



DER NEUE AUDI A1 AERODYNAMIK, AEROAKUSTIK, THERMOMANAGEMENT UND KLIMATISIERUNG

Möglichst geringer Kraftstoffverbrauch und hoher Fahrkomfort sind primäre Entwicklungsziele der AUDI AG. Dabei stehen aerodynamisch optimal gestaltete Karosserien bei niedrigen Strömungsgeräuschen, bestmögliche Klimaanlage und Belüftungssysteme unter dem Gesichtspunkt eines hohen Kundennutzens und -komforts im Vordergrund. Grundlage dafür bilden die Entwicklung und Integration neuer Technologien und Konzepte von der Definitionsphase bis hin zur Serienreife. Zur Unterstützung dienen der Betrieb von thermodynamischen Prüfständen sowie die Entwicklungsumgebung eines der modernsten Windkanalzentren der Welt. Ziel ist, für den Kunden einen bestmöglichen Komfort bei geringst möglichem Verbrauch zu erreichen.

AUTOREN



DR. MICHAEL SCHREFL

ist Modellreihenverantwortlicher der AO-Modellreihe in der Entwicklung Aerodynamik/Aeroakustik bei der AUDI AG in Ingolstadt.



GEORG TENTROP

ist in der Entwicklung Thermomanagement Aufbau Auslegung/ Applikation der AUDI AG in Ingolstadt zuständig für die AO- und A-Reihe.



MARKUS JOSEF MAIER

ist in der Entwicklung Klimatelektronik der AUDI AG in Ingolstadt zuständig für die Elektronikentwicklung der Kühlerlüfterelektronik.

ENTWICKLUNGSZIEL KUNDENVERBRAUCH

In Zeiten, in denen der Fokus der technischen Entwicklung auf Reduzierung der fahrzeugseitigen CO₂-Emissionen liegt, werden neue Wege beschritten, um aus vielen kleinen einen großen Schritt in Richtung CO₂-Reduzierung zu tätigen. Folgend werden Entwicklungsschritte und -ergebnisse beschrieben, die eine positive Auswirkung auf den Kundenverbrauch aufweisen.

AERODYNAMIK

Bei der Entwicklung des aerodynamischen Konzepts des Audi A1 lag der Fokus darauf, einen geringen Luftwiderstand ohne Einschränkungen für das Exterieurdesign zu realisieren. Zu Gunsten einer agilen Fahrdynamik galt es dabei, geringe aerodynamische Auftriebe an Vorder- und Hinterachse zu gewährleisten. Um diese Ziele zu erreichen, unterteilt sich der Produktentstehungsprozess der Aerodynamikentwicklung bei Audi grundsätzlich in zwei wesentliche Phasen:

- : In der frühen Konzeptphase werden Windkanaluntersuchungen an Tonmodellen im Maßstab 1:4 durchgeführt. Ergänzt werden diese Messungen durch CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) mit der Software „OpenFOAM“. Durch eine parallele Verwendung können die Vorteile beider Methoden kombiniert und die Nachteile eliminiert werden. Während die CFD-Simulation eine Visualisierung noch vorhandener Problemstellen ermöglicht, ermöglichen Messungen im Windkanal eine schnelle und effiziente Bewertung verschiedener Maßnahmen.
- : Nach einer Verdichtung aller Designvorschläge auf eine verbleibende Variante wird ein Aerodynamikmodell im Originalmaßstab aufgebaut. Dieses besitzt eine Außenhaut aus Ton, um rasch Formänderungen umsetzen zu können, und stellt bereits realitätsnahe Motorraumdurchströmung sowie beurteilbare Achsteile und Unterbodenkomponenten dar. Damit werden weitere Optimierungen an der Karosserieform und die finale Designbestätigung durchgeführt. Genauso werden auch erste Abstimmungen der aerodynamischen Unterbodenteile, Anbauteile wie Außenspiegel und der Räder durchgeführt. Auch dieser Projektabschnitt wird mit CFD-Simulationen begleitet, um eine kontinuierliche Verbesserung zu erreichen.

KAROSSERIE

Im Rahmen des skizzierten Prozesses wurden unter anderem der Kunststoffheckspoiler und die Spoilerrandbereiche, wie in ❶ dargestellt, optimiert und Schließteile sowie Spoilerecken eingeführt. Diese führen zu einem definierten Abriss der Strömung im Dachbereich und reduzieren damit den Luftwiderstand signifikant. In ❷ zeigt sich, dass ein Entfall von Spoilerecken bei der vorliegenden Heckform zu einer „anliegenden“ Strömung führt. Die sich ergebenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einem niedrigen Druck im Bereich der C-Säule/Heckscheibe. Daraus resultiert eine nach hinten und oben gerichtete Kraft, die sowohl den Luftwiderstand als auch den Hinterachsauftrieb erhöht. Da ein geringer Hinterachsauftrieb und eine ausgewogene Auftriebsverteilung elementar für die Fahrdynamik sind, kann mit der Einführung von Spoilerecken ein Beitrag zur her-



➊ Heckspoiler mit Spoilerecken:
geringer Luftwiderstand und Hinterachsauftrieb



➋ Heckspoiler ohne Spoilerecken:
hoher Luftwiderstand und Hinterachsauftrieb

ausragenden Fahrdynamik des A1 geleistet werden. Durch die zusätzlich eingeführten Abrisskanten an den Enden der Spoilerecken kann diese Auftriebsverteilung auch bei Seitenwind sichergestellt und ein stabiles Fahrzeugverhalten auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten erreicht werden. Die Ausführung des Bauteils als Hochglanzbauteil und dem damit einhergehenden geringen Kontrast zur Heckscheibe ermöglicht es, diese Maßnahme optisch unauffällig in das Grunddesign zu integrieren. Das Wirkprinzip der Abrisskanten wurde auch bei den Rückleuchten angewendet. Durch die aerodynamisch günstige, eckige Gestaltung und dem damit einhergehenden definierten Strö-

mungsabriss wurde eine deutliche Widerstandsreduzierung erzielt.

Neben dem Heckspoiler wurden auch die Räder aerodynamisch optimiert. Zur Reduzierung des c_w -Werts wurden für die angebotene Basisbereifung des A1 vollflächige Radzierblenden eingeführt. Der aerodynamische Nachteil einer breiteren Basisbereifung, welche hinsichtlich Fahrdynamik deutliche Vorteile mit sich bringt, wird damit kompensiert.

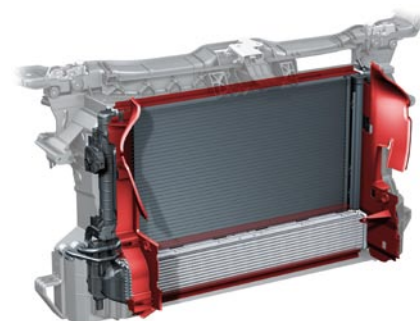
Einen wesentlichen Anteil zum Gesamtwiderstand tragen auch der Motorraum und der Unterboden bei. Da diese Anteile keinen direkten Einfluss auf das Design des Fahrzeugs haben, lag ein Hauptaugenmerk auf der Optimierung dieser Bereiche.

MOTORRAUMDURCHSTRÖMUNG

Die Motorraumdurchströmung ist für ungefähr 10 % des Gesamtwiderstandes des Fahrzeugs verantwortlich. Schon früh im Projektverlauf wurden 3D-Motorraumsimulationen mit OpenFOAM durchgeführt, um Potenziale aufzuzeigen. Dies führte zu Optimierungen im Kühlerumfeld und zur Ermittlung der erforderlichen Kühlluft Eintrittsfläche.

Im Wärmetauscherumfeld wurde auf eine möglichst leakage- und somit verlustfreie Zuströmung für Kühler und Klimakondensator Wert gelegt. Die üblicherweise noch vorhandenen toleranzbedingten Leckagen zwischen Kühlluft eintritt und Kühler wurden durch montagetragere, optimierte Luftleitteile und zusätzliche Dichtstreifen geschlossen. Der Aufbau des Wärmetauscherumfelds ist exemplarisch für einen 1,2-l-TFSI-Motor in ➌ dargestellt. Neben der Reduzierung des c_w -Wertes werden durch diese zusätzlichen Dichtstreifen auch die Klimatisierung und die Motorkühlung verbessert. Rezirkulationen im Wärmetauscherpaket im Stop-and-Go-Betrieb werden reduziert und die Effizienz des Kühlpaketes erhöht sich deutlich.

Ergänzt wird das optimierte Kühlerumfeld durch motorisierungsabhängige zusätzliche Verschließungen des Kühlerschutzgitters, ➍. Im Vergleich zu einer variablen Ziergitterverschließung ist das, hinsichtlich Kosten und Komplexität, die effizientere Methode einer c_w -Reduzierung. Auch diese Maßnahme wurde bereits in der frühen Entwicklungsphase virtuell optimiert und frühzeitig im Projekt vorgehalten. Mit Prototypen erfolgte lediglich eine Absicherung über Freigabemessungen.



➌ Kühlerumfeldabdichtung am Beispiel 1,2-l-TFSI-Motor



4 Feste motorisierungsabhängige Ziergitterverschluss

Diese beschriebenen Maßnahmen im Kühlerumfeld und Kühlerschutzgitter haben ein Gesamtpotenzial von $c_w = -0,013$. Das führt zu einer Verbrauchsreduzierung um bis zu 0,1 l/100 km

BÜRSTENLOSER ELEKTROLÜFTER ALS ERWEITERTE EFFIZIENZTECHNIK

Als weitere Maßnahme zur Optimierung des Kundenverbrauchs beim Audi A1 wird erstmalig in der Premium-Kompaktklasse ein effizienter bürstenloser Elektrolüfter flächendeckend zum Einsatz gebracht, 5. Aufgrund des höheren Wirkungsgrads und der stufenlosen Ansteuerung wird die Stromaufnahme des Lüfters, bei identischer Luftleistung, zum Stufenlüfter reduziert. Zusätzlich steigern die effizientere Wirkungsweise, die geringere Stromaufnahme sowie die reduzierten Ansteuerungszeiten des bürstenlosen Lüfters die Stoppzeit im Start-Stopp-Fahrbetrieb.

Über den gesamten Betriebstemperaturbereich wirken sich die Eigenschaften des bürstenlosen Motors positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. So wird eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 0,15 l/100 km realisiert, 6. Die stufenlose Ansteuerung des Lüfters hat auch einen positiven Einfluss auf den Kundenkomfort. Es werden nur exakt die Drehzahlen des Lüfters eingestellt, die für die jeweilige Anforderung minimal notwendig sind. Somit werden unnötige akustische Emissionen vermieden.

UNTERBODEN

Ein weiterer Bereich zur c_w -Optimierung eines Fahrzeugs ist der Unterboden. Bei Audi werden in allen Baureihen Bugspoiler, Radspoiler, Bugkapsel und c_w -Bodenverkleidungen eingesetzt. Zusätzlich wurde beim A1 auch ein Reserveradmuldenspoiler eingeführt. Dieser ist in 7 zu sehen. Gerade bei Vollheckfahrzeugen ermöglicht dieser Spoiler eine sehr effiziente c_w -Reduzierung.

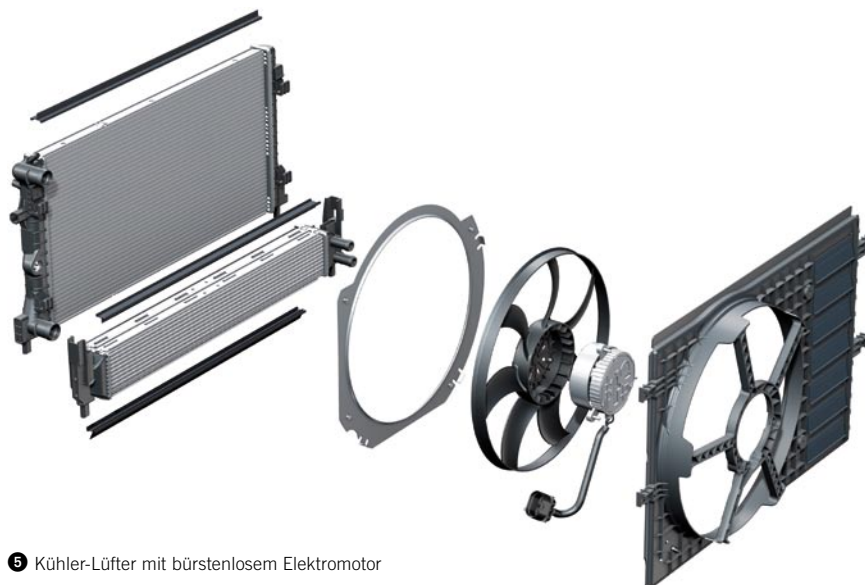
Die Summe der Maßnahmen am Unterboden, vom Bugspoiler über die Radspoiler bis zum Reserveradmuldenspoiler,

ermöglichte eine Reduzierung des c_w -Werts um -0,028. Auch dadurch war es möglich, trotz nur geringer Eingriffe ins Grunddesign des Fahrzeugs einen sehr guten c_w -Wert zu erzielen.

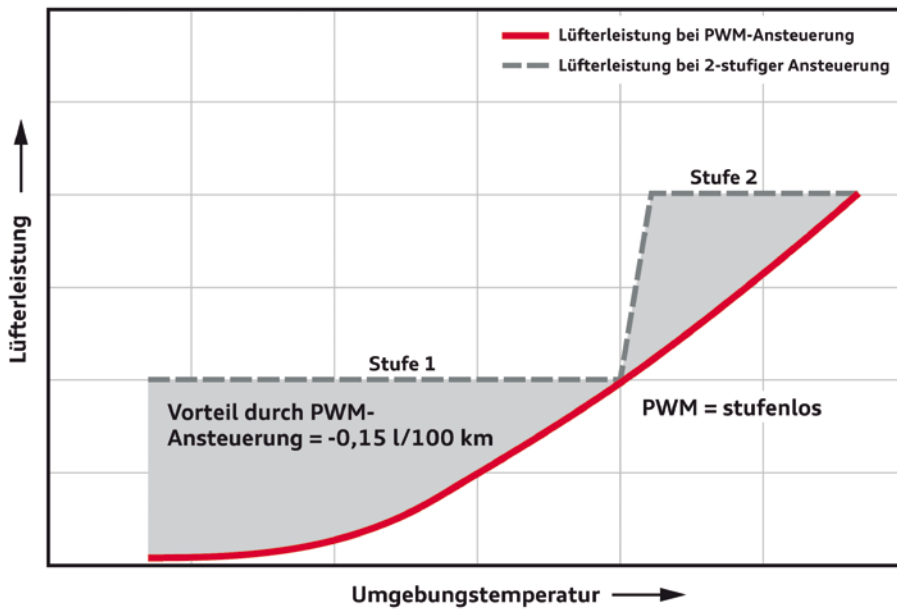
SEITENSCHIEBENVERSCHMUTZUNG

Ein weiteres Entwicklungsziel neben guter Aerodynamik ist, eine freie Sicht durch die Seitenscheibe und auf das Außenspiegelglas sicherzustellen. Trotz Verzicht auf eine Wasserfangeleiste konnte beim A1 ein klassengerechtes Ergebnis erreicht werden. Das Abführen des Regenwassers von der Frontscheibe wurde aufgrund einer engen Abstimmung mit der Designabteilung durch einen ausreichend großen Rücksprung der Frontscheibe zur A-Säule sichergestellt.

Die Außenspiegel sind hinsichtlich Aerodynamik, Aeroakustik und Verschmutzung optimiert, 8. Neben der optimierten Grundform zeigt sich dies durch verschiedene Maßnahmen im Spiegelgehäuse. Zur Schmutzfreihaltung des Spiegelglases wurde eine Nut zwischen Spiegelkappe und -brille umgesetzt. Die Nut an der Spiegeloberkante dient dazu, Wasser, das sich auf dem Spiegel sammelt, nach außen hin abzuführen, sodass das dort abtropfende Wasser das Spiegelglas nicht mehr beaufschlagt. An der Unterseite ist eine Abweiskante analog zum Audi Q5 umgesetzt. Mithilfe der Abweiskante an der Unterseite des Spiegels wird der Spiegel-



5 Kühler-Lüfter mit bürstenlosem Elektromotor



6 Lüfterleistungsvergleich bei zweistufiger Ansteuerung gegenüber der Ansteuerung mittels Pulsweitenmodulation (PWM)

nachlauf so beeinflusst, dass der aerodynamische Nachlauf und somit das abtropfende Wasser die Brüstung nicht auf Höhe der Türscheibe oder des Türgriffes trifft.

Trotz der engen, an manchen Stellen einschränkenden Randbedingungen und des herausfordernden Grunddesigns konnte der Widerstandsbeiwert beim

Audi A1 über den oben skizzierten Entwicklungsprozess um $c_w = 0,080$ von 0,40 auf 0,32 reduziert werden, bei einer Stirnfläche von 2,04 m². Der Kraftstoffverbrauch verringert sich dadurch um bis zu 0,6 l/100 km. Mit diesem Ergebnis von $c_w = 0,32$ für einen Audi A1 mit 1,2-l-TFSI-Motor nimmt der A1 eine Spitzenposition im Wettbewerbsumfeld ein, 9.

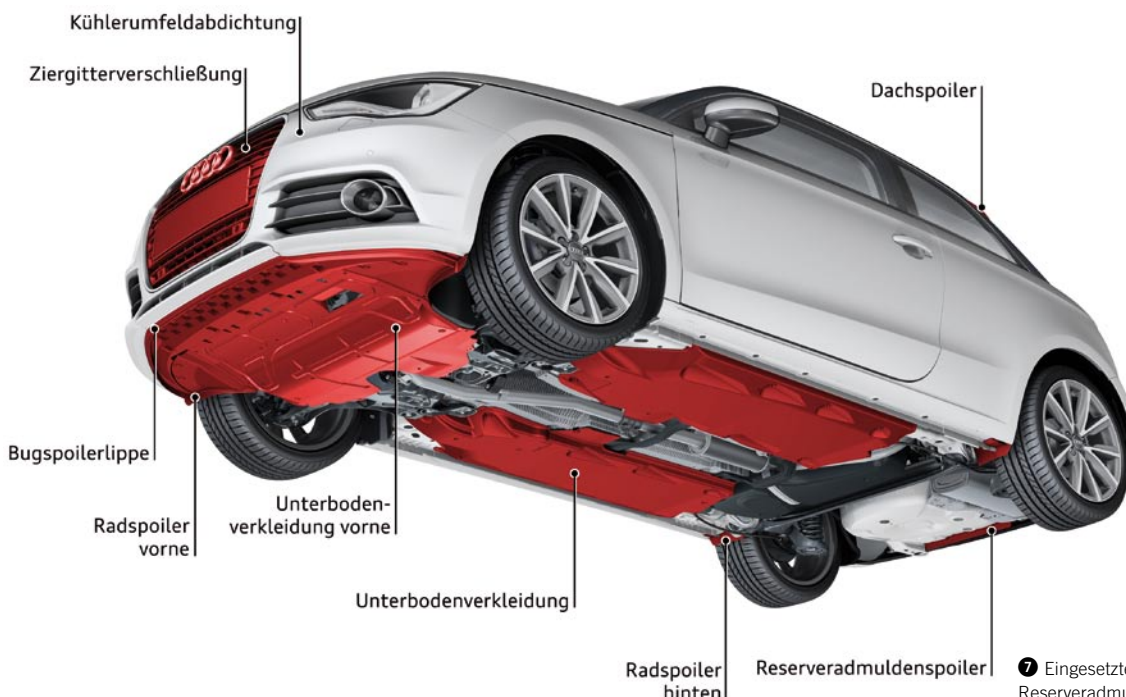
ENTWICKLUNGSZIEL KUNDENKOMFORT

Um den Kundenkomfort weiter zu erhöhen, kommen folgende Maßnahmen und Entwicklungsschritte aus dem Bereich der Aeroakustik im A1 zum Einsatz.

AEROAKUSTIK

Ein wesentlicher Anteil des Komforteindrucks in Kraftfahrzeugen wird vom Geräuschniveau im Innenraum bestimmt. Daher wurde auf die Optimierung der Aeroakustik großer Wert gelegt. Aufgrund der Ausrichtung des A1 als erstes Fahrzeug seiner Klasse mit Premiumanspruch war klar, dass das Ziel für die Aeroakustik „best in class“ lauten muss.

Das Geräusch im Fahrzeuginnenraum setzt sich im Wesentlichen aus Roll-, Antriebsstrang- und Windgeräuschen zusammen. Ab einer Geschwindigkeit von zirka 120 km/h wird es von den Windgeräuschen dominiert. Diese treten als spektral breitbandiges Rauschen auf und haben verschiedenste Ursachen. Primär entscheidend für einen harmonischen Gesamteindruck ist zunächst, dass keine lokalen Undichtigkeiten oder tonalen Anteile wahrgenommen werden. Für das subjektive Geräuschempfinden ist darüber hinaus entscheidend, dass im Frequenz-



7 Eingesetzte c_w -Maßnahmen inklusive Reserveradmuldenspoiler

bereich von 1 bis 5 kHz ein geringes Niveau erreicht werden kann, da das menschliche Gehör genau dort die höchste Empfindlichkeit besitzt. Neben einem geringen Summenpegel wurde also auch darauf geachtet, dass ein homogener Gesamteindruck im Fahrzeug entsteht.

Für diese Entwicklungsaufgabe verfügt Audi über einen der weltweit leisesten Aeroakustik-Windkanäle (57 db(A) bei 140 km/h Windgeschwindigkeit). Mit modernster Kunstkopf-Messtechnik werden die an den Ohren aller Fahrzeuginsassen ankommenden Geräuschpegel aufgezeichnet und ausgewertet, 10. Die subjektive Beurteilung durch den Aeroakustik-Ingenieur ist aber nach wie vor unerlässlich. Seine persönlichen Eindrücke von Lautstärke und Klangbild helfen später bei der Auswertung der objektiven Messdaten, zum Beispiel bei Hörvergleichen im Akustikstudio.

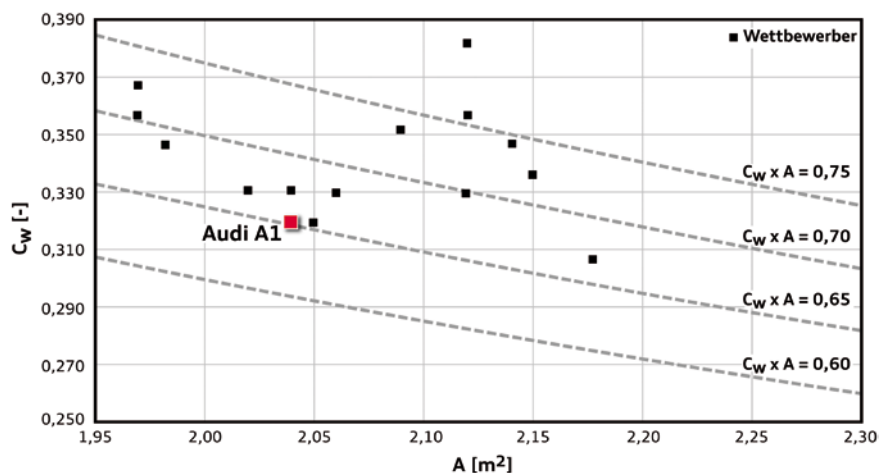
Auch in der Aeroakustik gliedert sich die Entwicklung im Wesentlichen in eine Konzept- und eine Optimierungsphase. In der Konzeptphase werden die grundlegenden, konzeptionellen Themen abgestimmt und zur Entscheidung gebracht. Dabei sind zum Beispiel zu nennen:

- : Anzahl und Ausführung der Türdichtungen
- : Dicken der Front-, Seiten- und Heckscheiben
- : Einsatz von Brüstungs- oder Dreiecksspiegel
- : geometrische Details der Karosserie und Anbauteile, beispielsweise bei einem Schiebedach.

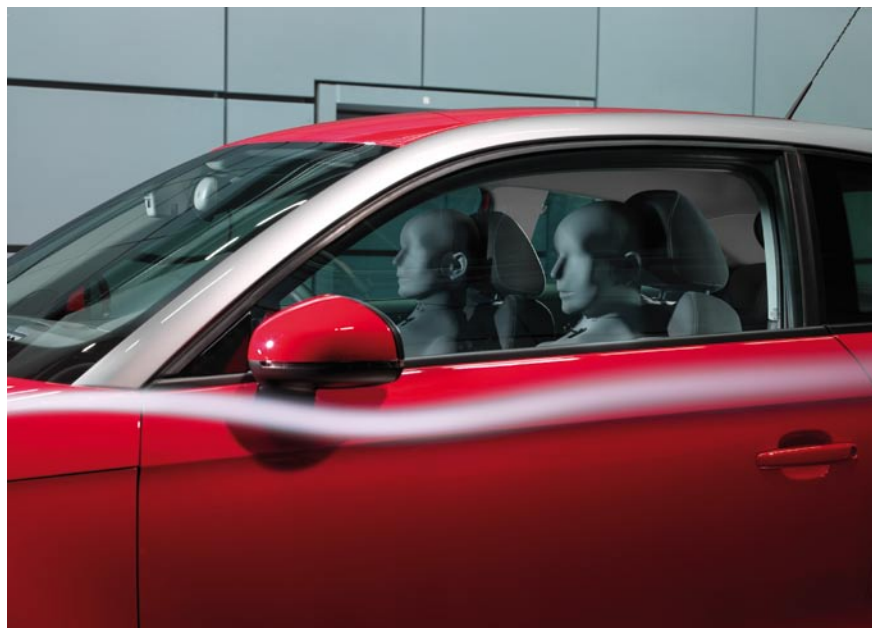
Die Summe dieser Randbedingungen führt dann zu einer abgeleiteten Zielkurve, die nach entsprechender Detailarbeit erreicht werden kann. Nach Abschluss der Konzeptphase wird die Konstruktion betreut, beispielsweise des Rohbaus oder der Dichtungen, bis erste Prototypen verfügbar sind. Mit diesen beginnt dann der Optimierungsprozess um das gewählte Konzept auch final abzustimmen. In dieser Phase werden noch vorhandene Schwachstellen des Dichtsystems im Aeroakustikwindkanal ausgearbeitet und die notwendigen Änderungen in mehreren Optimierungsschleifen in die Konstruktion eingebracht. Als Beispiel zu nennen ist hier die Längenabstimmung von Fensterführung und Fensterschachtleisten.

Selbstverständlich sind die für die Verbesserung der Eigenschaften hinsichtlich

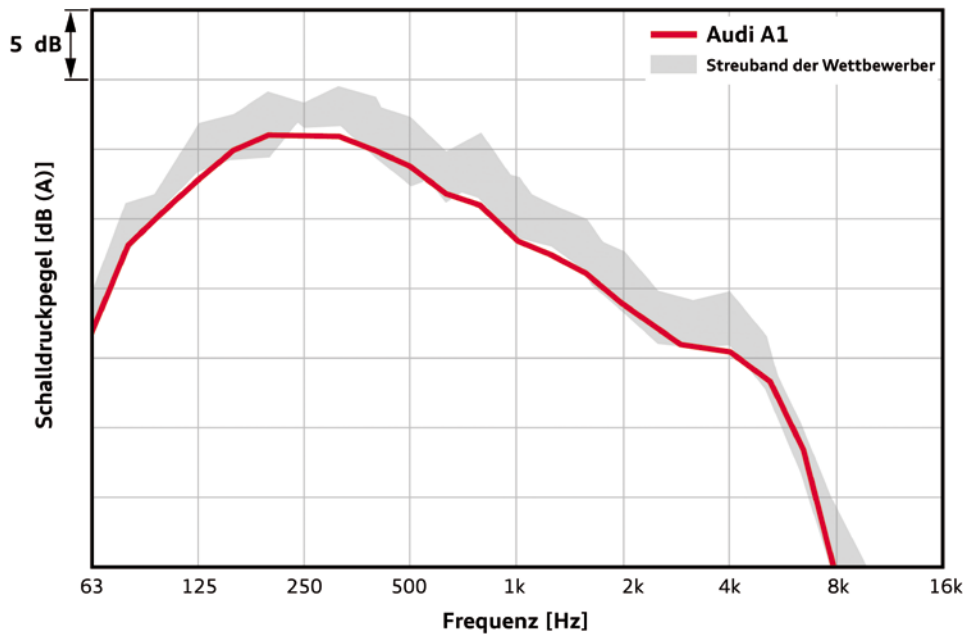
8 Außenspiegel des Audi A1



9 Aerodynamik des Audi A1 im Wettbewerbsumfeld



10 Audi A1 mit Kunstkopf zur Aeroakustikmessung



11 Aeroakustik des Audi A1 im Wettbewerbsumfeld

Aerodynamik, Seitenscheiben- und Spiegelverschmutzung gezeigten Maßnahmen so ausgeführt, dass keine aeroakustischen Nachteile akzeptiert werden müssen. Durch eine konsequente Detailoptimierung konnte ein aeroakustisches Niveau „best in class“ erreicht werden, das mit Fahrzeugen der übergeordneten Kompaktklasse konkurrieren kann, 11.

KLIMAKOMFORT

Auch beim Klimakomfort will der neue Audi A1 Maßstäbe setzen. Entsprechend waren die Zielsetzungen definiert, um einerseits für den Insassen den größtmöglichen Komfort zu realisieren und andererseits eine möglichst energieeffiziente Klimaregelung zu ermöglichen. Für den Audi A1 gibt es zusätzlich zu einem beheizbaren Belüftungssystem ein zweistufiges Angebot für die Fahrzeugklimatisierung. Als Einstiegs-klimatisierung kann eine manuelle Klimaanlage bestellt werden. Die optionale vollautomatische Einzonen-Klimaanlage regelt die Solltemperatur, Luftverteilung und Luftmenge abhängig von der Sonneneinstrahlungsintensität und der Temperatur innen und außen. Zudem verfügt sie über einen Feuchtesensor. Im Spiegelfuß wurde ein Taupunkt- und Scheibentemperatursensor integriert, um Scheibenbeschlag zu reduzieren und den Klimakomfort durch

ein Innenraumfeuchte-Management zu erhöhen.

Bei Gefahr von Scheibenbeschlag wird verstärkt entfeuchtet und/oder die Scheibentemperatur erhöht. Im Sommerbetrieb ist die Funktion „Innenraumfeuchte-Management“ aktiviert. Mit Hilfe des Feuchtesensors und der variablen Verdampfer-temperatur wird im Innenraum eine angenehme relative Luftfeuchtigkeit geregelt.

Auch zur Start-Stopp-Automatik trägt die Klimaregelung einen wichtigen Teil

bei. Die Sensoren überwachen permanent die Temperatur und Feuchtigkeit der Luft im Innenraum und erlauben damit maximale Stoppzeiten des Motors. Erst wenn Scheibenbeschlag droht oder die Gefahr des Auskühlens beziehungsweise Aufheizens des Innenraums besteht, wird der Motor wieder gestartet.

Eine ergonomische Bedienbarkeit der Klimabetätigung wurde ebenfalls bereits in der frühen Konzeptphase berücksichtigt. Die Einsicht der Tasten und Drehsteller ist aus jeder Sitzposition gewährleistet und durch eine energieeffiziente Suchbeleuchtung ist auch bei schlechten Lichtverhältnissen eine gute Ablesbarkeit möglich, 12.

Ebenso wurde ein verständliches und anwenderfreundliches Bedienkonzept entwickelt. Die drei zentralen Drehsteller der Klimabetätigung ermöglichen die Einstellung der Innenraumtemperatur, den manuellen Eingriff in der Luftverteilung und Luftmenge. Zusätzlich sind die Funktionen „Auto“, „Defrost“, „Umluft“ und „AC“ in die Bedienoberfläche integriert.

Ein weiteres Feature ist die Vernetzung der Klimaregelung mit dem Bordcomputer mit Effizienzprogramm. Die Funktion gibt über das Fahrerinformationssystem Aufschluss, ob die Klimaanlage aktiv ist und zeigt den daraus resultierenden Kraftstoffverbrauch an. Zudem erhält der Fahrer Hinweise zur effizienten Nutzung der Klimaanlage, falls eine geöffnete Seitenscheibe oder das Schiebedach den Energiebedarf erhöhen.



12 Klimabedienteil

MIT DEM NEUESTEN WISSEN SCHLIESST SICH DER KREIS.



© 2009 creativa republic / Rentop Frankfurt / iStock



**JETZT FÜHRENDES FACHWISSEN EINSCHALTEN
UND KOSTENLOS ATZ ELEKTRONIK TESTEN.**

Elektronik treibt Innovationen an. Das Wissen dazu Karrieren. Machen Sie darum jetzt den Test, entdecken Sie **ATZ elektronik**. Und Fachwissen auf wissenschaftlichem Niveau und in einzigartiger Informationstiefe. Von Elektromobilität über Testing bis hin zu Energiemanagement und mehr. Eine kostenlose Ausgabe ist für Sie reserviert. Füllen Sie einfach den Coupon aus und ab das Fax! Mehr unter: www.ATZonline.de/leseprobe/atze

ATZ elektronik

JA, ICH MÖCHTE ATZ ELEKTRONIK JETZT GRATIS TESTEN!

311 10 503

Bitte schicken Sie mir kostenlos und unverbindlich die nächste Ausgabe ATZ elektronik. Möchte ich die Zeitschrift danach weiterlesen, brauche ich nichts weiter zu tun. Ich erhalte die Zeitschrift zum Preis von nur € 111,- zzgl. Versandkosten. Das Abonnement kann ich jederzeit nach Erhalt der letzten Ausgabe kündigen. Zu viel gezahlte Beiträge für nicht gelieferte Ausgaben werden erstattet. WIDERRUFGSGARANTIE: Diese Vereinbarung kann innerhalb von 14 Tagen schriftlich widerrufen werden. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung (Poststempel) an Springer Automotive Media, Leserservice PF 18, Abraham-Lincoln-Straße 46, 65189 Wiesbaden.

FIRMA

FUNKTION

STRASSE / NR.

TELEFON

DATUM / UNTERSCHRIFT

VORNAME / NAME

BRANCHE

PLZ / ORT

E-MAIL-ADRESSE

Füllen Sie einfach den Coupon aus und ab das Fax an: **0611.78 78 – 4 07**
Oder senden Sie eine Mail an: **SpringerAutomotive@abo-service.info**