

Beurteilung der Rutschsicherheit von Fußböden

H. Fischer



S 84

Schriftenreihe der
Bundesanstalt für
Arbeitsschutz und
Arbeitsmedizin

b a u a :

Beurteilung der Rutschsicherheit von Fußböden

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Arbeitswissenschaftliche Erkenntnis Trittsicherheit: Beurteilung der Rutschsicherheit von Fußböden“ - Projekt F 790 E - der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Autor: Dr.-Ing. Hugo Fischer
Gruppe „Produkte, mechanische und elektrische Sicherheit“
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Umschlaggestaltung
und Fotografik: Angelika Rößler,
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Verlag/Druck: Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 - 77
E-Mail: info@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, D-44149 Dortmund
Telefon: (02 31) 90 71 - 0
Telefax: (02 31) 90 71 - 24 54
E-Mail: poststelle@baua.bund.de
Internet: www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40-42, D-10317 Berlin
Telefon: (0 30) 5 15 48 - 0
Telefax: (0 30) 5 15 48 - 41 70

Dresden:
Proschhübelstr. 8, D-01099 Dresden
Telefon: (03 51) 56 39 - 50
Telefax: (03 51) 56 39 - 52 10

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.

ISSN 1433-2140
ISBN 3-86509-393-0

Inhaltsverzeichnis

Seite

Kurzreferat	5
Abstract	6
Résumé	7
1 Einleitung	8
2 Sturzunfälle durch Ausrutschen – ein Schwerpunkt im Unfallgeschehen	9
3 Vorschriften und Regeln zur Rutschsicherheit	11
3.1 Begehungsverfahren	11
3.2 Gleitreibungsmessverfahren	12
4 Der menschliche Gang – ein komplizierter Bewegungsvorgang	13
5 Einflussfaktoren auf die Rutschsicherheit	16
6 Modell zur Beschreibung der Rutschhemmung von Bodenbelägen	18
6.1 Festkörperreibung und viskoelastische Reibung	19
6.2 Modellbildung	22
7 Biomechanische Untersuchungen beim Gehen	25
7.1 Ziel der Untersuchungen und Untersuchungsbedingungen	25
7.2 Versuchseinrichtung und Messungen	26
8 Untersuchungsergebnisse beim Geradeausgehen	30
8.1 Kräfte, die auf den Fußboden übertragen werden	30
8.2 Aufsetzgeschwindigkeit des Fußes	33
8.3 Aufsetzwinkel und Aufsetzfläche des Fußes	35
9 Untersuchungen beim Ändern der Bewegungsrichtung (im rechten Winkel, im Bogen)	36
10 Zusammenfassung der wesentlichen Bewegungsparameter und Ableitung erster Prüfparameter	41
11 Untersuchungen zur Optimierung der Prüfparameter	44
11.1 Untersuchte Materialkombinationen	44
11.2 Versuchseinrichtung	45
11.3 Wesentliche Untersuchungsergebnisse	45

12	Vorschlag von Prüfparametern und deren Realisierbarkeit in mobilen Reibungsmessgeräten	52
12.1	Auswahl der Prüfparameter	52
12.2	Prüfgeschwindigkeit	53
12.3	Flächenpressung	54
12.4	Gleitematerial	55
13	Parametervergleich mit ausgewählten ortsunabhängigen Prüfverfahren	56
13.1	Tribometerverfahren mit gleichförmiger Gleitgeschwindigkeit	56
13.2	Prüfverfahren mit ungleichförmiger Gleitgeschwindigkeit	57
13.3	Prüfverfahren zur Messung des Rutschwinkels	59
14	Bewertung der Rutschhemmung von Fußböden im Betriebszustand	61
15	Beurteilung der Rutschsicherheit auf Fußböden mit unterschiedlichem Oberflächenzustand	64
15.1	Beurteilung der Rutschsicherheit auf trockenen Fußböden	64
15.2	Beurteilung der Rutschsicherheit auf nassen Fußböden	66
15.3	Beurteilung der Rutschsicherheit nach der Reibwertdifferenz	68
16	Problemstellungen für Folgearbeiten	72
16.1	Ermittlung von Fußbodenparametern, die Einfluss auf die Rutschhemmung haben	72
16.2	Weiterentwicklung von Prüfverfahren zur Gleitreibungsmessung und Bewertung der Rutschhemmung	73
17	Literaturverzeichnis	74
18	Abbildungsverzeichnis	77
19	Tabellenverzeichnis	79
20	Formelzeichen und Abkürzungen	80
Anhang A:	Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene	81
Anhang B:	Abrollgleiter (ARG) – Gleitreibungsmessgerät mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit	85

Beurteilung der Rutschsicherheit von Fußböden

Kurzreferat

An der BAuA wurden in zurückliegenden Jahren mehrere Projekte zur Entwicklung von Prüfverfahren, insbesondere für die instationäre Messung der Gleitreibung von Fußböden bearbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in diesem Bericht zusammengefasst und bisherige Erfahrungen bei der Anwendung der Ergebnisse ausgewertet. Schwerpunkt waren biomechanische Untersuchungen der Gehbewegung in kritischen Phasen. Daraus abgeleitete Bewegungsparameter wurden über Modellbildung als Prüfparametern in gerätetechnischen Konzeptionen umgesetzt. Dabei galt es, aus der Breite der material-, geschwindigkeits- und gestaltungsbezogenen Einflussgrößen die wesentlichen Prüfparameter zu optimieren und für normgerechte Prüfverfahren vorzuschlagen. Bisherige Erfahrungen bei der Anwendung zeigen, dass insbesondere kritische unprofilierte Hartböden bei Nässe sowohl mit niedriger als auch mit erhöhter Gleitgeschwindigkeit geprüft werden sollten, wobei neben dem absoluten Reibwert die Reibwertdifferenz Auskunft über die Höhe des Rutschrisikos geben. Abschließend werden aus Problemen bei der praktischen Anwendung der Verfahren Vorschläge für Folgearbeiten, insbesondere zur Präzisierung und Weiterentwicklung der Verfahren sowie zur Geräteentwicklung unterbreitet.

Schlagwörter:

Rutschsicherheit, Rutschrisiko, Rutschhemmung, Fußböden, Prüfverfahren, Prüfgeräte

Assessment of the safety of floors against slip

Abstract

At the BAuA a number of projects have been conducted over the past few years on the development of testing procedures, especially for the non-steady-state measurement of the sliding friction in floors. The main results of these studies are compiled in this report and experience of their application is evaluated. The focus was on biomechanical studies of walking motion in critical phases. Motion parameters derived from this were applied through the formation of models as test parameters in equipment configurations. The aim was to optimise the major test parameters from a wide range of material-, speed- and design-related influencing factors, and to propose them for testing procedures according to the European standards. So far, experience of their application show that in particular critical, unprofiled hard floors in wet conditions should be tested at low and high sliding speed. In addition to the absolute friction coefficient, the difference of both friction coefficients yields information on the level of the slip risk. Finally, taking problems with the practical application of the procedures into account, proposals are put forward for follow-up work, and in particular for the closer specification and ongoing development of the procedures and equipment development.

Key words:

slip resistive, slip risk, floors, slip-resistance, test procedure, test equipment

Evaluation de la sécurité antiglissement des planchers

Résumé

A l'Institut Fédéral de la Sécurité et de la Santé au Travail (BAuA), on a travaillé au cours de ces dernières années sur plusieurs projets tendant à développer des procédés de contrôle, en particulier pour la mesure instationnaire du frottement de glissement des planchers. Les résultats essentiels de ces études sont récapitulés dans le présent rapport dans lequel on procède également à l'évaluation des expériences vécues jusqu'à présent dans l'application des résultats. L'intérêt principal a alors été porté sur les études biomécaniques du mouvement de marche dans les phases critiques. Les paramètres de mouvement ainsi obtenus furent mis en pratique, par la formation de modèles, comme paramètres de contrôle dans les conceptions techniques d'appareils. L'objectif poursuivi était d'optimiser les paramètres de contrôle essentiels à l'aide des grandeurs d'influence relatives au matériau, à la vitesse et à la conception, et de faire des propositions pour des procédés de contrôle conformes aux normes. Les expériences vécues jusqu'à présent dans l'application montrent que particulièrement les sols durs critiques sans profil devraient être contrôlés à l'état humide avec une vitesse de glissement aussi bien basse qu'élevée, étant donné que, outre le coefficient de frottement absolu, la différence de coefficient de frottement permet d'évaluer le risque de glissement. Pour finir, sur la base des problèmes rencontrés dans l'application pratique des procédés, on propose des travaux consécutifs tendant particulièrement à préciser et perfectionner les procédés et faire des propositions pour le développement des appareils.

Mots clés:

Sécurité antiglissement, risque de glissement, propriété antiglissement, planchers, procédé de contrôle, appareils de contrôle

1 Einleitung

Mit Unfällen durch Stolpern oder Ausrutschen hat schon jeder mehr oder weniger seine Erfahrungen gemacht; nicht nur bei der Arbeit oder auf dem Arbeitsweg, sondern auch im Haus- und Freizeitbereich. Sturzunfälle sind unter den bekannten Unfallarten sogenannte unspezifische Unfälle [1], d. h. sie lassen sich nicht speziellen Branchen, Prozessen oder Arbeitsmitteln zuordnen, sie treten praktisch überall auf und sind – wie bereits festgestellt – nicht nur auf den Arbeitsbereich beschränkt. Die Verhütung von Sturzunfällen steht daher nicht immer im Mittelpunkt der Aktivitäten von Sicherheitsfachkräften. Die Ursachen von Sturzunfällen werden oftmals im nicht sicherheitsgerechten Verhalten gesehen. Unfallauswertungen beschränken sich dann auf die Feststellung „Unachtsamkeit“, „Ungeschick“, „Unkonzentriertheit“. Als Aktivitäten werden dann vor allem verhaltensbezogene Maßnahmen, z. B. im Rahmen von Unterweisungen, in Betracht gezogen; im günstigen Fall wird an die Einhaltung von Ordnung und Sauberkeit appelliert. Zweifellos spielen verhaltens- und personenbezogene Ursachen in der Unfallstrategie zur Vermeidung von Sturzunfällen eine große Rolle. Große Reserven bestehen jedoch in der Beachtung technischer Einflussgrößen, z. B. hinsichtlich Fußbodenbeschaffenheit und -zustand, Reinigung und Pflege, Schuhwerk, wobei gesamtheitliche Lösungen immer wieder den größten Erfolg erbringen.

Diesem Anliegen waren in den zurückliegenden Jahren an der BAuA eine Reihe von Forschungsprojekten speziell zur Messung und Beurteilung der Rutschhemmung auf Fußböden und Treppen gewidmet [2, 3, 4]. Ziel des vorliegenden Beitrages soll es sein, die wichtigsten theoretischen Erkenntnisse aus den Untersuchungen und praktische Erfahrungen aus der bisherigen Anwendung der Ergebnisse zur Beurteilung der Rutschhemmung von Fußböden zusammenzufassen. Im Vordergrund steht dabei immer wieder, Beiträge für die Überarbeitung der Vorschriften und Regeln, insbesondere für die Normung einzubringen, worin die größten Chancen gesehen werden, dass zunehmend auch die technischen Maßnahmen zur Verhütung von Sturzunfällen Beachtung finden.

2 Sturzunfälle durch Ausrutschen – ein Schwerpunkt im Unfallgeschehen

Sturzunfälle durch Ausrutschen, Stolpern und Umknicken sind gesamtwirtschaftlich mit etwa 23 % (2003) aller meldepflichtigen Arbeits- und Wegeunfälle schon seit Jahren der Unfallschwerpunkt Nr. 1. Auch im Haus- und Freizeitbereich ist der Anteil der Sturzunfälle mit mehr als 27 % außerordentlich hoch [5].

Aus der Unfallstatistik für 2001 [6] lassen sich besonders belastete Wirtschaftsbereiche erkennen. So sind 32 % aller Sturzunfälle dem Wirtschaftszweig Handel und Versorgung, 17 % dem Wirtschaftszweig Bau, 12 % dem Wirtschaftszweig Metall zuzuordnen. Bei einer groben Einteilung von Arbeitsplätzen nach Innen- und Außenbereichen weist die Unfallstatistik 32 % der Sturzunfälle den Außenbereichen und 53 % den Innenbereichen zu. Die restlichen 15% betreffen in der Unfallstatistik nicht eindeutig abgrenzbare Bereiche. Wie stark Witterungsbedingungen die Höhe der Unfallzahlen beeinflussen, wird bei Betrachtung der Jahreszeiten deutlich. Während in Innenbereichen erwartungsgemäß eine über die Monate des Jahres in etwa gleichmäßige Verteilung der Sturzunfälle vorliegt, ist für Außenbereiche in manchen Jahren in den Wintermonaten ein erheblicher Anstieg zu verzeichnen. Das Ausrutschen auf Schnee- und Eisglätte macht je nach Strenge und Dauer der Winterzeit einen Anteil von 2 % bis über 15 % an diesem Unfallschwerpunkt aus.

Sturzunfälle sind wahrlich keine Bagatellunfälle, wie der Eindruck z. B. durch Situationskomik im Film wie auch im realen Erleben erweckt werden kann. Die Folgen sind oft erheblich schwerwiegender als angenommen. Die durchschnittliche Ausfallzeit infolge eines Sturzunfalls beträgt immerhin um die 20 Tage. Ein Viertel aller Arbeitsunfälle mit der Folge einer Rentenzahlung durch die gewerbliche Berufsgenossenschaft sind Sturzunfälle, wobei ein Drittel davon Frauen betroffen sind, was im Vergleich zu den übrigen schweren Unfällen überproportional hoch ist [6].

Hinsichtlich der Unfallstelle ereignen sich 15 % aller Sturzunfälle auf Treppen bzw. Leitergängen und 11 % in Baustellenbereichen. Auf diese Unfallstellen konzentrieren sich auch die schweren und tödlichen Unfälle.

Werden die Sturzunfälle nach ihrem Unfallhergang unterteilt, ergeben sich für Unfälle durch Ausrutschen ein Anteil von 52 % und für Unfälle durch Stolpern, Umknicken, Fehltreten ein Anteil von 48 % [7].

Betriebliche Analysen haben gezeigt, dass die Mehrzahl der Sturzunfälle in Innenbereichen nicht durch Gleitmittel (z. B. Öl, Fett und sonstige Verunreinigungen) verursacht werden, sondern sich auf vermeintlich trockenen Böden ereignen. Ein nicht geringer Anteil davon ereignet sich durch kaum wahrnehmbare eingetragene Nässe auf Fußböden sowie falsche Pflege von Böden, aber auch durch Nässe an Schuhsohlen sowie ungeeignetes Schuhwerk mit zu harter Sohle.

Wird die Gesamtheit der Ausrutschunfälle betrachtet, ergibt sich z. B. nach [8] hinsichtlich des Oberflächenzustandes des Fußbodens folgende Aufteilung (Abb. 2.1):

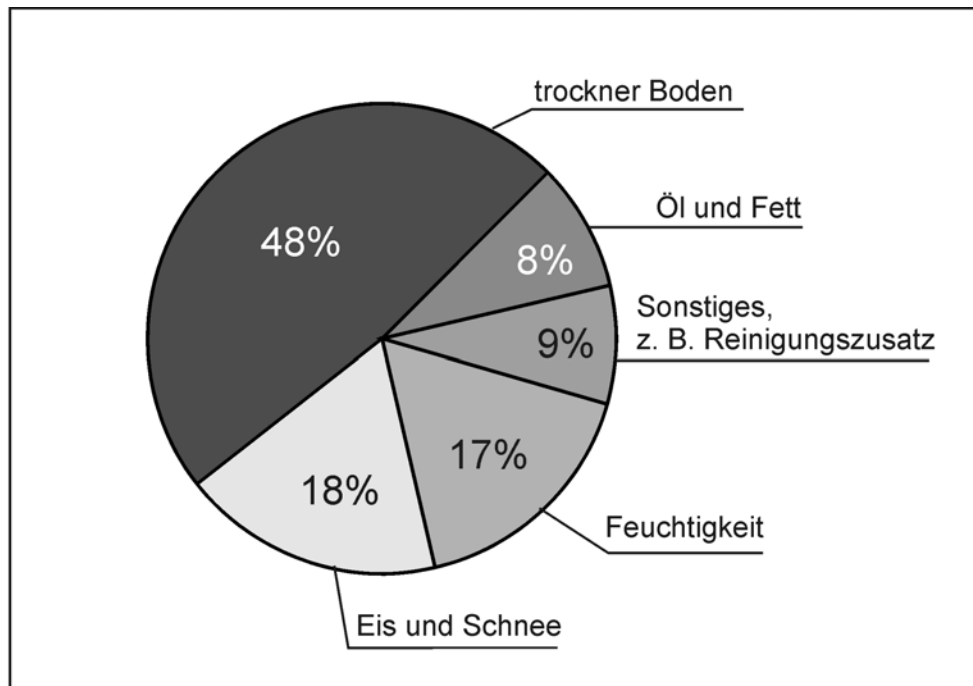


Abb. 2.1 Verteilung der Ausrutschunfälle nach dem Oberflächenzustand des Fußbodens [8]

Die Wahrnehmbarkeit von Sturzgefährdungen durch Ausrutschen auf trockenen Böden ist oftmals schwierig, da die Gefährdung nicht immer durch Glanz und Glätte angezeigt wird. **Vom Anschein her nicht wahrnehmbare Rutschgefährdungen können oftmals nur durch Messung der Rutschhemmung festgestellt werden.**

3 Vorschriften und Regeln zur Rutsicherheit

Allgemeine, grundlegende Forderungen zur Rutsicherheit sind enthalten in:

- **Arbeitsstättenverordnung** – ArbStättV Anhang zu §3 (1)
(Abschn. 1.5: „(2) Die Fußböden der Räume dürfen keine Unebenheiten, Löcher, Stolperstellen oder gefährliche Schrägen aufweisen. Sie müssen gegen Ver- rutschen gesichert, tragfähig, trittsicher und rutschhemmend sein.“).
- **Arbeitsstätten-Richtlinie Fußböden - ASR 8/1**, Abschn. 1.2 – 1.3
(„1.2 Gegen Ausgleiten sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich, wenn durch Wasser, Eis, Fett, Öl oder andere Stoffe eine erhöhte Rutschgefahr besteht. Als Schutzmaßnahmen kommt insbesondere ein geeigneter Fußbodenbelag in Frage, (z. B. Fliesen mit griffiger Oberfläche, ...).
1.3 Sofern aus betrieblichen Gründen Flüssigkeit in erheblichem Umfang auf den Boden gelangt, muss die Flüssigkeit abgeführt werden. Dies kann durch leichtes Gefälle des Fußbodens gegen Ablauföffnungen oder Ablaufrinnen erreicht werden...“).

Diese allgemeinen Forderungen der Arbeitsstättenverordnung werden durch **spezi- elle Vorschriften und Regeln** untersetzt bzw. ausgefüllt. Sie betreffen ausschließlich **Prüfverfahren zur Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaften von Bo- denbelägen** (DIN 51097, DIN 51130, E DIN 51131) sowie die Bewertung der Rutschgefährdung und Auswahl geeigneter Bodenbeläge anhand der Prüfergebnisse (BGR 181, GUV-R 181, GUV-I 8527).

Die Verfahren können unterschieden werden in:

- **Labor- Prüfverfahren** (z. B. Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene)
- **Ortsunabhängige Prüfverfahren** (z. B. Gleitreibungsmessverfahren mit mobilen Messgeräten)

3.1 Begehungsverfahren

Ein im Labor angewandtes stationäres Verfahren ist das **Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene** (siehe Anhang A) nach

- **DIN 51130**: Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Arbeitsräume und Arbeitsbereiche mit erhöhter Rutschgefahr – Begehungsverfahren – Schiefe Ebene

bzw.

- **DIN 51097**: Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Nassbelastete Barfußbereiche – Begehungsverfahren – Schiefe Ebene

Diese genormten Prüfverfahren sind in folgenden Regeln oder Informationen der Berufsgenossenschaften bzw. Unfallsicherungsträger aufgenommen:

- BGR 181: Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr
- GUV-R 181: Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr
- GUV-I 8527: Bodenbeläge für nassbelastete Barfußbereiche

Die Prüfung erfolgt im Sinne einer Baumusterprüfung. Die Prüfergebnisse finden Anwendung bei der Auswahl und Gestaltung von Fußböden auf der Grundlage tätigkeitsbezogener Anforderungen an die Rutschhemmung von Bodenbelägen in Arbeitsräumen und -bereichen mit Rutschgefahr (BGR 181, Anhang 1).

3.2 Gleitreibungsmessverfahren

Die Gleitreibungsmessung kann vor Ort, aber auch im Labor erfolgen. Für die Vor-Ort-Messung werden mobile Gleitreibungsmessgeräte eingesetzt, z. B. nach

- DIN 51131 (Entwurf): Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Verfahren zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten

Die bekanntesten mobilen Gleitreibungsmessverfahren und -geräte werden in Abschn. 13 beschrieben.

Der Vorteil beim Einsatz mobiler Gleitreibungsmessgeräte besteht darin, dass vor Ort die aktuellen Rutschhemmungsverhältnisse auf Fußböden gemessen werden können. Sowohl unmittelbar nach der Verlegung von Bodenbelägen als auch während der Nutzung kann der Rutschhemmungs-Ist-Zustand sowie dessen Veränderung im Verlaufe der Nutzung festgestellt und erforderlichenfalls Maßnahmen zur Sanierung oder Nachbehandlung von Bodenbelägen eingeleitet werden. Auch lassen sich mit einer Vor-Ort-Messung mögliche Rutschgefährdungen im Zusammenhang mit der Reinigung und Pflege der Beläge feststellen. Die Rutschhemmungsmessung kann sowohl auf neuen Belägen normgemäß im nassen und trockenen Zustand als auch auf vorhandenen Belägen mit den gegebenen gleitfördernden Verschmutzungen durchgeführt werden.

Ziel der nachfolgenden Untersuchungen soll es sein, aus dem menschlichen Gang abgeleitete Prüfparameter für ortsunabhängige Prüfverfahren vorzuschlagen. Dabei sollen die Prüfparameter bekannter Verfahren und Erfahrungen bei der Anwendung (Abschn. 13) beachtet werden.

4 Der menschliche Gang – ein komplizierter Bewegungsvorgang

Um ein möglichst praxisnahes Prüfverfahren zu entwickeln, ist es notwendig, den menschlichen Gang hinsichtlich seiner kritischen Phasen, die zum Ausrutschen führen können, zu untersuchen.

Der menschliche Gang ist einer der unsichersten Fortbewegungsvorgänge, die es unter Lebewesen in der Natur gibt. Eine Schrittbewegung ist das Resultat einer koordinierten Bewegung der einzelnen Teile des Bewegungsapparates, d. h. der unteren Gliedmaßen im Kontakt mit der Bewegungsfläche um drei Drehpunkte: Sprunggelenk, Kniegelenk und Hüftgelenk (Abb. 4.1) sowie der stabilisierenden Bewegung von Rumpf und Oberkörper (vor allem durch Ausgleichbewegungen der Arme).

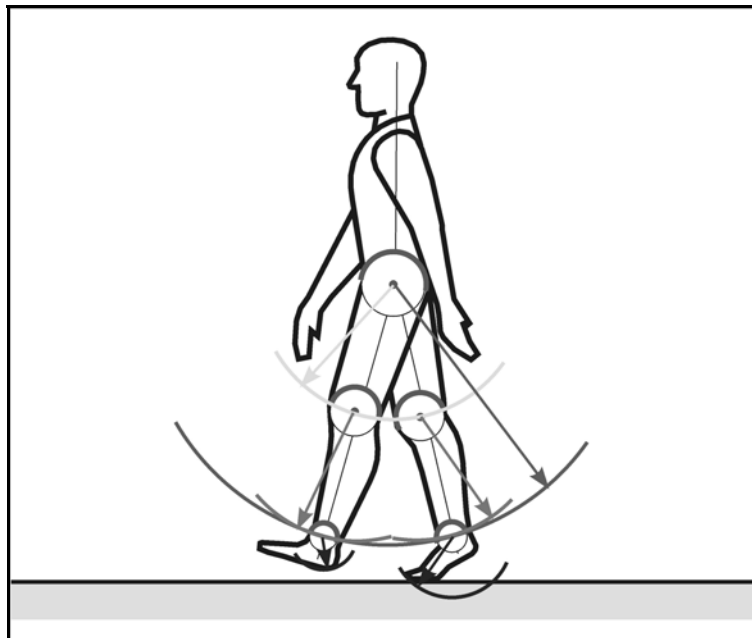


Abb. 4.1 Schrittkinematik als Überlagerung der Drehbewegungen der unteren Gliedmaßen

In einem Beispiel nach [9] befindet sich der Mensch bei einer Schrittgeschwindigkeit von 4,2 km/h während eines Doppelschrittes (Schrittzykluslänge 1,5 m) etwa 84 % der Zeit immer auf einem Bein. Die Schrittbewegung kann in einzelne Phasen aufgeteilt werden (Abb. 4.2). Sie wird aus der Stützphase heraus durch eine Pendelbewegung des einen Beines nach vorn eingeleitet. In der Abrollbewegung des Stützfußes nach vorn wird eine Rückstoßkraft nach hinten ausgeübt. Diese schwebende Pendelbewegung dauert im dargelegten Beispiel etwa 0,55 s (bei einer Gesamtschrittdauer von 0,65 s). Der Pendelfuß setzt in einem bestimmten Winkel und mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf der Ferse auf. Die Abrollbewegung des Stützfußes wird beendet. Der Pendelfuß wird zum Stützfuß und dessen Abrollbewegung beginnt. In dieser Übergangsphase befinden sich beide Füße für etwa 0,1 s in einer Stützphase. Die Dauer dieser gemeinsamen Stützphase kann unterschiedlich sein. Je schneller die Schrittgeschwindigkeit ist, desto kürzer wird diese Stützphase.

Beim schnellen Lauf oder Springen gibt es keine gemeinsame Stützphasen mehr, sondern nur noch einfache Stützphasen und Schwebphasen.

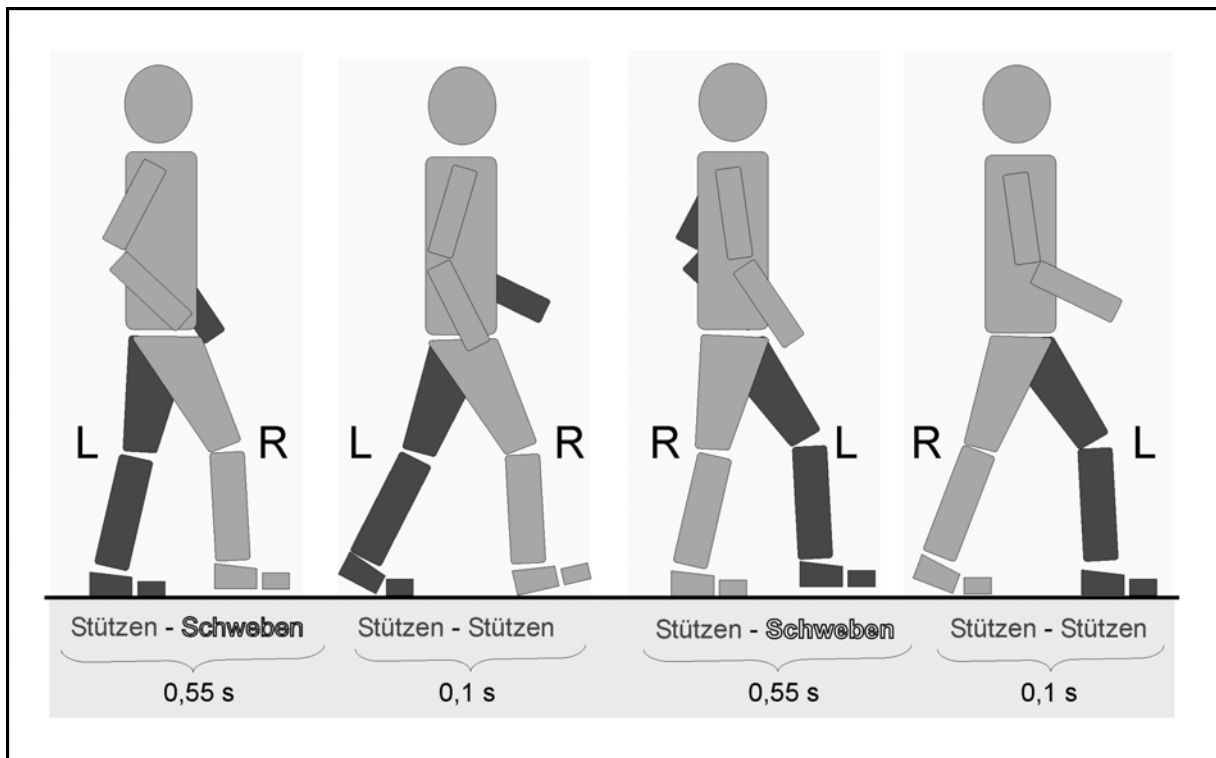


Abb. 4.2 Stütz- und Schwebphasen im Schrittrhythmus (nach [9])

Die im Schwerpunkt angreifenden Beschleunigungs- und Bremskräfte werden über das jeweilige Stützbein in einer Abrollbewegung des Fußes auf den Boden übertragen. Eine kritische Phase, die zum Ausrutschen in die Rückenlage führen kann, liegt zum Zeitpunkt des Aufsetzens mit der Ferse bzw. dem Absatz vor. Beim Aufsetzen des Fußes liegt zu diesem Zeitpunkt der Bewegung der Körperschwerpunkt hinter dem Aufsetzpunkt, bevor der Körperschwerpunkt seine Lage beim Abrollen des Fußes über die Aufsetzstelle hinaus in Gangrichtung verlagert. Beim anschließenden Abstoßen befindet sich der Körperschwerpunkt bereits vor dem mit dem Boden kontaktierenden Fuß. Ein mögliches Ausrutschen nach vorn kann durch Ausgleichschritt oder Ausgleichsbewegung anderer Körperteile leichter ausbalanciert werden als ein Fall nach hinten.

Die **Lage des Schwerpunktes** verändert sich ständig sowohl im Körper als auch im Bewegungsraum. Zur Erhaltung des Gleichgewichtes werden mit den Gliedmaßen (z. B. Armen) und anderen Körperteilen Ausgleichsbewegungen durchgeführt. Diese Ausgleichsbewegungen ergeben zusammen mit der Schrittbewegung einen komplizierten Bewegungsvorgang.

Der Körperschwerpunkt liegt in symmetrischer Ruhestellung etwa an der Innenfläche des 2. Wirbels der Wirbelsäule. Beim Gehen wandert der Schwerpunkt für das linke und rechte Bein entsprechen den einzelnen Gangphasen in einer geschlossenen Bahn um den Ruheschwerpunkt (siehe Abb. 4.3 - dicke Linie für gemeinsame Stützphasen).

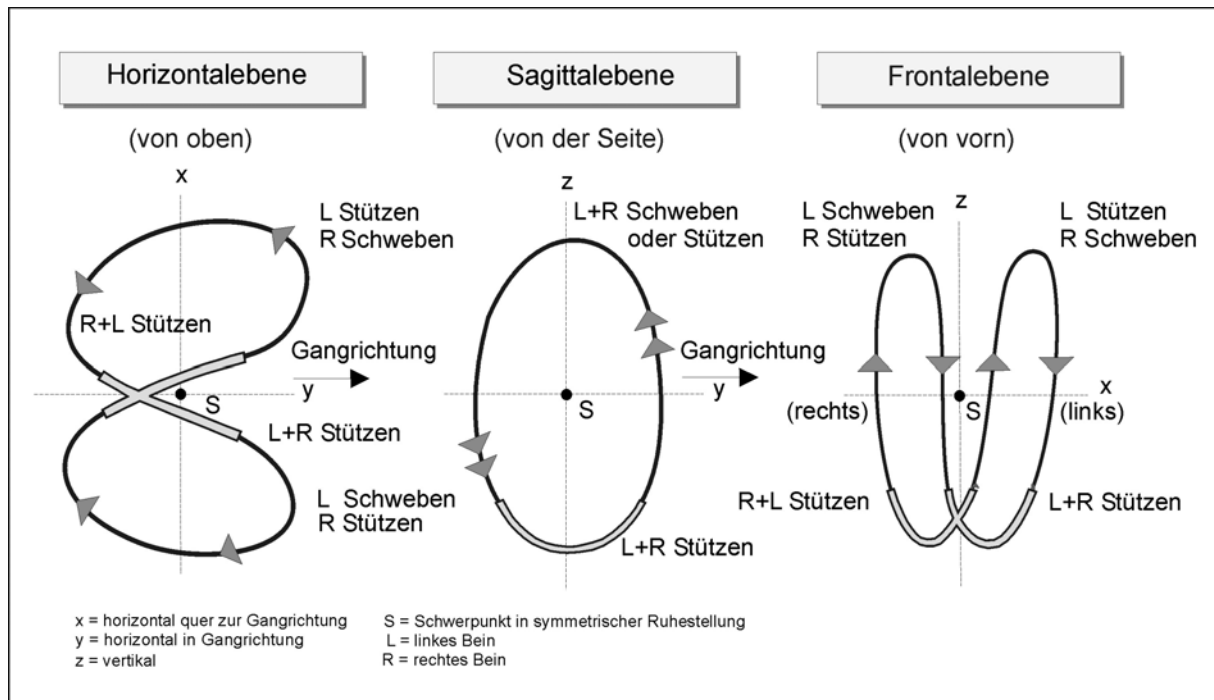


Abb. 4.3 Schwerpunktverlagerung beim Schrittzzyklus - horizontaler Geradeausgang ohne Belastung (nach [10] aus [11])

Diesen komplizierten Bewegungsvorgang beim Gehen erlernt der Mensch im Kindesalter (oder auch erneut nach einem Schlaganfall in der Rehabilitationsphase). Er ist dann ein **automatisierter, routinemäßiger Vorgang**, der im Unterbewusstsein abläuft, d. h. der unter Normalbedingungen nicht vom Bewusstsein her gesteuert wird. Beim Gehen stellt sich die „psychische Automatik“ auf die zu Beginn wahrgenommenen Bodenverhältnisse ein, d. h. auf Art des Fußbodens, mögliche Unebenheiten, Glätte u. a. Verändern sich im Verlauf des Gehbereiches die Bodenverhältnisse, z. B. durch einen anderen Bodenbelag, so ändert der Mensch auf Grund eigener Erfahrungen sein Bewegungsprogramm und passt sich in seinem Gehverhalten den veränderten Bedingungen an. Werden diese Veränderungen nicht wahrgenommen (z. B. unerwartete Nässe auf trockenem Boden) bzw. stimmen die aufgenommenen Informationen nicht mit seinen Erfahrungen überein (z. B. falsche Einschätzung des Rutschhemmungsunterschiedes bei wechselnden Bodenbelägen), kann ein Rutschrisiko entstehen.

Bei der Planung und Gestaltung von Fußböden in Arbeitsbereichen und Arbeitsräumen mit Rutschgefährdung kommt es darauf an, solche möglichen **Störungen der Bewegungsregulation** oder „Programmstörungen“ zu erkennen und zu berücksichtigen. D. h., dass bei Berücksichtigung solcher möglichen Störungen, z. B. das Begehen von Arbeitsflächen mit stellenweiser produktionsbedingter Glätte oder Betreten von wechselnden Belägen mit unterschiedlicher Rutschhemmung nicht zwangsläufig zum Sturz führen sollte. Die Rutschhemmung des Bodens sollte immer noch so groß sein, dass es mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zum Sturz durch Ausrutschen kommt. Die Berücksichtigung solcher möglichen Störungen kann z. B. durch entsprechende tätigkeits- oder bewegungsbezogene Richtwerte für Gleitreibungswerte erfolgen (Abschn. 14).

5 Einflussfaktoren auf die Rutschsicherheit

Häufig wird die Beurteilung der Rutschsicherheit allein auf die rutschhemmenden Eigenschaften des **Fußbodens** beschränkt. Diese einseitige Betrachtungsweise schränkt die Möglichkeiten zur Verbesserung der Rutschsicherheit ein. Größtmögliche Wirksamkeit kann erzielt werden, wenn möglichst viele Einflussgrößen beachtet werden (Abb. 5.1).

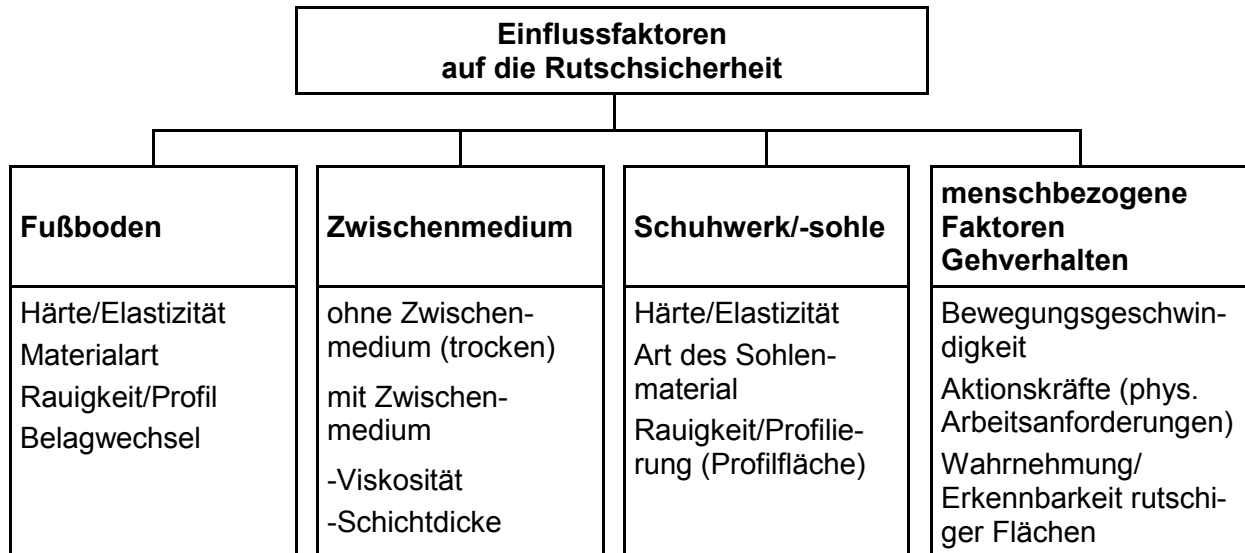


Abb. 5.1 Einflussfaktoren auf die Rutschsicherheit

Die **Fußbodeneigenschaften** können als wichtigster Einflussfaktor angesehen werden. Mit einem richtig ausgewählten und gestalteten Boden kann die Rutschsicherheit weitgehend für **mehrere** Personen mit unterschiedlich rutschhemmendem Schuhwerk oder unterschiedlichen Tätigkeitsanforderungen gewährleistet werden. Die rutschhemmenden Eigenschaften der meisten Fußböden können erfahrungsgemäß positiv beeinflusst werden durch Erhöhung der Parameter Profilierung/Rauigkeit sowie Elastizität. Für mineralische und keramische Bodenbeläge lässt sich die Rutschhemmung auch nachträglich durch Nachbehandlung (chemo-technische, laser-technische Verfahren) verbessern. Reinigung und Pflege des Fußbodens kann sowohl einen positiven wie auch negativen Einfluss haben. Als negativ haben sich vor allem bestimmte schichtbildende Pflegemittel (z. B. wachshaltige Mittel) in Verbindung mit Nässe erwiesen.

Manchmal werden der Gestaltung von Fußboden hinsichtlich Rutschhemmung wegen ihres gewünschten repräsentativen Aussehens auch Grenzen gesetzt, z. B. bei traditionellen Steinböden in Eingangsbereichen, wo in der Regel die Rutschhemmung nicht sehr hoch ist. Hier kann es bei Tragen von ungünstigem Schuhwerk (z. B. mit harten Sohlen und Absätzen aus Hartplaste oder Leder) und ggf. in Verbindung mit eingetragener Nässe zu Sturzunfälle durch Ausrutschen kommen. In solchen Fällen sollte - soweit dies möglich ist (z. B. im gewerblichen Bereich) - verstärktes Augenmerk auf die richtige Wahl des rutschhemmenden **Schuhwerks** gerichtet werden. Ähnlich wie beim Fußboden kann auch bei der Schuhsohle mit Zunahme von Profil/Rauigkeit sowie Elastizität eine Erhöhung der Rutschhemmung erzielt werden.

Am Rutschvorgang ist neben den beiden Reibpartnern „Fußboden – Schuhsohle“ das **Zwischenmedium** in Form von Nässe oder gleitfördernden Verschmutzungen beteiligt. Das Vorhandensein bzw. die Wirksamkeit von Zwischenmedien wird entscheidend durch die Reinigung und Pflege des Fußbodens bestimmt.

Ein Einflussfaktor, der erfahrungsgemäß bei der Beurteilung der Rutschsicherheit nicht immer ausreichend beachtet wird, ist das **Gehverhalten** der betreffenden Personen, d. h. vor allem die tätigkeitsbezogenen physischen Anforderungen und die Bewegungsgeschwindigkeit, ggf. noch in Verbindung mit plötzlichen Richtungsänderungen oder Kurvengängen sowie Begehen von Neigungen oder Steigungen.

Ebenso wie das Zusammenfallen mehrerer ungünstiger Faktoren die Sturzgefährdung erhöhen kann, kann umgekehrt die Vermeidung möglichst vieler dieser Faktoren die Rutschsicherheit erhöhen. Die Gestaltungs- bzw. Verbesserungsmaßnahmen sollten daher nicht nur auf **eine** Einflussgröße gerichtet sein, z. B. auf den Fußboden, sondern auf möglichst **mehrere**. Entsprechend der genannten Rangfolge sollte **ausgehend von den Tätigkeitsanforderungen (physische Belastung, Bewegungsgeschwindigkeiten, Wegeverlauf u. a.) und gegebenen arbeitsbereichspezifischen Bedingungen, wie Nässe, Verschmutzungen, deren Wahrnehmung u. a., zunächst die Art des Fußbodens, dessen erforderliche Reinigungs- und Pflegefähigkeit und dann – soweit beeinflussbar – die Art des Schuhwerks ausgewählt werden.**

Diese ganzheitliche Betrachtungsweise der Einflussfaktoren soll nicht nur bei der Beurteilung, sondern auch - wie nachfolgend beschrieben – bei der Erarbeitung von Verfahren zur messtechnischen Bestimmung der Rutschhemmung von Bodenbelägen weitgehende Berücksichtigung finden.

6 Modell zur Beschreibung der Rutschhemmung von Bodenbelägen

Prüfverfahren unter Beteiligung von Probanden (z. B. Begehungsverfahren Schiefe Ebene, Mannes-Verfahren, Strandberg-Verfahren) sollen den realen Ausrutschvorgang soweit wie möglich simulieren. Dabei sind der Simulation hinsichtlich der Prüfparameter (z. B. Bewegungsgeschwindigkeit, Wirkungsrichtung der Aktionskräfte) sowie durch individuelle und subjektive Einflüsse gewisse Grenzen gesetzt. Beim Mannes-Verfahren bewegt sich die Versuchsperson gegen die Rückhaltekraft einer Feder (Reibkraft) auf dem Prüfbelag nach vorne bis sie wegen mangelnder Bodenhaftung ausgleitet [12, 13]. Beim Strandberg-Verfahren durchläuft die Versuchsperson mit zu prüfenden Schuhen eine 12 m lange Triangel als Prüfnormal. Die Durchlaufzeit ist ein Maß für die Rutschhemmung [14].

Das Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene (Anhang A) erfordert einen relativ hohen gerätetechnischen Aufwand. Es kann nicht vor Ort eingesetzt werden. Um die subjektiven Einflüsse einzugrenzen, ist eine Kalibrierung mit genormten Belägen erforderlich. Ebenso wie beim Mannes-Verfahren können die physischen Anforderungen bei großem Prüfumfang hoch sein. Trotz Auffangeinrichtung verbleibt beim Begehungsverfahren Schiefe Ebene ein gewisses Verletzungsrisiko, ebenso beim Strandberg-Verfahren. Aus diesen Gründen wurde nach personenunabhängigen, d. h. technischen Verfahren, vor allem für den Vor-Ort-Einsatz gesucht.

Um ein solches Verfahren zu entwickeln sind biomechanische Untersuchungen des Bewegungsvorgangs in sturzgefährdeten Phasen erforderlich. Ziel der Untersuchungen soll es sein, **die wesentlichen realen Einflussfaktoren auf die Rutschgefährdung durch ein Modell zu beschreiben, das als Grundlage für ein technisch realisierbares Prüfverfahren dienen soll**. Nach diesem Prüfverfahren soll es dann möglich sein, entsprechende Geräte zu entwickeln und zu bauen, mit denen die Rutschhemmung von Belägen möglichst objektiv gemessen werden kann. Den menschlichen Gang in seinen sturzgefährdeten Phasen perfekt mit einem Gerät zu simulieren wäre technisch sehr aufwendig und wenig sinnvoll. Das Modell soll die Relationen, welche zwischen den ursächlichen Erscheinungen und Wirkungen (bewegungsbezogene und schuhbezogene Einflussfaktoren des Menschen) als Reaktionsgrößen (Rutschhemmung des Fußbodens) bestehen, möglichst getreu widerspiegeln. Dabei kommt es darauf an, die wirklich wesentlichen Einflussfaktoren zu erfassen und fassbar zu machen, mit denen der menschliche Rutschvorgang mit ausreichender Genauigkeit gerätetechnisch simuliert werden kann. Die praktische Umsetzung dieser Simulation soll dann der Reibwert-Messvorgang sein. Damit kann der komplizierte reale Ausrutschvorgang vereinfacht mit geringerem technischen Aufwand und ohne Prüfpersonen, d. h. ohne physische Belastungen und Verletzungsrisiko nachvollzogen werden.

Solche gerätetechnische Umsetzungen könnten als Reibungsmessung auf dem zu prüfenden Belag in unterschiedlicher Form realisiert werden. In Abhängigkeit vom kritischen Bewegungsvorgang des Menschen in sturzgefährdeten Phasen könnte der Messvorgang z. B. in einer abrollenden Bewegung eines gekrümmten Reibpartners (als Prüfnormal) auf der zu prüfenden Tritfläche oder translatorischen bzw. rotierenden Bewegung eines ebenen Reibpartners auf der Prüffläche erfolgen [15, 16], wobei

eine möglichst einfache Bewegungsform für die Reibungsmessung angestrebt wird, um den gerätetechnischen Aufwand zu minimieren.

Bei der Entwicklung von Prüfverfahren sind für die Reibpaarung Fußboden – Schuhsohle neben den Bewegungsparametern auch die besonderen Reibungsverhältnisse zu beachten.

6.1 Festkörperreibung und viskoelastische Reibung

Bei der klassischen **Festkörperreibung** haben die Parameter Belastung und Kontaktfläche (d. h. Flächendruck) sowie Gleitgeschwindigkeit der Reibpartner keinen Einfluss auf den Reibungskoeffizienten (**Coulombsche Gesetze**). Der Reibungskoeffizient ist lediglich abhängig vom Material.

Bei der Rutschhemmung von Bodenbelägen bzw. Schuhsohlen gelten nicht die Regeln der klassische Reibung zwischen Festkörpern, sondern es entsteht Reibung zwischen **viskoelastischen Körpern**, für die andere Abhängigkeiten gelten. Bei einer Vielzahl viskoelastischer Körper (ohne Gleitmittel)

- **sinkt der Reibwert mit zunehmender Belastung**
(bei gleichbleibender Fläche)
- **steigt der Reibwert mit größer werdender Fläche**
(bei gleichbleibender Belastung), damit
- **sinkt der Reibwert mit zunehmendem Flächendruck;**

des Weiteren

- **verändert sich** (steigt oder sinkt) **der Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit**
- **verändert sich der Reibwert in Abhängigkeit von der Art des Materials.**

Vor allem die beiden zuletzt genannten Abhängigkeiten bleiben im Zusammenhang z. B. mit der Härte/Elastizität und Oberflächencharakteristik bei unprofilieren Belägen, insbesondere Hartböden und elastische Belägen, ungeklärt (Abschn.16.1).

Der Einfluss von Temperatur auf die Reibung viskoelastischer Stoffe soll nicht betrachtet werden.

Die Reibungsmessung erfolgt wie bei der Festkörperreibung nach dem **Tribometerverfahren** (Abb. 6.1). Gemessen wird der Gleitreibungskoeffizient oder andere damit im Zusammenhang stehende Kenngrößen (z. B. Reibungswinkel beim Abgleiten von der schiefen Ebene). Bei dem Tribometerverfahren wird ein Gleitkörper möglichst gleichförmig, d. h. mit konstanter Geschwindigkeit, über eine Gleitfläche gezogen und dabei die mit der Reibkraft F_R identische Zugkraft F_Z gemessen. Die Zugkraft F_Z (Reibkraft F_R) mit der Gewichtskraft F_G (Normalkraft F_N) ins Verhältnis gesetzt, ergibt als Proportionalitätskonstante den Reibwert μ als Maß für die Rutschhemmung. Dieser Reibwert (Gleitreibungskoeffizient) entspricht dem Tangens des Reibungswinkels auf der schiefen Ebene, bei dem der Gleitkörper sich gleichförmig abwärts bewegt (Anh. A, Abb. 2).

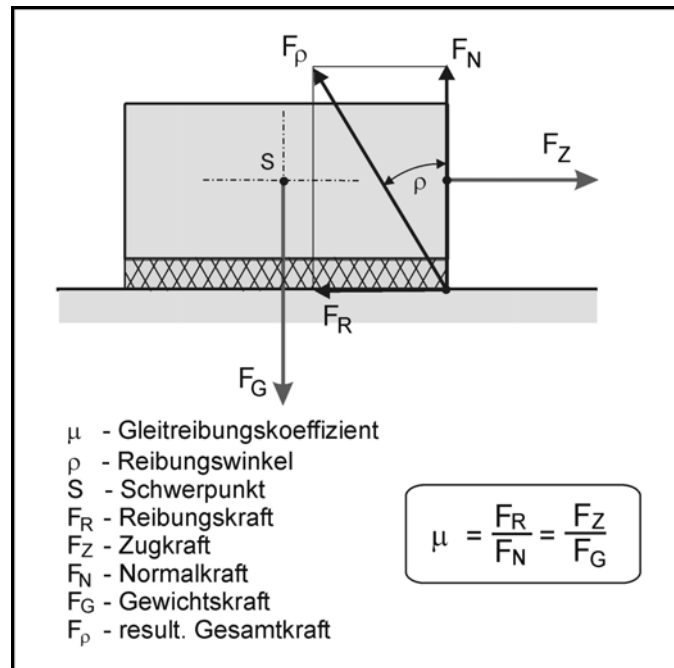


Abb. 6.1 Tribometerverfahren zur Bestimmung des Gleitreibungskoeffizienten

Bei der vorliegenden Reibpaarung Fußboden-Schuhsohle besteht die Schuhsohle in der Regel aus einem viskoelastischen Stoff, der Reibungsantagonist Fußboden hingegen kann sowohl ein viskoelastischer Körper (z. B. elastischer Bodenbelag) als auch ein Festkörper (z. B. Steinboden) sein. Beim Reibungsvorgang überlagern sich Fußboden- und Schuhsohlenparameter gegenseitig.

Die Fortbewegung des Menschen auf einem Fußboden kommt nur dann zustande, wenn zwischen Schuhsohle und Fußboden eine ausreichende Kraftübertragung vorhanden ist, d. h. wenn eine ausreichende Reibkraft wirkt. Für die viskoelastische Reibung kann es verschiedene Komponenten geben, die kombiniert mit unterschiedlichen Anteilen zur Wirkung kommen:

- **Adhäsionsreibung**

Diese Reibungsform wird durch molekulare Bindungen auf sehr geringer Entfernung insbesondere zwischen glatten Reibpartnern bestimmt (sog. van der Waal'sche Kräfte). Neben dem Abstand der Reibpartner ist die Adhäsionsreibung vor allem von der effektiven Kontaktfläche und den Materialeigenschaften abhängig. Die effektive Berührungsfläche wird durch die Hysterese des viskoelastischen Reibpartners beeinflusst. Mit zunehmender Oberflächenstrukturierung bzw. Rauigkeit verringert sich die Kontaktfläche für adhäsive Bindungen, die Flächenpressung steigt. Im Ergebnis sinkt der Reibwert.

Adhäsionsreibung kann mit unterschiedlichem Anteil sowohl im trockenen als auch im nassen o. ä. Zustand vorliegen. Im trockenen Zustand stellt die Adhäsionsreibung den dominierenden Reibungsanteil dar. Bei Vorhandensein eines Zwischenmediums, wie Flüssigkeit, ist ein Übergang zur sog. **Mischreibung** möglich. In diesem Zustand lässt eine zu geringe bzw. nur stellenweise vorhandene Flüssigkeitsmenge noch keine komplette Entkopplung der adhäsiven Bindungen zu. Ab einer bestimmten Schicht- bzw. Filmdicke des Zwischenmediums

(in Abhängigkeit von Viskosität und Flächenpressung) sowie Gleitfläche kommt es oberhalb einer bestimmten Gleitgeschwindigkeit bei ausreichenden Scherkräften zum Abriss der molekularen Bindung und damit zum Übergang in **Flüssigkeitsreibung**.

- **Deformations- oder Hysteresereibung**

Diese Reibungsform entsteht bei der Deformation viskoelastischer Stoffe unter Kräfteeinwirkung aufgrund ihrer Hystereseigenschaften. Bei viskoelastischen Stoffen, aus denen die meisten gebräuchlichen Schuhsohlen und elastischen Bodenbeläge bestehen, ist die bei der Deformation durch den menschlichen Gang aufgewendete Energie größer als die bei der Entspannung frei werdende Energie. Es tritt Hysterese ein. Die durch Hysterese bewirkten Dämpfungsverluste werden in Wärme umgewandelt und entsprechen der Deformationsreibkraft. Die Deformationsreibung ist in erster Linie abhängig von der Viskoelastizität des Materials und der Oberflächengestalt, wie Profil und Rauigkeit, insbesondere Makrorauigkeit. Die Reibkraft wirkt also über eine kraftschlüssige Verbindung der elastischen Oberflächenprofilgebung (z. B. des Schuhs) mit dem Reibpartner (z. B. Fußboden). Eine Kraftübertragung ist nur solange möglich, solange sog. Deformations-schlupf vorliegt. Die Deformationsreibung beeinflusst durch horizontale und vertikale Kräfteeinwirkung sowie Elastizität die Größe der Kontaktfläche und -tiefe. Durch Erhebungen (z. B. bei eingestreutem körnigen Material in Kunstharzbeschichtungen) oder Vertiefungen (z. B. im Ergebnis einer chemo-technischen Nachbehandlung eines Fußbodens) kann mit zunehmender Kontakttiefe des viskoelastischen Materials (z. B. der Schuhsohle) die Kontaktfläche insgesamt erhöht werden.

Deformationsreibung ist stärker geschwindigkeitsabhängig als andere Reibungskomponenten. Aufgrund der Federungs- und Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Stoffe nimmt die Kontakttiefe und damit die Kontaktfläche mit steigender Geschwindigkeit nichtlinear ab. Daher nimmt auch die Reibung bei hoher Geschwindigkeit ab. Der Reibwertverlust kann bei Vorhandensein eines Zwischenmediums verstärkt werden.

Die Deformationsreibung tritt meist in Verbindung mit der Adhäsionsreibung auf. Die Deformationsreibung verringert mit ihren Oberflächenanteilen die wirksame Kontaktfläche und damit auch die Größe der Adhäsionskomponente. Bei reiner Deformationsreibung entsteht kein Abrieb.

- **Kohäsionsreibung**

Diese Reibungsform entsteht durch molekulare Anziehungskräfte von teilweise verzahnten Rauigkeitsspitzen. Die Überwindung dieser Kohäsionskräfte kann zum Abscheren von Molekülen, z. B. Mikro-Rauigkeitsspitzen an der Oberfläche führen. Die für das Abscheren erforderliche Kraft entspricht der Kohäsionskraft. Ihr Anteil an der Reibung ist verhältnismäßig gering. Sie macht sich durch Verschleiß in Form von Abrieb bemerkbar. Im Ergebnis werden neue Oberflächen erzeugt.

Befindet sich zwischen den Reibpartnern eine trennende Flüssigkeitsschicht, die einen unmittelbaren Kontakt zwischen den Reibpartnern verhindert, so kann **Flüssigkeitsreibung** auftreten. Dabei sind zwischen den Reibpartnern die molekularen Kräfte der Flüssigkeit durch Scherung zu überwinden. Es kommt zu einem „Aufschwimmen“ des beweglichen Reibpartners. Die Flüssigkeitsreibung ist u. a. abhängig von der Viskosität des Zwischenmediums, der Größe der Gleitfläche, der sogenannten Spalthöhe und der Gleitgeschwindigkeit [17] (Abschn. 15.2). In einem Übergangsbereich zwischen viskoelastischer Reibung und Flüssigkeitsreibung kann es zu sogenannter **Mischreibung** kommen. Ein großer Teil von Sturzunfällen durch Ausrutschen ereignet sich, wenn die Flüssigkeitsreibung dominiert, z. B. auf partieller, nicht wahrnehmbarer Nässe in Eingangsbereichen in Verbindung mit schneller Ganggeschwindigkeit.

6.2 Modellbildung

Reales System für die Modellbildung soll das tribologische System „Fußboden – Zwischenmedium – Schuhsohle/Mensch“ sein. Die wesentlichen Kräfte- und Bewegungsverhältnisse sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Wichtigste Reaktionsgröße ist die Reibkraft, deren Größe im Wesentlichen über das Ereignis Sturz durch Ausrutschen entscheidet. Die Reibkraft ist der horizontal wirkenden Aufsetzkraft des Schuhs entgegengerichtet. Ein Gehen ist nur dann möglich bzw. ein Sturz kann nur dann vermieden werden, wenn die entgegenwirkende Reibkraft größer ist, als die vom menschlichen Fuß ausgehende Aufsetzkraft. Je größer dieser Unterschied ist, desto größer ist die Rutschsicherheit. Der Quotient aus horizontaler und vertikalen Aufsetzkraft wird als **Anforderungskoeffizient Q** bezeichnet. Da dieser Wert nicht unterschritten werden soll, wird er auch zur Festlegung eines Grenzwertes herangezogen. Ausreichende Rutschhemmung ist vorhanden, wenn

Reibwert μ > Anforderungskoeffizient Q

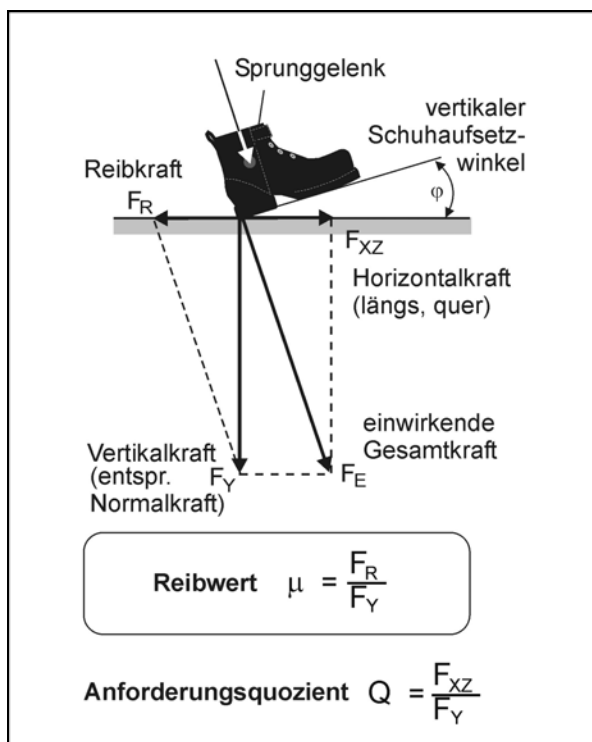


Abb. 6.2 Kräfte- und Bewegungsparameter beim Aufsetzen des Schuhs auf den Bodenbelag

Als wesentlicher Parameter des realen Systems soll daher der Anforderungskoeffizient als Quotient aus Horizontal- und Vertikalkraft gewählt werden, der gerätetechnisch als Reibwert (gemessene Reibkraft/Gewichtskraft des Gleitkörpers) geprüft wird. Weitere Einflussfaktoren des realen Systems sind in Tabelle 6.1 unter den Bewegungsparametern aufgeführt: die horizontale Aufsetzgeschwindigkeit des Absatzes wird zum Prüfparameter Gleitgeschwindigkeit, die Aufsetzfläche des Absatzes zur Gleiterfläche, das Sohlenmaterial zum Gleitermaterial.

Tab. 6.1 Bewegungsparameter des Menschen und entsprechende Parameter des Prüfverfahrens

Bewegungsparameter	Prüfparameter
Anforderungskoeffizient (auf Fußboden wirkende horizontale Körperkraft/ vertikale Körperkraft)	Reibwert (gemessene Reibkraft/ Gewichtskraft des Gleitkörpers)
Aufsetzgeschwindigkeit des Absatzes, horizontal	Gleitgeschwindigkeit
Aufsetzfläche des Absatzes	Gesamt-Gleiterfläche
Sohlenmaterial	Gleitermaterial

Die aus einer kritischen Fußstellung hergeleiteten Bewegungsparameter sind als Prüfparameter in einer bestimmten Bewegungsform (z. B. translatorisch) als Reibmessung nach Abbildung 6.1 umzusetzen (Abb. 6.3).

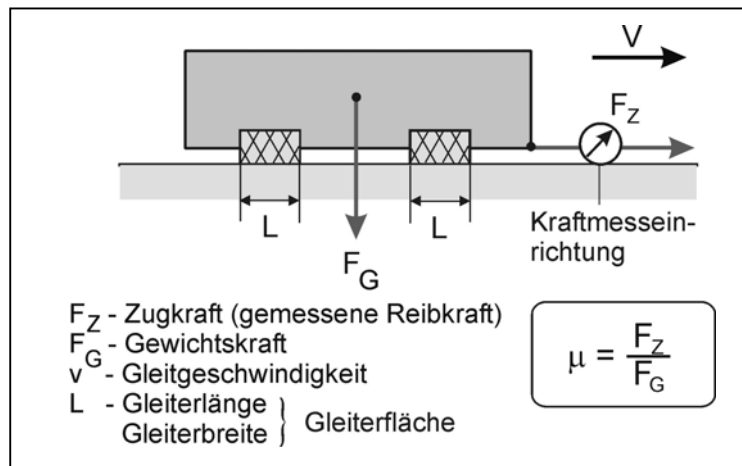


Abb. 6.3 Beispiel für gerätetechnische Parameter eines Prüfverfahrens

Da die Bewegungsparameter des Reibungssystems Fußboden - Zwischenmedium - Schuhsohle/Mensch sich zeitlich ständig ändern (z. B. durch reaktive Ausgleichsbewegungen) und von Mensch zu Mensch unterschiedlich sind, kann jede modellhafte Nachbildung nur einen Kompromiss darstellen. Mit den gewählten Prüfparametern kann nicht immer die gesamte Breite der möglichen Bewegungsparameter für alle Personen erfasst werden, sondern nur Ausschnitte (Häufungen, Maxima). Im Ergebnis der Messung kann es daher, bezogen auf einzelne Personen, zu einer abweichenden Darstellung der Reibungsverhältnisse kommen.

Bei der Modellbildung kommt es also darauf an, einen tragbaren Kompromiss zu finden, der das Rutschrisiko im Wesentlichen und für eine möglichst große Personenzahl widerspiegelt.

7 Biomechanische Untersuchungen beim Gehen

7.1 Ziel der Untersuchungen und Untersuchungsbedingungen

Biomechanische Untersuchungen des Gehens sind in der Literatur mehrfach beschrieben (z. B. [10, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23]). Die Ergebnisse beschreiben jedoch die oben genannten Parameter nicht vollständig, oder sie entstammen kleinen Versuchsgruppen. Aus biomechanischen Untersuchungen abgeleitete Prüfparameter beschränkten sich meist auf die Parameter Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung des Gleiters; Untersuchungen der materialbezogenen Parameter zu Art, Form und Anordnung der Gleiter fehlten. Zur Begründung der unter Abschn. 6.2 genannten Parameter für ein Prüfverfahren waren deshalb ergänzende Untersuchungen erforderlich. Dabei waren auch die Prüfparameter der bisher zur Anwendung kommenden unterschiedlichen Prüfverfahren [z.B. 11, 15, 16, 24] (vgl. Abschn.13) zu bewerten und abzugleichen. Gangpathologische Veränderungen sollten nicht in die biomechanischen Untersuchungen einbezogen werden.

Untersuchungen und Ergebnisse sind in [2] dargestellt und werden im Folgenden zusammengefasst. Die Untersuchungen sollen dazu dienen, unter den Bewegungsparametern des Menschen nach Abschn. 6.2 die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Rutschrisiko für die Modellbildung zu finden und als Prüfparameter zu begründen. Dabei soll das Aufsetzen des menschlichen Fußes in seinen kritischen Phasen im örtlich-zeitlichen Verlauf sowie die gleichzeitig auf den Belag einwirkenden Kräfte erfasst werden. Dabei interessieren vor allem die folgenden **Bewegungsparameter**:

- Ganggeschwindigkeit
- horizontal und vertikal wirkende Kräfte
- Aufsetzgeschwindigkeit des Fußes
- Aufsetzwinkel des Absatzes sowie
- Aufsetzfläche des Absatzes und der Vordersohle.

Die kritischen Phasen, die zum Sturz führen können, hängen örtlich-zeitlich von der **Körperbewegung** ab: z. B.

- Geradeausgehen
- aus der Bewegung stehen bleiben
- aus dem Stand losgehen
- die Bewegungsrichtung ändern (winklig, kurvenförmig).

Dabei sind die unterschiedlichen **bewegungsbezogenen Aktionskräfte** (körpereigene Kräfte, Schwerkraft und Beschleunigungskräfte) zu berücksichtigen, z. B.:

- auf der horizontalen Ebene
- auf der geneigten Ebene (aufwärts, abwärts)
- bei physischer Belastung (Tragen, Schieben, Ziehen)
- mit unterschiedlicher Ganggeschwindigkeit.

7.2 Versuchseinrichtung und Messungen

Auf einer Gehbahn sollen der zeitliche Verlauf der Auftrittskräfte und der Abrollbewegung des Schuhs (Aufsetzwinkel und –geschwindigkeit) sowie die Ganggeschwindigkeit der Versuchspersonen untersucht werden.

Messung der Auftrittskräfte

Als Gehbahn diente ein etwa 5 m langer stabiler Spanplattenbelag, in dem nach 3 m höhengleich eine piezoelektrische 3-Komponenten-Kraftmessplattform (Hersteller: Fa. Kistler) eingebaut war. Zur Messwertverarbeitung wurde eine zugehörige PC-Software genutzt.

Gemessene Horizontal- und Vertikalkräfte:

- Vertikalkraft F_y
- Horizontalkraft in Gangrichtung F_x
- Horizontalkraft quer zur Gangrichtung F_z .

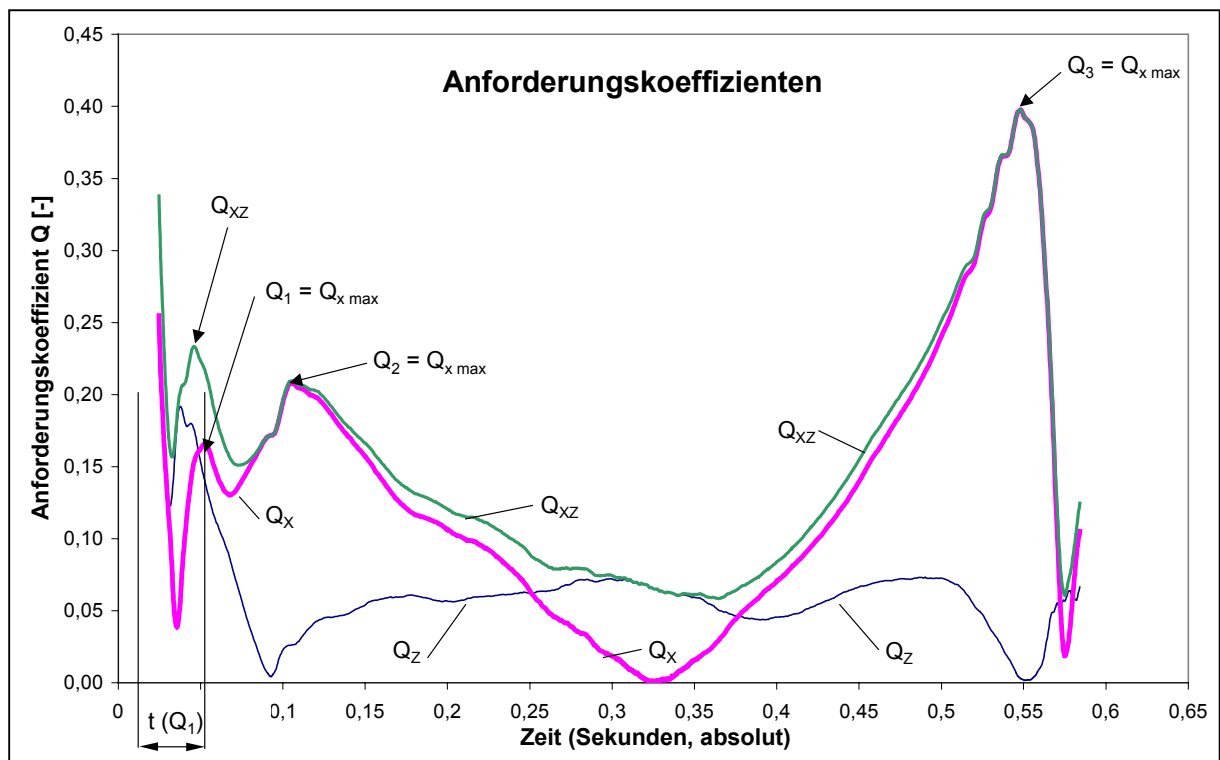
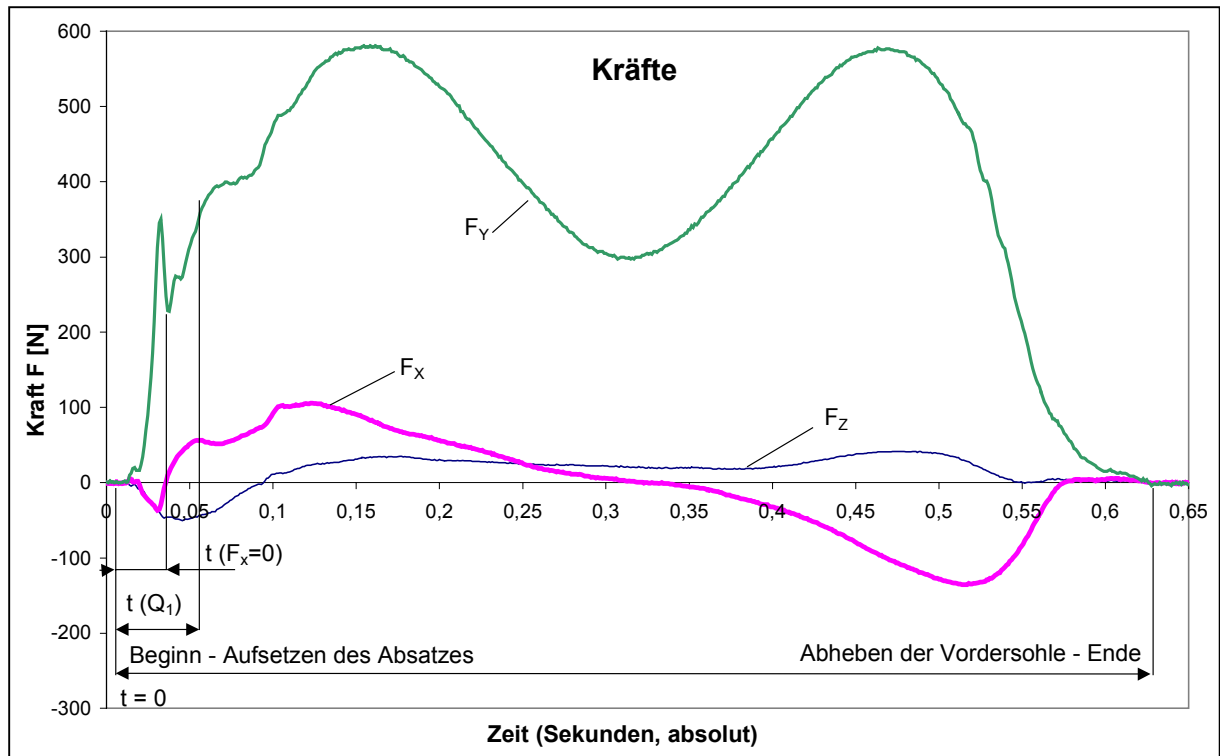


Abb. 7.1 Zeitlicher Verlauf der Auftrittskräfte und entsprechenden Anforderungskoeffizienten für eine Versuchsperson [2]

Gemäß Abbildung 7.1 ergeben sich als Quotient von Horizontalkraft und Vertikalkraft die zeitlichen Verläufe der entsprechenden Anforderungskoeffizienten:

- Anforderungskoeffizient $Q_x = F_x/F_y$ (Absolutwert)
- Anforderungskoeffizient $Q_{xz} = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} / F_y$
- Anforderungskoeffizient $Q_z = F_z/F_y$ (Absolutwert).

Erfassung des Bewegungsverlaufes des Schuhabsatzes

Beim schnellen Gehen gibt es 2 Situationen, in denen üblicherweise ein Ausrutschen auftreten kann:

- beim Aufsetzen des Absatzes rutscht dieser auf dem Fußboden in Gangrichtung
- beim Abstoßen am Ende der Stützphase rutscht die Vordersohle nach hinten, d. h. entgegen der Gangrichtung.

Nach [19, 27] ist besonders die erste Situation kritisch, weil hierbei die Person kaum eine Möglichkeit hat, den Verlust des Gleichgewichtes durch eine Ausgleichsbewegung des Körpers zu kompensieren (Abschn. 4).

Der Bewegungsablauf des Schuhabsatzes wurde während des Aufsetzens auf die Messplattform mit einer Videokamera (System S-VHS-C) aufgenommen. Die Bildfolgefrequenz einer Standard-Videokamera beträgt 50 Hz, und damit beträgt die Zeit zwischen 2 Einzelbildern 20 ms. Um eine höhere Bildfolgefrequenz und damit eine genauere Geschwindigkeitsberechnung zu ermöglichen, wurde vor dem Objektiv eine rotierende, stroboskopische Scheibe mit radialen Schlitzen angeordnet. Die Drehzahl der Scheibe, die Anzahl der Schlitze und deren Breite wurden so gewählt, dass während der Belichtungszeit der Videokamera für 1 Bild 3 Schlitze der Scheibe vor der Objektivöffnung vorbeirotierten. Dadurch entstanden auf jedem Video-Einzelbild 3 übereinanderliegende Abbildungen des Schuhs. Der Schuhabsatz wurde seitlich mit einer Markierung versehen. Auf diese Weise entstanden Bildsequenzen im Abstand von etwa 7 ms (Abb. 7.2).

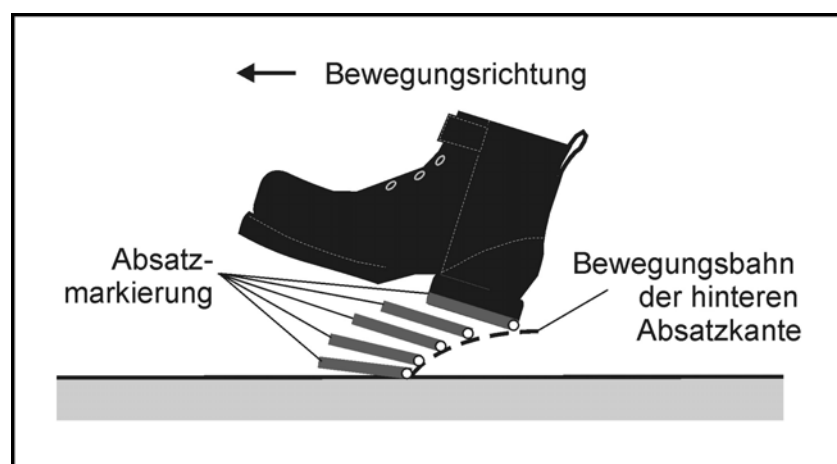


Abb. 7.2 Bildsequenz der Absatzmarkierung vor dem Aufsetzen auf dem Boden ($\Delta t \approx 7$ ms)

Messung der Ganggeschwindigkeit

Seitens der Versuchspersonen wurde ein unbelastetes Gehen ohne zusätzliche Aktionskräfte des Körpers in Schrittgeschwindigkeit von ca. 5 km/h angestrebt. Um Bewegungsabläufe und Fußkräfte an vorgegebenen Messpunkten erfassen zu können, war ein konzentriertes Gehen auf der Bahn erforderlich. Die Ganggeschwindigkeit wurde mittels einer elektronischen Zeitmesseinrichtung und zweier Lichtschranken im Abstand von 1,00 m und in einer Höhe von 1,35 m ermittelt.

Versuchspersonen und getragenes Schuhwerk

Bei der Auswahl der Versuchspersonen wurde darauf geachtet, eine möglichst gleiche Verteilung hinsichtlich Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht zu erzielen. Die Versuchsgruppe bestand aus 22 Personen, davon 12 Frauen und 10 Männer im Alter zwischen 27 und 59 Jahren (Durchschnitt 42,6 Jahre, Standardabweichung 10,2 Jahre). Für jede Versuchsperson wurden 8 Gänge über die Gehbahn ausgewertet, so dass $8 \times 22 = 176$ Einzelversuche zur Verfügung standen.

Um ein normales, ungezwungenes Gehen zu fördern, trugen die Versuchspersonen ihr gewohntes persönliches Schuhwerk, im Wesentlichen Sommerschuhwerk, d. h. keine Stiefel, aber auch keine Sandalen:

- mit und ohne Absätzen (Langkeilsohlen)
- verschiedenem Sohlenmaterial.

8 Untersuchungsergebnisse beim Geradeausgehen

8.1 Kräfte, die auf den Fußboden übertragen werden

Aus 8 Versuchen bei 22 Versuchspersonen wurden insgesamt 176 Einzelversuche ausgewertet [2].

Bei der Auswertung des Bewegungsverlaufes und der Aufsetzkräfte des Absatzes wurde festgestellt, dass die Art, wie der Absatz auf dem Fußboden aufgesetzt wird, sich markant von Person zu Person in individuellen Gangmustern voneinander unterscheidet. Die Gangkinematik wird insbesondere durch den Pendelausschlag des Beines und die Schrittlänge bestimmt. Entscheidend ist die Steilheit der Flugbahn des Absatzes in der Aufsetzphase. Im Berührungspunkt des Absatzes kann es zu einer in Gangrichtung nach vorn oder nach hinten gerichteten Bewegung bzw. Horizontalkraft F_x kommen. Erst dann, wenn eine positive, d. h. nach vorn wirkende Kraft F_x vorhanden ist, kann der Absatz in Gangrichtung ausrutschen.

In Abhängigkeit von der Wirkungsrichtung F_x (nach hinten oder nach vorn) unmittelbar nach dem Moment des Aufsetzens wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Gangtypen A und B gebildet (Abb. 8.1), wobei sich die unterschiedlichen Wirkungsrichtungen sofort oder mit kurzzeitiger Verzögerung einstellen können (bei $F_x \approx 0$).

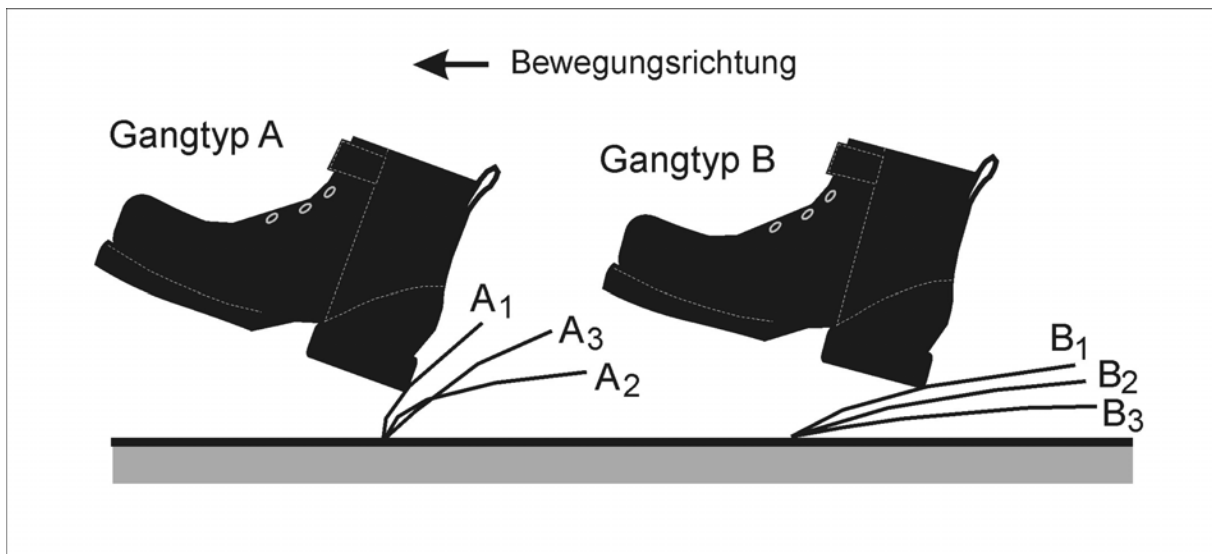


Abb. 8.1 Bewegungsverläufe der hinteren Absatzkante dreier Versuchspersonen des Gangtyps A und B unmittelbar vor dem Aufsetzen auf den Fußboden

Der Typ A entsteht, wenn der Fuß in einer relativ steilen Bahn in Richtung Fußboden geführt wird. Die horizontale Auftreffgeschwindigkeit v_{ho} ist dabei relativ gering.

Der Typ B entsteht durch eine flachere Bewegungsbahn des Fußes. v_{ho} ist dabei relativ hoch.

Betrachtet man die Verteilung der Gangtypen, so ergibt sich, dass

- 73 % der Versuchspersonen dem Gangtyp A
- 27 % der Versuchspersonen dem Gangtyp B

zuzuordnen waren. Es kann also angenommen werden, dass die Mehrzahl der Menschen bei normaler Ganggeschwindigkeit geradeaus dem Gangtyp A angehören. Bei beschleunigter Bewegung und Erhöhung der Ganggeschwindigkeit war bei Vertretern des Gangtyps A eine Verschiebung der Merkmale in Richtung Typ B erkennbar. Den Typen A und B ähnliche personenbezogene Gangmuster wurden in [19] festgestellt.

Beim **Typ A** setzte bei der Hälfte der Versuchspersonen die Kraffteinwirkung von F_x **nach hinten** nicht gleich zum Zeitpunkt des Aufsetzens ein. Der F_x -Wert verblieb über ein kurzes Zeitintervall um Null, bevor es sich in den negativen Bereich veränderte. Der Absatz kann im Zeitintervall bei dem $F_x < 0$ nur entgegen der Gangrichtung ausrutschen. Diese Rutschwege sind kurz und unkritisch. Frühestens zum Zeitpunkt unmittelbar nach $F_x > 0$ kann ein kritisches Ausrutschen einsetzen (Abb. 7.1). Bei den Versuchspersonen des Gangtyps A war das im Mittelwert nach $t(F_x = 0) = 22$ ms.

Beim **Typ B** ist F_x **nach vorn** gerichtet und das Ausrutschen kann bereits unmittelbar nach dem Aufsetzen einsetzen, bei Vorhandensein von Querkräften F_z auch ein seitliches Ausrutschen, das in ein nach vorn oder in seitliches Rutschen übergehen kann. Ähnlich wie beim Typ A kann es zu einer kurzzeitigen Verzögerung kommen, solange der F_x -Wert sich um Null bewegt. Die biodynamischen Parameter unterscheiden sich hierbei für den Rutschbeginn sehr wesentlich von denen des Typs A.

In der Anfangsphase kann es bei beiden Typen zu einem Stoß durch die Verzögerungskräfte beim Abbremsen des Schuhabsatzes auf dem Bodenbelag kommen. Dadurch kann es zu einer unregelmäßig ausgeprägten kurzzeitigen Erhöhung des Anforderungskoeffizienten Q_x kommen. Dieser instabile Bereich am Anfang kann daher in die Auswertung nicht einbezogen werden. Der Ausrutschvorgang kann unabhängig vom Gangtyp frühestens beginnen, wenn $F_x > 0$ wird, und er kann spätestens einsetzen, wenn Q_x das Maximum innerhalb der ersten Hälfte der Stützphase des Fußes, d. h. Q_1 oder Q_2 erreicht hat (Abb. 7.1).

Die Maxima von Q_1 und Q_2 sind im Mittel gleich groß, so dass das zeitlich frühere Maximum Q_1 als Grundlage für die Begrenzung der wirksamen Kräfte in der Auftrittsphase betrachtet wird. Q_2 wird also in die nachfolgenden Betrachtungen nicht mehr einbezogen.

Der Bereich der Vertikalkraft F_y , in dem der höchste Anforderungskoeffizient auftreten kann, ist demnach unter Berücksichtigung der Mittelwerte (Abb. 8.2):

- Gangtyp A: $F_y \approx 350 \dots 500$ N bzw. $F_y/F_G = 0,56 \dots 0,70$
- Gangtyp B: $F_y \approx 0 \dots 600$ N bzw. $F_y/F_G = 0 \dots 0,86$.

Im Mittelwert betrug F_y für beide Gangtypen A und B etwa 400 N.

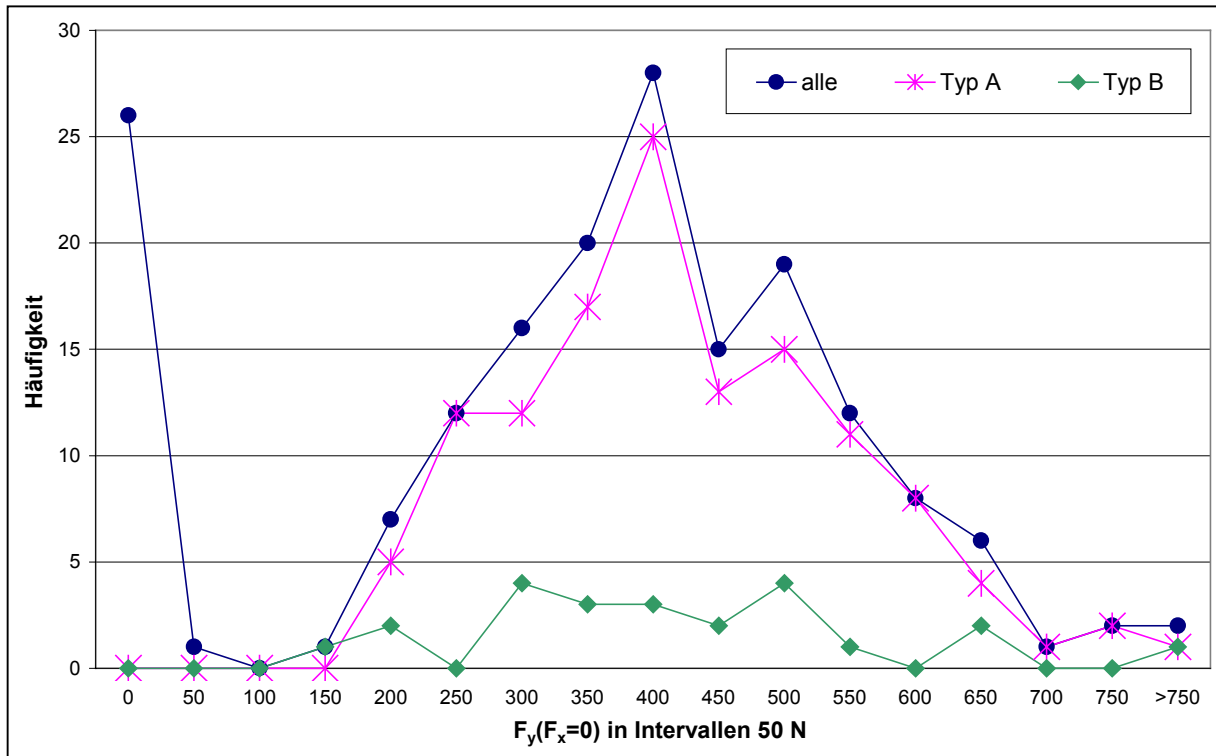


Abb. 8.2 Häufigkeitsverteilung für F_y ($F_x = 0$) nach Gangtypen A und B [2]

Anmerkung: In der Abbildung sind die Häufigkeiten innerhalb eines Intervalls jeweils der oberen Intervallgrenze zugeordnet, mit Ausnahme der Werte F_y ($F_x = 0$) = 0, die definitionsgemäß den Großteil der Werte des Gangtyps B darstellen.

In Tabelle 8.1 sind die Kraftmesswerte beim Aufsetzen des Absatzes und Abheben der Vordersohle vom Fußboden zusammengestellt.

Um die Vertikalkräfte F_y zwischen den Versuchspersonen vergleichen zu können, wurden die F_y -Werte zusätzlich auf das jeweilige Körpergewicht der Versuchspersonen normiert (F_y/F_G). Die auf das Körpergewicht bezogenen Vertikalkräfte entsprechen für beide Gangtypen im Bereich 0,56...0,86 denen in [9].

Kurz vor dem Abheben der Sohle vom Fußboden steigt der Anforderungskoeffizient auf ein absolutes Maximum Q_3 . Das entsteht, weil zu diesem Zeitpunkt der Fuß noch eine erhebliche horizontale Schubkraft (F_x) ausführt, gleichzeitig aber bereits die vertikale Belastung des Fußes (F_y) stark abnimmt (Abb. 7.1).

Tab. 8.1 Zusammenstellung der Kraftmesswerte beim Geradeausgehen [2]

Kräfte	Mittelwert	Standardabweichung
Q_1	0,22	0,06
$F_y(Q_1)$ [N]	493	157
$F_y(Q_1)/F_G$	0,70	0,19
Q_3	0,36	0,06
$F_y(Q_3)$ [N]	278	101
$F_y(Q_3)/F_G$	0,41	0,14

8.2 Aufsetzgeschwindigkeit des Fußes

Ausgehend von einer mittleren Ganggeschwindigkeit der 22 Versuchspersonen von 5,4 km/h = 1,5 m/s (Standardabweichung 0,14 m/s), sollte die horizontale Aufsetzgeschwindigkeit des Absatzes festgestellt werden.

Die Bewegung des Fußes wurde in einer Video-Bildfolge mit einer Zeitdifferenz von etwa 7 ms untersucht (Abb. 7.2). Vor dem Aufsetzen bewegt sich der Absatz näherungsweise linear, so dass die Markierungen parallel liegen. Sobald der Absatz auf den Boden aufsetzt, beginnt eine deutlich sichtbare Drehbewegung. Ausgewertet wurden die letzten Bildfolgen vor dem Aufsetzen, wobei jeweils 3 Horizontalgeschwindigkeitswerte ermittelt wurden.

Als Aufsetzgeschwindigkeiten wurden die Geschwindigkeiten v_{ho} im letzten Zeitintervall vor dem Aufsetzen angenommen.

Abbildung 8.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung für v_{ho} nach Gangtypen A und B.

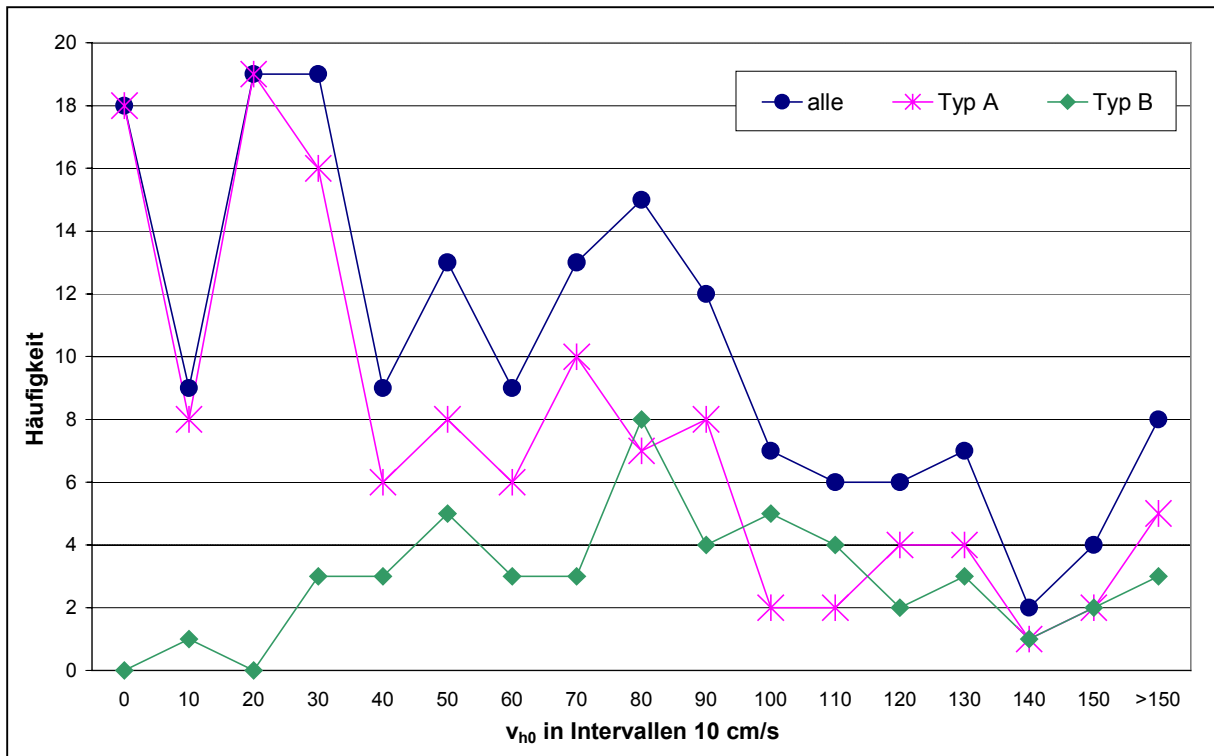


Abb. 8.3 Häufigkeitsverteilungen für v_{ho} nach Gangtypen A und B [2]

v_{ho} für den Gangtyp A unterscheidet sich deutlich von Gangtyp B. Typ A setzt mit einer deutlich niedrigen horizontalen Geschwindigkeit des Absatzes auf den Boden auf als Typ B (Tab. 8.2).

Tab. 8.2 Häufigkeitsmaxima der Aufsetzgeschwindigkeiten v_{ho} und Relativgeschwindigkeiten zum Rutschbeginn nach Gangtypen

	Typ A	Typ B
Aufsetzgeschwindigkeit v_{ho}		
- Häufigkeitsmaxima	10...30 cm/s	70...90 cm/s
- Mittelwert	49,2 cm/s	84,1 cm/s
- Standardabw.	46,2 cm/s	40,2 cm/s
Relativgeschwindigkeit v_R	0...30 cm/s	> 70 cm/s

Das Häufigkeitsmaximum für Typ B ist nur schwach ausgeprägt. Der Mittelwert der Aufsetzgeschwindigkeit aller Gangtypen beträgt 59,1 cm/s (Standardabw. 47,2 cm/s).

Da für Gangtyp A ein Ausrutschen erst nach einer Umkehrbewegung nach vorn möglich ist, kann die geschätzte Relativgeschwindigkeit zwischen Schuh und Boden nur kleiner sein als das oben genannte Häufigkeitsmaximum der Aufsetzgeschwindigkeit.

Beim Gangtyp B kann die Aufsetzbewegung sofort bzw. nach kürzester Zeit in eine Rutschbewegung übergehen.

Bei Untersuchung realer Ausgleitvorgänge [19] wurde festgestellt, dass infolge der instabilen Anfangsreibung unabhängig vom Gangtyp ein stabiler Gleitvorgang erst ab 15 cm/s einsetzt.

8.3 Aufsetzwinkel und Aufsetzfläche des Fußes

Aus den Videoaufzeichnungen wurde die Fußstellung im letzten Zeitintervall vor dem Aufsetzen des Absatzes erfasst. Dabei wurden folgende mittlere **Aufsetzwinkel** zwischen der Schuhsohle und Horizontalen auf dem Fußboden (Abb. 6.2) festgestellt (Tab. 8.3):

Tab. 8.3 Mittlere Aufsetzwinkel nach Gangtypen

Typ	mittlerer Aufsetzwinkel φ	Standardabweichung
Typ A	21,8°	4,6°
Typ B	22,8°	5,1°
Typ A + B	22,1°	4,7°

Als mittlerer vertikaler Aufsetzwinkel kann für alle Gangtypen ein Winkel $\varphi \approx 22^\circ$ angesehen werden.

Die wirksame **Aufsetzfläche A** zum Zeitpunkt des möglichen Ausrutschens hängt neben der effektiven Kontaktfläche (unter Beachtung von Profilgebung und Verschleiß) auch von dem Aufsetzwinkel, der Elastizität des Materials und dem Körpergewicht der Versuchsperson ab. Aus Videoaufzeichnungen zum Zeitpunkt der maximalen Anforderungskoeffizienten am Anfang und am Ende der Stützphase (Q_1 und Q_3) wurden näherungsweise folgende Aufsetzflächen ermittelt:

- durchschnittliche Aufsetzfläche des Absatzes $A_A = 10 \text{ cm}^2$ (bei harten, kantigen Absätzen/Stöckelabsätzen $A_A < 2 \text{ cm}^2$)
- durchschnittliche Aufsetzfläche der Vordersohle beim Abheben vom Boden $A_V = 25 \text{ cm}^2$.

In der Annahme, dass das größere Sturzrisiko beim Aufsetzen des Schuhabsatzes besteht (vgl. Abschn. 4), wird als kritischer biomechanischer Parameter die Aufsetzfläche des Absatzes gesehen, d. h. $A = 10 \text{ cm}^2$. Des Weiteren wird angenommen, dass sich diese Fläche bei einem möglichen Rutschvorgang des Absatzes auf der Trittlfläche nicht wesentlich verändert.

9 Untersuchungen beim Ändern der Bewegungsrichtung (im rechten Winkel, im Bogen)

Stürze ereignen sich oft bei plötzlicher Änderung der Bewegungsrichtung, z. B. im rechten Winkel oder im Bogen.

Bei der Gangart „im rechten Winkel“ wurde die Richtungsänderung um 90° aus der Bewegung heraus in zwei Schritten vorgenommen, wobei das Aufsetzen des Fußes mit anschließender Drehbewegung auf der Kraftmess-Plattform mit Videoaufzeichnung erfasst wurde.

Bei der Gangart „im Bogen“ bewegte sich die Versuchsperson auf einer Kreisbahn mit einem Radius von etwa 1 m.

Die Versuchspersonen waren aufgefordert, eine für sie normale Ganggeschwindigkeit anzunehmen. Das Verfolgen der vorgegebenen Bewegungsbahn und das Aufsetzen mit einem bestimmten Fuß auf der Mess-Plattform erforderte von den Versuchspersonen eine hohe Konzentration. Die stichprobenweise gemessene Ganggeschwindigkeit war daher bei Richtungsänderungen geringer als beim Geradeausgehen (≤ 5 km/h).

An den Versuchen waren sechs Personen beteiligt. Für jede Gangart wurden drei Messwerte pro Person ausgewertet.

Die durchschnittlichen Messwerte zum Zeitpunkt $t(F_x = 0)$ bzw. $F_y(F_x = 0)$ bewegen sich im Rahmen der Mittelwerte für das Geradeausgehen, d. h. $t(F_x = 0) \approx 22$ ms und $F_y(F_x = 0) \approx 300$ N.

In Tabelle 9.1 sind die wesentlichen Messwerte für die Anforderungskoeffizienten, deren Vertikalkraftkomponenten sowie die Aufsetzgeschwindigkeiten des Absatzes und deren Aufsetzwinkel gangtypunabhängig zusammengestellt.

Tab. 9.1 Zusammenstellung der Kraftmesswerte bei Änderung der Bewegungsrichtung [2]

Parameter	Gangart			
	im rechten Winkel		im Bogen	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
Q_1	0,26	0,034	0,24	0,027
$F_y(Q_1)$ [N]	384	179	406	165
$F_y(Q_1)/F_G$	0,60	0,23	0,62	0,18
Q_3	0,35	0,023	0,35	0,061
$F_y(Q_3)$ [N]	285	76,7	264	100
$F_y(Q_3)/F_G$	0,46	0,13	0,42	0,138
Q_4	0,21	0,029	0,24	0,045
$F_y(Q_4)$ [N]	634	162	618	96
$F_y(Q_4)/F_G$	0,98	0,10	0,98	0,12
v_{ho} [cm/s]	66,8	27,0	61,4	25,6
φ [°]	28	4,4	23	5,8

Bei Änderung der Bewegungsrichtung ändert sich auch die Wirkungsrichtung der Horizontalkraft (F_{xz}), z. B. durch Zentrifugalkraft bei Kurvengang. Dabei entsteht ein relatives Maximum Q_4 des Anforderungskoeffizienten Q_{xz} (siehe Beispiel für eine Versuchsperson in Abb. 9.1 und 9.2). Bemerkenswert ist der im Vergleich zu Q_1 und Q_3 lange Zeitraum, in dem Q_4 bei relativ hohem Niveau wirksam ist.

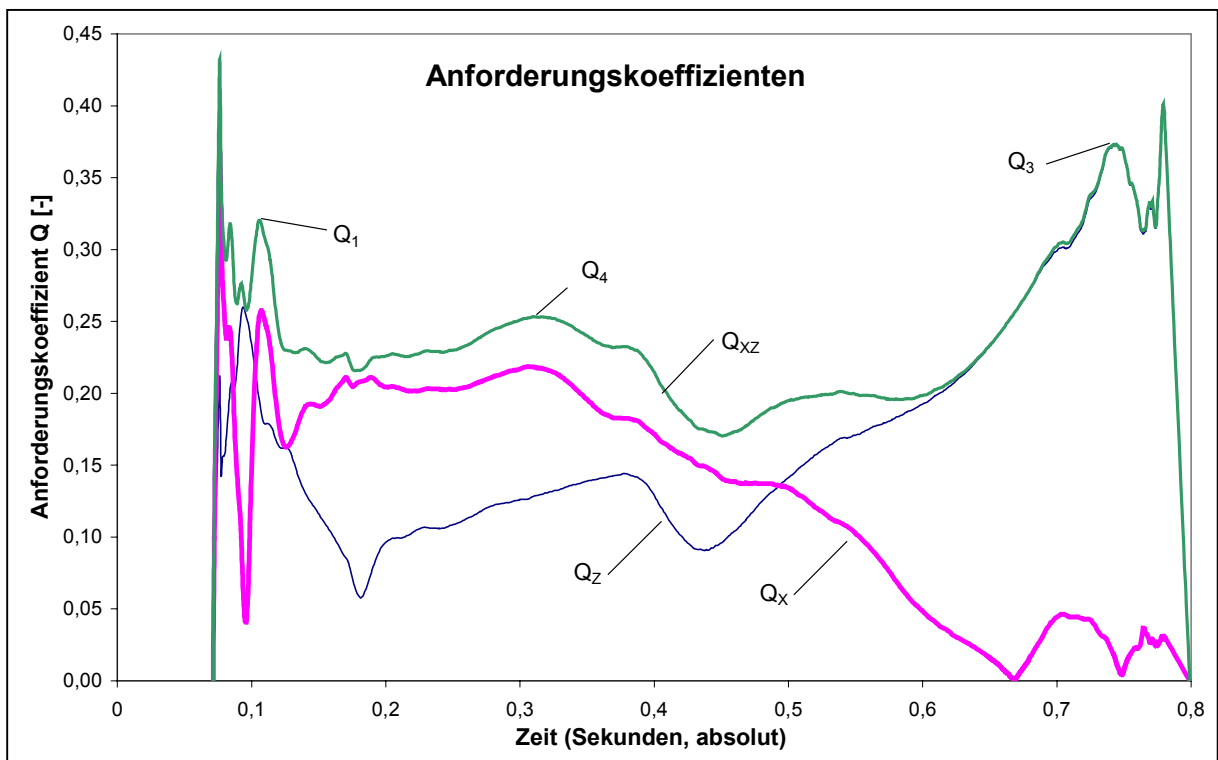
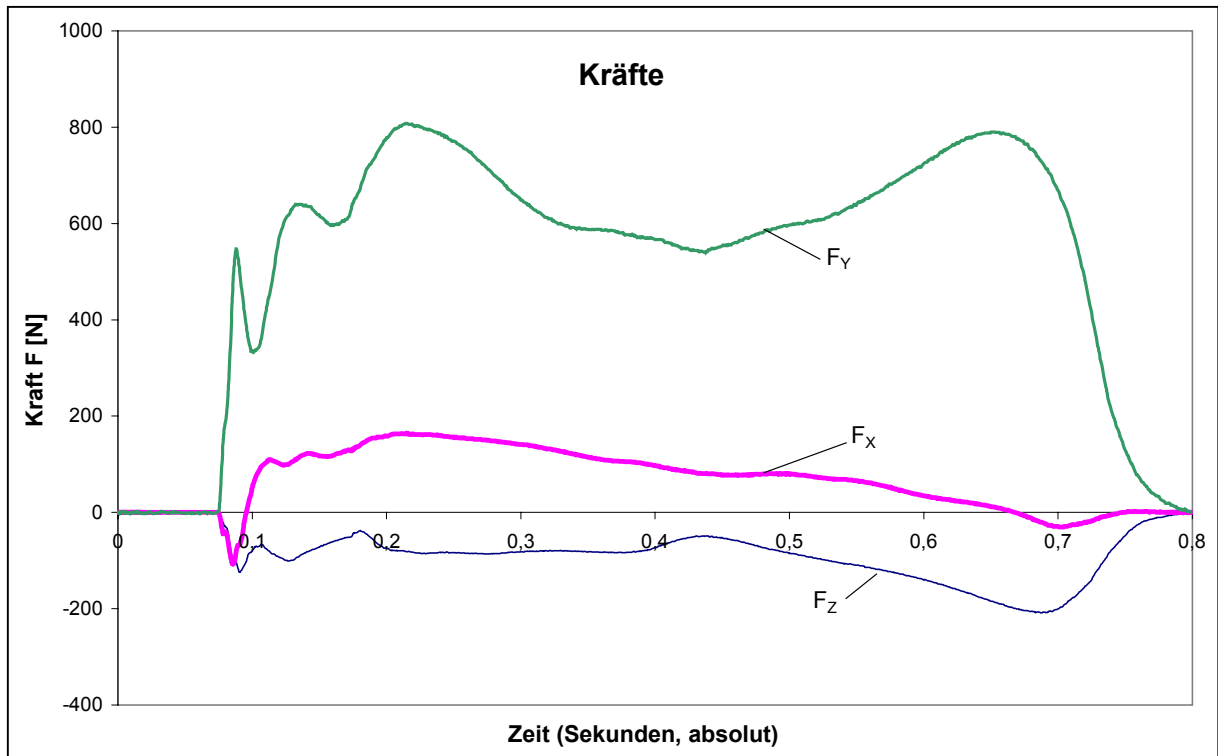


Abb. 9.1 Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Kräfte und entsprechenden Anforderungskoeffizienten bei Gangart „im rechten Winkel“ [2]

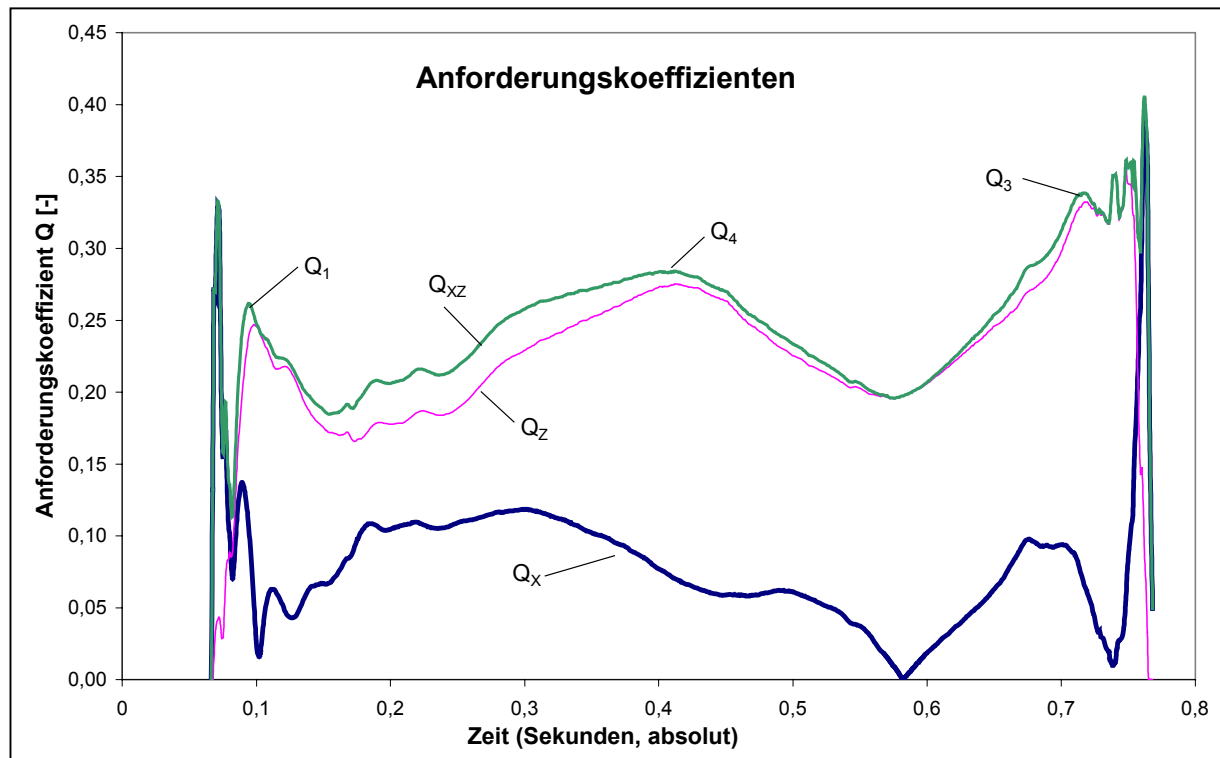
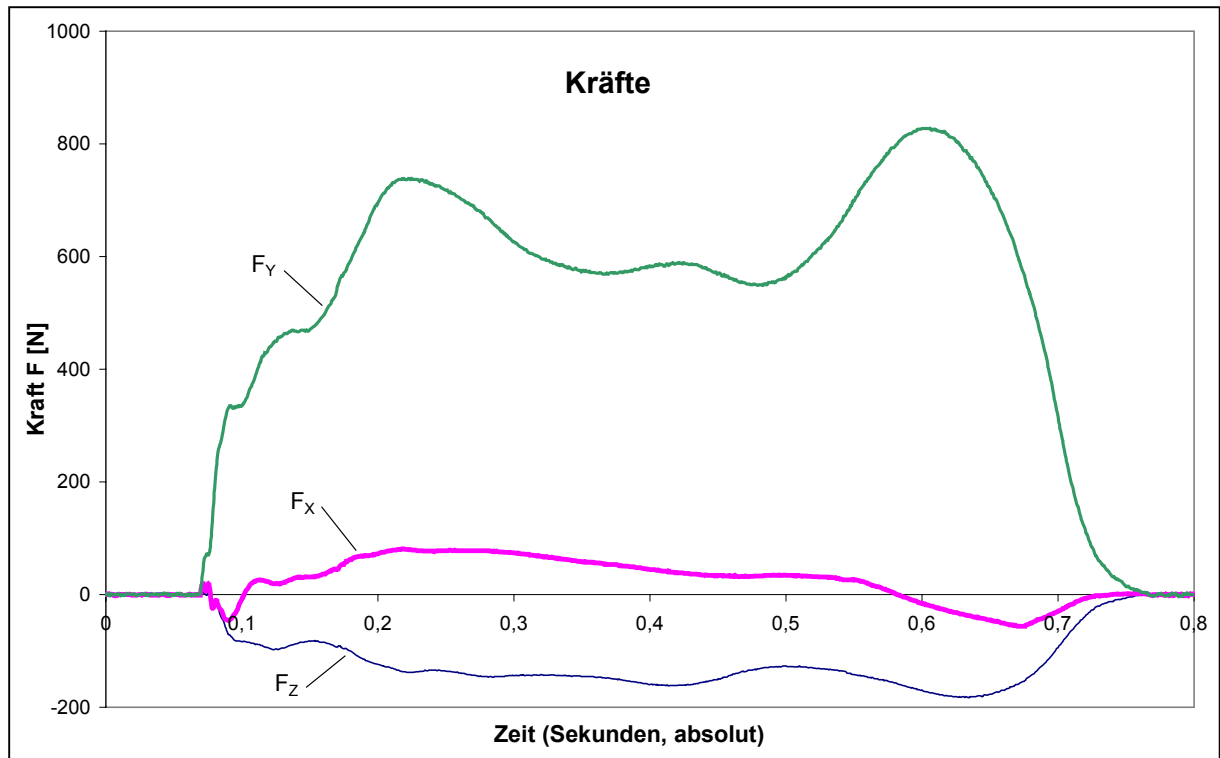


Abb. 9.2 Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Kräfte und entsprechenden Anforderungskoeffizienten bei Gangart „im Bogen“ [2]

Im Vergleich der in Abschnitt 8.1 (Tab. 8.1), Abschnitt 8.2 und Abschnitt 9 (Tab. 9.1) angeführten Mittelwerte lassen sich für Bewegung geradeaus und Bewegung mit Richtungsänderung folgende Aussagen ableiten:

- Die mittleren Aufsetzgeschwindigkeiten sind für alle Gangtypen und Gangarten mit oder ohne Änderung der Bewegungsrichtung annähernd gleich (59,1 bis 66,8 cm/s).
- Die Anforderungskoeffizienten Q_1 , Q_2 , Q_3 unterscheiden sich beim Gang mit Richtungsänderung nur unwesentlich vom Gang geradeaus (Q_1 und Q_2 : 0,22 bis 0,26; Q_3 : 0,35 bis 0,36)
- Der bei Richtungsänderungen durch Querkräfte entstehende Anforderungskoeffizient Q_4 hat ein Maximum, das dem beim Aufsetzen des Absatzes entspricht, d. h. $Q_4 \approx Q_1$. Allerdings wirkt Q_4 weitaus länger als Q_1 (Abb. 9.1, 9.2), was von Bedeutung für die Einschätzung des Sturzrisikos ist. Da in dieser Phase nahezu das gesamte Körpergewicht sowie anteilige Beschleunigungskräfte über den aufgesetzten Fuß wirken, ist $F_y(Q_4)$ in diesem Zeitraum größer als zum Zeitpunkt des Aufsetzens und Abhebens ($F_y(Q_4) \approx 700$ N).
- Für die Drehbewegung auf der Vordersohle wurde unter Berücksichtigung des Aufsetzwinkels eine wirksame Aufsetzfläche von 50 cm^2 geschätzt.

10 Zusammenfassung der wesentlichen Bewegungsparameter und Ableitung erster Prüfparameter

Aus den biomechanischen Untersuchungen der unterschiedlichen Körperbewegungen beim Gehen [2] können zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Ausrutschen kann einsetzen, wenn der Anforderungsquotient Q größer wird als der Reibkoeffizient μ zwischen Schuh und Fußboden. Das kann vor allem in den Gangphasen eintreten, in denen Q ein relatives Maximum annimmt:

1. Aufsetzen des Absatzes zu Beginn der Standphase (Q_1)
→ Ausrutschen auf dem Absatz in Bewegungsrichtung (x) oder in seitlicher Richtung (xz)
2. Richtungsänderung der Körperbewegung bei aufgesetzter Vordersohle (Q_4)
→ Ausrutschen auf der Vordersohle seitlich zur Bewegungsrichtung (xz)
3. Abheben der Vordersohle am Ende der Standphase (Q_3)
→ Ausrutschen auf der Vordersohle entgegen der Bewegungsrichtung (x) oder in seitlicher Richtung (xz).

Ein Sturz ist dann wahrscheinlich, wenn sich während des Ausrutschens der Körper in einer instabilen Gleichgewichtslage befindet, d. h. wenn sich der Körperschwerpunkt weit hinter dem Aufsetzpunkt des Fußes befindet und ungünstige Bedingungen zur Gleichgewichtsstabilisierung vorliegen. Das tritt vor allem ein

- **beim Aufsetzen des Absatzes** (beim Ausrutschen entfernt sich der Körperschwerpunkt immer mehr vom Aufsetzpunkt, eine stabilisierende Ausgleichsbewegung mit dem anderen Fuß ist kaum möglich – vgl. Abschn.4)
- **bei der Richtungsänderung der Körperbewegung**, wenn der linke Fuß in einer Linkskurve oder der rechte Fuß in einer Rechtskurve in Fliehkrachrichtung ausrutscht (beim Ausrutschen ist mit dem äußeren Fuß eine stabilisierende Ausgleichsbewegung nach innen kaum möglich).

Während des Ausrutschens beim Abheben der Vordersohle am Ende der Stützphase befindet sich das andere Bein bereits wieder auf dem Boden und ermöglicht dadurch eine Stabilisierung des Körpergleichgewichts. Zum Sturz wird es deshalb nur in Ausnahmefällen kommen, wenn die Schrittweite zu groß ist oder wenn die Reaktionsfähigkeit der Person gemindert ist. Dieser Fall wird daher in die nachfolgenden Betrachtungen nicht weiter einbezogen.

Der Reibwert μ zwischen Schuh und Fußboden hängt u. a. vor allem von der Rutschgeschwindigkeit v_R des Schuhs und von der Flächenpressung F_y/A ab. Die Prüfung von Fußböden hinsichtlich Rutschhemmung sollte deshalb bei den Parameterkombinationen von Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung erfolgen, die den oben genannten kritischen Gangphasen 1. und 2. entsprechen.

In Tabelle 10.1 sind die Parameter Relativgeschwindigkeit zu Rutschbeginn v_R und zeitgleich Flächenpressung F_y/A für die kritischen Gangphasen

- Aufsetzen des Absatzes nach Gangtyp A
- Aufsetzen des Absatzes nach Gangtyp B
- Drehen auf der Vordersohle bei Richtungsänderung (z. B. Kurvengang)

zusammengestellt.

Tab. 10.1 Zusammenfassende Ergebnisse von Parametern, bei denen ein Ausrutschen einsetzen kann [2]

Nr.	kritische Gangphasen	v_R [cm/s]	F_y [N]	F_y/F_g [-] ¹⁾	F_y/A [N/cm ²]	Q [-]
1	Aufsetzen des Absatzes/Gangtyp A	0...30*	350...500	0,56...0,70	35...50 ²⁾	0,22 (Q ₁)
2	Aufsetzen des Absatzes/Gangtyp B	70...90	0...600	0...0,86	0...60 ²⁾	0,22 (Q ₁)
3	Drehen auf der Vordersohle bei Richtungsänderung	0...10*	≈ 700	1	≈ 14 ³⁾	0,21(Q ₄)

* geschätzte Richtwerte, messtechnisch nicht genau erfassbar

1) $F_g = 700$ N mittleres Personengewicht

2) $A = 10$ cm² für Absatz beim Aufsetzen

3) $A = 50$ cm² für Vordersohle bei Richtungsänderung

Der Ausrutschvorgang ist ein dynamischer Prozess, bei dem sich die Bewegungsparameter verändern. Bei einer Prüfungssimulation kann dieser Prozess nicht vollständig nachvollzogen werden, es müssen Vereinfachungen angenommen werden. Die zu wählenden Prüfparameter sollten möglichst den biomechanischen Parametern zum Rutschbeginn entsprechen, bei denen eindeutig ein stabiler Rutschvorgang einsetzt.

Als allgemeiner **Anforderungskoeffizient Q** wird für alle kritischen Gangphasen ein Wert **Q = 0,22** angenommen. Der Geschwindigkeitsparameter v_R unter Pos. 1 zwischen 0...30 cm/s sollte im unteren Bereich nicht unmittelbar als Prüfparameter übertragen werden, da auf Grund der Deformationsreibung und ggf. Adhäsionsreibung bei solch niedrigen Geschwindigkeiten des Gleitkörpers erfahrungsgemäß nicht immer ein gleichförmiger Gleitvorgang zustande kommt. Nach [19] wurden für eine dem Gangtyp A entsprechende Personengruppe 30...50 ms nach dem Aufsetzen des Absatzes Rutschgeschwindigkeiten gemessen, die etwa den Aufsetzgeschwindigkeiten des Absatzes entsprechen. Für die durchgeführten Versuche liegt das Häufigkeitsmaximum der Aufsetzgeschwindigkeit für **Gangtyp A** bei **10...30 cm/s** (Tab. 8.2). Diese Geschwindigkeit sollte als untere Grenze der **Rutschgeschwindigkeit** übernommen werden.

Die unter Pos. 2 in Tabelle 10.1 für **Gangtyp B** entsprechend festgestellte höhere **Rutschgeschwindigkeit $v_R \approx 70...90 \text{ cm/s}$** ist erfahrungsgemäß für solche Materialkombinationen relevant, bei denen mit zunehmender Geschwindigkeit ab einem bestimmten Grenzwert der Reibwert μ besonders bei Nässe abfällt, wie auf bestimmten unprofilierten Hartböden (z. B. glasierte Fliesen, Kunstharzbeschichtungen ohne Einstreuungen) oder elastischen Belägen (z. B. PVC). Dabei wird das Gleitmittel (z. B. Wasser) zwischen der Sohle und dem Fußboden nicht ausreichend verdrängt und der Gleitmittelfilm auf dem Boden kann nicht durchdrungen werden. Diese Rutschgeschwindigkeit sollte bei den Materialkombinationen übernommen werden, die bei Gleitmitteln (Nässe o. ä.) sowie erhöhten physischen Tätigkeitsanforderungen (schnelle Gehbewegungen) eine starke Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes erkennen lassen.

Ein Unfallschwerpunkt sind Sturzunfälle durch Ausrutschen bei Richtungsänderungen. Für kritische Gangphasen unter Pos. 3 ist die Aufsetzgeschwindigkeit v_{ho} gangtypunabhängig bei Richtungsänderung im Mittelwert größer (Tab. 9.1) als beim Geradeausgang (Abschn. 8.2). Das Ausrutschen erfolgt infolge der Beschleunigungskräfte (Fliehkraft) nicht in Auftrittsrichtung, sondern in seitlich abgelenkter Richtung. Der Rutschvorgang beginnt mit geringer Geschwindigkeit. Rutschgeschwindigkeiten für diese kritische Gangphase sind messtechnisch nicht erfassbar. Der Geschwindigkeitsparameter sollte mindestens so hoch sein wie der bei kritischer Gangphase 1 (Aufsetzen des Absatzes).

Anforderungskoeffizient Q_4 beim Gang mit Richtungsänderungen (0,21 und 0,24 – s. Tab. 9.1) ist etwa gleich dem beim Geradeausgang Q_1 (0,22 – s. Tab. 8.1). Im Gegensatz zu Q_1 wirkt Q_4 jedoch über einen längeren Zeitraum. Mögliche Veränderung der Parameter während der Drehbewegung (z. B. Kontaktfläche) und das Vorhandensein von Gleitmitteln können das Ausrutschen begünstigen.

Die Umsetzung der vorgeschlagenen Prüfparameter hängt maßgeblich von deren Realisierbarkeit ab. Dabei wird ein ortsunabhängiges Prüfverfahren immer ein Kompromiss sein, da es kaum gelingen wird, alle Bedingungen des Ausrutschvorganges als Prüfparameter zu erfassen und vor allem technisch zu realisieren.

Das betrifft neben der Prüfgeschwindigkeit insbesondere die Flächenpressung, Materialart und Anordnung der Gleiter. Zum Beispiel wären die in Tabelle 10.1 für die kritische Gangphase Pos. 1 und 2 angeführten Flächenpressungen in einem praxistauglichen handhabbaren Gerät vor allem hinsichtlich des Gewichtes nicht umsetzbar.

Um die Prüfparameter in diesem Sinne zu optimieren, wurden für ausgewählte Schuhsohlenmaterialien und Fußböden der Einfluss verschiedener Materialkenngrößen sowie der Prüfparameter Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung auf die Reibwerte untersucht. Ziel sollte es sein, geeignete Prüfgleitermaterialien zu finden, die vor allem bei höheren Prüfgeschwindigkeiten möglichst geringe Veränderungen der Gleitreibungseigenschaften zeigen und eine differenzierte Beurteilung unterschiedlicher Bodenbeläge ermöglichen. Abschließend soll ein Vorschlag für die Prüfparameter eines ortsunabhängigen Prüfverfahrens unterbreitet werden.

11 Untersuchungen zur Optimierung der Prüfparameter

11.1 Untersuchte Materialkombinationen

Untersuchte Bodenbeläge

Ausgewählt wurden typische, unprofilierte Bodenbeläge (Hartböden und elastische Beläge), für die eine instationäre Gleitreibungsmessung in Frage kommt (Tab. 11.1). Die Beläge wurden im trockenen und im nassen Oberflächenzustand geprüft. Korrekterweise handelt es sich hierbei eher um einen „feuchten“ Oberflächenzustand, d. h. dass mittels Schwamm die Oberfläche befeuchtet wurde, stehende Nässe wurde vermieden. Um einen gleichmäßigen Flüssigkeitsfilm (besonders bei hydrophoben Oberflächen) zu erzeugen, wurde entspanntes Wasser verwendet (10 ml Spülmittel auf 10 l Leitungswasser nach DIN 51097).

Tab. 11.1 Untersuchte Bodenbeläge [3]

Belag	Rauigkeit R_z (μm)	Elastizität (Shore A)
Granitplatten 70x59 x 2 cm <ul style="list-style-type: none"> • C 60-geschliffen • C 220-geschliffen 	11 – 22 6 – 12	
Spaltplatten (Steinzeug) 24x11,5 cm	59 – 79	
Fliesen (unprofiliert, glasiert) 25x25 cm	28 – 40	
PVC-Bodenbelag	3 – 4	95 – 97

Verwendete Gleiter

Entsprechend den für Schuhsohlen am häufigsten verwendeten Materialien wurde in einer Vorauswahl verschiedene Materialien getestet. Materialien mit großer Reibung und/oder hohem Verschleiß schieden dabei aus. Gewählt wurden dabei auch solche Sohlenmaterialien, die wegen ihrer großen Härte erfahrungsgemäß unfallbegünstigend sein können. Die Untersuchungen wurden mit den in Tabelle 11.2 aufgeführten Gleitermaterialien durchgeführt.

Tab. 11.2 Verwendete Gleiter [3]

Gleitermaterial	Shore A - Härte	Rauigkeit R_z (μm)	sonst. Eigenschaften/ Bemerkungen
Kunststoff Polyurethan PU 1 PU 2 PU 3 PU 4	94 95 75 76	24–75 >100 4–17 3–16	schwach profiliert (Waffelmuster) stärker profiliert (Querrippen) unprofiliert; Dichte 850 kg/m^3 unprofiliert; Dichte 1150 kg/m^3
Nitrilkautschuk Gummi GU 1 GU 2 GU 3 GU 4 GU 5	77 96 82 72 76	>60 2– 7 28–40 25–50 21– 26	schwach profiliert (Waffelmuster) unprofiliert; leitfähiger Prüf gummi unprofiliert; angeraut ¹ unprofiliert; angeraut ¹ unprofiliert; Ausschnitt aus Sicherheitsschuhsohle
Leder (Spaltleder)	95	7–10/21–25	glatt/aufgeraut ¹

¹ Körnung 400

11.2 Versuchseinrichtung

Als Versuchseinrichtung diente ein Zugtribometer, das über eine 1,5 m lange Prüfbahn gezogen wurde. Im Verlauf des zu prüfenden Bodenbelags befand sich höhengleich eine 3-Komponenten-Kraftmessplattform. Die Gleitgeschwindigkeit des Tribometers konnte zwischen 0 und 2,0 m/s stufenlos verändert werden. Die Masse des Schleppegewichts betrug 6,0 kg.

An der Grundplatte waren drei in Bewegungsrichtung angeschrägte Gleiterstücke mit einer Einzelauflagefläche von $1,5 \times 2,0 \text{ cm}$ (Gesamtfläche 9 cm^2) in 3-Punktauflage angebracht. Dadurch ergab sich eine Flächenpressung von $6,5 \text{ N/cm}^2$. Wegen des auf das Vorderteil des Schleppegewichtes wirkenden Kippmomentes war vorn ein höherer Gleiterverschleiß festzustellen. Um einen gleichmäßiger verteilten Verschleiß zu erzielen, wurden daher zwei der drei Gleiter vorn angeordnet.

11.3 Wesentliche Untersuchungsergebnisse

Abhängigkeit des Reibwertes von der Gleitgeschwindigkeit

Bei den Reibwertmessungen kommen auf den untersuchten Belägen die verschiedenen Reibungsformen und Reibungskomponenten in Abhängigkeit von Rauigkeit und Zwischenmedium (Wasser) zur Wirkung. Während im trockenen Zustand Adhäsions- und Deformationsreibung dominieren, kann im nassen Zustand neben Adhäsions- und Deformationsreibung (Mischreibung) auch die Flüssigkeitsreibung auftreten.

In Tabelle 11.3 ist in der Tendenz die Abhängigkeit des Reibwertes μ von der Gleitgeschwindigkeit zusammengefasst.

Tab. 11.3 Abhängigkeit des Reibwertes μ von der Gleitgeschwindigkeit v am Beispiel ausgewählter Bodenbeläge (trocken/nass) - nach [3]

Bodenbelag	trocken Oberfläche		nasse Oberfläche	
	niedrige v ($v=0\dots0,3$ m/s)	zunehmende/ höhere v ($v>0,3$ m/s)	niedrige v ($v=0\dots0,3$ m/s)	zunehmende/ höhere v ($v>0,3$ m/s)
Granit (C 60 und C 220)	$\mu_{\text{trocken}} \approx \text{const.}$ ($\mu_{\text{C220}} < \mu_{\text{C60}}$)		$\mu_{\text{nass}} > \mu_{\text{trocken}}$	Abfall μ_{nass}
Spaltplatten	$\mu_{\text{trocken}} \approx \text{const.}$ $\mu_{\text{trocken}} > \mu_{\text{nass}}$		$\mu_{\text{nass}} < \mu_{\text{trocken}}$	Abfall μ_{nass}
Fliesen (unprofiliert, glasiert)	$\mu_{\text{trocken}} \gg \mu_{\text{nass}}$	Anstieg μ_{trocken}	$\mu_{\text{nass}} \ll \mu_{\text{trocken}}$	$\mu_{\text{nass}} \approx \text{const.}$ $\approx 0,1\dots0,2$
PVC	$\mu_{\text{trocken}} \gg \mu_{\text{nass}}$		$\mu_{\text{nass}} \ll \mu_{\text{trocken}}$	Abfall μ_{nass}
	Anstieg μ_{trocken}	$\mu_{\text{trocken}} \approx \text{const.}$		$\mu_{\text{nass}} \approx 0,1\dots0,3$

Auf **Granit (C60, C220)** war sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand im Geschwindigkeitsbereich $0,1\dots1,0$ m/s der Reibwert $\mu \geq 0,4$. Die höchsten Reibwerte ($\mu = 0,6\dots0,7$) wurden auf trockenem Granit mit dem relativ weichen Gummi GU1 erzielt. Der Reibwertabfall war vor allem bei höherer Geschwindigkeit und Nässe nicht so stark wie auf Fliesen- und PVC-Belag.

Der Reibwertverlauf bei **Spaltplattenbelag** zeigt eine ähnlich gering fallende bis konstante Geschwindigkeitsabhängigkeit wie bei Granitbelag, allerdings auf höherem Niveau ($\mu = 0,55\dots0,85$), was auf die höhere Rauigkeit zurückzuführen ist. Hier ist über den gesamten Geschwindigkeitsbereich der Reibwert für trockenen Oberflächenzustand höher als für nassen Zustand.

Auffällig ist bei den Bodenbelägen **Fliesen, glasiert und PVC** der extreme Unterschied zwischen μ_{trocken} und μ_{nass} , bei anfänglich fallendem und extrem niedrigem Reibwert μ_{nass} mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit (siehe Beispiel Abb. 11.1 und Abb. 11.2).

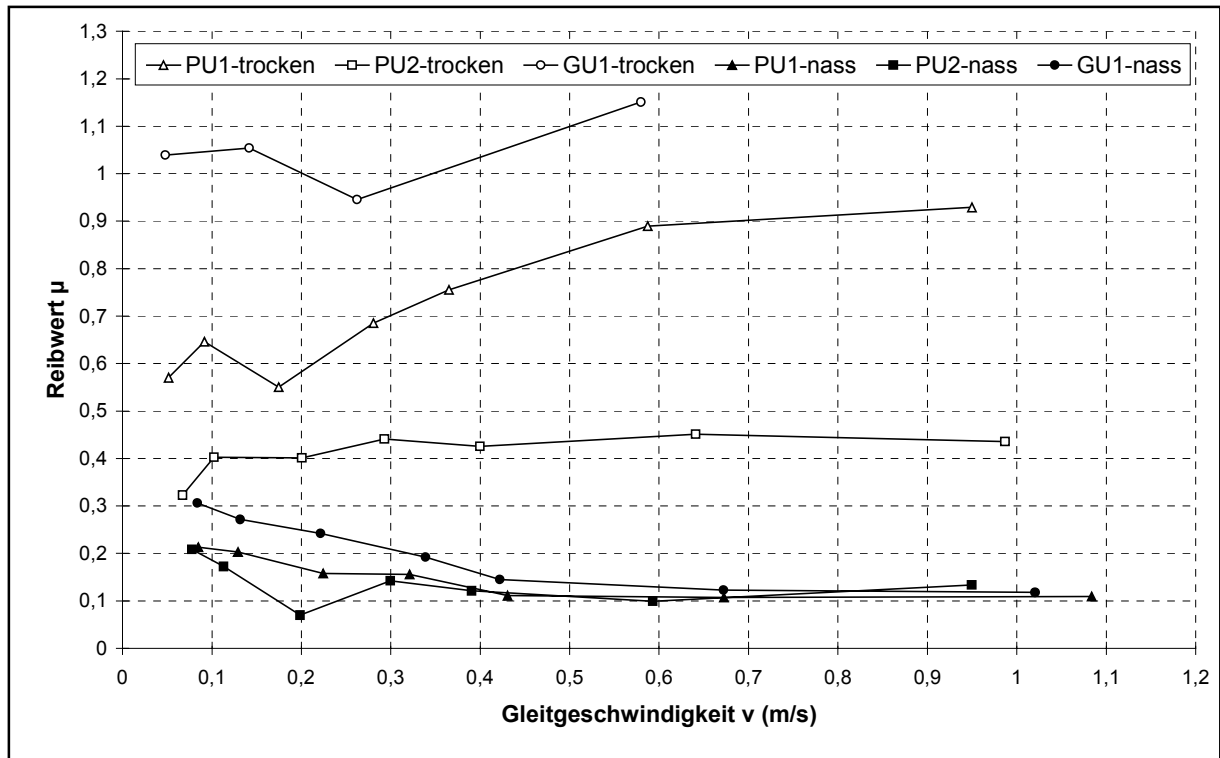


Abb. 11.1 Beispiel für Reibwertmessung auf unprofilierten, glasierten Fliesen (trocken/nass) mit Kunststoffgleitern (PU1, PU2) und Gummigleiter (GU1) [3]

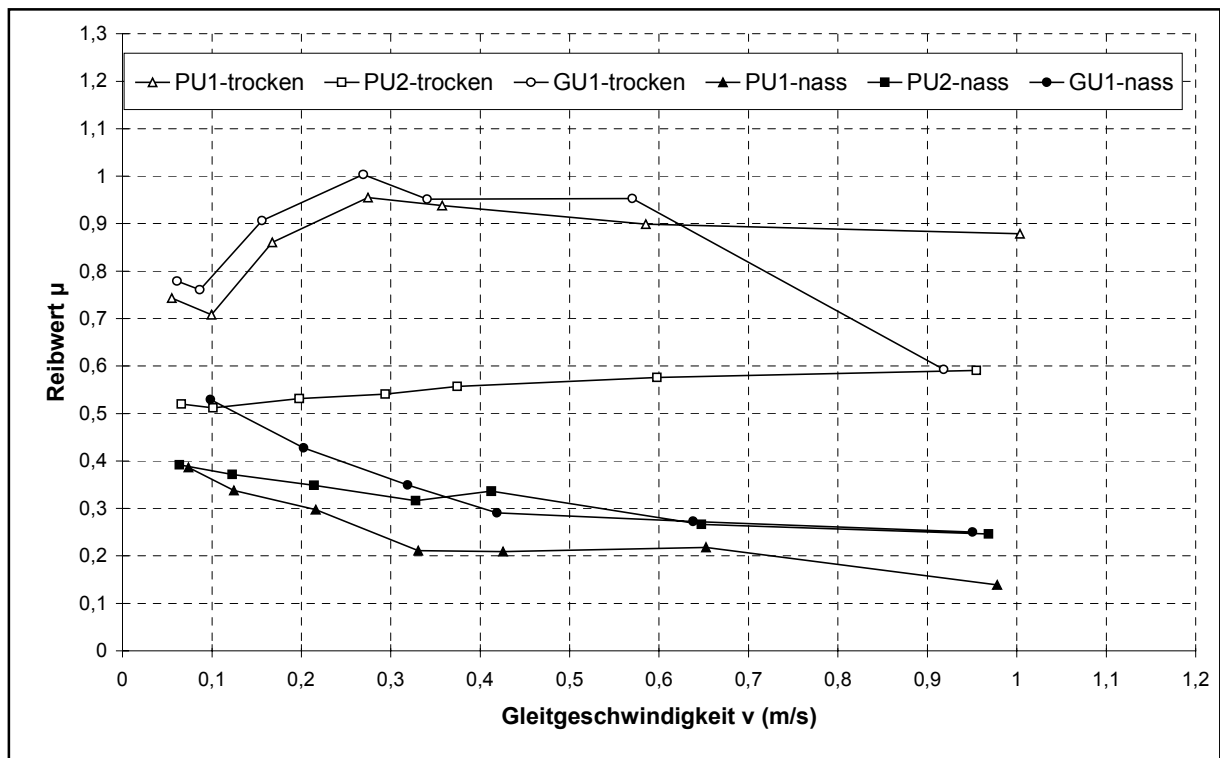


Abb. 11.2 Beispiel für Reibwertmessung auf PVC-Belag (trocken/nass) mit Kunststoffgleitern (PU1, PU2) und Gummigleiter (GU1) [3]

Abhängigkeit des Reibwertes von der Art des Gleitermaterials

Die wichtigsten zum Einsatz kommenden Sohlenmaterialien (vgl. Tab. 11.2)

- Nitrilkautschuk (Gummi – GU)
- Polyurethan (PU)
- Leder (Spaltleder)

sollten hinsichtlich ihrer Eignung als Prüfmaterial untersucht werden. Materialkenngrößen und beschreibende Merkmale, die Einfluss auf den Reibwert haben können, sind neben chemischer Zusammensetzung und Oberflächenform (Sohlungestalt, Profilgebung):

- Elastizität/Härte (Shore A)
- Dichte (kg/m^3)
- Mikro-Oberflächengestalt (Rauigkeit R_z).

Verwendet wurde unprofiliertes bzw. wenig profiliertes Plattenmaterial, aus dem Schuhsohlen hergestellt werden sowie profillose Ausschnitte aus fertigen Sohlen. Untersucht wurde die Eignung des Gleitermaterials, für die gewählten Bodenbeläge differenzierte, messbare Reibwerte im Bereich zwischen 0 und 1,0 zu erhalten.

Dabei war die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes für die einzelnen Gleitermaterialien zu beachten. In den Untersuchungen wurde für alle Gleitermaterialien bei Nässe und Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit von 0,2 m/s auf 0,9 m/s ein Abfall des Reibwertes festgestellt. Dabei zeigte sich, dass eine Auswertung allein nach der Art des Gleitermaterials (PU1...PU4/GU1...GU4) ohne Materialkenngrößen (Härte, Dichte, Rauigkeit) nicht möglich ist.

Einfluss der Shore A-Härte des Gleiters

Zusammenfassend können für die untersuchten Gleitermaterialien (Tab. 11.2) hinsichtlich ihrer Eignung als Prüfmaterial bei trockenem und nassem Oberflächenzustand des zu prüfenden Bodenbelages folgende Tendenzen festgestellt werden:

- **Auf trockenen Bodenbelägen sind PU-Gleiter mit einer Härte > 90 Shore A** (z. B. PU2) geeignet, da eine gute Differenzierbarkeit der Reibwerte für unterschiedliche Bodenbeläge bei geringerer Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes als bei Gummimaterial festgestellt wurde. Bei Gleitermaterial geringerer Härte (<80 Shore A) ergeben sich aufgrund von Deformationsreibung sowohl bei PU – als auch GU-Gleitern (z. B. GU1) mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit zunächst zunehmende, dann abnehmende Reibwerte bzw. Stick-Slip-Effekte (siehe Beispiel Abb. 11.1 und Abb. 11.2).

Neben PU- und GU-Gleitern wurden Reibwertmessungen mit **Leder-Gleitern**, die bei anderen traditionellen Verfahren (z. B. mit Schuster-Gleiter, FSC 2000) auf trockener Oberfläche verwendet werden, durchgeführt (Abb. 11.3). Der horizon-

tale Kurvenverlauf zeigt nahezu konstante, d. h. von der Gleitgeschwindigkeit unabhängige Reibwerte an.

Als Gleitermaterial für die Prüfung trockener Böden ist neben hartem PU auch Leder (Spaltleder) geeignet.

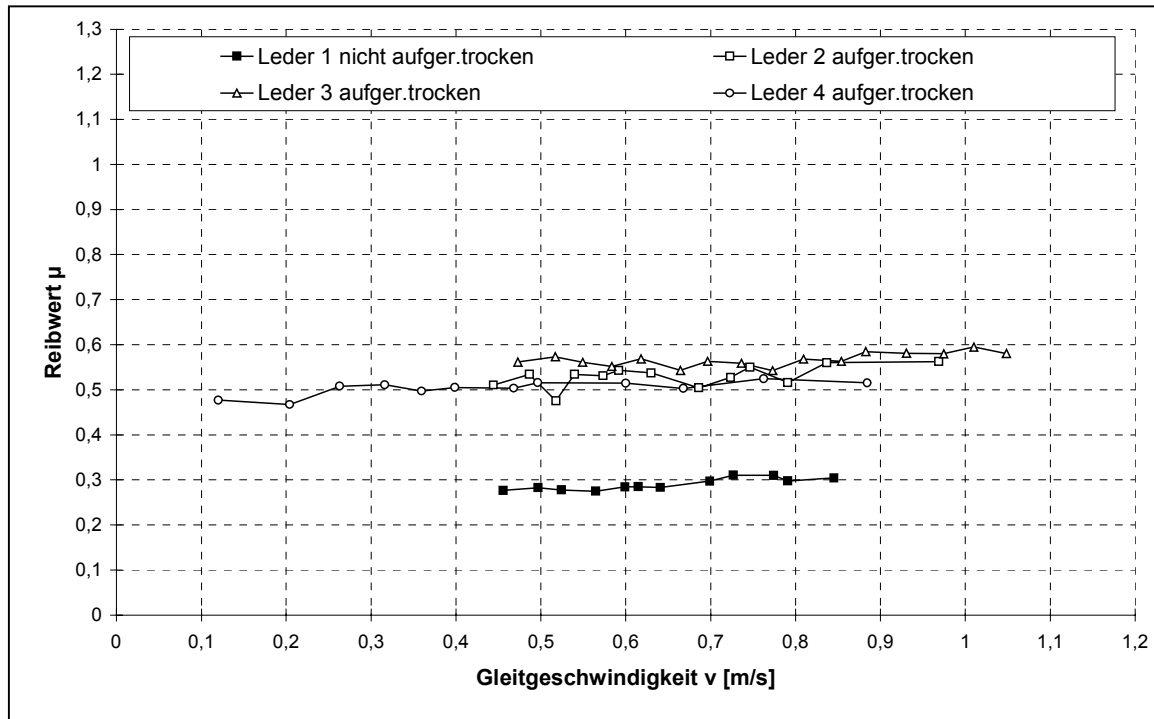


Abb. 11.3 Beispiel für Reibwertmessung mit Leder-Gleiter auf PVC-Belag (trocken) (aufgeraut mit Körnung 400) [3]

- **Auf nassen Bodenbelägen sind Gleiter sowohl aus PU- als auch GU-Material mit einer Härte > 90 Shore A geeignet.** Bei diesen Werkstoffen liegt eine gute Differenzierbarkeit der Reibwerte vor, bei konstantem bis leicht fallendem Verlauf der Reibwerte mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit (siehe Beispiel Abb. 11.4).

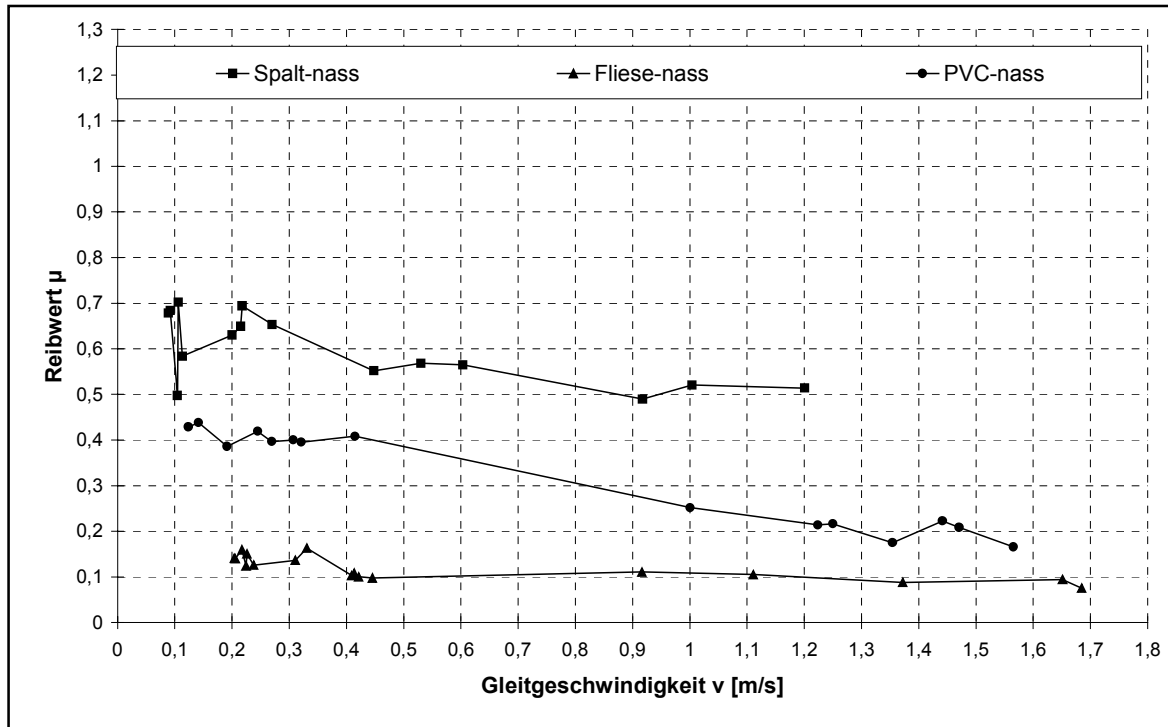


Abb. 11.4 Beispiel für Reibwertmessung mit Gummi-Gleiter (GU 2) auf Spaltplatten-, Fliesen-, PVC-Belag (nass) [3]

Sowohl bei weicherem PU- als auch GU-Gleiter mit einer Härte <80 Shore A ist ein steiler Abfall des Reibwertes von relativ hohen Ausgangswerten zu verzeichnen (vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich <0,3 m/s – siehe Abb. 11.1 und Abb. 11.2).

Einfluss der Dichte des Gleitermaterials

Vergleichsmessungen wurden durchgeführt zwischen den Gleitermaterialien PU 3 und PU 4. Die beiden Materialproben bestehen aus dem gleichen Grundmaterial mit nahezu gleicher Härte (75 bzw. 76 Shore A).

Die Dichte beider Materialien war jedoch unterschiedlich:

$$\text{PU 3} = 850 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{PU 4} = 1150 \text{ kg/m}^3.$$

Für die untersuchten gleichartigen PU-Gleitern unterschiedlicher Dichte konnten keine wesentliche Unterschiede im Reibungsverhalten nachgewiesen werden. Lediglich für nassen Fliesenbelag war mit dem Gleiter höherer Dichte auch bei geringen Gleitgeschwindigkeiten ein niedriger Reibwert zu verzeichnen.

Der Untersuchungsumfang war zu gering, um verallgemeinerte Aussagen machen zu können. Zu klären wäre dieser Zusammenhang vor allem hinsichtlich des Einflusses auf die Adhäsionsreibung.

Einfluss der Rauigkeit der Gleiterfläche

Der Einfluss der Rauigkeit wurde mit dem Ledergleiter auf trockenem PVC-Belag untersucht. Zur Aufrauung wurde Schleifpapier 400er Körnung verwendet.

Die Reibwertmessungen zeigen deutliche Unterschiede zwischen glattem und aufgerautem Gleiter ($\Delta\mu \leq 0,3$), wobei für beide Oberflächenzustände kaum eine Geschwindigkeitsabhängigkeit festgestellt werden konnte (Abb. 11.3). Erfahrungsgemäß stellt sich nach etwa 3 Messvorgängen eine Verglättung der Gleiteroberfläche ein, was sich in wenig veränderlichen Messwerten bei Wiederholungsmessungen zeigt. Um eine zu starke Verdichtung und Verglättung durch die Gleitmittelverschmutzungen zu verhindern, ist eine regelmäßige Aufrauung der Gleiterflächen erforderlich.

Die Höhe des Reibwertes hängt vom Grad des Aufrauens der Ledergleitfläche ab. Für den Aufrauvorgang sind daher definierte Vorgaben hinsichtlich Art und Körnung des Schleifmittels, Anpressdruck, Anzahl und Richtung der Schleifbewegung u. a. erforderlich.

Abhängigkeit des Reibwertes von der Flächenpressung des Gleiters

Der Parameter Flächenpressung wurde nur stichprobenhaft untersucht, für $P = 6,5 \text{ N/cm}^2$ und $P = 10,7 \text{ N/cm}^2$ (Tab. 11.4). Variiert wurde das Gleitergewicht bei Beibehaltung der Gesamtgleiterfläche von 9 cm^2 .

Tab. 11.4 **Abhängigkeit des Reibwertes von der Flächenpressung**
(PU-Gleiter auf nassem C 60-Granit) [3]

P = 6,5 N/cm²		P = 10,7 N/cm²	
v (m/s)¹⁾	μ¹⁾	v (m/s)¹⁾	μ¹⁾
0,10	0,79	0,07	0,81
0,89	0,60	0,26	0,78
1,65	0,50	0,45	0,72
		0,82	0,68

¹⁾ Mittelwert aus 3 Messwerten

Im Vergleich der Reibwertverläufe für die beiden Flächenpressungen waren kaum Unterschiede festzustellen.

Höhere Flächenpressungen durch Verringerung der Gleiterfläche, wie sie z. B. bei Absatzkanten- oder Sohlenkantenreibung entstehen können, wurden nicht untersucht. Versuche mit höheren Flächenpressungen, d. h. mit größeren Gleitergewichten, waren auch mit der vorhandenen Versuchseinrichtung nicht möglich. Erfahrungsgemäß kann eine Kantenreibung zu einem drastischen Abfall der Rutschhemmung führen (z. B. auf einem feuchten, mit Pflegemitteln überschichteten Belag). Unter bestimmten Bedingungen kommt es bei Nässe auf Sohle bzw. Absatz und Belag nicht mehr zum Kontakt zwischen den Reibpartnern und es entsteht Flüssigkeitsreibung. Dabei kann die Flächenpressung unterschiedlich sein (Abschn. 15.2) [17].

12 Vorschlag von Prüfparametern und deren Realisierbarkeit in mobilen Reibungsmessgeräten

12.1 Auswahl der Prüfparameter

Die Auswahl aus den unter Abschnitt 11 optimierten Prüfparametern erfolgte unter folgenden Gesichtspunkten [3]:

- differenzierte Verteilung der Reibwerte für unterschiedliche Bodenbeläge und Oberflächenzustände (trocken/nass) einschließlich Veränderungen durch Nachbehandlungen, Reinigung und Pflege
- möglichst konstanter bzw. wenig veränderlicher Reibwertverlauf im Gleitgeschwindigkeitsbereich 0,2 bis 0,9 m/s (mit Einschränkung bestimmter unprofilierter Beläge, wie Hartböden und elastische Beläge, bei Nässe und höherer Gleitgeschwindigkeit)
- vergleichbare Reibwerte mit denen aus Messungen mit anderen Gleitreibungsmessgeräten (z. B. FSC 2000, Schuster-Gleiter, Schiefe Ebene) und weitgehend realistische Übereinstimmung gemessener Reibwerte mit der subjektiven Beurteilung der Rutschhemmung der Beläge
- Reduzierung bzw. Vereinfachung der menschenbezogenen Bewegungsparameter aus den biomechanischen Untersuchungen beim Gehen auf ein akzeptables Maß zur Umsetzung in messtechnische Prüfparameter
- technische Realisierbarkeit der vorgeschlagenen Prüfparametern in praktikablen, handhabbaren Messgeräten

Unter den genannten Gesichtspunkten wurden für Prüfverfahren zur instationären Gleitreibungsmessung von Bodenbelägen folgende Prüfparameter vorgeschlagen (Tab. 12.1).

Tab. 12.1 Vorschlag von Prüfparametern zur instationären Gleitreibungsmessung auf Bodenbelägen [3]

Prüfparameter	technische Daten
Prüfgeschwindigkeit	$v_1 = 0,2 \text{ bis } 0,3 \text{ m/s}$ $v_2 > 0,7 \text{ m/s}$
Flächenpressung	$P = 8 \text{ bis } 10 \text{ N/cm}^2$
Gleitematerial	
- auf trockenen Belägen	Leder oder PU > 90 Shore A-Härte
- auf nassen Belägen	Gummi oder PU > 90 Shore A-Härte

Die Bewegungsform für die Gleitreibungsmessung wurde offen gelassen. Entscheidend dafür sind die Möglichkeiten der technischen Realisierung der Prüfparameter in mobilen Gleitreibungsmessgeräten.

Im Sinne der in Abschn. 6.2 beschriebenen Prüfungssimulation des Gleitvorgangs sind die aus menschenbezogenen Bewegungsparametern abgeleiteten Prüfparameter gemäß Tabelle 12.1 in praktikablen, handhabbaren Messgeräten umzusetzen. Einige der vorgeschlagenen Prüfparameter konnten in bereits vorhandenen Gleitreibungsmessgeräten, z. B. FSC 2000 und Pendelgleiter, festgestellt werden. Ein ausführlicher Vergleich mit den Parametern der bekanntesten Messgeräten erfolgt in Abschnitt 13. Nachfolgend soll auf Möglichkeiten der Realisierung der ausgewählten Parameter eingegangen werden.

12.2 Prüfungsgeschwindigkeit

Die Umsetzung der vorgeschlagenen Prüfungsgeschwindigkeiten

$$v_1 = 0,2 \text{ bis } 0,3 \text{ m/s}$$

$$v_2 \geq 0,7 \text{ m/s}$$

hat wesentlichen Einfluss auf die konstruktive Ausführung der Gleitreibungsmessgeräte.

Die **niedrigere Geschwindigkeit $v_1 = 0,2 \dots 0,3 \text{ m/s}$** lässt sich mit Geräten realisieren, bei denen die Gleitermasse nach dem klassischen Tribometerverfahren translatorisch oder rotatorisch auf der Prüffläche bewegt wird (Abb. 6.1). Dabei gibt es bei translatorischer Bewegung zwei Möglichkeiten:

- a) **Gleiter mit Eigenantrieb**, wobei die Antriebsräder direkt auf den zu prüfenden Belag eingreifen (z. B. FSC 2000 [15]) oder sich die Antriebselemente außerhalb des zu prüfenden Belages befinden, z. B. auf Schienen o.a. Führungen. Bei direkt auf dem Belag wirkenden Antriebsrädern können sich bei niedrigen Reibwerten des Bodenbelages die Räder durchdrehen, wodurch keine stabile Gleitbewegung und somit keine Reibwertmessung zustande kommen kann.
- b) **gezogener oder geschobener Gleiter**, wobei die Gleitermasse von einem festen Punkt aus z. B. mittels Seilzug oder starrer Zug-/Schubstange gezogen bzw. geschoben wird. Die Festpunkte der Geräte können z. B. ein Saugnapf oder eine Fußplatte, auf der die messende Person steht, oder feststehende Gehäuseteile sein.

Die Messung der Reibkraft F_R nach a) und b) erfolgt im Kraftverlauf zwischen Antrieb bzw. Befestigungspunkt und Gleitreibungsfläche. Gemessen wird, nachdem sich der Gleiter in gleichförmiger Bewegung befindet. Erfahrungsgemäß ist für die Reibwertmessung eine Gleitstrecke von mindestens 50 cm erforderlich.

Bei Gleitreibungsmessung auf kurzen Trittflächen, z. B. Treppenstufen, ist eine gleichförmige rotierende Gleitbewegung zu empfehlen, z. B. mit Hilfe einer **mit Gleitern bestückten rotierenden Scheibe** (Reibscheibe) [28]. Aufgrund des kurzen Gleitweges (eine Kreisbahn mit gleichbleibender Gleitmittelschicht), ist ein höherer konstruktiv-technischer Aufwand für die Reibkraftmessung und Bewegungssteuerung zu erwarten.

Für die Umsetzung der **höheren Prüfgeschwindigkeit $v_2 \geq 0,7 \text{ m/s}$** ist das für v_1 beschriebene translatorische Tribometerverfahren im praktischen Einsatz nur schwer realisierbar, da bei höheren Geschwindigkeiten, z. B. mit Seilzug, größere Beschleunigungskräfte beim Anfahren und Abbremsen entstehen, die u. U. keine sichere Handhabung solcher Geräte ermöglichen. Als praktische Geschwindigkeitsgrenze kann $v_2 \approx 2,0 \text{ m/s}$ angenommen werden. Die Untersuchungen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes haben gezeigt, dass eine maximale Geschwindigkeit von $v_2 = 1,5 \text{ m/s}$ ausreichend ist. Eine höhere Gleitgeschwindigkeit erbringt keine wesentliche Reibwertveränderung, der technische Aufwand zur Realisierung einer höheren Gleitgeschwindigkeit kann jedoch höher werden.

Solche Gleitgeschwindigkeiten können mit relativ geringem technischen Aufwand bei ungleichförmigen Bewegungen erzielt werden, wenn der Gleitkörper mit v_2 aufsetzt und nach einem bestimmten Gleitweg zum Stillstand kommt (z. B. Stuttgarter Gleiter, Abrollgleiter – s. Abschn. 13). Die verloren gegangene Reibungsenergie ist ein Maß für die Rutschhemmung.

Die Realisierung des Reibvorgangs über eine gleichförmige rotierende Bewegung stellt hohe Anforderungen vor allem an die Steuerung der Bewegung und an die Reibkraftmessung aufgrund des relativ kurzen Gleitweges (eine Kreisbahn) und der hohen Winkelgeschwindigkeit [28].

12.3 Flächenpressung

Die Handhabbarkeit eines mobilen Messgerätes wird maßgeblich durch dessen Gewicht bestimmt. Über vorgegebene Flächenpressung lassen sich Gewicht und Gleiterfläche in bestimmten Grenzen variieren. Als Flächenpressung für den Prüfgleiter wurde in Tabelle 12.1 ein Gesamtwert von $P = 8 \dots 10 \text{ N/cm}^2$ vorgeschlagen. Als handhabbares Gewicht für Gleitreibungsmessgeräte haben sich Massen bis 10 kg erwiesen. Ausgehend von dieser Gewichtskraft ergibt sich eine Prüfgleiterfläche von $A \leq 12 \text{ cm}^2$.

Diese Einschränkung der angenommenen Flächenpressung erscheint vertretbar, da geringere Flächenpressungen durchaus z. B. beim Gangtyp B auftreten können (Tab. 10.1).

Bei Untersuchungen von Belägen ohne Gleitmittel und im trockenen Zustand wurde im interessierten Geschwindigkeitsbereich keine eindeutige Abhängigkeit des Reibwertes von der Flächenpressung festgestellt.

Bei Vorhandensein mehrerer Einzelgleiter haben Anordnung und Form der einzelnen Gleiter Einfluss auf die Verteilung der Flächenpressung. Da bei einem gezogenen Gleiter der Kraftangriffspunkt in der Regel oberhalb der Gleiterfläche liegt, entsteht um den vorderen Auflagepunkt des vorderen Gleiters (in Bewegungsrichtung gesehen) ein Moment, das den vorderen Gleiter zusätzlich zur Normalkraft belastet. Um eine möglichst gleichmäßige Belastung aller Gleiter (und damit gleichmäßige Flächenpressung) zu erzielen, empfiehlt es sich, die größere Gleiterfläche nach vorn zu verlegen.

In den experimentellen Untersuchungen hat sich unter dem genannten Gesichtspunkt herausgestellt, dass eine Anordnung der Gleiter in zwei Längsstreifen (analog

dem Schuster-Gleiter) zu einer ungleichmäßigen Lastverteilung und einem verstärkten Verschleiß beider Gleiter im vorderen Bereich führt. Als günstig hat sich daher eine Gleiteranordnung in Dreipunktauflage mit zwei Gleitern vorn und einem Gleiter hinten erwiesen.

Untersuchungen [17] haben ergeben, dass insbesondere bei nassen Böden die Form und Größe der Gleiter sowie deren Anordnung (hintereinander/längs bzw. nebeneinander/quer) einen wesentlichen Einfluss auf die Flüssigkeitsverdrängung und damit auf den Reibwert haben.

In einer Messvorschrift sollte daher neben der Gleiterfläche auch die Breite und Länge sowie die Anordnung der Gleiter festgelegt werden. Auf der Grundlage der durchgeführten Messungen mit **Einzelgleitern in Dreipunktauflage** können folgende Abmessungen empfohlen werden:

Breite der Gleitfläche: 1,5 cm

Länge der Gleitfläche: 2,0 cm

(ergibt bei drei Einzelgleitern eine Gesamtgleitfläche $A_{\text{ges.}} = 9,0 \text{ cm}^2$).

Um ein möglichst gleichmäßiges Auflaufen der Gleiter auf den Gleitmittelfilm zu gewährleisten, sollten die Gleiter vorn angeschrägt sein (unter Berücksichtigung des mittleren Aufsetzwinkels in Abschn. 8.3: 20° bis 30°). Des Weiteren sollten die Gleiter so zueinander versetzt sein, dass sich jeder Gleiter auf einer eigenen, von den anderen Gleitern nicht gestörten Spur bewegt.

12.4 Gleitermaterial

Aus den in Tabelle 12.1 empfohlenen Gleitermaterialien wurden für den Einsatz in mobilen Gleitreibungsmessgeräten in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand folgende Materialien gewählt:

- **trockener Oberflächenzustand: Leder**

Leder wird bei anderen traditionellen Gleitreibungs-Messverfahren (z. B. Schuster-Gleiter, Pendelgleiter, Stuttgarter Gleiter - vgl. Abschn.13) verwendet und hat sich dort bewährt. Da Leder (Spaltleder) ein Naturprodukt ist, sind gewisse Unregelmäßigkeiten in der Struktur möglich. Um zu große Unterschiede zu vermeiden, sind Vorgaben erforderlich hinsichtlich

- Beseitigung der glatten, harten Epidermis in bestimmter Tiefe
- Festlegung einer Verschleißgrenze, Verschleißdicke
- Art und Weise des Anschleifens (Art und Körnung des Schleifmittels, Anzahl und Richtung der Schleifbewegungen, Anpressdruck)
- Lagerung des Ledergleiters (Temperatur, Luftfeuchtigkeit)

- **nasser Oberflächenzustand: Gummi SBR (Shore A > 90)**

Empfohlen wurde ein SBR-Gummi nach DIN ISO 868 (entspr. GU2 in Tab. 11.2). Voraussetzung für die Verwendung als Prüfnorm ist, dass ein Gleitermaterial in gleicher chemischer Zusammensetzung und mit gleichen physikalischen Eigenschaften für längere Zeit bereitgestellt werden kann.

Die Gleiteroberfläche ist unprofiliert und vor der Messung anzuschleifen. Art und Weise des Anschleifens ist vorzugeben (siehe oben).

13 Parametervergleich mit ausgewählten ortsunabhängigen Prüfverfahren

Nachfolgend sollen die Prüfparameter für ausgewählte Gleitreibungsmessgeräte, die am Häufigsten zum Einsatz kommen, mit den in Tabelle 12.1 vorgeschlagenen Parametern verglichen werden. Dabei handelt es sich um Geräte, bei denen die vorgeschlagenen Parameter Prüfgeschwindigkeit, Flächenpressung und Gleitmaterial im unterschiedlichen Maße realisiert wurden.

Nähere Angaben zu Prüfparametern, Funktionsweise und Herstellern können für einige Geräte den Beschreibungen in [15] entnommen werden.

Die ausgewählten Geräte können hinsichtlich ihres physikalischen Wirkprinzips wie folgt unterschieden werden [15, 16]:

13.1 Tribometerverfahren mit gleichförmiger Gleitgeschwindigkeit

Bei Geräten nach diesem Verfahren wird ein Gleitkörper mit einer bestimmten Masse über den zu prüfenden Belag bewegt. Dabei wird die Reibzahl durch **Messung der Reibkraft** ermittelt (Abb. 6.1). Je nach Kraftwirkungsrichtung, Form und Anordnung des Gleitkörpers unterscheidet man in Zug-, Fahr- und Rotationsscheibentribometer. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind:

- **Tortus Floor Friction Tester**

Es ist eines der ersten serienmäßig hergestellten Gleitreibungsmessgeräte, das auch heute noch zum Einsatz kommt. Es ist ein selbstfahrendes Gerät. Kennzeichnend für den Tortus ist die niedrige Gleitgeschwindigkeit von 1,7 cm/s und der geringe Gleitkörper-Durchmesser von 9 mm. Bei einer wirksamen Normalkraft von 2 N ergibt sich eine Pressung von ca. 3 N/cm². Zur Art des Gleitmaterials gibt es keine genauen Angaben (2 verschiedene Sohlenmaterialien).

- **Schuster-Zugtribometer**

Es ist ein handgezogenes Gerät. Dementsprechend ist die Gleitgeschwindigkeit bedienungsabhängig (zwischen 0 und 0,5 m/s). Orientiert wird auf eine Geschwindigkeit von ca. 0,2...0,3 m/s. Das Gerät ist an der Unterseite in Längsrichtung mit zwei Ledergleitern bestückt. Hinsichtlich des Oberflächenzustandes ist daher der Einsatz weitgehend auf trockene Flächen beschränkt. Bei einer Masse des Schleppgewichtes von 4 kg beträgt die Flächenpressung 1...4 N/cm² je nach Kontaktfläche (40...10 cm² - bei Schrägzug).

- **Floor Slide Control 2000 (FSC 2000)**

Das bedienungsfreundliche Gerät bewegt sich mit einer Gleitgeschwindigkeit von ca. 0,1...0,2 m/s (reibwertabhängig). Die Normalkraft beträgt ca. 24 N. Bei einem Gleiter mit der Kontaktfläche von ca. 4 cm² ergibt sich eine Flächenpressung von etwa 6 N/cm². Als Gleitmaterial stehen NBR, PU und Leder (für trocken) zur Verfügung. Bei großer Rutschhemmung des Prüfbelages neigen die selbstangetriebenen Räder zum Durchdrehen.

- **Gleitreibungsmessgerät GMG 100**
(E DIN 51131)

Das motorgezogene Gerät hat eine nominale Gleitgeschwindigkeit von 0,2 m/s, die sich in Abhängigkeit von der Rutschhemmung des Prüfbelages verringern kann. Das Eigengewicht beträgt ca. 9 kg und die Gesamtgleiterfläche in Drei-Punkt-Auflage ca. 9,5 cm² (Flächenpressung ca. 9 N/cm²). Die 3 Einzelgleiter sind wahlweise mit SBR oder PVC (für nass) sowie Leder (für trocken) bestückt. Die Handhabbarkeit des Seilzugantriebs ist verbesserungsbedürftig (Abb. 13.1).

Das Gerät entspricht in seinen Prüfparametern dem aktuellen Normentwurf DIN 51131, das ein Tribometerverfahren zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten zum Inhalt hat.



Abb. 13.1 Gleitreibungsmessgerät GMG 100 nach E DIN 51131

13.2 Prüfverfahren mit ungleichförmiger Gleitgeschwindigkeit

Bei solchen Verfahren kann der Reibwert durch **Messung der Reibungsenergie** bestimmt werden. Es kommen vor allem Verfahren zur Anwendung, bei denen gespeicherte potenzielle Energie in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Dabei können relativ hohe Auftreffgeschwindigkeiten erzielt werden - z. B.:

- **Pendelgleiter SRT**
(DIN EN 1341, BC 7976 u.a.)

Eine in waagerechter Lage ausgelenkte Gleitermasse trifft bei der Abwärtsbewegung im unteren Scheitelpunkt mit einer Geschwindigkeit von etwa 3,0 m/s auf den zu prüfenden Belag, gleitet auf einer vorgegebenen Strecke und schlägt in Abhängigkeit von der Restenergie aus. Der Ausschlag des Schleppzeigers (Winkel) über den untersten Punkt hinaus ist ein Maß für die durch Reibung verlorene

Energie, d. h. für die Höhe des Reibwertes. Bei einer Normalkraft von ca. 25 N und einer verschleißabhängigen Kontaktfläche des Gleiters von anfänglich ca. 2,25 cm² (3mm x 76mm) entsteht eine Flächenpressung von ≤ 11 N/cm². Der quer liegende Gleiter kann wahlweise mit Gummi unterschiedlicher Härte (4S oder TRL) für nassen Oberflächenzustand oder Leder für trockenen Zustand bestückt werden (Abb. 13.2).

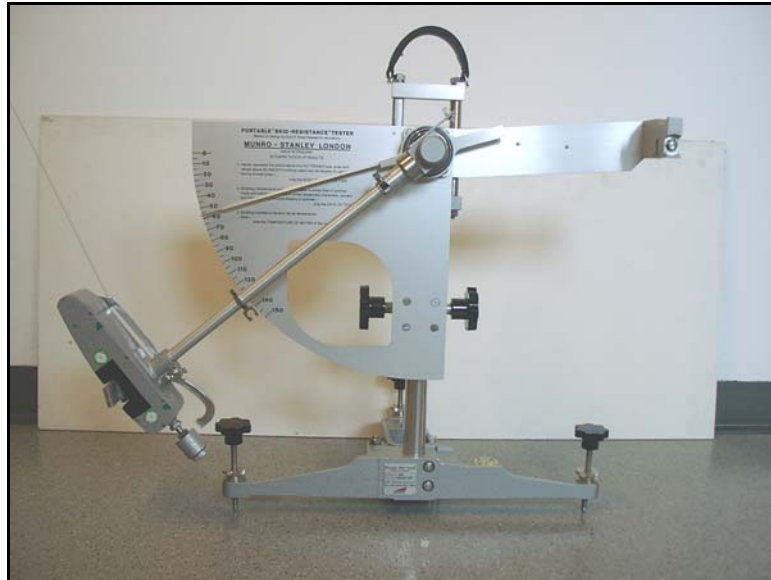


Abb. 13.2 Pendelgleiter nach BC 7976

- **Stuttgarter Gleiter**
(DIN 18032-2, Ausgabe 1991)

Ähnlich wie beim Pendelgleiter wird die Wirkung der Schwerkraft genutzt. Durch das Absenken eines freihängenden Gewichtes wird eine Rotationsbewegung erzeugt, wobei die mit Spaltleder bestückte, rotierende Gleiterscheibe mit einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 0,6 m/s auf dem zu prüfenden Belag aufgesetzt und durch Reibung bis zum Stillstand abgebremst wird. Der Ledergleiter wird vor jeder Messung gewechselt. Geprüft wird nur auf trockener Oberfläche. Das in der Angleitphase auf 0,2 m Gleitweg ermittelte Drehmoment ist ein Maß für die Höhe des Reibwertes. Die wirksame Normalkraft beträgt nahezu 200 N. Die Kontaktfläche lässt sich aufgrund der Balligkeit der 3 Einzelgleiter und des Verschleißes der Gleiterflächen nicht genau ermitteln. Bei vollflächigem Verschleiß wäre die größtmögliche Kontaktfläche 27 cm². Davon ausgehend würde die Flächenpressung immer >7 N/cm² betragen.

- **Berliner Gleiter**
(Gleitmessgerät der Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin – DIN 18032-2, Ausgabe 1991)

Bei diesem Verfahren wird durch eine federkraftbetätigte Abschussvorrichtung ein 3 kg schwerer Gleitkörper mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 2,8 m/s auf dem Prüfbelag in eine geradlinige Bewegung versetzt und gleitet in Abhängigkeit vom Reibungswiderstand auf dem Prüfbelag bis zum Stillstand. Der Gleitweg ist ein Maß für die Höhe des Reibwertes. Die Gesamtgleiterfläche in Drei-Punkt-Auflage

beträgt 6 cm^2 . Daraus ergibt sich eine Flächenpressung von ca. 5 N/cm^2 . Gleitfläche ist die Haar-Oberseite eines Ledergleiters, der vor jeder Messung gewechselt wird. Der Ledergleiter wird sowohl bei trockener als auch nasser Oberfläche verwendet.

An Stelle einer Feder kann auch ein komprimiertes Medium (Druckluft [29] oder Hydraulikflüssigkeit) verwendet werden.

- **Abrollgleiter ARG**

Eine von einer schiefen Ebene abrollende Gleitermasse setzt auf den Prüfbelag auf und gleitet bis zum Stillstand. Der Gleitweg ist dabei ein Maß für die Rutschhemmung des Prüfbelages. Die Gleiterparameter entsprechen denen des GMG 100. Als Gleitermaterial dient Leder (für trocken) und SBR (für nass). Die Flächenpressung in Drei-Punkt-Auflage beträgt ca. 7 N/cm^2 . Je nach Ausgangshöhe kann die Aufsetzgeschwindigkeit wahlweise 1,0; 1,8; 2,2 m/s betragen (Anhang B).

13.3 Prüfverfahren zur Messung des Rutschwinkels

Das Verfahren ist im Prinzip vergleichbar mit dem der Schiefen Ebene (Anhang A). Der ermittelte **Rutschwinkel** entspricht dem Reibungswinkel auf der schiefen Ebene bzw. Gleitreibungskoeffizient (vgl. Anh. A, Abb. 2). Unter Nutzung einer schräg angestellten Gewichtskraft wird im Grenzbereich zwischen Haft- und Gleitreibung der Ausgleitwinkel gesucht, bei dem der Gleitkörper zu gleiten beginnt. Bekanntester Vertreter dieses Verfahrens ist:

- **Brungraber Slip Tester Mark II**

Eine geführte Masse von 10 kg wirkt über ein Gelenk schräg auf die Prüffläche. Der senkrechte Anstellwinkel wird soweit vergrößert, bis ein Ausgleiten einsetzt. Aus den Anstellwinkeln bei Nichtausgleiten und erstem Ausgleiten wird der mittlere Gleitreibungskoeffizient berechnet. Die Auftreffgeschwindigkeit kann bis $0,2 \text{ m/s}$ betragen. Die wirksame Normalkraft bewegt sich je nach Anstellwinkel zwischen $100 \dots 50 \text{ N}$. Bei einer quadratischen Kontaktfläche von 60 cm^2 ergibt sich dabei eine veränderliche Flächenpressung von ca. $1,6 \dots 0,8 \text{ N/cm}^2$ (mit zunehmendem Anstellwinkel wird die Flächenpressung geringer). Als Gleitermaterial wird Leder verwendet. Der trockene Ledergleiter wird bei beliebigem Oberflächenzustand eingesetzt.

Im Parametervergleich stimmt kein Verfahren vollständig mit den Parametern in Tabelle 12.1 überein. Lediglich in der Gruppe der **Tribometer** (Abschn. 13.1) werden die Parameter zum großen Teil vom GMG 100 erfüllt, bei der Prüfgeschwindigkeit jedoch nur im unteren Bereich ($\leq 0,2 \text{ m/s}$). Sowohl Prüfgeschwindigkeiten als auch Flächenpressungen für alle übrigen Tribometer und den Brungraber Slip Tester (Abschn. 13.3) sind gering und entsprechen in der Parameterkombination eher dem weniger kritischen Aufsetzen mit der Vordersohle. **Rutschhemmungsmessungen mit diesen Geräten bilden daher näherungsweise das langsamere Gehen und gleichzeitig großflächige Aufsetzen mit der Schuhsohle nach.**

Die Verfahren nach Abschn. 13.2 (**SRT, Stuttgarter/Berliner Gleiter, ARG**) sind besonders durch die höheren Prüfgeschwindigkeiten (0,6...3,0 m/s) gekennzeichnet. Auch die Flächenpressungen sind im Durchschnitt höher als bei den zuvor genannten Verfahren. **Es kann angenommen werden, dass schnelleres Gehen und das Ausrutschen auf dem Absatz, insbesondere wenn Gleitmittel vorhanden sind, mit diesen Verfahren besser nachgebildet werden.**

Allen Verfahren dieser Gruppe gemeinsam ist, dass es aus einer beschleunigten Bewegung des Gleitkörpers von maximaler Anfangsgeschwindigkeit heraus durch Reibungsenergieverlust zum Stillstand des Gleiters bzw. zur Umkehrbewegung des Pendelgleiters kommt. Aus der Länge des Gleitweges bzw. dem Winkel des Pendelausschlags wird der Reibwert ermittelt. Ungünstig bei den ungleichförmig bewegten Gleitern, z. B. ARG ist, dass aufgrund der quadratischen Abhängigkeit des Reibwertes von der Anfangsgeschwindigkeit schwankende oder ungenau ermittelte Anfangsgeschwindigkeiten sich in Schwankungen des Reibwertes äußern, besonders stark bei geringen Gleitwegen, d.h. großen Reibwerten (vgl. Anh. B, Abb.3).

An Stelle potenzieller Energie kann eine Gleitermasse auch mit Antriebsenergie, z. B. rotierendem Antrieb, in eine gleichförmige Bewegung versetzt werden und auf einem örtlich begrenzten Gleitweg die Reibkraft gemessen werden [28].

Hinsichtlich der verwendeten Gleitermaterialien konnte im Parametervergleich festgestellt werden, dass bei allen Verfahren für den trockenen Oberflächenzustand – wie in Tabelle 12.1 vorgeschlagen – Leder als Gleitermaterial verwendet wird (bei einigen Verfahren, wie Brungraber und Berliner Gleiter auch für beliebige Gleitmittel). Allein bei den genormten Verfahren werden konkrete Materialkenngrößen vorgegeben. Dem in Tabelle 12.1 angegebenen Gleitermaterial für nassen Oberflächenzustand entsprechen lediglich die Materialien beim Verfahren GMG 100 (SBR) und näherungsweise beim SRT (4S).

Das GMG 100 wird gegenwärtig in breitem Umfang eingesetzt. Im Einsatz des Gerätes hat sich gezeigt, dass für bestimmte unprofilierte Hartböden und elastische Beläge bei Nässe Reibwerte gemessen werden, die nicht immer dem subjektiven Empfinden beim Begehen der Beläge entsprechen. Gleiches wurde bei Nachuntersuchungen von Unfällen, die sich auf solchen Belägen ereignet haben, festgestellt. An der BAuA wurde daher auf der Grundlage der in Tabelle 12.1 vorgeschlagenen Prüfparameter das Prüfgerät Abrollgleiter ARG mit höheren Prüfgeschwindigkeiten entwickelt (Anhang B). Mit Ausnahme der Prüfgeschwindigkeit stimmt der ARG in allen anderen Prüfparametern (Flächenpressung, Material, Größe und Anordnung der Gleiter) mit dem GMG 100 weitgehend überein, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

14 Bewertung der Rutschhemmung von Fußböden im Betriebszustand

Für die Bewertung der Messwerte, die nach den in Abschn. 13 beschriebenen Verfahren ermittelt wurden, fanden in der Vergangenheit verschiedene Skalierungen Verwendung. Die am Häufigsten verwendete Skalierungstabelle vor allem für Reibwerte nach den Tribometerverfahren waren die „Wuppertaler Kennwerte für Gleitsicherheit“ [9, 30] analog Tabelle 14.1. Die Tabelle stellt eine vom Fachausschuss Bauliche Einrichtungen, Sachgebiet „Fußböden, Treppen“ vorgenommene Weiterentwicklung der Wuppertaler Kennwerte dar.

Tab. 14.1 Richtwerte zur Beurteilung der Rutschhemmung von Fußböden im Betriebszustand

Reibwert μ nach E DIN 51131	Bewertung der Rutschhemmung
>0,45	ausreichende Rutschhemmung ¹
0,30 – 0,45	ausreichende Rutschhemmung unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen (Aufkommen von gleitfördernden Stoffen, Reinigung, Nutzungsart ...); Prüfung von Möglichkeiten zur Verbesserung der Rutschhemmung und Durchführung zusätzlicher Maßnahmen
<0,30	unzureichende Rutschhemmung

¹ Bei sehr hohen μ -Werten steigt das Risiko des Stolperns und des Gelenkverschleißes des Stütz- und Bewegungsapparates

Nach Tabelle 14.1 ist ausreichende Rutschhemmung vorhanden, wenn der Reibwert $\mu > 0,45$. Dieser allgemeine Grenzwert stimmt nahezu mit dem auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen in [18] vorgeschlagenen Wert überein und liegt im Bereich der international existierenden Reibgrenzwerte.

Bei der Anwendung der Einstufungs-Tabelle gibt es immer wieder Unklarheiten zum Bewertungsbereich $\mu = 0,30 \dots 0,45$. Was ist unter „Berücksichtigung der Betriebsbedingungen ... und Durchführung zusätzlicher Maßnahmen“ zu verstehen? Bei den zu berücksichtigenden Betriebsbedingungen ist zwischen

- **ständig vorhandenen** Betriebsbedingungen und
- **zeitweilig zu erwartenden** Betriebsbedingungen

zu unterscheiden. Bei den zusätzlich zu ergreifenden Maßnahmen handelt es sich in der Regel entsprechend um ständige bzw. örtlich begrenzte oder zeitweilige Maßnahmen (Tab. 14.2).

Tab. 14.2 Zu berücksichtigende Betriebsbedingungen und erforderliche Zusatzmaßnahmen (für Bewertungsbereich $\mu = 0,30 \dots 0,45$ in Tab. 14.1)

Betriebsbedingungen	erforderliche Zusatzmaßnahmen
<p><u>ständig vorhandene Betriebsbedingungen</u>, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • betriebsbedingte Verschmutzungen und Nässe • hohe physische Belastung hinsichtl. Kräfteinsatz/Bewegungsgeschwindigkeit • Kurvengänge, Neigungen • wechselnder Bodenbelag mit großem Reibwertunterschied 	<p>(Reibwertmessung ggf. mit erhöhter Prüfungsgeschwindigkeit v_2 – vgl. Abschn. 15.2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auf der Grundlage von Reibwertmessungen des vorhandenen Bodenbelages: Prüfung von Verbesserungsmöglichkeiten, wie <ul style="list-style-type: none"> – regelmäßige Reinigung – bauliche Veränderungen gegen Nässestau – rutschhemmende Nachbehandlung oder Beschichtung – rutschhemmendes Schuhwerk – physische Belastungsminderung – ...
<p><u>zeitweilig zu erwartende Betriebsbedingungen</u>, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • hineingetragene bzw. witterungsbedingte Nässe • reinigungsbedingte Glätte • nicht wahrnehmbare/unerwartete Glätte • ungeeignetes Schuhwerk (hartes Sohlenmaterial) 	<p>Reibwertmessung des zu erwartenden Oberflächenzustandes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prüfung von Verbesserungsmöglichkeiten, wie <ul style="list-style-type: none"> – Nässe- und Schmutzbindung im Eingangsbereich, z. B. mit textilen Läufern – ggf. Nachbehandlung des Fußbodens, bei Nässe rutschhemmende Pflegemittel, z. B. mit wasserlöslichen Polymeren, keine wachshaltigen Mittel – organisatorische Maßnahmen (zeitlich/örtlich), z. B. zeitweilige Abspernung feuchter Bereiche nach Reinigungsarbeiten – Maßnahmen zur Wahrnehmbarkeit der Glätte – Verhaltensanforderungen, z. B. Hinweisschilder, Unterweisungen, die auf ein vorsichtiges Gehverhalten einwirken sollen

Die Maßnahmen in Tabelle 14.2 sind als Orientierung zu betrachten und für die jeweiligen Einsatzbedingungen konkret festzulegen.

Die in Tabelle 14.1 angeführten Richtwerte sollen nach [18] für das freie unbelastete Gehen gelten. Anforderungsbezogene Richtwerte für Tätigkeiten mit erhöhten Ganggeschwindigkeiten oder dynamischen Belastungen in Arbeitsbereichen z. B. analog den in BGR 181 Anhang 1 aufgeführten Tätigkeiten bzw. Arbeitsbereichen fehlen derzeit (beispielsweise werden für Sportböden nach DIN V 18032-2, Ausg. 2001-04, solche Richtwerte für bestimmte Nutzungsarten vorgegeben: $\mu = 0,4 \dots 0,6$).

15 Beurteilung der Rutschsicherheit auf Fußböden mit unterschiedlichem Oberflächenzustand

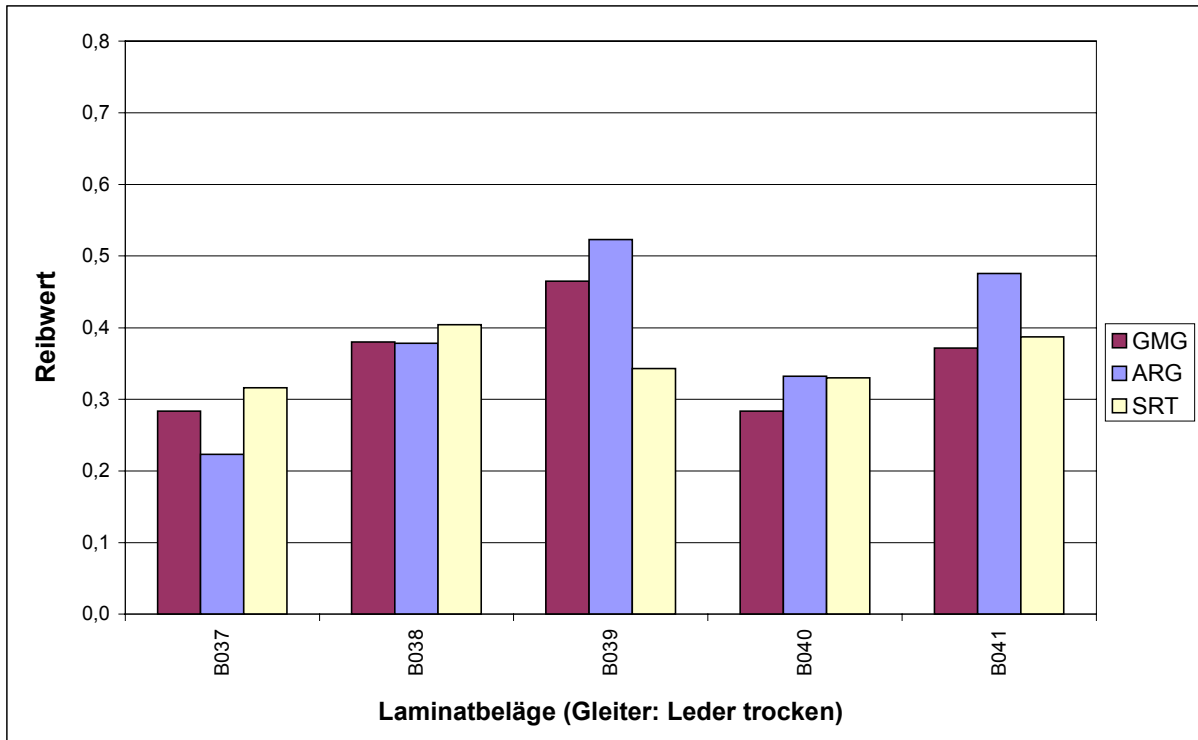
Die in Abschn. 13.1 und Anhang B beschriebenen Geräte Gleitmessgerät GMG 100 und Abrollgleiter ARG wurden in zahlreichen betrieblichen Messungen und Labormessungen gemeinsam eingesetzt. Mit den Messergebnissen wurden Aussagen zur Rutschhemmung erzielt, die auch weitgehend dem subjektiven Empfinden beim Begehen der Beläge entsprachen. Zusätzlich wurden Vergleichsmessungen mit dem Pendelgleiter SRT durchgeführt.

Aus den bisherigen Erfahrungen beim Einsatz der Prüfgeräte sowohl nach dem Verfahren mit der niedrigen Prüfgeschwindigkeit v_1 (GMG 100) als auch mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit v_2 (ARG, SRT) sollen nachfolgend die erzielten Prüfergebnisse interpretiert werden, unter Beachtung der Aspekte gangtypisches und dynamisches Gehverhalten (Abschn. 8.1), Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes (Abschn. 11.3) sowie wirksame Reibungskräfte (Abschn. 6.1).

15.1 Beurteilung der Rutschsicherheit auf trockenen Fußböden

Da auf trockenen Böden der Reibwert im interessierten Geschwindigkeitsbereich $<2,0$ m/s in der Regel steigt (mit wenigen Ausnahmen ab einer bestimmten Größe konstant bleibt, seltener leicht sinkt), ist bei einer Prüfgeschwindigkeit $v_1 = 0,2 \dots 0,3$ m/s mit den gemessenen Reibwerten μ eine unmittelbare Aussage über die Rutschsicherheit möglich, d. h., dass jeder gemessene Reibwert unverändert für die Bewertung der Rutschsicherheit herangezogen werden kann. Messungen mit höheren Prüfgeschwindigkeiten können sicherheitshalber durchgeführt werden. Sie führen in der Regel zu keiner wesentlich anderen Aussage (siehe Beispiel Abb. 15.1). Kritische Böden, wie z. B. polierte oder feingeschliffene Steinböden ($>C120$), erbringen den erwarteten niedrigen Reibwert.

Auf trockenen Böden ist also eine Unterscheidung nach Gangtypen bzw. Ganggeschwindigkeiten bei der Wahl der Prüfgeschwindigkeit nicht erforderlich.



- niedrige Prüfgeschwindigkeit (v_1) : GMG 100 (0,2 m/s)
- erhöhte Prüfgeschwindigkeit (v_2): ARG (2,2 m/s) und SRT (3,0 m/s)
- Leder: Prüfgleiter des GMG 100 und SRT

Abb. 15.1 Gleitreibungsmessung auf trockenen Laminatböden mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Bei der Reibung auf trockenen Böden werden vor allem Adhäsions- und Deformationsreibung wirksam. Im interessierten Geschwindigkeitsbereich steigt bei viskoelastischen Stoffen in der Regel zunächst der Reibwert. Bei großem Anteil von Deformationsreibung bewirkt die Hystereseeigenschaft des viskoelastischen Stoffes zunächst einen Anstieg des Reibwertes, bevor es bei hoher Gleitgeschwindigkeit zum Abfall bzw. weiteren konstanten Verlauf des Reibwertes kommen kann. Beide Reibungskomponenten überlagern sich in ihrer Wirkung. Im interessierten Geschwindigkeitsbereich kommt es im Ergebnis für die meisten viskoelastischen Stoffe im trockenen Zustand zum Anstieg des Reibwertes. Bei glatten Reibpartnern (z. B. mineralischen Festkörpern, wie Steinbeläge) werden mit zunehmender Geschwindigkeit die molekularen Bindungen der Adhäsionsreibung gelöst und der Reibwert fällt.

15.2 Beurteilung der Rutschsicherheit auf nassen Fußböden

Bisherige Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass im nassen Zustand die Reibwerte, die mit $v_1 = 0,2 \dots 0,3$ m/s gemessen wurden, wesentlich höher ($\Delta\mu = 0,1 \dots 0,5$) sein können als jene Reibwerte, die mit $v_2 = 0,7 \dots 3,0$ m/s ermittelt wurden (siehe Beispiele Abb. 11.1, Abb. 11.2, Abb. 15.2).

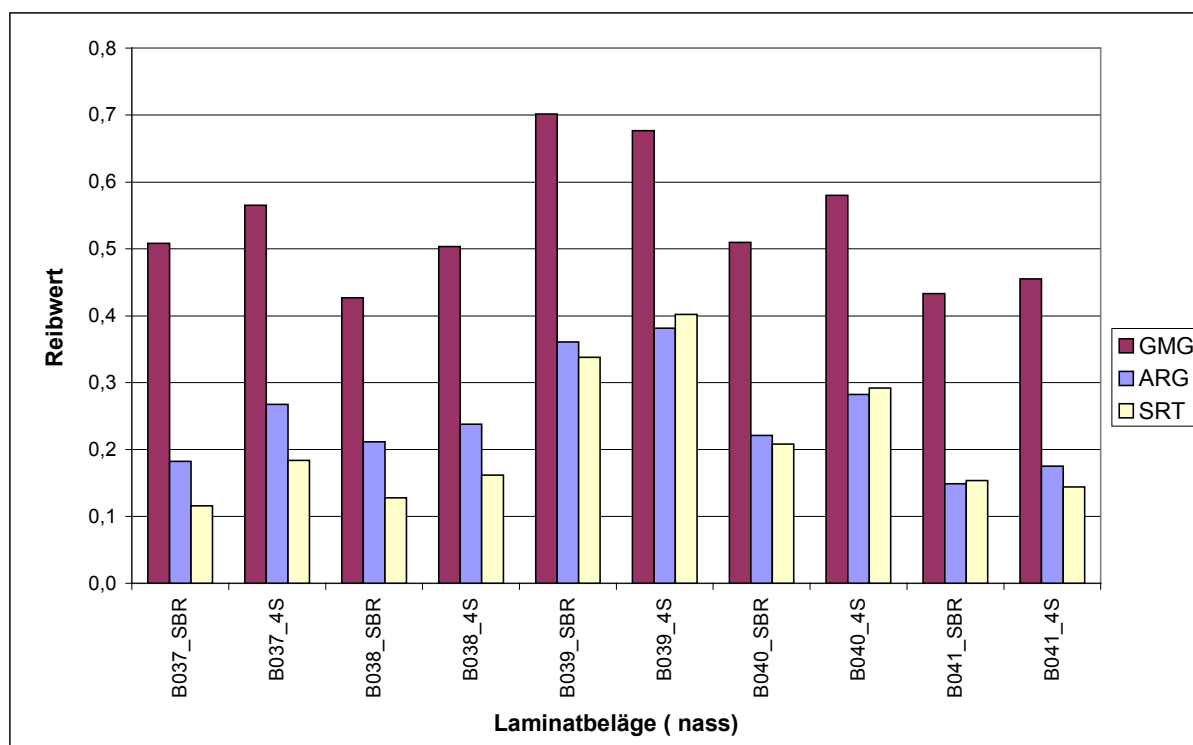
Für einen großen Teil der **Personen (vor allem des Gangtyps A), die sich bei Nässe vorsichtig und bedacht auf bestimmten unprofilierten Hartböden oder unprofilierten elastischen Belägen bewegen**, sind die mit Prüfgeschwindigkeit $v_1 = 0,2 \dots 0,3$ m/s gemessene Reibwerten unmittelbar aussagefähig, d. h.:

- Niedrige Reibwerte deuten von vornherein auf eine geringe Rutschhemmung des Fußbodens hin, was subjektiv bestätigt werden kann. Das Begehen solcher Böden ist mit einem hohen bzw. erhöhten Rutschrisiko verbunden.
- Werden hohe Reibwerte gemessen, so ist der Fußboden bei vorsichtiger und bedachter Gangart begehbar, aber es ist dieser erfahrungsgemäß dennoch kritisch zu betrachten. Die Begehbarkeit des nassen Fußbodens sollte zunächst subjektiv geprüft werden, z. B. durch Aufsetzen in kritischer Fußstellung, wie Gleiten über die Sohlenseitenkante. Setzt ein sofortiges Ausrutschen ein, liegt die Vermutung nahe, dass die Rutschhemmung des Bodens nicht ausreichend ist. In diesem Fall ist eine Prüfung mit erhöhter Geschwindigkeit (v_2) zu empfehlen.

Bei vorsichtiger Gangweise mit langsamer Ganggeschwindigkeit (Gangtyp A) wird auf Grund der niedrigen Aufsetzgeschwindigkeit und der Kontaktzeit bis zum Zeitpunkt $t(F_x > 0)$ der anfängliche Flüssigkeitsfilm verdrängt und dadurch die Adhäsionskomponente der Gesamtreibungskraft erhöht. Deformationsreibung, insbesondere durch Rauigkeit sowie Profilgebung und gegebenenfalls Kohäsionsreibung kommen zur Wirkung. Dieser Übergangsbereich zur Flüssigkeitsreibung wird als **Mischreibung** bezeichnet. Geringe Anteile an Flüssigkeitsreibung können vorliegen, was sich in Anzeichen von geringem Anrutschen und dadurch verursachten Unsicherheiten beim Begehen äußern kann.

Die von der betroffenen Person empfundene hohe Rutschhemmung kann ein vermeintlich sicheres Gefühl hervorrufen und die Person dazu veranlassen, den Gang zu beschleunigen und damit die Aufsetzgeschwindigkeit zu erhöhen. Erfolgt dies auf einem Bodenbelag, dessen Reibwert mit wachsender Aufsetzgeschwindigkeit stark sinkt, entsteht dadurch ein Rutschrisiko.

Für **Personen, die entweder gangtypisch (Gangtyp B) oder bei dynamischen Körperbewegungen**, z. B. tätigkeitsabhängig oder bei Hast, mit einer höheren Auftrittsgeschwindigkeit aufsetzen, würden auf bestimmten unprofilierten Hartböden und elastischen Belägen bei Nässe die mit der Prüfgeschwindigkeit v_1 gemessenen Reibwerte um $\Delta\mu = 0,1 \dots 0,5$ höher sein als die mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit v_2 gemessenen Reibwerte (siehe Beispiel in Abb. 15.2) und eine unrealistisch hohe Rutschsicherheit voraussagen. Für diese Fälle müsste der Reibwert mit der Prüfgeschwindigkeit v_2 ermittelt werden.



- niedrige Prüfgeschwindigkeit (v_1): GMG 100 (0,2 m/s)
- erhöhte Prüfgeschwindigkeit (v_2): ARG (2,2 m/s) und Pendel (3,0 m)
- SBR: Prüfgleiter des GMG 100
- 4S: Prüfgleiter des SRT

Abb. 15.2 Gleitreibungsmessung auf nassen Laminatböden mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Bei sofortigem Gleitbeginn infolge hoher Aufsetzgeschwindigkeit besteht auf der Aufsetzfläche keine Möglichkeit gegebenenfalls durch vorhandenen Rauigkeiten an Schuhabsatz oder Fußboden den Flüssigkeitsfilm zu durchtrennen. Damit kann keine Adhäsionsreibung zur Reibung beitragen. Ist die Rauigkeit und Profilgebung nicht ausreichend ausgeprägt, kommt auch die Deformationsreibung nicht zur Wirkung. Begünstigt wird diese geringe Reibung durch eine zu diesem Zeitpunkt niedrige Normalkraft F_y . In der die Reibpartner trennenden Flüssigkeitsschicht kann sich somit ein hydrodynamischer Druck aufbauen, der mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit steigt. Bei diesem Vorgang werden die Rauigkeitsspitzen des Bodenbelages mit dem Zwischenmedium überdeckt. Das führt zur Verkleinerung der Kontaktfläche und somit zur Verringerung der adhäsiven Bindungen, die **Flüssigkeitsreibung** dominiert (Abschn. 6.2).

An der BAuA wurden für die Reibpaarung Fußboden/Schuhsohle die Eigenschaften der Flüssigkeitsreibung in einem Spalt analysiert [17]. Einfluss auf die Spaltdicke haben solche Parameter, wie Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit, Spalllänge, Viskosität der Flüssigkeit. Auf der Grundlage von Reibwertmessungen auf typischen Hartböden wurde die Berücksichtigung dieser Parameter in den zur Zeit bekanntesten Messverfahren GMG 100, Pendelgleiter SRT und Schiefe Ebene geprüft und Schlussfolgerungen für die Konzeption von Messgeräten unter Beachtung biomechanischer Parameter zusammengestellt. Rechnerisch wurde ermittelt, dass sich beim Ausrutschen auf einem Wasserfilm eine Wasserfilmdicke $h_{\min} \approx 2 \dots 10 \mu\text{m}$ ausbildet. Ist die Rauigkeit größer als h_{\min} , werden sich einzelne Rauigkeitsspitzen oder

ganze Oberflächenbereiche in der Gleitpaarung berühren und somit Adhäsions- und Deformationsreibung erhöhen (Mischreibung). Die Berechnungen haben aber auch gezeigt, dass beim vorsichtigen Gehen, d. h. bei niedriger Aufsetzgeschwindigkeit v_1 und hoher Aufsetzkraft F_y eine minimale Spaltdicke $h_{\min} < 1 \mu\text{m}$ zu erwarten ist. Der Vergleich mit den Rauigkeitswerten der untersuchten Beläge zeigt, dass hierbei immer direkter Kontakt zwischen Sohle und Bodenbelag besteht, d. h., dass der Mensch unter diesen Bedingungen in der Lage ist, auf jedem nassen Bodenbelag zu gehen. Erst dann, wenn die Kontaktfläche groß wird, z. B. durch unprofilierte oder grob/großflächig profilierte Schuhsohlen, bei hoher Aufsetzgeschwindigkeit und geringer Aufsetzkraft (z. B. durch weiten Ausfallschritt) oder durch anderes Gleitmittel (z. B. Öl), erhöht sich das Rutschrisiko.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Reibwert auf den meisten nassen Böden mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Rauigkeit durch sinkenden Adhäsionsanteil mehr oder weniger fällt, bei einigen Böden mit großer Rauigkeit und dadurch bedingtem großem Deformations- und Kohäsionsreibungsanteil wenig steigt. Bei geringer werdender Rauigkeit ist im unteren Gleitgeschwindigkeitsbereich v_1 ein stärkerer Reibwertabfall zu verzeichnen als bei größeren Rauigkeiten. In diesem Bereich herrscht meistens Mischreibung. Ein vorsichtiges Begehen ist in der Regel noch möglich. Mit wachsender Geschwindigkeit im Bereich v_2 fällt der Reibwert auf den meisten unprofilieren Hartböden und elastischen Belägen bei Nässe auf einen Reibwert um $\mu \approx 0,1 \dots 0,2$. Danach ändert sich der Reibwert nur noch wenig. In diesem Bereich dominiert die Flüssigkeitsreibung. Ein forsches Begehen solcher Flächen ist mit einem hohen Rutschrisiko verbunden.

Für Einsatzfälle, bei denen auf unprofilieren Fußböden (Hartböden oder elastischen Belägen) von vornherein ständig (z. B. produktionsbedingt) oder in Außenbereichen zeitweise (witterungsbedingt) mit Nässe und ggf. mit Laufen oder Rennen von Personen oder hohen physischen Anforderungen an diese Personen zu rechnen ist, empfiehlt sich in jedem Fall eine Prüfung mit Geräten, die eine Prüfgeschwindigkeit $v_2 \geq 0,7 \text{ m/s}$ (z. B. ARG oder SRT) ermöglichen.

15.3 Beurteilung der Rutschsicherheit nach der Reibwertdifferenz

Unfallauswertungen und Betriebsuntersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Reibungsverhältnisse im Bewegungsbereich, die nicht oder nicht richtig wahrgenommen bzw. falsch beurteilt werden, ein erhöhtes Sturzrisiko darstellen können. Vor allem auf unprofilieren Böden mit Reibwerten im Bereich $0,3 \dots 0,45$ können solche unterschiedlichen Reibungsverhältnisse kritisch werden, z. B. auf

- **nassen Fußböden**, die mit unterschiedlicher Geschwindigkeit begangen werden können (vgl. Abschn.15.2),
- **wechselnden Bodenbelägen** mit größerem Reibwertunterschied, beim Wechsel vom Belag mit höherer zum Belag mit geringerer Rutschhemmung
- **trockenen Fußböden mit nicht wahrnehmbarer partieller Nässe** (oder am Schuhwerk eingetragener Nässe),
- **überschichteten trockenen Fußböden** im Ergebnis falscher Pflege, ggf. in Verbindung mit eingetragener Nässe.

Sturzgefährdungen entstehen bei Bedingungswechsel meist aus einem sicheren Gefühl heraus, d. h. mit Erhöhung der Ganggeschwindigkeit oder Beibehaltung einer hohen Ganggeschwindigkeit. Erfahrungsgemäß versucht jede Person, wenn sie „ins Straucheln gerät“ durch Ausgleichsbewegungen das Gleichgewicht wieder zu erlangen, um damit einen Sturz zu verhindern.

Für die Beurteilung der Rutschrisikos ist nicht nur allein die Höhe der Reibwertes des ersten Zustandes, sondern auch das Reibwertgefälle zum zweiten Zustand, d. h. die Reibwertdifferenz zwischen beiden Zuständen entscheidend für die Beurteilung des Rutschrisikos:

$$\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$$

Dieser Unterschied verkörpert praktisch die unterschiedliche Rutschhemmung beim langsamen und schnellen Gehen. Ist diese Differenz zu groß und gelingt es der Person nicht, das durch Anrutschen gestörte Gleichgewicht wieder auszubalancieren, kann es zum Sturz kommen.

Für eine kritische Reibwertdifferenz gibt es derzeit noch keinen Richtwert. Als Richtwert für ein zulässiges Rutschrisiko wurde vorerst ein Wert von

$$\Delta\mu \leq 0,2$$

gewählt, der in bisherigen Betriebsuntersuchungen bestätigt werden konnte. Dieser Richtwert entstand in Anlehnung an BGR 181 für die Rutschhemmung benachbarter Bereiche, wonach der Unterschied in der R-Gruppe nicht größer als eine Bewertungsgruppe sein sollte. Dieser R-bezogene Richtwert hat sich bisher in der Praxis für benachbarte R9/R10-Beläge bewährt (Tab. 15.1).

Tab. 15.1 Zulässige Reibwertdifferenzen wechselnder Bodenbeläge nach BGR 181

wechselnder Bodenbelag	Differenz¹ Akzeptanzwinkel $\Delta\alpha$	Differenz Reibwert $\Delta\mu$
R9/R10	14°	0,25
R10/R11	18°	0,32
R11/R12	17°	0,31
R12/R13	>9°	>0,16

¹ vom Anfangswinkel der niedrigen bis Endwinkel der nächst höheren Bewertungsgruppe

Entsprechend den hier vorrangig betrachteten Belägen wurde der Übergangsbereich R9/R10 gewählt, wobei die Akzeptanzwinkeldifferenz über den $\tan \alpha$ in eine Reibwertdifferenz umgerechnet wurde (vgl. Anh. A, Abb. 2). Da die Winkeldifferenz theoretisch zwei Bewertungsgruppen überdeckt, wurde die zulässige Reibwertdifferenz von $\Delta\mu = 0,25$ zunächst auf $\Delta\mu = 0,20$ verringert. Diesen Richtwert gilt es, in nächster Zeit weiter zu beobachten.

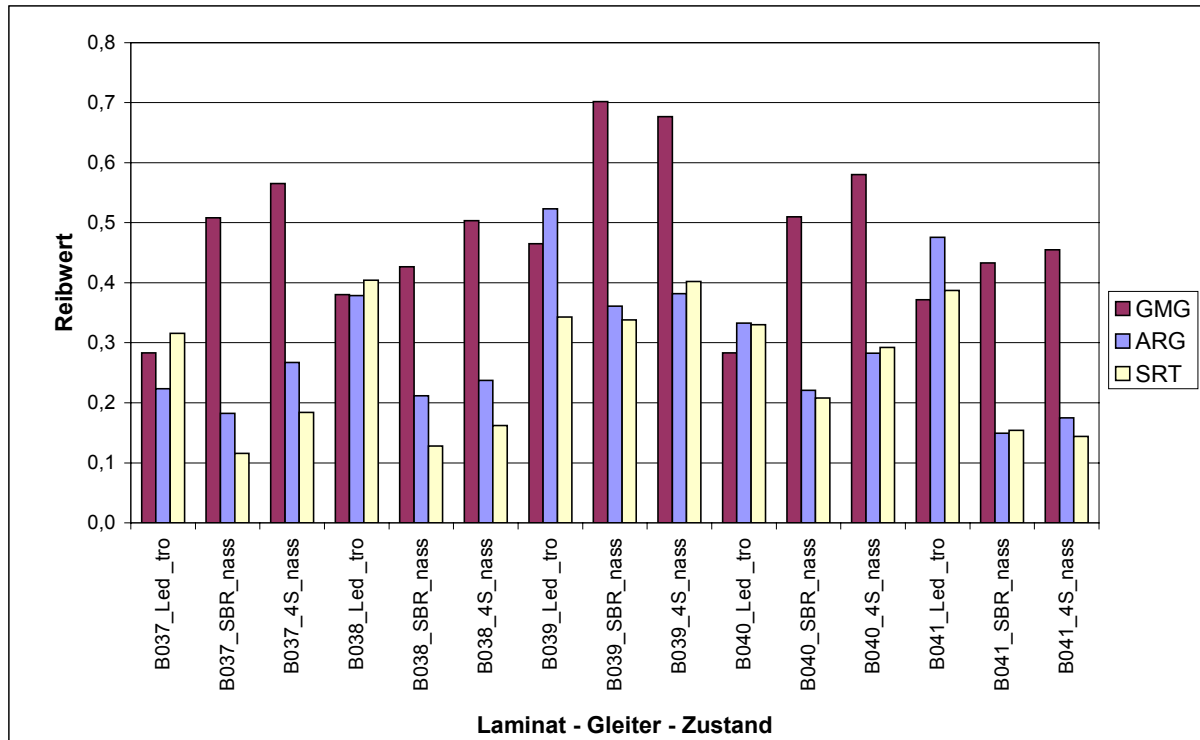
In Abbildung 15.1 gezeigtem Beispiel für trockene Laminatböden beträgt wohl die Reibwertdifferenz für alle Beläge $\Delta\mu < 0,15$, die Rutschsicherheit ist dennoch differenziert zu bewerten. Mit Ausnahme der Beläge B037 und zum Teil B040 besitzen die übrigen Beläge eine für Laminat relativ gute Rutschhemmung. Zu beachten ist also auch der unterste Reibwert, der einen bestimmten Grenzwert ($\mu = 0,3$) nicht unterschreiten sollte (Tab. 14.1).

In Abbildung 15.2 gezeigtem Beispiel für nasse Laminatböden ist für alle Beläge die Reibwertdifferenz $\Delta\mu > 0,20$ (bei v_2 -Reibwerten $\mu < 0,30$ für ARG und SRT), Aufgrund des relativ hohen Reibwertes bei schneller Gleitgeschwindigkeit, ist der Belag B039 weniger kritisch zu beurteilen.

Mit nassen Böden vergleichbare Fußböden können auch **trockene Böden** sein, die einen hohen Anteil an Adhäsionsreibung besitzen, wie beispielsweise **mit wachshaltigen Pflegemitteln überschichtete Beläge**, die bei langsamer Begehung als sicher erscheinen, jedoch beim schnellen Gehen ein erhöhtes bis hohes Rutschrisko haben, vor allem, wenn es zur Kantenreibung über Absatz oder Sohlenseitenkante kommt. Solche Böden sollten genauso wie nasse Böden geprüft und zusätzlich nach der Reibwertdifferenz beurteilt werden.

Vergleichbar kritische Bedingungen liegen auch vor beim **Begehen wechselnder Bodenbeläge mit großem Reibwertunterschied oder trockener Beläge mit stellenweise eingetragenen, nicht wahrnehmbarem Gleitmittel, z. B. Nässe** in Eingangsbereichen, wenn sich die Person im Gehverhalten auf den sicheren Belag (z. B. trockenen Belag) eingestellt hat und mit höherer Ganggeschwindigkeit den unerwartet rutschigen Belag betritt. Auch in diesen Fällen kann trotz mit v_1 gemessener Reibwerte im akzeptablen Bereich ein erhebliches Rutschrisko vorhanden sein. Daher empfiehlt sich auch hier eine zusätzliche Beurteilung der Rutschhemmung nach der Reibwertdifferenz. Wenn es sich hierbei um nasse oder teilweise nasse Böden handelt, ist eine Prüfung der beiden Bereiche bzw. Oberflächenzustände mit erhöhter Gleitgeschwindigkeit v_2 zu empfehlen, da im trockenen Zustand die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes geringer ist als im nassen Zustand und die höhere Prüfgeschwindigkeit die kritischere ist.

Die Messbedingungen auf **trockenen Böden mit partieller Nässe** (z. B. in Eingangsbereichen) können näherungsweise durch getrennte Messungen auf trockenem und nassem Boden nachgebildet werden (Abb. 15.3). In dem Beispiel wird mit Ausnahme des Belages B041 (ARG, SRT) und teilweise B038 (SRT) die kritische Reibwertdifferenz wohl nicht überschritten, die Höhe der Reibwerte ist jedoch mit Ausnahme des Belages B039 relativ niedrig. Der Belag B039 hat sowohl im Absolutwert als auch in der Reibwertdifferenz trocken/nass relativ günstige Werte.



- niedrige Prüfgeschwindigkeit (v_1): GMG 100 (0,2 m/s)
- erhöhte Prüfgeschwindigkeit (v_2): ARG (2,2 m/s) und SRT (3,0 m)
- Leder und SBR: Prüfgleiter des GMG 100
- Leder und 4S: Prüfgleiter des SRT

Abb. 15.3 Gleitreibungsmessung auf trockenen und nassen Laminatböden mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Die Reibwertdifferenz $\Delta\mu \leq 0,2$ ist ein Richtwert. $\Delta\mu$ sollte verringert werden, wenn an den Beschäftigten erhöhte Tätigkeitsanforderungen gestellt werden, wie Ziehen/Schieben von Arbeitsmitteln, Heben/Tragen von Lasten, Begehen von Schrägen, häufige Richtungsänderungen u. a.

16 Problemstellungen für Folgearbeiten

Aus der bisherigen praktischen Erfahrung bei der Prüfung der Rutschhemmung von Bodenbelägen und dem jetzigen theoretischen Kenntnisstand ergeben sich folgende zwei Problemfelder:

16.1 Ermittlung von Fußbodenparametern, die Einfluss auf die Rutschhemmung haben

Bei genauerer Kenntnisse der Parameterkennwerte könnte beispielsweise bei der Herstellung von Bodenbelägen gezielt Einfluss genommen werden auf deren rutschhemmende Eigenschaften oder für die Nutzung einschließlich Reinigung und Pflege entsprechend den Einsatzbedingungen der optimale Belag ausgewählt werden, wobei im günstigsten Fall nicht immer eine Reibwertmessung erforderlich wäre, wenn eine orientierende Beurteilung der rutschhemmenden Eigenschaft, z. B. nach Oberflächenparametern möglich wäre.

Nach bisherigem Kenntnisstand über Parameter, die die Rutschhemmung beeinflussen, sind folgende Probleme zu lösen:

- **Einfluss der Oberflächencharakteristik und Materialeigenschaften von Bodenbelägen**
 Entscheidenden Einfluss auf die Rutschhemmung hat die **Oberflächencharakteristik**. Die **Rauigkeit bzw. Profilierung** wird bei einigen Verfahren (z. B. SRT oder Schiefe Ebene) auch als zusätzlicher Bewertungsparameter für die Rutschhemmung herangezogen, da damit die Eigenschaft der Durchdringung des Gleitmittelfilms bzw. der Aufnahme des Gleitmittels gekennzeichnet werden kann.
 Unklar ist, welchen anteiligen Einfluss Mikrorauigkeit, Makrorauigkeit, Profilierung auf die einzelnen Reibungskomponenten Adhäsions-, Deformations-, Kohäsionsreibung (Abschn. 7.2 und 11.3) haben. Dabei interessiert vor allem die flächenmäßige, topografische Ausbildung der Oberfläche. Gesucht werden Verfahren, die mit möglichst einfacher oder spezifischer Messtechnik, die reibungsrelevanten Oberflächenmerkmale erfassen.
- Einfluss haben weiterhin:
 - **Härte bzw. Elastizität** der Reibpartner, insbesondere auf die Deformationsreibung,
 - **sonstige Materialeigenschaften**, wie Materialart, Porosität/Saugfähigkeit, hydrophobe und hydrophile Eigenschaften, Mikrovertiefungen durch Nachbehandlungsverfahren auf die Adhäsionsreibung oder Flüssigkeitsreibung sowie
 - **Eigenschaften von Zwischenmedien** auf die Adhäsionsreibung oder Flüssigkeitsreibung.

16.2 Weiterentwicklung von Prüfverfahren zur Gleitreibungsmessung und Bewertung der Rutschhemmung

- Bei der technischen Umsetzung der Prüfparameter (Abschn. 12) wurden beispielsweise für GMG 100 und ARG mit Ausnahme der Gleitgeschwindigkeiten v_1 und v_2 weitgehend einheitliche Parameter verwendet.
Es fehlt derzeit ein **normgerechtes Prüfverfahren zur Realisierung einer erhöhten Prüfgeschwindigkeit v_2** . Dabei sollte bei Größe, Form und Anordnung der Gleiter den Bedingungen der Flüssigkeitsreibung Rechnung getragen werden [17].
Zu klären wäre, ob in einem Prüfverfahren beide Prüfgeschwindigkeiten v_1 und v_2 vereinigt werden könnten.
- Die vorgeschlagenen Prüfparameter lassen sich für die **Beurteilung der Rutschsicherheit auf Treppenstufen** nur für die Auftrittsflächen anwenden. Es fehlt ein Prüfverfahren, das die Abrollbewegung der Schuhsohle auf der Stufenkante berücksichtigt.
- **Neu- und Weiterentwicklung von Gleitreibungsmessgeräten**
Um den gerätetechnischen Aufwand und damit Prüfumfang zu reduzieren, wäre es wünschenswert, wenn beide Prüfgeschwindigkeiten in einem Gleitreibungsmessgerät mit einstellbarer Gleitgeschwindigkeit realisiert werden könnten [28].
- **Richtwerte für anforderungsbezogene Reibwerte**
Analog den R- und V-Richtwerten nach Anlage in BGR 181 sollten für Fußböden und sonstige Trittplächen mit Rutschgefahr, deren Rutschhemmung vor Ort mit mobilen Gleitreibungsmessgeräten gemessen werden kann, differenzierte Richtwerte für anforderungsbezogene Reibwerte erarbeitet werden (Abschn. 14). Die Erarbeitung solcher Sicherheitsgrenzwerte sollte auf der Grundlage von Reibwertmessungen auf bewährten oder vergleichbaren Böden mit ausreichender Rutschhemmung (z. B. nach BGR 181) sowie Reibwertmessungen im Rahmen der Nachuntersuchung von ereigneten Unfällen erfolgen.

17 Literaturverzeichnis

- [1] **Gniza, E.:** Spezifische und unspezifische Fehlhandlungen (Tatsachen und Probleme). In: Beiträge für die Praxis. Dresden 43 (1984), S. 71-74
- [2] **Kirchberg, S.; Fischer, H.; Kittelmann, M.; Tschöcke, E.; Reyhl, H.:** Untersuchungen zur Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur instationären Messung der Gleitreibung von Fußböden – Biomechanische Untersuchungen beim Gehen. Amtliche Mitteilungen der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Sonderausgabe Nr. 2/96. Dortmund, 1996
- [3] **Kirchberg, S.; Fischer, H.; Reyhl, H.:** Untersuchungen zur Optimierung der Prüfparameter für Verfahren zur instationären Messung der Gleitreibung von Fußböden. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund 1997 (interner Forschungsbericht zu Projekt F 1673)
- [4] **Kirchberg, S.; Fischer, H.:** Rutschsicherheit beim Auftreten auf Treppenstufen – Voruntersuchung zur Entwicklung von Prüfverfahren. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dresden 2000 (interner Forschungsbericht zu Projekt F 1547)
- [5] **Henter, A.:** Heim- und Freizeitunfälle in Deutschland. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW 1995 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Sonderschrift S 39)
- [6] **Hoffmann, B.; Rostek, R.:** Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG) (Hrsg.): Arbeitsunfallstatistik 2001, Sankt Augustin: HVBG 2003, (BGZ-Report, 3/2003)
- [7] **Jühlig, J.; Lux, R.:** Unfallschwerpunkt: Stolpern, Rutschen, Stürzen. In: Brücke 1/04
- [8] **Skiba, R.; Kuschefski, A.; Cziuk, N.:** Gleitsicherheit von Schuhsohlen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz (Hrsg.). Dortmund o. Jg.
- [9] **Skiba, R.; Bonefeld, X.; Mellwig, D.:** Voraussetzung zur Bestimmung der Gleitsicherheit beim menschlichen Gang. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft Nr. 37, 4/1983
- [10] **Carlsöö, S.; Mayr, J.:** Die Bestimmung des Gleitens und des Gleitrisikos beim normalen Gang. Bericht der Fliesen-Beratungsstelle e.V., Großburgwedel 1968
- [11] **Skiba, R.; Kuschefski, A.; Cziuk, N.:** Entwicklung eines normgerechten Prüfverfahrens zur Ermittlung der Gleitsicherheit von Schuhsohlen. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW 1987 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 526)
- [12] **Manning, D. P., Jones, C.:** A step towards safe walking. Safety Science, Nr. 16, 1993

- [13] **Scheil, M., Windhövel, U.:** Instationäre Reibzahlmessung mit dem Messverfahren nach Manning. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Nr. 48, 3/1994
- [14] **Lanshammar, H., Strandberg, L.:** Assessment of friction by speed measurement during walking in a closed path. Biomechanics IX-B, 1985
- [15] **Skiba, R.; Scheil, M.; Windhövel, V.:** Vergleichsuntersuchungen zur instationären Reibzahlmessung auf Fußböden. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW 1994 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz: Forschung, Fb 701)
- [16] **Bonefeld, X.:** Die Bestimmung des Gleitverhaltens von Schuhsohlen auf Bodenbelägen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1981 (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 265)
- [17] **Kirchberg, S.:** Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Messung des Gleitreibungskoeffizienten zur Beurteilung der Rutschsicherheit beim Gehen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dresden 2005 (interner Forschungsbericht zu Projekt F 1954)
- [18] **Bönig, St.:** Experimentelle Untersuchung zur Festlegung von normgerechten Reibzahlgrenzwerten für gleitsicheres Gehen. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1996
- [19] **Morach, B.:** Quantifizierung des Ausgleitvorganges beim menschlichen Gang unter besonderer Berücksichtigung der Aufsetzphase des Fußes. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1993
- [20] **Hochmuth, G.:** Biomechanik sportlicher Bewegungen. Sportverlag Berlin 1981
- [21] **Grönqvist, R.:** Dynamic Method for Assessing Pedestrian Slip Resistance. Finnish Institute of Occupational Health (Hrsg.). People and Work Research Reports, Nr. 2, 1995
- [22] **Wieder, R.:** Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Gleitsicherheit beim menschlichen Gang. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1988
- [23] **Mellwig, D.:** Experimentelle Untersuchungen über das Reibverhalten viskoelastischer Sohlenmaterialien in Kombination mit verschiedenen Böden. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1983
- [24] **Scheil, M.:** Analyse und Vergleich von instationären Reibzahlmessgeräten – ein Beitrag zur Gleitsicherheit beim menschlichen Gang. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1993
- [25] **Tisserand, M.:** Progress in the prevention of falls caused by slipping. Ergonomics 28, Nr. 7, 1985
- [26] **Leclercq, S.; Tisserand, M.; Saulnier, H.:** Quantification of the slip resistance of floor surfaces at industrial sites. Safety Science, Nr. 17, 1993

- [27] **Skiba, R.; Bonefeld, X.; Mellwig, D.:** Voraussetzungen zur Bestimmung der Gleitsicherheit beim menschlichen Gang. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft Nr. 37 April 1983, S. 227-232
- [28] **Löbicke, C.:** Entwicklung einer Konzeption für einen mobilen Messgeräteprototyp zur Messung des Reibungswiderstandes zwischen Fußboden und Schuh. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, 2005
- [29] **English, W.:** Pedestrian Slip Resistance, How to Measure it and How to Improve it. W. English, Alva, Florida 33920, 1996
- [30] **Skiba, R.:** Sicherheitsgrenzwerte zur Vermeidung des Ausgleitens. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Nr. 42, 1/1988
- [31] **Arnold, J.:** Experimentelle Untersuchung zur Sicherheit gegen Ausgleiten auf vereisten Gehwegen. Dissertation, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1997
- [32] **Timmler, H.:** Untersuchung der Übertragbarkeit einer Gleitsicherheitsprüfung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zwischenmedien. Studienarbeit, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1993

18 Abbildungsverzeichnis

	Seite	
Abb. 2.1	Verteilung der Ausrutschunfälle nach dem Oberflächenzustand des Fußbodens [8]	10
Abb. 4.1	Schrittkinematik als Überlagerung der Drehbewegungen der unteren Gliedmaßen	13
Abb. 4.2	Stütz- und Schwebphasen im Schrittrhythmus (nach [9])	14
Abb. 4.3	Schwerpunktverlagerung beim Schrittzzyklus - horizontaler Geradeausgang ohne Belastung (nach [10] aus [11])	15
Abb. 5.1	Einflussfaktoren auf die Rutschsicherheit	16
Abb. 6.1	Tribometerverfahren zur Bestimmung des Gleitreibungskoeffizienten	20
Abb. 6.2	Kräfte- und Bewegungsparameter beim Aufsetzen des Schuhs auf den Bodenbelag	23
Abb. 6.3	Beispiel für gerätetechnische Parameter eines Prüfverfahrens	24
Abb. 7.1	Zeitlicher Verlauf der Auftrittskräfte und entsprechenden Anforderungskoeffizienten für eine Versuchsperson [2]	27
Abb. 7.2	Bildsequenz der Absatzmarkierung vor dem Aufsetzen auf dem Boden ($\Delta t \approx 7$ ms)	28
Abb. 8.1	Bewegungsbahnen der hinteren Absatzkante dreier Versuchspersonen des Gangtyps A und B unmittelbar vor dem Aufsetzen auf den Fußboden	30
Abb. 8.2	Häufigkeitsverteilung für F_y ($F_x = 0$) nach Gangtypen A und B [2]	32
Abb. 8.3	Häufigkeitsverteilungen für v_{ho} nach Gangtypen A und B [2]	34
Abb. 9.1	Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Kräfte und entsprechenden Anforderungskoeffizienten bei Gangart „im rechten Winkel“ [2]	38
Abb. 9.2	Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Kräfte und entsprechenden Anforderungskoeffizienten bei Gangart „im Bogen“ [2]	39
Abb. 11.1	Beispiel für Reibwertmessung auf unprofilierten, glasierten Fliesen (trocken/nass) mit Kunststoffgleitern (PU1, PU2) und Gummigleiter (GU1) [3]	47
Abb. 11.2	Beispiel für Reibwertmessung auf PVC-Belag (trocken/nass) mit Kunststoffgleitern (PU1, PU2) und Gummigleiter (GU1) [3]	47

Abb. 11.3	Beispiel für Reibwertmessung mit Leder-Gleiter auf PVC-Belag (trocken) (aufgeraut mit Körnung 400) [3]	49
Abb. 11.4	Beispiel für Reibwertmessung mit Gummi-Gleiter (GU 2) auf Spaltplatten-, Fliesen-, PVC-Belag (nass) [3]	50
Abb. 13.1	Gleitreibungsmessgerät GMG 100 nach E DIN 51131	57
Abb. 13.2	Pendelgleiter nach BC 7976	58
Abb. 15.1	Gleitreibungsmessung auf trockenen Laminatböden mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten	65
Abb. 15.2	Gleitreibungsmessung auf nassen Laminatböden mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten	67
Abb. 15.3	Gleitreibungsmessung auf trockenen und nassen Laminatböden mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten	71
Anh. A, Abb. 1	Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene nach DIN 51130	81
Anh. A, Abb. 2	Ermittlung des Reibungswinkels	82
Anh. B, Abb. 1	Physikalisches Prinzip des Abrollgleiters	85
Anh. B, Abb. 2	Abrollgleiter für mobile Gleitreibungsmessung	86
Anh. B, Abb. 3	Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitstrecke (bei Aufsetzgeschwindigkeiten 1,0, 1,8, 2,2 m/s)	87

19 Tabellenverzeichnis

	Seite	
Tab. 6.1	Bewegungsparameter des Menschen und entsprechende Parameter des Prüfverfahrens	23
Tab. 8.1	Zusammenstellung der Kraftmesswerte beim Geradeausgehen [2]	33
Tab. 8.2	Häufigkeitsmaxima der Aufsetzgeschwindigkeiten v_{ho} und Relativgeschwindigkeiten zum Rutschbeginn nach Gangtypen	34
Tab. 8.3	Mittlere Aufsetzwinkel nach Gangtypen	35
Tab. 9.1	Zusammenstellung der Kraftmesswerte bei Änderung der Bewegungsrichtung [2]	37
Tab. 10.1	Zusammenfassende Ergebnisse von Parametern, bei denen ein Ausrutschen einsetzen kann [2]	42
Tab. 11.1	Untersuchte Bodenbeläge [3]	44
Tab. 11.2	Verwendete Gleiter [3]	45
Tab. 11.3	Abhängigkeit des Reibwertes μ von der Gleitgeschwindigkeit v am Beispiel ausgewählter Bodenbeläge (trocken/nass) - nach [3]	46
Tab. 11.4	Abhängigkeit des Reibwertes von der Flächenpressung (PU-Gleiter auf nassem C 60-Granit) [3]	51
Tab. 12.1	Vorschlag von Prüfparametern zur instationären Gleitreibungsmessung auf Bodenbelägen [3]	52
Tab. 15.1	Zulässige Reibwertdifferenzen wechselnder Bodenbeläge nach BGR 181	69

20 Formelzeichen und Abkürzungen

R	Bewertungsgruppe der Rutschgefahr (R-Gruppe, z. B. R9, R10)
V	Verdrängungsraum (V-Gruppe)
α	Akzeptanzwinkel auf Schiefen Ebene
ρ	Reibungswinkel
μ	Reibwert, Reibungskoeffizient
Q	Anforderungskoeffizient

Indizes

x, y, z	Bewegungs-/Wirkungsrichtung längs, senkrecht, quer, z. B.
F_x, F_y, F_z	Fußkräfte längs, senkrecht, quer zur Gangrichtung
Q_x, Q_z, Q_{xz}	Anforderungskoeffizient bezügl. F_x, F_z, F_{xz}
F_R	Reibungskraft
F_G	Gewichtskraft
F_g	mittleres Personengewicht
F_N	Normalkraft
φ	Aufsetzwinkel der Schuhsohle/des Absatzes
v_{ho}	horizontale Aufsetzgeschwindigkeit
v_R	Relativgeschwindigkeit zu Rutschbeginn
A_A, A_V	durchschnittliche Aufsetzfläche des Absatzes, der Vordersohle
P	Flächenpressung
h_{min}	minimale Spaltdicke bei Flüssigkeitsreibung
PU	Gleitematerial aus Polyurethan
Led	Prüfgleiter des GMG 100 und SRT aus Leder
GU	Gleitematerial aus Gummi
SBR	Prüfgleiter des GMG 100 aus Nitrilkautschuk
S4	Prüfgleiter des SRT aus Nitrilkautschuk
GMG 100	Gleitreibungsmessgerät nach E DIN 51131
SRT	Pendelgleiter nach BC 7976, DIN EN 1341
ARG	Abrollgleiter

Anhang A: Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene

Ein seit Jahren mit Erfolg angewandtes Verfahren ist das **Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene** nach DIN 51130 bzw. DIN 51097.

Die Prüfung erfolgt im Sinne einer Baumusterprüfung. Die Prüfergebnisse finden Anwendung bei der Auswahl und Gestaltung von Fußböden auf der Grundlage tätigkeitsbezogener Anforderungen an die Rutschhemmung von Bodenbelägen in Arbeitsräumen und -bereichen mit Rutschgefahr (BGR 181, Anhang 1).

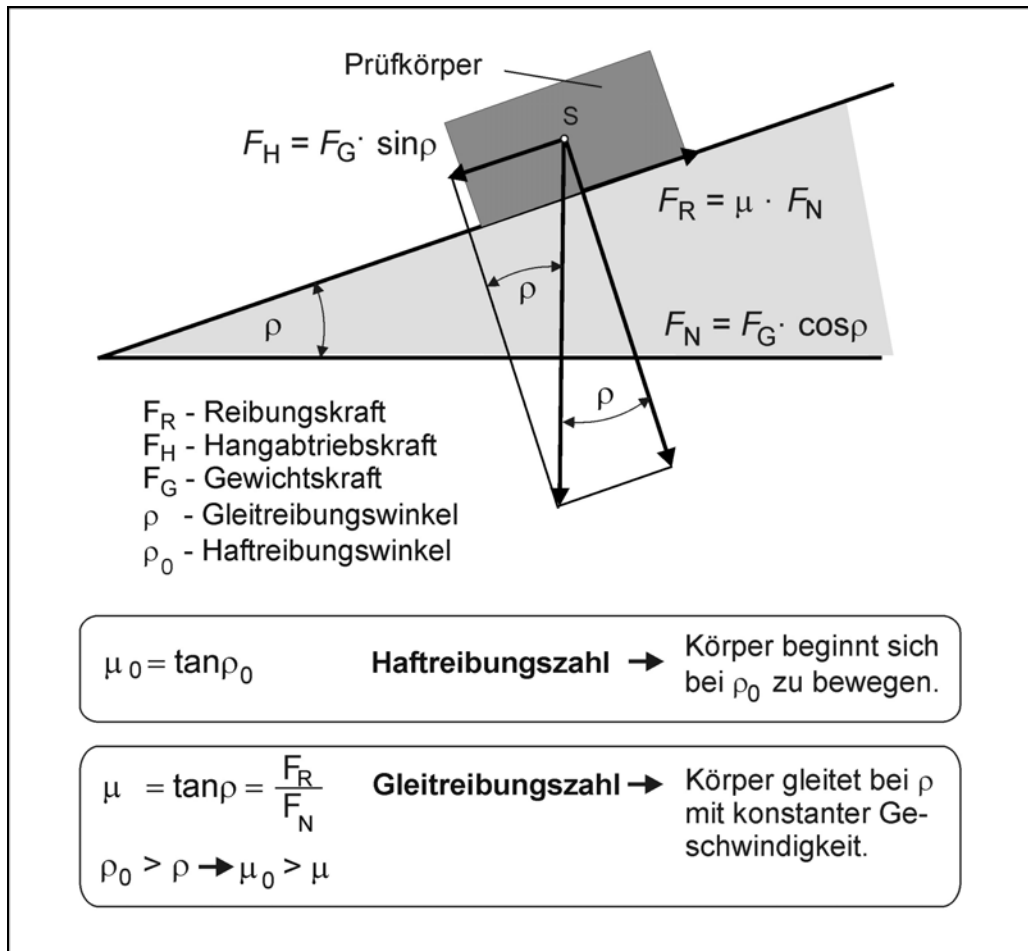
Prinzip der Prüfung ist es, beim Abwärtsgang auf der **Schiefen Ebene** den Neigungswinkel zu finden, bei dem die Prüfperson unsicher wird (Anh. A, Abb. 1).



Anh. A, Abb. 1 Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene nach DIN 51130

Dieser sog. **Akzeptanzwinkel α** (physikalisch Reibungswinkel ρ) ist eine dem Mindestreibwert μ ($\tan \rho$ bzw. $\tan \alpha$) proportionale Größe und damit ein Maß für die Rutschhemmung des Fußbodens (Anh. A, Abb. 2). Der Akzeptanzwinkel α ist der Winkel, bei dem die Prüfperson zu rutschen beginnt. Dieser Grenzwinkel ρ des Rutschbeginns ist vergleichbar mit dem Reibwert der Ruhe (Haftreibung). Die ins Rutschen geratene Person gleitet daraufhin gleichförmig, d. h. mit konstanter Geschwindigkeit abwärts. Verringert man während des Abgleitens den Winkel, so hört der Rutschvorgang wieder auf. Bis zu dieser Winkelstellung liegt Gleitreibung vor. In diesem Fall ist die Haftreibung größer als die Gleitreibung. Der Haftreibungskoeffizient ist größer als der Gleitreibungskoeffizient bei der Festkörperreibung. Die Gleitrei-

bung kann auch größer sein als die Haftreibung, z. B. bei bestimmten viskoelastischen Stoffen, im trockenen Zustand und bei höherer Gleitgeschwindigkeit - Bedingungen, die den genormten Vorgaben des Begehungsverfahrens nicht entsprechen. Der Akzeptanzwinkel α ist soweit wie möglich in der Nähe der Haftreibung zu erfassen, d. h. praktisch die Grenze des sicheren Gehens zu erfassen. Dieser Punkt ist in einem geringen Verstellbereich durch Annäherung von zu großem und zu kleinem Neigungswinkel so weit wie möglich einzugrenzen.



Anh. A, Abb. 2 Ermittlung des Reibungswinkels

Die Prüfung wird mit einem bestimmten Prüfschuh und Prüföl als Gleitmittel durchgeführt. Subjektive Einflüsse auf den Akzeptanzwinkel werden durch ein Kalibrierungsverfahren eingegrenzt. Der gesamte Verstellbereich des Neigungswinkels wird in bestimmte Winkelbereiche eingeteilt. Diese Winkelbereiche werden bestimmten **Bewertungsgruppen der Rutschgefahr (R-Gruppen)** zugeordnet (Anh. A, Tab. 1).

Der Grad einer vorhandenen Profilierung des Prüfbelages (Erhöhungen oder Vertiefungen) kann anhand der Hohlräume des Profils auf einer Fläche des Prüfbelages von 10 x 10 cm als sog. **Verdrängungsraum (V-Gruppen)** für die Aufnahme möglicher Gleitmittel bestimmt werden (Anh. A, Tab. 1).

Anh. A, Tab. 1 Bewertungsgruppen der Rutschhemmung (R-Gruppen) und des Verdrängungsraumes (V-Gruppen) nach BGR 181

Zuordnung der Gesamtmittelwerte der Neigungswinkel zu den Bewertungsgruppen der Rutschhemmung	
Gesamtmittelwerte	Bewertungsgruppe
von 6° bis 10°	R9
mehr als 10° bis 19°	R10
mehr als 19° bis 27°	R11
mehr als 27° bis 35°	R12
mehr als 35°	R13
Zuordnung der Bezeichnung des Verdrängungsraumes zu den Mindestvolumina	
Bezeichnung des Verdrängungsraumes	Mindestvolumen des Verdrängungsraumes (cm ³ /dm ²)
V4	4
V6	6
V8	8
V10	10

Der Vorteil des Begehungsverfahrens besteht darin, dass der menschliche Gang im gewissen Maße in das Prüfverfahren eingeht. Der menschliche Gang lässt sich gerätetechnisch nur schwer oder nur mit großem Aufwand simulieren (s. Abschn. 6.2). Bei größeren Winkelstellungen der Schiefen Ebene (z. B. >30°) entsprechen die Fußstellung und Körperschwerpunktlage, d. h. Richtung der einwirkenden Kräfte, nicht mehr den realen Verhältnissen beim Gang auf der Ebene. Die im oberen Winkelbereich nach diesem Verfahren erzielten Ergebnisse sind dennoch in ihrer praktischen Aussagegenauigkeit ausreichend.

Unsicherheiten gibt es bei der erst später eingeführten Gruppe R9. Viele unprofilierte Bodenbeläge (Hartböden und elastische Beläge) in Eingangsbereichen, in die häufig witterungsbedingte Nässe eingetragen wird, entsprechen dieser Gruppe R9. Mit der Neueinführung dieser Gruppe erfüllten nicht alle Böden, die bisher mehr oder weniger zufriedenstellend in Eingangsbereichen verlegt wurden, die Anforderungen an diese Gruppe R9, z. B. Steinböden mit Feinschliff >C120. Bei anderen Belägen, wie z. B. manchen elastischen Bodenbelägen sowie Parkett- und Laminatböden, bleibt die Beurteilung der Rutschhemmung in diesem Grenzbereich umstritten.

Wenig praxisrelevant ist nach Auffassung der BAuA die Prüfung in der Bewertungsgruppe R9 mit dem Gleitmittel Öl; den praktischen Gegebenheiten mehr entsprechen würde als Gleitmittel Wasser (z. B. wg. möglichem Nässeintrag in Eingangsbereichen) zu verwenden, zumal keine ausreichende Korrelation zwischen den Reibwerten bei Öl und bei Nässe gegeben ist [32]. Eine Prüfung von Bodenbelägen in den Bewertungsgruppen R10 bis R13, die vor allem im gewerblichen Bereich eingesetzt werden, mit dem Gleitmittel Öl entspricht eher den praktischen Einsatzbedingungen; wobei für die Mehrzahl ein ölbelasteter Fußboden als worst case anzusehen wäre.

Das Begehungsverfahren auf der Schiefen Ebene hat sich über Jahre bewährt und wird auch in Zukunft seine Berechtigung haben, insbesondere für stark profilierte Beläge, wie z. B. Gitterroste, für die es kein alternatives Prüfverfahren gibt. Für profillose bis leicht profilierte Bodenbeläge (R9-/R10-Beläge) kommen zunehmend ortsunabhängige Verfahren zur Anwendung, für die im Rahmen der europäischen Normung nicht nur die Vor-Ort-Prüfung vorhandener Böden, sondern auch eine stationäre Prüfung der Bodenbeläge im Labor (im Sinne einer Baumusterprüfung) angestrebt wird.

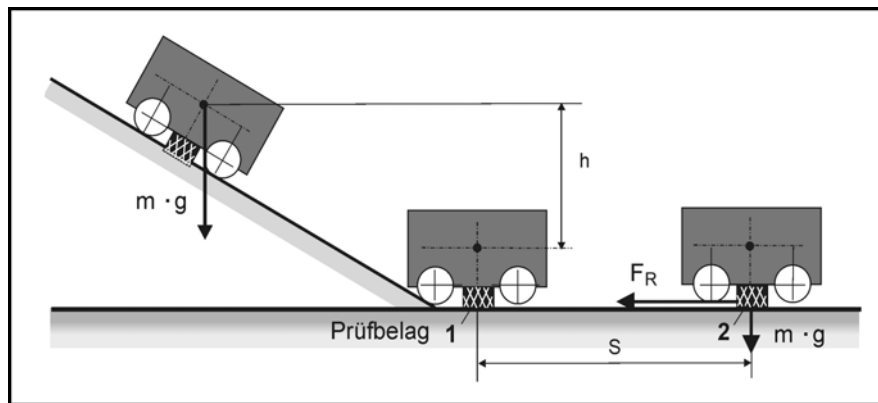
Anhang B: Abrollgleiter (ARG) – Gleitreibungsmessgerät mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit

Das Messgerät wurde an der BAuA entwickelt und hergestellt. Mit dem Gerät können gem. Abschnitt 12.2 die höheren Prüfgeschwindigkeiten $v_2 \geq 0,7$ m/s realisiert werden (wahlweise $v_2 = 1,0 / 1,8 / 2,2$ m/s).

1. Physikalisches Prinzip

(Anh. B, Abb. 1)

Ein von einer schiefen Ebene abrollender Körper hat beim Auftreffen auf den Prüfbelag im Punkt 1 eine bestimmte kinetische Energie (E_1), die bei anschließendem Gleiten auf dem Prüfbelag bis zum Stillstand im Punkt 2 ($v_2 = 0$) durch die Reibungsenergie (E_R) aufgebraucht wird. Dabei wird über den Weg s die Reibungsarbeit W_R verrichtet.



Anh. B, Abb. 1 Physikalisches Prinzip des Abrollgleiters

$$E_1 = \frac{m \cdot v_1^2}{2} = E_R$$

- kinetische Energie im Punkt 1 bzw. durch Reibung kompenzierte kinetische Energie bis Punkt 2

$$W_R = F_R \cdot s = m \cdot g \cdot \mu \cdot s$$

- Reibungsarbeit über Weg s
 $F_R = m \cdot g \cdot \mu$ - Reibungskraft

$$W_R = E_R$$

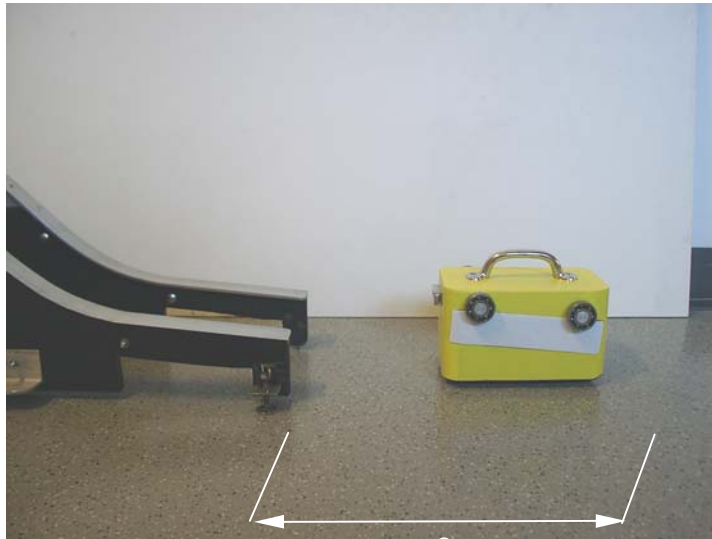
$$m \cdot g \cdot \mu \cdot s = \frac{m \cdot v_1^2}{2}$$

$$\mu = \frac{v_1^2}{2g \cdot s} \quad (1)$$

D. h., der Reibwert ist abhängig vom Quadrat der Anfangsgeschwindigkeit sowie umgekehrt proportional vom Gleitweg. Formel (1) gilt für eine gleichmäßig verzögerte Bewegung. Dies setzt eine weitgehende Unabhängigkeit des Reibwertes des Prüfgleiters von der Prüfgeschwindigkeit voraus.

2. Messgerät

Unter den Gesichtspunkten praktische Handhabbarkeit und vertretbare Messgenauigkeit wurde ein Messgerät gem. Anh. B, Abb. 2 hergestellt.



Anh. B, Abb. 2 Abrollgleiter für mobile Gleitreibungsmessung

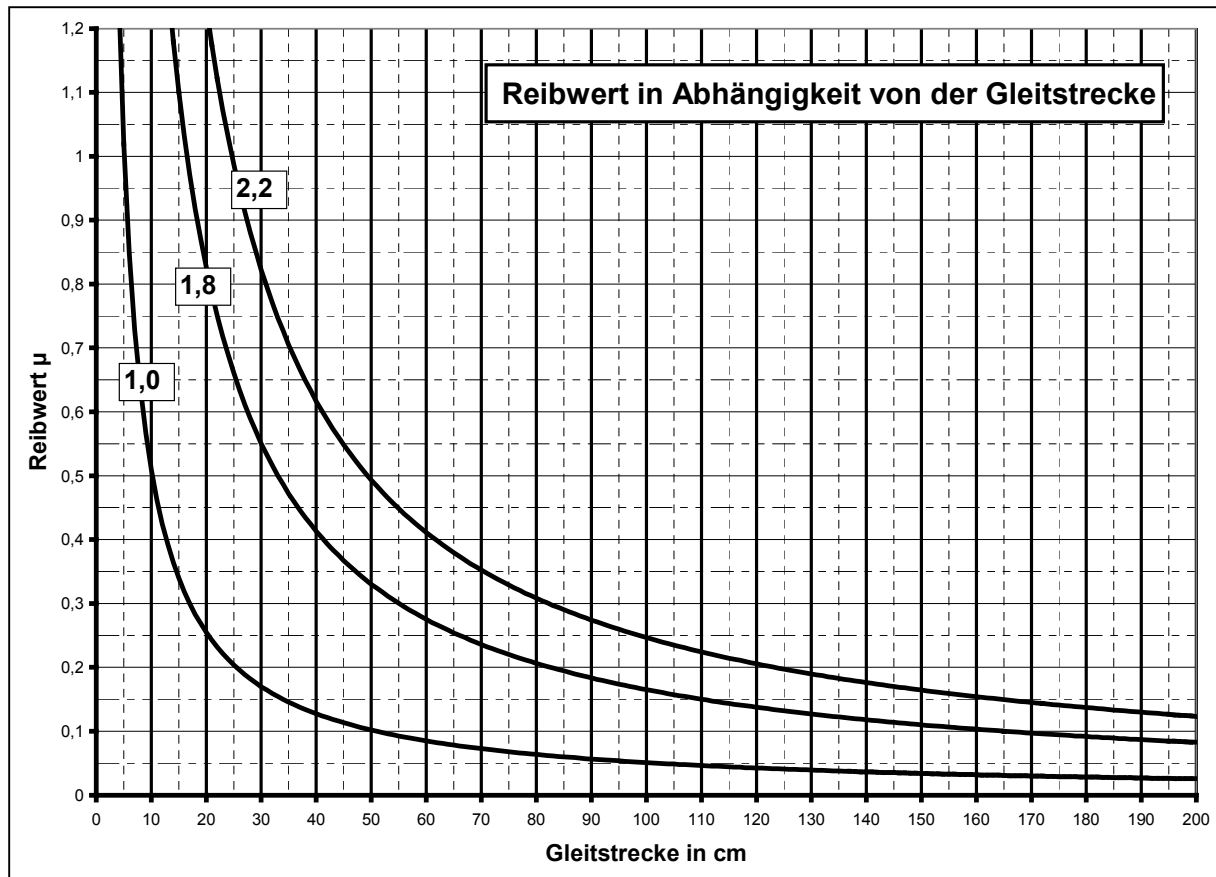
Der Abrollgleiter hat ein Gewicht von 6,2 kg. Verwendet wurden Gleiterplatten analog dem GMG 100. Der Gleiter rollt mit kugellagerbestückten Rädern auf 2 Führungsschienen ab. Mit Hilfe von Lichtschranken wurden im Auslauf der schiefen Ebene die Aufsetzgeschwindigkeiten gemessen. So konnten für definierte Aufsetzgeschwindigkeiten (1,0; 1,8; 2,2 m/s) die erforderlichen Ausgangshöhen auf der schiefen Ebene ermittelt werden.

3. Prüfverfahren

Das Gerät wird auf den zu prüfenden Belag aufgesetzt und der Gleiter aus der Höhenarretierung für die gewünschte Aufsetzgeschwindigkeit gelöst. Gemessen wird der Gleitweg s vom Aufsetzpunkt bis zum Endpunkt (Anh. B, Abb. 2).

Nach Formel (1) kann bei bekannter Aufsetzgeschwindigkeit v_1 und gemessenem Gleitweg s der Reibwert errechnet werden. Die Reibwerte können auch direkt aus den Kurvenverläufen für die einzelnen Aufsetzgeschwindigkeiten aus Anh. B, Abb. 3 entnommen werden. Je höher die Aufsetzgeschwindigkeit gewählt wird, umso günstiger ist die Verteilung der Reibwerte über der Gleitstrecke.

Bei geringen Reibwerten, z. B. $\mu < 0,2$ bei $v = 2,2$ m/s, ist aufgrund des nahezu waagerechten Kurvenverlaufes mit einer großen Schwankungsbreite für den Gleitweg zu rechnen. Bei zu langen Gleitstrecken kann daher im Bedarfsfall die Gleitstrecke durch einen Anschlag auf etwa 1 m verkürzt werden. Wenn der Gleiter den Anschlag erreicht, kann ein Reibwert $\mu < 0,2$ angenommen werden. Bei Gleitstrecken < 20 cm, d. h. $\mu > 0,8$, kann der Reibwert nur grob geschätzt werden.



Anh. B, Abb. 3 Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitstrecke (bei Aufsetzgeschwindigkeiten 1,0, 1,8, 2,2 m/s)

4. Erprobung des Messgerätes und bisherige Praxiserfahrungen

Zum Vergleich wurden Reibwertmessungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten mit Abrollgleiter und Zugtribometer [3] durchgeführt.

Ziel der Versuche sollte sein

- die Aussagefähigkeit der Messergebnisse zu prüfen;
- davon abgeleitet, die Grenzen der Prüfparameter, insbesondere der minimal zulässigen Gleitwege, festzustellen;
- Hinweise zur konstruktiven Verbesserung des Gerätes zu erlangen.

Im Ergebnis der Vergleichsmessungen wurde eine gute Übereinstimmung des Reibwertverlaufes zwischen dem Abrollgleiter und dem Zugtribometer bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Gleitstrecken >20 cm festgestellt.

Bei Gleitstrecken <20 cm werden offensichtlich zu hohe Reibwerte ermittelt. Ursachen könnten sein: Kippbewegungen des Gleiters, zusätzliche Reibung zwischen Gleiter und Führungsschienen während des kurzen Gleitweges, ungleichmäßiges oder stoßartiges Aufsetzen des Gleiters auf dem Bodenbelag. Als akzeptabler Gleitweg sollte daher eine Strecke >20 cm angesehen werden. Bei dieser Einschränkung ent-

fällt eine große Anzahl von Messwerten, vor allem für den trockenen Oberflächenzustand. Der Abrollgleiter ist also nicht zu empfehlen für Reibwertmessungen auf trockenen Böden. Diese Reibwerte sind ohnehin nicht von Interesse, da sie meist im Bereich $\mu > 0,6$ sind, teils nahe oder über $\mu = 1,0$.

Im Ergebnis der Erprobung konnte also festgestellt werden, dass der Abrollgleiter vor allem für die Prüfung von glatten unprofilierten Belägen bei Nässe oder ähnlichen Gleitmitteln geeignet ist.

Im Rahmen von Betriebsuntersuchungen durch die BAuA wurde der Abrollgleiter des öfteren eingesetzt, vor allem auf unprofilierten keramischen und mineralischen Böden bei Nässe; Messungen erfolgten sowohl im Innen- als auch im Außenbereich.

Anlass des Einsatzes des ARG waren Messergebnisse des GMG 100, die nicht dem subjektiven Empfinden beim Begehen der Beläge entsprachen. Die mit ARG gemessenen Reibwerte waren in diesen Fällen ausnahmslos um $\Delta\mu = 0,15 \dots 0,50$ niedriger als die mit GMG 100 gemessenen Reibwerte und wurde von allen an den Messungen beteiligten Personen als weitgehend realistisch eingeschätzt.

5. Maßnahmen zur Verbesserung des Abrollgleiters

Die Unzulänglichkeiten des Prüfverfahrens liegen vor allem in der Streuung der Reibwerte im Bereich der geringen Gleitstrecken. Diese ist begründet zum einen im Verfahren selbst durch die größeren Veränderungen des Reibwertes bei kleinen Veränderungen des Gleitweges (Formel (1)), zum anderen im Prüfgerät durch Schwankungen des Reibungswiderstandes beim Abrollen und durch stoßartiges Aufsetzen des Gleiters.

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit des Gerätes wurde daher vorgeschlagen und inzwischen realisiert:

- Verringerung der Reibung durch Verwendung von PE-beschichteten, reibungsarmen Laufflächen auf den Führungsschienen.
- Höhenjustierung im Aufsetzpunkt, um ein stoßartiges Aufsetzen des Gleiters zu vermeiden.
- Verbesserung der praktischen Handhabung durch automatische Anzeige des Reibwertes nach dem erfassten Gleitweg (durch Umrechnung nach Formel (1)).

Hinsichtlich der Gleitwegmessung sollte geprüft werden, ob diese mit Hilfe von Abstandssensoren (Ultraschall-, Infrarotsensoren) o. a. reibungsarmen Längenmeseinrichtungen erleichtert werden kann.

Zu prüfen wäre eine Veränderung des Prüfverfahrens durch Kombination von abrollendem Gleitkörper und Federwegmessung des auf eine Druckfeder auftreffenden Gleitkörpers. Ähnlich wie beim Pendelgleiter könnte nach einem bestimmten Gleitweg die Restenergie über den Federweg ermittelt werden. Der Vorteil eines solchen Verfahrens würde in der Verkürzung der Gleitstrecke des Gleitkörpers liegen.