

# Der erste serienmäßige Reihen-Fünfzylinder-Ottomotor für Personenwagen – eine Entwicklung von AUDI NSU

Erstmals in der Geschichte des Kraftfahrzeugs setzt AUDI NSU serienmäßig einen schnelllaufenden Fünfzylinder-Ottomotor in Reihenbauweise ein. Er entstand als baukastenmäßige Erweiterung des 1,6-l-Audi-80-Motors, jedoch unter Anwendung einiger kostengünstigerer und wartungsfreundlicherer Konstruktionsprinzipien.

## First Five-Cylinder Production In-Line Otto Engine for Passenger Cars – An Audi Development

### Abstract:

For the first time in the history of automobile engineering Audi NSU have introduced a 5-cylinder in-line Otto engine for production cars designed to run at speeds up to about 7,000 rpm. The paper describes a remarkable new design which enables to set new standards of performance and smoothness, while still retaining the advantages of the front wheel drive. This was achieved by taking the existing 1.6 liter engine (used in the Audi 80, Audi Fox, VW Dasher and VW Rabbit) as a basis for the design, incorporating certain features at the same time which reduce production and maintenance costs.

The paper also explains the theory which the designers followed in order to achieve the best possible equilibrium of primary and secondary inertia couples and goes on to describe all essential details regarding the construction and arrangement of the engine. The authors give test results concerning performance, fuel consumption, engine vibration problems, and engine noise in the passenger compartment of the new Audi, which, while retaining the advantages of the front wheel drive, can safely stand comparison with any 6-cylinder vehicles produced by competing manufacturers.

## 1. Grundsätzliche Betrachtungen

Bei der Absicht, ihr Motorenprogramm durch eine leistungsstarke Variante nach oben abzurunden, konnte AUDI NSU nicht auf eine konventionelle Lösung zurückgreifen. Ein in gewohnter Bauweise vor Getriebe und Differential liegender Reihen-Sechszylindermotor hätte zu lang gebaut, die hohe Vorderachslast hätte die Vorzüge des Frontantriebs erheblich geschmälert und Schwierigkeiten bezüglich Reifenverschleiß und Bedienungskomfort heraufbeschworen. Der Quereinbau eines Reihen-Sechszylindermotors hätte völlig neue, aufwendige, in der Ölwanne liegende Getriebe bedeutet. Der kürzer bauende Sechszylinder in V-Anordnung wäre diesem gegenüber wegen des ungünstigeren Massenausgleichs in der Laufkultur unterlegen und hätte nicht in ein Baukastensystem gepaßt.

In Anbetracht des Änderungsumfanges an den vorhandenen Fertigungsanlagen bot sich die Verlängerung des Audi 80-Motors um eine Zylindereinheit bei – entgegen einem Vorschlag von Schrön [1] – gleichgroßen Zylinderabständen an. Die Schwierigkeit eines solchen, in Personenkraftwagen noch nie eingesetzten schnelllaufenden Ottomotors in Fünfzylinder-Reihenbauart, der immerhin eine Leistung von mehr als 125 PS erwarten ließ, schien in der Beherrschung des Massenausgleichs zu liegen.

## 2. Theoretische Betrachtungen zum Massenausgleich

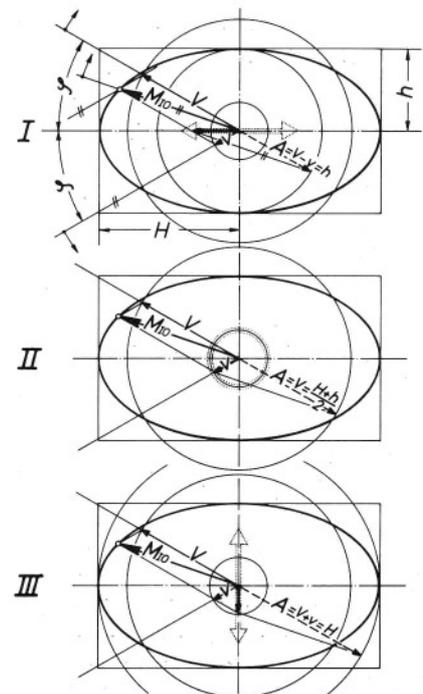
Im Jahre 1973 begannen bei AUDI NSU intensive theoretische Überlegungen zu diesem Thema. Zuerst fiel die Entscheidung zugunsten eines gleichmäßigen Zündabstandes von 144°, ungleicher Zündabstand erschien wegen der angestrebten Laufkultur riskant. Bei dem damit vorgegebenen, in 5 x 72° aufgeteilten Kurbelstern gibt es zwar keine Möglichkeit, die einzelnen Kröpfungen so auf der Kurbelwelle anzuordnen, daß die Massenmomente I. und II. Ordnung verschwinden, jedoch werden die Massenkräfte I. und II. Ordnung (letztere sind bekanntlich beim Reihen-Vierzylindermotor besonders störend) zu Null. Nachdem sich abschätzen ließ, daß das mit vertretbarem konstruktiven Aufwand nicht

zu beeinflussende Moment II. Ordnung als Störschwingungs-Anregung fast völlig in den Hintergrund treten würde, fiel die Wahl auf diejenige Kröpfungsanordnung, die das geringste Moment I. Ordnung (und damit die Zündfolge 1 – 2 – 4 – 5 – 3) aufweist.

Unter dem Einfluß dieses Momentes vollführt der schwebend gedachte Motor normalerweise eine Taumelbewegung um eine zur Kurbelwelle parallele Achse durch den Schwerpunkt. Demzufolge werden über alle Verbindungsstellen zur Karosserie (Motorlager, Antriebsachsen, Auspuff, Schaltgestänge, Bowdenzüge usw.) Schwingungen in das Fahrzeug eingeleitet, deren Resonanzen eine ernstzunehmende Komforteinträchtigung bedeuten könnten. Federsteifigkeit der Motorlager und Bewegungsamplituden ergeben ein Maß für die Größe der zu übertragenden Kräfte.

Bei genauerer Betrachtung ergibt sich für den aus räumlichen Gründen zumeist nicht möglichen vollen Ausgleich des rotierenden Anteils der bewegten Massen, daß der Momentenvektor veränderlicher Größe mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit umläuft. Seine Spitze beschreibt eine Ellipse, die in einer Ebene durch Mitte Motor senkrecht zur Kurbelwellenachse liegt, die große Halbachse steht senkrecht zur Zylinderhochachse, Bild 1. Die absolute Größe der Ellipse würde mit erhöhtem Ausgleich des rotierenden Anteils zwar abnehmen; jedoch wegen der oszillierenden Massen – wie erwähnt – nicht zu Null werden.

Dieser verbleibende Momentenvektor I. Ordnung ( $M_{10}$  in Bild 1) läßt sich in zwei gleichförmig, entgegengesetzt zu-



(Richtung und Maximalwert des Restmomentes punktiert)

$$\left. \begin{aligned} V+v &= H \\ V-v &= h \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} v &= \frac{H+h}{2} \\ v &= \frac{H-h}{2} \end{aligned}$$

	Vektor des Zusatzmomentes	Ergibt max. Restmoment d. Größe	Dieses erzeugt eine
I	$A = V - v = h$	$\pm 2v$ , nur osz.	Bewegung um die Querachse
II	$A = V = \frac{H+h}{2}$	$v = \frac{H-h}{2}$ , rot.	Taumelbewegung
III	$A = V + v = H$	$\pm 2v$ , nur osz.	Bewegung um die Hochachse

Bild 1. Auswirkung eines Zusatzmomentes auf die Eigenbewegungsform des Motors

Auch der neue große

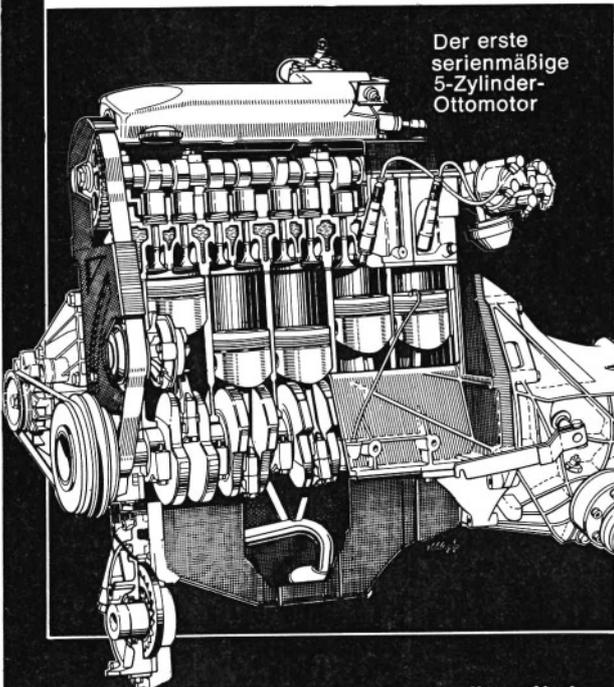
# AUDI 100

in 8 Varianten  
mit 3 verschiedenen Motoren  
wieder mit MAHLE-Kolben

AUDI 100 L 5E, 100 GL 5E  
2,2 l, 136 PS, Superbenzin  
Autothermatikkolben  
79,5 mm  $\phi$   
Al-Si-Legierung MAHLE 124  
Oberfläche verbleit



Der erste  
serienmäßige  
5-Zylinder-  
Ottomotor



Seit es AUDI gibt, sind sämtliche  
AUDI-Typen serienmäßig  
mit MAHLE-Kolben ausgerüstet

Man fährt gut mit

## MAHLE

MAHLE GMBH, Postfach 500 769, D 7000 Stuttgart 50

# Ein Drittel weniger investiert



In dieses moderne Umschlagsystem einer zentralen Müllentsorgung wurde ein Drittel weniger investiert. Dank Anwendung von Kässbohrer-Abroll-Kippsattelanhängern mit Wechselbehältern! Mit einem durchschnittlichen Tagesdurchfluß von 150 t Müll und der Entfernung von 30 km zur Zentraldeponie, waren ein Drittel weniger Investitionskosten erforderlich, weil das Kässbohrer-SKAM-Wechselsystem mit weniger (steuerpflichtigen) Zugfahrzeugen, mit weniger Sattelanhängern und preisgünstigen Behältern auskommt gegenüber einem Transportsystem mit fest aufgebauten Behälterfahrzeugen.

Behälter mit 50 m<sup>3</sup> gepreßtem Haus- und Industriemüll sind in 3 Minuten aufgenommen und in 5 Minuten restlos entleert. Die wenigen Handgriffe erledigt allein der Fahrer.

Auch die laufenden Betriebskosten bleiben niedriger. Das ist wirtschaftliche Entsorgung!

Fordern Sie ausführliche Informationen von:

Karl Kässbohrer Fahrzeugwerke GmbH, Abt. VA,  
Postf. 2660, 7900 Ulm, Tel. 0731/18 12 57, Tx. 07 12766



## Kässbohrer fahren-lohnt sich



Kässbohrer-Werke  
in Dortmund, Hamburg, Frankfurt,  
Berlin und München  
sowie 200 erfahrene Vertrags-  
werkstätten sorgen für einen  
zuverlässigen Kundendienst.

Bild 2 a (links). Schnittdarstellung des Audi Fünfzylinder-Reihenmotors

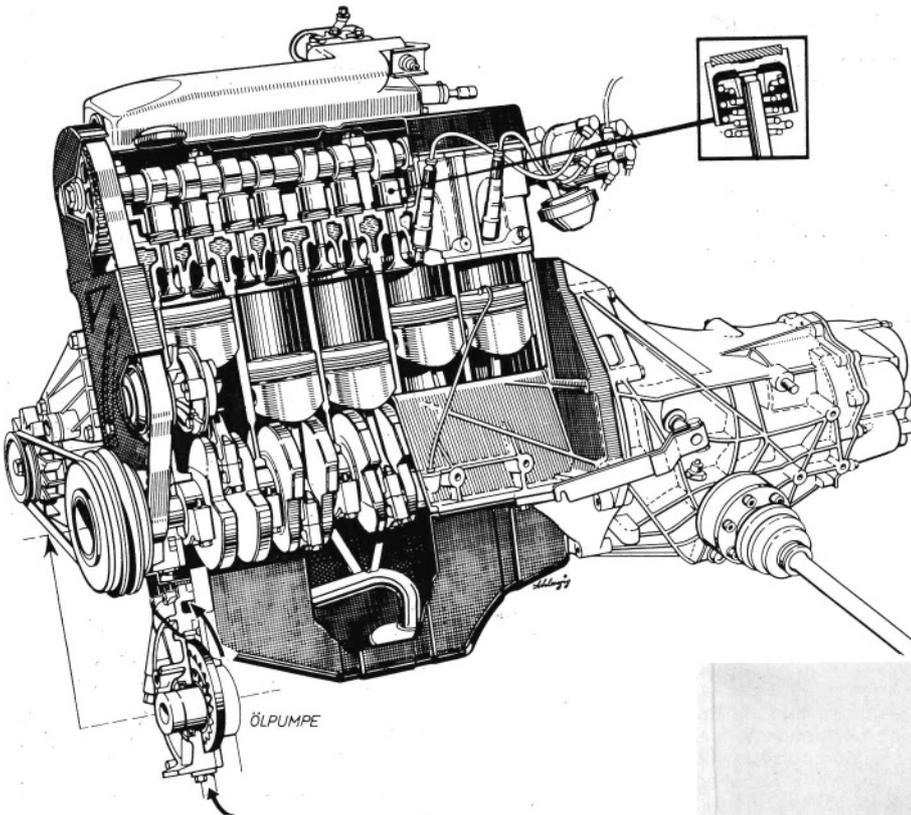
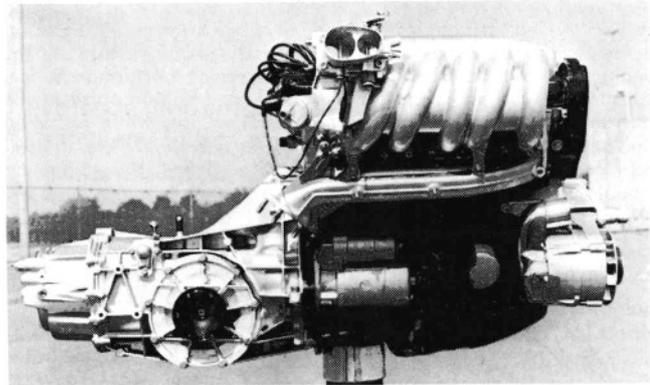


Bild 2 b (unten). Ansicht des Frontantriebsaggregates mit Ansaugsammelraum und Einzelrohren über dem Auspuffkrümmer



einander umlaufende Vektoren  $V$  und  $v$  zerlegen. Der im Richtungssinn der Kurbelwelle umlaufende Vektor  $V$  läßt sich durch ein auf der Kurbelwelle anzubringendes Kräftepaar  $A$  ausgleichen bzw. über- oder unterkompensieren. In Bild 1 ist versucht worden, in gedrängter Form drei charakteristische Fälle darzustellen: Bei geeigneter Dimensionierung des Zusatzkräftepaars ist es nicht nur möglich, den verbliebenen Momentenvektor I. Ordnung beträchtlich zu verringern, sondern überdies nach

- Fall I: eine Bewegung des Motors nur um die Querachse
- Fall II: eine Taumelbewegung um eine zur Kurbelwelle parallele Achse
- Fall III: eine Bewegung des Motors nur um die Hochachse zu erzwingen.

Damit eröffnet sich die sehr willkommene Möglichkeit, die Eigenbewegung des Motors infolge des Momentes I. Ordnung durch geeignete Dimensionierung des Zusatzkräftepaars derart festzulegen, daß über die erwähnten Übertragungspunkte ein Minimum an Störungsanregungen in die Karosserie eingeleitet wird und dabei die speziellen Eigenschaften z. B. der Motorlager in optimaler Weise genutzt werden. Als recht günstig erweist sich, daß das Zusatzkräftepaar durch relativ kleine Unwuchten dargestellt werden kann, die sich bequem auf dem Schwungrad und in der Nabe des Schwingungsdämpfers unterbringen lassen.

Als weiterer Vorteil des aus Fünfzylinder-Reihenmotor, Kuppelung, Differential und Getriebe bestehenden Frontantriebsaggregates ist anzuführen, daß die komplette Einheit mit ihrem, gegenüber dem bisher allein betrachteten Motor, vergrößerten Massenträgheitsmoment grundsätzlich kleineren Eigenbewegungen unterliegt, wenn es gelingt, Motor- und Getriebegehäuse und ihre Verbindungen genügend biegesteif auszuführen.

Das Moment II. Ordnung – der Vektor oszilliert in der Richtung der Querachse – ist dem Betrag nach zwar größer als das der I. Ordnung. Da jedoch bei gleichen Momenten die Schwingwege der II. Ordnung genau 25% derjenigen der ersten Ordnung betragen, ist eine spürbare Komforteinbuße nicht zu befürchten.

Die vorstehend erwähnten Überlegungen führten zu dem Re-

sultat, daß keine theoretisch begründeten Einwände gegen die Realisierung eines Fünfzylinder-Reihenmotors bestehen. Dies konnte auch in der Praxis bestätigt werden.

### 3. Konstruktive Ausführung

#### 3.1. Baukastenmäßige Erweiterung des Audi-80-Motors

Mit Rücksicht auf die vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten ist die konstruktive Ausführung des neuen Fünfzylinder-Motors, Bild 2 a und b, als Erweiterung des Audi-80-Motors im Sinne eines Baukastens angelegt. Demzufolge sind die nachstehenden Konstruktionsmerkmale gleich geblieben:

Zylinderabstand; Bohrung; Bauhöhe von Kurbelgehäuse und Zylinderkopf; Bohrbild für Zylinderkopfschrauben; Anordnung von Ventilen, Zündkerzen und Einspritzdüsen; Ausführung der Kurbelwellenlagergasse; Ausbildung des über Mitte Kurbelwelle herabgezogenen, steifen Kurbelgehäuses; zusammengegegossene Zylinderlaufbüchsen sowie das Ventilspiel-Einstellsystem über Einstellplatten.

Auf diese Weise können – kostengünstig und servicefreundlich – Bauteile des Audi-80-Motors verwendet werden, die bereits mit hohem Aufwand entwickelt wurden und die im Ersatzteildienst vorrätig sind.

Es sind dies: Alle Steuerungsteile bis auf die verlängerte Nockenwelle und vergrößerten Ventile; Pleuel mit Lager-schalen und Schrauben; Pleuelbolzen und Pleuelringe, Zahnriemenräder, Wellendichtringe und Thermostat.

#### 3.2. Neue Konstruktionsprinzipien und Auslegungsdetails

Da die Fertigungseinrichtungen für Zylinderkopf und Zylinder-

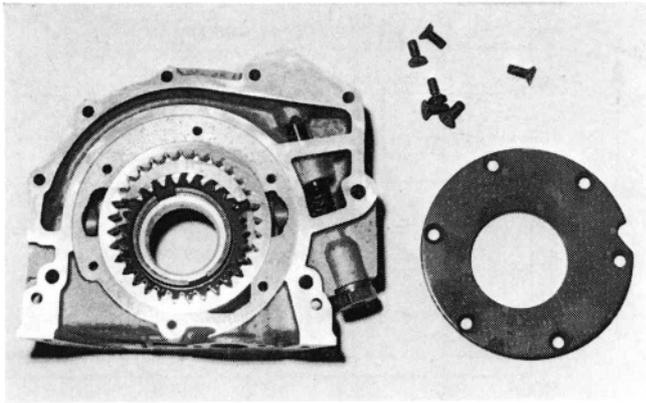


Bild 3. Ölwanne als innenverzahnte Sichelpumpe mit Bypass-Kanal

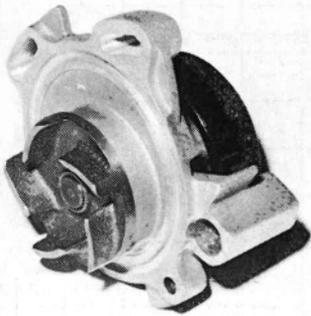


Bild 4. Wasserpumpe im Kurbelgehäuse integriert und zur Spannung des Zahnriemens verwendet

derkurbelgehäuse wegen der hinzugekommenen Zylinder-einheit zwangsläufig geändert werden mußten, bot sich die Möglichkeit, wartungsfreundliche und kostengünstigere Konstruktionsmerkmale des zwischenzeitlich entwickelten Audi-50- und des neuen 2-Liter-Motors einzuführen [2, 3].

So wurde auf eine Zwischenwelle für den Antrieb von Öl-pumpe, Zündverteiler und Benzinpumpe verzichtet. Die Öl-pumpe, wie beim neuen 2-Liter-Motor eine innenverzahnte Sichelpumpe, Bild 3, wird direkt von der Kurbelwelle, der an den Zylinderkopf angeflanschte Zündverteiler direkt von der Nockenwelle angetrieben. Neu an der Ölwanne ist ein Bypass-Kanal, über den die bisher in die Ölwanne abge-spritzte Überschuß-Ölmenge jetzt unmittelbar dem Saugraum der Pumpe zugeführt wird. Damit wird die Verschämung des Motoröls deutlich reduziert. Das Überdruckventil ist von außen zugänglich. Über die günstige Fördercharakteristik einer solchen Pumpe wurde bereits berichtet [3].

Um Teile einzusparen, sind die vom Zahnriemen angetriebene Wasserpumpe, Bild 4, und das Thermostatgehäuse in das Zylinderkurbelgehäuse integriert. U. a. entfällt eine Spann-rolle, durch exzentrische Verstellbarkeit des Pumpengehäuses wird die korrekte Riemenspannung des Nockenwellenantriebs eingestellt. Wegen der Dehnungsarmut der Zahnriemen müs-sen nur die Einbautoleranzen ausgeglichen werden. Ein Vor-teil dieser Auslegung ist, daß die Motorkühlung nicht durch den Ausfall eines Schmalkeilriemens gefährdet wird.

Der ursprünglich vorgesehene Kolbenhub des Basismotors (80 mm) wurde im Verlauf der Entwicklung auf 86,4 mm ver-größert. Damit ergab sich eine überproportionale Dreh-momentsteigerung. Um die ausreichende Torsionssteifigkeit der um den zusätzlichen Zylinderabstand verlängerten Stahl-Kurbelwelle, Bild 5, sicherzustellen, wurden die Durchmesser der gehärteten Hauptlagerzapfen von 54 auf 58 mm ver-größert. Ein vulkanisierter Torsionsschwingungsdämpfer be-grenzt den Winkelausschlag der Welle auf maximal 0,2°.

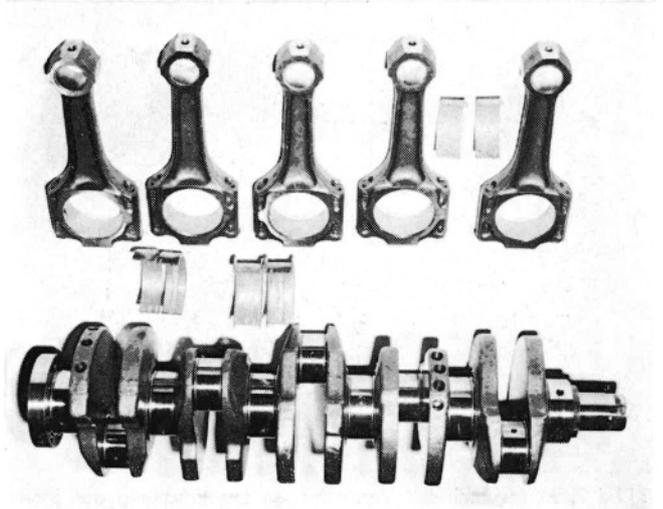


Bild 5. Kurbelwelle und Pleuel

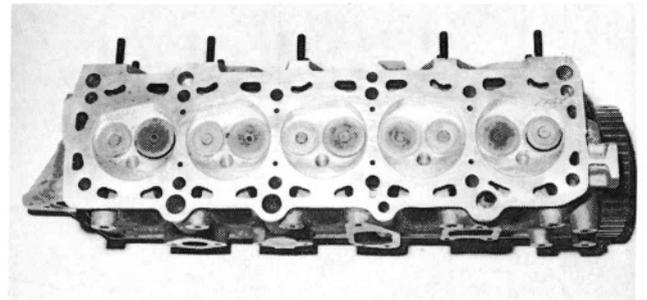


Bild 6. Zylinderkopf von der Brennraumseite mit Quetschfläche gegenüber der Kerzenbohrung

Seine Außenmasse trägt die drei Keilriemenspuren zum Antrieb von Lichtmaschine, Lenkhilfe und Klimakompressor.

Große Aufmerksamkeit erforderte die Optimierung des Brennraumes. Leistungsausbeute, Schadstoffemission, Brennstoffverbrauch und Klopfverhalten sind bekanntlich die bestimmenden Faktoren, hinzu kommt der Freigang zwischen Ventil- und Kolbenbewegung für den Fall eines Zahnriemen-schadens. Der Brennraum befindet sich – möglichst um die Zündkerzenmitte konzentriert – hauptsächlich im Zylinderkopf, die Quetschfläche liegt gegenüber der Kerze, Bild 6. Die Kolben erhielten eine leichte Kugelmulde mit angedeuteten Ventiltaschen. Ein- bzw. Auslaß-Ventil wurden auf 38 bzw. 33 mm Durchmesser (Basis-Motor: 34 bzw. 31 mm) vergrößert.

Das Saugrohr mußte hinsichtlich Leistungsausbeute, Einbau-verhältnissen und Montagemöglichkeit abgestimmt werden. Als günstig für die Einspritzung erwies sich ein zylindrischer Sammelraum mit ca. 1,8 l Inhalt und 270 mm langen Zuführun-gen zum Zylinderkopf.

Die Gemischaufbereitung erfolgt mittels Benzineinspritzung (K-Jetronic von Bosch), deren Einspritzdüsen den Kraftstoff unmittelbar den Einlaßventilen vorlagern. Damit werden die Probleme bezüglich ungleichmäßiger Gemischverteilung, Kraftstoff-Überschwemmung bei Kaltstart, Kaltlaufverhaltens im Winter und Fahrens in großen Höhen beherrscht.

Beim Auspuffkrümmer, Werkstoff GG 26, mußten Wärme-spannungen und Geräuschverhalten beachtet werden. Günstige Verhältnisse ergaben sich für die Zusammenführung der Abgase von Zylinder 1, 2 und 5 in den ersten, die der übrigen in den zweiten Strang.

Für präzise Zündeneinstellung sorgt bei völliger Wartungsfrei-heit eine kontaktlose Transistorzündung.

Weitere, im grundsätzlichen gleiche Konstruktionsdetails sind bereits in [2] und [3] beschrieben.

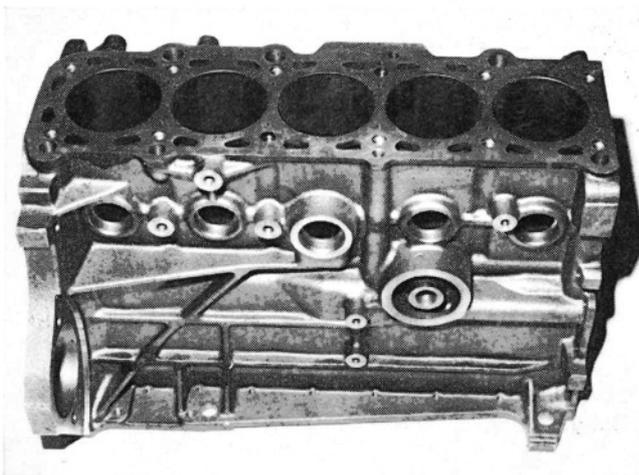


Bild 7. Motorblock mit Versteifungen zur Erhöhung der Biege-Eigenfrequenz

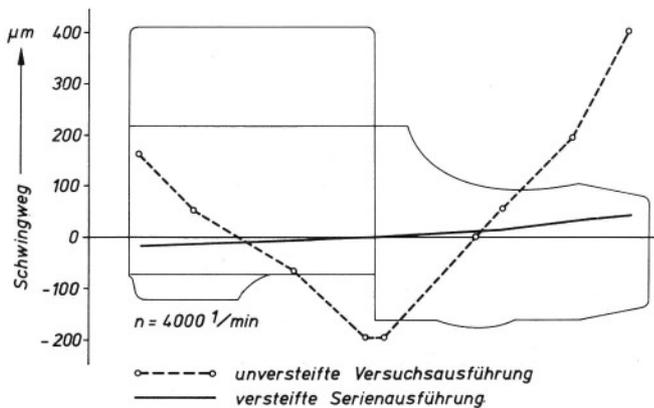


Bild 8. Biegeschwingsform des kompletten Frontantriebsaggregates infolge Anregung durch die 2. Ordnung

Tafel 1: Technische Daten des Audi-Fünfzylindermotors

Zylinderzahl	5
Zylinderanordnung	stehend in Reihe
Zylinderabstand	88 mm
Hubraum	2144 cm <sup>3</sup>
Bohrung	79,5 mm
Hub	86,4 mm
Verdichtungsverhältnis	9,3
Leistung	100 kW (136 PS)
bei Drehzahl (Nenn Drehzahl)	5700 1/min
mittlere Kolbengeschwindigkeit	
bei Nenn Drehzahl	16,4 m/s
max. Drehmoment	182 Nm (18,5 kpm)
bei Drehzahl	4200 1/min
Oktanahlbedarf	98 ROZ
DIN-Normverbrauch	10,5 l/100 km
Gewicht des kompletten Motors	
einschließlich Kupplung, Anlasser usw., trocken	165 kg
Füllmenge Öl inklusive Ölfilter	5 l
Füllmenge Wasser	8,1 l

### 3.3. Aussteifung des Frontantriebsaggregates

Im Verlauf der Versuchserprobung zeigte sich, daß der Frontantriebsblock zu Biegeschwingungen mit lästiger Geräuschabstrahlung angeregt wurde. Durch eine Reihe von Aussteifungsmaßnahmen, Bild 7, gelang es, die zunächst zu niedrige Eigenfrequenz der Antriebseinheit außerhalb des Bereiches der 2. Motorordnung zu verlagern und Resonanzüberhöhungen zu vermeiden. Bild 8 zeigt den Vergleich zwischen Versuchs- und Serienausführung.

### 3.4. Akustische Bewertung

Bild 9 stellt die Motorengeräusche des Fünfzylindermotors

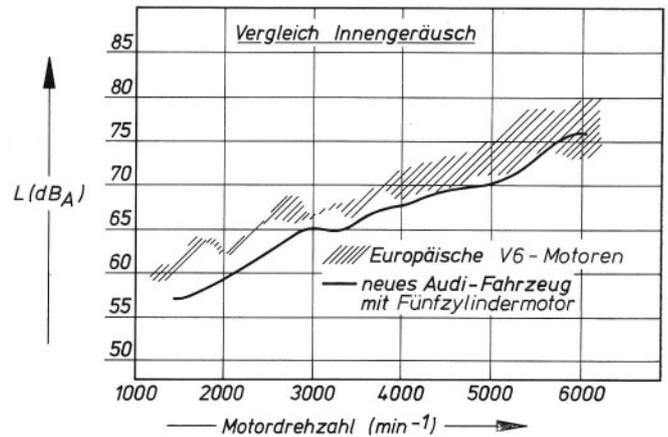


Bild 9. Motorgeräusch des Fünfzylindermotors am Fahrer-Ohr im neuen Audi 100 im Vergleich zu europäischen Personenwagen mit V6-Motoren

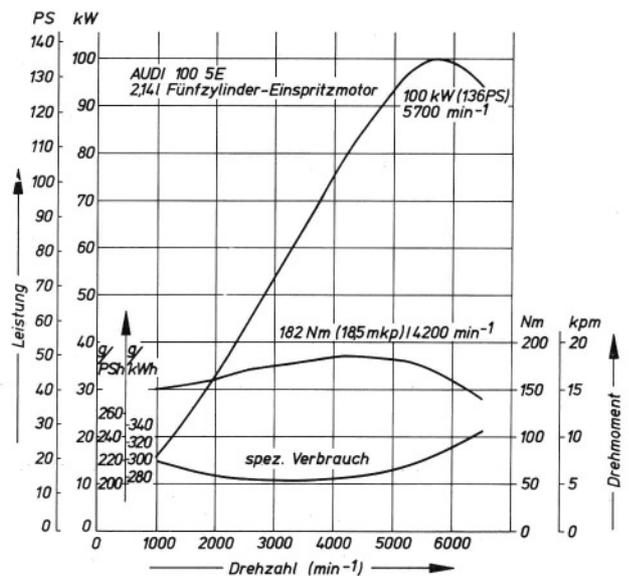


Bild 10. Leistungs- und Drehmomentenverlauf und spezifischer Verbrauch des Audi Fünfzylindermotors

im neuen Audi 100 den Verhältnissen bei europäischen Konkurrenzmodellen mit V6-Motoren gegenüber.

### 4. Motorkennwerte

Bild 10 zeigt den Leistungs- und Drehmomentverlauf. Letzterer ist bemerkenswert füllig, so stehen ca. 80% des maximalen Drehmomentes bereits bei 1000 1/min zur Verfügung. Weitere interessierende Daten sind in Tafel 1 zusammengefaßt.

### 5. Schlußbetrachtung

Der neue Fünfzylindermotor rundet das Audi-Motorenprogramm im Sinne eines Baukastens ab. Der Motor bietet neben beachtlicher Laufruhe, Elastizität und Wirtschaftlichkeit die Möglichkeit rationaler Fertigung sowie große Wartungsfreundlichkeit. Der mit diesem Komforttriebwerk ausgestattete neue Audi 100 scheut keinen Vergleich mit Sechszylinder-Modellen des Wettbewerbs und wahrt die Vorteile des Frontantriebs.

### Schrifttum

- [1] Schrön, H.: Die Dynamik der Verbrennungskraftmaschine. Springer Verlag 1947
- [2] Kraus, L.; Behles, F. und Piech, F.: Audi 50 – ein sparsamer Kompaktwagen mit Komfort. ATZ 76 (1974) 10, S. 309–316
- [3] Hauk, F. und Röder, G. I.: Der neue 2-Liter-Audi-Motor, Konstruktion und Versuchsergebnisse. ATZ 78 (1976) 3, S. 95–98