

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 81 (1963)  
**Heft:** 34

**Artikel:** Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne  
**Autor:** Zeller, J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-66860>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne

DK 627.157.001

Von J. Zeller, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau (VAWE) an der ETH, Zürich

### I. Elemente des Sedimenttransports

#### 1. Einleitung

Die nachfolgende Arbeit hat zum Ziel, eine kurze Einführung in das Problem des Feststofftransports in fliessendem Wasser zu vermitteln. Da schon seit über 80 Jahren an diesem Problem gearbeitet wird — ohne dass wir sagen könnten, dass es heute gelöst wäre — liegt eine ausserordentlich umfangreiche Literatur vor. Es fällt deshalb nicht leicht, auf kleinem Raum einen Ueberblick über die gegenwärtige Situation zu vermitteln. Auch ist es kaum möglich, auf Details oder auf einzelne Untersuchungen näher einzugehen. Es ist uns aber dennoch ein Anliegen, eine «Standortbestimmung» vorzunehmen, da seit einiger Zeit diesen Problemen an der VAWE wieder vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden kann, und in den nächsten Jahren, wie wir hoffen, von Zeit zu Zeit Untersuchungsresultate veröffentlicht werden können.

Gehen wir nun über zum eigentlichen Problem der «Geschiebeführung» oder, wie wir es in Zukunft allgemeiner benennen wollen, *des Sedimenttransports*. Es handelt sich hierbei um ein Phänomen, das durch die gegenseitige Einwirkung fliessenden Wassers und einzelner Feststoffpartikel entsteht, die sich als Folge der Wasserströmung fortbewegen oder in Bewegung versetzt werden. Die Forschung auf diesem Gebiet entwickelte sich vorwiegend aus dem Wunsche, Erosion, Transport und Ablagerung von Sedimenten insbesondere in Bächen und Flüssen zu regeln. Dort ist wohl auch der grösste wirtschaftliche Nutzen der Forschungsarbeit zu suchen<sup>1)</sup>.

Bevor wir uns mit den Untersuchungsergebnissen des Sedimenttransports abgeben, wollen wir vorerst einige Grundbegriffe erläutern und die für den Sedimenttransport massgebenden Eigenschaften der Sedimente kennen lernen.

Der Sedimenttransport wird durch die verschiedensten äusseren Umstände beeinflusst. So spielen bei Gewässern Topographie, Geologie, Abflussregime usw. eine wesentliche Rolle. Die Vielfalt der Einzeleinflüsse ist fast unerschöpflich.

Betrachtet man den Vorgang des Sedimenttransports näher, so kann man im allgemeinen feststellen, dass normalerweise der grobkörnigere Teil der Sedimente sich vorwiegend entlang der Gerinnesohle bewegt und der feinkörnigere, falls vorhanden, meist hochgewirbelt wird und sich in Form einer mehr oder weniger ausgeprägten Suspension talwärts bewegt. Es lassen sich derart (stark vereinfacht) zwei Haupttransportarten unterscheiden, die eine, die «Geschiebeführung», welche in nächster Umgebung der Gerinnesohle stattfindet und die andere, der Transport als «Suspension», d. h. die «Schwebstoffführung». Diese beiden Transportarten treten normalerweise gleichzeitig auf, wobei es allerdings bis heute nicht gelungen ist, eine scharfe Abgrenzung zwischen diesen zwei Transportarten zu ziehen.

Wie erwähnt, ist in einem Gerinne einer gegebenen Wasserführung eine entsprechende, transportierte Sedimentmenge zugeordnet. Finden weder Erosion (Abtrag) noch Ablagerung (Ablagerung) in der Gerinnesohle statt, so befindet sich der Transportvorgang im Gleichgewicht und die transportierte Sedimentmenge entspricht dem Transportvermö-

gen (Transportkapazität) des Flusses<sup>2)</sup>. Dieser Fall wurde bis heute im Laboratorium und in der Natur am häufigsten untersucht. Auch fand man, dass Bettform und Strömungseigenschaften voneinander abhängen. Treten z. B. aus irgendwelchen Gründen lokale Änderungen in der transportierten Geschiebemenge auf, so wird dies unfehlbar eine entsprechende «lokale» Änderung im Gerinnebett zur Folge haben, d. h. einer Vergrösserung des Geschiebetransportvermögens sind Kolke und Erosionen und einer entsprechenden Verkleinerung sind Auflandungen zugeordnet.

So plausibel und einfach diese Feststellungen auch sind, so schwierig ist es, sie praktisch anzuwenden. Will man konkrete Aussagen machen, so muss die gegenseitige Wechselwirkung zwischen der transportierten Sedimentmenge und den Strömungseigenschaften bzw. -vorgängen des zu untersuchenden Gerinnes bekannt sein. In den meisten Fällen trifft dies jedoch nicht zu, so dass auf experimentellem Wege diese Grössen bzw. Funktionen aufgesucht werden müssen.

#### 2. Der Mechanismus des Sedimenttransports

Obwohl der Transportmechanismus nicht kompliziert ist und generell als bekannt vorausgesetzt werden darf, wollen wir uns dennoch in Einzelheiten vertiefen, die später für das Verständnis von Bedeutung sein werden.

Zur Beschreibung des Transportvorganges nehmen wir im folgenden an, dass:

- in einer bewegten Flüssigkeit einzelne Sedimentpartikel verteilt sind, deren spezifisches Gewicht  $\gamma_s$  grösser ist als dasjenige der Flüssigkeit
- diese Partikel die Gerinnesohle bilden
- Kräfte auf die Partikel wirken, die z. T. durch die Strömung hervorgerufen werden.

#### Die Kräfte

Durch die mehr oder minder aus der Sohle hervorragenden Geschiebekörper wird die Strömung nach oben und der Seite umgelenkt und es bilden sich auf der Unterwasserseite «Walzen» und Wirbel, deren Grösse von der Lage der Lösung der lokalen Grenzschicht<sup>3)</sup> am Einzelkorn abhängt. Diese ist wiederum ihrerseits eine Funktion der Kornform, der Kornbeschaffenheit und der lokalen Reynolds-Zahl. Die derart auf das Einzelkorn wirksamen Kräfte können in eine Schub- oder Schleppkraft  $S$  (in Strömungsrichtung wirkend) und eine «Auftriebskraft»  $A$  (senkrecht zur Strömungsrichtung wirkend) aufgeteilt werden. Die Schleppkraft setzt sich aus dem Formwiderstand des Kornes und dem Reibungswiderstand an der Kornoberfläche zusammen. (Der Kraftangriffspunkt liegt nicht im Schwerpunkt des Kornes). Die «Auftriebskraft» ist die resultierende Kraft der auf die Unter- und Oberseite des Kornes wirkenden Drücke. Auf der Unterseite wird der Druck normalerweise als hydrostatisch<sup>4)</sup> angenommen, da praktisch keine Strömung vorhanden ist, wohingegen auf der Oberseite der

<sup>2)</sup> Es ist hervorzuheben, dass in diesem Aufsatze nur der Fall eines Gerinnes in eigener Alluvion besprochen wird, d. h. die transportierten Sedimente sind geotechnisch und «hydraulisch» mit denjenigen der Gerinnesohle und -böschung identisch.

<sup>3)</sup> Erläuterung der Bedeutung der Grenzschicht siehe unter 4. Hydraulische Grundelemente.

<sup>4)</sup> Diese vereinfachende Annahme ist nach neuesten Untersuchungen nicht mehr korrekt. Druckmessungen haben ergeben, dass sich «Druckstöße» (Pulsationen) in den Porenraum der Gerinnesohle fortpflanzen.

Druck kleiner ist als der hydrostatische, wegen der stark gekrümmten «Stromlinien» (örtliche Beschleunigung). Ueberlagert man dieser Strömung noch die Turbulenzerscheinungen, um den tatsächlichen Verhältnissen nahezukommen, so ändert demnach die Auftriebs- und Schleppkraft in Grösse und Richtung mit der Zeit.

Der Widerstand, der gegen die Bewegung des Einzelkornes wirkt, ist die Folge des Eigengewichtes (unter Wasser) und anderer irgendwie nach unten wirkender Kräfte, welche u. a. durch den Kontakt mit benachbarten Partikeln entstehen. Das Gewicht des Kornes unter Wasser hängt ab von dessen Volumen und Dichte, welche in natürlichen Sedimenten («Geschieben») in einem weiten Bereich variieren können. Hinzu kommt die Ausgesetztheit des Kornes gegenüber der Strömung, welche von der relativen Lage des Kornes zu den anderen abhängt. Sie variiert zwischen vollständiger Ausgesetztheit und vollständiger Geschütztheit durch die Nachbarkörner. Unter Einbeziehung der Strömungscharakteristiken sind infolgedessen die Kraftsysteme, die die Bewegung des Kornes hervorrufen, komplexe Funktionen von Zeit, Raum und den geometrischen und geotechnischen Eigenschaften der Sedimente.

#### Die Bewegungen

Wenn das aktive Moment aus Schleppkraft und Auftrieb bezüglich dem Momentanzentrum der Drehbewegung (Berührungs punkt mit Nachbarkorn) grösser ist als dasjenige aus Eigengewicht (unter Wasser) und anderer passiver Kräfte, so wird das Korn zu rollen beginnen, zu irgend einem anderen stromabwärts liegenden Punkt, wo die Kombination dieser Kräfte, einschliesslich des eigenen Impulses derart ist, dass das Korn wieder einen stabilen Zustand erreicht. Werden die Auftriebskräfte nunmehr aus irgend einem Grunde grösser als das Kornsgewicht (unter Wasser), so wird das Korn von der Sohle abgehoben und nach oben getragen. Die Schleppkraft trägt es zudem stromabwärts. Sobald das Korn die Gerinnesohle verlassen und einen genügenden Sohlenabstand erreicht hat, werden die Strömungsvorgänge um das Korn auf dessen «Ober- und Unterseite» gleichartig, wodurch sie im Hinblick auf den hydrodynamischen Auftrieb die Tendenz haben, sich gegenseitig aufzuheben. Die Gesamtauftriebskraft nimmt hiernach ab und das Korn fällt zurück auf die Gerinnesohle. Die Kombination dieser vertikalen und horizontalen Bewegungen ergibt eine solche stromabwärts bis zu einem Punkt, wo das Korn angehalten und hierauf wieder von neuem weitertransportiert wird.

Wird das Korn während des Hochhebens ins turbulente Strömungsfeld hineingetragen, so können die Geschwindigkeitsänderungen von derartiger Grösse und Richtung sein, dass das Korn weiter aufwärts transportiert wird. Seine Bewegungen hängen nurmehr ab von den Turbulenzeigenschaften der Strömung und der Turbulenzintensität im Verhältnis zum Gewicht und zur Grösse des Kornes.

Tatsächlich findet man in der Natur eine Kombination dieser Bewegungsarten, so dass alle möglichen Variationen zwischen absoluter Ruhe bis zur nahezu ständigen Schwreibung des Kornes auftreten. Man kann folgende Bewegungsarten unterscheiden (Gilbert 1914, [1]<sup>5</sup>): Rollen, Gleiten, Hüpfen, Schweben (Suspendieren).

Bis anhin wurde nur die Bewegung eines Einzelkornes betrachtet. In Natur finden die beschriebenen Phänomene entlang der gesamten Gerinnesohle statt, so dass eine grosse Menge Körner zur gleichen Zeit die verschiedensten Bewegungen vollführen. Diese Körner beeinflussen sich dadurch gegenseitig. Man versucht deshalb, nicht mehr nur vom Einzelkorn ausgehend, die Sedimentbewegung zu betrachten, sondern den Sedimenttransport z. B. als einen Spezialfall der Zweiphasenströmung<sup>6</sup>) zu betrachten. Eine weitere Möglichkeit, die vor allem mehr Einblick in das Problem der Sohlenform und deren laufender Umgestaltung vermittelt, ist die Betrachtung des Phänomens nach den Grundsätzen der

<sup>5</sup>) Die Zahlen in eckiger Klammer verweisen auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

<sup>6</sup>) Strömung eines Mediums, das aus zwei verschiedenen Stoffen aufgebaut ist, so dass ein «Stoffgemisch» entsteht, das nunmehr als «quasi homogene Flüssigkeit» betrachtet werden kann.

Schichtströmung<sup>7</sup>), wobei die Gerinnesohle als ein «flexibles Medium» angesehen werden kann.

#### Formen der Gerinnesohle

Als eine Folge der Gruppenwirkung der Körner in ihrer gegenseitigen Beeinflussung und deren Einwirkung auf die Strömung ist die Wellen- und Bankbildung in einer Gerinnesohle zu betrachten. Wir wollen auf diese Erscheinungen nicht weiter eingehen und nur noch die verschiedenen bis heute bekannten «Sohlenwellenformen» kurz beschreiben<sup>8)</sup>.

Ist z. B. die ursprüngliche Gerinnesohle eben und die Strömung von geringer Geschwindigkeit, aber derart, dass die Körner des Sohlenmaterials verschiedenster Durchmesser sich gerade noch bewegen (Sandmaterial vorausgesetzt), so wird eine Reihe schmaler, unregelmässiger Riffel entstehen. Steigert man die Geschwindigkeit, so nehmen die Riffel an Grösse zu und erhalten ihre charakteristische Form, deren ausgeprägteste Dünne genannt wird. Diese Dünen wandern langsam talwärts und weisen konstante Randbedingungen vorausgesetzt, einheitliche Form auf. Bei einer weiteren Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit wird der Sedimenttransport wesentlich intensiver, die Sohlenwellen gewinnen an Höhe und Ausdehnung und tendieren zu einer in Längsrichtung symmetrischen Form. Bei weiterer Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit wird ein Zustand erreicht, bei dem die Sohlenwellen vollständig verschwinden und die Sohle ganz eben ist. Der Sedimenttransport ist dann sehr intensiv. Bei einer nochmaligen Erhöhung der Geschwindigkeit bilden sich abermals grosse Sohlenwellen aus, die scheinbar die Tendenz zeigen, stromaufwärts zu wandern, sog. Antidünen. Eine weitere Geschwindigkeitssteigerung würde zu einem vollständigen Zusammenbruch der Gerinnesohle führen.

In der Natur sind diese Sohlenwellen infolge von Querschnittsänderungen usw. häufig verformt, so dass sie oftmals kaum mehr als solche erkannt werden können. Ausgeprägte dreidimensionale Wellen (Kiesbänke) sind z. B. im kanalisierten Rhein oberhalb des Bodensees oder in der Thur zwischen Frauenfeld und der Einmündung in den Rhein vorhanden. Durch die Sohlenwellen werden die hydraulischen Vorgänge außerordentlich kompliziert, so dass unsere eingangs erwähnten Kraftsysteme, die im Bereich des Flussbettes sind, kaum mehr überblickt werden können.

### 3. Für den Sedimenttransport massgebende Eigenschaften der Sedimente

Es sind folgende Materialarten zu unterscheiden:

- nicht kohärente Sedimente
- kohärente Sedimente

Zu den nicht kohärenten Sedimenten zählt man sämtliche Materialien, deren Partikel keinen festen Verband untereinander haben und deren Fortbewegung nur abhängt von Grösse, Form, spez. Gewicht und Lage der Partikel zueinander. Sand und Kies fallen unter diese Kategorie.

Kohärente Materialien hingegen sind solche, deren Widerstand gegen Erosion weitgehend von den Kohäsionskräften zwischen den einzelnen Partikeln selbst abhängt. Hierzu können gezählt werden die Tone und Tongemische, dann aber auch, wenigstens näherungsweise Beton, Festgestein oder auch mit einer Grasnarbe überdeckte Gerinnesohlen usw. Sobald kohärentes Material aus seinem Verband herausgelöst wird, verhält es sich beim eigentlichen Transport ähnlich wie ein nicht kohärentes Material.

In dieser Arbeit befassen wir uns ausschliesslich mit den nichtkohärenten Sedimenten<sup>9)</sup>. Dies ist um so mehr gerechtfertigt, als diese Sedimentenkategorie in unserem Lande überwiegt.

<sup>7</sup>) Strömung verschiedener Flüssigkeiten, die übereinander «geschichtet» sind, ohne sich aber zu durchmischen.

<sup>8</sup>) In der Fachliteratur ist dieser Ausdruck häufig anzutreffen («sediment waves», «bed waves»). Er ist auf die Analogie zurückzuführen, die gewisse Sedimentwellen mit den «Wasserwellen» des breiten Gerinnes aufweisen.

<sup>9</sup>) Es ist vorgesehen, in einer speziellen Arbeit die kohärenten Materialien dem Leser vorzuführen. Da diese Kategorie von Sedimenten noch sehr wenig erforscht ist, gehört ihr die besondere Aufmerksamkeit der VAWE.

Charakterisiert werden diese Sedimente durch Korn-durchmesser, Form, spez. Gewicht sowie bei Korngemischen durch die Kornverteilung. Oft bezieht man auch die Absetzeigenschaften (Sinkgeschwindigkeit) mit ein, so dass wenigstens eine teilweise Verbindung der Sedimentklassifikation mit hydraulischen Größen möglich wird. Bei sehr feinkörnigen Sedimenten ist die Tendenz zur Flockenbildung speziell zu berücksichtigen.

#### Korndurchmesser

Wegen der unregelmässigen Form natürlicher Körner bereitet die Definition des massgebenden Korndurchmessers Schwierigkeiten. Man kam deshalb überein, folgende Durchmesserarten zu definieren:

- Sieb-Korndurchmesser, erhalten durch Aussieben, wohl die gebräuchlichste Methode, speziell für Grobmateriale
- Sedimentations-Durchmesser, d. h. der Durchmesser einer virtuellen Kugel mit gleichem spez. Gewicht und gleicher Sinkgeschwindigkeit wie der tatsächliche Körper, vorwiegend für Feinmaterial.
- Nenn-Durchmesser, d. h. der Durchmesser einer virtuellen Kugel mit gleichem Volumen wie das Einzelkorn.

Zur Beschreibung des Korngemisches dient die Kornverteilungskurve, wobei zu deren Charakterisierung oft der mittlere Durchmesser  $d_m$  benutzt wird. Manchmal kann  $d_{65}$  oder  $d_{90}$  geeigneter erscheinen, d. h. diejenige Korngrösse, die von 65 bzw. 90 % der Gesamtheit der Körner unterschritten wird.

#### Kornform

Die Form eines jeden natürlichen Einzelkornes weist eine gewisse Kugelförmigkeit und einen Rundungsgrad auf.

$$\begin{aligned} \text{Kugelförmigkeit} &= \frac{\text{Kugeloberfläche der virtuellen Kugel mit gleichem Volumen}}{\text{tatsächliche Oberfläche}} \\ \text{Rundungsgrad} &= \frac{\text{Mittlerer Krümmungsradius einer »Ecke« oder »Kante«}}{\text{Radius des Umhüllungskreises im betreffenden Schnitt}} \end{aligned}$$

Viele Sande, vor allem aus Quarz oder Feldspat, haben eine relativ grosse Kugelförmigkeit, dagegen kann der Rundungsgrad (je nach Abnutzung) sehr klein sein. Da es häufig schwierig ist, Sedimente derart zu umschreiben, führt man diese Arbeit häufig nicht aus, so dass wir heute über den Einfluss der Kornform auf den Sedimenttransport recht wenig Bescheid wissen.

#### Spezifisches Gewicht

Dieses spielt eine sehr wichtige Rolle in Transportphänomenen und muss deshalb bekannt sein. Das mittlere spezifische Gewicht natürlicher Sedimente der Schweiz kann mit demjenigen von Quarz  $\gamma_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$  bzw. Kalk  $\gamma_s = 2,75 \text{ g/cm}^3$  für eine generelle Beurteilung des Sedimenttransports ausreichend charakterisiert werden. Immerhin ist es angezeigt, sich diesbezüglich zu versichern.

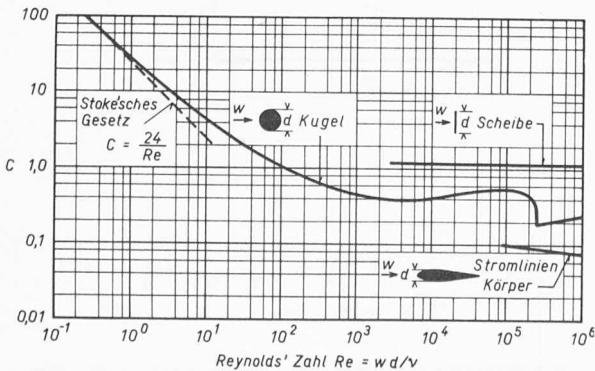


Bild 1. Koeffizient  $C$  des Strömungs- bzw. Sinkwiderstandes für Kugel, Scheibe und Stromlinienkörper nach L. Prandtl und G. J. Higgins

#### Sinkgeschwindigkeit

Sie hängt ab — abgesehen von den hydraulischen Vorgängen — einerseits von Korndurchmesser, Kornform, Oberflächenbeschaffenheit, spez. Gewicht des Kornes und anderseits von Viskosität und spez. Gewicht der Flüssigkeit. In ruhendem Wasser ist die Sinkgeschwindigkeit einer Kugel (Bild 1)

$$(1) \quad w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C} g d \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right)}$$

- $w$  = Sinkgeschwindigkeit in m/s  
 $C$  = Strömungs- bzw. Sinkwiderstandscoefficient, welcher eine Funktion der Reynolds-Zahl  $Re$  bezogen auf das Korn ist (siehe Bild 1), dimensionslos  
 $d$  = Korndurchmesser in m  
 $\gamma_s$  = spezifisches Gewicht des Kornes in  $\text{t/m}^3$   
 $\gamma_w$  = spezifisches Gewicht des Wassers in  $\text{t/m}^3$   
 $Re$  = Reynoldszahl ( $Re = w d / \nu$ ), dimensionslos  
 $\nu$  = kinematische Zähigkeit der Flüssigkeit in  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $g$  = Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$

Das Stokes'sche Gesetz über die Sinkgeschwindigkeit eines Einzelkornes in stehendem Wasser lautet:

$$(2) \quad w = \frac{1}{18} \frac{g d^2}{\nu} \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right)$$

Es ist ein Spezialfall zu Gleichung (1), wenn man berücksichtigt, dass für  $Re < 0,1$  der Widerstandscoefficient  $C = 24/Re$  wird.

Weitere Versuche, mit einzelnen Quarzkörnern durchgeführt, zeigen die in Bild 2 dargestellten Sinkgeschwindigkeiten in Funktion von Korndurchmesser, Viskosität und Dichte des Wassers (Wassertemperatur) sowie der Reynolds-Zahl.

Leider hat man es in Natur durchwegs mit Korngruppen zu tun und nicht mit Einzelkörnern. Die verschiedenen Partikel beeinflussen den Absetzvorgang gegenseitig, so dass z. B. das Stokes'sche Gesetz ganz wesentlich an Bedeutung verliert. Man fand für Quarzsand die im Diagramm Bild 3 wiedergegebenen Werte, d. h. mit zunehmender Konzentration nimmt die Sinkgeschwindigkeit ab. Handelt es sich um sehr feinkörnige Materialien wie z. B. Tone, so ist es möglich, stabile Dispersionen, Suspensionen oder umgekehrt Ausflockungen zu erhalten, was wiederum bedeutet, dass bei sehr feinkörnigen Materialien nicht nur die Korngrösse usw. eine Rolle spielt, sondern dass den chemisch-physikalischen Eigenschaften der Suspension eine ausschlaggebende Bedeutung zukommt.

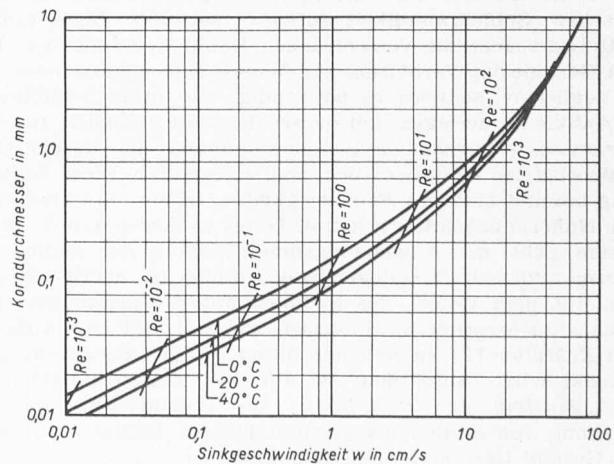


Bild 2. Sinkgeschwindigkeit von Quarzkugeln in Wasser verschiedener Temperatur. (Autor unbekannt)

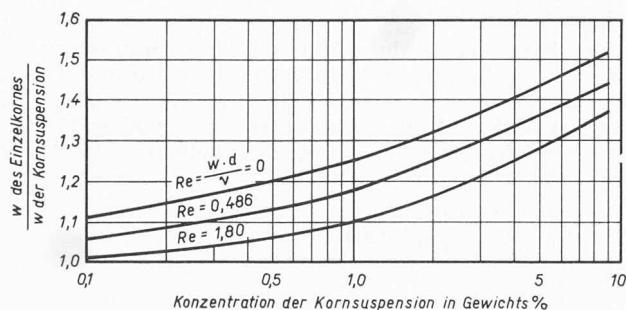


Bild 3. Einfluss der Konzentration von Kornsuspensionen auf die Sinkgeschwindigkeit nach McNoron und Liu (gültig für Quarzsand in stehendem Wasser)

#### 4. Hydraulische Elemente zum Sedimenttransport

Wie wir früher gesehen haben, hängt der Sedimenttransport zum grossen Teil von der hydraulischen «Beanspruchung» des Gerinnes ab. Diese ihrerseits ist eine Funktion von Strömung, Gerinnegeometrie und Strömungswiderstand längs des Gerinnes (Sohle und Böschungen). Es wäre deshalb notwendig, die individuelle Geschwindigkeitsverteilung im betr. Profil zu kennen. Meist ist diese aber nicht bekannt, so dass man häufig gezwungen ist, den Sedimenttransport auf die mittlere Geschwindigkeit im betr. Profil zu beziehen. Wie erwähnt, wurde bis heute der Sedimenttransport vorzugsweise für Normalabflussverhältnisse studiert, wo die Gradienten von Energielinie, Wasserspiegel und Gerinnesohle einander gleich sind, d. h.  $J_e = J_w = J_s$ .

Die mittlere Geschwindigkeit nach Strickler lautet dann

$$(3) \quad v_m = k R^{2/3} J_e^{1/2}$$

mit:

$k$  = «Rauhigkeitskoeffizient» für das Gesamtgerinne (einschliesslich Sohlen- und Wandwiderstand, Formwiderstand der Kiesbänke usw.) in  $m^{1/3} \cdot s^{-1}$ .

$$R = \text{hydr. Radius} = F/P = \frac{\text{benetzter Querschnitt}}{\text{benetzter Umfang}} \text{ in m}$$

Ein Mass für die auf die Gerinnesohle wirksamen Kräfte ist, wie früher erwähnt, die Schubkraft bzw. die pro Flächeneinheit wirkende «Schubspannung»  $\tau$ . Sie ist u. a. verantwortlich für die Auslösung und den Fortgang der Gschiebebewegung. Die mittlere Schubspannung beträgt

$$(4) \quad \tau = \frac{\gamma_w F J_e}{P} = \gamma_w R J_e$$

Bei sehr breiten Gerinnen und verhältnismässig geringer Wassertiefe, d. h. näherungsweise zweidimensionalen Strömungsvorgängen wird

$$(4a) \quad \tau \sim \gamma_w h J_e$$

Falls das Gerinne verschiedenartige Sohlenbeschaffenheit bzw. Sohlenrauhigkeit aufweist, so stellt obiges  $\tau$  den Mittelwert über die verschiedenen Rauigkeitsteile dar. Ist das Gerinne im Verhältnis zur Wassertiefe schmal oder ist es gegliedert, so wird es notwendig, die totale Schubkraft in Anteile zu zerlegen, um derart die ausschliesslich auf die Gerinnesohle wirksamen Beanspruchungen, die für den Gschiebebetrieb verantwortlich sind, zu erhalten. Diese Aufteilung bereitet etwelche Schwierigkeiten, indem man bis heute nur Näherungsmethoden kennt. Da es in dieser Arbeit nicht darum geht, die Anwendungsmöglichkeiten der Sedimenttransportformeln darzulegen, sondern über die heutige Situation auf dem Gebiet des Sedimenttransportphänomens als solches zu orientieren, verweisen wir z. B. auf den Aufsatz von R. Müller [2], in welchem diesen Fragen Beachtung geschenkt wird. Ausserdem ist auf die Untersuchungen von H. A. Einstein und R. B. Banks [3] hinzuweisen, die die Wirkung von Sohlenunebenheiten (Riffel, Bänke usw.) auf die Gesamt-Gerinnerauhigkeit prüften.

Die sehr einfache und praktische Betrachtungsweise, die Schubspannung aus Wassertiefe und mittlerer Strö-

$$\text{mungsgeschwindigkeit } \tau = \gamma_w R J_e = \gamma_w \frac{v_m^2}{k^2 R^{1/3}} \text{ zu er-}$$

rechnen, vermag aber keineswegs die tatsächlichen Vorgänge zu erfassen. Man ist deshalb heute bemüht, die Sedimenttransportphänomene mehr nach hydromechanischen und -dynamischen Gesichtspunkten zu betrachten, ein Unterfangen, das ausserordentlich schwierig ist und nur mit Hilfe von statistischen Methoden usw. einigermassen erfolgversprechend zu sein scheint. Um dem Leser einige Hinweise geben zu können, dienen die nachfolgenden etwas rudimentären Angaben über die hydraulische Seite dieses Problems.

In offenen Gerinnen ist im allgemeinen das turbulent strömende Wasser vom Gerinnett durch eine laminare Uebergangszone geringer Mächtigkeit getrennt. Die bewegten Sedimentpartikel befinden sich demnach sowohl in laminar als auch in turbulent strömendem Wasser. Unsere Betrachtungen über die Schubspannungen  $\tau$  haben sich deshalb auf diese beiden Bewegungsarten zu erstrecken. Da wir es mit *nicht idealen* Flüssigkeiten zu tun haben, werden nachfolgend vorerst die Schubspannungen im Wasser selbst und dann diese entlang den Grenzflächen (Gerinnesohle und -wand) kurz besprochen.

In der *laminaren* Strömung ist die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen ausschliesslich molekularer Natur. Diese Teilchen sind hierbei infolge der Wirkung der Viskosität gezwungen, parallele Wege zurückzulegen. Die Schubspannungen haben die Form

$$(5) \quad \tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

$\eta$  = Viskosität nach Newton

In der *turbulenten* Strömung dagegen verbleiben die Flüssigkeitsteilchen nicht in «Schichten», sondern bewegen sich kreuz und quer durch die Strömung, indem die Wegbahnen sich kreuzen, überschneiden, berühren, und derart eine Durchmischung der Flüssigkeit entsteht. Diese kleinen, «unmotivierten» Bewegungen der «Wasserballen» verursachen in jedem beliebigen Punkt eine rasche und unregelmässige Pulsation der Geschwindigkeit. Verfolgt man z. B. (zweidimensional) diese Geschwindigkeitsfluktuationen, so ergibt sich ungefähr Bild 4, wobei sich der «allgemeinen Fortbewegungsgeschwindigkeit» der Flüssigkeit die momentanen Geschwindigkeitsänderungen überlagern.

Die zeitliche Veränderung der Geschwindigkeit bzw. Abweichung vom Mittelwert ist ein Mass für die Intensität der Turbulenz, d. h. sie gibt ein Mass an für den zeitlichen Durchgang der Wirbel im betreffenden Messpunkt. Diese Turbulenzintensität (auch Turbulenzgrad genannt) ist definiert als das Quadratmittel der Momentangeschwindigkeiten. In  $x$ -Richtung ist diese Intensität  $\Delta v'_x$  z. B.:

$$(6) \quad \Delta v'_x = \sqrt{\sum \Delta v_x^2}$$

wobei  $\Delta v_x = v - v_m$

oder in relativen Grössen ausgedrückt, ist die Intensität dann

$$\frac{\Delta v'_x}{v_m}$$

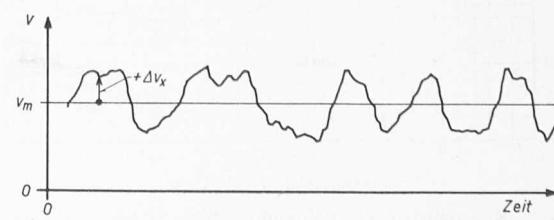
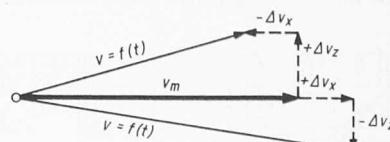


Bild 4. Geschwindigkeitsfluktuationen einer turbulenten Strömung

Da die Turbulenz durch diese chaotische Bewegung kleiner Flüssigkeitsmassen charakterisiert ist, gelingt es nicht, wie bei der laminaren Strömung die Wegbahnen auf mathematischem Wege zu beschreiben. Hingegen ist es möglich, die mittlere Bewegung der Flüssigkeitsteilchen mathematisch darzustellen oder mit statistischen Methoden zu erfassen. Auf diese Weise lässt sich die Schubspannung einer turbulenten Strömung stark vereinfacht definieren zu:

$$(7) \quad \tau = (\eta + \varepsilon) \frac{dv}{dz}$$

$\varepsilon$  = Wirbelviskosität nach Boussinesq (für rein laminare Strömung ist  $\varepsilon = 0$ )

$\eta$  = Viskosität der laminaren Bewegung nach Newton (für rein turbulente Strömung ist  $\eta = 0$ )

Dieser Ansatz wird, dank seines einfachen Aufbaues, auch heute noch verwendet, darf jedoch nur als Näherung betrachtet werden.

Die heutige Auffassung, begründet durch L. Prandtl, und später erweitert durch Th. von Kármán, geht dahin, dass

$$(8) \quad \tau = \rho K^2 \frac{[dv/dz]^4}{[dv^2/dz^2]^2}$$

$\rho$  = Dichte

$K$  = Kármán-Konstante (dimensionslos; neue Untersuchungen zeigen, dass  $K$  für turbulente Bewegungen nicht absolut konstant ist)

Auf dieser Betrachtung der im Wasser selbst vorhandenen Schubbeanspruchungen beruht die entsprechende Herleitung für feste Grenzflächen. Die Strömung entlang solcher Grenzflächen weist spezielle Eigenheiten auf. Bekannt ist die Geschwindigkeitsabnahme in Grenzflächennähe, die an der Grenzfläche selbst auf Null abfällt (Geschwindigkeitsprofil). Die Art dieser Geschwindigkeitsabnahme hängt, je nach der Strömungsart, auch von der Beschaffenheit dieser Grenzfläche ab. In Bild 5 ist dieses Verhalten schematisch dargestellt.

Bei laminarer Strömung ist die Geschwindigkeitsverteilung unabhängig von der Beschaffenheit (Rauigkeit) der Begrenzung. Die Schubspannungen entlang dieser Begrenzung sind deshalb

$$(5) \quad \tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

Bei turbulenten Strömung jedoch hat die Begrenzungsrauigkeit einen Einfluss auf die Strömungsvorgänge. Es bildet sich zwischen Grenzfläche und mit hoher Turbulenz strömendem Wasser, wie erwähnt, eine Übergangszone aus, die sog. Grenzschicht. Je nach den Strömungsvorgängen unterscheidet man laminare und turbulente Grenzschichten. Man nimmt an, dass im Falle einer turbulenten Grenzschicht noch ein laminarer Bereich geringer Mächtigkeit direkt entlang

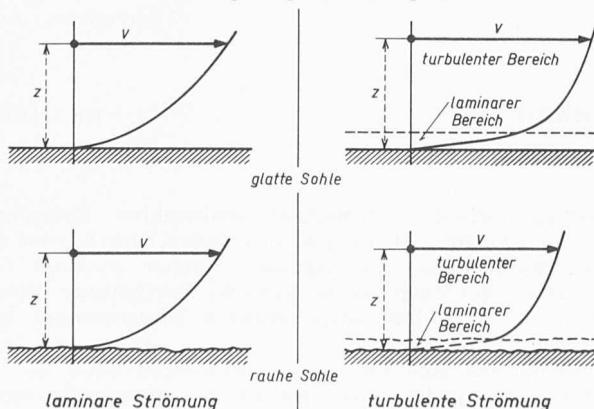


Bild 5. Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilung einer laminaren und einer turbulenten Strömung auf glatter bzw. rauher Gerinnesohle. Laminare Strömung ( $Re < 2500$ ) kein Unterschied zwischen glatt und rau. Turbulente Strömung ( $Re > 5000$ ) grosser Unterschied zwischen glatt und rau.

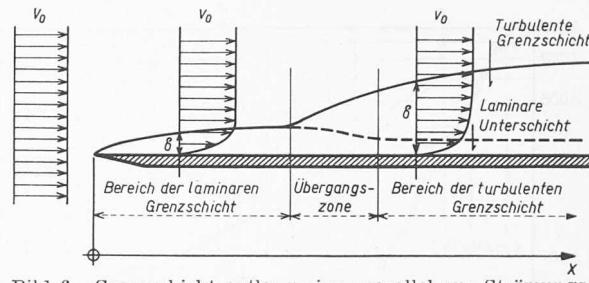


Bild 6. Grenzschicht entlang einer parallel zur Strömungsrichtung stehenden Platte nach Prandtl-Tietjens

der Begrenzung sich ausbildet, die sog. laminare Grenzunterschicht.

In Bild 6 ist die bekannte Darstellung der Ausbildung der verschiedenen Grenzschichtarten entlang einer Platte wiedergegeben. Die Grenzschicht ist laminar, wenn die Reynolds-Zahl dieser Schicht

$$Re_\delta = \frac{v_0 \delta}{\nu} < 3900$$

ist, andernfalls nimmt sie turbulenten Charakter an.

Die laminare Grenzschicht hat nach Blasius ungefähr folgende Mächtigkeit (gültig für eine in Strömungsrichtung eingetauchte Platte grosser Länge):

$$(9) \quad \frac{\delta}{x} \sim \sqrt{\frac{30}{\left(\frac{v_0 x}{\nu}\right)}} = \sqrt{\frac{30}{Re_x}}$$

wobei  $\delta$  definiert ist als diejenige Grenze, bei der die dort auftretende plattenparallele Geschwindigkeit  $v_\delta = 0,99 v_0$  beträgt<sup>10)</sup>. Die längs der Platte wirksamen Schubspannungen betragen mit Gl. (8) als Grundlage (nach Schlichting, [4]):

$$(10) \quad \tau_0 \sim \frac{0,332}{\sqrt{Re_x}} \rho v_0^2$$

und die Wandreibung, bzw. Schleppkraft, auf eine Wandseite wirkend

$$(11) \quad W = \left[ 1,328 \frac{1}{\sqrt{Re_x}} x \rho \frac{v_0^2}{2} \right]^{1/2}$$

mit dem Widerstandskoeffizienten  $C_f = 1,328 \frac{1}{\sqrt{Re_x}}$

Die turbulente Grenzschicht weist einige andere Charakteristiken auf, als die laminare. So ist z.B. die Grenzschichtdicke momentanen Änderungen unterworfen, so dass nur Mittelwerte angegeben werden können. Diese Dicke beträgt für die in Strömungsrichtung eingetauchte Platte:

$$(12) \quad \frac{\delta}{x} \sim \frac{0,38}{Re_x^{0.2}}$$

die Schubspannungen entlang der Platte sind

$$(13) \quad \tau_0 \sim 0,0464 \left( \frac{\nu}{v_0 \delta} \right)^{1/4} \frac{\rho v_0^2}{2}$$

und die auf eine Wandseite wirkende Reibung ist

$$(14) \quad W \sim \left[ \frac{0,074}{Re_x^{0.2}} x \rho \frac{v_0^2}{2} \right]^{1/2}$$

bzw. der Widerstandskoeffizient  $C_f \sim 0,074 \frac{1}{Re_x^{0.2}}$

Bild 7 zeigt deutlich die Verschiedenheit der Wandreibung bzw. Schleppkraft im laminaren und turbulenten Strömungsbereich.

<sup>10)</sup> Der Koeffizient 30 ist dimensionsunabhängig. Ebenso sind es die Koeffizienten der Gl. (10) bis (14).

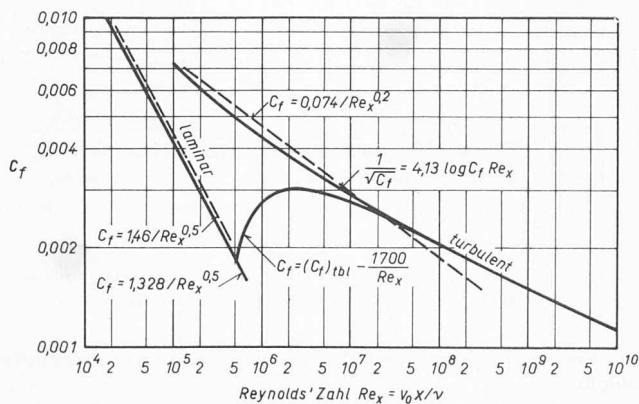


Bild 7. Widerstandskoeffizient  $C_f$  in dimensionsloser Darstellung für die ebene, glatte, in Strömungsrichtung eingetauchte Platte nach Blasius, Prandtl, Schlichting u. a. ( $C_f$  bezieht sich auf beide Plattenseiten)

Auch darf nicht ausser acht gelassen werden, dass die Grenzschicht sich als Folge ausgeprägter Gerinneunebenheiten verformt und eventuell sogar ablöst, wodurch zusätzliche Kräfte auf die Sohle und sohennahen Teile wirken [5].

Es ist ausserdem zu erwähnen, dass in Bächen und Flüssen die Mächtigkeit  $\delta$  der turbulenten Grenzschicht meist der Wassertiefe gleichgesetzt werden kann. Dies trifft jedoch seltener zu für Kanäle und kaum mehr für Laboratoriumsrinnen. Bei Untersuchungen im Laboratorium ist deshalb den Belangen der Strömungsarten und dem Einfluss der Grenzschicht auf den Sedimenttransport besonders Beachtung zu schenken. Da dort die Gerinnedimensionen meist relativ klein sind und derart das Verhalten der Grenzschicht, besonders in Einlaufnähe, sowie die der Rinne «zugeordnete» Turbulenz die Messungen beeinflussen, können die Versuchsergebnisse grundsätzlich nicht durchwegs als allgemein gültig angesprochen werden.

Sämtliche Darlegungen über die Strömungsvorgänge bedürfen noch einer Korrektur. Bis anhin beruhten unsere Betrachtungen auf reinem Wasser, in dem einzelne Partikel sich bewegen. Leider ist es aber meist so, dass, besonders bei Sedimenten mit einem weiten Bereich der Kornverteilung, die Sedimentkonzentration im Wasser, insbesondere bei sehr grosser Schwebstoffführung derart ist, dass die Flüssigkeiteigenschaften sich ändern und somit die Geschwindigkeitsverteilung, speziell in Sohennähe, nicht mehr unseren Annahmen entspricht. Verändert sind: «spez. Gewicht, Viskosität und die Turbulenzeigenschaften des Gemisches»<sup>11)</sup>. In Bild 8 ist das Beispiel einer homogenen Feinsand-Suspension dargestellt.

Die Geschwindigkeitsverteilung gehorcht dem Gesetz

$$(15) \quad v = v_0 + \frac{1}{K} \sqrt{g h J} \left( 1 + 2,3 \log \frac{z}{h} \right)$$

<sup>11)</sup> Man hat es mit einer sich mit der Tiefe kontinuierlich ändernden Mehrschichtenströmung zu tun.

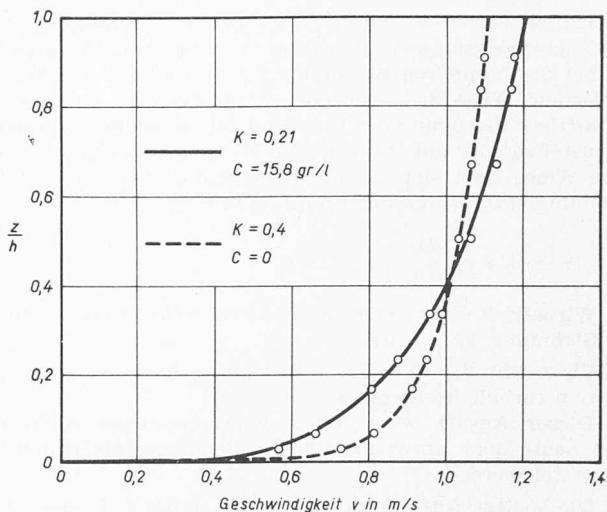


Bild 8. Geschwindigkeitsverteilung in offenem Gerinne von Reinwasser und einer Wasser-Sand-Suspension nach Vanoni-Brooks-Kennedy. (Wassertiefe 8,95 cm, Gerinnebreite 75,5 cm, Gefälle  $J_s = 2,5\%$ ,  $K$  = Konstante nach v. Kármán,  $c$  = Schwebstoffkonzentration)

mit der Kármán-Konstanten

$K = 0,4$  für Reinwasser (Konzentration  $c = 0$ ) und  
 $K = 0,21$  für die Suspension ( $c = 15,8$  g/l)

Obwohl schon viele Untersuchungen vorliegen, ist man leider heute noch nicht so weit, irgendwelche ausreichenden Auskünfte über die Veränderung der Strömungsvorgänge durch das transportierte Material geben zu können.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass der Sedimenttransport vor allem beeinflusst wird durch

- Primär- und Sekundärströmungen im Gerinne
- Turbulenz- und Diffusionsvorgänge, besonders auch in der Nachbarschaft von Grenzflächen
- Strömungsvorgänge entlang Grenzflächen (Grenzschichten)
- Physikalisch-chemische Eigenschaften des flüssigen Mediums mit den zwei Phasen Wasser und Sediment und eventuell Luft (Zwei- bzw. Dreiphasenströmung) usw.

Leider ist demnach mit der eingangs erwähnten Berechnung der Schubbeanspruchung (Gl. 4), die auf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im betreffenden Gerinnequerschnitt beruht, kaum auszukommen. Die darauf aufgebauten Sedimenttransportformeln benötigen deshalb Korrekturfaktoren, die leider nur in den seltensten Fällen den hydraulischen Ähnlichkeitsgesetzen gehorchen, so dass diese Korrekturfaktoren von Fall zu Fall mehr oder weniger angepasst werden müssen. Diese Gleichungen sind deshalb nur streng gültig, wenn die den Untersuchungen zugrunde gelegten Randbedingungen eingehalten werden.

Fortsetzung folgt

## Dehnungsmessungen ohne Aufkleben der Messtreifen

Von A. Moser, Ing. ETH, Zumikon-Zürich

DK 624.001.57

Wenn ein Modellversuch für neuartige Konstruktionen gemacht wird, ist es oft nicht leicht vorauszusehen, wo die grössten Spannungen auftreten werden. Die Kenntnis dieser Stellen und die Uebersicht über den Spannungsverlauf ist meistens wichtiger als die genaue Messung von Dehnungen an willkürlich gewählten Punkten.

Wird ein Dehnungsmesstreifen zwischen die Oberfläche des Modells und ein Stück zäh elastisches Material (z. B. Neopren), gelegt, und wird dieses Stück kräftig auf die Messfläche gepresst, so zeigt der Streifen, verglichen mit einem aufgeklebten Messtreifen, die Dehnungen des Modells mit einem Minderwert von rd. 10 bis 20 Prozent. Bei Verwendung von Neopren wirkt sich die grosse Querdehnung dieses Materials so aus, dass das

Verhältnis zwischen zueinander senkrechten Messungen verzerrt erscheint. Ist es jedoch möglich, durch eine geeignete Vorrichtung das Anpressen immer konstant und gleichmässig vorzunehmen, so kann die Vorrichtung geeicht werden, so dass die umgerechneten Messresultate gut brauchbar werden.

Bekanntlich sind die beiden Dehnungen unter  $45^\circ$  zu den Hauptachsen gleich gross. Werden zwei Messtreifen senkrecht zueinander angebracht und einer davon als Kompressionsstreifen verwendet, so kann sehr genau die Richtung gefunden werden, für welche die Messbrücke keinen Ausschlag zeigt. Die Hauptachsen liegen dann unter  $45^\circ$  zu den Messtreifen. Bei dieser Operation spielen alle Eichkonstanten keine Rolle.