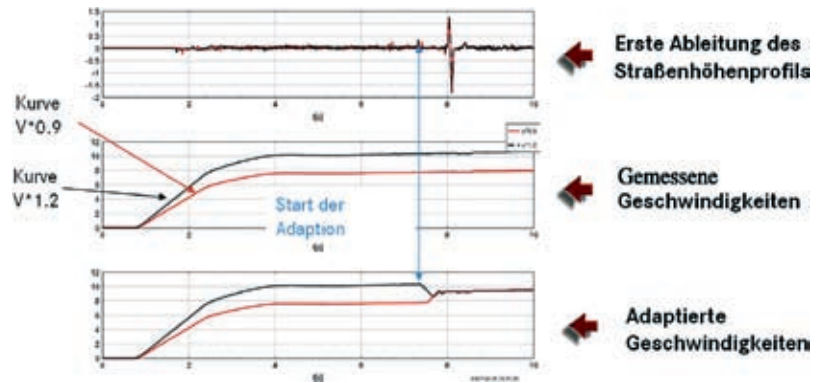
$x_{Korr}(v_x, \Delta T)$	Ortskorrekturterm
$D_{off}$	Messfehleroffset durch Remissionsänderungen auf unterschiedlich reflektierenden Oberflächen
$\Theta_A$	Massenmatrix
$K_D$	Dämpfungsmatrix
$K_F$	Federmatrix
$z$	Aufbauposition
$n$	Nickwinkel
$w$	Wankposition
$\begin{pmatrix} z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{Strasse}$	modale Koordinaten einer Fahrbahnoberfläche
$U_{ABC}$	Reglerausgangsgröße
$\begin{pmatrix} z_{rel} \\ n_{rel} \\ w_{rel} \end{pmatrix}$	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

## Der Autor

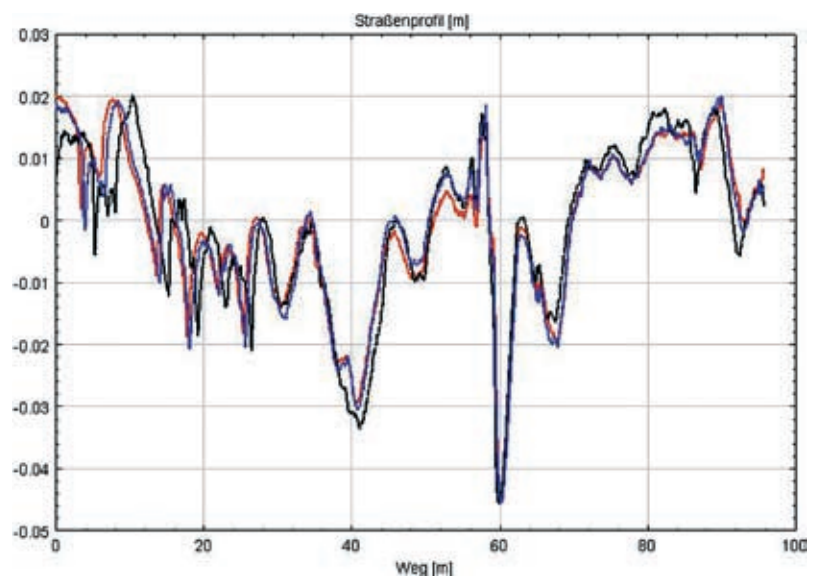


Dr.-Ing.  
Ralph Streiter  
ist wissenschaftlicher  
Mitarbeiter bei Active  
Suspensions, Group  
Research and  
Advanced Engineering,  
Daimler AG,  
Sindelfingen.

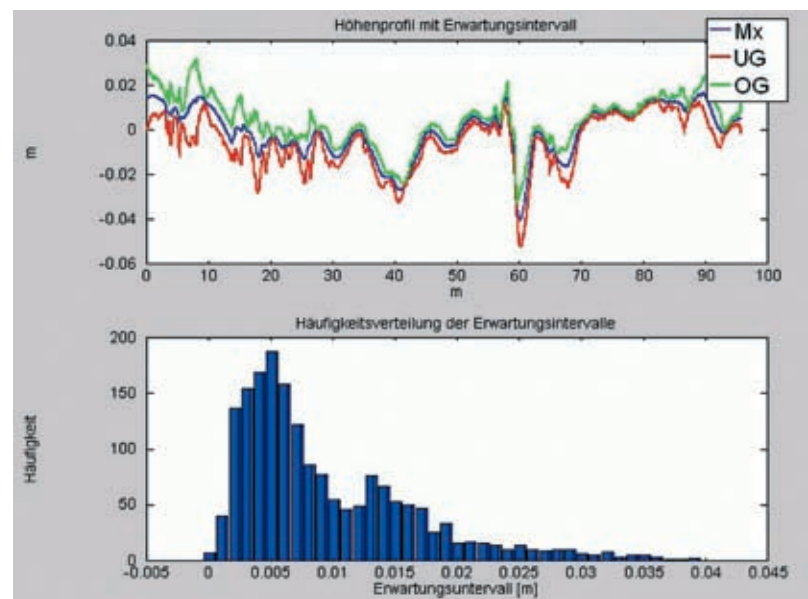
Auf diese Weise werden die polaren Daten in ein kartesisches Profil transformiert. Da die notwendige Messgenauigkeit und -sicherheit nur durch statistische Berechnung erreicht werden können, wird in [4] und [5] ein Verfahren vorgeschlagen, das durch gewichtete Mittelung und iterative Rekursionsrekonstruktion 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 zugeordnet, Bild 1 unten. Durch gewichtete Mittelung aneinandergrenzender und überlappender Spots entsteht eine erste Schätzung für das Höhenprofil. Aus dieser Schätzung kann durch Regression mit dem bisher (aus dem vorhergehenden Schritt) beobachteten Höhenprofil eine Höhen- und Nickwinkelkorrektur berechnet werden. Somit kann eine Iterationsvorschrift für  $z_{AF}$  und  $n_{AF}$  definiert werden. Mit den Korrekturwerten für  $z_{AF}$  und  $n_{AF}$  wird eine verbesserte Schätzung des aktuellen Profils durchgeführt, die zusammen mit dem bisher rekonstruierten Höhenprofil unter Berücksichtigung der damit verknüpften Gewichtungen eine neue Profilschätzung ermöglicht. 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 soviel 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 Berechnungszyklus beginnt die Datenakquisition der Lasersensoren von vorne. Im nachfolgenden Iterationszyklus werden neue Daten zu dem bisherigen Straßenprofil statistisch hinzugefügt und wieder Positionsänderungen des Fahrzeugs durch Eigenbewegung ermittelt und kompensiert. Mit Voranschreiten des



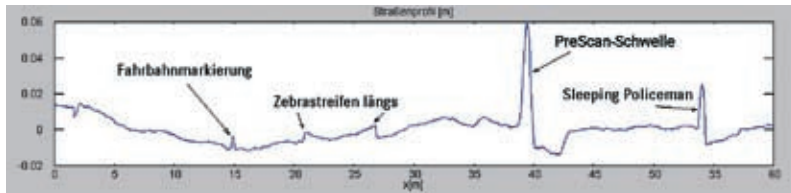
**Bild 2:** Die Geschwindigkeitsadaption stellt das korrekte Timing der Ableitungsberechnung sicher



**Bild 3:** Gegenüberstellung von drei Messungen bei der Überfahrt des gleichen Fahrbahnprofils



**Bild 4:** Das Erwartungsintervall bildet einen Fehlerschlauch um das Profil. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass die meisten Fehler unterhalb 1 mm liegen



**Bild 5:** Die Fahrbahnhöhenrekonstruktion kann auch Hindernisse mit geringer Höhe erfassen. Die Pre-Scan-Schwelle (Bild 8) ist bei 40 m zu erkennen

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 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 dem Antiblockiersystem (ABS) haben allerdings nur eine eingeschränkte Genauigkeit und können Justagefehler nicht korrigieren. Basierend auf der Überlegung, dass sich in aufeinanderfolgenden Lasersensordatensätzen das glei-

che 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 2** zeigt exemplarisch an zwei Versuchsszenarien den Iterationsprozess. Die gemessene Fahrgeschwindigkeit ist jeweils mit einem Fehlerfaktor beaufschlagt, Bild 2 Mitte. Mit Beginn der Adaption konvergieren beide Geschwindigkeiten auf den gleichen korrekten Geschwindigkeitsverlauf, Bild 2 unten. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die erste Ableitung des Fahrbahnprofils tatsächlich zeitlich synchron

berechnet wird, Bild 2 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.

### 4 Genauigkeit der Höhenprofilschätzung

Für die resultierende Performance eines Pre-Scan-Eingriffs ist auf der einen Seite eine robuste Fahrwerkregelung und eine effektive Pre-Scan-Strategie wichtig. Einen ebenso starken Einfluss hat aber auf der anderen Seite die Qualität der Fahrbahnhöhenprofilschätzung. Um die Genauigkeit des beobachteten Straßenprofils abschätzen zu können, wird mit einem Versuchsträger in mehreren Versuchen das gleiche Fahrbahnprofil befahren. **Bild 3** zeigt die Gegenüberstellung von drei resultierenden Höhenprofilschätzungen. Aus mehreren Messungen wird das Erwartungsintervall für jeden Zeitpunkt gebildet, **Bild 4** oben. Exemplarisch ergibt sich dabei ein Erwartungsintervall von  $\pm 1$  cm. Die Häufigkeitsverteilung, Bild 4 unten, zeigt, dass die meisten Fehler kleiner als 1 mm sind. **Bild 5** zeigt einen ermittelten Fahrbahnhöhenverlauf, der durch das beschriebene Verfahren ermittelt worden ist.

### 5 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, Gl. (3), Tabelle :

$$(\Theta_A \cdot s^2 + K_D \cdot s + K_F) \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix} = \frac{1}{s} \cdot u_{ABC} + (K_D \cdot s + K_F) \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{\text{Straße}} \quad \text{Gl. (3)}$$

Unter Berücksichtigung der oben genannten Konvergenzüberlegungen für den geschlossenen Regelkreis kann die folgende vereinfachte Matrix-Reglerstruktur gewählt werden, Gl. (4) (weitere Reglerkoeffizientenmatrizen können weitere Freiheitsgrade eröffnen und die Realisierbarkeit des Reglers unterstützen)

$$u_{ABC} = [T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I]^{-1} \cdot \left( [K_{2B,R} \cdot s^2 + K_{B,R} \cdot s] \cdot \begin{pmatrix} \ddot{z} \\ \dot{n} \\ \dot{w} \end{pmatrix} + K_{L,R} \begin{pmatrix} z_{rel} \\ n_{rel} \\ w_{rel} \end{pmatrix} \right) \quad \text{Gl. (4)}$$

mit den Eingangsmessgrößen, Tabelle. Dies führt zu der folgenden Matrixgleichung für den geschlossenen Regelkreis, Gl. (5):

$$-K_{L,R}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)(\Theta_A \cdot s^2 + K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{2B,R} \cdot s^4 - K_{B,R} \cdot s^3 - K_{L,R}] \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix} = -K_{L,R}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) \cdot (K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{L,R}] \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{\text{Straße}} \quad \text{Gl. (5)}$$

Der Nenner gibt das Stabilitätsverhalten wieder. Für dieses Matrixpolynom kann nun ein Wunschpolynom der Form Gl. (6)

$$\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I \quad \text{Gl. (6)}$$

vorgegeben werden. Dieses Wunschpolynom 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:

$$(\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I) \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix} = -K_{L,R}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) \cdot (K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{L,R}] \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{\text{Straße}} \quad \text{Gl. (7)}$$

Durch Matrixkoeffizientenvergleich können die Reglerkoeffizientenmatrizen bestimmt werden, Gl (8):

$$\begin{pmatrix} T_4 \\ T_3 \\ T_2 \\ T_1 \\ K_{2B,R} \\ K_{B,R} \\ K_{L,R} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\Theta_A \\ -K_D \\ -K_F \\ -K_E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_A & K_A & K_F & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Theta_A & K_D & K_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Theta_A & K_D & K_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Theta_A & K_D & K_F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ \mu_7 & \mu_6 & \mu_5 & \mu_4 & \mu_3 & \mu_2 & \mu_1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. (8)}$$

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

### 6 Die Pre-Scan-Steuerung (PSS)

Die Frage nach dem Konzept von Pre-Scan ist der zentrale Punkt für die Realisierbarkeit des Fahrwerks mit Vorausschau. Nahe liegend sind Ansätze, die eine direkte Inversion der Raddynamik be-

inhalten 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 das Verhalten bis hin zur Instabilität verschlechtern. Des Weiteren ist eine sinnvolle Kooperation mit einem modalen Regelkonzept wie der ABC-Regelung nur schwer zu organisieren. Es besteht die Gefahr, dass Fahrwerkregelung und Pre-Scan gegeneinander arbeiten. Ein weiterer Grund liegt darin, dass eine radbezogene Kompensation mehr agiert als nötig, da 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 Pre-Scan-Strategie mehr Aktivitäten zeigen, ohne einen Komfortgewinn zu erzielen. 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 PSS entworfen. Dazu wird die Gleichung des geschlossenen Regelkreises als Grundlage für den Steuerungsentwurf verwendet. Durch diesen Ansatz ist das harmonische Zusammenwirken von PSS und ABC-Regelung gewährleistet. Wird in Gl. (9) für das frequenzreduzierte Modell

$$u_{ABC} := u_{ABC} + u_{PR\ ev} \quad \text{Gl. (9)}$$

gesetzt, ergibt sich für den geschlossenen Regelkreis die Gl. (10):

$$(\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I) \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix} = -K_{L,R}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) \cdot (K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{L,R}] \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{\text{Straße}} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$-K_{L,R}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) \cdot u_{Preview}$$

Um direkten Zugang zu den Eingangsgrößen  $\begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{\text{Straße}}$  zu erlangen, wird die Filter-

wirkung des Reglers kompensiert, Gl. (11):

$$u_{\text{Preview}} = (T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)^{-1} \cdot K_{LR} \cdot u_{\text{Preview}}^* \quad \text{Gl. (11)}$$

Diese Kompensation ist unkritisch, da alle Koeffizienten aus dem Reglerentwurf exakt bekannt sind. Dieser Kompensationsanteil bildet den Nenner der PSS. Gl. (12) vereinfacht sich zu:

$$\begin{aligned} & (\mu_7 s^7 + \mu_6 s^6 + \mu_5 s^5 + \mu_4 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_2 s^2 + \mu_1 s + I) \cdot \\ & \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix} = -K_{LR}^{-1} [(T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I) \\ & (K_D \cdot s^2 + K_F \cdot s) - K_{LR}] \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ w \end{pmatrix}_{\text{Straße}} - u_{\text{Preview}}^* \quad \text{Gl. (12)} \end{aligned}$$

Diese Matrixgleichung wird als entkoppelbar betrachtet. Durch die Diagonalstrukturvorgabe für das Wunschpolynom 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  $\vartheta_j$  folgende skalare Gl. (13) angegeben werden:

$$N_{j\_Wunsch} \cdot \vartheta_j = Z_{j\_Straße} \cdot \vartheta_{j\_Straße} - u_{\text{Preview\_Modus\_}\vartheta_j}^* \quad \text{Gl. (13)}$$

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 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 als angenehmer empfunden wird, da er eine geringere Bewegungskomplexität wahrnimmt. Dabei behält die Gesamt-

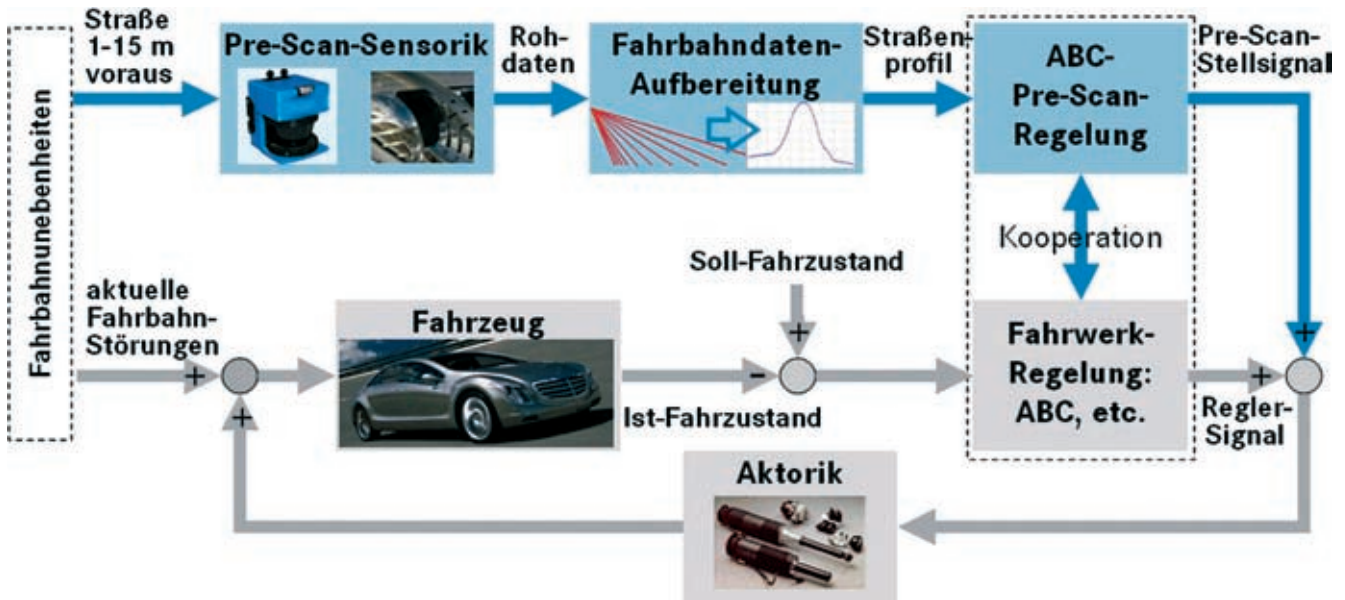


Bild 6: Gesamtkonzept der Pre-Scan-Fahrwerkregelung

struktur die vorgesehenen System- und Robustheitseigenschaften. Es erfolgt zunächst ein Ausklammern des gemeinsamen Polynoms  $N_{j,g}$ , Gl. (14).

$$(N_{j,g} \cdot N'_{j,Wunsch}) \cdot \vartheta_j = (N_{j,g} \cdot Z'_{j,Stra\beta e}) \cdot \vartheta_{j,Stra\beta e} - u^*_{Preview\_Modus\_ \vartheta_j} \quad \text{Gl. (14)}$$

Die PSS wird durch Vorgabe eines skalaren Wunschpolynoms  $Z_{j,Stra\beta e}^{Wunsch}$  für den Zählerterm  $Z'_{j,Stra\beta e}$  bestimmt, Gl. (15).

$$(N_{j,g} \cdot N'_{j,Wunsch}) \cdot \vartheta_j = (N_{j,g} \cdot Z'_{j,Stra\beta e}) \cdot \vartheta_{j,Stra\beta e} - u^*_{Preview\_Modus\_ \vartheta_j} \quad \text{Gl. (15)}$$

Es folgt, Gl. (16):

$$N_{j,g} \cdot [Z'_{j,Stra\beta e} - Z_{j,Stra\beta e}^{Wunsch}] \cdot \vartheta_{j,Stra\beta e} = u^*_{Preview\_Modus\_ \vartheta_j} \quad \text{Gl. (16)}$$

Im nächsten Schritt wird eine Frequenzreduktion durchgeführt, die unerwünschte Pre-Scan-Aktivitäten durch hochfrequente Störanteile in  $\vartheta_{j,Stra\beta e}$  vermeidet. Die obige Gl. (16) geht somit über in, Gl. (17):

$$N_{j,g}^{red} \cdot [Z'_{j,Stra\beta e} - Z_{j,Stra\beta e}^{Wunsch}]^{red} \cdot \vartheta_{j,Stra\beta e} = u^*_{Preview\_Modus\_ \vartheta_j} \quad \text{Gl. (17)}$$

Werden die Kompensationsentwürfe für alle Freiheitsgrade zusammengefasst, kann die Pre-Scan-Designgleichung in die Ursprungsgleichung eingesetzt werden, Gl. (18):

$$u_{Preview} = (T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + I)^{-1} \cdot K_{L,R} \cdot N_{j,g}^{red} \cdot [Z'_{j,Stra\beta e} - Z_{j,Stra\beta e}^{Wunsch}]^{red} \cdot \begin{pmatrix} Z \\ n \\ W \end{pmatrix}_{j,Stra\beta e} \quad \text{Gl. (18)}$$

### 7 Realisierung

Es stellt sich die Frage, wie das Wunschzählerpolynom  $Z_{j,Stra\beta e}^{Wunsch}$  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  $Z'_{j,Stra\beta e}$ , die mit Ableitungspotenzen der nullten, ersten und zweiten Ordnung verknüpft sind, belassen werden, beziehungsweise können nur bei sehr kleinen Geschwin-



Bild 7: Überfahrt der Pre-Scan-Schwelle



**Bild 8:** Die Pre-Scan-Schwelle ist eine 5 cm hohe und 1 m lange sinusähnliche Bodenwelle

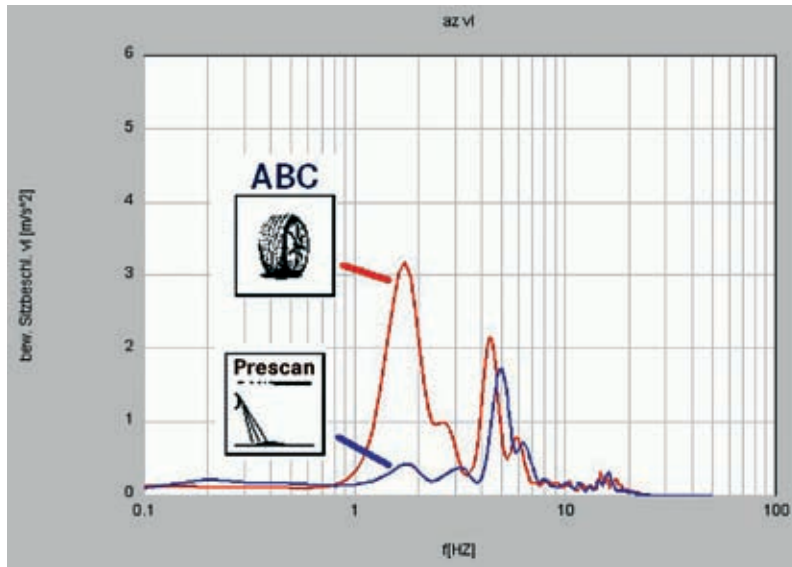
digkeiten reduziert werden. Im allgemeinen Fall werden daher die Koeffizienten von  $Z_{j\_Straße}^{Wunsch}$  bis zur zweiten oder dritten Ordnung denen von  $Z'_{j\_Straße}$  entsprechen müssen. Dies führt für die PSS auf ein Zählerpolynom, das erst ab der zweiten

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  $(T_4s^4 + T_3s^3 + T_2s^2 + T_1s + I)$  und somit die Realisierbarkeit gefährdet ist, kann das

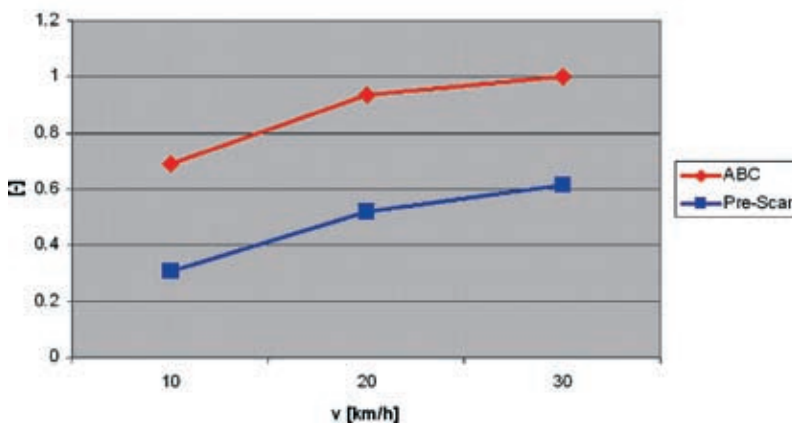
Fehlen der Koeffizienten nullter und erster Ordnung günstig ausgenutzt werden. Durch eine phasenfreie Vorwärts-Rückwärtsfilterung des ermittelten Straßenprofils wird die erste und zweite Ableitung an den vier Radaufstandspunkten direkt berechnet. Der Zählergrad der PSS kann daher formal zwei Ordnungen 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.

## 8 Ergebnis

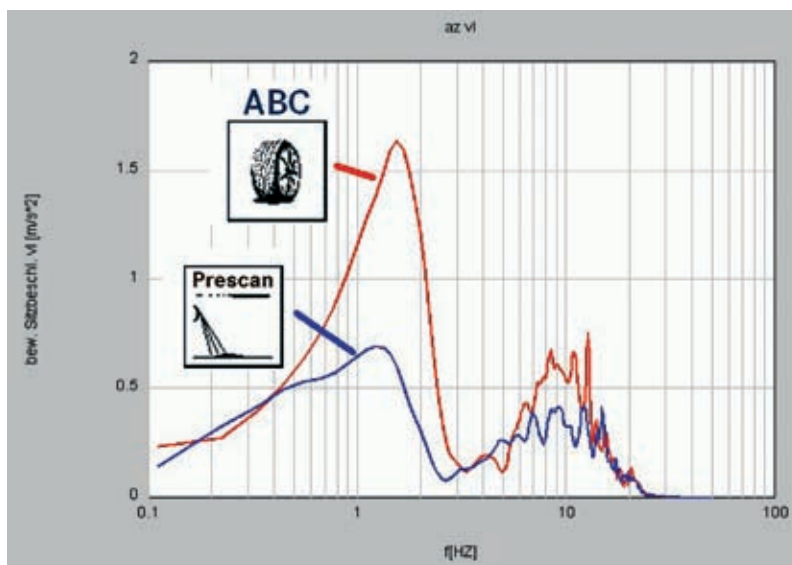
Um das Potenzial von ABC Pre-Scan untersuchen zu können, wurde das Gesamtkonzept, **Bild 6**, zunächst in einem Prototyp dargestellt, **Bild 7**. Bei Messfahrten über die sogenannte Pre-Scan-Schwelle kann das Potenzial voll ausgeschöpft werden, **Bild 8**. Der Vergleich zwischen den nach [6] bewerteten Frequenzspektren



**Bild 9:** ABC Pre-Scan reduziert bei Überfahrt der Pre-Scan-Schwellen die Beschleunigungen am Fahrersitz



**Bild 10:** Vergleich der normierten Stößigkeit am Fahrersitz bei Schwellenüberfahrt. Bei drei verschiedenen Geschwindigkeiten zeigt Pre-Scan sein Potenzial

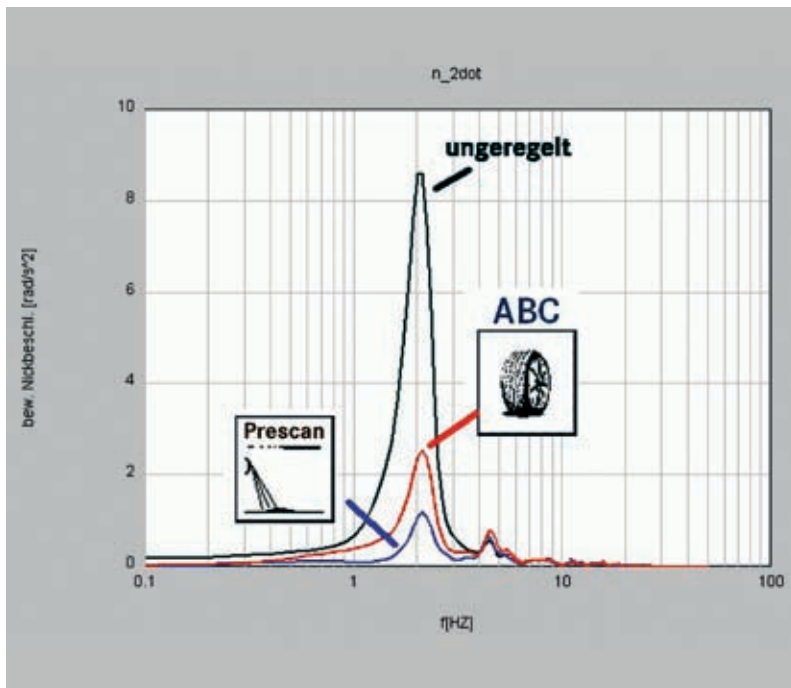


**Bild 11:** Vergleich der bewerteten Frequenzspektren bei einer Autobahnfahrt mit 100 km/h

der Fahrersitzbeschleunigung zeigt die Komfortverbesserung durch Pre-Scan, **Bild 9**. In **Bild 10** 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 11** zeigt das Frequenzspektrum der Fahrersitzbeschleunigung bei einer Autobahnfahrt mit 100 km/h. Pre-Scan erzielt gegenüber ABC einen Komfortvorteil. Einen ebenso großen Vorteil kann Pre-Scan auf dem so genannten Freeway-Hop, einer Autobahn mit zyklisch wiederkehrenden Betonplattenschlägen, erzielen. **Bild 12** zeigt die Gegenüberstellung der bewerteten Nickbeschleunigungen an der Fahrerposition. ABC reduziert deutlich die Schwingungen gegenüber dem unregelmäßigen Fahrzeug. Pre-Scan kann die Beschleunigungen noch einmal deutlich verringern.

## 9 Zusammenfassung

Pre-Scan fasst die Möglichkeiten eines aktiven Fahrwerks mit der lasergestützten Fahrbahnhöhenprofilerkennung durch ein integrales Regel- und Steuerkonzept zu einer Funktion 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 Fahrzeugbewegung, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs 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 deutlich verbesserter 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 präsentiert.



**Bild 12:** Vergleich der bewerteten Frequenzspektren der Nickbeschleunigung auf dem Freeway-Hop bei 40 km/h

### Literaturhinweise

- [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] Daimler Chrysler 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

Download des Beitrags unter  
[www.ATZonline.de](http://www.ATZonline.de)

**ATZ**  
 online

**ATZ**

Read the English e-magazine.  
 Order your test issue now:  
[viewweg@abo-service.info](mailto:viewweg@abo-service.info)