

ISSN 0073-8433

# **PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN**

SEKTION  
**TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN  
NATURWISSENSCHAFTEN**

SERIE 8 · NUMMER 25 · 1984

FILM C 1503

**Reifenrollgeräusche  
Strömungs- und Druckschwankungen  
im Bereich der Aufstandsfläche**



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

*Angaben zum Film:*

Tonfilm (Komm., deutsch und Originalton), 16 mm, farbig, 151 m, 14 min (24 B/s). Hergestellt 1982/83, veröffentlicht 1983.

Der Film ist für die Verwendung im Hochschulunterricht bestimmt.

Veröffentlichung aus dem Dritten Physikalischen Institut der Universität Göttingen, Prof. Dr. D. RONNEBERGER, Dipl.-Phys. K. SCHAAF, P. NEUWALD, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Dipl.-Ing. H. ADOLF; Kamera: K. LECHNER; Ton: K. KEMNER; Trickgraphik: K. LECHNER; Schnitt: K. LECHNER.

*Zitierform:*

RONNEBERGER, D., K. SCHAAF, P. NEUWALD und INST. WISS. FILM: Reifenrollgeräusche – Strömungs- und Druckschwankungen im Bereich der Aufstandsfläche. Film C 1503 des IWF, Göttingen 1983. Publikation von D. RONNEBERGER, K. SCHAAF, P. NEUWALD, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 25/C 1503 (1984), 16 S.

*Anschrift der Verfasser der Publikation:*

Prof. Dr. D. RONNEBERGER, Dipl.-Phys. K. SCHAAF, P. NEUWALD, Drittes Physikalisches Institut der Universität Göttingen, Bürgerstr. 42–44, 3400 Göttingen.

---

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: E. BETZ

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftliche Ergänzung zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus mehreren Lieferungen.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film

Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen

Tel. (05 51) 20 22 02

## FILME FÜR FORSCHUNG UND HOCHSCHULUNTERRICHT

DIRK RONNEBERGER, KLAUS SCHAAF, PETER NEUWALD, Göttingen, und INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM, Göttingen:

Film C 1503

### **Reifenrollgeräusche – Strömungs- und Druckschwankungen im Bereich der Aufstandsfläche**

Verfasser der Publikation: DIRK RONNEBERGER, KLAUS SCHAAF und PETER NEUWALD

Mit 6 Abbildungen

#### *Inhalt des Films:*

**Reifenrollgeräusche – Strömungs- und Druckschwankungen im Bereich der Aufstandsfläche.** Das Abrollgeräusch eines Reifens ist eng verknüpft mit schnell veränderlichen Strömungen im Bereich der Aufstandsfläche. In einem Modellexperiment, in dem Versuchsreifen bei kleinen Geschwindigkeiten durch einen Wasserkanal rollen, werden diese Strömungen sichtbar gemacht und gefilmt. Die Beobachtungen werden verglichen mit den Ergebnissen von Druckmessungen im Nahfeld der Aufstandsfläche. Im Film dargestellt sind die quasistationäre Umströmung eines glatten Reifens und ihre Störung durch eine in den Rollweg gelegte Doppelschwelle bzw. durch eine Querrille im Reifen sowie die Umströmung eines Serienreifens.

#### *Summary of the Film:*

**Noise of a Rolling Tire – Flow and Pressure Variations in the Region of the Contact Patch.** The noise of a rolling tire is connected with unsteady flow around the contact patch. The flow is made visible – and depicted in this film – by rolling a test tire through a water trough at low speeds. The observations are then related to results of pressure measurements in the area of the contact patch. The film depicts the quasi-stationary flow around a bald tire and its disruption due to a ridge in the pavement or a transverse groove in the tire, as well as the flow around a standard tire.

#### *Résumé du Film:*

**Bruit de pneus roulants – Variations de l'écoulement et de la pression dans la région de contact.** Le bruit de pneus est fortement lié aux variations rapides de l'écoulement autour de la région de contact. Un essai de modèle avec un pneu roulant dans un canal d'eau est utilisé pour montrer et filmer ces écoulements. On relie les observations aux résultats de mesures de la pression au champ proche de la surface de contact. Le film montre l'écoulement quasistationnaire autour d'un pneu lisse, les perturbations produites par un paire des seuils surroulés ou par une rainure transversale dans le pneu et l'écoulement autour d'un pneu en serie.

### **Allgemeine Vorbemerkungen**

Das Massenverkehrsmittel unserer Zeit, das Kraftfahrzeug, erzeugt eine Reihe von Problemen für unsere Umwelt, unter anderem die Belastung durch Verkehrslärm.

Verkehrslärm wird heute nicht mehr so sehr bestimmt von dem Fahrzeugantrieb, dessen Geräusche bereits wirksam bekämpft werden konnten, als vielmehr von den Reifenrollgeräuschen.

Mit dem Ziel, die Mechanismen dieser Schallerzeugung zu verstehen, werden seit geraumer Zeit vielfältige Untersuchungen unter den verschiedensten Gesichtspunkten angestellt.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, daß die wesentlichen Ursachen von Reifenrollgeräuschen in der Aufstandsfläche, d.h. in der Kontaktzone von Reifenlauffläche und Fahrbahn lokalisiert sind.

### **Erläuterungen zum Film**

#### **1. Qualitative Modelle zur Schallerzeugung**

Den idealisierten stationären Rollvorgang kann man sich vorstellen als das Abrollen eines vollkommen homogenen, ideal glatten Reifens auf einer vollkommen ebenen, glatten Fahrbahn. Wenn dieser Abrollvorgang nun zeitlich vollkommen stationär abläufe, entstünde kein Schall. Jeder reale glatte Reifen enthält Inhomogenitäten und – wenn auch nur winzige – Unebenheiten der Oberfläche; diese erzeugen selbst auf der glatten Trommel bereits erhebliche Abrollgeräusche. Es wird auch die Hypothese vertreten, daß selbst beim ideal glatten Reifen beim Abrollen auf der glatten Fahrbahn instationäre Mikrorutschbewegungen in der Kontaktzone stattfinden, die zur Schallerzeugung führen.

#### **1.1. Die Air-Pumping-Theorie**

Das Entstehen von Schall versucht man durch verschiedene Ansätze zu erklären. Die Air-Pumping-Theorie sieht die Ursache darin, daß sich Hohlräume, die in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn liegen, beim Abrollen verformen.

Solche deformierten Hohlräume stellen beispielsweise die Profilirillen dar, die zusammengedrückt werden, wenn sie in die Kontaktfläche einlaufen, und sich wieder aufweiten, wenn sie durch die Kontaktfläche hindurchgerollt sind und aus ihr auslaufen. Auch liegt der Reifen nicht glatt auf der Straßenoberfläche auf, sondern stützt sich im wesentlichen auf den Rauigkeitsspitzen des Belages ab, so daß auch hierdurch Hohlräume geschaffen werden.

Machen diese Hohlräume nun beim Abrollen eine Form- und Volumenänderung durch, so wird die Luft aus ihnen herausgepreßt oder in sie eingesaugt. Dieses „Pumpen“ soll nach der Air-Pumping-Theorie die schallerzeugenden Wechseldrucke hervorrufen.

#### **1.2. Reifenschwingungen als Lärmursache**

Ein anderes Konzept versucht, die Schallerzeugung damit zu erklären, daß beim Aufsetzen auf die stets unebene Fahrbahn die Reifenlauffläche unterschiedliche Beschleunigungen erfährt. Dies wird den Reifen zu Radialschwingungen anregen, die sich der umgebenden Luft mitteilen und so zu Schallwellen führen.

Beide Theorien sind begrifflich nur schwer gegeneinander abzusetzen (wie eine Podiumsdiskussion „How is tire noise generated“ auf der Internationalen Reifenlärmkonferenz 1979 in Stockholm [1] gezeigt hat) und beschreiben die Vorgänge in der Aufstandsfläche nur sehr pauschal.

## 2. Untersuchung der Vorgänge im Bereich der Aufstandsfläche

Festzuhalten ist, daß das Abrollgeräusch dadurch hervorgerufen wird, daß sich die Reifenoberfläche im Bereich der Kontaktzone instationär verformt. Diese Verformung setzt die angrenzende Luft in Bewegung und verursacht so eine Strömung. Ist diese Strömung gleichmäßig, entsteht durch sie kein Schall; ändert sie sich dagegen in sehr kleinen Zeiträumen (von der Größenordnung Millisekunden), ist sie also instationär, so kann damit eine Schallerzeugung verbunden sein.

Bisher fehlen jedoch noch Informationen, was für Prozesse im Detail sich im Bereich der Kontaktzone abspielen, wenn der Reifen abrollt, und welche Strömungen dabei angeworfen werden.

### 2.1. Erfordernisse einer solchen Untersuchung

Prinzipiell kann man Informationen über eine Strömung auf zweierlei Weise gewinnen: 1) durch Messung des Druckfeldes, wobei jedem Ort in der Strömung ein Druckwert zugeordnet wird, oder 2) durch Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes, sichtbar gemacht als die Bewegung von Teilchen, die vom Strömungsmedium mitgetragen werden.

Um aber aus Druckmessungen mit einer Mikrophonanordnung ein Gesamtbild der Strömung zu erhalten, muß man hohen Aufwand betreiben, um eine ausreichend große räumliche Auflösung zu erhalten.

Dagegen besteht bei der Sichtbarmachung der Strömung das Problem darin, eine ausreichende zeitliche Auflösung zu gewährleisten, wenn der Reifen mit realistischen Geschwindigkeiten von 60 bis 100 km/h rollen soll.

### 2.2. Realisierung der Untersuchung

Daher entschieden wir uns für zwei verschiedene, einander ergänzende Experimente.

Zum einen überrollte ein Pkw eine Druckmeßanordnung mit Geschwindigkeiten um 80 km/h. Diese Meßanordnung bestand aus einer ebenen Metallplatte, in die 16 Mikrophone eng benachbart, bündig eingelassen waren.

Zum anderen zeichneten wir in den vorliegenden Filmaufnahmen auf, wie die Aufstandsfläche eines einzelnen, langsam rollenden Reifens in einem Modellexperiment umströmt wurde.

### 2.3. Realisierung der Strömungssichtbarmachung

Neben der kleinen Rollgeschwindigkeit (ca. 60 cm/s) besteht der Modellcharakter des Experiments darin, daß der Reifen sich nicht durch Luft, sondern durch Wasser bewegt.

Zwar unterscheidet sich Wasser von Luft als Strömungsmedium durch seine größere Dichte, durch die fehlende Kompressibilität und durch seine geringere kinematische

Zähigkeit. Die Zeitkonstanten (z.B. Schwingungsperioden) der dynamischen Prozesse, wie Reifenschwingungen und Luftresonanzen sind jedoch unabhängig von der Rollgeschwindigkeit und können daher in unserem Modell ohnehin nicht unmittelbar beobachtet werden. Die erstgenannten unterscheidenden Faktoren wirken deshalb nicht verfälschend, und die uns interessierenden Charakteristiken der Primärströmung werden nicht gestört. Die um einen Faktor 15 kleinere kinematische Zähigkeit des Wassers hat noch den Effekt, daß den erreichten Geschwindigkeiten in Wasser Rollgeschwindigkeiten in Luft bis zu etwa 35 km/h entsprechen – unter der Voraussetzung, daß der Abrollvorgang stationär ist und die zugehörige Strömung nur von der Reynoldszahl abhängt.

Der Vorteil des Wassers als Strömungsmedium besteht darin, daß es eine Reihe von Schwebeteilchen gibt, die in ihrer Dichte dem Wasser angepaßt sind, und daß daher die Relativbewegung zwischen Teilchen und Wasser weitgehend ausgeschlossen werden kann. Für unser Experiment verwendeten wir Schwebeteilchen, die einen Durchmesser von 250 µm hatten und das eingestrahlte Licht gut rückstreteten.

Weiterhin hat Wasser eine höhere Wärmekapazität und geringere thermische Ausdehnung als Luft, daher führt die Aufheizung des Wassers durch die zum Filmen notwendige starke Lichteinstrahlung nicht oder kaum zu störenden Sekundärströmungen.

Den Aufbau des Experiments zeigt Abb. 1. In einem Kanal mit rechteckiger Grundfläche von  $1,30 \times 0,50 \text{ m}^2$  ist bis zu einer Höhe von 15 cm Wasser eingefüllt. Durch dieses Becken rollt der Meßreifen, gezogen von einem Gleichstrommotor mit Seilzug und von einem Gestänge geführt.

Der Reifen 155 R 13 von rund 60 cm Durchmesser hat in diesem Becken einen freien Rollweg von 1,10 m zur Verfügung. Auf dieser Strecke überrollt er eine Glasplatte, die bündig in den Kanalboden eingelassen ist. Sie macht die unmittelbare Beobachtung und die filmische Aufzeichnung der Vorgänge in der Aufstandsfläche möglich. Gefilmt wurde über einen Spiegel; dabei betrug die Bildaufnahmefrequenz 400 B/s.

Um eine möglichst realistische Aufstandsfläche zu erhalten, wurde der Reifen mit einem Gewicht von 60 kg belastet und sein Innendruck soweit verringert, daß die Kontaktzone eine Größe von ca.  $9 \times 9 \text{ cm}^2$  hatte.

### 3. Ergebnisse der Untersuchung

#### 3.1. Störung durch Serienprofil

In den Filmaufnahmen des Serienreifens ist deutlich zu erkennen, daß die Profilrillen beim Durchlauf durch die Aufstandsfläche stark verformt werden. Im Gegensatz zur Air-Pumping-Theorie treten aber nur starke Auswärtsströmungen aus den seitlichen Querrillen auf, wenn diese in die Kontaktzone einlaufen. Die Rückströmungen im Auslaufbereich sind dagegen viel schwächer.

#### 3.2. Quasistationäre Umströmung eines glatten Reifens auf glatter Fahrbahn

Um die Beobachtungen am Serienreifen im einzelnen zu klären, wurde zunächst die Strömung um einen profillosen Reifen untersucht, der noch durch Abschleifen von Unebenheiten nachbehandelt war. Da der Reifen im Kanal über eine glatte Fahrbahn rollt, erzeugt er in dem mit der Aufstandsfläche mitbewegten Bezugssystem eine Strömung, die sich – abgesehen von Turbulenzen – zeitlich nicht ändert, also stationär ist.

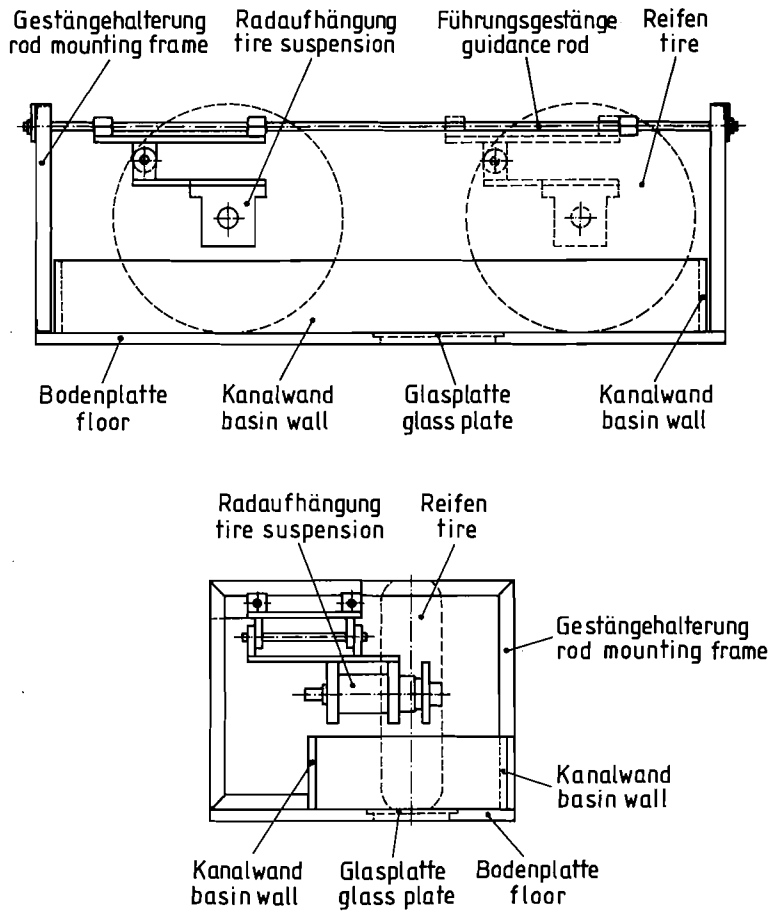


Abb. 1. Mechanischer Aufbau der Radführung und des Wasserbeckens zur Sichtbarmachung der Strömung;  
a) Seitenansicht, b) Ansicht von vorn

Abb. 2 zeigt das Stromlinienfeld, wie es der mitbewegte Beobachter sehen würde. Es wurde aus den Filmaufnahmen rekonstruiert. Die Umströmung ähnelt der ebenen Umströmung eines festen Hindernisses. Die Reifenkontur und die Fahrbahn bilden jedoch einen keilförmigen Zwischenraum, der im Bereich vor der Aufstandsfläche sehr flach verläuft. Daher weicht die Strömung schon sehr früh seitlich aus. Dabei schießt sie mit Geschwindigkeiten, die doppelt so hoch wie die Anströmgeschwindigkeit werden, aus dem Verdrängungsbereich heraus. An den vorderen Ecken der Kontaktzone reißt die Strömung ab. Die Ablöseblasen ziehen sich seitlich der Aufstandsfläche bis hinein in das Totwassergebiet, das sich hinter der Kontaktzone ausbildet.

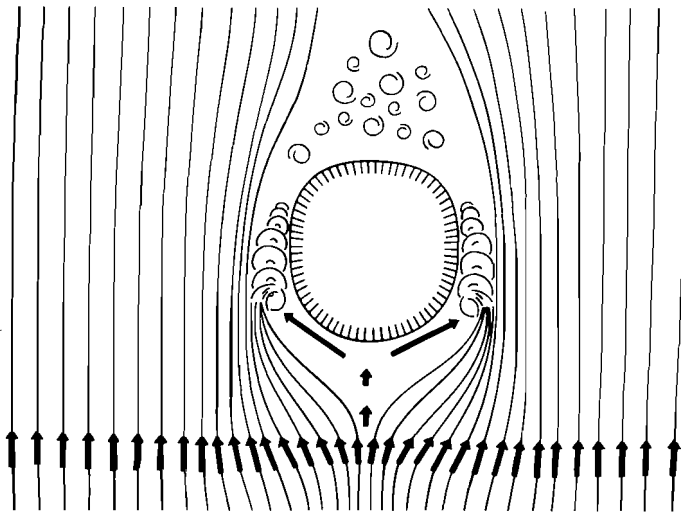


Abb. 2. Umströmung eines glatten Reifens, dargestellt als Stromlinien. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit

Das Medium, das vorne aus dem sich verjüngenden keilförmigen Hohlraum verdrängt wird, kann wegen der abgerissenen Strömung hinter der Kontaktfläche nicht wieder von den Seiten her angesaugt werden in den sich hier aufweitenden Zwischenraum zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Unsymmetrie der stationären Strömung ist der Grund dafür, daß beim Serienreifen die Strömung aus den Querrillen heraus viel stärker ist als die Rückströmung in die Rillen hinein.

Vor der Aufstandsfläche – zumindest außerhalb der Ablöseblasen – kann man die Strömung als Potentialströmung beschreiben. Dann läßt sich aus dem Geschwindigkeitsfeld nach Bernoulli das Druckfeld berechnen. Abb. 3 zeigt die Isobaren der Druckverteilung vor der Aufstandsfläche.



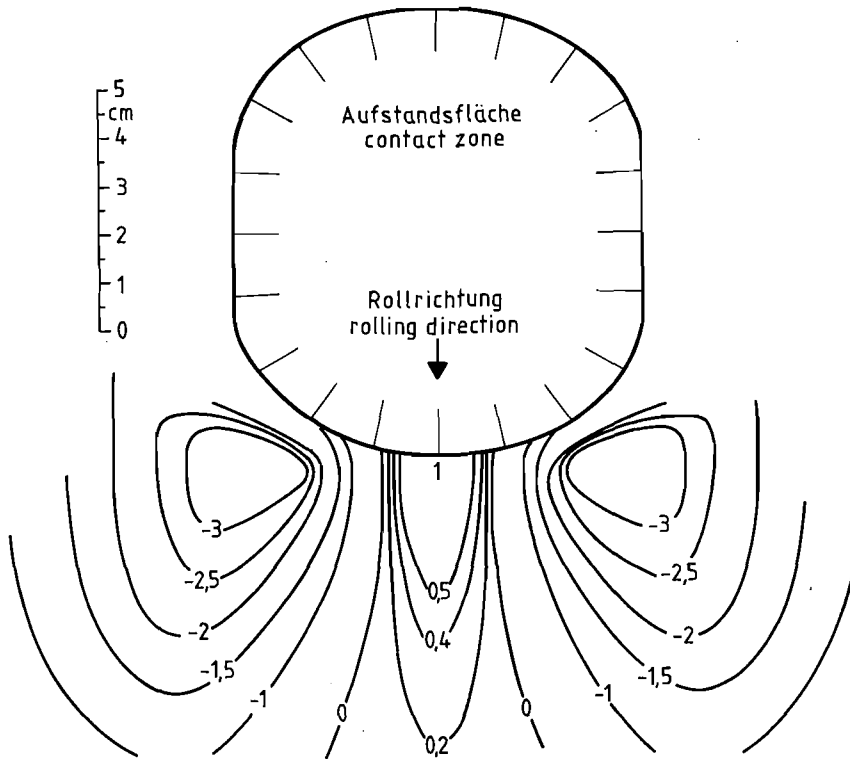


Abb. 3. Isobaren der Druckverteilung vor dem glatten Reifen. Die angegebenen Werte sind auf den Staudruck  $p/2 v_{roll}^2$  normiert

### 3.3 Störungen des stationären Abrollens

#### 3.3.1. Störung durch Schwellen auf der Fahrbahn

Von Interesse ist nun, wie sich die Druckverläufe und die Strömung ändern, wenn der Abrollvorgang durch Straßenunebenheiten und durch das Reifenprofil instationär wird.

Um dies zu untersuchen, wurde als erstes dem glatten Reifen ein Hindernis in den Weg gestellt: zwei quer zur Fahrtrichtung ausgerichtete Schwellen, jeweils 15 mm breit und 2,3 mm hoch, in einem Abstand von 12 mm hintereinander.

An der Strömung zeigen sich folgende Beobachtungen: Die Teilchen werden von der sich absenkenden Reifenlauffläche zur Seite verdrängt wie beim stationären Abrollen. Die Verdrängung wird dann noch etwas beschleunigt, bevor die Strömung zum Stillstand kommt. Dieses Phänomen tritt vor der ersten Schwelle auf, wenn der Reifen auf die erste Schwellenkante aufschlägt, ebenso auch in dem Kanal zwischen den Schwellen, wenn er auf die zweite Schwellenkante trifft, und hinter den Schwellen, wenn der Reifen auf den Fahrbahngrund zurückfällt.

Hat die Aufstandsfläche die betreffende Stelle überrollt und beginnt die Lauffläche sich wieder abzuheben, strömen zwar Teilchen zurück, beispielsweise in den Kanal zwischen den Schwellen; dieses Ansaugen ist jedoch ein recht allmählicher Prozeß und nicht mit großen Beschleunigungen verbunden.

Diese qualitativen Ergebnisse der Strömungssichtbarmachung finden ihre Entsprechung in den Druckverläufen, die in unserem zweiten Experiment aufgenommen wurden. Wie bereits erwähnt, überfuhr ein Pkw eine Metallplatte, in die ein Feld von 16 Mikrofonen

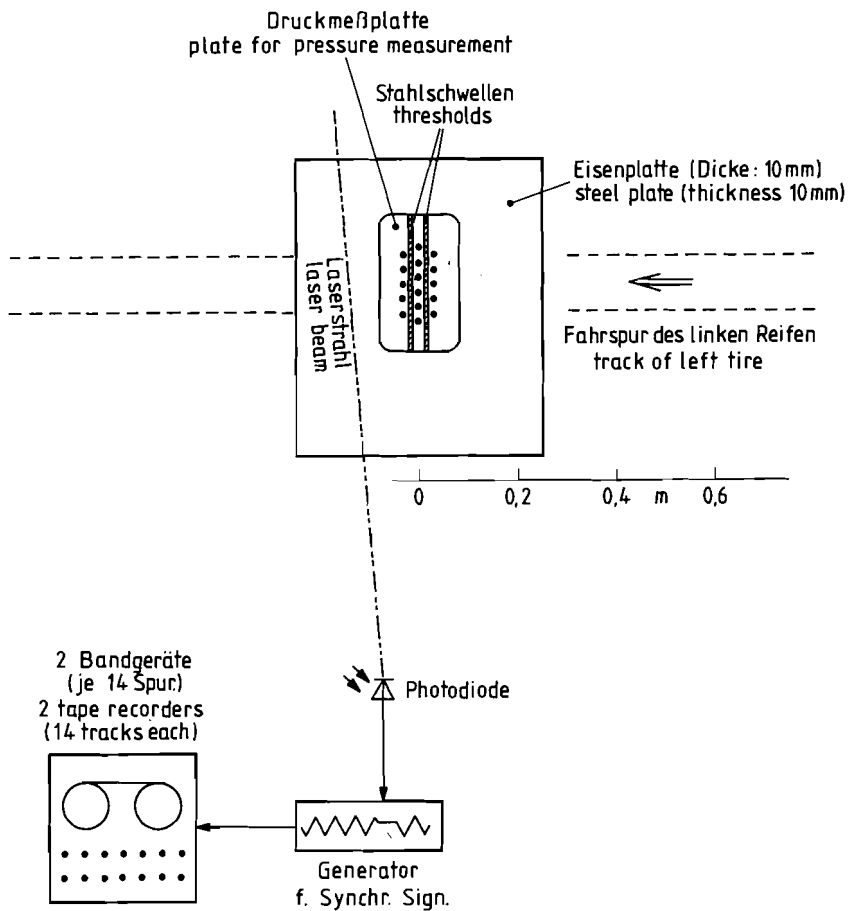


Abb. 4. Meßaufbau zur Bestimmung der Druckverteilung im Bereich der Reifenaufstandsfläche (vgl. [2])

eingelassen war (Abb. 4). Zwischen den Mikrofonen waren zwei Stahlschienen quer zur Fahrtrichtung aufgeklebt, so daß die Meßanordnung dem Strömungsexperiment entsprach.

Typische Druckverläufe aus diesen Messungen zeigt Abb. 5. Für das Entstehen dieser Druckverläufe haben wir folgendes Modell entwickelt, das hier am Signal des Mikrophons A vor den Schwellen erläutert wird.

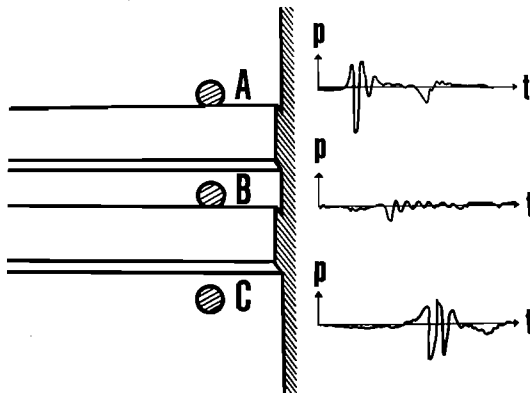


Abb. 5. Typische Druckverläufe aus Überfahrtsmessungen an den Mikro-  
phonen vor (A), zwischen (B) und hinter  
(C) den Schwellen

In Position 1 (Abb. 6) ist die Lauffläche nur noch wenige Millimeter von der Kante der ersten Schwelle entfernt. Die Schwelle stört dann den Luftverdrängungsprozeß vor dem Reifen; es kommt zu einem verstärkten Aufstau, der den Überdruckimpuls in Abb. 6 erklärt. Hier liegt also so etwas wie ein Air-Pumping-Effekt vor: Der Hohlraum, der sich zwischen Reifen, Fahrbahn und Schwellenkante bildet, wird durch die abnehmende Entfernung zwischen Aufstandsfläche und Schwellenkante verkleinert, und Luft wird herausgepumpt.

Nur Bruchteile einer Millisekunde später wird in dem Hohlraum ein sehr tiefer Unterdruckimpuls erzeugt, der in eine Resonanzschwingung übergeht (Position 2). Dieses Verhalten kann man folgendermaßen verstehen: Fixiert man einen gedachten Punkt auf der Lauffläche eines abrollenden Reifens, dann hat dieser Punkt im Einlaufbereich ständig eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Fahrbahn nach unten. Während der Punkt in die Aufstandsfläche einläuft, geht im Fall des ungestörten Abrollvorgangs diese Geschwindigkeitskomponente stetig auf den Wert Null zurück.

Nun wird der Lauffläche ein Hindernis in den Weg geschoben: die Schwellenkante, die etwa 2,3 mm über der Aufstandsfläche liegt. Die Lauffläche trifft die Schwellenkante also in endlicher Höhe über der Fahrbahn und hat auch noch eine endliche Abwärtskomponente der Geschwindigkeit, die beim Aufschlag abrupt auf Null gebremst werden muß. Anders betrachtet erfährt die Lauffläche im Aufschlagpunkt eine große, ins Reifeninnere gerichtete Beschleunigung, die sich der umgebenden Luft mitteilt in Form eines Unterdruckpulses. Die Information über dieses Ereignis breitet sich dann mit Schallgeschwindigkeit aus.

In der Zwischenzeit treffen andere Punkte des Laufstreifens auf die Schwellenkante auf; es wird durch die Schwelle ein an den Seiten offener Kanal zwischen Reifen und Fahrbahn gebildet. Die Geschwindigkeit, mit der die Länge dieses Kanals wächst, hängt von der Form der Aufstandsfläche ab und ist eine Zeitlang größer als die Schallgeschwindigkeit.

In dem so gebildeten Kanal regt der Unterdruckpuls eine  $\lambda/2$  Resonanz an. Die gemessene Resonanzfrequenz entspricht einer Schall-Wellenlänge von etwa der doppelten Reifenbreite.

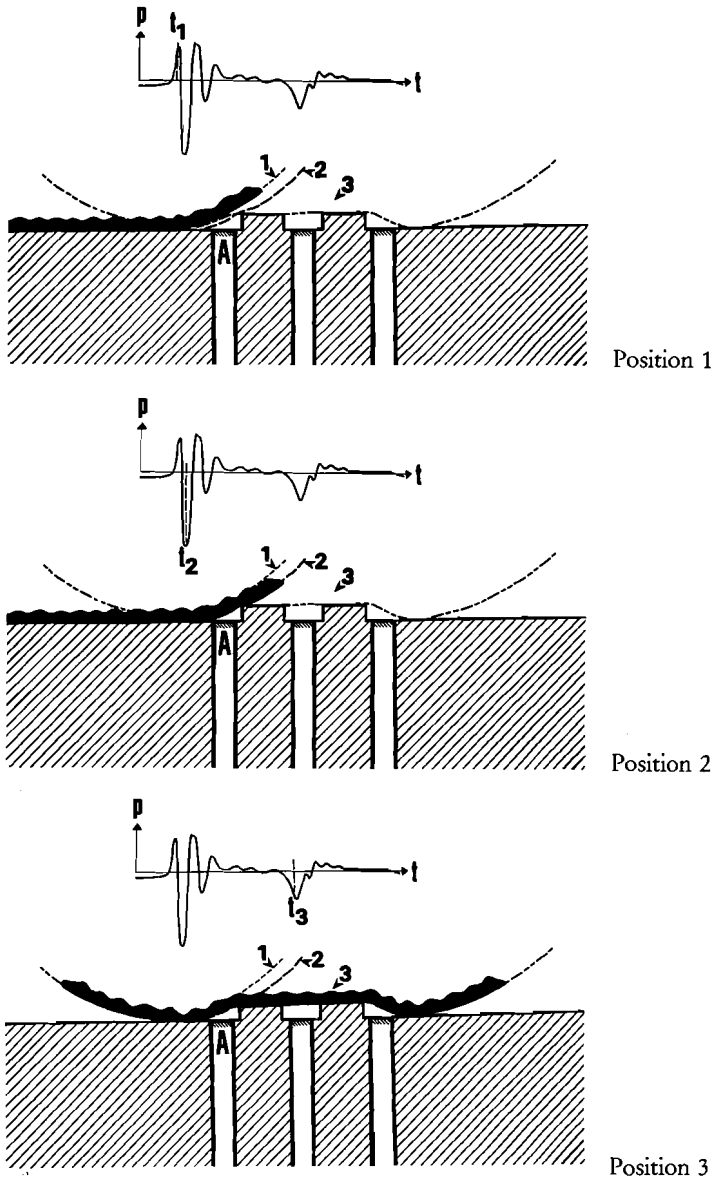


Abb. 6. Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Reifenposition und Drucksignal am Beispiel des Mikrophons A: Reifen in Position 1; Reifen in Position 2; Reifen in Position 3

Hebt dann der Reifen in Position 3 wieder vom Boden ab, vergrößert sich zunächst der Kanalquerschnitt, was die breite Unterdruckspitze zur Folge hat und öffnet sich dann nach hinten, wobei eine Helmholtz-Resonanz angeregt wird.

Dieses Modell läßt sich im wesentlichen auch auf die Druckverläufe übertragen, die man zwischen und hinter den Schwellen mißt.

### 3.3.2. Störung durch eine Querrille in der Lauffläche

Störungen des stationären Abrollens werden nicht nur durch Fahrbahnebenenheiten erzeugt, sondern auch durch die Profilierung der Lauffläche. Als einfaches Profilelement untersuchten wir eine einzelne Querrille, die in die Lauffläche eines glatten Reifens eingeschnitten war. Aus Überfahrtsdruckmessungen ist bekannt, daß ganz ähnliche Druckverläufe wie beim Überrollen einer Schwelle durch einen glatten Reifen erzeugt werden, wenn die Rille durch die Aufstandsfläche rollt.

Auch hat der Vorgang prinzipielle Ähnlichkeit mit dem in 3.3.1. diskutierten Prozeß: Läuft die Rille in die Aufstandsfläche ein, bildet sie einen Kanal, der nach beiden Seiten geöffnet ist. Der Querschnitt dieses Kanals wird in der Aufstandsfläche deutlich sichtbar verformt; im Einlauf wird er zunächst verengt, im Auslauf, kurz bevor die Rille wieder vom Boden abhebt, dann stark aufgeweitet. Die Filmaufnahmen zeigen – wie bereits bei dem Serienreifen – daß diese Verformung kaum einen sichtbaren Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeit in der Rille nimmt, wie es die Air-Pumping-Theorie erwarten ließe. Auf der anderen Seite haben akustische Untersuchungen gezeigt, daß die bei den Überfahrtsdruckmessungen im Nahfeld nur schwach erkennbare Helmholtz-Resonanz beim Öffnen der Rille im Auslauf zu einer extremen Schallabstrahlung führt, die in vielen Fällen alle übrigen Schallerzeugungsprozesse weit übertrifft. Insbesondere wird hier deutlich, daß nicht allein die Entstehung von Wechseldrücken das Schallfeld in größerer Entfernung (im sog. Fernfeld) bestimmt, sondern in gleichem Maße die Abstrahlcharakteristik des Reifens und seiner Umgebung (physikalisch gefaßt unter dem Begriff Schallübertragungsfunktion) mit eingeht (SCHAAF u. RONNEBERGER [4]).

Der Unterdruckimpuls beim Einlauf der Rille entsteht auf andere Weise als beim Überrollen einer Schwelle: Betrachtet man die Aufstandsfläche, während die Rille einläuft, so stellt man fest, daß ihre Front sich nicht gleichförmig mit Rollgeschwindigkeit fortbewegt, sondern einen Moment lang an der Rille „hängenzubleiben“ scheint.

Die Rille stellt eine Schwachstelle im Gummi der Lauffläche dar. Der Reifen ist daher in ihrem Bereich ein wenig stärker nach außen gewölbt, als hätte man einen dünnen Wulst über die Lauffläche gelegt, in dessen Mitte die Rille liegt. Läuft die Rille in die Aufstandsfläche ein, verstärken die besonders starken Biegekräfte, die hier wirken, noch die Tendenz zur Ausstülpung. Dieser Wulst muß im Einlauf ins Reifeninnere gedrückt werden. Indiz dafür ist, daß sich in diesem Moment der Rollwiderstand merklich erhöht.

Dadurch wird die Front der Aufstandsfläche abgebremst bzw. die Lauffläche ins Reifeninnere beschleunigt. Diese Abbremsung teilt sich dem umgebenden Medium mit und führt im Einlauf der Rille zu ganz ähnlichen Druckverläufen, wie das Auftreffen auf eine Schwelle. In Druckuntersuchungen hat sich auch hier ein Überwiegen von Unterdruckamplituden gezeigt, die auf eine instationäre Abbremsung der Reifenoberfläche hinweisen.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, daß die Begriffe Air-Pumping oder Reifenschwingung die schallerzeugenden Prozesse nicht detailliert genug beschreiben, selbst wenn man nur idealisierte Straßenunebenheiten oder Profilelemente behandelt. Im Einlauf in die Kontaktzone wird die Schallerzeugung bestimmt durch ungleichmäßige Abbremsungen der Reifenoberfläche; im Auslauf dagegen mehr durch die plötzliche Vergrößerung von Hohlräumen.

#### Wortlaut des gesprochenen Kommentars

Das Reifenrollgeräusch wird im zunehmenden Maße zur wichtigsten Verkehrslärmkomponente, da die Antriebsgeräusche der Kraftfahrzeuge immer wirksamer bekämpft werden.

Der Reifenlärm entsteht hauptsächlich am Rand der Kontaktfläche zwischen Reifen und Straße. Während ein ideal glatter Reifen auf glatter Fahrbahn praktisch geräuschlos abrollt, erzeugen Abweichungen von diesem stationären Rollvorgang Schall.

Ganz allgemein sind Ungleichmäßigkeiten bei der Luftverdrängung durch den rollenden Reifen die Lärmursache.

Nach der sog. Air-Pumping-Theorie entsteht der Schall hauptsächlich durch die Luftverdrängung aus Hohlräumen, z.B. in dem beim Aufsetzen des Reifens die Hohlräume im Reifenprofil zusammengedrückt und beim Abheben wieder aufgeweitet werden.

Nach einer anderen Theorie entsteht der Lärm besonders durch Schwingungen der Reifenoberfläche, z.B. beim Auftreffen auf ein Hindernis oder beim Ausschlagen von Profilklötzen. Untersuchungen sollen Aufschluß geben, welche dieser Theorien zutrifft.

Beobachten wir einmal die Reifenkontaktfläche beim Abrollen auf der Fahrbahn und die dabei verursachten Strömungen. In einem Modellversuch wählen wir als Strömungsmedium Wasser. Im Wasser lassen sich die Strömungen mit Hilfe von Schwebeteilchen problemloser als in Luft sichtbar machen. Wir beobachten den Rollvorgang durch eine im Boden des Versuchskanals eingelassene Glasscheibe und einen darunter aufgestellten Spiegel.

Um mit angemessenem technischen Aufwand eine ausreichende zeitliche Auflösung zu erhalten, wird die Untersuchung bei kleinen Rollgeschwindigkeiten durchgeführt. Es sind hier ungefähr  $\frac{1}{2}$  m/s. Dies entspricht unter gewissen Einschränkungen 30 km/h in Luft.

Ein Serienreifen rollt über die Glasscheibe. Man sieht, wie das Profil in der Kontaktfläche zusammenschrumpft. Mit 17facher Zeitdehnung werden Einzelheiten deutlich. Zum Vermessen der Aufstandsfläche ist ein Maßstab an der Radführung befestigt. Jetzt kommt er ins Bild. In den seitlichen Querrillen zeigen die Teilchen starke instationäre Strömungen an. Vor der Kontaktfläche werden schnelle Auswärtsströmungen in Gang gesetzt, die plötzlich stoppen, wenn die Querrillen auf die Fahrbahn aufsetzen. Hinter der Kontaktfläche wird beim Abheben des Reifens das Strömungsmedium in die Rillen eingesaugt. Es geht deutlich langsamer. Nach der Air-Pumping-Theorie erwartet man jedoch, daß der Pumpprozeß im Ein- und Auslauf gleichschnell verläuft.

Im folgenden Experiment wird gezeigt, daß diese Strömungssymmetrie zwischen dem Aufsetzen und dem Abheben des Reifens nicht durch die Pumpbewegung des Profils

erzeugt wird; sie ist bereits bei einem glatten Reifen, der stationär umströmt wird, vorhanden.

Der für diesen Versuch speziell angefertigte profillose Reifen hat den gleichen inneren Aufbau wie ein Serienreifen; Unebenheiten auf der Lauffläche wurden abgeschliffen. Unmittelbar vor dem rollenden Reifen strömt das Medium mit hoher Geschwindigkeit zur Seite. An den Ecken der Kontaktfläche reißt die Strömung ab und folgt nicht der seitlichen Reifenkontur. Deshalb kann hinter der Kontaktfläche das Medium nicht mehr von der Seite her eingesaugt werden.

Ein Beobachter, der sich mit der Reifen-Aufstandsfläche mitbewegt, sieht die Umströmung der Aufstandsfläche wie die Umströmung eines festen Hindernisses. Vor der Aufstandsfläche bildet sich zwischen Reifen und Fahrbahn ein keilförmiger Zwischenraum. Das in diesen Raum einströmende Medium muß wegen der keilförmigen Verengung frühzeitig zur Seite ausweichen. Dabei werden Geschwindigkeiten erreicht, die doppelt so groß sind wie die Anströmungsgeschwindigkeit. Beim seitlichen Ausstoß aus dem keilförmigen Zwischenraum reißt die Strömung ab und folgt nicht mehr der seitlichen Reifenkontur. Die dabei entstehende Verwirbelung setzt sich bis ins Totwasser hinter der Aufstandsfläche fort.

Nun wird die Umströmung der Kontaktfläche durch eine Fahrbahnebenheit gestört. Dazu sind zwei zusammenhängende Schwellen auf der Fahrbahn aufgeklebt. Die Teilchen in der Rille zwischen den Schwellen werden wie bei der glatten Fahrbahn zur Seite gedrängt und abrupt gestoppt, wenn der Reifen den Raum zwischen den Schwellen abschließt. Der Einsaugprozeß beim Abheben des Reifens ist wieder deutlich langsamer.

Besonders stark ausgeprägt ist die Beschleunigung der seitlichen Strömung und ihre plötzliche Abbremsung vor der ersten und hinter der letzten Schwellenkante. An diesen Stellen wird der gleichmäßige Rollvorgang stark gestört.

Der genaue Ablauf dieser Störungen wird anhand von Druckmessungen in realen Reifenabrollversuchen geklärt. Dazu rollte ein PKW bei 80 km/h über die hier überhöht dargestellten Schwellen und eingebauten Mikrophone A, B, C. Beim Überrollen werden durch die Mikrophone diese zeitlichen Luftdruckverläufe registriert. An der vom Mikrophon A aufgenommenen Druckkurve interessieren besonders drei charakteristische Ereignisse. In Position 1 ist der Reifen nur noch wenige Millimeter von der Kante der ersten Schwelle entfernt. Der Luftstau vor der Schwelle führt zu diesem Zeitpunkt  $t_1$  zu einer Überdruckspitze und entsprechend starker seitlicher Strömungsbeschleunigung vor der Schwelle.

Kaum eine Millisekunde später schlägt bei Position 2 bzw. im Zeitpunkt  $t_2$  die Reifenoberfläche auf die Schwellenkante auf. Die resultierende Einwärtsbeschleunigung der Reifenoberfläche verursacht eine tiefe Unterdruckspitze. Dadurch wird in dem keilförmigen Hohlraum zwischen Reifen und Fahrbahn die eingeschlossene Luft in Schwingungen versetzt.

In Position 3 hebt der Reifen vom Boden vor der Schwelle ab. Kurz davor weitet sich der Querschnitt des keilförmigen Hohlraums. Beim Öffnen des Hohlraums wirkt der resultierende Unterdruck eine sog. Helmholtz-Resonanz an. Diese Resonanzschwingung ist hier nur schwach zu erkennen.

In allen 3 Positionen sind die großen Luftdruckschwankungen durch den nichtstationären

Rollvorgang verursacht. Das beweist der Druckverlauf bei glatter Fahrbahn und glattem Reifen. Er wird nur noch durch den geringen Staudruck der stationären Strömung bestimmt.

Die Druckverläufe an den Mikrofonen B und C lassen sich ähnlich erklären. Am Mikrophon B sind die Druckschwankungen wesentlich kleiner, denn der Rollvorgang wird durch die Vertiefung zwischen den Schwellen weniger gestört als durch die Stufen am Anfang und Ende der Doppelschwelle.

Für das Aufsetzen des Reifens gilt also folgendes: Die Unterdruckspitze beim Abbremsen der Lauffläche ist größer als der Überdruck durch die Luftverdrängung. Also hat der Air-Pumping-Effekt beim Aufsetzen nur zweitrangige Bedeutung. Beim Abheben des Reifens dagegen ist der Unterdruck ein reiner Air-Pumping-Effekt.

Ähnliche Strömungen und Druckverläufe wie in der Rille zwischen den Schwellen treten auch in einer in den Reifen geschnittenen Querrille auf. Es kommt jedoch ein weiterer Störfaktor hinzu. Die Rille wird beim Durchlauf durch die Kontaktfläche verformt. Der Rillenquerschnitt verengt sich beim Aufsetzen und weitet sich beim Abheben des Reifens. Die allmähliche Aufweitung der Rille beim Auslauf aus der Kontaktfläche bewirkt nur eine geringe seitliche Verschiebung der Schwebeteilchen.

Ein zusätzlicher Prozeß beim Aufsetzen des Reifens ist ein Verharren der Kontaktfläche an der Rille. Die Lauffläche im Rillenbereich ist nämlich etwas stärker nach außen gewölbt und muß beim Aufsetzen der Rille erst wieder eingedrückt werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß schon bei idealisierten Straßenunebenheiten und Reifenprofilen die schallerzeugenden Prozesse durch pauschale Theorien wie Air-Pumping und Reifenschwingungen nur ungenau beschrieben werden.

Beim Einlauf in die Kontaktzone führen unterschiedliche Ursachen zur ungleichmäßigen Abbremsung der Reifenoberfläche. Eine eindeutige Zuordnung zu einer der beiden Theorien ist nicht möglich. Nur der Überdruckstoß vor dem Aufsetzen kann als Air-Pumping bezeichnet werden.

Beim Abheben des Reifens wird entsprechend der Air-Pumping-Theorie das Nahfeld weitgehend durch plötzliche Vergrößerungen der Hohlräume bestimmt.

Wenn man die Mechanismen der Schallabstrahlung einbezieht, kann man aus dem hier untersuchten Nahfeld auf das resultierende Fernfeld schließen.

#### Literatur

- [1] Panel Discussion: How is Tire Noise Generated. Proc. Int. Tire Noise Conf., p. 143-152; Stockholm 1979.
- [2] RONNEBERGER, D., K. SCHAAF und K. RICHTER: Messung der Strömungs- und Druckverteilung im Bereich der Aufstandsfläche rollender Reifen. Techn. Ber. Drittes Phys. Inst., Univ. Göttingen, 1982.
- [3] RONNEBERGER, D., K. SCHAAF und K. RICHTER: The Role of Unsteady Airflow in Tire Noise Generation, Fortschritte der Akustik - FASE/DAGA '82; Göttingen 1982.
- [4] SCHAAF, K., und D. RONNEBERGER: Noise radiation from rolling tires - sound amplification by the "horn-effect", Proceedings Inter-noise 82, San Francisco 1982.

#### Abbildungsnachweis

Abb. 1 u. 4: Aus RONNEBERGER, SCHAAF u. RICHTER [2]; Abb. 2, 3, 5 u. 6: P. NEUWALD.