

BERICHT (Hausexemplar)
Ermittlung von oberen und unteren Reibungs-
beiwertgrenzwerten für den Gleitsicherheits-
nachweis bei Traggerüsten (DIN 4421)

LEHRSTUHL FÜR INGENIEURHOLZBAU
UND BAUKONSTRUKTIONEN
UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)
o. PROFESSOR DR.-ING. K. MÖHLER

II

14.78

ERMITTLUNG VON OBEREN UND UNTEREN REIBUNGSBEWERTGRENZWERTEN
FÜR DEN GLEITSICHERHEITSNACHWEIS BEI TRAGGERÜSTEN (DIN 4421)

Untersuchungen
durchgeführt im Auftrage des Instituts für Bautechnik, Berlin

von

Karl Möhler und Werner Herröder

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe (TH)

BERICHT

Ermittlung von oberen und unteren Reibungsbeiwertgrenzwerten für den Gleitsicherheitsnachweis bei Traggerüsten (DIN 4421)

1. Einleitung

Für die Neubearbeitung von DIN 4421 "Traggerüste" werden zum Nachweis der Gleitsicherheit obere und untere Reibungsbeiwerte bei auftretenden Reibungskräften benötigt, die in die vorgesehene Tabelle 2 der DIN 4421 aufzunehmen sind. Dies bezieht sich auf die Reibung zwischen den Baustoffen Beton, Holz und Stahl, sowohl zwischen den gleichen Stoffen als auch den verschiedenen Kombinationen. Die anzugebenden Reibungsbeiwerte sollen als Rechengrundlage zur Ermittlung möglicher Reibungskräfte in den Berührungsflächen der einzelnen Konstruktionsglieder dienen. Die oberen Reibungsbeiwerte sind bei der Berechnung von ungünstig auf das Bauwerk wirkenden Zwängungskräften, z. B. infolge Lagerreibung einzusetzen. Günstig wirkende, d. h. auf das Tragwerk entlastend wirkende Reibungskräfte, sind mit den unteren Reibungsbeiwerten in Rechnung zu stellen. Voraussetzung ist allerdings, daß das Auftreten von Reibungskräften auch zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. Mittlere Reibungsbeiwerte, wie sie bisher für den statischen Nachweis von Gerüstkonstruktionen angewendet wurden, können in Grenzfällen bedeutende Abweichungen von den wirklichen Verhältnissen ergeben. Es schien daher notwendig, den Streubereich abzugrenzen und die auf die Reibungsbeiwerte ungünstig wirkenden Einflüsse wenigstens größenordnungsmäßig zu erfassen. Aufgabe dieses Forschungsvorhabens war es nun, solche Werte zu ermitteln. Dies sollte über zwei getrennte Wege erreicht werden. Zum einen war eine umfassende Literatursichtung und Auswertung vorzunehmen, um dadurch möglichst viele obere und untere Reibungsgrenzwerte aus früheren Untersuchungen zu erfassen, zum anderen sollten ergänzende praktische Reibversuche für noch nicht untersuchte Materialkombinationen und Fehlereinflüsse durchgeführt werden. Dabei waren die Auswirkungen baupraktischer Verhältnisse, wie unterschied-

liche Holzfeuchtigkeiten oder die Verschmutzung der Reibflächen durch Beton- oder Fettreste mit in die Untersuchungen einzubeziehen.

2. Literatursichtung

Zu Beginn des Forschungsauftrages wurde zunächst eine umfassende Sichtung der verfügbaren Literatur über Reibungsbeiwerte, soweit sie in diesem Rahmen von Interesse waren, vorgenommen, mit dem Ziel die gefundenen Werte zusammenzustellen und sie auf ihre Brauchbarkeit für Tabelle 2, DIN 4421 hin zu überprüfen. Da hierbei in erster Linie die Haftreibungsbeiwerte (Uebergang von Ruhe in Bewegung) von Bedeutung sind, wurde die Suche in der Literatur auch nur auf solche Werte beschränkt. Es zeigte sich aber, daß Gleitreibungsbeiwerte (Reibung während der Bewegung) häufiger, besonders in der englischsprachigen Literatur, angetroffen werden.

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung aus der Literatur zusammengetragener Haftreibungsbeiwerte.

Aus den in [1] bis [3] aufgeführten Versuchsergebnissen von Reibungsbeiwerten Beton/Beton geht eine gewisse Abhängigkeit der Haftreibungsbeiwerte von der Höhe der Flächenpressung in der Reibfläche hervor. Mit zunehmender Flächenpressung nehmen die Reibungsbeiwerte ab. Diese Erscheinung tritt sowohl bei der Reibung zwischen 2 hochfesten Betonen als auch bei Reibung von Beton auf einer Mörtelschicht auf. Werte über 2,0 konnten nur bei Verzahnung erreicht werden.

Für die Reibungsverhältnisse Stahl/Stahl ist eine Fülle von Reibungsbeiwerten vorhanden, insbesondere durch die umfangreichen Untersuchungen zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau [10]. Für die verschiedenen Stahloberflächen, wie sie in der Praxis vorkommen können, ergeben sich teilweise beträchtliche Unterschiede in der Höhe der aufnehmbaren Reibungskräfte. So ist ein Ansteigen der Haftreibungskoeffizienten nach

folgender Reihenfolge zu beobachten: Oberflächen geölt bzw. gefettet, feuerverzinkt, mit Walzhaut, mit Drahtbürste gereinigte Walzhaut, sandgestrahlte und grundierte Walzhaut, sandgestrahlte Walzhaut bis sandgestrahlte Oberfläche mit Spritzverzinkung.

In [12] sind Werte für die Reibung zwischen Stahl und Holz in Höhe von $\mu = 0,65$ für lufttrockenes Holz (Fichte) und $\mu = 0,7$ für nasses Holz angegeben. Weitere Haftreibungswerte wurden in [8] für Reibung von geglättetem Stahl auf Kiefer und Eiche gefunden, die sehr gering sind.

Für das Reibungsverhältnis Holz/Holz (Fichte) sind in [5] und [6] Mittelwerte aus Reibversuchen in den verschiedensten Variationen veröffentlicht, wobei [6] mit Vorsicht betrachtet werden muß, da hier mit sehr geringen Auflasten ($0,001 - 0,01 \text{ N/mm}^2$) gearbeitet wurde. Im Bereich von $0 - 0,03 \text{ N/mm}^2$ fällt nach Stôsic der Reibungskoeffizient stark ab. Für den Fall der Reibung von Fichtenholz auf Fichtenholz mit Faserrichtung in Reibrichtung sind in [4] Haftreibungswerte in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit dargestellt.

Aus Tabelle I ist ersichtlich, daß für Reibungsverhältnisse Hirnholz/Hirnholz, Hirnholz/Holz quer, Hirnholz/Holz längs, Holz quer/Holz quer, Hirnholz/Stahl, Holz/Mörtelbett, sowie Holz/Beton keine Reibungswerte gefunden werden konnten. Die Bezeichnung "Holz längs" bzw. "Holz quer" soll die Lage der Faserrichtung zur Reibrichtung ausdrücken, wobei "längs" die Reibrichtung parallel zur Faserrichtung und "quer" die Reibrichtung senkrecht zur Faserrichtung bedeutet. Aus den verschiedenen Veröffentlichungen und auch bei den durchgeführten Reibversuchen wurde klar erkennbar, daß die Reibungskoeffizienten nicht nur durch örtliche Verschiedenheiten (Faserverlauf, Rost usw.) der aufeinanderreibenden Materialien beeinflußt werden, sondern in den meisten Fällen stark vom wirkenden Anpressdruck abhängen. Daneben spielt bei den Gleitreibungskoeffizienten auch der Gleitweg eine bedeutende Rolle. Die Abhängigkeit vom Anpressdruck fällt besonders bei Reibung von Beton auf Beton oder Mörtel auf. Hier kann der Reibungswert bei geringer

Flächenpressung doppelt so hoch liegen, als er sich bei hoher Druckspannung in der Reibfläche ergibt. Dies gilt ebenso, wenn auch weniger deutlich, für Reibungsverhältnisse Holz/Holz, wie es sich u.a. in den Versuchen von Möhler/Maier [4] zeigte. Jedoch wirkt sich hierbei die Querdruckspannung nur bis zu einer Höhe von ca. $0,6 \text{ N/mm}^2$ ungünstig auf den Reibungsbeiwert aus. Höhere Flächenpressungen haben keinen Einfluß mehr auf die Höhe des Reibungsbeiwertes. In [4] und [6] sind zusätzliche Reibversuche mit eingestreutem Sand in den Reibflächen durchgeführt worden, da man überprüfen wollte, ob hierdurch ein gewisser Verzahnungseffekt zu höheren Werten führen würde. Das war aber nur der Fall, wenn der Sand hauchdünn, d.h. mit nur einer Kornlage eingestreut wurde. War der Sand in 2 oder mehr Lagen vorhanden, so trat ein rapides Absinken des Reibungskoeffizienten ein, da die Sandkörner jetzt wie eine Schmierschicht wirkten. Für die im Gerüstbau vorliegenden Verhältnisse sollte man daraus die Lehre ziehen, daß Reibflächen, deren Reibverhalten für die Standsicherheit einer Gerüstkonstruktion von Bedeutung werden kann oder diese mit Sicherheit beeinflußt, beim Zusammenbau der Einzelteile zu säubern sind.

Der Einfluß der Holzfeuchtigkeit ging aus den veröffentlichten Daten nicht eindeutig hervor. Es scheint im hygrokopischen Bereich ($u \leq 30\%$) eine Zunahme von μ mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt vorzuliegen, bei nassem Holz (weitgehend wassergesättigt) ist aber mit einem Abfall der Reibungsbeiwerte zu rechnen. Durch Versuche sollten die noch offenen Fragen, vorwiegend der Einfluß der Faserrichtung und der Feuchtigkeit auch bei Hirnholzflächen geklärt werden. Die Versuche wurden auch auf Holz/Stahl- und Holz/Beton-Kombinationen ausgedehnt, da hierfür in der Literatur keine Werte gefunden wurden.

3. Eigene Reibversuche

3.1 Versuchseinrichtung und Durchführung

Zur Bestimmung des Reibverhaltens von Holz auf Holz und anderen Baumaterialien bei unterschiedlicher Vorspannung und Holzfeuchtigkeit wurden eine Reihe

von Reibversuchen durchgeführt. Im Einzelnen wurden folgende Reibungsverhältnisse untersucht:

- a) Reibung von Holz auf Holz
 - 1) Holz längs/Holz längs
 - 2) Holz längs/Holz quer
 - 3) Holz längs/Hirnholz
 - 4) Holz quer/Holz quer
 - 5) Holz quer/Hirnholz
 - 6) Hirnholz/Hirnholz

- b) Reibung von Holz auf verschiedenen Baumaterialien
 - 7) Holz längs/Beton
 - 8) Holz längs/Mörtelbett
 - 9) Holz längs/Holz längs mit Betonresten
 - 10) Holz längs/Hirnholz mit Betonresten
 - 11) Holz längs/Holz längs mit Fettresten
 - 12) Holz längs/Hirnholz mit Fettresten
 - 13) Holz längs/Stahl mit Walzhaut
 - 14) Holz längs/Stahl mit grundierter Oberfläche
 - 15) Holz längs/Stahl mit angerosteter Oberfläche
 - 16) Hirnholz/Beton
 - 17) Hirnholz/Stahl mit Walzhaut
 - 18) Hirnholz/Stahl mit grundierter Oberfläche
 - 19) Hirnholz/Stahl mit angerosteter Oberfläche

Die Ausdrücke "Holz längs" und "Holz quer" wurden bereits erläutert. "Hirnholz" bedeutet Reibung auf den Stirnflächen der Hölzer, d.h. die Holzfasern stehen senkrecht auf der Reibebene.

Die unter a) aufgeführten Reibversuche Holz auf Holz wurden aufgrund früherer Ergebnisse [4] in 3 Holzfeuchtigkeitsbereichen, $u=10 - 14\%$,

$u=20 - 25\%$ und $u \geq 30\%$ durchgeführt. Das entsprach trockenem, luft-trockenem und nassem Holz (Ueberschreitung des Fasersättigungspunktes). Außerdem wurde die äußere Belastung der Versuchskörper so gewählt, daß einmal eine Querdruckspannung von $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und zum anderen eine von $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ in den Reibflächen auftrat.

Um den nicht unerheblichen Umfang der Versuche zu begrenzen, wurden die unter b) zusammengefaßten Reibungsversuche, Reibung von Holz auf anderen Baustoffen, auf eine Querdruckspannung von $0,6 \text{ N/mm}^2$ und eine Holzfeuchtigkeit von $u = 20 - 25\%$, wie sie bei Holz von Gerüstbauteilen im allgemeinen vorhanden ist, beschränkt. Erfahrungsgemäß werden auch bei höheren Druckspannungen die Reibungskoeffizienten nicht oder nur unbedeutend kleiner.

Die Versuchskörper wurden - in Anlehnung an die Ende der 60er Jahre von Möhler/Maier durchgeführten und in [4] veröffentlichten Reibversuche an Fichtenholz - dreiteilig hergestellt. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung des Prüfkörpers sowie der beim Versuch einwirkenden Kräfte.

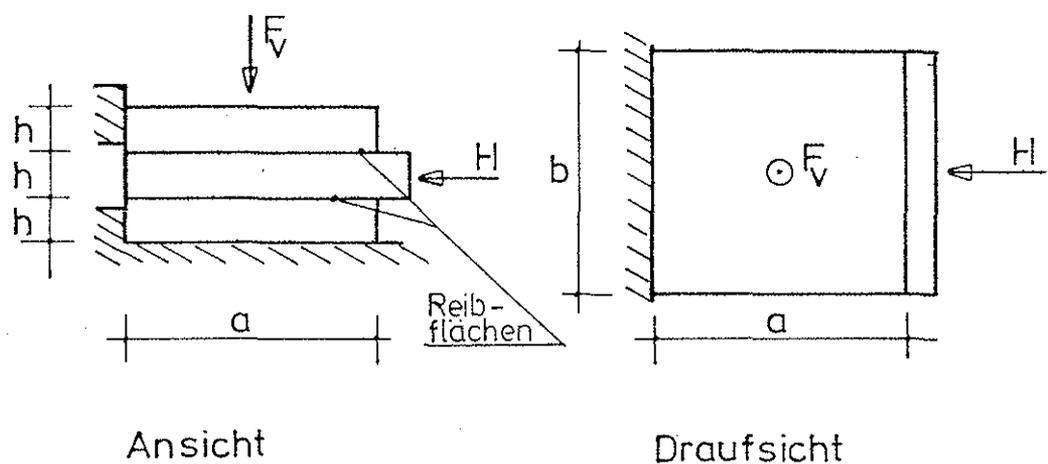


Bild 1 : Versuchskörper

Die beiden äußeren Teile des Körpers wurden während des Reibversuches unverschieblich in ihrer Lage gehalten, während das mittlere, länger ausgeführte Teil nach Aufbringung einer konstanten Querdruckkraft F_v und einer stetig steigenden Horizontalkraft H nach Ueberwindung des Haftreibungswiderstandes in den beiden Reibflächen des 3-teiligen Versuchskörpers in Richtung der Kraft H gleiten konnte. Der Aufbau der Versuchskörper aus drei Einzelteilen hatte gegenüber den in [5] und [6] verwendeten 2-teiligen Versuchskörpern den großen Vorteil, daß die Druckkraft F_v den Verschiebungsweg nicht mitmachen mußte und deshalb mit Hilfe des Druckkolbens einer Prüfmaschine aufgebracht werden konnte, wodurch wesentlich größere Druckspannungen in den Reibflächen zu erzeugen waren. Außerdem konnte durch die Konstanthaltvorrichtung der Prüfmaschine über die Dauer eines Reibversuches eine konstante Flächenpressung in den Reibflächen gewährleistet werden.

In Bild 2 und 3 ist die verwendete Versuchseinrichtung dargestellt. Sie wurde so konzipiert, daß Versuchskörper unterschiedlicher Abmessungen bis zu maximal $a/b/h = 25/25/5$ cm verwendet werden konnten, wie sie auch für die Mehrzahl der Versuche mit Holz vorgesehen worden waren.

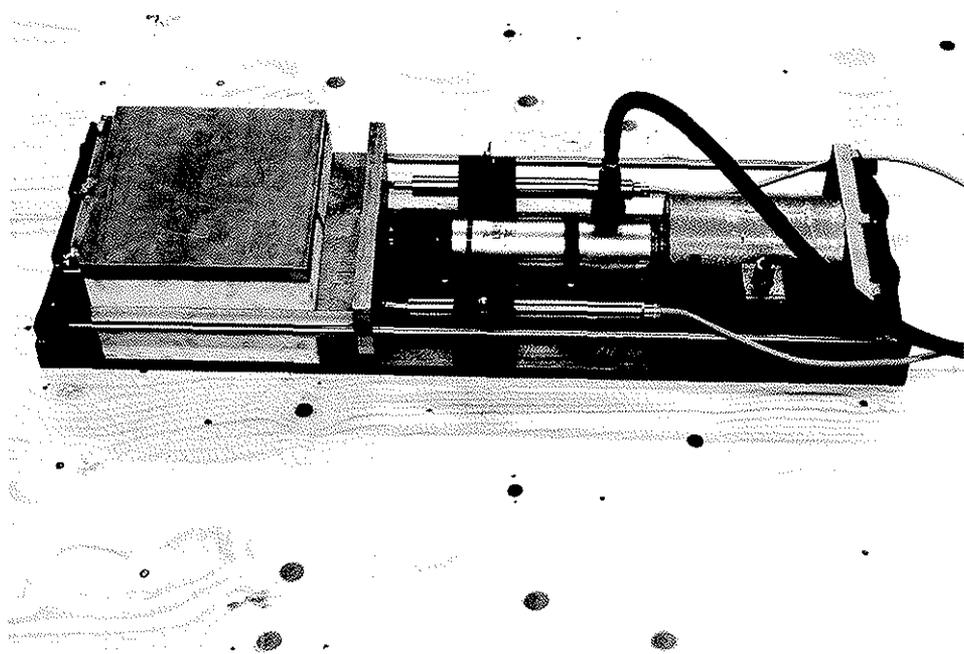


Bild 2 : Ansicht der Versuchseinrichtung ohne Prüfmaschine

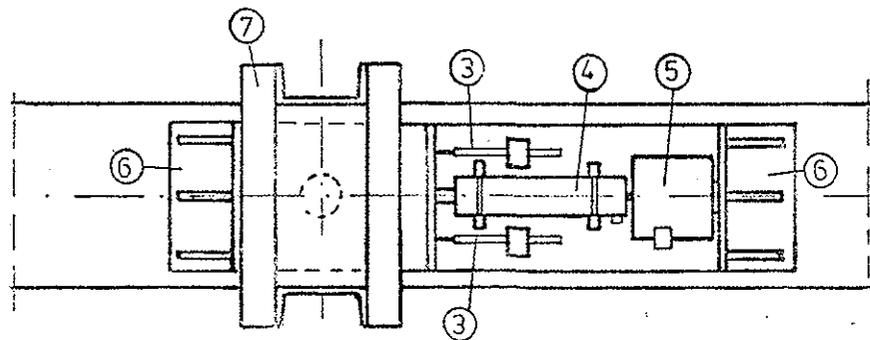
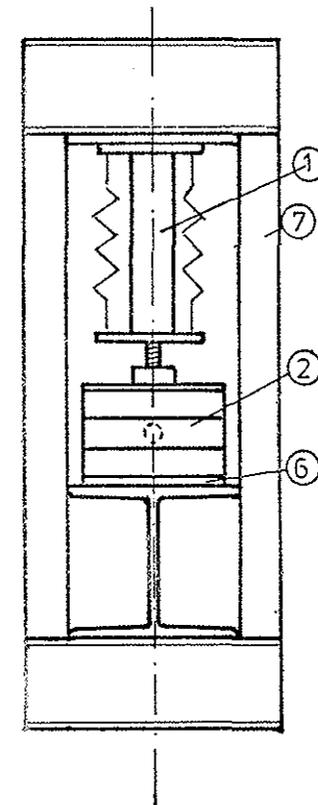
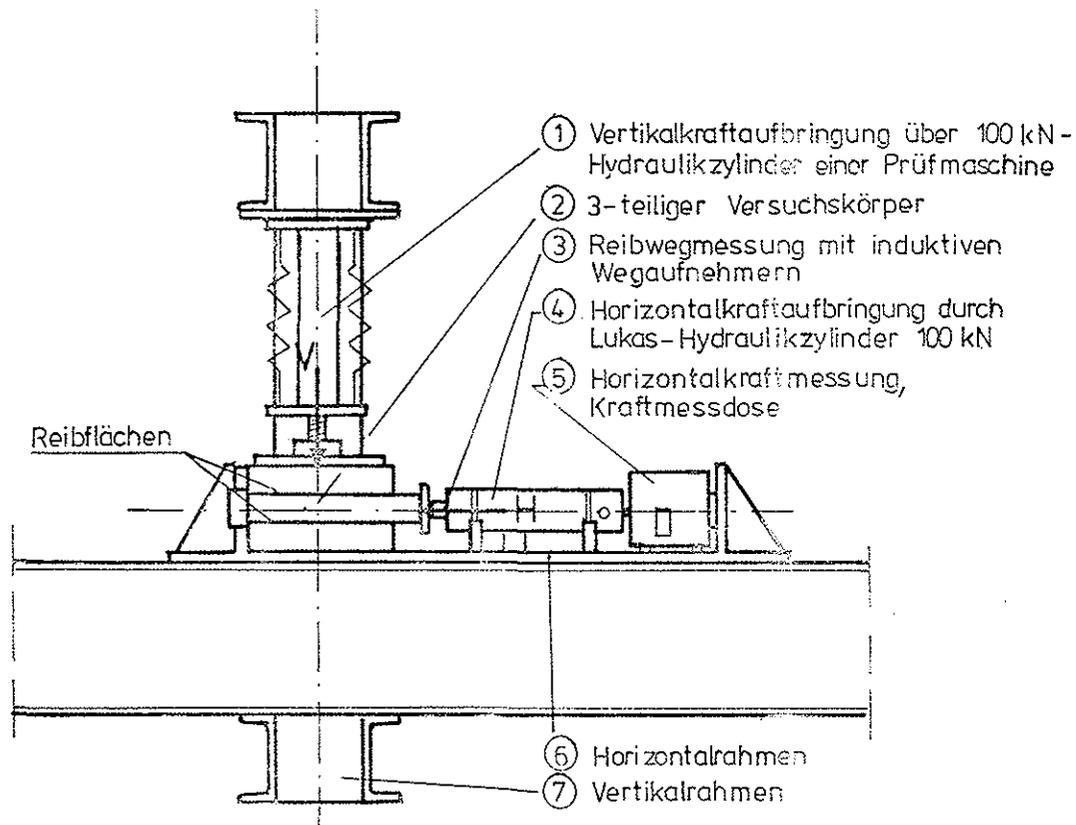


Bild 3:

Versuchseinrichtung für Reibungsuntersuchungen

Hirnholz/Hirnholz-Versuche z.B. wurden mit den Probekörperabmessungen $a/b/h = 12/12/5$ cm durchgeführt, da die Proben aus Kantholz geschnitten werden mußten und auch die aufnehmbare Druckspannung senkrecht zur Faser nicht überschritten werden durfte. Bei allen Versuchskörpern wurde darauf geachtet, daß sich während des Verschiebens die Größe der Reibflächen nicht verminderte, da sich dadurch unbeabsichtigt die Flächenpressung erhöhen würde. Aus diesem Grunde wurden die Mittelteile der Versuchskörper um mindestens 2 cm länger, entsprechend dem vorgesehenen Reibweg, als die äußeren Teile ausgeführt. Wie aus früheren Versuchen bekannt war und es sich auch später bestätigte, verliefen die Lastverschiebungslinien nach 2 cm Verschiebungsweg im allgemeinen parallel zur Abszisse s , d.h. es trat kein Horizontalkraftabfall mehr ein. Durch Einschaltung einer 100 kN-Druckmessdose wurde die aufgebrachte Horizontalkraft H und mit 2 induktiven Wegaufnehmern der Verschiebungsweg s elektrisch gemessen und mittels eines 2-Komponentenschreibers als Kraft-Weg-Diagramm erhalten. Hergestellt wurden die hölzernen Versuchskörper der Reihen 1-6 und Versuchskörperteile für die Reihen 7-19 aus sägerauhen (Gattersäge), 5 cm dicken und 20 bzw. 30 cm breiten Nadelholzbohlen der Gkl. II. Beim Zuschnitt wurde darauf geachtet, daß zu jeder Versuchsreihe die Hölzer der Versuchskörper aus den gleichen Bohlen gefertigt wurden. Der Begriff "sägerauh" ist nicht eindeutig, denn der Grad der Rauigkeit hängt stark von der Güte und Arbeitsweise des Sägegatters und von dem Aufbau des Nadelholzes, enge oder weite Jahrringe, großer oder kleiner Spätholzanteil und dergl. ab. Aus diesem Grunde ist es auch verständlich, daß Versuche an verschiedenen sägerauhen Hölzern teilweise stark voneinander abweichende Werte ergeben können. In Tabelle 3 sind dazu Reibungsbeiwerte aufgeführt, die aus Reibversuchen ermittelt wurden, bei denen die Versuchskörper aus verschiedenen Bohlen, ohne dabei eine bestimmte Ordnung einzuhalten, zusammengesetzt wurden. Es zeigte sich, daß diese Reibungsbeiwerte einer größeren Bandbreite unterliegen als die entsprechenden aus Tabelle 2.

Aus Fichtenkanthölzern mit den Seitenabmessungen $a/b=12/14$ und $a/b=12/12$ cm wurden die Hirnholz-Versuchskörper geschnitten. Um eine möglichst praxisnahe Rauigkeit der Hirnholzoberflächen nach dem Schnitt zu erhalten, wurde mit einem normal gezahnten Sägeblatt, wie es auf Baustellen benutzt wird, gearbeitet.

3.2 Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen

Aus den bei den Reibversuchen erhaltenen Lastverschiebungsdiagrammen wurden die Reibungskoeffizienten μ mit folgenden Gleichungen errechnet:

$$\mu = \frac{H}{2 \cdot F_v} \quad (1)$$

$$F_v = \sigma_v \cdot A = \sigma_v \cdot a \cdot b \quad (2)$$

Hierin sind H die aufgebrachte Horizontalbelastung, F_v die vertikal angreifende Druckkraft, σ_v die gewählte Höhe der Druckspannung und A die Größe der vorhandenen Reibfläche mit den Abmessungen a und b . Der Faktor 2 im Nenner von Gleichung (1) ergibt sich aufgrund der beiden Reibflächen in den Versuchskörpern.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Vor- und Hauptversuche zusammengestellt. Ermittelt wurde der Haftreibungskoeffizient $\mu_H = \frac{\max H}{2 \cdot F_v}$ aus der größten Horizontalkraft H , die meist nach einer geringen Verschiebung des Probekörpers um ca. 0,5 - 2 mm erreicht wurde. Dieses anfängliche Verutschen ist durch das Anpressen der Seitenhölzer des Versuchskörpers an die Haltebacken der Versuchseinrichtung sowie einer gewissen Längsdehnung bzw. Querdehnung der Hölzer zu erklären. Bild 4 zeigt drei typische

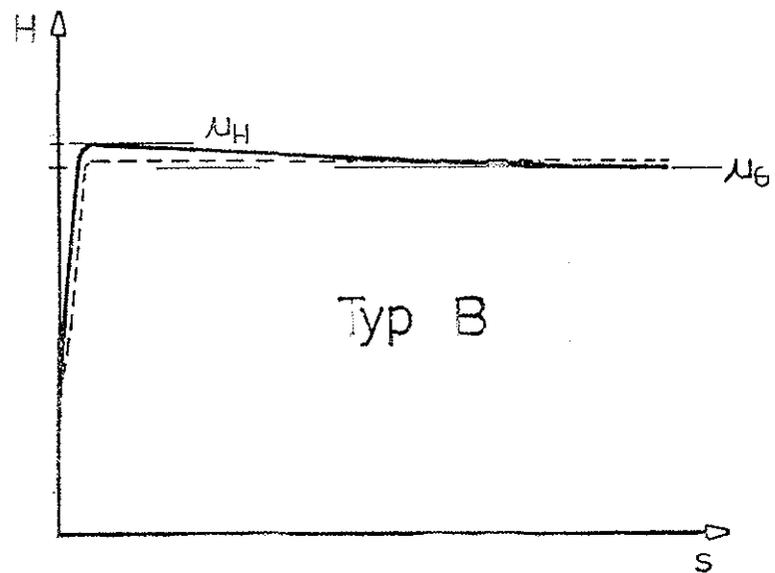
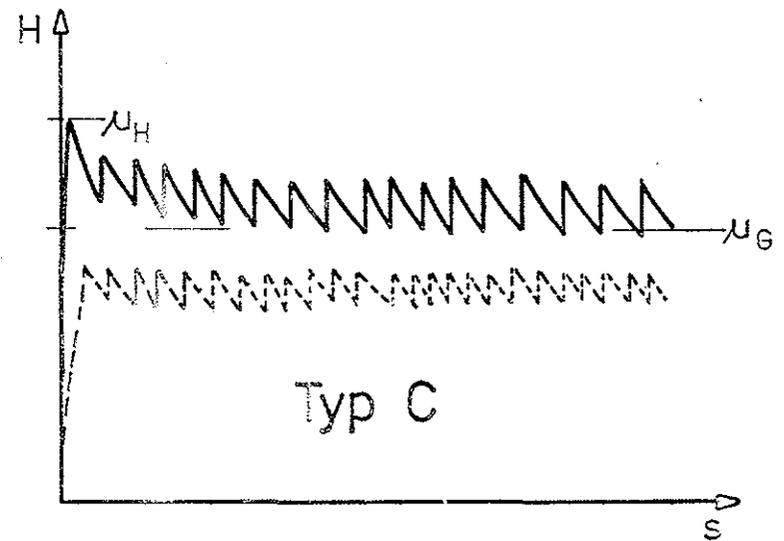
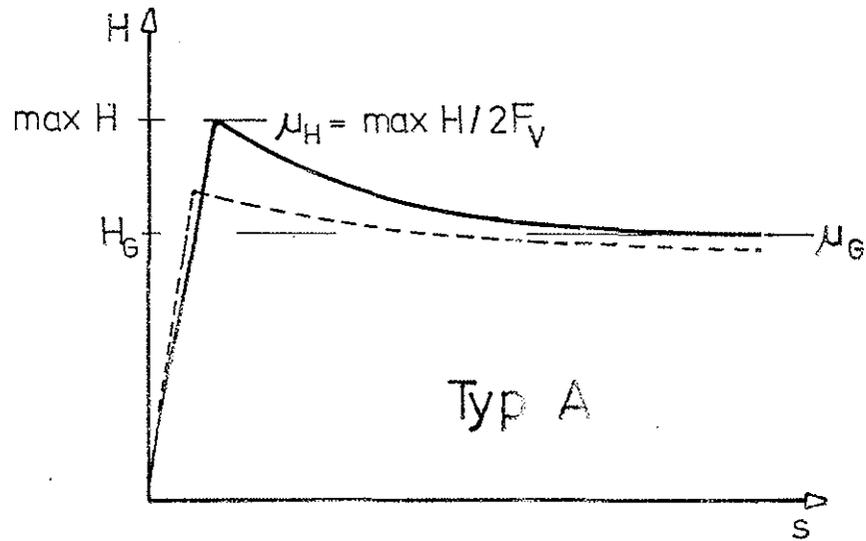


Bild 4:
Lastverschiebungslinien aus
Reibungsversuchen

- Erster Reibversuch
- - - Nach mehreren Reibdurchgängen

μ_H Haftreibungsbeiwert
 μ_G Gleitreibungsbeiwert

Lastverschiebungslinien, die den Verlauf der Horizontalkraft H in Abhängigkeit vom Reibweg s zeigen, nach denen alle aus den Versuchen erhaltenen Kraft-Weg-Diagramme eingeordnet werden konnten. In Tabelle 2 ist neben dem Mittelwert jeder Versuchsreihe auch der jeweils dazugehörige Kurventyp nach Bild 4 angegeben. Zusätzlich wurde aus den Lastverschiebungslinien der Gleitreibungskoeffizient μ_G bestimmt. Nach Zurücklegung eines Reibweges von 2 cm war in fast allen Fällen die Lastverschiebungslinie in eine Parallele zur Abszisse übergegangen, d.h. die Horizontalkraft blieb konstant. Aus dieser Kraft konnte analog zur Gleichung (1) der Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = \frac{H_G}{2 \cdot F_v}$ errechnet werden.

Zu den Versuchen Nr. 4-19 wurden Wiederholungsversuche durchgeführt. Dabei stellte sich nach anfangs kräftigem Abfallen der Reibungskoeffizienten nach ca. 4-6 Wiederholungen eine konstante Höhe ein, die auch bei weiteren Versuchen nicht oder nur unwesentlich kleiner wurde. Allerdings konnte allgemein beobachtet werden, daß mit steigender Zahl von Wiederholungen der Unterschied zwischen Haftreibungs- und Gleitreibungskoeffizient geringer wurde, d.h. der Kurvenverlauf wurde immer flacher.

3.2.1 Holz längs/Holz längs

Diese Versuche wurden durchgeführt um Vergleichswerte bzw. eine Bestätigung der in [4] mitgeteilten Reibungskoeffizienten zu erhalten, da jetzt mit einer anderen Versuchseinrichtung gearbeitet wurde. Die aus den jetzigen Versuchen ermittelten Haftreibungsbeiwerte (siehe Tabelle 2 Nr. 1) lagen im Mittel etwas höher als die in [4] gemessenen Werte. Zum Beispiel lag bei einer Holzfeuchtigkeit von $u=20-25\%$ der jetzt ermittelte Wert bei $\mu_H = 0,775$, der aus [4] entnommene zugehörige Wert bei $\mu_H = 0,686$.

Bestätigt wurde der Abfall der Reibungskraft bei höheren Flächenpressungen. Nicht so eindeutig dagegen konnte die Abhängigkeit der Reibungsbeiwerte von der Holzfeuchtigkeit verglichen werden, denn während in [4] mit höheren Feuchtigkeiten auch die Reibungskoeffizienten anwachsen, waren die für $u \cong 30\%$ neu ermittelten Werte eher etwas geringer als die bei einer Holzfeuchtigkeit von $u = 20-25\%$ gemessenen Werte.

Ein Einfluß der Anordnung der Jahrringe konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, jedoch scheinen stehende Jahrringe (ca. $60-90^\circ$) etwas geringere Werte als flach geneigte Jahrringe ($< 45^\circ$) zu ergeben. Das könnte aus der glatteren Oberfläche von Bohlen mit stehenden Jahrringen erklärt werden, denn das Sägeblatt eines Gatters reißt beim Sägen oft größere Frühholztäfelchen aus den flach liegenden Jahrringen, wodurch die Holzoberfläche gegenüber stehenden Jahrringen einen höheren Rauheitsgrad erhält. Beim Aufeinanderreiben verkeilen sich die Oberflächen besser und ergeben somit höhere Reibungsbeiwerte. Die Lastverschiebungslinien verliefen bei trockenem und lufttrockenem Holz und $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ Flächenpressung nach Typ A von Bild 4. Die Lastverschiebungslinie stieg sehr steil, fast senkrecht, an, bis der Punkt erreicht war, an dem die Haftreibung überschritten wurde. Beim Versuch zeigte sich dies durch plötzlich beginnendes Gleiten des Mittelholzes. Der Gleitvorgang vollzog sich kontinuierlich über den Reibweg, wobei ein parabelförmiger Abfall der Gleitreibungskraft zu verzeichnen war. Die Lastverschiebungslinien der Versuchskörper aus nassem Holz bei $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ sowie aller Holzfeuchtigkeitsstufen bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ verhielten sich wie der Kurventyp C. Das Gleiten verlief im Versuch nicht mehr kontinuierlich, sondern stoßweise. Nachdem ein kurzes Stück Gleitweg zurückgelegt worden war und aus diesem Grunde die Horizontalkraft geringer wurde, fing sich das Holz wieder und die Lastverschiebungslinie stieg erneut an. Der darauffin auftretende Gleitreibungsbeiwert lag jedoch unter dem zuerst erhaltenen.

3.2.2 Holz längs/Holz quer

Bei dieser Anordnung der Versuchskörper verlief die Faserrichtung der Seitenhölzer senkrecht, die des Mittelholzes faserparallel zur Reibrichtung. Gegenüber Holz längs/Holz längs ergaben sich daraus nur geringfügige Unterschiede in der Höhe der Reibungsbeiwerte. Zum Teil rollten sich jedoch die querliegenden Fasern auf den Seitenholzoberflächen auf, was besonders deutlich bei nassem Holz zu sehen war. Die Lastverschiebungslinien verliefen bei $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ nach Typ A und bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ nach Typ C. Ein Einfluß der Jahrringordnung war nicht zu erkennen.

3.2.3 Holz längs/Hirnholz

In diesen Versuchen wurde das Mittelteil des Versuchskörpers von einem Hirnholzstück mit den Abmessungen $a/b/h = 12/12/5 \text{ cm}$ gebildet. Die Seitenhölzer waren wie in den vorangegangenen Versuchsreihen $25/25/5 \text{ cm}$ groß. Es ergaben sich für die lufttrockenen Hölzer im Mittel um 10%, für die nassen Hölzer im Mittel um 20% höhere Reibungsbeiwerte als aus den entsprechenden Holz längs/Holz längs - Versuchen. Die Ergebnisse der trockenen Hölzer lagen im Mittel um 7% bei $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und um 40% bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ niedriger. Auffallend ist auch der große Unterschied zwischen trockenen Hölzern und lufttrockenen bzw. nassen Hölzern, wie er aus den Balkendiagrammen von Bild 5 und 6 hervorgeht. Durchgeführte Wiederholungsversuche ergaben nach ca. 4 Wiederholungen eine Abminderung der Haftreibungsbeiwerte um durchschnittlich 21% und der Gleitreibungsbeiwerte um ca. 10%.

Die Lastverschiebungslinien verliefen für $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ bei $u = 10-14\%$ nach Typ A, die restlichen nach Typ C. Die Anordnung der Jahrringe ergab keinen merklichen Einfluß auf die Höhe der Reibungsbeiwerte.

3.2.4 Holz quer/Holz quer

Diese Anordnung der Reibflächen (Faserverlauf der beiden Holzoberflächen

einer Reibfläche unter 90° zur Reibrichtung) erbrachte neben den Holz längs/Hirnholz und Holz quer/Hirnholz die höchsten Reibungsbeiwerte. Sie lagen im Mittel um 7% bei $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und um 26% bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ höher als die vergleichbaren Werte aus den Holz längs/Holz längs-Versuchen. Der Grund dafür dürfte eine bessere Verzahnung der Holzoberflächen sein, denn das festere Spätholz der Jahrringflächen konnte sich in die vom Schneidevorgang herührenden, tiefer und quer zur Reibrichtung liegenden Rillen aus dem Frühholzanteil der Jahrringe gut verkeilen, wodurch höhere Reibungsbeiwerte erreicht wurden. Bei den Reibversuchen konnte auf den Reibflächen teilweise ein Abscheren und nachfolgendes Abrollen der oberen Faserbündel auf den Holzoberflächen beobachtet werden.

Die Lastverschiebungslinien hatten bei allen Versuchen dieser Reihe die Form von Typ A. Wiederholungsversuche wurden in diesem Falle nur für nasse Hölzer ($u \geq 30\%$) bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt. Sie ergaben im Mittel eine größte Abminderung von 12,9% bei den Haftreibungs- und 7,3% bei den Gleitreibungskoeffizienten. Die Abmessungen der Versuchshölzer betragen $a/b/h = 25/30/5 \text{ cm}$ bei den Mittelhölzern, während die Seitenhölzer für $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ das übliche Maß von $25/25/5 \text{ cm}$ aufwiesen, aber für $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ auf $15/15/5 \text{ cm}$ begrenzt werden mußten, um nicht infolge der erforderlichen Horizontalkraft die Querdruckfestigkeit in den Seitenflächen zu überschreiten.

3.2.5 Holz quer/Hirnholz

Auch bei diesen Versuchen wurden merklich höhere Reibungskräfte gemessen. Sie liegen knapp unter den in 3.2.4 ermittelten Werten. An den Oberflächen der $12/12/5 \text{ cm}$ großen Hirnholzstücke war nach den Reibversuchen deutlich zu sehen, daß als tatsächlich vorhandene Reibfläche nur die festen Spätholzanteile in den Jahrringflächen gelten können, denn das weichere Frühholz drückte sich unter der Vorspannung leicht zusammen oder es war infolge des Sägens der Hölzer der Frühholzanteil tiefer herausgenommen worden und entzog sich somit einer direkten Kraftaufnahme. Aus diesen Gründen bestand die

Hirnholzreibfläche aus zum Kern hin enger werdenden Kreisringflächen oder auch Halbkreisringflächen in unregelmäßigen Abständen nebeneinanderliegend.

Durch diese Form der Reibfläche konnte zwar eine Verzahnung mit dem Querholz entstehen, doch wurde sie durch die Ringform des Hirnholzspätholzes behindert. So sind auch die Reibflächen des Querholzes und des Hirnholzes nur wenig im Gegensatz zu den Versuchen Holz quer/Holz quer zerstört worden.

Die Lastverschiebungslinien entsprachen bei trockenen und lufttrockenen Versuchskörpern dem Typ A, bei nassen Hölzern dem Typ B. Bei den Wiederholungsversuchen ergaben sich Abminderungen der Haftreibungsbeiwerte zwischen 11 und 24% und der Gleitreibungsbeiwerte von 6 und 14%.

3.2.6 Hirnholz/Hirnholz

Die Abmessungen der Versuchskörperteile bei diesen Versuchen betragen $a/b/h=12/12/5$ cm bei den Seitenteilen und $12/14/5$ cm für das Mittelholz. Die gemessenen Haftreibungsbeiwerte unterschieden sich gegenüber den Holz längs/Holz längs-Werten nach nachstehender Tabelle.

Tabelle 3a: Unterschied in % der μ_H -Werte für Hirnholz gegenüber Längsholz

Vorspannung	Holzfeuchtigkeit u [%]	Unterschied in %
$\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$	10 - 14	+ 40
	20 - 25	- 22
	30	+ 15
$\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$	10 - 14	- 47
	20 - 25	+ 14
	30	+ 19

Auch bei diesen Versuchen ergab sich bei $u=10-14\%$ und $\sigma_v=0,6 \text{ N/mm}^2$ ein auffallend kleiner Wert, wie auch schon in den Holz längs/Hirnholz-Versuchen. Das könnte darauf zurückzuführen sein, daß die trockenen Spätholzringe eine glattere Oberfläche als feuchte oder nasse Ringe besaßen. Tatsächlich waren Hirnhölzer nach den Reibversuchen vorhanden, bei denen die Oberflächen der Spätholzringe so glatt waren, daß sie, wie nach einer Politur, matt glänzten.

Auch hier, wie bei den vorangegangenen Versuchen ließ sich ein Einfluß der Jahrringe nicht deutlich feststellen. Die Versuche wiesen aber darauf hin, daß bei kleiner Vorspannung weitringige Hirnhölzer größere Kräfte aufnehmen können als engringige, langsam gewachsene Hölzer. Bei großer Vorspannung war dagegen genau das Gegenteil festzustellen.

In den erhaltenen Lastverschiebungslinien waren alle drei Typen A, B und C vertreten (siehe auch Tabelle 2). Die Wiederholungsversuche ergaben im Mittel Abminderungen von 28% bei den Haftreibungsbeiwerten und von 14% bei den Gleitreibungsbeiwerten.

3.2.7 Holz längs/Beton

Um die Reibungsbeiwerte zwischen Holz und Beton zu bestimmen, wurden Betonplatten aus Bn 250 mit abgezogener Oberfläche und den Abmessungen $a/b/h = 20/20/5 \text{ cm}$ verwendet. Sie wurden auf Holzstücken $25/25/5 \text{ cm}$ mit einer Holzfeuchtigkeit zwischen 20 und 25% gerieben, wobei die Faserichtung des Holzes parallel zur Reibrichtung verlief. Nach Ueberwindung des Haftreibungswiderstandes war die Gleitreibung nicht mehr kontinuierlich, sondern verlief stoßweise, so daß die erhaltenen Lastverschiebungslinien dem Typ C entsprachen. Die mittlere Haftreibung aus diesen Versuchen lag bei $\mu_H = 0,93$ und wurde von keiner Holz/Holz-Kombination bei 20-25% Holzfeuchtigkeit und $0,6 \text{ N/mm}^2$ Querdruckspannung erreicht. Beim Versuch wurde beobachtet, daß die Reibfläche der Betonplatte nach dem Versuch vollständig mit abgescherten Holzfaserteilen übersät war. D.h., daß die

fein strukturierte Oberfläche des abgezogenen Betons in das Holz eingedrückt wurde und dadurch eine Verbundwirkung hervorrief. Bestätigt wurde dies durch die Wiederholungsversuche, die, nachdem sich die Oberflächenstruktur des Betons mit Holzteilchen nach dem 1. Reibversuch vollgesetzt hatte, untereinander kaum noch Abweichungen von der beim 2. Versuch erreichten Horizontalkraft aufwiesen.

3.2.8 Holz längs/Mörtelbett

Für diese Versuchsreihe wurden Probekörper aus einem Zementmörtel mit dem Mischungsverhältnis Zement/Sand von 1 : 4 hergestellt. Da in der Praxis Auflagerungen in das noch weiche, nicht abgebundene Mörtelbett verlegt werden, wurde der Zementmörtel in gießfähigem Zustand zwischen 2 Holzkörper ($a/b/h=25/25/5$ cm), die dann die Seitenteile des Probekörpers bildeten, eingebracht. Das sollte bewirken, daß der Mörtel in die Oberflächenstruktur des Holzes eindringen konnte und dies nach dem Abbinden zum innigen Verbund zwischen Holz und Mörtel führen würde. Tatsächlich ergab sich gegenüber der Holz/Beton-Kombination ein um ca. 5% höherer Haftreibungsbeiwert, aber auch nicht höher, wie vermutet worden war.

Die Oberflächenstruktur des Holzes blieb auch nach mehreren Wiederholungsversuchen, die den Haftreibungsbeiwert um 30% und den Gleitreibungsbeiwert um 4% abminderten, trotz geringer Glättung noch deutlich auf der Mörteloberfläche erkennbar. Alle Lastverschiebungslinien verliefen nach Typ A.

3.2.9 Holz längs/Holz längs mit Betonresten

Die Probekörper für die mit Betonresten verschmutzten Reibflächen wurden in ähnlicher Weise wie in Abschnitt 3.2.8 hergestellt. Die Holzteile der Versuchskörper ($25/25/5$ cm und $30/25/5$ cm) wurden auch hier als Schalungsflächen benutzt und die Zwischenräume mit Beton Bn 250 verfüllt. Nach dem Erhärten wurde der Beton ausgeschalt, danach die Hölzer leicht abgeklopft, um lose Sand- und Zementschlammteilchen zu entfernen. Ein wesentlicher Unterschied in der Höhe der Reibungsbeiwerte aus Holz längs/Holz längs mit sauberen Oberflächen war aber nicht festzustellen, auch wenn ein Auftreten größerer

Reibungsbeiwerte durch das Eindringen von Sandkörnern in die Holzoberfläche oder kleinere Werte durch Abrollen des Holzes auf den Sandkörnern hätte vermutet werden können. Im Mittel ergab sich nach den Wiederholungsversuchen eine maximale Abminderung von ca. 9% bei Haftreibung, von -5,3% bei Gleitreibung. Der Verlauf der Lastverschiebungslinien entsprach Typ B, d.h. die Horizontalkraft stieg steil an, um nach Ueberwindung des Haftreibungswiderstandes in Form einer sehr flachen Parabel mit fortschreitendem Reibweg kleiner zu werden, bis sie eine konstant bleibende Höhe erreichte. Im Gegensatz dazu blieb die Horizontalkraft bei den Wiederholungsversuchen nach Erreichen des Höchstwertes konstant, so daß nach 2 cm Reibweg der Gleitreibungskoeffizient höher ausfiel als nach dem ersten Reibversuch.

3.2.10 Holz längs/Hirnholz mit Betonresten

Hergestellt wurden die Versuchskörper dieser Reihe analog zu der in 3.2.9 beschriebenen Versuchsanordnung. Dabei wurden Hirnhölzer 12/12/5 cm verwendet. Die ermittelten Haftreibungsbeiwerte lagen im Mittel um 7% unter den Werten aus Holz längs/Hirnholz, aber um ca. 6% höher als aus der Kombination Holz längs/Holz längs mit Betonresten.

Das bedeutete, daß sich die Betonreste auf den Hirnholzoberflächen negativ auf die Aufnahme von Reibungskräften auswirkten. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, daß sich die im Spätholz liegenden Vertiefungen der Hirnholzoberfläche mit Zementschlamm vollsetzten und sich dadurch nach dem Erhärten neben den Spätholzringen Betonringe ausbildeten, so daß eine relativ ebene Oberfläche entstand. Zudem konnten auf diesen Betonringen die Sandkörner besser abrollen, als auf den Holzoberflächen. Die Lastverschiebungslinien hatten die Form des Typs B. Aus den Wiederholungsversuchen ergaben sich Abminderungen der Haftreibungsbeiwerte um 16,2%, der Gleitreibungsbeiwerte um 4,1%.

3.2.11 Holz längs/Holz längs mit Fettresten

Erwartungsgemäß traten bei dieser Versuchsreihe die kleinsten Reibungsbeiwerte aller hier durchgeführten Versuche auf. In ihrer Größenordnung lagen sie im Mittel bei $\mu_H = 0,211$ und $\mu_G = 0,091$, was gegenüber den Holz längs/Holz längs-Werten eine Verringerung von ca. 72% für μ_H und ca. 80% für μ_G bedeutete. Hergestellt wurden die Versuchskörper, indem die Reibflächen der Hölzer 25/25/5 cm mit einer dünnen Schicht Kugellagerfett, wie es zur Abschmierung bewegter Maschinenteile gebraucht wird, bestrichen wurden. Damit sollte eine Verschmutzung von hölzernen Auflagerungen mit Fettresten auf der Baustelle nachgeahmt werden. Die Lastverschiebungslinien verliefen nach Typ A. Bei den Wiederholungsversuchen zeigte sich, daß der nach dem 1. Reibversuch verbleibende Schmierfilm erhalten blieb und weitere Wiederholungsversuche nach dem 2. Versuch die gleichen Werte ergaben. Durchschnittlich war eine Abnahme der Haftreibungsbeiwerte um 33% und der Gleitreibungsbeiwerte um 5,5% zu verzeichnen.

3.2.12 Holz längs/Hirnholz mit Fettresten

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte analog der in 3.2.11 beschriebenen Weise. Die Abmessungen der Längshölzer betragen wiederum 25/25/5 cm und die der Hirnhölzer 12/12/5 cm. Auch hier wurden nur kleine Reibungsbeiwerte ermittelt. Allerdings betrug der Unterschied von Holz längs/Holz längs gegenüber Holz längs/Holz längs mit Fettresten nur noch 51% bei μ_H und 42% bei μ_G , statt 72% bzw. 80%. Gegenüber Holz längs/Hirnholz war eine Abnahme des Haftreibungsbeiwertes μ_H um 65% und des Gleitreibungsbeiwertes μ_G um 63% festzustellen. Bei den Versuchen konnte beobachtet werden, daß der Fettfilm auf der Hirnholzoberfläche beim Reiben zum größten Teil in die tiefer liegenden Frühholzflächen eingepreßt wurde. Dadurch wurde die Schmierwirkung des aufgetragenen Fettfilmes erheblich vermindert, im Gegensatz zu den Holz längs/Holz längs-Reibkörpern, wo aufgrund des Reibens längs der Faser der Schmierfilm fast vollständig erhalten blieb. Aus den erhaltenen Lastverschiebungslinien vom Typ A ergaben sich nach Wiederholungsversuchen Abmin-

derung der Haftreibungsbeiwerte im Mittel um 50,5% und der Gleitreibungsbeiwerte im Mittel um 17,3%.

3.2.13 Holz längs/Stahl mit Walzhaut

Für diese Versuchsreihen wurden Stahlplatten mit den ungefähren Abmessungen $a/b/h = 20/20/2$ cm aus St 37 verwendet. Das Material wurde aus neuen, gerade vom Walzwerk gelieferten Stahlblechen gefertigt, so daß eine gleichmäßige und saubere Walzhautoberfläche gegeben war. Die glatte Oberfläche des Stahls führte auch hier zu relativ niedrigen Reibungskoeffizienten. So lagen die mittleren Haftreibungsbeiwerte bei $\mu_H = 0,56$ um ca. 28% und die Gleitreibungsbeiwerte bei $\mu_G = 0,49$ um ca. 7% niedriger als die vergleichbaren Werte aus den Holz längs/Holz längs-Versuchen. Der Verlauf der Horizontalkraft über den Reibweg entsprach dem Typ B. Auch bei diesen Versuchen stieg die Horizontalkraft steil, fast senkrecht an, bis der Haftreibungswiderstand überschritten wurde. Das bei den bisher untersuchten Reibvorgängen plötzliche Absinken der Horizontalkraft bei Einsetzen des Gleitreibens war hier aber nicht zu beobachten. Vielmehr blieb die Horizontalkraft längs des Reibweges in Höhe der zuerst erreichten Kraft, oder sie fiel kaum merklich nahezu geradlinig ab. Nach den Wiederholungsversuchen konnte infolge einer Glättung der Holzoberfläche - die Walzhautfläche veränderte sich durch die Reibvorgänge nicht - im Mittel eine Abminderung bei μ_H von 7% und bei μ_G von 1,1% festgestellt werden.

3.2.14 Holz längs/Stahl mit grundierter Oberfläche

Auf das gleiche Material, wie es in 3.2.13 verwendet wurde - St 37 mit Walzhaut - wurde für die Versuchskörper dieser Reihe ein Grundanstrich aus schnelltrocknendem Bleimennige V 40 (n. Bundesbahnvorschrift 634/55) aufgetragen und 3,5 Tage bzw. 84 Std. trocknen gelassen. Die Abmessungen der Platten betragen auch hier $20/20/2$ cm und die der Holzteile $25/25/5$ cm. Diese Versuche ergaben höhere Reibungsbeiwerte (im Mittel $\mu_H = 0,81$, $\mu_G = 0,65$) gegenüber den Holz/Stahl-Werten ohne einen Grundanstrich.

Im Verhältnis dazu stiegen die Haftreibungsbeiwerte um 45% und die Gleitreibungsbeiwerte um 32%. Im Vergleich zu Holz längs/Holz längs waren die Werte um 5% bzw. um 42% höher. Der Kurvenverlauf der Horizontalkraft entsprach Typ B und hatte die gleichen Eigenschaften wie in 3.2.13 beschrieben. Wiederholungsversuche ergaben im Mittel Abminderungen von μ_H um 13,4% bzw. μ_G um 1,1%. Die höheren Reibungsbeiwerte gegenüber blankem Walzhaut-Stahl ergaben sich durch die von der Grundierung bewirkte verbesserte Haftung zwischen Holz und Stahl. Nach den Versuchen zeigte es sich, daß teilweise die Farbschicht von den Holzfasern aufgeraut wurde und auch Farbe am Holz anhaftete.

3.2.15 Holz längs/Stahl mit angerosteter Oberfläche
Platten 20/20/2 cm aus St 37, die ca. 1 Jahr im Freien gelagert waren, wurden mit Hölzern 25/25/5 cm zur Herstellung der Versuchskörper dieser Versuchsreihe verwendet. Ungeschützt der Witterung ausgesetzt hatten die Platten einen gleichmäßigen, fest anhaftenden Rostüberzug gebildet, der nun eine raue Oberfläche abgab. Aus diesem Grunde kam es bei den Reibversuchen zu einer guten Haftung zwischen Holz- und Stahloberfläche, was zu hohen Reibungskoeffizienten führte. Im Mittel betragen sie bei Haftreibung 0,99 und bei Gleitreibung 0,74. Im Gegensatz zur blanken Walzhaut bedeutete das einen Anstieg von 77 bzw. 51%, zu grundiertem Stahl eine Erhöhung um 22 bzw. 14% sowie zu Holz längs/Holz längs eine Steigerung von 28 bzw. 62%. Die Lastverschiebungslinien verliefen im Gegensatz zu 3.2.13 und 3.2.14 nicht kontinuierlich, sondern – wie schon in 3.2.1 beschrieben – stoßweise, ähnlich dem Typ C, aber auch mit fast konstant bleibender Horizontalkraft längs des Reibweges (siehe 3.2.13). 29,2% Abminderung des Haftreibungsbeiwertes und 10,4% Abminderung des Gleitreibungswertes aus dem 1. Reibversuch ergaben die nachfolgend durchgeführten Wiederholungsversuche. Der stärkste Abfall der Reibungsbeiwerte wurde beim 1. Wiederholungsversuch festgestellt, denn beim

erstmaligen Reiben hatte sich die obere raue Rostbeschichtung abgerieben und in den Vertiefungen der Holzoberfläche festgesetzt, so daß beide Materialien, Holz und Stahl, glattere Oberflächen aufwiesen. Bei weiteren Wiederholungsversuchen veränderte sich die Rauigkeit der Oberfläche dann nur noch unwesentlich.

3.2.16 Hirnholz/Beton

Der Aufbau der Versuchskörper war der gleiche wie in Abschnitt 3.2.7 beschrieben, nur wurden hier statt der Längshölzer Hirnhölzer 12/12/5 cm verwendet. Als mittlerer Haftreibungswert ergab sich ein gleich hoher Wert $\mu_H = 0,93$ wie bei Holz längs/Beton, was überraschte, da alle durchgeführten Hirnholz-Versuche höhere Reibungswerte aufwiesen als die entsprechenden Versuche mit Holz längs. Vermutlich war eine geringere Verbundwirkung die Ursache, denn wie schon mehrfach ausgeführt, rieben die Hirnhölzer nur auf den kreisringförmigen Spätholzflächen, die sich aber mit der Betonoberfläche nicht so verzahnen konnten, wie dies bei Holz längs möglich war. Die Lastverschiebungslinien entsprachen Typ A, bestanden aber aus wesentlich flacheren Parabeln. Bei den Wiederholungsversuchen konnte eine maximale Abminderung von μ_H um 28% und μ_G um 19,6% festgestellt werden.

3.2.17 Hirnholz/Stahl mit Walzhaut

Die Versuchskörper waren ähnlich wie in 3.2.13 aus Stahlplatten St 37 12/12/2 cm und Hirnhölzern 10/12/5 cm zusammengesetzt. Der ermittelte Haftreibungsbeiwert $\mu_H = 0,56$ war genau so hoch, wie der bei Holz längs/Stahl mit Walzhaut festgestellte Wert. Wie bei anderen Hirnholzversuchen war auch hier auf den Hirnholzoberflächen deutlich zu sehen, daß nur der Spätholzanteil in den Jahrringflächen als Reibfläche beansprucht wurde. Zerstörungen der Holzfasern konnten nach dem Reiben nicht festgestellt werden, nur ein Glätten aufgrund des Reibens auf der Stahlfläche, wobei diese keiner-

lei Veränderungen aufwies. Bei dieser Materialkombination, Holz/Stahl mit Walzhaut, spielte vermutlich nur die vorhandene Rauigkeit der Stahloberfläche eine Rolle, während die Struktur der Holzoberfläche kaum einen Einfluß auf den Reibungskoeffizient ausübte. Die Lastverschiebungslinien verliefen analog zu 3.2.13 nach Typ B. So ergaben sich nach den Wiederholungsversuchen mittlere Abminderungen von μ_H um 14,7% und von μ_G um 4,5%.

3.2.18 Hirnholz/Stahl mit grundierter Oberfläche

Aus diesen Versuchen ergaben sich die zweithöchsten Reibungsbeiwerte der mit Materialkombinationen durchgeführten Versuchsreihen. Die Oberflächen der Stahlplatten wurden analog wie in 3.2.14 behandelt. Die Versuche ergaben Lastverschiebungslinien nach Typ B. Infolge der hohen Haftung des Holzes auf der grundierten Stahloberfläche waren die Haft- und Gleitreibungsbeiwerte bei den Wiederholungsversuchen nur unwesentlich geringer (2,6% bzw. 3,2%) als nach dem 1. Reibversuch. Es konnte beim Versuch beobachtet werden, daß die aufgebrachte Grundierung auf den Stahlplatten durch den Reibvorgang vom Holz größtenteils zerstört wurde. Die abgeriebene Farbe setzte sich auf den Spätholzjährringen fest, so daß auch bei den Wiederholungsversuchen stets Grundierungsfarbe zwischen den Reibflächen vorhanden war und damit eine gute Haftung gegeben war. Im Mittel lagen die Haftreibungsbeiwerte bei 1,03 und die Gleitreibungsbeiwerte bei 0,66.

3.2.19 Hirnholz/Stahl mit angerosteter Oberfläche

Die Versuchsdurchführung und der Versuchsablauf ergaben sich analog wie in Abschnitt 3.2.15, Holz längs/Stahl mit angerosteter Oberfläche. Die erhaltenen Lastverschiebungslinien entsprachen dem Typ C. Als mittlere Reibungsbeiwerte ergaben sich μ_H -Werte von 1,11 und μ_G -Werte von 0,75. Das waren neben den Werten aus dem vorhergehenden Abschnitt die höchsten ermittelten Reibungskoeffizienten aus allen untersuchten Materialkombinationen bei $u = 20 - 25\%$ und $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$. Sie entsprachen etwa dem 1,4 bzw. 1,6-fachen der Werte aus Holz längs/Holz längs-Versuchen. Die ermittelten maximalen Reibungsbeiwerte waren nach drei Wiederholungsversuchen im Mittel um 32% bei μ_H und 15% bei μ_G niedriger als nach dem ersten Reibversuch.

In Bild 5 und 6 sind die gemessenen maximalen, mittleren und minimalen Reibungsbeiwerte der durchgeführten Versuchsreihen bei Reibung von Holz auf Holz für die 3 Holzfeuchtigkeitsbereiche und Druckspannungen von 0,1 und 0,6 N/mm² als Balkendiagramme aufgetragen. Die Reibungsbeiwerte der Reibungsverhältnisse Holz/Holz, Holz mit Verunreinigungen auf den Reibflächen und Holz mit anderen Materialien sind in Bild 7 aufgetragen. Bei diesen Versuchsreihen betrug die Holzfeuchtigkeit 20 - 25% und die Flächenpressung 0,6 N/mm². Aus den Diagrammen gehen die Unterschiede in der Höhe der Koeffizientenwerte zwischen den einzelnen Versuchsreihen deutlich hervor. Aus dem Vergleich von Bild 5 und 6 ist ersichtlich, daß - von wenigen Ausnahmen abgesehen - bei höherer Vorspannung der Reibungsbeiwert μ geringer ist als bei niedriger Vorspannung, wie auch aus den zugehörigen Einzelwerten der Tabelle 4a und b hervorgeht. Die Zahlenwerte zu Bild 7 sind in Tabelle 4b zusammengestellt.

Bild 8 zeigt für die Holz/Holz-Reibversuche die Verhältnismittelwerte der mittleren Reibungsbeiwerte jeder Versuchsreihe für niedrige (0,1 N/mm²) und hohe (0,6 N/mm²) Druckspannung. Sie sind für Haft- und Gleitreibung und für die 3 Feuchtigkeitsbereiche dargestellt. In Tabelle 5 sind die zugehörigen Zahlenwerte für die mittleren Verhältnismittelwerte und die Extremwerte angegeben.

4. Zusammenfassung

Zur Ermittlung von Reibungsbeiwerten für den Gleitsicherheitsnachweis für die Baustoffe Holz, Beton und Stahl bei Reibung zwischen den gleichen Baustoffen und Baustoffkombinationen von Traggerüsten wurden die zugängliche Literatur auf ermittelte Reibungskoeffizienten durchgesehen und ergänzend zusätzliche Reibversuche durchgeführt. Da beim Ablauf eines Gleitvorganges, der nach Ueberwindung des Reibungswiderstandes in Gang kommt, in der Regel der Haftwiderstand bei Beginn der Bewegung sich vom Gleitwider-

stand unterscheidet, wurden in erster Linie die Haftreibungswerte erfaßt. Bei den Versuchen konnten auch anhand der Lastverschiebungslinien die Gleitreibungswerte festgestellt werden, die für die einzelnen Versuchsreihen bei der Zusammenstellung der Ergebnisse mitaufgenommen wurden.

Für Reibung von Beton auf Beton konnten aus der Literatur Haftreibungskoeffizienten von 0,48 bis 0,94, für Reibung von Beton auf einer ebenen Mörtelfuge Werte von 0,48 bis 1,77 und bei verzahnten Mörtelfugen Werte im Bereich zwischen 0,71 und 3,34 entnommen werden. Die Unterschiede in der Höhe der Reibungskoeffizienten gehen teilweise auf den starken Einfluß der wirksamen Druckspannung in den Reibflächen zurück, da der Reibungsbeiwert im allgemeinen mit wachsender Druckspannung abnimmt. Diese Tatsache war auch bei allen anderen Materialkombinationen, wenn auch nicht so deutlich, festzustellen. Bei Reibung von Stahl auf Stahl reichten die Reibungsbeiwerte aufgrund unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit von $\mu = 0,08$ bei feuerverzinkter Oberfläche bis $\mu = 0,99$ bei sandgestrahlter und spritzverzinkter Oberfläche. Bei överschmutzten Stahl-Oberflächen muß mit Werten von 0,10 bis 0,12 gerechnet werden. Die für Reibung von sägerauhem Fichtenholz in Faserrichtung in der Literatur angegebenen Reibungskoeffizienten erstreckten sich von 0,20 bis 1,07. Sie sind sowohl von der Druckspannung als auch vom Feuchtigkeitsgehalt des Holzes abhängig. Eine graduelle Einstufung erschien nur nach Durchführung weiterer Versuche möglich.

Zur Ermittlung der Reibungsbeiwerte von Holz auf Holz bei verschiedener Anordnung der Faser- zur Reibrichtung und Holz auf anderen Materialien wie Beton, Mörtel und Stahl wurden praktische Reibversuche mit sägerauhem Fichtenholz durchgeführt. Für die Reibung Holz auf Holz wurde der Einfluß unterschiedlicher Holzfeuchtigkeit bei zwei verschiedenen Druckspannungen in den Reibflächen für 6 Kombinationen von Längs- und Hirnholz untersucht. Dabei ergaben sich Haftreibungswerte von 0,60 bis

1,37 bei einer Flächenpressung von $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und von 0,29 bis 1,22 bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$. Die geringsten Werte wurden bei trockenem Holz festgestellt, während zwischen halbtrockenem und nassem Holz kein eindeutiger Unterschied zu verzeichnen war. Holz längs/längs und Holz längs/quer ergaben nahezu gleiche Werte, während bei den übrigen Kombinationen mit Hirnholz und Querholz in der Regel höhere Haftreibungswerte erhalten wurden. Die Gleitreibungskoeffizienten lagen nach einem Verschiebungsweg von ca. 2 cm zwischen 0,37 und 1,07 bei $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und zwischen 0,14 und 0,67 bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$. Teilweise erreichten die Gleitreibungsbeiwerte nur einen Bruchteil der zugehörigen Haftreibungsbeiwerte.

Die höchsten Werte traten bei den Reibkombinationen Holz quer/Holz quer und Holz längs/Hirnholz auf. Ein Einfluß der Jahrringordnung der Hölzer konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Auch die Annahme, daß mit steigender Holzfeuchtigkeit der Reibungswiderstand ansteigt, konnte im allgemeinen nur zwischen trockenen und halbtrockenen Probekörpern festgestellt werden, während über dem Fasersättigungspunkt ($u_F \approx 30\%$) liegende Feuchtigkeiten keinen eindeutigen Unterschied ergaben.

Größere Unterschiede in der Höhe der festgestellten Reibungskoeffizienten ergaben die Reibversuche Holz auf Beton, Mörtel und Stahl sowie Holz auf Holz, dessen Reibflächen durch Fett oder Beton verunreinigt waren. Diese Versuche wurden auf die Untersuchung der Reibungsbeiwerte bei einer Vorspannung von $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ mit Holz längs und Hirnholz sowie einer Holzfeuchtigkeit von $u = 20 - 25\%$ begrenzt. Dabei ergaben die Versuche Holz längs/Holz längs mit Fettresten auf den Reibflächen die niedrigsten und Holz längs/Stahl mit angerosteter Oberfläche die höchsten Reibungszahlen. Die Anordnung der Jahrringe erbrachte auch bei diesen Versuchen keinen deutlichen Einfluss auf die Höhe der Reibungsbeiwerte. Verunreinigungen der Holzoberflächen durch Beton- oder Fettreste verringern den Reibwiderstand, bei Holz/Stahlkombinationen ergibt Stahl mit Walzhaut die geringsten, angerosteter Stahl die höchsten Reibungsbeiwerte.

5. Vorschlag
für die in Tabelle 2 DIN 4421 aufzunehmenden Reibungsbeiwerte

Als Folgerung der aus dem Forschungsauftrag "Ermittlung von Reibungsbeiwerten" gewonnenen Erkenntnisse können für die Festlegung von oberen und unteren Haftreibungswerten folgende Werte vorgeschlagen werden :

Baustoffkombinationen	Max. Wert	Min. Wert
Holz/Holz Reibfläche parallel oder quer zur Faser	1,0	0,4
Holz/Holz Mindestens eine Reibfläche senkrecht zur Faser (Hirnholz)	1,0	0,6
Holz/Stahl	1,2	0,5
Holz/Beton (Mörtelbett)	1,0	0,8
Stahl/Stahl	0,8	0,2
Beton/Beton	1,0	0,5
Stahl/Beton	0,4	0,2

Es ist darauf hinzuweisen, daß Verunreinigungen der Gleitflächen die Reibbeiwerte stark abmindern und die Gleitbeiwerte nach Ueberwinden des Haftwiderstandes nur einen Bruchteil der Haftbeiwerte betragen können.

Tabelle 1: Zusammenstellung aus der Literatur entnommener Haftreibungskoeffizienten

Reibung zwischen:	Reibungskoeffizient μ_H			Quelle	Bemerkungen, σ_v in $[N/cm^2]$
	max	mittel	min		
1. Beton/Beton	0,76	0,63	0,48	2	B 300, $\sigma_v = 8,9-15,5$ B 300, $\sigma_v = 1,7-6,5$
	0,94	0,82	0,77	3	
2. Beton/ebene Mörtelfuge	1,77	1,72	1,68	1	B 300, $\sigma_v = 1$ B 300, $\sigma_v = 2,2$ B 300, $\sigma_v = 1,6-6,5$ B 300, $\sigma_v = 9,6-11,4$ aus Versuchen d. engl. Cement and Concrete Assoc.
	1,02	0,86	0,70	1	
	1,08	0,80	0,69	3	
	0,53	0,51	0,48	3	
	0,77	0,71	0,65	3	
3. Beton/verzahnte Mörtelfuge	1,44	0,93	0,71	3	B 300, $\sigma_v = 1,6-6,5$ B 300, $\sigma_v = 1,0$ B 300, $\sigma_v = 2,5$
	3,34	2,68	2,03	1	
	1,63	1,51	1,39	1	
4. Stahl/Stahl (S= 37)	0,59	0,36	0,18	10	Oberflächenbeschaffenheit: -m. Drahtstränge gewalzt -sandgestrahtet -Salzhaut -Salzhaut u. Zementierung -sandgestrahtet mit Grundierung -feuerverzinkt -feuerverzinkt -sandgestrahtet u. anschließend verzinkt -Seigerung durch Mineralelektrolyse
	0,77	0,66	0,43	10	
	0,59	0,55	0,49	10	
	0,81	0,57	0,32	9	
	0,40	0,35	0,31	10	
	0,55	0,32	0,31	10	
	0,54	0,52	0,48	10	
	0,65	0,51	0,38	9	
	0,36	0,19	0,08	9	
	0,19	0,15	0,12	10	
	0,59	0,65	0,42	9	
	0,20	0,16	0,13	11	
0,12	0,12	0,11	7		
5. Stahl/Holz	-	0,1	-	8	-Glatter Stahl, Niofer -Glatter Stahl, Niofer -unpolierter Stahl/ Holz ($u=10-25\%$) -unpolierter Stahl/ Holz ($u \geq 30\%$)
	-	0,1	-	8	
	-	0,65	-	12	
	-	0,70	-	12	
6. Holz längs/ Holz längs Pflanze sägerauh	0,557	0,489	0,317	4	$\left. \begin{array}{l} u=10-17\%/o \\ u=20-25\%/o \\ u \geq 30\%/o \end{array} \right\} \sigma_v = 0,1-0,1$ $\left. \begin{array}{l} u = 10-15\%/o \\ u = 10-15\%/o \end{array} \right\} \sigma_v = 0,001-1,01$ ungefeuchtet u > 30% weitere Lagerung und 1 Lage Feinsand 1 Lage Grobsand
	0,957	0,686	0,530	4	
	1,07	0,925	0,650	4	
	0,50	0,49	0,47	6	
	-	0,30	-	6	
	-	0,34	-	6	
	0,50	0,38	0,25	11	
	-	0,468	-	5	
	-	0,92	-	6	
	-	0,20	-	11	
	-	0,29	-	6	
	-	0,54	-	6	
-	0,67	-	6		

QUELLENVERZEICHNIS zu Tabelle 1

- 1 Dörnen, K.
Meyer, A. Emsbrücke Hembergen in dübellosem Stahlverbund
Der Stahlbau, 29. Jahrg. H 7 1960 S. 199
- 2 Fiedler, K. Versuche über den Reibungskoeffizienten in den Fugen
zusammengespannter Betonfertigteile
Bauplanung - Bautechnik 16 Jg. H 3 März 1962 S.142
- 3 Franz, G. Versuche über die Querkraftaufnahme in Fugen von Spannbeton-
trägern aus Fertigteilen
Beton + Stahlbeton 54. Jg. H 6 Berlin 1959 S.137
- 4 Möhler, K.
Maier, G. Der Reibbeiwert bei Fichtenholz im Hinblick auf die Wirksamkeit
reibschlüssiger Holzverbindungen
Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 27 (1969) S. 303-307
- 5 Stôsic, D. Untersuchungen über den stat. Reibungskoeffizienten des Holzes
Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 17 H 3 1959
- 6 Gaber, E. Versuche über die Reibung von Nadelholz
Holz als Roh- und Werkstoff 3. Jg. H 4 1940
- 7 Kollmann, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe
2. Auflage Springer-Verlag Berlin 1951
- 8 Lemoine, T. J.
Koch, P. Coefficient of Friction of Dry Slashpine and Southern
Redoak on Three Tension Grip Facings
Wood Science Jan. 1975 Vol.7 Nr. 3 Page 182
- 9 Valtinat, G. Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau im Hinblick
auf Schraubenverbindungen
Beratung Feuerverzinken, Hagen
- 10 Möhler, K.
Steinhardt, O. Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau
Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau
Heft 18, 22, 24, 25.
- 11 Bowden, F.P.
Tabor, D. Reibung und Schmierung fester Körper
Springer Verlag 1959
- 12 Mc Kenzie, W.M.
Karpovich, H. The Frictional Behaviour of Wood
Wood Science and Technology Vol.2 (1968) Page 139/152

Tabelle 2: Haft- und Gleitreibungskoeffizienten
aus den Hauptversuchen

a) Reibung von Holz auf Holz

Nr.	Reibung zwischen	σ_v [N/mm ²]	Haftreibung			Gleitreibung		
			μ_H			μ_G		
			Holzfeuchtigkeit u in [°/o]					
		10-14	20-25	≥ 30	10-14	20-25	≥ 30	
1	Holz längs/Holz längs	0,1	0,791	1,084	1,089	0,508	0,647	0,752
		0,1	0,667	1,117	0,927	0,525	0,655	0,672
		0,1	0,850	0,882	0,833	0,542	0,647	0,537
	Mittelwert:	\bar{x}	0,769	1,028	0,950	0,525	0,650	0,654
	Typ nach Bild 4:	K	A	A	C	A	A	C
		0,6	0,639	0,775	0,780	0,403	0,405	0,138
		0,6	0,649	0,769	0,625	0,458	0,459	0,269
		0,6	0,625	0,782	0,793	0,389	0,506	0,336
		\bar{x}	0,638	0,775	0,733	0,417	0,456	0,248
		K	C	C	C	C	C	C
2	Holz längs/Holz quer	0,1	0,755	0,975	0,935	0,534	0,705	0,740
		0,1	0,755	0,951	0,955	0,516	0,705	0,711
		0,1	0,749	0,975	0,943	0,413	0,754	0,732
		0,1	0,629	1,030	1,065	0,403	0,754	0,711
		0,1	0,604	0,976	0,833	0,420	0,738	0,610
		\bar{x}	0,698	0,981	0,946	0,457	0,731	0,701
		K	A	A	A	A	A	A
		0,6	0,631	0,806	0,779	0,445	0,547	0,271
		0,6	0,710	0,799	0,728	0,438	0,587	0,339
		0,6	0,717	0,806	0,650	0,416	0,492	0,339
	0,6	0,728	0,806	0,661	0,448	0,587	0,373	
	0,6	0,630	0,799	0,813	0,469	0,560	0,339	
	\bar{x}	0,683	0,803	0,726	0,443	0,555	0,332	
	K	C	C	C	C	C	C	
3	Holz längs/Hirnholz	0,1	0,657	1,337	1,137	0,402	0,972	1,030
		0,1	0,748	0,938	1,146	0,365	0,816	0,694
		0,1	0,748	1,059	1,181	0,493	0,781	0,833
		\bar{x}	0,718	1,111	1,155	0,420	0,856	0,852
		K	A	A	A	A	A	A
		0,6	0,441	0,746	0,938	0,243	0,503	0,590
		0,6	0,395	0,990	0,938	0,295	0,590	0,556
		0,6	0,365	0,851	0,781	0,228	0,504	0,451
		\bar{x}	0,400	0,862	0,886	0,255	0,532	0,532
		K	A	C	C	A	C	C

4	Holz quer/Holz quer	0,1	0,771	1,170	1,054	0,500	-	0,731
		0,1	0,749	1,220	0,968	0,563	0,813	0,667
		0,1	0,792	1,098	0,968	0,458	0,711	0,710
		0,1	1,042	0,894	0,860	0,771	0,610	0,645
		0,1	0,833	1,179	1,030	0,542	0,732	0,753
		\bar{x}	0,837	1,112	0,976	0,567	0,717	0,701
		K	A	A	A	A	A	A
		0,6	0,852	0,796	0,955	0,667	0,519	0,441
		0,6	1,148	0,815	1,010	0,426	0,519	0,459
		0,6	0,815	0,937	0,918	0,593	0,611	0,321
		0,6	0,741	0,769	1,083	0,333	0,556	0,422
		0,6	0,815	1,037	1,221	0,556	0,620	0,441
		\bar{x}	0,874	0,871	1,037	0,515	0,565	0,417
		K	A	A	A	A	A	A
5	Holz quer/Hirnholz	0,1	0,820	1,130	1,065	0,780	1,065	0,880
		0,1	0,790	1,065	1,366	0,530	0,752	0,948
		0,1	0,840	0,857	0,764	0,432	0,671	0,718
		\bar{x}	0,817	1,017	1,065	0,581	0,829	0,849
		K	A	A	B	A	A	B
		0,6	0,901	0,926	0,763	0,590	0,579	0,495
		0,6	0,803	0,896	0,770	0,625	0,731	0,434
		0,6	0,969	0,868	0,903	0,591	0,535	0,521
		\bar{x}	0,891	0,897	0,812	0,602	0,615	0,483
		K	A	A	B	A	A	B
6	Hirnholz/Hirnholz	0,1	1,369	0,741	0,998	0,492	0,741	0,677
		0,1	0,620	0,833	0,991	0,475	0,671	0,677
		0,1	1,258	0,949	1,302	0,639	0,625	0,660
		\bar{x}	1,082	0,841	1,097	0,535	0,679	0,671
		K	A	B	B	A	B	B
		0,6	0,521	0,903	0,942	0,377	0,486	0,432
		0,6	0,287	0,923	0,848	0,211	0,567	0,556
		0,6	0,467	0,833	0,818	0,264	0,451	0,386
		\bar{x}	0,425	0,886	0,869	0,284	0,501	0,458
		K	B	C	C	B	C	C

- b) Reibung zwischen Holz und anderen Materialien
 bei $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$ Druckspannung
 und $u = 20-25\%$ Holzfeuchtigkeit

Nr.	Reibung zwischen	σ_v	μ_H	μ_G
7	Holz längs/Beton	0,6	0,930	0,644
		0,6	0,918	0,509
		0,6	0,930	0,513
		\bar{x}	0,926	0,555
		K	C	C
8	Holz längs/ Mörtelbett	0,6	0,998	0,716
		0,6	0,868	0,630
		0,6	1,063	0,586
		\bar{x}	0,976	0,644
		K	A	A
9	Holz längs/ Holz längs mit Betonresten	0,6	0,748	0,599
		0,6	0,748	0,598
		0,6	0,776	0,599
		\bar{x}	0,757	0,599
		K	B	B
10	Holz längs/ Hirnholz mit Betonresten	0,6	0,755	0,633
		0,6	0,810	0,653
		0,6	0,847	0,709
		\bar{x}	0,804	0,675
		K	B	B
11	Holz längs/ Holz längs mit Fettresten	0,6	0,260	0,109
		0,6	0,155	0,077
		0,6	0,220	0,088
		\bar{x}	0,211	0,091
		K	A	A
12	Holz längs/ Hirnholz mit Fettresten	0,6	0,492	0,211
		0,6	0,276	0,165
		0,6	0,322	0,175
		0,6	0,487	0,230
		\bar{x}	0,394	0,195
K	A	A		
13	Holz längs/ Stahl mit Walzholz	0,6	0,556	0,500
		0,6	0,547	0,453
		0,6	0,539	0,537
		0,6	0,552	0,469
		\bar{x}	0,561	0,489
K	B	B		

14	Holz längs/ Stahl mit grundier- ter Oberfläche	0,6	0,861	0,660
		0,6	0,806	0,639
		0,6	0,778	0,583
		0,6	0,808	0,707
		\bar{x}	0,813	0,647
		K	B	B
15	Holz längs/Stahl mit angerosteter Oberfläche	0,6	1,148	0,815
		0,6	0,990	0,699
		0,6	0,838	0,701
		\bar{x}	0,992	0,738
		K	C	C
16	Hirnholz/Beton	0,6	0,859	0,713
		0,6	0,974	0,652
		0,6	0,950	0,670
		\bar{x}	0,928	0,678
		K	A	A
17	Hirnholz/ Stahl mit Walzhaut	0,6	0,623	0,533
		0,6	0,482	0,346
		0,6	0,561	0,447
		\bar{x}	0,555	0,442
		K	B	B
18	Hirnholz/Stahl mit grundierter Oberfläche	0,6	0,980	0,591
		0,6	1,100	0,721
		0,6	1,010	0,662
		\bar{x}	1,030	0,658
		K	B	B
19	Hirnholz/Stahl mit angerosteter Oberfläche	0,6	1,077	0,721
		0,6	1,077	0,675
		0,6	1,168	0,849
		\bar{x}	1,107	0,748
		K	C	C

Tabelle 3: Reibungsbeiwerte von aus verschiedenen Bohlen
zusammengesetzten Versuchskörpern bei $u = 10 - 14\%$

Nr.	Reibung zwischen	σ_v [N/mm ²]	μ H	μ G	
1	Holz längs/ Holz längs	0,1	0,508	0,328	
		0,1	0,557	0,352	
		0,1	0,492	0,312	
	Mittelwert:		\bar{x}	0,519	0,330
	Typ nach Bild 4:		K	A	A
			0,6	0,669	0,471
			0,6	0,533	0,328
			0,6	0,567	0,287
			\bar{x}	0,590	0,362
			K	C	C
2	Holz längs/ Holz quer	0,1	0,629	0,403	
		0,1	0,604	0,420	
		0,1	0,537	0,352	
		0,1	0,503	0,252	
		0,1	0,537	0,302	
			\bar{x}	0,562	0,346
			K	A	A
			0,6	0,728	0,448
			0,6	0,630	0,469
			0,6	0,560	0,378
			0,6	0,574	0,364
			0,6	0,644	0,399
			\bar{x}	0,627	0,412
		K	C	C	

Tabelle 4: Zusammenstellung der maximalen, mittleren und minimalen Reibungsbeiwerte

a) $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ μ_H = Haftreibungswert, μ_G = Gleitreibungswert

Nr.	V e r s u c h	Holzfeuchtigkeit u in [°/o]									
		10 - 14			20 - 25			≥ 30			
		max	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel	min	
1	Holz längs/Holz längs	μ_H	0,850	0,769	0,667	1,117	1,028	0,882	1,089	0,950	0,833
		μ_G	0,542	0,525	0,508	0,655	0,650	0,647	0,752	0,654	0,537
2	Holz längs/Holz quer	μ_H	0,755	0,698	0,604	1,030	0,981	0,951	1,065	0,946	0,833
		μ_G	0,534	0,457	0,403	0,754	0,731	0,705	0,740	0,701	0,610
3	Holz längs/Hirnholz	μ_H	0,748	0,718	0,657	1,337	1,111	0,938	1,181	1,155	1,137
		μ_G	0,493	0,420	0,365	0,972	0,856	0,781	1,030	0,852	0,694
4	Holz quer/Holz quer	μ_H	1,042	0,837	0,749	1,179	1,112	0,894	1,054	0,976	0,860
		μ_G	0,771	0,567	0,458	0,813	0,717	0,610	0,753	0,701	0,645
5	Holz quer/Hirnholz	μ_H	0,840	0,817	0,790	1,130	1,017	0,857	1,366	1,065	0,764
		μ_G	0,780	0,581	0,432	1,065	0,829	0,671	0,948	0,849	0,718
6	Hirnholz/Hirnholz	μ_H	1,369	1,082	0,620	0,949	0,841	0,741	1,302	1,097	0,991
		μ_G	0,639	0,535	0,475	0,741	0,679	0,625	0,677	0,671	0,660

$$b) \sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$$

Nr.	V e r s u c h	Holzfeuchtigkeit u in [%]									
		10 - 14			20 - 25			≥ 30			
		max	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel	min	
1	Holz längs/Holz längs	μ_H	0,649	0,638	0,625	0,782	0,775	0,769	0,793	0,733	0,625
		μ_G	0,458	0,417	0,403	0,506	0,456	0,405	0,336	0,248	0,138
2	Holz längs/Holz quer	μ_H	0,728	0,683	0,630	0,806	0,803	0,799	0,813	0,726	0,650
		μ_G	0,469	0,443	0,416	0,587	0,555	0,492	0,373	0,332	0,271
3	Holz längs/Hirnholz	μ_H	0,441	0,400	0,365	0,990	0,862	0,746	0,938	0,886	0,781
		μ_G	0,295	0,255	0,228	0,590	0,532	0,503	0,590	0,532	0,451
4	Holz quer/Holz quer	μ_H	1,148	0,874	0,741	1,037	0,871	0,769	1,221	1,037	0,918
		μ_G	0,667	0,515	0,333	0,620	0,565	0,519	0,459	0,417	0,321
5	Holz quer/Hirnholz	μ_H	0,969	0,891	0,803	0,926	0,897	0,868	0,903	0,812	0,763
		μ_G	0,625	0,602	0,590	0,731	0,615	0,535	0,521	0,483	0,434
6	Hirnholz/Hirnholz	μ_H	0,521	0,425	0,287	0,923	0,886	0,833	0,942	0,869	0,818
		μ_G	0,377	0,284	0,211	0,567	0,501	0,451	0,556	0,458	0,386

Nr.	V e r s u c h	u = 20 - 25%			
		max	mittel	min	
7	Holz längs/Beton	μ_H	0,930	0,926	0,918
		μ_G	0,644	0,555	0,509
8	Holz längs/Mörtelbett	μ_H	1,063	0,976	0,868
		μ_G	0,716	0,644	0,586
9	Holz längs/Holz längs mit Betonresten	μ_H	0,776	0,757	0,748
		μ_G	0,599	0,599	0,598
10	Holz längs/Hirnholz mit Betonresten	μ_H	0,847	0,804	0,755
		μ_G	0,709	0,675	0,653
11	Holz längs/Holz längs mit Fettresten	μ_H	0,260	0,211	0,155
		μ_G	0,109	0,091	0,077
12	Holz längs/Hirnholz mit Fettresten	μ_H	0,492	0,394	0,276
		μ_G	0,230	0,195	0,165
13	Holz längs/Stahl mit Walzhaut	μ_H	0,589	0,561	0,547
		μ_G	0,537	0,489	0,453
14	Holz längs/Stahl mit grundierter Oberfläche	μ_H	0,861	0,813	0,778
		μ_G	0,707	0,647	0,583

Nr.	V e r s u c h	u = 20 - 25%			
		max	mittel	min	
15	Holz längs/Stahl mit angerosteter Oberfläche	μ_H	1,148	0,992	0,838
		μ_G	0,815	0,738	0,699
16	Hirnholz/Beton	μ_H	0,974	0,928	0,859
		μ_G	0,713	0,678	0,652
17	Hirnholz/Stahl mit Walzhaut	μ_H	0,623	0,555	0,482
		μ_G	0,533	0,442	0,346
18	Hirnholz/Stahl mit grundierter Oberfläche	μ_H	1,100	1,030	0,980
		μ_G	0,721	0,658	0,591
19	Hirnholz/Stahl mit angerosteter Oberfläche	μ_H	1,168	1,107	1,077
		μ_G	0,849	0,748	0,675

Tabelle 5: Verhältniswerte der maximalen, mittleren und minimalen Reibungskoeffizienten bei Druckspannungen in den Reibflächen von $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_v = 0,6 \text{ N/mm}^2$

$$\text{Haftreibungsverhältnis } v_H = \frac{\mu_H(\sigma_v = 0,1)}{\mu_H(\sigma_v = 0,6)} ;$$

$$\text{Gleitreibungsverhältnis } v_G = \frac{\mu_G(\sigma_v = 0,1)}{\mu_G(\sigma_v = 0,6)}$$

Nr.	V e r s u c h	Holzfeuchtigkeit u in [°/o]									
		10 - 14			20 - 25			≥ 30			
		max	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel	min	
1	Holz längs/Holz längs	v_H	1,31	1,21	1,07	1,43	1,33	1,15	1,37	1,30	1,33
		v_G	1,18	1,26	1,31	1,29	1,43	1,60	2,24	2,64	3,89
2	Holz längs/Holz quer	v_H	1,04	1,02	0,96	1,28	1,22	1,19	1,31	1,30	1,28
		v_G	1,14	1,03	0,97	1,28	1,32	1,43	1,98	2,11	2,25
3	Holz längs/Hirnholz	v_H	1,70	1,80	1,80	1,35	1,29	1,26	1,26	1,30	1,46
		v_G	1,67	1,65	1,60	1,65	1,61	1,55	1,75	1,60	1,54
4	Holz quer/Holz quer	v_H	0,91	0,96	1,01	1,18	1,28	1,16	0,86	0,94	0,90
		v_G	1,16	1,10	1,38	1,31	1,27	1,18	1,64	1,68	2,01
5	Holz quer/Hirnholz	v_H	0,87	0,92	0,98	1,22	1,13	0,99	1,51	1,31	1,00
		v_G	1,25	0,97	0,73	1,46	1,35	1,25	1,82	1,76	1,65
6	Hirnholz/Hirnholz	v_H	2,63	2,55	2,16	1,03	0,95	0,89	1,38	1,26	1,21
		v_G	1,70	1,88	2,25	1,31	1,36	1,39	1,22	1,47	1,71

Bild 5: Reibungsbeiwerte μ

für verschiedene Holzfeuchtigkeiten
Druckspannung $\sigma_v = 0,1 \text{ N/mm}^2$

Haftreibungsbeiwerte:

— $\mu_{H\text{mittel}}$ — $\mu_{H\text{max}}, \mu_{H\text{min}}$

Gleitreibungsbeiwerte:

— $\mu_{G\text{mittel}}$ - - - $\mu_{G\text{max}}, \mu_{G\text{min}}$

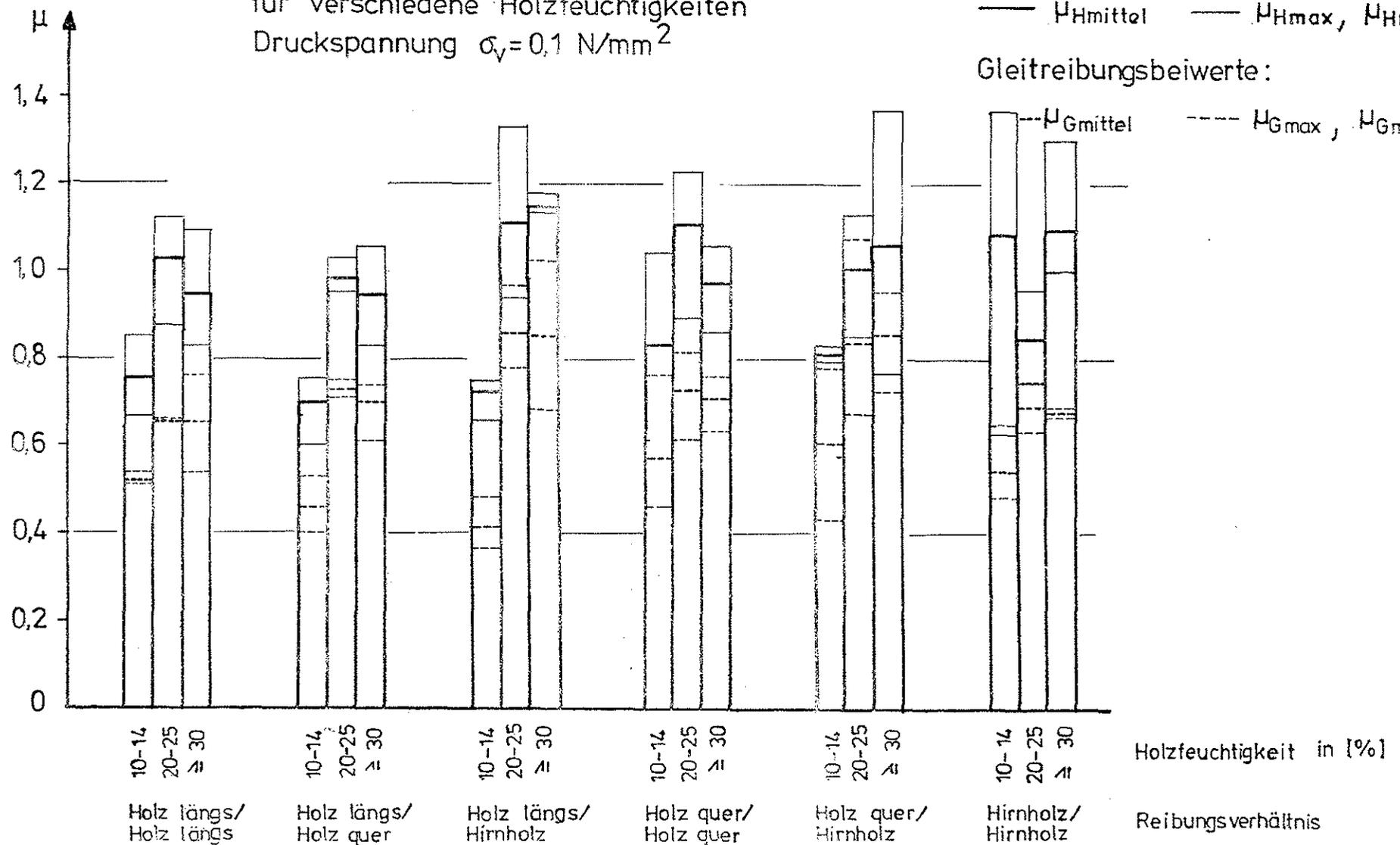


Bild 6: Reibungsbeiwerte μ

für verschiedene Holzfeuchtigkeiten
Druckspannung $\sigma_V = 0,6 \text{ N/mm}^2$

Haftreibungsbeiwerte:

— $\mu_{H \text{mittel}}$ — $\mu_{H \text{max}}, \mu_{H \text{min}}$

Gleitreibungsbeiwerte:

- - - $\mu_{G \text{mittel}}$ - - - $\mu_{G \text{max}}, \mu_{G \text{min}}$

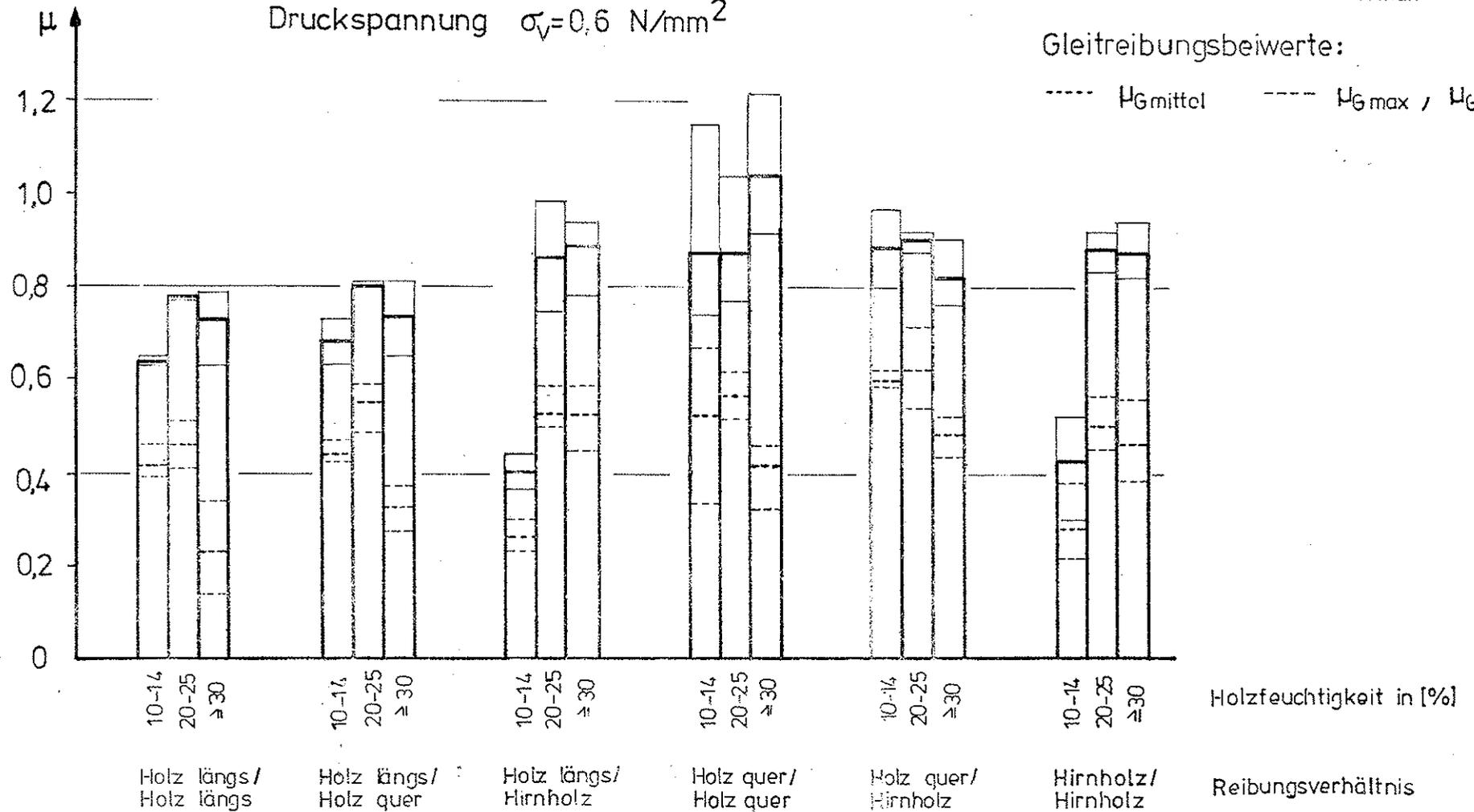


Bild 7: Reibungsbeiwerte μ

bei $u = 20 - 25\%$ Holzfeuchtigkeit,
Druckspannung $\sigma_y = 0,6 \text{ N/mm}^2$

Haftreibungsbeiwerte:

— $\mu_{H \text{ mittel}}$ — $\mu_{H \text{ max}}$ / $\mu_{H \text{ min}}$

Gleitreibungsbeiwerte:

- - - $\mu_{G \text{ mittel}}$ - - - $\mu_{G \text{ max}}$ / $\mu_{G \text{ min}}$

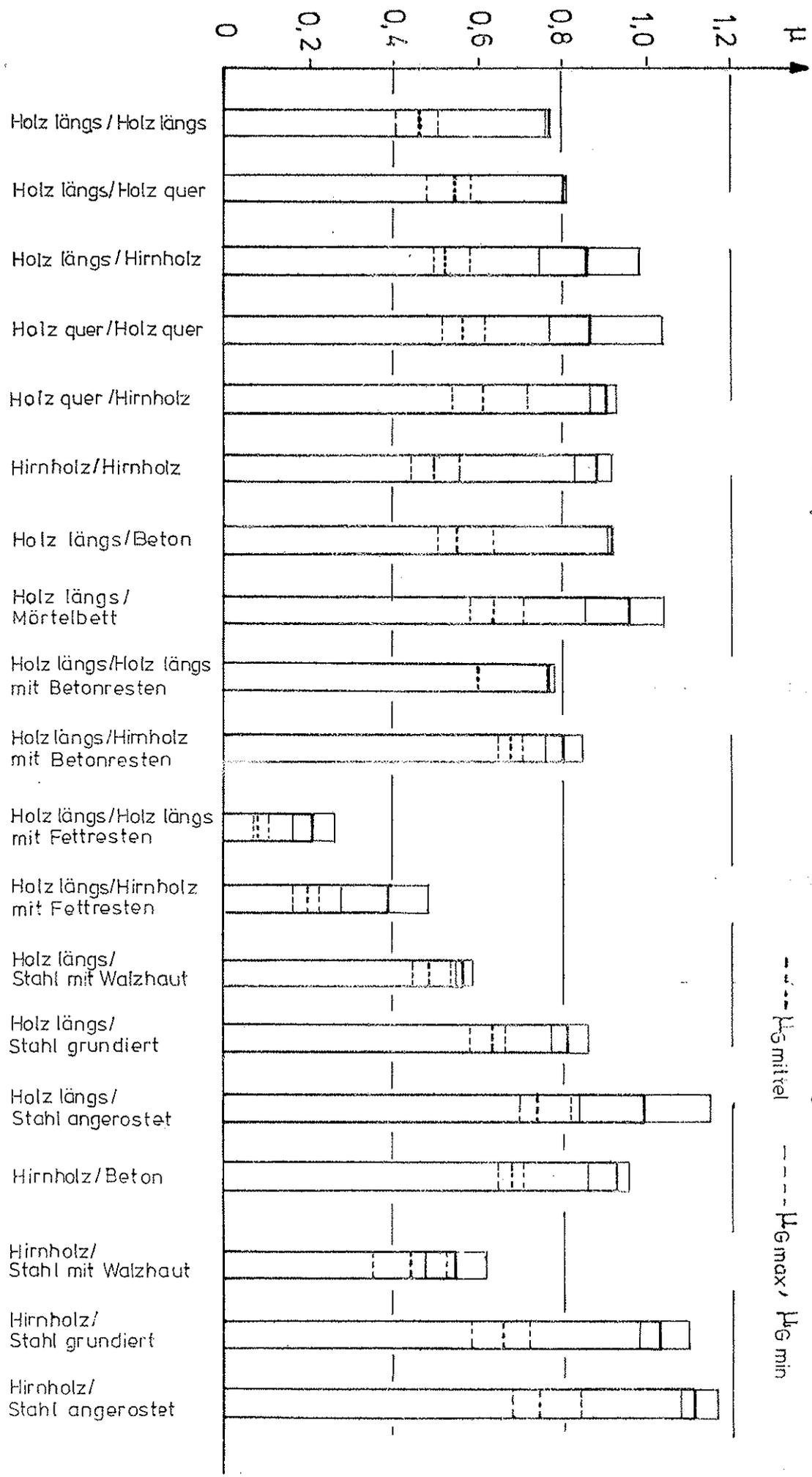
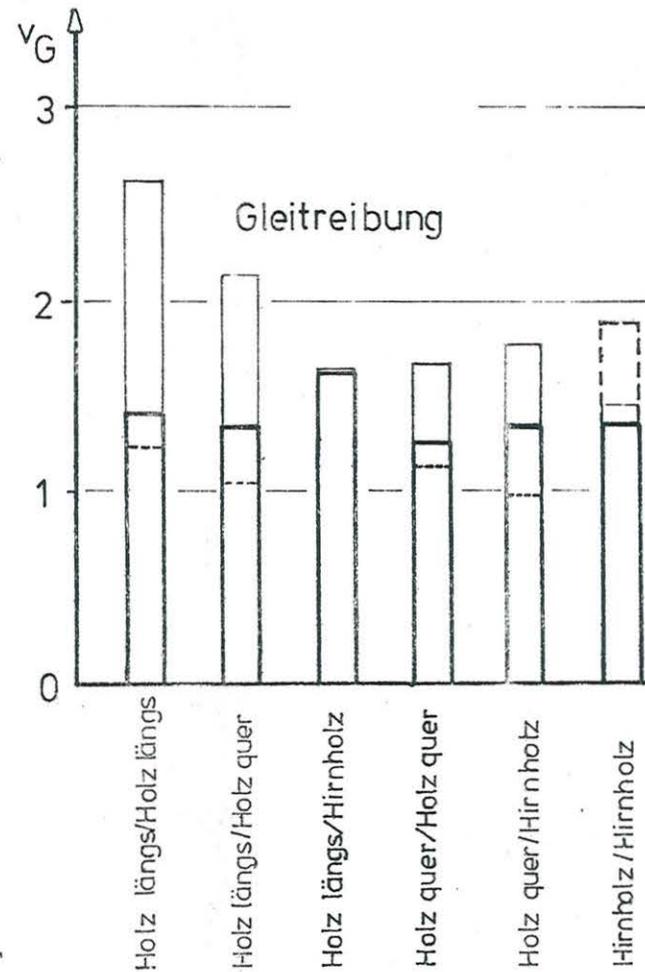
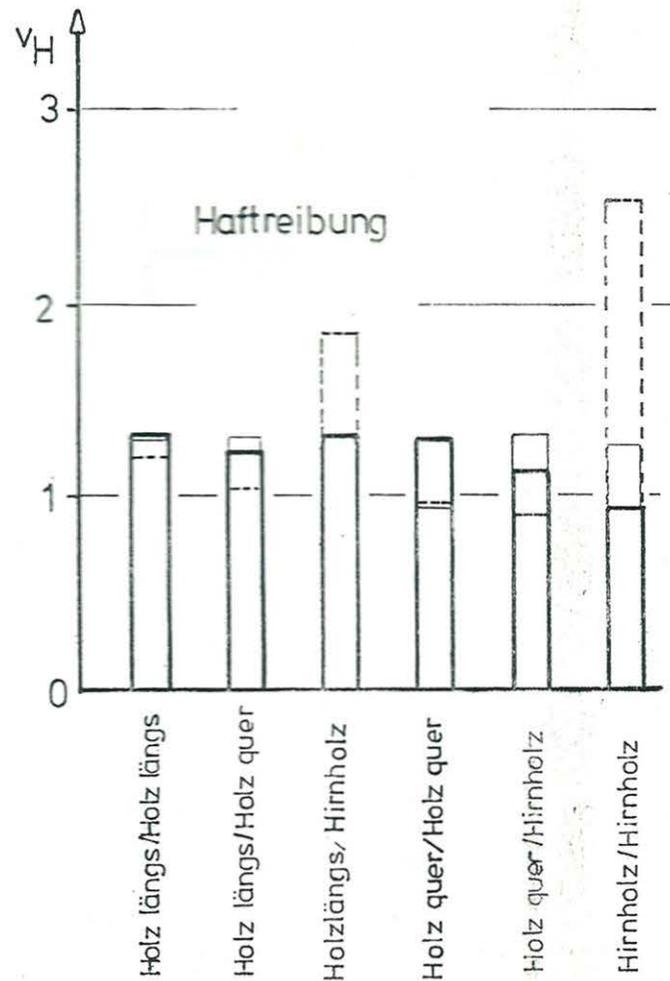


Bild 8: Verhältniswerte der mittl. Reibungskoeffizienten $\mu_{H\text{mittel}}$ bzw. $\mu_{G\text{mittel}}$ für Druckspannungen in den Reibflächen von 0.1 N/mm² und 0.6 N/mm²



$$v_{H,G} = \frac{\mu_{H,G\text{mittel}}(0.1)}{\mu_{H,G\text{mittel}}(0.6)}$$

Holzfeuchtigkeit:
 - - - 10-14 %
 ——— 20-25 %
 ——— ≥ 30 %

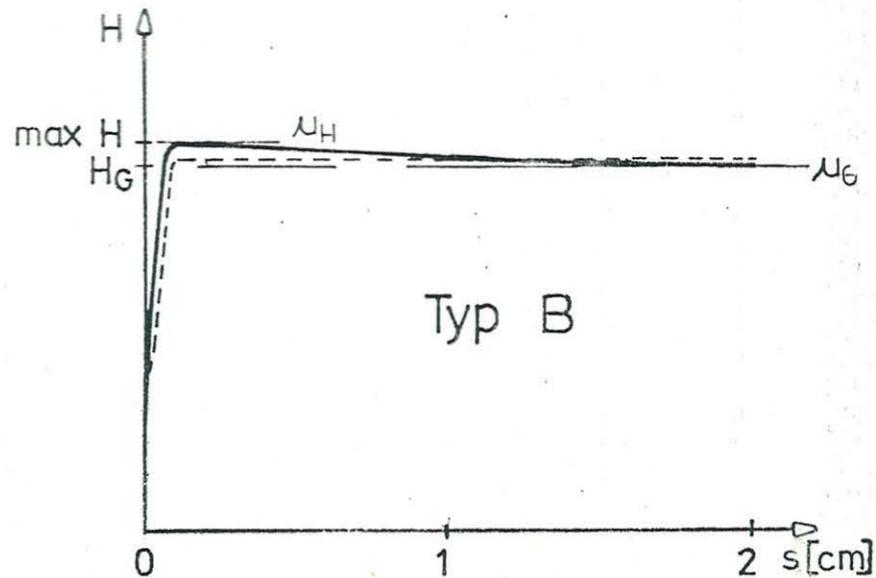
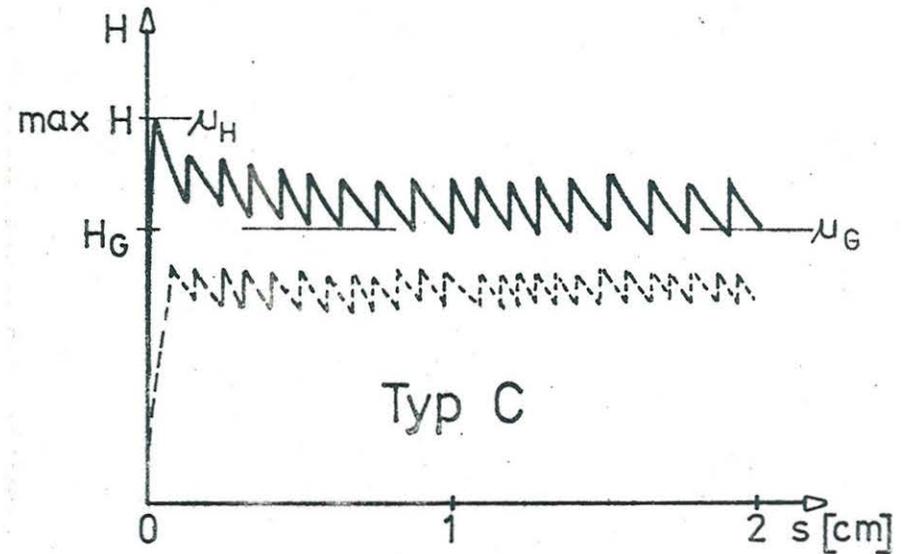
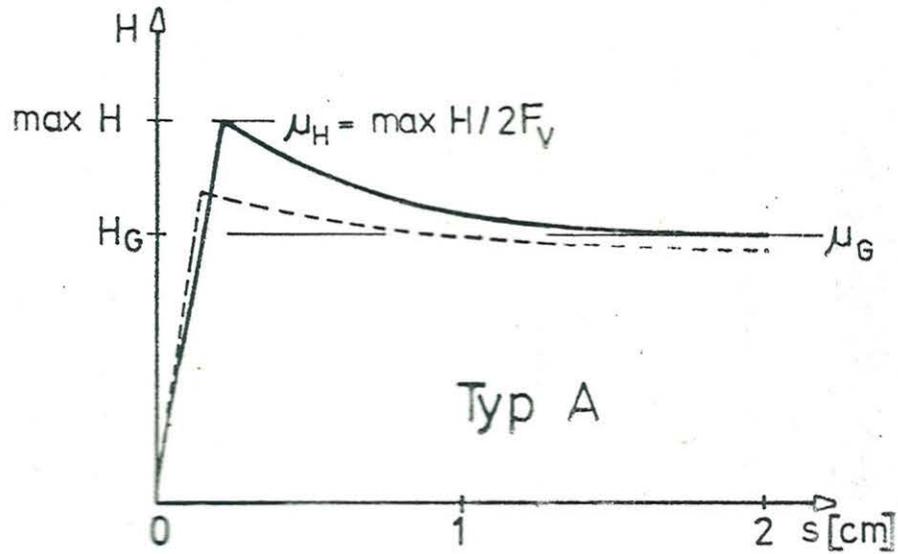


Bild 4 :

Lastverschiebungslinien aus Reibungsversuchen

- Erster Reibversuch
- - - Nach mehreren Reibdurchgängen

μ_H Haftreibungsbeiwert
 μ_G Gleitreibungsbeiwert