



Effizientes Testen für mehr Energieeffizienz

Der Rollenprüfstand als mechatronische Entwicklungsplattform

Individuelle Mobilität von heute bedeutet – neben Komfort und Sicherheit – vor allem Energieeffizienz. Ein energieeffizientes Gesamtfahrzeug stellt hohe Anforderungen an die Steuerungs- und Regeltechnik, da die Funktionen oft auf viele Steuergeräte verteilt sind und sich erst im optimierten Zusammenspiel die im Lastenheft festgelegten Ziele erreichen lassen. Die von AVL beschrittene Weiterentwicklung des klassischen Rollenprüfstands hin zu einem leistungsfähigen „Vehicle-in-the-Loop“-Prüfstand ist daher eine logische Konsequenz. Wie der Rollenprüfstand zu einer mechatronischen Entwicklungsplattform wird und den Automobilentwicklern dabei hilft, „grüne“ Technologien kosteneffizient auf die Straße zu bringen, lesen Sie in diesem Artikel.

1 Einleitung

„Total Energy Efficiency Testing“ hat zum Ziel, durch Tests am Prüfstand den im späteren Einsatz sich einstellenden Energieverbrauch realitätsnah zu messen, zu bewerten und zu optimieren. Hierbei sind die unterschiedlichsten Betriebs- und Umgebungsbedingungen für folgende Aufgabenstellungen zu berücksichtigen:

- Welchen Realverbrauch hat das Fahrzeug im Vergleich zum gesetzlichen Zyklus?
- Welcher Verbrauch ergibt sich bei den Tests der Populär- und Fachpresse? Durch welche Maßnahmen ist hier eine gute Bewertung erzielbar? Bei den Tests durch Motorjournalisten, etwa in der Verbraucherrunde von „auto motor und sport“, hat der Realverbrauch ein hohes Gewicht und ist somit ein wesentliches Kriterium für die Entscheidung über den Kauf eines Fahrzeugs [1].
- Welchen Einfluss haben verschiedene Reibschlussverhältnisse (Reifen/Fahrbahn), Bereifungsvarianten (Sommer/Winter) und das Seitenwindverhalten auf den Kraftstoffverbrauch?
- Welchen Einfluss hat das Fahrerverhalten? Welches Design führt zu einer hohen „Fuel Economy Robustness“ im Hinblick auf das Fahrerverhalten?
- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Beladungszustände und deren Verteilung (Vorder-/Hinterachslast)? Die Fahrmanöverkataloge unterscheiden hier zwischen unterschiedlichen Leergewichten durch Ausstattung und Bauvarianten, dem Testgewicht, der Besetzung durch Personen sowie zwischen Dach- und Anhängelasten.
- Wie können Fahrerassistenzsysteme (ADAS) wie Adaptive Cruise Control (ACC) zur Kraftstoffeinsparung genutzt werden?
- Wie kann der Kraftstoffverbrauch auf „Raum und Zeit“ hin optimiert werden, also auf eine bestimmte Fahrstrecke, die darüber hinaus oft noch von bestimmten Fahrern zu bestimmten oft regelmäßig wiederkehrenden Tages-, Wochen-, Jahreszeiten befahren wird, optimiert werden? Anders formuliert: Lässt sich ein Streckengedächtnis realisieren? Welchen Beitrag leisten zukünftig digitale Karten und GPS im Hinblick auf eine vorausschauende Betriebsstrategie?

Die in diesem Artikel beschriebene Entwicklungs- und Testumgebung hat das Ziel, durch Fahrversuche am Rollenprüfstand das Fahrzeug (möglichst) im gesamten Fahrmanöver-Parameterraum realitätsnah zu betreiben, um so die im späteren Alltagsgebrauch vorkommenden verbrauchsrelevanten Situationen abzudecken. Einen „energetischen Fingerabdruck“ zu ermitteln, ist vor dem Hintergrund der frühzeitigen Absicherung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs ein Hauptanliegen dieser von AVL entwickelten Testmethode. Das Verfahren leistet darüber hinaus einen signifikanten Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeit. Denn eines ist klar: So viel die Fahrzeugentwickler derzeit auch erreicht haben – mit den steigenden Anforderungen muss die weitere Entwicklung zügig vorangehen.

2 Manöver- und ereignisbasiertes Testen

Die Arbeitsmethode, mit der Testfälle am Rollenprüfstand mit AVL InMotion umgesetzt werden, wird mit dem Begriff „Manöver- und ereignisbasiertes Testen“ belegt. Dieser Methode liegt im Kern folgende Idee zugrunde: Fahren, das ultimative Ziel der Fahrzeugentwicklung, ist letztlich eine Abfolge von Ereignissen und Manövern. Daher müsste eine solche manöver- und ereignisbasierte Testbeschreibung eine hocheffiziente „Lingua Franca“ im Fahrzeug-Entwicklungsprozess darstellen. Im Ergebnis erlaubt eine manöver- und ereignisbasierte Entwicklungsumgebung daher auch eine Verschmelzung traditionell getrennter Entwicklungsbereiche (Fahrwerk/Antriebsstrang), wodurch zusätzlich Vernetzungspotenziale gehoben werden. Auch durch die einzigartige Vereinigung der vier Testumgebungen Büro, Labor, Prüfstand und Straße (Office – Lab – Testbed – Road) unter eine gemeinsame Benutzeroberfläche sowie Datenverwaltung wird eine neue Qualität im Entwicklungsprozess erzielt.

Während der letzten zehn Jahre wurde oft von „Synergien“ gesprochen, zu oft. Doch aufgrund der heutigen Kombination aus technologischer Reife (zum Beispiel von Assistenzsystemen, elektrischer Horzont) und der ökonomischen Notwendigkeit einer nachhaltigen Mobilität wird

heute erkannt, dass die CO₂-Optimierung quer durch alle Funktionen und Fachbereiche gehen muss. Durch entsprechende Aufrüstungen ist es möglich, das Zusammenwirken der hochgradig vernetzten Einzelsysteme im Gesamtverbund am AVL-Rollenprüfstand effizient zu testen.

3 Absinth-Regelungsstrategie

Nach Stand der Technik werden am Rollenprüfstand die Fahrwiderstände rechen-technisch durch einen polynomialen Ansatz – etwa vom Typ

$$F_x = F_{00} + C_0 \cdot v + C_2 \cdot v^2 \quad (1)$$

– festgelegt, **Bild 1**. Dieser Ansatz ist im Hinblick auf eine ganzheitliche Bewertung der Energiebilanz und die in der Einleitung genannten Aufgabenstellungen unzureichend [3]. Welchen Anteil hat etwa der Walkwiderstand des Reifens? Welchen Einfluss haben Umgebungsbedingungen (zum Beispiel Reifentemperatur- und Reifenfülldruck)? Wie groß ist der Anteil aufgrund der Unebenheit der Fahrbahn sowie der dynamischen Radlasten? Wie groß ist der Einfluss einer nassen oder schneebedeckten Fahrbahn (Schwallwiderstand, erhöhter Schlupf) oder auf Schlechtwegstrecken? Wie groß ist der Verlustanteil durch die Achsgeometrie – also insbesondere Vorspur und Sturz – auch bei Geradeausfahrt? Wie groß ist der Leistungsverlust beim Kurvenfahren (kombinierter Umfangs- und Seitenschlupf, Rückstellmomente etc.) und bei transientem Reifenverhalten? Welchen Beitrag kann die

Fahrwerksentwicklung (Achsauslegung) zur CO₂-Reduktion leisten? Diese und viele andere zur Ermittlung des „energetischen Fingerabdrucks“ – also zur ganzheitlichen und realitätsnahen Bewertung der Verlustleistung und damit des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs – zentralen Fragen konnten bislang auf Rollenprüfständen nicht erfasst werden.

Abhilfe bringen hier AVL-Rollenprüfstände im Zusammenspiel mit der von den Autoren zum Patent angemeldeten „Absinth-Regelungsstrategie“. Der dahinterliegende Grundgedanke ist es, den Kraftschluss (Power Bond) von der Reifen-Fahrbahn-Kontaktzone in die Seitenwellen und sogar vor das Achsgetriebe (Differenzial) zu verlegen. Laut Definition tauschen reale und virtuelle Welt am Prüfstand über definierte Schnittstellen (sogenannte PowerBonds) die Leistungsgrößen aus. Die Antriebsmomente und Drehzahlen im PowerBond werden hierfür entweder aus der Zugkraftbestimmung des Prüfstands oder über Drehmoment-Messräder bestimmt. Der Reifen ist somit nicht mehr Teil des Prüflings, sondern wird zu einem Teil des Prüfstands. Sofern der PowerBond auf die Eintriebsseite des Achsdifferenzials verlegt wird, sind auch Seitenwelle und Achsdifferenzial Teil des Prüfstands und nicht des Prüflings. Die Reifenverluste werden am AVL-Rollenprüfstand mit AVL InMotion durch leistungsfähige echtzeitfähige Reifenmodelle simulationstechnisch erfasst, **Bild 2**. Aufgrund der Vielzahl von Wirkparametern (Radlast, Schräglaufwinkel, Sturz, Umfangsschlupf, Fülldruck, Reifentemperatur, Fahrbahnbeschaffenheit, Reibwert usw.) und der ausgeprägten Nichtlinearität und Dynamik der Reifen-

physik kommen sehr detaillierte Reifenmodelle zur Anwendung wie TaMeTire, ein von Michelin entwickeltes thermomechanisches Reifenmodell [4]. Andere Standardformate wie TYDEX, Pacejka Magic Formula oder kundenspezifische Reifenmodelle werden über Standardschnittstellen in eine Reifen-Modellbibliothek eingebunden.

Folgende weitere 3D-mechanische Kopplungseffekte zwischen realem Antriebsstrang (Prüfling) und Gesamtfahrzeug (simuliert) werden von AVL InMotion berücksichtigt: Abstützmomente (Aggregat-lager, Fahrscemellager), zeitvariable Beugung der Gelenkwellen (also die Kopplung mit dem Radhub) sowie gyroscopische Effekte, wie sie etwa auf ein gierendes Fahrzeug insbesondere bei Schaltvorgängen einwirken [5].

Die Regelungsstrategie hat darüber hinaus den Vorteil, dass der Reifen als Störgröße (Streuung der Messergebnisse durch Aufheizung und Profilverschleiß) eliminiert wird. Der Reifen muss im Testbetrieb weniger häufig gewechselt werden, da sein Verhalten auf die Prüfergebnisse keinen Einfluss mehr hat – was Kosten und Zeit spart. Sofern auf die Verwendung einer Radmessnahe verzichtet wird, wird das Reifenmodell im „Absinth Mixed-Mode“ betrieben: Die Kraft F_x wird (in Fahrzeuglängsachse) real gemessen, die anderen Kraft-/Momentenkomponenten des Reifens werden simuliert. Steht auch keine Zugkraftmessdose, sondern nur das Moment der Trommel zur Verfügung, kann messtechnisch nicht zwischen F_x und Rollwiderstandsmoment im Radaufstandspunkt (M_r) unterschieden werden. In diesem Fall wird M_r über geeignete Schätzverfahren

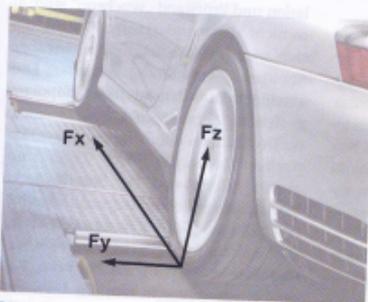


Bild 1: Kraftgrößen am Reifen

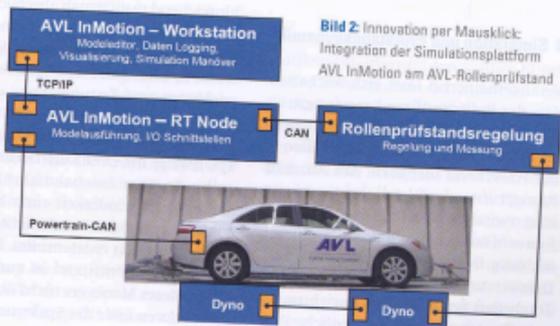


Bild 2: Innovation per Mausklick: Integration der Simulationsplattform AVL InMotion am AVL-Rollenprüfstand

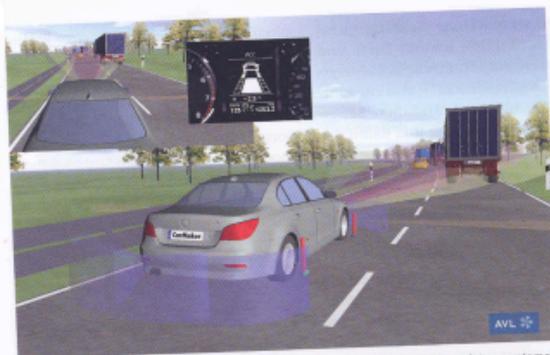


Bild 3: Verkehrssimulation am Rollenprüfstand: Die Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen und Antriebsstrangregelung ermöglicht geringeren Kraftstoffverbrauch

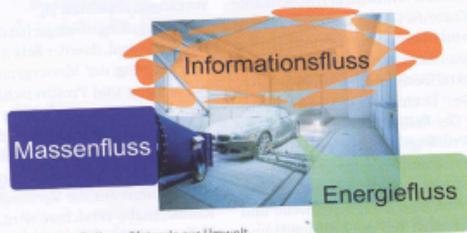


Bild 4: Schnittstellen des Rollenprüfstands zur Umwelt

separiert. F_x und M_x entstammen dann der Messung, die vier anderen Kräfte/Momente der Simulation. Wird im Manöver der Reifen im Grenzbereich des Kraftübertragungspotenzials und insbesondere bei kombiniertem Schlupf betrieben, ist die Verwendung einer Radmessenabbeugung zu empfehlen.

4 Simulation und Prüfstandsynamik

Verallgemeinernd lässt sich festhalten, dass der Rollenprüfstand regelungstechnisch ähnlich dem Antriebsstrangprüfstand betrieben wird. In beiden Fällen ist der PowerBond identisch. Am Antriebsstrangprüfstand erfolgt die Leistungskopplung zwischen Prüfling und Prüfstand formschlüssig, am Rollenprüfstand kraftschlüssig. Das ist der zentrale Unterschied. Daraus – und aus den unterschiedlichen Trägheiten der Belastungseinrichtungen – ergibt sich eine unterschiedliche Prüf-

standsdynamik. Für viele Applikationsaufgaben – insbesondere zur Optimierung des Kraftstoffverbrauches – ist die Dynamik moderner Rollenprüfstände ausreichend. **Bild 3.** Seitenwandsteifigkeiten- und dämpfungen sowie die ersten Eigenschwingungsformen des Reifens (Reifen/Gürtel/Startkörpermode) [6] werden „in erster Ordnung“ für die meisten Testaufgaben hinreichend realitätsnah abgebildet.

An dieser Stelle muss mit einem weit verbreiteten Missverständnis aufgeräumt werden: Eine simulationsbasierte Entwicklungs- und Testumgebung erfordert nicht notwendigerweise einen hochdynamischen Prüfstand. So können beispielsweise die Drehzahl-/Drehmoment-sollwerte einer Autobahnfahrt bei konstanter Geschwindigkeit einer leistungsfähigen, realitätsnahen 3D-Echtzeit-Fahrzeugsimulation entstammen. Ein hochdynamischer Prüfstand ist zur Nachbildung dieses Manövers nicht notwendig. Am anderen Ende des Spektrums finden

sich dynamische Fahrmanöver wie etwa der Lastschlag oder Knallstart. Diese können realitätsnah nur an hochdynamischen Antriebsstrangprüfständen dargestellt werden [7]. In der virtuellen Welt können beliebige Drehzahl-/Drehmomentgradienten erzeugt werden, also auch solche, die im späteren Einsatzbereich des Fahrzeugs selten oder gar nicht vorkommen. Die Schlussfolgerung daraus bedeutet, dass zwar nicht jeder Prüfstand den ganzen Fahrmanöverraum abdecken kann (das kann auch das Testgelände nicht), dass aber sowohl quasistationäre, transiente als auch hochdynamische Prüfstände manöver- und ereignisbasiert betrieben werden können.

5 Betriebsarten im Simulationsmodus

Als „Free Mode“ wird eine Betriebsart bezeichnet, bei der der Prüfling in einem geschlossenen Regelkreis über die PowerBonds mit dem virtuellen Fahrzeug- und Umgebungsmodell betrieben wird. Kein Prüfstand kann jedoch – wie bereits oben diskutiert – regelungstechnisch beliebige Bandbreiten darstellen, also beliebige von der Simulationsumgebung angeforderte Gradienten und Frequenzgänge umsetzen. Teilweise werden Drehzahlen/Drehmomente auch bewusst begrenzt, um den Prüfling zu schützen. Die Prüfstandsdynamik ist jedoch vorab meist sehr genau bekannt. Die angeforderten Drehzahlen können somit auf ihre Realisierbarkeit im Prüfstandskontext durch geeignete Prüfstandsmodelle online (also in Echtzeit) überprüft werden.

Diese Überlegung führt zu der von AVL zum Patent angemeldeten Strategie, die Simulation so zu beeinflussen, dass Simulation und Prüfstand „synchron“ sind, also nicht auseinanderlaufen. Die Simulation wird im Bedarfsfall dabei im sogenannten „Servo Mode“ betrieben. Dies geschieht entweder durch das Einprägen geeigneter Servo-Momente oder indem die Drehzahl rheonom (im Sinne der klassischen Mechanik) durch Zwangsmomente geführt wird. Der Begriff „Servo Mode“ leitet sich von den von H. Behghin eingeführten „Servo Constraints“ ab [8]. Die Umschaltung zwischen „Servo Mode“ und „Free Mode“ erfolgt stoßfrei zwischen zwei Integrationsschritten. Die im Servo Mode dem Modell eingepreisten virtuellen

„Einfaches und objektives Benchmarken“

Interview mit Dr.-Ing. Christoph Schmidt und Dipl.-Ing. Uwe Schmidt, beide Geschäftsführer der AVL Zöllner GmbH in Bensheim und der AVL-Moravia s.r.o. in Hranice (Tschechien)



Christoph Schmidt



Uwe Schmidt

zunehmende Komplexität und Vernetzung von Komponenten und Systemen im Gesamtfahrzeug begrenzen die vollständige „In the loop“-Entwicklung der Komponenten. In Abhängigkeit des Entwicklungsstands haben beide Vorgehensweisen ihre Berechtigung. Der Rollenprüfstand bietet darüber hinaus, da das Fahrzeug als geschlossenes System getestet wird, einfaches und objektives Benchmarken von Versionen, Weiterentwicklungen und Wettbewerbsprodukten.

Wie hoch ist die Effizienzsteigerung, wenn Sie alle Prüfstände einheitlich steuern und eine durchgängige Datenverwendbarkeit sichern? Die Einführung einer durchgängigen Entwicklungsplattform für Motoran- und Fahrzeugversuch allein führt nicht zu einer Effizienzsteigerung, sondern erfordert die Einführung und Umsetzung angepasster, das Potenzial hebender Prozesse.

Wir gehen davon aus, dass die in den letzten Jahren signifikant verkürzten Entwicklungszeiten trotz zunehmender Komplexität – Stichwort Hybrid – weiter verkürzt, mindestens jedoch auf dem heute erreichten Niveau gehalten werden können. AVL stellt dem Kunden für den durchgängigen Entwicklungsprozess die notwendige Umgebung zur Verfügung – daneben kann AVL den Kunden beratend beim Prozessdesign und Roll-out unterstützen und so die Werkzeuge optimal einsetzen.

Ersetzt eine Fahrbarkeitsbewertung auf dem Rollenprüfstand künftig das „Popometer“ des Versuchsfahrers vollständig?

Nein – es erspart aber Routinearbeit und ermöglicht rationelles Testen. Damit wird Kapazität für anspruchsvollere Arbeiten wie die Validierung frei. Aber die Probefahrt des Vorstands wird sich damit nicht ersetzen lassen.

Welche Rolle spielt die Rolle bei der Konfiguration neuer Antriebskonzepte, zum Beispiel bei der Teileelektrifizierung?

Die Rolle liefert nach der Straße das realistischste Umfeld, weil dort am wenigsten simuliert werden muss. Getestet werden können darauf Fahrzeuge mit Antrieben aller Art – konventionell, hybrid, rein elektrisch, das heißt, die Rolle stellt hier eine universelle Entwicklungsumgebung und wird bei weiterer Diversifikation der Antriebsarten zukünftig eine größere Bedeutung erlangen.

AVL Zöllner hat einen großen Namen als Prüfstandsanbieter – wie wichtig ist die Verzahnung mit übrigen AVL-Bereichen wie Simulation oder Applikationsentwicklung?

AVL Zöllner liefert und entwickelt solide und moderne Rollenprüfstandstechnik für Anwendungen wie NVH, EMV, MACD, Emissionsentwicklung und Kalibrierung für alle Fahrzeugarten und -größen. Die Integration in AVL mit ihren modernen Messtechniken und Applikationswerkzeugen geben der Prüfstandsentwicklung immer wieder neue Impulse, die final in einen höheren Kundennutzen umgesetzt werden.

Brauchen wir künftig überhaupt noch Rollenprüfstände, wenn wir Komponenten und Systeme doch „in the loop“ auch weniger aufwändig testen können?

Moderne Entwicklungsprozesse zeichnen sich zwar durch den intensiven Einsatz von Simulation aus, die gerade am Anfang der Prozesse viele Versuche ersetzt, gleichzeitig werden aber Untersuchungen von der Straße in das Labor auf den Rollenprüfstand verlagert, das heißt, der Rolle kommen hier weitere und neue Entwicklungsaufgaben zu. Der Vorteil der Rolle ist hier die Objektivierung – reproduzierbare, jederzeit abrufbare Umweltbedingungen gewährleisten effizientes Testen und Messen. Der Versuchsbetrieb wird nicht durch Wetter, Reise- und Arbeitszeiten limitiert. Der Rollenprüfstand als Ersatz des Straßentests in unmittelbarer Nähe zur Entwicklung ermöglicht darüber hinaus den Einsatz komplexer Messtechnik „auf der Straße“. Die

Zusatzmomente werden protokolliert und stehen so dem Benutzer zur Verfügung. Das einfachste Beispiel für die Betriebsart im „Servo-Mode“ ist eine Drehzahlbegrenzung.

6 Anwendung als mechatronische Entwicklungsplattform

6.1 Schnittstellen

In hybriden und zunehmend auch in konventionellen Fahrzeugkonzepten über-

nehmen vernetzte Steuergeräte die energetisch relevanten Funktionen in einem stimmigen und leistungsfähigen Systemverbund. Für die Erprobung bedeutet dies die Bereitstellung leistungsfähiger Schnittstellen, über die der Prüfling sich mit dem Prüfstand austauscht. Die drei zentralen mechatronischen Schnittstellen sind bekanntermaßen „Materie“, „Energie“ und „Information“ [9]. Bild 4. Die Beherrschung der Schnittstelle „Materie“ wird an AVL Leistungsprüfständen über eine leistungsfähige Öl-, Wasser- und Kraft-

stoffkonditionierung sowie über Klima- und Höhenkammern sichergestellt.

Die Beherrschung der Schnittstelle „Energie“ erfolgt über Leistungsbremsen mit der dazugehörigen Mess- und Regeltechnik sowie bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen über Batteriesimulatoren. Die realitätsnahe Nachbildung der Schnittstelle „Information“ hat erstaunlicherweise noch nicht die Beachtung gefunden, die ihr aufgrund ihrer Bedeutung als Innovationssträger und Markttreiber zukommt. Der von AVL kontinuierlich beschrittene „Vehicle-

in-the-Loop"-Ansatz schließt diese Lücke. Der klassische Rollenprüfstand entwickelt sich so evolutionär weiter, hin zu einer integrierten mechatronischen Entwicklungs- und Testplattform. Eine solche Plattform sollte als Gesamtkonzept zur Optimierung der Produktentwicklung begriffen werden. Im Folgenden wird anhand ausgewählter Beispiele dargestellt, welche Applikationsmöglichkeiten ein „Vehicle-in-the-Loop“-Rollenprüfstand bietet.

6.2 Applikationsbeispiele

Beim Einachs-Rollenprüfstand drehen die nicht angetriebenen Räder nicht mit. Die Raddrehzahlen der stehenden Räder entsprechen daher nicht dem realen Fahrbetrieb. Auch eventuelle Radbremsmomente der nicht angetriebenen Achse werden nicht berücksichtigt. Die Raddrehzahlen werden daher beim Einsatz von AVL InMotion am Rollenprüfstand aus der Simulation heraus realitätsnah erzeugt. AVL ermöglicht es, induktive, magnetoresistive oder „intelligente“ Raddrehzahlsignale über IO-Module nachzubilden. Sofern es bei dem geforderten Manöver zu Bremsengriffen kommt, werden die Kräfte und Drücke in den Bremsattelkolben direkt gemessen und online in das Modell zurückgelesen. Die Verwendung von Steckverbindern aus der Serienfertigung sowie von vorkonfigurierten Messbrems scheiben führt zu kurzen Rüstzeiten. Im Ergebnis werden so beispielsweise der „Rock Cycle“ (Herausschaukeln aus der Schneekuhle) oder das Anfahrverhalten am Steigungshügel und aus dem Rückwärtsrollen mit jeweils sehr weichen Brems- und Reglereingriffen dadurch erstmals am Rollenprüfstand darstellbar. Für eine energieeffiziente Auslegung wichtig ist, dass die Messbrems scheiben auch die nach Lösen des Bremspedals verbleibenden Restbremsmomente ermitteln und der Simulation zur Verfügung stellen. Restbremsmomente betragen bis zu 50 % des Rollwiderstandsmomentes und sind daher verbrauchsrelevant.

Insbesondere im Stadtverkehr, aber auch bei Kolonnenverkehr mit wechselnden Geschwindigkeiten bieten ACC-Systeme (Adaptive Cruise Control) ein signifikantes und bislang noch viel zu wenig beachtetes Potenzial zur Kraftstoffeinsparung. Die Vielzahl von möglichen Szenarien, die sich aus den Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug, Verkehrssitu-

ation und Umwelt ergeben, stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Die wichtigsten Szenarien müssen als Testfälle identifiziert und in der Simulation reproduzierbar umgesetzt werden.

Mit AVL InMotion kann ACC nunmehr am AVL-Rollenprüfstand unter realistischen Bedingungen getestet werden. Frei konfigurierbare Verkehrssituationen mit einer beliebigen Anzahl von beweglichen Objekten sind zu erstellen. Die Sensorinformation des Radars wird vom Testsystem erzeugt und dem realen Fahrzeug zugespielt. Übergeordnete Fahrdynamikregler koordinieren die Eingriffe in die Motorsteuerung und modulieren bei Bedarf auch aktiv die hydraulische Bremse.

Karten- und GPS-Informationen werden derzeit noch nicht genutzt, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, bieten aber ein großes Potenzial. Zukünftige Navigationssysteme („Elektrischer Horizont“) stellen Informationen über Steigungen, Kurvenradien, Geschwindigkeitsbegrenzungen, sonstige Verkehrseinschränkungen und sogar Informationen über die spektralen Unebenheitsdichten der Straße zur Verfügung. Sie berechnen darüber hinaus die Strecke, die das Fahrzeug höchstwahrscheinlich nehmen wird. Vorausschauende Systeme adaptieren das Antriebsmanagement an den erwarteten Streckenverlauf. Lernende Systeme protokollieren und erkennen stets wiederkehrende „Nutzungspfade“ des Fahrzeugs (Verkehrsdichte, Fahrstil) und reduzieren damit Mittelwert und Varianz des geschätzten Zyklus. Insbesondere für Hybrid- und Elektrofahrzeuge bietet diese Technologie das Potenzial eines deutlich reduzierten Kraftstoffverbrauchs.

Damit solche Entwicklungen schneller und kosteneffizienter auf die Straße gebracht werden können, rüstet AVL InMotion künftige Rollenprüfstände mit zusätzlichen Funktionen aus: Simulation der „GPS-Antenne“, RoadImporter (Import und Abbild der GPS-Strecke in das Testsystem), vorkonfigurierte ADAS-Schnittstelle und Preview Sensor.

7 Zusammenfassung

Die aufgeführten Beispiele lassen erkennen, dass die von AVL betriebene konsequente Weiterentwicklung des klassischen Rollenprüfstands hin zu einer mechatro-

nischen Entwicklungs- und Testplattform, eine kosten- und zeiteffiziente Entwicklung ermöglicht. Das gesamte Fahrzeug wird zu einem „Embedded System“ der virtuellen Umgebungswelt, in der es getestet wird. Durch die sich ständig erweiternden Fähigkeiten in der Sensorik, Mechatronik, der Datenverarbeitung und der Kommunikation wird in Zukunft eine Vielzahl an neuen Funktionen darstellbar. Die zunehmende Systemvernetzung ermöglicht Synergieeffekte, führt aber zugleich auch zu einer wesentlichen Komplexitätssteigerung. Im realen Fahrzeug werden die Einzelsysteme zusammengeführt und können so in ihrer Kombination getestet werden. Der Vehicle-in-the-Loop-Prüfstand ist daher ein Schlüssel zur Komplexitätsbeherrschung und Absicherung des gesamten funktionalen Systemverbundes: Unerwünschte Systemwechselwirkungen und Konflikte zwischen den Einzelsystemen mit den sich oft überlappenden Wirkungen werden am ViL-Prüfstand frühzeitig und kosteneffizient aufgedeckt und durch entsprechende Anpassung der Reglersoftware zielsicher beseitigt. Auch der Umgang mit der zunehmenden Variantenvielfalt wird erleichtert.

Innovative Anwendung des Rollenprüfstands für die Fahrbarkeitsabstimmung

Eine der zeitintensivsten Abstimmungsaufgaben in der Fahrzeugentwicklung ist die Optimierung der Fahrbarkeit. Um das marken- und variantenspezifische Fahrverhalten sicherzustellen, müssen zahlreiche fahrbarkeitsrelevante Stellgrößen abgestimmt werden. AVL hat einen neuen Ansatz entwickelt, der eine objektive, robuste und zeiteffiziente Abstimmung der Fahrbarkeit auf dem Rollenprüfstand ermöglicht.



1 Einleitung

Der anhaltende Kostendruck führt bei der Fahrzeugentwicklung zu einem immer stärkeren „Frontloading“. Dabei werden zum einen Testaufgaben, die früher auf dem Rollenprüfstand durchgeführt wurden, auf Motoren- oder Komponentenprüfstände verlagert. Zum anderen werden Straßentests, Erprobungen, neuerdings auch Qualitätsuntersuchungen und die Abstimmung der Fahrbarkeit (in der Motorsteuerung und der Getriebebesteuerung) vermehrt auf den Rollenprüfstand übertragen.

2 Modellbasierter Ansatz für die Fahrbarkeitsabstimmung

Die klassische manuelle Abstimmung der Fahrbarkeit auf der Straße wird vom Applikationsingenieur an Hand von subjektiven Bewertungskriterien durchgeführt. Diese Kriterien bestehen aus der gefühlten Fahrzeug-Längsbeschleunigung (absoluter Wert, Gradient, Schwingungen, Schläge, Gleichförmigkeit) und der Analyse der Signale der jeweiligen Fahrbarkeitsfunktionen im Steuergerät. Die Signale sind bei Lastwechselmanövern der Motormomentaufbau, hingegen bei Schaltvorgängen in Automatikgetrieben der Motormenteingriff sowie die Kupplungsdruckverläufe. Die Stellgrößen sind Filterparameter, mit denen der Verlauf des Momentaufbaus oder -eingriffs beeinflusst wird, und Parameter wie Füllzeit, Fülldruck oder Schaltdruck der Kupplungen. Mit dem Expertenwissen über den Zusammenhang zwischen Stellgrößen und Bewertungssignalen stimmt der Applikationsingenieur die Fahrbarkeit ab. Auf diesem Weg werden Fahrkomfort und -dynamik optimiert.

Die manuelle Vorgehensweise stößt neben der durchweg subjektiven Bewertung auf zusätzliche Schwierigkeiten: Unterschiedliche Umgebungsbedingungen (Fahrbahn, Wetter, Verkehr) führen zu einer geringen Reproduzierbarkeit. Nachtzeiten und Wochenendzeiten können für die Applikation nicht genutzt werden – was bei gegebener Vorgabe für die Entwicklungszeit eine höhere Anzahl an Prototypen bedingt. Aufgrund der zunehmenden Komplexität der Stellgrößen wird es für den Applikationsingenieur

schwieriger, den Gesamtsystemüberblick zu behalten.

Um eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Testumgebung, der Automatisierung und der Versuchsträgerausnutzung zu erhalten, ist eine objektive Bewertung des Fahrverhaltens auf einem Rollenprüfstand sinnvoll. Da die Fahrzeug-Längsbeschleunigung aufgrund der Fixierung zunächst nicht vorhanden ist, kann als äquivalentes Signal die Anbindungskraft des Fahrzeugs an der Fesselung oder die von den Rädern in die Rollen eingeleiteten Kräfte (Zugkraft) verwendet werden. Diese physikalischen Signale ermöglichen die Beurteilung des Fahrbarkeitsempfindens basierend auf objektiven Messwerten. In AVL-DRIVE ist die objektive Bewertung der Fahrbarkeit für Motor und Triebstrang in mehr als 400 Kriterien für mehr als 80 unterschiedliche Fahrmanöver (zum Beispiel „Tip In“, „Tip Out“, Schaltmanöver, Volllast- und Teillastbeschleunigungen, Anfahrmanöver) integriert. Diese Manöver werden während einer Messfahrt automatisch erkannt und online ausgewertet. AVL-DRIVE berechnet für jedes Fahrmanöver physikalische Kennwerte von vordefinierten Beurteilungskriterien wie Einzelschlag, Mehrfachschwingungen oder Ansprechverzögerung für den „Tip In“. Diese Einzelkriterien werden in Noten von 1 (keine Funktion) bis 10 (sehr gut) bewertet. Aus den Einzelkriterien eines Manövers wird eine Manöver-Gesamtbewertung errechnet (etwa für eine Volllastbeschleunigung aus dem Schubtrieb heraus) und aus allen Manöverbewertungen eine Fahrzeug-Gesamtnote ermittelt. Durch diese Umrechnungen werden die fahrbarkeitsrelevanten Signale zu skalaren Größen verdichtet, wobei ein einzelnes Manöver einem Messpunkt entspricht.

Mit dem Einsatz des Rollenprüfstands und der Objektivierung der Fahrbarkeitsbewertung kann der Schritt zur Automatisierung gemacht werden.

Dadurch können vordefinierte Fahrmanöver reproduzierbarer und effizienter gefahren werden. Trotz der Reproduzierbarkeit der Manöver tritt eine Streuung in der Bewertung der Fahrbarkeitsereignisse auf. Diese ist von vielen Faktoren wie dem aktuellen Schwingungszustand des Antriebsstrangs oder dem Kupplungszustand infolge der vorangegangenen Schaltung abhängig [1].

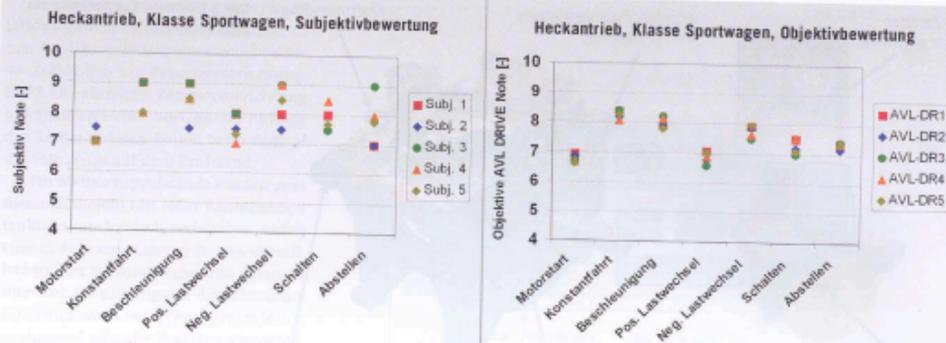


Bild 1: Vergleich subjektiver und objektiver Bewertungen der Fahrbarkeit anhand von fünf Fahrten mit fünf verschiedenen Applikationsingenieuren und AVL-DRIVE

Bei klassischer Abstimmung ist die Streuung der subjektiven Bewertung verglichen mit der objektiven Methode deutlich höher, **Bild 1**.

Aufgrund der Streuung ist für eine statistisch abgesicherte Aussage eine hohe Stichprobenanzahl von Messpunkten erforderlich. Um die Messungen in kurzer Zeit bewältigen zu können, wird der Rollenprüfstand für die Schaltqualitäts-optimierung in verschiedenen Regelungsarten betrieben. Ein Betriebspunkt, definiert über Drehzahl, Last und Gang, wird mit einer schnellen Geschwindigkeitsrampe angefahren. Nur während des eigentlichen Fahrmanövers wird der Rollenprüfstand in Straßenlastsimulation betrieben. Hierfür sind ein stoßfreier Wechsel der Regelungsart und eine stabile Regelung nach der Umschaltung wichtige Anforderungen an den Rollenprüfstand. Aufeinanderfolgende Schaltvorgänge können dadurch im Mittel mit einem Abstand von etwa 12 s und Lastwechsel-Vorgänge in zirka 15 s gefahren werden. Damit ergeben sich Gesamttestzeiten zwischen 10 und 70 h im unbeanannten Dauerbetrieb, abhängig von der aktuellen Abstimmungsaufgabe.

Den generellen Arbeitsablauf zeigt **Bild 2**. Nach dem Erstellen eines DoE-Versuchsplans [2] wird dieser automatisiert auf dem Rollenprüfstand abgefahren. Anschließend werden im Büro an Hand der Daten globale Modelle für Fahrkomfort- und Fahrdynamik-Größen erstellt. Während die manuelle Kalibrierung in lokalen Betriebspunkten durchgeführt

wird, verfolgt die automatisierte Fahrbarkeitsabstimmung einen globalen Ansatz. Neben den Stellgrößen werden zusätzlich die gemessenen Betriebsgrößen (Drehzahl und Last) in ein globales Modell eingerechnet. In diesem globalen Datensatz sind alle Informationen über

die Fahrbarkeit enthalten. Damit können Abstimmungen mittels Optimierung für verschiedene Fahrbarkeitsmodi, wie Komfort, Sport oder Supersport, ohne weitere Kalibrierschleifen durchgeführt werden. Bei der immer wichtiger werdenden individuellen Markenprägung



Bild 2: Arbeitsablauf bei der modellbasierten Fahrbarkeitsabstimmung

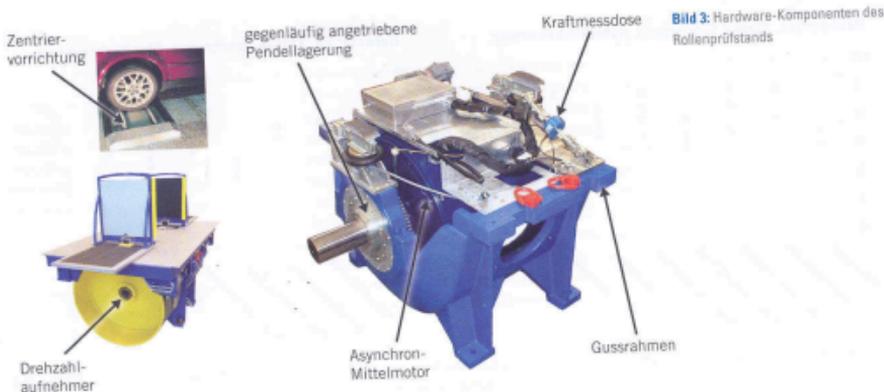


Bild 3: Hardware-Komponenten des Rollenprüfstands

jedes einzelnen Automobilherstellers mit aktuell bis zu sieben dieser Fahrbarkeitsprogramme reduziert sich der Kalibrieraufwand und Fahrzeugprototypenbedarf erheblich. Im Anschluss werden aber auch heute die Datensätze im Fahrzeug auf der Straße verifiziert.

3 Systemkonfiguration

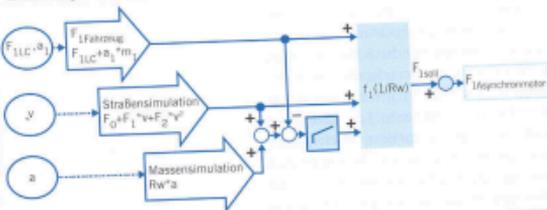
Für die Messungen auf dem Rollenprüfstand ist das Fahrzeug über eine Kraftmessdose mit einem sehr steifen Aufspannbock verbunden, da die Längskräfte nur von der Kraftmessdose aufgenommen werden. Diese nachrüstfähige Variante kam für die Untersuchungen in diesem Artikel zum Einsatz. Die an der AVL Zöllner-Rolle mögliche Nutzung des Beschleunigungssignals, direkt aus der Rollenregelung, vermeidet die zusätzliche Mechanik der Anbindung und verspricht hohe Dynamik und Messsicherheit. Dieses Signal wird über eine Messdatenerfassung an AVL-DRIVE übertragen, weitere notwendige Messsignale wie Fahrzeuggeschwindigkeit, eingelegter Gang oder Fahrpedalstellung werden vom Fahrzeug-CAN-Bus abgenommen.

Neben diesen für die Applikation notwendigen Komponenten haben der Aufbau und die Regelung des Rollenprüfstands eine wesentliche Bedeutung. Für die dynamischen Vorgänge bei der Fahrbarkeitsabstimmung ist eine hochdynamische Rolle erforderlich. Sind darüber hinaus die Vorgaben nach der Abgasse-

pezifikation C100081T1 erfüllt, so bietet der Prüfstand neben der Fahrbarkeitsabstimmung ein breites Applikationsfeld,

unter anderem für Emissionsauslegung, Dauerlauf oder Verbrauchsoptimierung, und ist gleichzeitig kostengünstig.

Einachsprüfstand



Zweiachsprüfstand

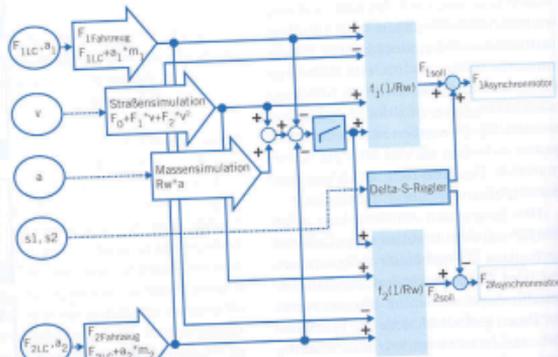


Bild 4: Regierkonfiguration auf Ein- und Zweiachsprüfständen

Den Rollenaufbau einer Achse (Simulationseinheit) bilden zwei direkt an einen Asynchron-Mittelmotor angebrachte 48-Zoll-Rollen mit Zentriervorrichtung, Bild 3. Die aktivierte Zentriervorrichtung gewährleistet eine horizontale Auflage der Reifen auf den Rollen beim Aufbau des Fahrzeugs auf dem Prüfstand.

Für Mehrachsprüfstände werden zwei dieser Einheiten mit einer Rahmenkonstruktion mechanisch verbunden, wobei eine in Fahrzeug-Längsrichtung verstellbar ist. Ein verwindungssteifer Gussrahmen zur Abstützung des Asynchronmotors sorgt auch bei hoher Dynamik für exakte und schnelle Reaktionsmomente. Eine gegenläufig angetriebene Pendellagerung zur Vermeidung von punktuellen Abnutzungen und dadurch erhöhten Losbrechmomenten befindet sich innerhalb des Drehmomentmesssystems. Damit werden temperaturabhängige Lagerverluste automatisch kompensiert und beeinflussen nicht die Genauigkeit der Drehmomentmessung. Die präzise Messung des Drehmoments selbst erfolgt durch eine temperaturkompensierte Kraftmessdose. Eine steife Ausführung der Dose und der Anlenkung führt zu einer hohen Eigenfrequenz der Pendelung.

Damit kann die Dynamik der schnellen Stromregelung von Motor und Umrichter ausgenutzt werden, Anregelzeiten unter 10 ms sind möglich.

Die Berechnung und Regelung der auf das Fahrzeug wirkenden Straßensimulationskraft erfolgt in Echtzeit. Die verwendete ARTE-Umgebung (AVL Real Time Environment) sorgt dabei für deterministische und schnelle Reaktionszeiten und ist damit Grundvoraussetzung für eine stabile Regelung, Bild 4. Die Simulation berücksichtigt die Haftreibung, die Gleitreibung und den Luftwiderstand in Form der Koeffizienten F_0 , F_1 und F_2 der Fahrwiderstandskennlinie. Die fehlende Massenträgheit des fixierten Fahrzeugs wird mit den rotierenden Rollenmassen erzeugt. Die Differenz zwischen der Fahrzeugmasse und der Rollenmasse wird mit einer Massensimulation ausgeglichen. Mit den gemessenen Geschwindigkeiten (v), Beschleunigungen (a) und Kraftsignalen (FxL) der Prüfstandsmaschine wird die vom Fahrzeug in die Straßenoberfläche eingeleitete Kraft (Fx Fahrzeug), die Kraft der Straßensimulation und die Kraft der Massensimulation berechnet. Durch die reine

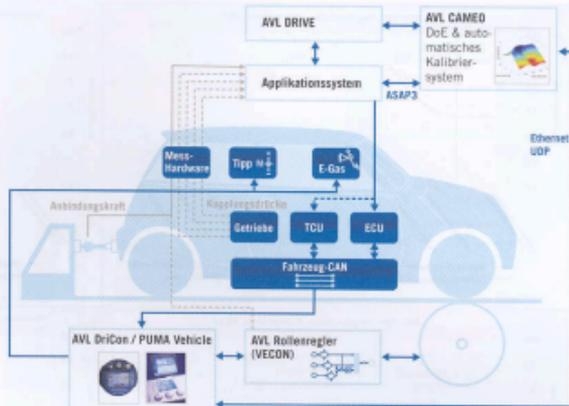


Bild 5: Systemaufbau, Testfahrzeug auf der hochdynamischen Rolle

Vorsteuerung der Kraft der Straßensimulation und des Fahrzeuges Fx Fahrzeug in Kombination mit der Regelung aller Kräfte, die additiv auf die Vorsteuerung wirkt, ist es möglich die notwendige Kraft an den Rädern Fx Soll innerhalb von Millisekunden durch den Drehstromantrieb zu stellen. Diese Art der Regelung gewährleistet eine schnelle und deterministische Reaktion des Prüfstands.

Bei zweiachsig angetriebenen Fahrzeugen sorgen die auf beiden Achsen symmetrisch benutzten Regler für die Einhaltung der berechneten Gesamtkraft bei gleicher Geschwindigkeit beider Rollen. Um Ungenauigkeiten des Simulationsmodells zu kompensieren und die Drehwinkelfehler zwischen den Rollen auf unter $0,2^\circ$ zu reduzieren, gleicht ein überlagerter Delta-5-Regler die Differenzen zwischen den Rollengeschwindigkeiten und

den Rollenpositionen (s_1, s_2) aus. Dies gewährleistet hohen Gleichlauf bei freier Zugkraftverteilung durch das Fahrzeug.

Zusätzlich zu der vorgestellten Regelung unterstützt die AVL-Zöllner-Rolle die stoßfreie Umschaltung zwischen den Regelungsarten Geschwindigkeitsvorgabe und Straßensimulation als wesentliche Voraussetzung für eine effektive Automatisierung.

Bild 5 zeigt den gesamten Systemaufbau mit dem Rollenregler AVL-VECON, der automatisierten Ansteuerung AVL-DriCon/PUMA Vehicle, dem Bewertungssystem AVL-DRIVE, dem Optimierungssystem AVL-CAMFO, dem Applikationssystem und dem aufgespannten Fahrzeug.

Mit AVL-DriCon oder PUMA Vehicle werden das Fahrpedal und das Automatik- oder Doppelkupplungsgetriebe rein elektrisch angesteuert.

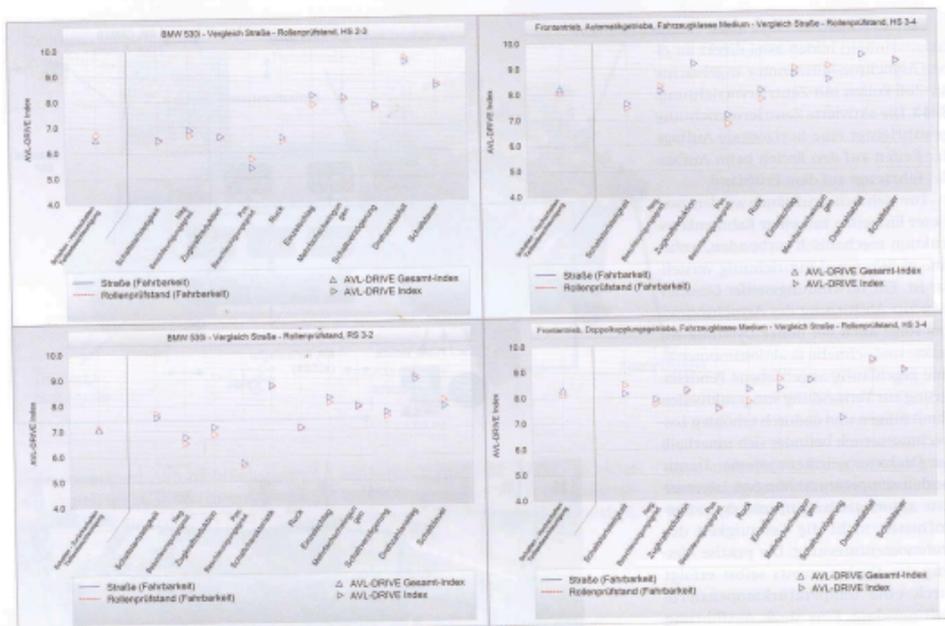


Bild 6: Vergleich der Fahrbarkeitsbewertungen für Schaltqualität zwischen Straße und Rollenprüfstand

Die Vorteile dieser elektrischen Ansteuerung sind:

- Einsatz in Serien- als auch Entwicklungsfahrzeugen
- kostengünstiger, kürzere Rüstzeiten und die erforderliche schnellere Umsetzung der Steuerbefehle als ein Fahrroboter
- gleicher Aufbau für die Straße und den Rollenprüfstand.

Über eine Ethernet-UDP-Schnittstelle erhält AVL-DriCon/Puma Vehicle vom Optimierungssystem AVL-CAMEO die Vorgaben für das aktuelle Fahrmanöver. Diese werden in Rampen für das Fahrpedal und die Rollengeschwindigkeit umgerechnet und gemeinsam mit der Regelart und der Fahrbahnsteigung an den Rollenregler und das Fahrzeug gesendet.

Neben der Steuerung des Versuchs ist in AVL-CAMEO die gesamte Versuchsplanung und Auswertung mit Modellbildung, Optimierung und Kennfeldrechner integriert. Über eine ASAP 3-Schnittstelle werden die fahrbarkeitsrelevanten ECU-/TCU-Stellgrößen an das Applikationssystem

übertragen. Die Noten und physikalischen Kenngrößen der von AVL-DRIVE bewerteten Fahrmanöver werden online an AVL-CAMEO übermittelt und gemeinsam mit den Stellgrößen in der Datenbank abgespeichert.

Die gesamte Messdatenerfassung mit der Zugkraft und eventuell weiteren Signalen wie Kupplungsdrücke, Emissionen und Verbrauch erfolgt über das Applikationssystem mit entsprechender Messhardware.

Um einen unbemannten Dauerbetrieb zu ermöglichen, ist eine Überwachung der relevanten Fahrzeug-CAN-BUS Signale und die Absicherung des Prüfings gegen Feuer und Überhitzung von Motor und Getriebe, Überdrehzahl und Überdrehmoment, Reifenschäden und übermäßige Fahrzeugbewegung, Diagnosefehler sowie Kraftstoffleckagen notwendig. Eine automatische Betankung muss eingerichtet werden.

Mit diesem Systemaufbau wurden detaillierte Korrelationsuntersuchungen von Fahrmanövern durchgeführt, um die Über-

tragbarkeit der Ergebnisse vom Rollenprüfstand auf die Straße sicherzustellen.

4 Korrelationsuntersuchung zwischen Straße und Rollenprüfstand

Für den Vergleich der Schaltqualitätsmessungen wurde ein BMW 530i mit Automatikgetriebe (AT), ein frontgetriebenes Fahrzeug mit Automatikgetriebe und ein Fronttriebler mit Doppelkupplungsgetriebe (DKG) verwendet. Der Messplan umfasst jeweils zehn Betriebspunkte, definiert durch Turbinendrehzahl über Turbinenmoment (AT) und Motordrehzahl über Motormoment (DKG), während Hochschaltungen vom zweiten in den dritten und dem dritten in den vierten Gang. Eine Rückschaltung vom dritten in den zweiten Gang wurde ebenfalls analysiert. Jeder Betriebspunkt wurde mit Serienkalibrierung gefahren und fünfmal wiederholt. Die Messungen erfolgten auf der Straße und einer hochdynamischen AVL Zöllner-Rolle.

Die Vergleichswerte der einzelnen Fahrbarkeitskriterien für die Schaltungen sind in **Bild 6** dargestellt. Die Differenz in den Bewertungsnoten ist maximal 0,5 [1] und liegt damit genau im Streubereich der AVL-DRIVE-Bewertung, **Bild 1**. Für den Vergleich des „Tip In“ wurden Variationen fahrbarkeitsrelevanter Stellgrößen mit einem Raster-Versuchsplan (343 Variationen) auf der Straße und dem Rollenprüfstand gefahren:

- Betriebspunkt: 1500/min (Motor), Pedalsprung 0 bis 50 %, zweiter Gang
- Stellgrößenvariation: Drosselklappenverstellung, Filterkonstanten für den Momentenaufbau.

Die Stellgrößen für den „Tip In“ teilen sich auf in die schnelle Momentenanforderung durch Zündzeitpunktverstellung („Zündungspfad“) in Form von Filterkonstanten und die langsame Momentenanforderung durch Drosselklappenverstellung („Luftpfad“). Der Modellverlauf, **Bild 7**, ist für Rolle und Straße qualitativ sehr ähnlich. Die Optimierung führt zu gleichwertigen Stellgrößen und die Notenunterschiede bewegen sich innerhalb von 0,5 [1]. Die Voraussetzung für eine Übertragung der Optimierungsergebnisse vom Rollenprüfstand auf die Straße ist somit erfüllt.

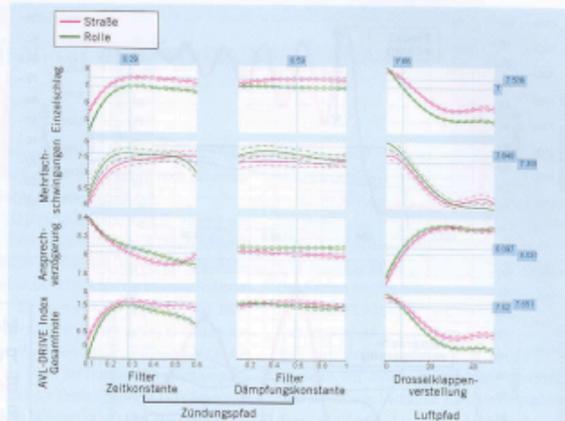


Bild 7: Vergleich der Fahrbarkeitsbewertungsmodelle für „Tip In“ zwischen Straße und Rollenprüfstand

Tabelle: Betriebsbereiche und Stellgrößen beim „Tip In“

Last	Pedalsprünge: 0 – 20, -30, -50, -75, -100 %
Motordrehzahl	1000 - 3000/min mit einer Schrittweite 250 oder 500/min
Gang	1ter, 2ter, 3ter, 4ter
Stellgröße 1	Verstärkungsfaktor AR-Funktion
Stellgröße 2	Filter Dämpfungskonstante der Momentenanforderung (Zündungspfad)
Stellgröße 3	Filter Zeitkonstante der Momentenanforderung (Zündungspfad)
Stellgröße 4	Drosselklappenverstellung der Momentenanforderung (Luftpfad)

5 Anwendung in der Fahrbarkeitsabstimmung

Das Beispiel für die Anwendung der modellbasierten Methode in der Fahrbarkeitsabstimmung beschränkt sich im Folgenden auf den „Tip In“ bei einem Ottomotor (Ergebnisse für die Schaltqualitätsabstimmung wurden bereits in [3] vorgestellt). Zusätzlich zu den erwähnten Stellgrößen für den „Tip In“ bei der Korrelationsuntersuchung wurde auch der Verstärkungsfaktor der Antiruckelfunktion variiert. Die Antiruckelfunktion (AR) der ECU dient zur Erkennung und Dämpfung unerwünschter Drehzahlschwingungen am Antriebsstrang. Die **Tabelle** zeigt den gefahrenen Betriebsbereich und die Stellgrößen.

Nach dem automatisierten Abfahren der Messungen wurden anhand der Daten für jeden Gang globale Modelle für die aussagekräftigsten AVL-DRIVE-Detailbewertungen und die Gesamtnote für den „Tip In“ gebildet, **Bild 8**.

Die Gesamtnote für einen „Tip In“ entsteht durch Gewichtung der Detailbewer-

tungen; Merfachschnwingungen gehen mit 25 %, der Einzelschlag mit 20 % und die Ansprechverzögerung mit 15 % in die Gesamtnote ein. Eine hohe Gesamtnote wird vor allem durch geringe Merfachschnwingungen und einen geringen Einzelschlag erzielt, was aus Fahrersicht einem hohen Fahrkomfort entspricht. Die weiteren Detailbewertungen haben einen geringen Anteil von 5 bis 10 % an der Gesamtnote und wurden daher nicht modelliert.

Es wurden zwei unterschiedliche Fahrbarkeitsvarianten durch Optimierung in AVL-CAMEO erstellt. Durch Maximierung der Gesamtnote unter Einhaltung einer maximalen Ansprechverzögerung (je kleiner die Ansprechverzögerung desto besser die Note) wurde eine sportliche Abstimmung erzeugt. Die Maximierung der Ge-

samtnote ohne weitere Begrenzungen ergab eine Komfortabstimmung. Nach der Optimierung und Generierung der Datensätze erfolgte die Validierung auf der Teststrecke. In **Bild 9** sind die AVL-DRIVE-Bewertungen der bewerteten Referenzabstimmung gegenübergestellt und ein Beispielverlauf für eine komfortable und eine sportliche Auslegung dargestellt.

Wie erwartet ist die Benotung der Ansprechverzögerung bei der Komfortabstimmung am niedrigsten. Der sanfte und harmonische Momentenaufbau führt zu besseren Bewertungen bei Merfachschnwingungen und Einzelschlag gegenüber der Referenz. Die sportliche Abstimmung zeigt Verbesserungen bei Einzelschlag und Merfachschnwingungen bei gleichwertiger Ansprechverzögerung.

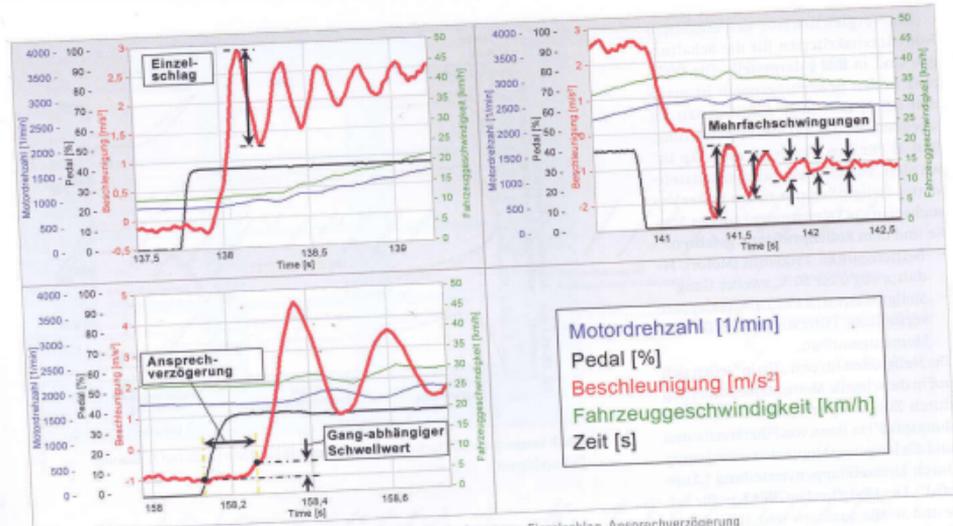


Bild 8: Wesentliche Faktoren für die „Tip In“-Bewertung: Mehrfachschwingungen, Einzel Schlag, Ansprechverzögerung

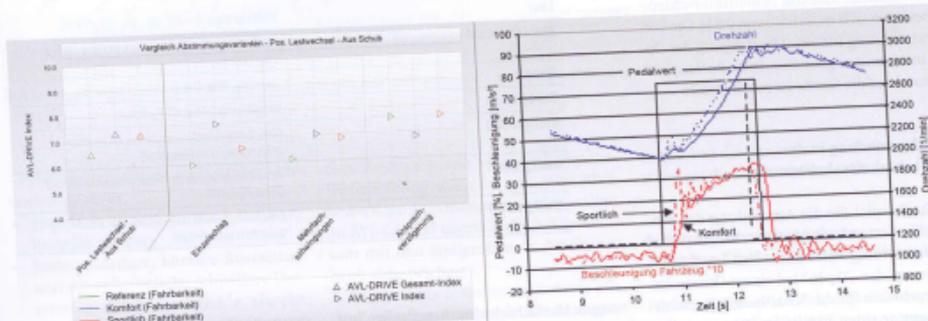


Bild 9: Vergleich der Abstimmungsvarianten, Auswirkung der Begrenzung auf die physikalischen Signale (der Signalverlauf entspricht einem „Tip In“ 0-75 % Pedalstellung im zweiten Gang bei einer Drehzahl von 2000/1min)

6 Zusammenfassung

Aufgrund der stetig steigenden Anforderungen des Marktes im Bereich der Fahrzeugkalibrierung hat AVL eine neue Methode für die Fahrbarkeitsabstimmung entwickelt. Die Schwerpunkte der Methode liegen in der automatisierten Rollenprüfstandmessung, der modellbasierten Vorgangsweise und der damit verbundenen Vermeidung der Abstimmungsschleifen. Da die Messungen in der Nacht und am Wochenende stattfinden kön-

nen ergibt sich eine Auslastungssteigerung des Rollenprüfstands.

Die anschließende Auswertung und Erstellung aller Fahrbarkeitsvarianten im Büro ermöglicht die gleichzeitige Nutzung der Fahrzeugprototypen für andere Abstimmungsaufgaben. Das Zusammenspiel all dieser Faktoren führt zu Einsparung von Zeit und Kosten. Dieser Ansatz setzt damit einen wesentlichen Akzent, um auch die zukünftigen Herausforderungen in der Fahrbarkeitsabstimmung zu bewältigen.