

Entwicklung von Aerodynamik, Aeroakustik und Wassermanagement



Da schon das Vorgängermodell des neuen Audi A3 im Vergleich mit dem Wettbewerb hervorragende aerodynamische und aeroakustische Eigenschaften besaß, wurden diese Entwicklungsziele für den neuen Audi A3 entsprechend hoch gesteckt. Dieser Artikel beschreibt die aerodynamischen Entwicklungsschritte zum fertigen Serienfahrzeug unter Berücksichtigung der Belange von Aerodynamik, Aeroakustik und Wassermanagement.

1 Einleitung

Der neue Audi A3 wurde gegenüber dem Vorgängermodell in der Stirnfläche vergrößert und bereits in der Grundversion mit größeren und breiteren Rädern und Reifen ausgestattet. Dies und eine neue Motorenpalette mit den damit neuen Abgasanlagen und vor allen Dingen das neue Hinterachskonzept machte eine aerodynamische Detailoptimierung im Unterbodenbereich zu einem Muss im Projekt, um die ehrgeizigen Ziele zu erreichen.

2 Die Aerodynamik-Entwicklung des A3

2.1 Die frühe Designphase

Die Aerodynamikentwicklung des neuen Audi A3 zeichnete sich bereits in der frühen Designphase durch ein Novum für die Audi AG aus. Neben der eher klassischen Erstellung von dreidimensionalen Clay-Modellen im Maßstab 1:4 von verschiedenen Designentwürfen für das neue Fahrzeug wurde bereits in der ersten Designphase für einige Entwürfe eine rechnergestützte Designentwicklung gewählt. Für den neuen Audi A3 bot sich damit die Gelegenheit und die Chance, den gesamten Konzept- und Fahrzeugentwicklungsprozess verstärkt auf den Einsatz und die Validierung von CA-Methoden auszurichten. Bereits in der sehr frühen Phase der aerodynamischen Fahrzeugentwicklung stand ein qualitativ hochwertiger Datensatz zur Beschreibung der äußeren Fahrzeuggeometrie zur Verfügung. Auf dieser Basis war es möglich, in der aerodynamischen Entwicklung als zeitliches Bindeglied zwischen dem Designentwurf am Bildschirm und der rechnergestützten Fahrzeugstrakterstellung virtuelle aerodynamische Entwicklungswerkzeuge parallel zur klassischen Aerodynamik-Entwicklung im Windkanal zu testen und einzusetzen.

Zeitgleich mit dem Beginn der A3-Entwicklung wurde bei Audi deshalb die klassische Aerodynamikentwicklung im Windkanal durch die computergestützte Simulationsmethode CFD (Computational Fluid Dynamics) ergänzt. Hierzu wurde das Programmpaket Power-Flow genutzt. Dieses zeichnet sich gegenüber herkömmlichen Navier-Stokes-Strömungslösern durch seine automatische Volumennetzgenerierung aus. Aufgrund der sich so verkürzenden Durchgangszeiten für eine Aerodynamikberechnung bestand die Möglichkeit, die Simulation in den Entwicklungsprozess während der Designfindungsphase zu integrieren.

Die erste Anwendungsphase war durch den Anspruch gekennzeichnet, die Zeiten

vom Erhalt eines digitalen Designmodells bis zum Erhalt der Ergebnisse zur Außenströmung zu minimieren. Zur Durchführung einer Strömungssimulation sind folgende Arbeitsschritte zu durchlaufen:

■ Analog zum Windkanalversuch wird ein Unterbodenmodell erstellt, welches im weiteren Projektverlauf sukzessive an den Entwicklungsstand angepasst wird. Bei der Bewertung eines Designmodells ist dann der Unterboden an die Außenhaut anzubinden. Anschließend erfolgt die Oberflächenvernetzung des daraus resultierenden Gesamtmodells sowie die automatische Volumenvernetzung des virtuellen Windkanals mit seinem Fahrzeug.

Die Autoren



Dr.-Ing. Michael Jaroch, M.Sc., ist Modellreihenverantwortlicher der A3-Modellreihe in der Entwicklung Aerodynamik der AUDI AG in Ingolstadt.



Dr. rer. nat. Ludger Lührmann ist Projektverantwortlicher in der Entwicklung Strömungstechnik Simulation der AUDI AG in Ingolstadt.

2.1 Die frühe Designphase

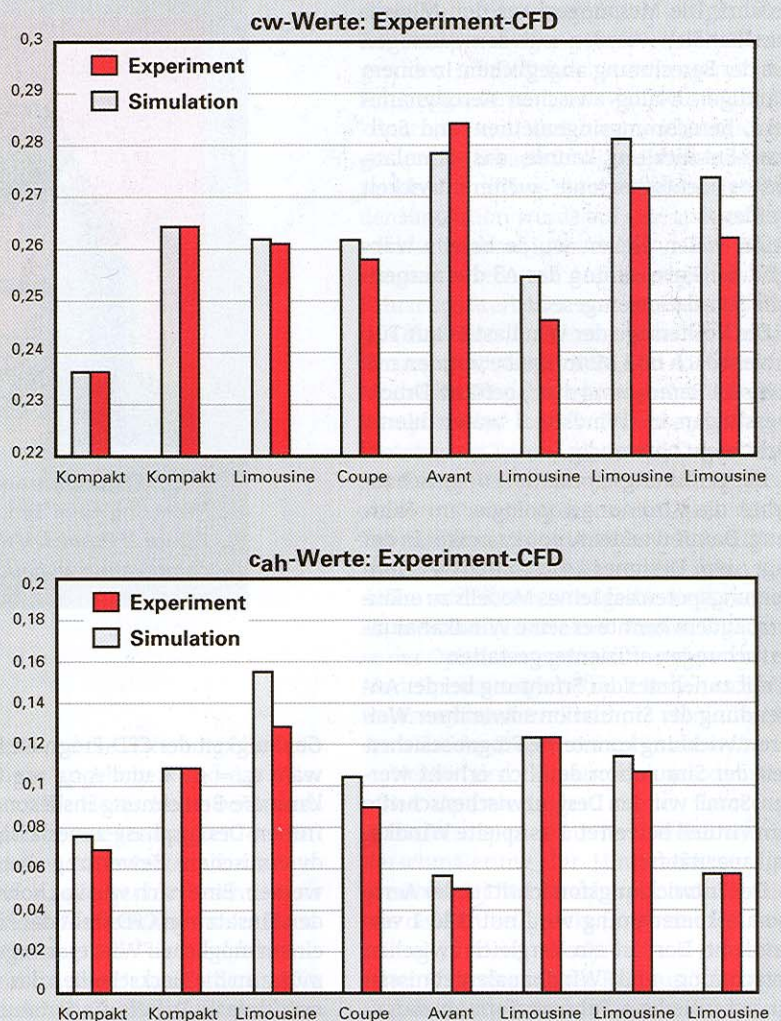


Bild 1: Vergleich der Ergebnisse aus Windkanalmessungen und CFD-Berechnungen für verschiedene Karosserieformen
Figure 1: Comparison of the results of wind tunnel measurements and CFD computations for various body shapes

- die eigentliche Simulation
- die Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse.

Durch die Weiterentwicklung der CAD-Tools und Netzgenerierern sowie leistungsfähigerer Rechner (in den letzten vier Jahren hat sich die eigentliche Simulationsdauer bei Audi von sieben auf einen Tag verkürzt) kann heute der Gesamtumfang einer kompletten Außenaerodynamikberechnung innerhalb weniger Tage erledigt werden. Kleinere Modifikationen, die am vorbereiteten Berechnungsmodell durchgeführt werden können, werden über Nacht aerodynamisch bewertet.

Neben der Prozessintegration stand während des A3-Projektes vor allem die Validierung der numerischen Rechenergebnisse und der Vergleich mit den Resultaten aus dem Windkanal im Vordergrund. An den Designmodellen zum Audi A3 wurden eine Reihe dieser Untersuchungen durchgeführt. Die Messungen aus den Modellwindkanälen wurden mit den Aussagen aus der Berechnung abgeglichen. In einem ständigen Dialog zwischen Aerodynamikern, Berechnungsingenieuren und Software-Entwicklern konnte das Simulationstool entscheidend weiterentwickelt werden.

An vielen Stellen wurde bereits während der Entwicklung des A3 die numerische Simulation eingesetzt:

- Die Vorhersage der Windlasten auf Tür, Schiebedach und Motorhaube wurden mit Hilfe der Berechnung durchgeführt. Druckmessungen im Windkanal waren hierzu nicht mehr notwendig

■ die Strömungssimulation veranschaulichte die Strömungstopologie am Fahrzeug. Damit war der Aerodynamiker in der Lage, dem Designer anschaulich das Optimierungspotenzial seines Modells zu erläutern. Zudem konnte er seine Windkanaluntersuchungen effizienter gestalten

- mit zunehmender Erfahrung bei der Anwendung der Simulation sowie ihrer Weiterentwicklung konnte die Prognosesicherheit der Simulation deutlich erhöht werden. Somit wurden Designschritte rein virtuell bewertet. Das spielte Windkanalkapazität frei.

Der Entwicklungsfortschritt in der Aerodynamikberechnung wird mit **Bild 1** verdeutlicht. Dort ist ein Vergleich zwischen Berechnung und Windkanalergebnissen für verschiedene Fahrzeugformen dargestellt. Die Luftwiderstandsbeiwerte c_w und Heckauftriebsbeiwerte c_{ah} sind Messungen entnommen, bei denen der Kühlluft eintrag in den Motorraum nicht berücksichtigt wurde. Diese Situation entspricht der, die der Aerodynamiker bei der Optimierung der Design-„Clay-Modelle“ vorfindet. Die

2.1 Die frühe Designphase

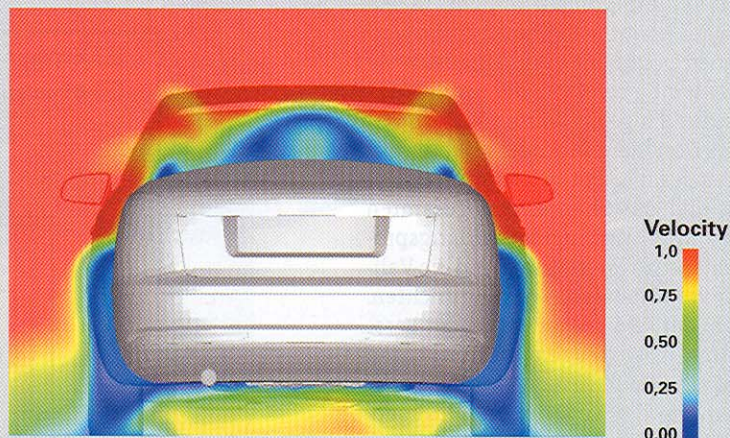
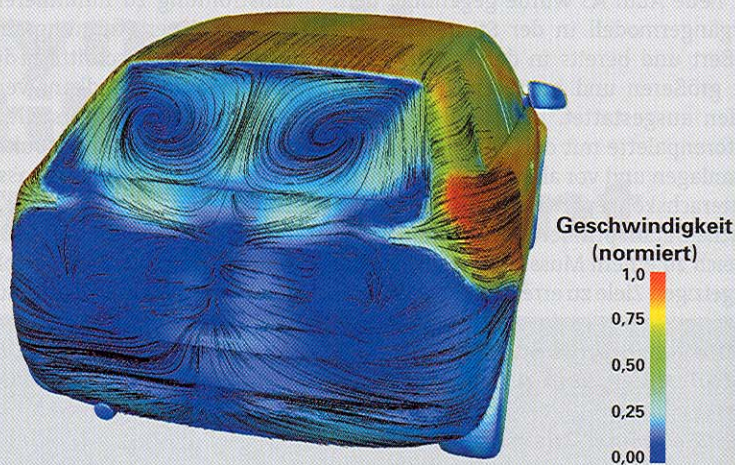


Bild 2: Ergebnisse der CFD-Berechnungen für das Geschwindigkeitsfeld; Rechnung ohne Bodensimulation

Figure 2: Results of the CFD computations for the velocity field; computation without road simulation

Genauigkeit der CFD-Prognose liegt bei etwa $\Delta c_w = \pm 3\%$ und $\Delta c_{ah} = \pm 0,15$. Damit kann die Berechnung insbesondere in der frühen Designphase zuverlässig zur aerodynamischen Bewertung herangezogen werden. Eine nach wie vor hohe Hürde für den Einsatz von CFD stellt die Prognose bei einem möglichen Wiederanliegen der Strömung an die Heckscheiben dar. Dabei können kleinste Details die Strömungstopologie und die zugehörigen aerodynamischen Eigenschaften komplett verändern. Hierauf wird im Laufe des Artikels noch näher eingegangen.

Die Wirkungsweise der Bodensimulation und die daraus resultierenden Änderungen der Strömungssituation im Bereich der

Heckscheibe sind in **Bild 2** grafisch mit Hilfe von Ergebnissen der CFD-Berechnung dargestellt.

Im oberen Teil des Bildes sind die Geschwindigkeiten (relativ zur Anströmgeschwindigkeit) nahe der Stromlinien auf der Fahrzeugoberfläche aufgetragen. Dabei wird die Strömung genährt vom C-Säulenwirbel, der sich im Übergang C-Säule zu Dachspoilerhinterkante über die Heckscheibe fortpflanzt und zwei gegenläufige Wirbel auf der Heckscheibe induziert. Der daraus resultierende Sog zieht die Dachüberströmung nach unten und führt zu einem Anlegen der Dachüberströmung an die Heckscheibe. Erfolgt die Simulation gemäß der Situation auf der Straße, das

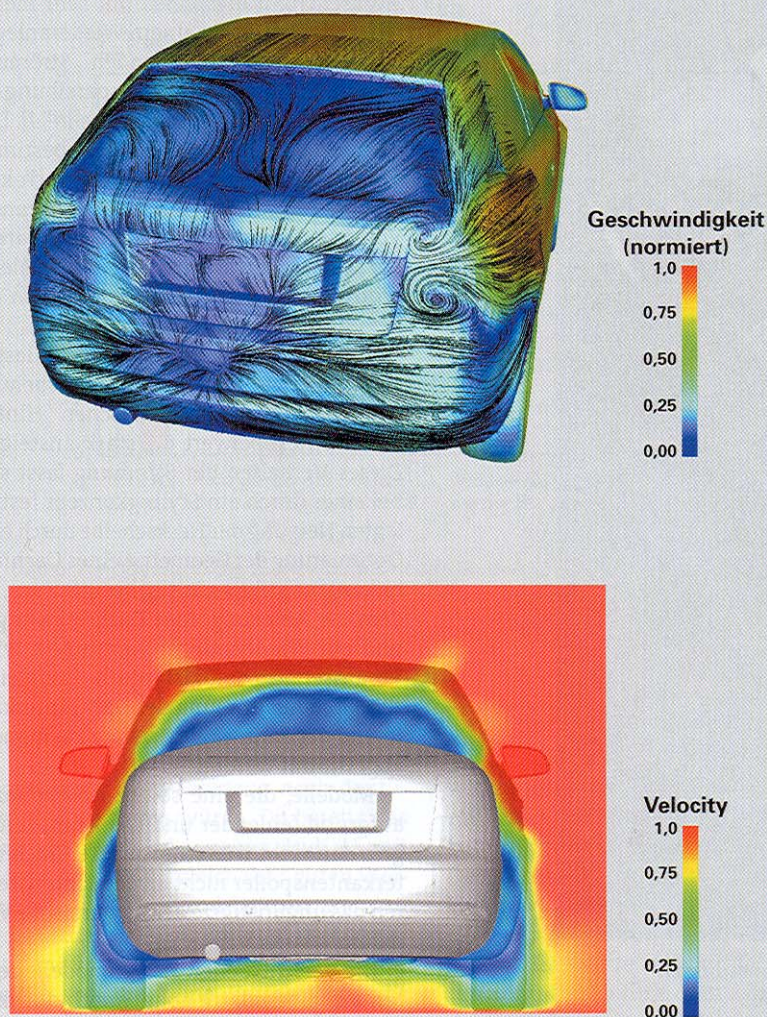


Bild 3: Ergebnisse der CFD-Berechnungen für das Geschwindigkeitsfeld;
Rechnung mit Bodensimulation
Figure 3: Results of the CFD computations for the velocity field;
computation with road simulation

heißt mit drehenden Rädern und unter Berücksichtigung der Relativbewegung des Fahrzeugs zur Fahrbahn, so ändert sich die Situation grundlegend. Die Strömung löst an der Dachhinterkante und am C-Pfosten ab. Dadurch liegt die Fahrzeugrückseite in einem Totwassergebiet, welches zu deutlich verringerter Luftbewegung und höherem Druckrückgewinn führt. Insbesondere der c_{ah} -Wert reduziert sich dabei drastisch von $c_{ah}=0,19$ auf $c_{ah}=0,08$. Die Begründung für die veränderte Strömungssituation mit voller Bodensimulation liefert Bild 3. Durch die drehenden Räder und die Relativbewegung der Fahrbahn zum Auto ergibt sich ein zusätzlicher Impulseintrag in die Unterbodenströmung und damit in den Nach-

lauf. Dadurch wird die Strömung oberhalb des Fahrzeuges angehoben und das Wiederanlegen an die Heckscheibe behindert. Obwohl die Prognosegenauigkeit der Berechnung in den letzten Jahren deutlich gewonnen hat, ist die gerade beschriebene Problematik des Wiederanlegens der Heckscheibenströmung bei Fließheckfahrzeugen nach wie vor eine Herausforderung für die CFD-Simulation. Zusätzlich spielen hierbei Details wie Heckklappenspalte, die im Simulationsmodell nicht berücksichtigt werden, eine Rolle. Daher machen derartige Phänomene die Überprüfung im Windkanal unabdingbar.

Die in Clay erstellten Designmodelle des neuen Audi A3 entstanden auf der Basis

grundsätzlicher Vorgaben für die Fahrzeuggröße wie Radstand und Spur und unter Berücksichtigung des für dieses Fahrzeug erwünschten Designcharakters „sportlich, dynamisch, elegant“. Im Laufe des Entwicklungsprozesses in der frühen Designphase wurden diese Modelle neben der Designentwicklung speziell in Hinblick auf Fahrzeugpackage, Fahrzeuergonomie und Aerodynamik verändert und weiterentwickelt.

Die aerodynamischen Messungen in dieser Entwicklungsphase wurden im 1:4-Modellwindkanal des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) vorgenommen. Die 1:4-Modelle waren dabei zur Vereinfachung der Modellerstellung und der Versuchsdurchführung nicht für eine Messung mit vollständiger Bodensimulation (bewegter Boden unter dem Fahrzeugmodell, drehende Räder [1, 2]) und nicht für eine Simulation der Kühlluftdurchströmung ausgerüstet. Zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Kühlluftdurchströmung mit der Fahrzeugaußenumströmung wurde auf Erkenntnisse vom Vorläufermodell zurückgegriffen, die Berücksichtigung der aerodynamischen Einflüsse einer vollständigen Bodensimulation wurde auf eine spätere Entwicklungsphase verschoben. Die Fahrzeuganbauteile wie Außenspiegel und der Fahrzeugunterboden waren bereits bei diesen Modellen in einem sehr hohen Detaillierungsgrad dargestellt, Bild 4, wobei im Modellmaßstab 1:4 sehr filigrane Teile wie Komponenten der Vorderachse als Rapid-Prototyping-Teile im Fused-Deposition-Moulding-Verfahren (FDM) hergestellt wurden. Die mechanische Festigkeit dieser Bauteile erwies sich trotz der bei aerodynamischen Messungen an verkleinerten Modellen sehr hohen Windgeschwindigkeiten als mehr als ausreichend. Wie die Ergebnisse der Optimierungen während der ersten Modellphase zeigen, Bild 5, ließen sich alle untersuchten Formkonzepte zumindest in die Nähe des Zielwertes optimieren.

Neben den klassischen aerodynamischen Optimierungen an der Fahrzeuggrundform speziell im Heckbereich wie der Verschmälerung der Hinterachsspur gegenüber der Vorderachsspur zum Einziehen des Fahrzeughecks (sogenanntes „boat tailing“) und der aerodynamisch-geometrischen Optimierung der Radhausöffnungen und der Radhauswülste zeigten sich bereits in der Modellphase wichtige Charakteristika der Modelle:

■ Wie speziell bei Vollheckfahrzeugen kleiner Schlankheitsgrade bekannt [3, 4], existiert eine Tendenz der Strömung, bei bestimmten Neigungswinkeln der Heckscheibe auf der Fahrzeugrückseite wiederanzu-

2.1 Die frühe Designphase

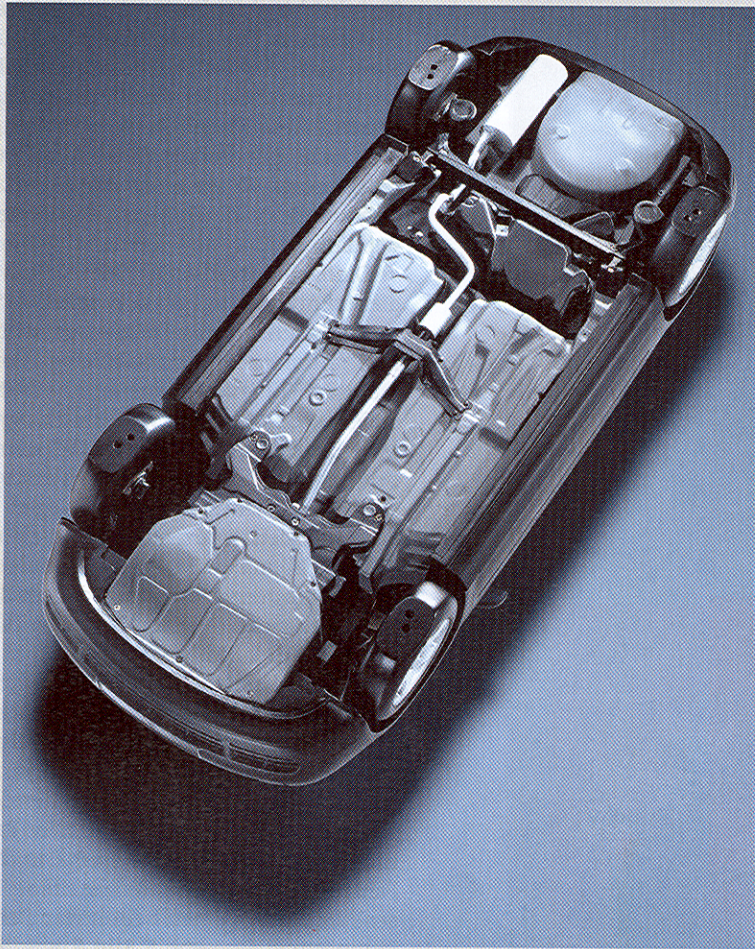


Bild 4: Fotografische Aufnahme eines der 1:4-Modellunterböden
Figure 4: Photo of one of the 1:4 scale model underbodies

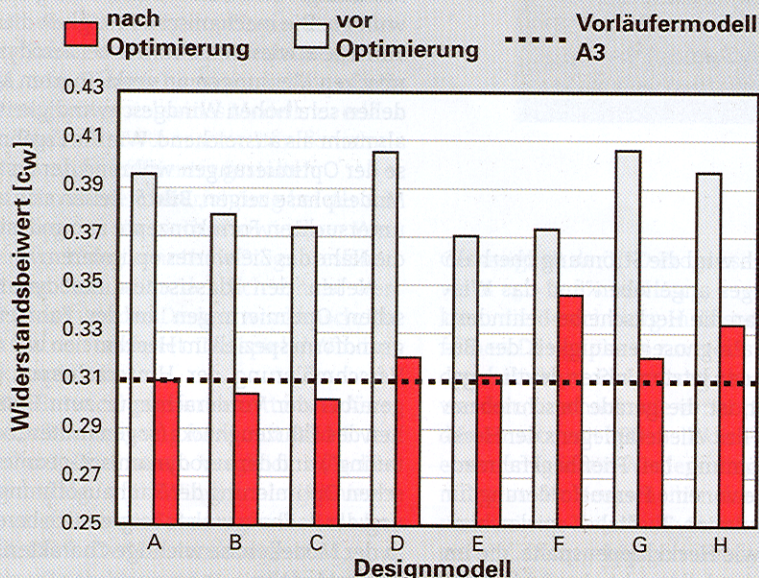


Bild 5: Ergebnis der aerodynamischen Optimierungen an den verschiedenen Designmodellen im Maßstab 1:4
Figure 5: Result of the aerodynamic optimisations of the various design models in 1:4 scale

legen. Die vom Pfosten C ablösenden, tütenförmigen Randwirbel erzeugen auf der Heckscheibe Saugspitzen mit sehr niedrigen Drücken, die zu einem Wiederanlegen der vom Dach ablösenden Strömung führen. Eine ausführliche Beschreibung der Strömungstopologie findet sich in [4]. Dieses Wiederanlegen kann dabei in bestimmten geometrischen Situationen auch kein stationärer, sondern ein intermittierender Vorgang sein, so dass die Wiederholbarkeit der Messergebnisse unakzeptabel schlecht wird und die Standardabweichungen der gemessenen Größen stark ansteigen.

Die beschriebenen Saugspitzen lassen den aerodynamischen Widerstandsbeiwert c_w und den aerodynamischen Hinterachsauftriebsbeiwert c_{Ah} stark ansteigen. Dieses Verhalten der Strömung lässt sich bei einer durch ein Stylingkonzept festgelegten Neigung der Heckscheibe durch eine Optimierung der Geometrie eines Dachhinterkantenspoilers günstig beeinflussen, indem die Ablösung vom Dach erzwungen und ein Wiederanlegen verhindert wird. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass gleichzeitig die Abströmung der Dachhinterkante und der Fahrzeugunterseite zueinander abgestimmt werden.

Modelle, die eine solche Abstimmung aufgrund fehlender und aus Anmutungsgründen nicht wünschenswerter Dachhinterkantenspoiler nicht ermöglichten, zeigten das ungünstigste aerodynamische Verhalten.

Die verschiedenen Designmodelle zeigten alle eine relativ hohe Empfindlichkeit der aerodynamischen Modelleigenschaften gegenüber Details in der Unterbodengestaltung. Die Gesamtumströmung des Fahrzeuges wurde um so ungünstiger beeinflusst, je höher der Impulsstrom zwischen dem Fahrzeugunterboden und simulierter Straße war. So beeinflusste ein wachsender Abstand des Modellunterbodens vom Windkanalboden (also die Fahrzeugtrimmlage) die aerodynamischen Eigenschaften negativ. Maßnahmen, wie diesen Impulsstrom blockierende, zur Anströmung senkrechte Spoiler an der Fahrzeugbugschürze oder ihn lenkende, wie Spoiler vor den Rädern, ließen eine deutliche Verbesserung der aerodynamischen Modelleigenschaften zu. Es war dabei auffällig, dass zu jeder untersuchten Fahrzeugtrimmlage auch eine optimale Spoilerkonfiguration existierte. Eine weitere Vergrößerung der Spoilerfläche über diese optimale Konfiguration hinaus führte zu einer Verschlechterung der aerodynamischen Eigenschaften. Es war zu erwarten, dass sich dieser Effekt bei Messungen mit vollständiger Bodensimulation aufgrund des dort grundsätzlich höheren Impuls-

2.1 Die frühe Designphase

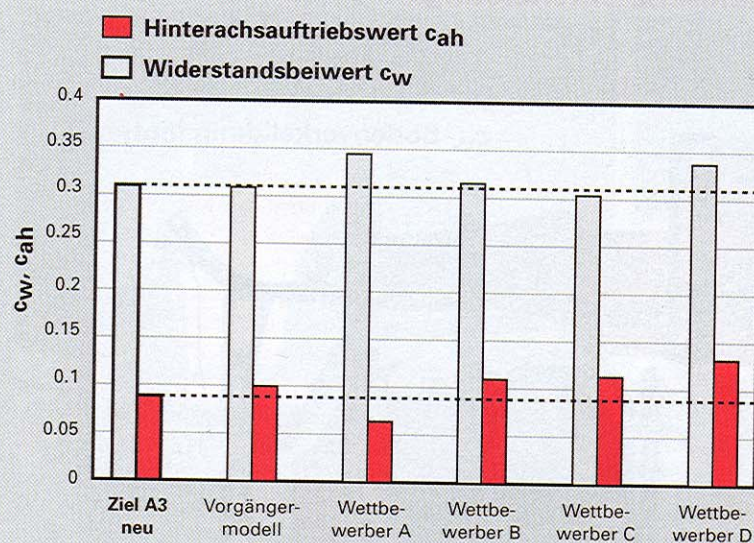


Bild 6: Aerodynamische Zielwerte des neuen Audi A3
Figure 6: Aerodynamic target values for the new Audi A3

stroms unter dem Fahrzeug noch deutlicher manifestieren würde. Da bereits das Vorgängermodell des neuen Audi A3 mit im Wettbewerbsvergleich sehr guten Werten für den Widerstandsbeiwert und den Heckauftriebsbeiwert aufwarten konnte, wurden für den neuen Audi A3 Zielwerte beschlossen, die keine Verschlechterung des aerodynamischen Widerstandsbeiwertes c_w zuließen und gleichzeitig eine Verbesserung des Heckabtriebsbeiwertes forderten, Bild 6. Ziel war damit, die bereits in dieser Entwicklungsphase angedachte Verbreiterung des neuen Audi A3 gegenüber dem Vorgängermodell und den projektierten Einsatz einer breiteren Bereifung in dieser Fahrzeugklasse – auch in der Grundversion – widerstandsneutral und heckauftriebsvermindernd umzusetzen.

Das Ende der frühen Designphase war durch eine Reduzierung der zu entwickelnden Modelle auf nur zwei Designgrundvarianten gekennzeichnet. Mit dieser Reduzierung der Entwicklungsbreite fand auch ein Übergang der experimentellen aerodynamischen Entwicklung im Projekt von 1:4-Modellen auf Clay-Modelle im Maßstab 1:1 statt.

2.2 Designverdichtung und aerodynamische Entwicklung bis zum Designmodell-Entscheid

Die aerodynamische Entwicklung in der 1:1-Modellphase war im Wesentlichen durch einen Übergang der experimentellen Ent-

wicklung auf Messungen im Windkanal mit vollständiger Bodensimulation gekennzeichnet. Erst diese ermöglichte die Detailentwicklung und Abstimmung von Unterbodenbauteilen und die Verfeinerung der Prognosen für die aerodynamischen Kennwerte des fahrfähigen Fahrzeugs um den Einfluss eben dieser Unterbodenbauteile. Im Vergleich zu den Erkenntnissen aus der ohne Bodensimulation durchgeführten 1:4-Modellphase wurden dabei nicht nur Unterschiede in der Größenordnung des aerodynamischen Einflusses von Unterbodenmaßnahmen festgestellt. Bei speziellen Unterbodenkonfigurationen kehrte sich der Einfluss einer Maßnahme sogar von positiv in negativ oder umgekehrt um, wenn die Ergebnisse von Messungen mit und ohne Bodensimulation miteinander verglichen wurden.

Detaillierte Vergleiche von Untersuchungsergebnissen von Messungen mit und ohne Bodensimulation zeigten, dass das bereits diskutierte Phänomen des Wiederanlegens der Dachabströmung an die Heckscheibe entscheidend vom Einsatz der Bodensimulationsmöglichkeiten während der Messungen beeinflusst wurde. Während der Einsatz von Grenzschichtabsaugung oder die Simulation der unter dem Fahrzeug bewegten Straße durch ein Laufband zwischen den Fahrzeugrädern [1, 5, 6] die aerodynamischen Eigenschaften eher verschlechterte, führte der Einsatz drehender Räder während der Messung zu einer

deutlichen Stabilisierung der Strömung und einer Verbesserung der aerodynamischen Beiwerte [7]. Während bei der Untersuchung von Fahrzeugmodellen ohne vollständige Bodensimulation Varianten von Unterbodenmaßnahmen dargestellt werden konnten, die zu einem Wiederanlegen der Dachabströmung führten, war dies bei Messungen mit vollständiger Bodensimulation nicht der Fall. Der Einsatz der Simulation drehender Räder bei den Windkanalexperimenten stabilisierte die Ablösung von der Dachhinterkante so weit, dass auch ein intermittierendes Wiederanlegen an die Heckscheibe nicht mehr beobachtet wurde.

Parallel zur aerodynamischen Entwicklung der 1:1-Modelle wurde die konstruktive Ausgestaltung des zukünftigen neuen Audi A3 detailliert. Aus der Festlegung der Motorenpalette und der daraus resultierenden Bandbreite der notwendigen Abgasanlagen für die neue Generation dieser Fahrzeugbaureihe, der Festlegung der Getriebevarianten und der Berücksichtigung der frontgetriebenen und der quattro-Varianten erwuchs eine ganze Reihe von Unterbodenvarianten. Alle wurden entwicklungsbegleitend aerodynamisch optimiert, wobei speziell die luftseitige Kühlung von Komponenten wie Bremsanlage und Getriebe berücksichtigt wurde. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss eines ersten Entwurfs für das Räder- und Reifenprogramm des neuen Fahrzeugs auf die aerodynamischen Eigenschaften.

Zur Umsetzung des für das neue Fahrzeug verfolgten Designkonzepts, zur weiteren Verbesserung der fahrdynamischen Eigenschaften und zur Erhöhung des Kundennutzens wurden im Projekt zwei gegenüber dem Vorgängermodell deutliche technische Abgrenzungen umgesetzt:

- Die Minimalbereifung des neuen Audi A3 gegenüber dem Vorgängermodell wurde von der Reifendimension 195/65 R 15 auf die Reifendimension 205/55 R 16 erhöht

- die Fahrzeuggrundabmessungen wurden gegenüber dem Vorgängermodell vergrößert: Der Radstand des Fahrzeugs wurde von 2498 mm auf 2577 mm erhöht, die Spur der Vorderachse von 1514 mm auf 1531 mm und die Spur der Hinterachse von 1493 mm auf 1515 mm.

Diese geometrisch tiefgreifenden Änderungen am Fahrzeuggrundkörper haben natürlich Auswirkungen auf die aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs. Diese wurden während der aerodynamischen Entwicklung untersucht, analysiert und durch Anpassung der Fahrzeuggrundform, der Radhäuser und der Unterbodengestaltung erfolgreich kompensiert.

Gegenüber dem Vorgängermodell wurden für den neuen Audi A3 zahlreiche neue,

2.2 Designverdichtung und aerodynamische Entwicklung bis zum Designmodell-Entscheid

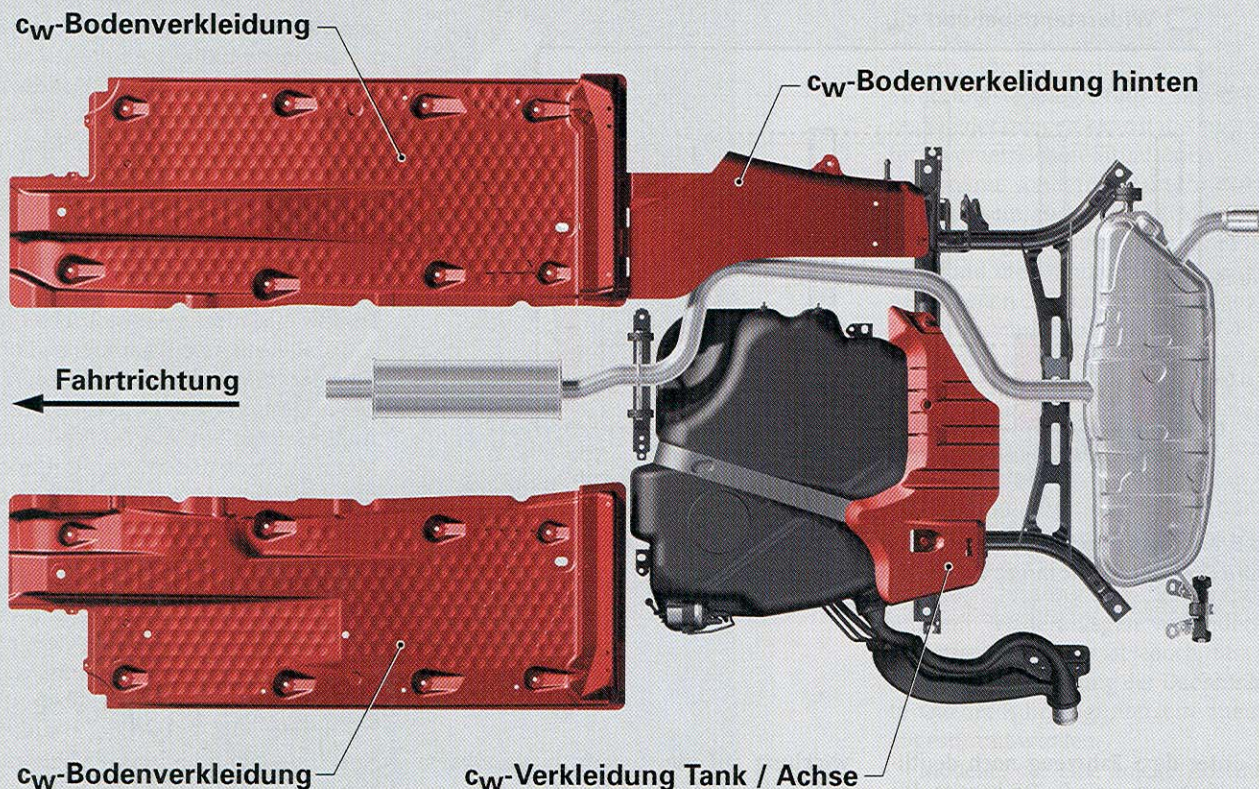


Bild 7: Unterbodenverkleidungen für Audi A3-Modelle mit und ohne Mittelschalldämpfer (MSD)

Figure 7: Underbody fairings for Audi A3 models with and without centre silencer

aerodynamisch wirksame Unterbodenmaßnahmen entwickelt. So besitzt der neue Audi A3 eine aerodynamisch wirksame Vollverkleidung des mittleren Unterbodens. Für bestimmte Unterbodenvarianten, die sich im Wesentlichen durch den Aufbau und die Geometrie der Abgasanlagen unterscheiden, werden dabei auch Zusatzabdeckungen für bestimmte Unterbodenbereiche am Fahrzeug eingesetzt, **Bild 7**.

Zum Abschluss der Designphase standen somit zwei Modelle zur Entscheidung, bei denen die aerodynamischen Eigenschaften und die Maßnahmen zur Erreichung der aerodynamischen Ziele im Detail bekannt und erprobt waren. Durch die gleichzeitig begonnene konstruktive Untersuchungsphase konnten schon jetzt die aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften stark beeinflussende Parameter wie Trimmhöhe, Bodenabstand und Ausschnitt der Radhäuser festgelegt werden. Mit der Entscheidung für ein Modell zur Erstellung eines Fahrzeugstraks und damit dem Bau der ersten fahrbaren Prototypen konnten

nun die aerodynamischen Auswirkungen von aus Erprobungsergebnissen resultierenden technischen Änderungen direkt an Fahrzeugen untersucht werden.

2.3 Die aerodynamische Entwicklung des Serienmodells

Die Untersuchungsergebnisse der ersten, von allen Bereichen der technischen Entwicklung des Hauses Audi durchgeführten Fahrversuche betrafen in großem Maße die aerodynamisch wirksamen Unterbodenbauteile.

Der während der Modellphase entwickelte und optimierte Spoiler an der Unterkante des Frontstoßfängers wurde zur Berücksichtigung der Ergebnisse von Bordsteinauffahrtstests, Böschungswinkeluntersuchungen und Verladeversuchen von seinem ursprünglich projektierten Maß von 30 mm auf 15 mm gekürzt. Gleichzeitig wurde zur besseren luftseitigen Beaufschlagung der in der Bugkapsel zur Aggregatkühlung vorhandenen NACA-Düsen eine Ausklinkung im Spoiler vor den beiden

Düsen eingebracht. Beide Maßnahmen führten zu einer leichten Verschlechterung der aerodynamischen Wirksamkeit des Spoilers ($\Delta c_w = +0,004$), die jedoch am Fahrzeug kompensiert werden konnte.

Die vorderen und hinteren Radspoiler wurden insbesondere in Form, Lage und Befestigungskonzept optimiert. Ausschlaggebend speziell für die hinteren Radspoiler waren dafür in der Prototypenphase durchgeführte Optimierungen an der Geometrie der neuen Vierlenker-Hinterachse.

Bei der endgültigen Auslegung der vorderen Radspoiler mussten die Anforderungen der komplexen Funktion dieser Bauteile berücksichtigt werden. Die vorderen Radspoiler beeinflussen neben den aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften auch in ganz entscheidendem Maße die Kühlung und die Freihaltung und Verschmutzung der Bremsen an den Vorderrädern. Die endgültige Auslegung der vorderen wie der hinteren Radspoiler erfolgte durch den Einsatz optimaler Simulationstechniken im Windkanal sowie in der virtuellen Entwick-

2.3 Die aerodynamische Entwicklung des Serienmodells

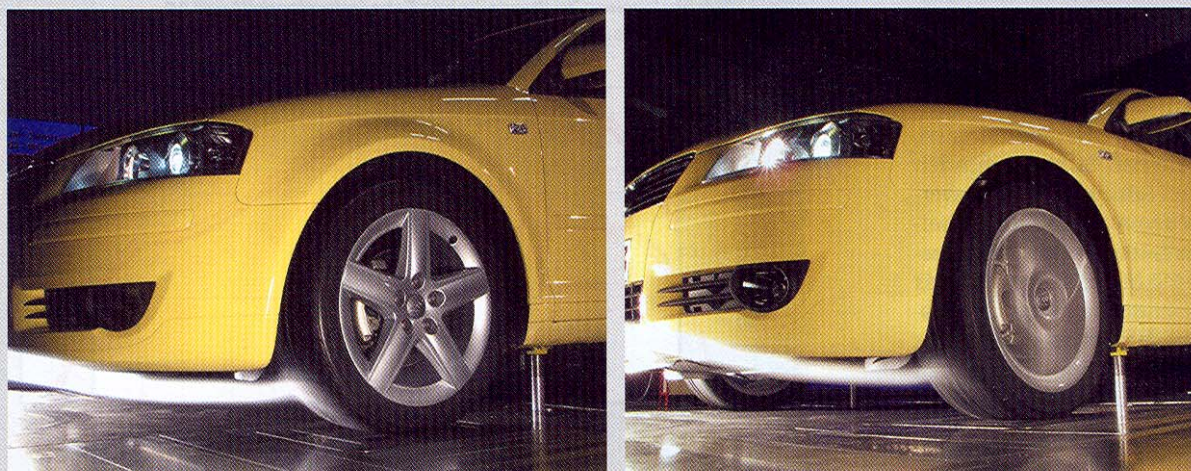


Bild 8: (a) Strömungssichtbarmachung an den vorderen Radspoilern, ohne Bodensimulation

(b) Strömungssichtbarmachung an den vorderen Radspoilern, mit Bodensimulation

Figure 8: (a) Flow visualisation at the front wheel spoilers, without road simulation

(b) Flow visualisation at the front wheel spoilers, with road simulation

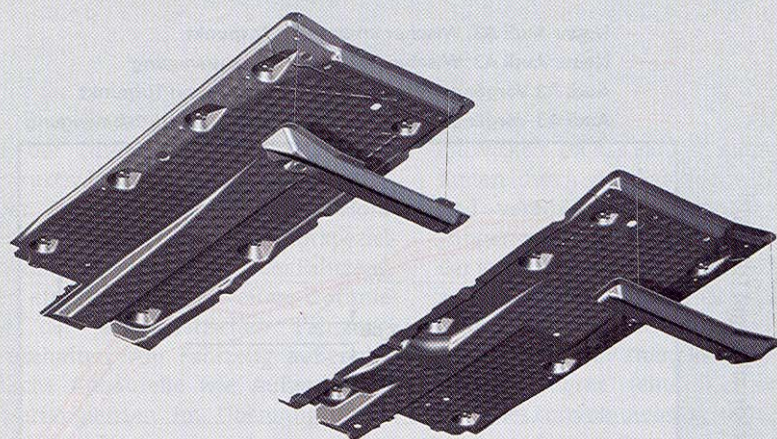


Bild 9: CAD-Rendering der Unterbodenverkleidungen mit Fersenblechspoilern und Steinschlagschutzkappen

Figure 9: CAD rendering of the underbody fairings with heel plate spoilers and stone guards

lung und wurde schließlich im Projekt unter Berücksichtigung der Anforderungen aller technischen Disziplinen umgesetzt, **Bild 8** (a) und (b).

Der Einsatz der beiden großen Unterbodenverkleidungen im Bereich der Fahrzeugmitte ermöglichte den Entfall von zusätzlichen gespritzten PVC-Unterbodenschutzmaßnahmen. Die aerodynamische Wirksamkeit dieser Bauteile liegt einerseits in der Glättung des Unterbodens ($\Delta c_w = -0,003$). Darüber hinaus können aber aerodynamisch außerordentlich wirksame Fersenblechspoiler an der Hinterkante dieser Unterbodenverkleidungen integriert werden.

Diese Fersenblechspoiler blockieren die Unterbodenströmung am Fahrzeug so effektiv, dass das in Abschnitt 2.1 beschriebene Wiederanlegen der Strömung an die

Heckscheibe wirksam unterbunden wurde. Gleichzeitig verbessern diese Spoiler auch die aerodynamischen Eigenschaften für die Unterbodenvarianten, bei denen ein Wiederanlegen nicht auftritt. So verbessern sie den Widerstandsbeiwert um $\Delta c_w = -0,009$ und den Heckauftriebsbeiwert um $\Delta c_{Ah} = -0,030$. Grund dafür ist das Vorbeileiten der Strömung an der neuen Vierlenkerhinterachse; das durch den Bauraum der Achse im Unterboden vorgegebene „Loch“ wird praktisch von der Strömung „übersprungen“.

Untersuchungen des Steinwurfverhaltens der Vorderräder zeigten, dass für in Bezug auf Kies und Schotter auf den Fahrbahnen hochbelasteten Einsatzorten ein Steinschlagschutz für die Radspoiler notwendig würde. Diese Steinschlagschutzkappen werden für bestimmte Märkte eingesetzt

und verbessern die aerodynamische Wirksamkeit der Fersenblechspoiler noch einmal leicht ($\Delta c_w = -0,002$), **Bild 9**.

Die bereits oben beschriebenen neuentwickelten Zusatzabdeckungen für jene Fahrzeugvarianten, deren Abgasanlage keinen Mittelschalldämpfer aufwies, glätten den Fahrzeugunterboden zusätzlich. Direkt beeinflusst werden hier der Bereich des Mittelschalldämpfers und ein Teil der Hinterachse. Diese Maßnahmen verringerten speziell den Hinterachsauftrieb noch einmal ($\Delta c_w = -0,002$, $\Delta c_{Ah} = -0,010$).

Mit den Fahrzeugprototypen standen auch die ersten Versuchsträger zur Abstimmung der Kühlluftöffnungen im Fahrzeugfrontend zur Verfügung. Neben dem Ziel, eine wirksame Aggregatekühlung bei gleichzeitig möglichst geringer Verschlechterung der aerodynamischen Eigenschaften

ten des Grundfahrzeuges zu erreichen, stand bei der Entwicklung der Fahrzeugfrontends auch die Reduzierung der Variantenvielfalt gegenüber dem Vorgängermodell im Vordergrund. Während für das Vorgängermodell fünf verschiedene Varianten der Ziergitter gesteuert werden mussten, konnte die Anzahl der Varianten für den neuen Audi A3 auf nur zwei reduziert werden. Bei allen neuen Audi A3 sind die beiden seitlichen unteren Kiemen verschlossen. Bei der 2-l-FSI-Motorisierung ist das Kühlsystem besonders leistungsfähig ausgelegt und besitzt deshalb, speziell bei den nicht mit Klimaanlage ausgerüsteten Fahrzeugen, noch Leistungsreserven. Bei diesen Fahrzeugvarianten können deshalb zusätzlich die obere Lamellenreihe der mittleren unteren Kieme, die beiden obersten Lamellenreihen des Grills und die Ringe des Audi-Symbols verschlossen werden und liefern damit keinen Anteil am Kühlwiderstand mehr. Letztgenannte Maßnahmen verbessern den Widerstandsbeiwert um $\Delta c_W = -0,005$.

Am Ende der Entwicklungsphase präsentiert sich der neue Audi A3 in der Basisausstattung mit folgenden aerodynamischen Beiwerten:

- Widerstandsbeiwert: $c_W = 0,31$
- Vorderachsauftriebsbeiwert: $c_{Av} = 0,04$
- Hinterachsauftriebsbeiwert: $c_{Ah} = 0,07$

und liegt damit wieder an der Spitze des Wettbewerbsumfeldes seiner Fahrzeugklasse. Abhängig von der Motorisierung und der Ausstattung des jeweiligen Fahrzeugs können sich Abweichungen von diesen Werten ergeben. Mit der aerodynamischen Entwicklung des Fahrzeugs konnten damit die Voraussetzungen für im Wettbewerbsvergleich ebenfalls hervorragende Eigenschaften in Fahrleistungen, Verbrauch und Fahrdynamik geschaffen werden.

3 Die Aeroakustik-Entwicklung des Audi A3

Die bereits beim Vorgängermodell des neuen Audi A3 realisierten guten aeroakustischen Eigenschaften sollten beim neuen Modell weiter verbessert werden. Die Ableitung der aeroakustischen Zielkurve erfolgte demgemäß auf der Basis von Messungen am Vorläufermodell. Die besten am Vorläufermodell erreichten Frequenzgänge des Schalldruckpegels am Fahrerohr wurden über den gesamten hörbaren Frequenzbereich um 1 dB verschärft, um die Zielkurve für den neuen Audi A3 zu definieren, **Bild 10**.

Bereits in der sehr frühen Entwicklungsphase des neuen Fahrzeugs wurde deshalb ein Türkonzept entwickelt, das auf dem des Audi A4 basierte und die Realisierung einer

mechanisch deutlich steiferen Tür beim neuen A3 zuließ. Das Dichtkonzept im Türbereich mit einer karosserieeitigen Schlauchdichtung im Türbereich und einer Lippendichtung im Bereich des oberen Türrahmens wurde beibehalten, die Lage der Dichtlinie jedoch so positioniert, dass der

Spiegelfuß des Außenspiegels mit seinen Karosseriedurchbrüchen und damit potentiellen akustischen Undichtigkeiten außerhalb des Dichtlinienbereichs liegt. Im Türinnenbereich wird eine klare Trennung der akustisch wirksamen Dämmungen und der gegen Wassereintritt in den Trockenbe-

3 Die Aeroakustik-Entwicklung des Audi A3

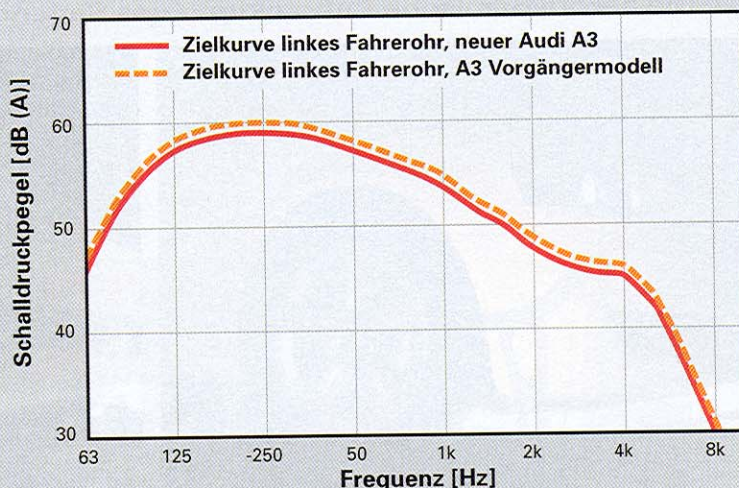


Bild 10: Aeroakustische Zielkurve des neuen Audi A3, Spektrum des Schalldruckpegels am linken Fahrerohr
Figure 10: Aeroacoustic target spectrum of the new Audi A3, spectrum of sound-pressure level at the driver's left ear

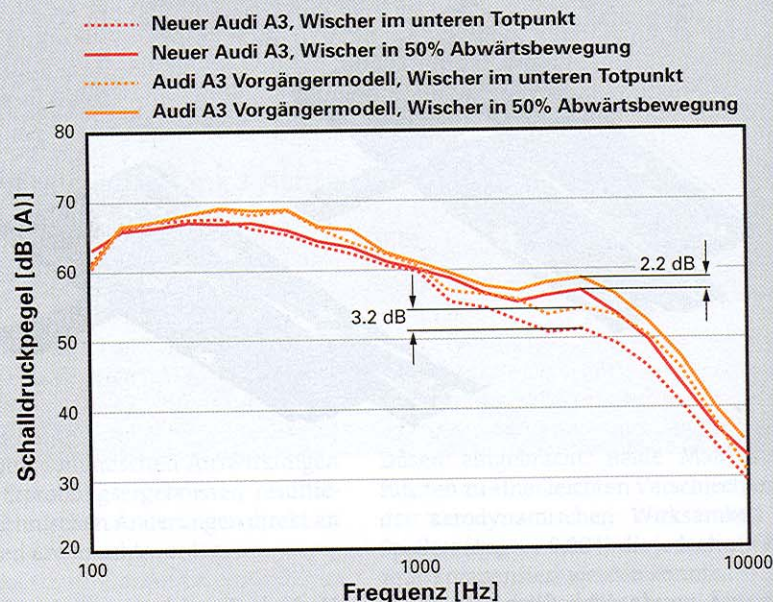


Bild 11: Vergleich der Spektren des Schalldruckpegels am linken Fahrerohr, neuer Audi A3 und Vorgängermodell, Wischer im unteren Totpunkt und in 50 % Abwärtsbewegung
Figure 11: Comparison of the spectra of sound-pressure level at the driver's left ear, new Audi A3 and predecessor model, wiper at bottom dead centre and in 50 % downward motion