



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Bestimmung und Messung physikalischer und technischer Parameter zur Beschreibung von Laufflächen in Milchviehställen



10

2007

Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

Impressum:

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Landtechnik@LfL.bayern.de
Tel.: 08161/71-3450

1. Auflage: Juni / 2007

Druck: Lerchl-Druck, 85354 Freising

Schutzgebühr: 15,-- €

© LfL

Die Beiträge dieser Schriftenreihe geben die Meinung des Autors wieder.



Bestimmung und Messung physikalischer und technischer Parameter zur Beschreibung von Laufflächen in Milchviehställen

Vollständiger Abdruck der vom Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.) genehmigte Dissertation.

Michael Kilian

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Landtechnik

**Bestimmung und Messung physikalischer und technischer
Parameter zur Beschreibung von Laufflächen in Milchvieh-
ställen**

Michael Kilian

Vollständiger Abdruck der vom Fachbereich Agrarwissenschaften,
Ökotoxikologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität
Gießen zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Steffen Hoy
Gutachter: Prof. Dr. Hermann Seufert
Prof. Dr. Hans-Peter Schwarz
Prüfer: Prof. Dr. Wilhelm Opitz von Boberfeld
Prof. Dr. Vladimir Dzapo

Tag der mündlichen Prüfung: 16.02.2007

Meiner Schwester Lea-Cornelia Kilian

*13.07.1981 †10.07.2006

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	17
1.1	Problemstellung	18
1.2	Zielsetzung	19
2	Stand des Wissens	21
2.1	Grundlagen zur Entwicklung von Geräten zur Messung der Rutschfestigkeit von Laufflächen	21
2.1.1	Kontaktflächen und auftretende Belastungen beim Stehen und Gehen des Rindes.....	21
2.1.2	Laufverhalten des Rindes	26
2.1.3	Einfluss von Klauenfeuchte auf Klauenhärte und -abrieb	30
2.2	Interaktionen zwischen Laufflächen und Klauen sowie deren Bedeutung für Klauenleiden	33
2.2.1	Auswirkung verschiedener Oberflächentexturen von Laufflächen auf die Klaue und die Reibungskomponenten beim Rindergang.....	33
2.2.2	Das mechanisch-rheologische Modell aus der Blechumformung und dessen Übertragung auf den Gang des Rindes auf harten Laufflächen	37
2.3	Anforderungen an Laufflächen sowie technische Parameter für ihre Charakterisierung	40
2.3.1	Anforderungen an Laufflächen aus tierischer und verfahrenstechnischer Sicht	40
2.3.2	Begriffe und technische Kenngrößen zur Beschreibung von Laufflächen und ihre Bedeutung für die gestellten Anforderungen.....	42
2.4	Erfassung der Rutschfestigkeit.....	51
2.4.1	Funktionsprinzipien von mobilen Reibzahlmessgeräten	51
2.4.2	Mobile Messgeräte zur Messung der Reibzahl	55
2.4.3	Bisherige Reibzahlmessungen zur Erfassung der Rutschfestigkeit von Laufflächen	62
2.4.4	Generelle Probleme und spezielle Faktoren bei Reibzahlmessungen auf Laufflächen	67
2.5	Erfassung von Oberflächen.....	68
2.5.1	Prinzip der Laser-Triangulation	70
2.5.2	Bildverarbeitung mit CCD-Technik.....	73
2.5.3	Merkmale zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften von technischen Oberflächen.....	75
2.5.4	Kenngrößen zur Beschreibung technischer Oberflächen.....	81
2.5.5	Bisherige Untersuchungen zur Erfassung der Oberflächenrauheit von Laufflächen	85

2.6	Bestehende Defizite bei der Rutschfestigkeits- und Oberflächenerfassung von Laufflächen	86
3	Material und Methoden	88
3.1	Entwicklung der Messtechnik	90
3.1.1	Anforderungen	90
3.1.2	Technische Ausführung des Gleitreibungsmessgerätes	94
3.1.3	Technische Ausführung des Topografiemessgerätes	97
3.2	Vorversuche	99
3.2.1	Gleitreibungsmessgerät	99
3.2.2	Topografiemessgerät	103
3.2.3	Versuchsroutine	104
3.3	Versuchvorbereitung und Versuchsdurchführung	105
3.3.1	Auswahl der Ställe	105
3.3.2	Auswahl der Messstellen im Stall	105
3.3.3	Durchführung der Messungen	106
3.4	Datenaufbereitung und statistische Auswertung	109
3.4.1	Verarbeitung der Reibungsmessdaten	109
3.4.2	Verarbeitung der Topografiemessdaten	112
3.4.3	Statistische Auswertungen	118
4	Ergebnisse	119
4.1	Reibwertmessungen	119
4.1.1	Haft- und Gleitreibungskoeffizienten	119
4.1.2	Arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden	126
4.1.3	Vergleich der Messgrößen aus der Gleitreibungsmessung	128
4.2	Topografiemessungen	130
4.2.1	Vertikale Oberflächenkenngrößen	131
4.2.2	Flächenkenngrößen	135
4.3	Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Gleitreibungs- und Topografiemessung	145
5	Diskussion	154
5.1	Messtechnik und Methodik	154
5.1.1	Gleitreibungsmessung	154
5.1.2	Topografiemessung	160
5.2	Einordnung der Ergebnisse aus der Gleitreibungsmessung	162
5.3	Einordnung der Ergebnisse aus der Topografiemessung	171

5.4	Zusammenhänge zwischen Gleitreibungsmessung und Topografiemessung.....	175
5.5	Interpretation der Messergebnisse – Ursachen für die Veränderungen der Laufflächen	182
5.6	Interpretation der Ergebnisse – Bedeutung der Laufflächenveränderungen für die Interaktionen zwischen Laufflächen und Klauen	188
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	192
7	Zusammenfassung.....	197
8	Summary.....	203
9	Literaturverzeichnis.....	208
10	Anhang	221

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Auswirkungen der Oberflächentexturen auf die Reibungskomponenten im System Klaue – Zwischenmedium – Boden	35
Abb. 2: Mechanisch-rheologisches Modell und Flächenanteile	38
Abb. 3: Ermittlung der Reibzahl durch Messen der Reibkraft, Prinzip von Zug-, Fahr- und Rotationstriebometer	51
Abb. 4: Ermittlung der Reibzahl durch Messen des Gleitwinkels, Prinzip der schiefen Ebene und des Rutschwinkelmessers.....	54
Abb. 5: Ermittlung der Reibzahl durch Messen der Reibenergie, Prinzip des Pendelgleiters	55
Abb. 6: Messprinzip bei der Laser-Triangulation	71
Abb. 7: Funktionsskizze eines einfachen Laserlinien-Triangulationsscanners.....	72
Abb. 8: Abbildung eines Spaltes bei der Informationsverarbeitung durch CCD-Zeilen.....	73
Abb. 9: Theoretischer und realer Intensitätsverlauf einer Bildzeile bei der Informationsverarbeitung durch CCD-Zeilen	74
Abb. 10: Beispieloberflächen für das Merkmal Abgeschlossenheit	76
Abb. 11: Beispieloberflächen für das Merkmal Leere	76
Abb. 12: Beispieloberflächen für das Merkmal geschlossener Leerflächenanteil	77
Abb. 13: Beispieloberflächen für das Merkmal Feinheit	78
Abb. 14: Beispieloberflächen für das Merkmal Dichte.....	78
Abb. 15: Beispieloberflächen für das Merkmal Größe der Strukturelemente.....	79
Abb. 16: Beispieloberflächen für das Merkmal Gleichmäßigkeit.....	79
Abb. 17: Beispieloberflächen für das Merkmal Richtung.....	80
Abb. 18: Beispieloberflächen für das Merkmal Welligkeit	80
Abb. 19: Flussdiagramm der methodischen Vorgehensweise zur Bestimmung von Kenngrößen für die Bewertung von Laufflächen.....	89
Abb. 20: Schematische Darstellung des Gleitreibungsmessgerätes.....	94
Abb. 21: Eingesetzter Prüfkörper zur Gleitreibungsmessung	95
Abb. 22: Schematische Darstellung des Topografiemessgerätes.....	97
Abb. 23: Aufstellungsschema der Messgeräte für die Versuchsdurchführung	104
Abb. 24: Umfang der Untersuchungen	105
Abb. 25: Auswahl der Messpunkte in den Ställen	106
Abb. 26: Verschiedene Bodenbeläge, präpariert für die Gleitreibungsmessungen.....	107
Abb. 27: Einsatz der Messgeräte in der Praxis.....	109
Abb. 28: Datenbereiche zur Ermittlung des Haft- und Gleitreibungskoeffizienten.....	110

Abb. 29: Positive und negative Amplituden und Beispiel eines Spitze-Spitze Wertes in der Gleitreibungskurve	112
Abb. 30: Auftretende Messfehler bei Laser-Triangulationssystemen (1)	113
Abb. 31: Auftretende Messfehler bei Laser-Triangulationssystemen (2)	114
Abb. 32: Messausreißerentfernung mit dem Programm WinSAM	115
Abb. 33: Exemplarische Gleitreibungskurven verschiedener Laufflächen	120
Abb. 34: Durchschnittliche Haftreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Betrieben	121
Abb. 35: Durchschnittliche Haftreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen	122
Abb. 36: Durchschnittliche Gleitreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Betrieben	123
Abb. 37: Durchschnittliche Gleitreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen	124
Abb. 38: Verschiedene Bodenbeläge mit identischem Gleitreibungskoeffizienten	125
Abb. 39: Verlauf der Gleitreibungskurven von Belägen mit identischem Gleitreibungskoeffizient	126
Abb. 40: Arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden nach Materialien und Altersklassen	127
Abb. 41: Vergleich des Oberflächenmerkmals Leere der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter vertikaler Oberflächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen	132
Abb. 42: Vergleich des Oberflächenmerkmals Leere der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter Flächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen	136
Abb. 43: Vergleich des Oberflächenmerkmals Feinheit der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter Flächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen	137
Abb. 44: Vergleich des Materialvolumens und der maximalen Anzahl Materialflächen der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen	139
Abb. 45: Vergleich des offenen Leervolumens und der maximalen Anzahl offener Leerflächen der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen	139
Abb. 46: Vergleich des geschlossenen Leervolumens und der maximalen Anzahl geschlossener Leerflächen der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen	140
Abb. 47: Vergleich des Oberflächenmerkmals Abgeschlossenheit der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter Flächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen	141
Abb. 48: Zusammenhang zwischen Topografietiefe und Gleitreibungskoeffizient auf den untersuchten Laufflächenmaterialien	146

Abb. 49: Zusammenhang zwischen Topografietiefe und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien	147
Abb. 50: Zusammenhang zwischen Topografietiefe und Anzahl positiver Amplituden auf den untersuchten Laufflächenmaterialien	147
Abb. 51: Zusammenhang zwischen offenem Leervolumen und Gleitreibungskoeffizient auf den untersuchten Laufflächenmaterialien	149
Abb. 52: Zusammenhang zwischen offenem Leervolumen und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien	150
Abb. 53: Zusammenhang zwischen maximaler Anzahl geschlossener Leerflächen und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien.....	151
Abb. 54: Zusammenhang zwischen der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien	152

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Anforderungen an Laufflächen aus tierischer Sicht.....	41
Tab. 2: Anforderungen an Laufflächen aus verfahrenstechnischer Sicht.....	41
Tab. 3: Technische Spezifikationen von mobilen Reibzahlmessgeräten	58
Tab. 4: Zu berücksichtigende Faktoren bei der Beurteilung der Gleitsicherheit des Systems Klaue – Zwischenmedium – Lauffläche	67
Tab. 5: Vor- und Nachteile ausgewählter Oberflächenmesssysteme hinsichtlich der Topografieerfassung von Laufflächen	69
Tab. 6: Begriffe zur einheitlichen Bezeichnung der geometrischen Eigenschaften von Blechoberflächen.....	75
Tab. 7: Auswahl vertikaler Oberflächenkenngrößen für den 2D- und 3D-Fall.....	83
Tab. 8: Auswahl horizontaler Oberflächenkenngrößen für den 2D-Fall.....	83
Tab. 9: Auswahl hybrider Oberflächenkenngrößen für den 2D-Fall.....	83
Tab. 10: Auswahl reiner 3D-Kenngrößen (Flächenkenngrößen) aus dem mechanisch-rheologischen Modell.....	84
Tab. 11: Anforderungen an das zu konstruierende Gleitreibungsmessgerät	92
Tab. 12: Anforderungen an das zu konstruierende Topografiemessgerät.....	93
Tab. 13: Technische Spezifikationen des Gleitreibungsmessgerätes	96
Tab. 14: Technische Spezifikationen des Topografiemessgerätes	98
Tab. 15: Ergebnisse der Vorversuche zur Auswahl der Messgeschwindigkeit bei der Gleitreibungsmessung auf trockenen Prüfmaterialien	100
Tab. 16: Ergebnisse der Vorversuche zur Auswahl der Messgeschwindigkeit bei der Gleitreibungsmessung auf nassen Prüfmaterialien	100
Tab. 17: Ergebnisse unterschiedlicher Messgeschwindigkeiten ausgewählter Prüfflächen im trockenen und nassen Zustand.....	101
Tab. 18: Ergebnisse der Vorversuche zur Überprüfung der Wiederholbarkeit von Messungen mit dem Topografiemessgerät auf ausgewählten Prüfflächen	103
Tab. 19: Verwendete Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften von Laufflächen.....	117
Tab. 20: Vergleich verschiedener Messgrößen der Gleitreibungsmessung bei den unterschiedlichen Materialien und Altersklassen.....	128
Tab. 21: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen den verschiedenen Kenngrößen aus der Gleitreibungsmessung.....	128
Tab. 22: Geeignete Messgrößen der Gleitreibungsmessung zur Unterscheidung verschiedener Materialien und Altersklassen.....	130
Tab. 23: Vergleich der Höhe und der Änderungen ausgewählter vertikaler Kenngrößen zur Beschreibung des Oberflächenmerkmals Leere der untersuchten Laufflächenklassen	133
Tab. 24: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen ausgewählten vertikalen Oberflächenkenngrößen der Leere	134

Tab. 25: Vergleich der Höhe und der Änderungen ausgewählter Flächenkenngrößen zur Beschreibung verschiedener Oberflächenmerkmale der Laufflächenklassen	144
Tab. 26: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen ausgewählten vertikalen Oberflächenkenngrößen und den Kenngrößen der Gleitreibungsmessung.....	148
Tab. 27: Pearson Korrelationskoeffizienten ausgewählter Flächenkenngrößen und Kenngrößen der Gleitreibungsmessung	153
Tab. 28: Vergleich der Gleitreibungsergebnisse verschiedener Autoren mit den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen.....	165
Tab. 29: Einteilung der Texturbereiche der untersuchten Laufflächenklassen nach DIN EN ISO 13473-1	188

Abkürzungsverzeichnis

A_{clm}	Maximum der durchschnittlichen Leerflächengröße
α_{clm}	maximal geschlossener Leerflächenanteil
$\alpha_{cl(Aclm)}$	geschlossener Leerflächenanteil bei maximaler geschlossener Leerflächengröße
γ_{clm}	bezogene Durchdringung mit dem max. geschlossenen Leerflächenanteil
C_{bot}	untere Durchdringung
C_{top}	obere Durchdringung
C_{clm}	Durchdringung mit dem maximal geschlossenen Leerflächenanteil
$R\Delta_q$	Quadratisches Mittel der Profilsteigungen (2D)
μ_G	Gleitreibungskoeffizient
μ_H	Haftreibungskoeffizient
μ_{ssa}	Arithmetischer Spitz-Spitz-Wert
KF	Kraftfutterstation
λ_q	mittlere quadratische Wellenlänge
M_{r1}	Kleinster Materialanteil (Kernrauheit) (2D)
M_{r2}	Größter Materialanteil (Kernrauheit) (2D)
N_{clm}	Maximale Anzahl geschlossener Leerflächen
$N_{cl(Aclm)}$	geschlossene Leerflächenanzahl bei maximaler durchschnittlich geschlossener Leerflächengröße
$N_{cl(clm)}$	Anzahl geschlossener Leerflächen bei maximal geschlossenem Leerflächenanteil
N_{mam}	Maximale Anzahl Materialflächen
N_{opm}	Maximale Anzahl offener Leerflächen
NPA	Anzahl positiver Amplituden
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert (2D)
R_c	Mittlere Höhe der Profilelemente
R_k	Kernrautiefe (2D)
R_{ku}	Kurtosis der Topografie (2D)
R_{pc}	Spitzenzahl

R_{pk}	Reduzierte Spitzenhöhe (2D)
R_{sk}	Schiefe der Topografie (2D)
R_{Sm}	Arithmetisches Mittel der Profilinebenheiten
R_t	Topografietiefe (2D)
R_{vk}	Reduzierte Riefentiefe (2D)
S_a	Arithmetischer Mittenrauwert (3D)
S_k	Kernrautiefe (3D)
S_{ku}	Kurtosis der Topografie (3D)
S_{pk}	Reduzierte Spitzenhöhe (3D)
S_q	Quadratischer Mittenrauwert (3D)
S_{r1}	Kleinster Materialanteil (Kernrauheit) (3D)
S_{r2}	Größter Materialanteil (Kernrauheit) (3D)
S_{sk}	Schiefe der Topografie (3D)
S_t	Topografietiefe (3D)
S_{vk}	Reduzierte Riefentiefe (3D)
V_{op}	Offenes Leervolumen
V_{ma}	Materialvolumen
V_{cl}	Geschlossenes Leervolumen
V_{vo}	Leervolumen
Z_t	Höhendifferenz eines Profilelementes

1 Einleitung

Laut ADR (2006) sind Klauen- und Gliedmaßenprobleme mit 9,7 % bundesweit die viert häufigste Abgangsursache aller in der Leistungsprüfung befindlichen Kühe, die direkt einem Krankheitsbild zugeordnet werden kann. Die regionalen Schwankungen reichten 2005 von 7,3 % in Schleswig Holstein bis 16,3 % in Sachsen. In Bayern belegten Klauen- und Gliedmaßenprobleme mit 9,4 % der Prüfungskühe ebenfalls den vierten Platz bei den Abgangsursachen, die direkt zugeordnet werden konnten (LKV BAYERN, 2005). Auch international sind diese Probleme von herausragender Bedeutung. Klauen- und Gliedmaßenprobleme enden in letzter Konsequenz in Lahmheiten. MANSKE (2002) bezeichnet Lahmheiten als Folge verschiedener Faktoren als eines der größten Probleme in der Milchviehhaltung. Die Varianz im Vorkommen von Klauen und Gliedmaßenproblemen kann aufgrund der Multifaktorialität sowohl beim Vergleich verschiedener Herden als auch bei tierindividuellen Vergleichen innerhalb derselben Herde sehr hoch sein. So berichtet MANSKE (2002) bei einer Studie, die 102 schwedische Milchviehbetriebe umfasste, von 72 % der Kühe, die mindestens eine Klauenverletzung hatten. Darüber hinaus waren 5,1 % davon lahm. DEMBELE et al. (2006) beziffern das Vorkommen von Lahmheit in 24 tschechischen Herden auf durchschnittlich 22 %, wobei die Spanne von 6 % bis 42 % reichte.

Die Einflussfaktoren auf Klauen- und Gliedmaßenprobleme und daraus resultierende Lahmheiten sind vielfältig. Oft wirken mehrere Faktoren zusammen, begünstigen oder verstärken sich wechselseitig. Zu den häufigst genannten Einflussfaktoren zählen Umweltfaktoren wie Boden und Liegeboxen (MURPHY et al., 1987; MATON, 1987; THYSEN, 1987; VOKEY et al., 2001, SOMERS et al.; 2003; COOK et al., 2004), Fütterung (HEDGES et al., 2001; BERGSTEN et al., 2003), Laktationsnummer, Laktationsstadium und Leistung (WARNICK et al., 2001; GREEN et al., 2002; MANSKE, 2002), Klauenpflege (MANSKE, 2002), Management (GREEN et al., 2002) und Genetik (FATEHI et al., 2003).

Die Folgen von Lahmheiten reichen von einer geringeren Milchleistung (WARNICK et al., 2001; GREEN et al., 2002), geringerer Reproduktionsleistung (FATEHI et al., 2003), erhöhten Behandlungskosten und erhöhtem Arbeitsaufwand bis hin zu Tierverlusten. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren und der hohen Variabilität des Vorkommens sind die Kosten von Lahmheiten schwer zu beziffern. WARNICK et al. (2001) berichten beispielsweise von 1,5 kg/d bzw. 0,8 kg/d weniger Milch in den ersten Wochen nach der Diagnose bei zwei untersuchten Herden mit 1796 bzw. 724 Tieren. GREEN et al. (2002) geben einen durchschnittlichen Milchverlust in Höhe von 360 kg (Spanne 160 bis 550 kg) pro Kuh und Laktation an.

Laut Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung 2001 (TierSchNutzV, § 3 Absatz 2 in HIRT et al., 2003) müssen „...Haltungseinrichtungen nach ihrer Bauweise, den verwendeten Materialien und ihrem Zustand so beschaffen sein, dass eine Verletzung oder sonstige Gefährdung der Gesundheit der Tiere so sicher ausgeschlossen wird, wie dies nach dem

Stand der Technik möglich ist.“ Da keine weiteren speziellen Anforderungen für Milchvieh hinsichtlich Laufflächen enthalten sind, wird diese Verordnung jedoch teilweise sehr großzügig ausgelegt. COOK et al. (2004) betonen, dass die Haltungsumwelt letztendlich entscheidend für den Grad der Klauen und Gliedmaßenprobleme bzw. der Lahmheit sei. Hierbei kommt den Böden bzw. den Laufflächen eine Schlüsselrolle zu. Auch BORDE-RAS et al. (2004) und DEMBELE et al. (2006) heben die Bedeutung der Rutschfestigkeit und der Sauberkeit der Böden als wichtigsten Einfluss der Haltungsumwelt auf das Vorkommen von Lahmheiten hervor. Die Bedeutung des Bodens auf die Klauengesundheit belegten u. a. auch SOMERS et al. (2003) mit Klauenbonitierungen von Milchviehherden, die auf Betonböden oder auf Stroh gehalten wurden.

Insbesondere die Bodenoberfläche hat nach CAMARA (1970) und NILSSON (1988) einen entscheidenden Einfluss auf die Klauengesundheit. Das Verständnis der Zusammenhänge zwischen der Laufflächenoberfläche und den Eigenschaften einer Lauffläche, die sich auf die Klauen- und Gliedmaßengesundheit auswirken, ist ein zentraler Ansatzpunkt zur objektiven Bewertung von Laufflächen.

1.1 Problemstellung

Aus der Literatur geht ein mittelbarer Zusammenhang zwischen den Laufflächen und der Klauenproblematik hervor. Den Haupteinfluss haben die Oberflächen der Laufflächen und deren Veränderungen im Laufe der Nutzungsdauer. Dies resultiert einerseits in mangelnder Rutschfestigkeit bei Belägen, die im weitesten Sinne aus Beton hergestellt sind und in zu hohem Klauenabrieb bei Laufflächen aus Gussasphalt. Auf beiden Materialien führt dies zu unterschiedlichen Klauen- und Gliedmaßenerkrankungen.

Aufgrund der materialspezifischen Haltbarkeitsprobleme bei Laufflächen aus Gussasphalt, Beton und Spaltenboden ist eine objektive Bewertungsmethodik mit vergleichbaren Kenngrößen nötig, welche die Unterschiede hinsichtlich Rutschfestigkeit und Oberflächeneigenschaften berücksichtigt. Während zur Beschreibung der Rutschfestigkeit von Laufflächen häufig Reibungskoeffizienten, insbesondere der Gleitreibungskoeffizient verwendet wurden und bereits zahlreiche Untersuchungsergebnisse vorliegen (BÄHR und TÜRPIZ, 1976; BÄHR et al., 1978; NILSSON, 1988; MULITZE, 1989; PHILLIPS et al., 1998; PHILLIPS et al., 2000; PHILLIPS und MORRIS, 2000; PHILLIPS und MORRIS, 2001; BONSER et al., 2003, MÜLLER, 2003), gibt es deutlich weniger Untersuchungen zur Erfassung und Beschreibung der Laufflächentopografie (DE BELIE und MONTENY, 1998; PHILLIPS und MORRIS, 2000; DE BELIE und ROMBAUT, 2003). Die Ergebnisse der Gleitreibungsmessungen o. g. Autoren sind allerdings schwer vergleichbar, da sie alle mit unterschiedlich spezifizierten Messgeräten arbeiteten. Dies reicht von verschiedenen Prüfkörpern aus Klauenhorn oder Kunststoff, über verschiedene Messgeschwindigkeiten und -strecken, unterschiedliche Kraftaufnahmesysteme bis hin zu verschiedenen Belastungen der Prüfkörper. Auch bei den Ergebnissen der Topografiemessungen ist eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben. Um wie bei der Fahrbahnprüfung, der Sportbodenprüfung, der Prüfung von nassbelasteten Bodenbelägen in Schwimmbädern

oder der Sicherheitsprüfung von Böden in Werkstätten und Schlachthöfen zu vergleichbaren Ergebnissen zu gelangen, die als anerkannte Qualitätseigenschaften der verschiedenen Böden kommunizierbar sind, ist eine Standardisierung der Messmethodik und der Messgeräte notwendig.

Aus den genannten Bereichen sowie der Metall- und Blechverarbeitung ist der Einfluss der Oberfläche von Materialien auf die Reibungskoeffizienten bereits bekannt, wodurch gezielt Oberflächen für bestimmte Einsatzzwecke ausgewählt und verwendet werden können. Dies gelingt nur, weil die Anforderungen an die Materialien qualitativ beschrieben und mittels entsprechender Kenngrößen quantifiziert werden können. Die Folgen von zu glatten oder zu rauen Laufflächen sind zwar hinlänglich bekannt, jedoch fehlen qualitative und quantitative Informationen über den Einfluss der Oberflächenmerkmale, die eine objektive Bewertung erlauben und Rückschlüsse auf die Rutschfestigkeit und die Abriebeeigenschaften der Laufflächen zulassen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine kombinierte Messmethodik zu entwickeln, die sowohl für eine detailliertere und differenziertere Beurteilung der Rutschfestigkeit in der Praxis als auch bei der Entwicklung neuer Laufflächen und Materialzusammensetzungen hilfreich sein kann. Hiermit soll ein Beitrag geleistet werden, Laufflächen in ihren Eigenschaften haltbarer und tiergerechter zu gestalten.

Dies soll zum einen durch die Bereitstellung grundlegender Erkenntnisse hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen der Oberflächenbeschaffenheit und den für die Tiere unmittelbar gesundheits- und verhaltensrelevanten Eigenschaften der Laufflächen (Rutschfestigkeit und Rauheit) erfolgen. Hierfür sind gleichermaßen Gleitreibungs- und Topografiemessungen notwendig, um so durch Aufzeigen von Zusammenhängen die materialbedingten Änderungen der Oberflächen und damit einhergehend auch die der Rutschfestigkeit und der abrasiven Eigenschaften zu verstehen. Zum anderen soll die bestehende Methodik der Gleitreibungsmessung verbessert und weitere aussagekräftige Messgrößen aus dem bestehenden Verfahren abgeleitet werden. In Anbetracht der unterschiedlichen Gleitreibungsmessgeräte und als ein erster Schritt in Richtung Vereinheitlichung der Messmethodik soll ein Messgerät entsprechend den Anforderungen der E DIN 51131 „Prüfung von Bodenbelägen: Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Verfahren zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten“ unter Berücksichtigung spezieller Anforderungen für Rutschfestigkeitsmessungen in Milchviehställen konstruiert werden.

Weiterhin sollen bekannte Oberflächenkenngrößen aus der Metallverarbeitung auf ihre Tauglichkeit zur Beschreibung der Laufflächenoberflächen und deren Einfluss auf Rutschfestigkeit sowie den zu erwartenden Klauenabrieb untersucht werden.

Zur Methodenevaluierung und Eignungsprüfung der Messtechnik einerseits aber auch zur Erfassung der Streubreite der Rutschfestigkeit und Topografie der Laufflächen andererseits soll die Datenerfassung in Liegeboxenlaufställen auf landwirtschaftlichen Betrieben mit

unterschiedlichen, harten Laufflächenmaterialien verschiedenen Alters erfolgen. Ein weiteres Ziel ist es, auftretende Veränderungen der Laufflächeneigenschaften nach fortgeschrittener Nutzungsdauer zu erfassen. Die Berechnungen der Kenngrößen und die Auswertung des Datenmaterials sollen nach der Fertigstellung eines Auswertungsverfahrens und einer Auswertungsroutine, die in dieser Arbeit zu entwickeln ist, möglichst schnell mit geringem Zeit- und Rechenaufwand auch vor Ort auf landwirtschaftlichen Betrieben durchführbar sein.

2 Stand des Wissens

In den folgenden Abschnitten wird eine Literaturübersicht gegeben, die sowohl für die Messmethoden- als auch für die Messtechnikentwicklung von Bedeutung ist. Hierzu werden neben veröffentlichten landtechnischen und veterinärmedizinischen Forschungen gezielt Erkenntnisse aus verschiedenen Fachdisziplinen wie beispielsweise der Arbeitssicherheit, dem Straßenverkehrswesen, der Tribologie und der Blechumformung sowie der Lasertechnik herangezogen. Es werden nur die Informationen dargestellt, die einen direkten Beitrag zur Messmethodik- oder zur Messtechnikentwicklung liefern. Größere Aufmerksamkeit wird jenen Abschnitten gewidmet, aus denen Spezifikationen für die Messtechnik direkt übernommen oder abgeleitet werden können.

2.1 Grundlagen zur Entwicklung von Geräten zur Messung der Rutschfestigkeit von Laufflächen

Ziel dieses Abschnittes ist es, die für die Konstruktion eines Rutschfestigkeitsmessgerätes wichtigen natürlichen Gegebenheiten wie beispielsweise die Belastungen auf den Extremitäten und die hieraus resultierenden Kräfte und Drücke zwischen Klaue und Boden während des Gehens und Stehens von Rindern aufzuzeigen. Bei der Konstruktion eines solchen Gerätes sind diese ebenso von Bedeutung wie die Eigenschaften des Klauenhorns und die Einflüsse der Laufflächen auf dessen mechanische Eigenschaften.

2.1.1 Kontaktflächen und auftretende Belastungen beim Stehen und Gehen des Rindes

Wie aus der Literatur hervorgeht, ist das Körpergewicht je nach Bewegungssituation des Rindes unterschiedlich auf die Vorder- und Hintergliedmaßen sowie die medialen und lateralen Klauen an den jeweiligen Gliedmaßen verteilt. Je nach Alter, Gewicht, teilweise auch nach Rasse, aber insbesondere tierindividuell, treten starke Variationen in der Klauengröße, der Kontaktfläche zwischen Klaue und Boden und den entstehenden Kontaktflächendrücken auf. Hinzu kommen unterschiedliche Angaben von Klauenaufstandsflächen und Klauendrücken durch verschiedene Messmethoden. Diese haben sich im Laufe der Zeit und zunehmendem Fortschritt in der Messtechnik verbessert. Als Beispiel für anfängliche Untersuchungen zu den genannten Messgrößen sei FEBL (1968) genannt, der die Klauenfläche anhand von auf Papier nachgezeichneten Klauenumrissen ermittelte. Diese Gesamtfläche entspricht allerdings aufgrund der Hohlkehlung der Klauen nicht der tatsächlichen Kontaktfläche zwischen Klaue und Boden. In neuesten Veröffentlichungen wird die tatsächliche Kontaktfläche mittels Planimetriertisch (RUSSKE, 2001) oder mit Kraftmessfolien im direkten Kontaktbereich von Klaue und Boden ermittelt, wodurch auch auftretende Punktbelastungen von Rauheitsspitzen der Bodenoberflächen gemessen und detektiert werden können (DE BELIE und ROMBAUT, 2003). Aus detaillierten Untersuchungen von VAN DER TOL et al. (2002) und VAN DER TOL et al. (2003) geht

hervor, dass bei der Angabe der Kontaktfläche und der auftretenden Belastungen an den Klauen stets der Bewegungszustand entscheidend ist. Denn in Abhängigkeit von den sich ändernden Vertikalkräften infolge von Körperschwerpunktverlagerungen während der Bewegungen oder während des Stehens ändert sich die Klauenaufstandsfläche und damit die Höhe der auftretenden Kontaktflächendrücke (MAIR, 1989; WANDEL, 1999; DE BELIE und ROMBAUT, 2003; VAN DER TOL et al., 2003). In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass die Vorderextremitäten, ausgenommen einige Bewegungsabläufe wie beispielsweise das Aufreiten auf andere Tiere, den größten Teil des Körpergewichtes tragen.

FEBL (1968) stellte stark variierende Bodenflächen (vom Autor so bezeichnet) in verschiedenen Gewichtsgruppen von Rindvieh während des Stehens fest. An den Vorderklauen von Kalbinnen fand er eine Fläche von etwa 50 cm^2 , bei Altkühen eine von etwa 82 cm^2 . Die Hinterklauen waren mit ca. 42 cm^2 bei Kalbinnen und mit ca. 65 cm^2 bei Altkühen signifikant kleiner. Während zwischen den verschiedenen Gewichtsgruppen signifikante Unterschiede bestanden, waren die Unterschiede in der Bodenfläche verschiedener Rassen nicht signifikant. Außerdem waren die lateralen Hinterklauen in den untersuchten Gewichtsgruppen signifikant größer als die medialen. Mit zunehmender Trächtigkeit verlagerte sich der Körperschwerpunkt weiter kaudal und die Hinterklauen wurden stärker belastet.

IRPS (1983) beziffert den durchschnittlichen Lastanteil auf den Vorderbeinen von Kühen auf ca. 55 % und auf den Hinterbeinen auf etwa 45 %. Des Weiteren nennt er Schätzwerte für maximale Vorder- und Hinterhandlasten von Kühen bei verschiedenen Aktivitäten. Beim Aufstehen und Hinlegen lasten schätzungsweise 495 kg auf den Vorder- und etwa 405 kg auf den Hinterbeinen. Während der Futteraufnahme tragen die Vorderbeine 430 kg und die Hinterbeine 270 kg. Bei ruhiger Fortbewegung kommen 395 kg auf die Vorderextremitäten und 325 kg auf die hinteren. Beim Aufreiten allerdings kehrt sich das Lastenverhältnis mit 395 kg auf den Vorderbeinen und 490 kg auf den hinteren um. IRPS (1983) berichtet von großen Streuungen innerhalb verschiedener Rassen. Je kg Lebendmasse stehen für beide Körperhälften einheitlich $0,3 \text{ cm}^2$ Stützfläche zur Verfügung. Dies entspricht Normaldrücken von etwa 20 N/cm^2 .

Auch SCOTT (1987) bestätigt, dass die lateralen Klauen von Kälbern während des Gehens mit einer durchschnittlichen Kontaktfläche von 319 mm^2 signifikant größer waren als die medialen Klauen mit einer Kontaktfläche von 285 mm^2 . Allerdings stellte er keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Gesamtkontaktflächen der verschiedenen Extremitäten fest. Es gab ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bereichen der Klauen an Vorder- und Hinterextremitäten, in denen die höchsten Drücke gemessen wurden. Er stellte eine signifikant größere Vertikalkraft während des Gehens an den Vorderfüßen fest. Die Vorderfüße trugen demnach 61 %, die Hinterfüße 51 % des Körpergewichtes. Er folgerte daraus, dass der größere Teil des Körpergewichtes von den Vorderbeinen getragen wird und daher auch dort die höheren Drücke entstehen. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen von SCOTT (1987) galt jedoch dem zeitlichen Gangablauf und den unterschiedlichen Belastungen während des Gehens. Der zeitliche Verlauf des

vertikalen Kraftverlaufs an den Vorderbeinen stellte sich wie folgt dar: Nach dem Aufsetzen der Ferse wanderte der Kontaktpunkt in Richtung Zehe. Dies führte zu einem Anstieg der vertikalen Kraftkomponente mit zunehmender Schwerpunktverlagerung auf das betreffende Bein. Im Stand (bei voller Belastung des Beins) schwang das andere Bein vorwärts. Die vertikale Kraftkomponente des betrachteten Beins wurde wieder geringer und schließlich Null, als das andere Bein auf den Boden aufsetzte. Bei den Hinterbeinen war ebenfalls ein Anstieg der vertikalen Kraftkomponente zum Zeitpunkt des Aufsetzens der Ferse zu beobachten. Dann allerdings zeigte sich im Gegensatz zu den Vorderbeinen ein bimodaler Kraftverlauf mit ähnlich hohen Ausschlägen an beiden Spitzen wie an den Vorderbeinen. Beim zeitlichen Verlauf der horizontalen Kraftkomponente zeigte sich nach anfänglichem Abfall der Kraft durch das Abbremsen wieder ein kontinuierlicher Kraftanstieg bis zum höchsten Ausschlag beim Abdrücken der Klaue vom Boden. Der Abfall der Kraft ist für Vorder- und Hinterbeine ähnlich, allerdings ist der Kraftanstieg beim Abdrücken an den Hinterbeinen größer, was auf einen größeren Vorschub durch die Hinterbeine hindeutet.

MAIR (1989) beziffert die mittlere Fläche der rechten Vorderextremität der untersuchten Kühe auf $59,1 \text{ cm}^2$. Er teilte das Klauenpaar des rechten Vorderbeins in die vier Sektoren medial-kranial, lateral-kranial, medial-kaudal und lateral-kaudal ein. Beide kraniale Sektoren hatten größere Flächen als die kaudalen Sektoren. Der Sektor lateral-kaudal hatte von allen Sektoren den kleinsten Flächenanteil. Die Spannweite des mittleren Gewichtes auf der Vordergliedmaße lag zwischen 837 und 1404 N. Der durchschnittliche Anteil des gesamten Körpergewichtes, der auf der rechten Vordergliedmaße lastete, betrug 16 %. Dies führte er auf vorsichtiges Standverhalten der Tiere auf ungewohntem Untergrund zurück. Dabei wurden die medialen Klauen im Mittel mit 53,1 % etwas mehr belastet als die lateralen Klauen mit 46,9 %. Teilweise waren große tierindividuelle Unterschiede festzustellen. Im Mittel der Tiere fand er folgende Gewichtsverteilung auf der rechten Vorderextremität: medial-kranial 25,7 %, medial-kaudal 27,3 %, lateral-kranial 28,5 % und lateral-kaudal 18,3 %. Der mittlere Druck (Quotient aus Gewichtskraft und Fläche) gemittelt über alle Tiere betrug $18,8 \text{ N/cm}^2$ je Klauenpaar mit hohen interindividuellen Schwankungen der Druckverteilung auf die einzelnen Sektoren der Gesamtklaue. Im Durchschnitt der Tiere fand er den größten mittleren Druck mit $21,1 \text{ N/cm}^2$ im Sektor medial-kaudal. Die anderen 3 Sektoren lagen alle nur ca. 3 N/cm^2 unter diesem Wert, daher konnte dieser Unterschied nicht statistisch abgesichert werden. Der höchste Maximaldruck, der bei einem Einzeltier gemessen wurde, lag bei $92,8 \text{ N/cm}^2$. Bei den anderen lag er zwischen $50,5 \text{ N/cm}^2$ und $73,5 \text{ N/cm}^2$. Im Schnitt war der Maximaldruck etwa dreimal so hoch wie der mittlere Druck auf der Kontaktfläche. Die höchsten Druckwerte traten überwiegend im Ballenbereich auf.

WANDEL (1999) berichtet von einer wechselnden Belastung während des Stehens und Gehens. Bei Kühen mit einem durchschnittlichen Gewicht von 700 kg variierte die Belastung zwischen 175 und 400 kg je Klauenpaar. Bei einer Stützfläche von 75 cm^2 entspricht dies Normaldrücken von bis zu 40 N/cm^2 auf der Sohle und bis zu 320 N/cm^2 auf dem Tragrand.

RUSSKE (2001) stellte ebenfalls größere Fußungsflächen eines Klauenpaares an den Vorderklauen (zwischen 10 und 22,5 cm²) am 750. Lebenstag von Rindern fest. Dabei spielte die Rasse keine Rolle. Die Fußungsflächen an den Hinterklauen betragen dagegen zwischen 7,5 und 27,5 cm². Bei den Fußungsflächen gab es Unterschiede zwischen den untersuchten Rassen. Auch DE BELIE und ROMBAUT (2003) stellten größere Kontaktflächen der Vorderklauen fest, beziffern diese jedoch nicht.

VAN DER TOL et al. (2002) ermittelten die auftretenden Drücke unter den Klauen von Milchkühen während des Stehens mit einer Kraftmessplattform. Sie fanden keine gleichmäßige Verteilung des Körpergewichtes weder an den Vorderklauen noch an den Hinterklauen. An den Vorderextremitäten wurden die Medialklauen, an den Hinterbeinen die Lateralklauen besonders belastet. An Vorder- und Hinterklauen traten die höchsten Kontaktflächendrücke an der Sohle und nicht, wie erwartet, an der Klauenwand auf. An den hinteren Lateralklauen wurden die höchsten Drücke im vorderen Teil der Sohle, an den vorderen Medialklauen im hinteren Teil der Sohle gemessen. Zu vernachlässigende Unterschiede traten zwischen rechten und linken Beinen auf, da es durch geringe Bewegungen der Tiere bei der Kraftmessung im Stand zu einer Variation des Körperschwerpunktes und damit zu geringen Variationen der Kontaktflächendrücke zwischen den Gliedmaßen der beiden Körperhälften kam. Dies bestätigen auch DE BELIE und ROMBAUT (2003). Die durchschnittlichen Werte der Maximaldrücke von allen Tieren betragen 17-54 N/cm² je Klaue.

In einer späteren Veröffentlichung zeigten VAN DER TOL et al. (2003) unterschiedliche Klaue-Boden Kontaktflächen und Druckbelastungen der Klauen während fünf verschiedener Gangphasen. Diese wurden wie folgt definiert:

1. Fersenaufsetzen: Moment, in dem die Klaue den Boden berührt und die Kraft auf die Gliedmaße übertragen wird, wobei die vertikale Komponente der Gesamtkraft 30 % ihres Maximalwertes erreicht.
2. Maximale Verzögerung: Moment, in dem die Gliedmaße der höchsten Bremskraft ausgesetzt ist, wobei die longitudinale Komponente der Gesamtkraft ihr Minimum erreicht.
3. Mitte Stützphase: Moment, in dem sich die Gliedmaße im Übergang vom Bremsen zum Beschleunigen befindet.
4. Maximale Beschleunigung: Moment, in dem die Gliedmaße die höchste Beschleunigungskraft ausübt, um den Körper vorwärts zu treiben, wobei die longitudinale Komponente der Gesamtkraft ihr Maximum erreicht.
5. Abstoßen: Moment, in dem die Klaue beinahe vom Boden abgedrückt ist, wobei die vertikale Komponente der Gesamtkraft auf 30 % ihres Maximalwertes reduziert wird.

Hierbei stellte sich der longitudinale Kräfteverlauf (Horizontalkraft parallel zum Boden) in Abhängigkeit von der Zeit folgendermaßen dar: Nach einem negativen Ausschlag in der ersten Hälfte der Stützphase (Bremskraft) stieg die Horizontalkraft in der Mitte der Stützphase wieder auf Null an und erreichte einen positiven Ausschlag in der zweiten Hälfte der Stützphase (Beschleunigungskraft). Während des Gehens traten im Laufe der Zeit Be-

lastungswechsel (Vertikalkraft) bei Vorder- und Hinterbeinen auf, wobei Kraft, Druck, deren Verteilung sowie deren Wechsel bei Vorder- und Hinterbeinen im Laufe der Zeit unterschiedlich waren. Bei den Vorderbeinen landete die Klaue beim Fersenaufsetzen auf dem Ballenbereich der Lateralklaue und weniger im Ballenbereich der Medialklaue. Nach komplettem Aufsetzen waren beide Klauen mehr oder weniger gleich belastet und zwar hauptsächlich im Ballenbereich und an den Wänden. Die Sohle hingegen wurde kaum belastet. Von der Hauptstützphase bis zur maximalen Beschleunigung wechselte die Last zur Medialklaue. Beim Abdrücken konnte eine Gleichverteilung der Last auf die vorderen Bereiche der Wand und der Sohle beider Klauen einer Gliedmaße beobachtet werden.

Beim Aufsetzen des hinteren Klauenpaares wurden 95 % der Last auf die Lateralklaue übertragen. Während der Verzögerungs- und Hauptstützphase wechselte die Last auf die Medialklaue. Dennoch blieb die größte Belastung auf der Sohle und dem Ballen der Lateralklaue. Beim Abstoßen war die Last mehr oder weniger gleich auf die vorderen Bereiche von Wand und Sohle der Medial- und Lateralklaue verteilt. Gemittelt über alle Gliedmaßen ergaben sich während des Aufsetzens der Fersen 23 cm^2 , in der Mitte der Stützphase 50 cm^2 und beim erneuten Abdrücken der Klauen 13 cm^2 Kontaktfläche. Die Unterschiede bei den Änderungen der Kontaktflächen an Vorder- und Hintergliedmaßen waren teilweise signifikant. Beim Fersenaufsetzen und in der Mitte der Stützphase war die Kontaktfläche an den Vordergliedmaßen signifikant größer als an den Hintergliedmaßen. In der Phase der maximalen Verzögerung, der maximalen Beschleunigung und beim Abdrücken der Klaue waren keine signifikanten Unterschiede für Vorder- und Hintergliedmaßen festzustellen. Die Durchschnittsdrücke an den Hintergliedmaßen betragen 50 bis 85 N/cm^2 . Die gemessenen Maximaldrücke erhöhten sich von 90 bis 110 N/cm^2 beim Fersenaufsetzen auf 180 bis 200 N/cm^2 beim Abdrücken. Die Kräfteverteilung an den Hinterklauen war insgesamt sehr unausgewogen, denn die während des Fersenaufsetzens, Bremsens, in der Mitte der Stützphase und des Beschleunigens übertragenen Kräfte waren an der Lateralklaue signifikant größer als an der Medialklaue. Die vertikale Kraftkomponente nahm während der Hauptstützphase zu und während des Abdrückens ab. Die maximale vertikale Kraft an den Hinterbeinen (rechtes und linkes gemittelt) war mit 2444 N geringer als an den Vorderbeinen mit 3324 N. Diese Kräfte entsprachen 37 % des Körpergewichtes auf den Hinterbeinen und 51 % auf den Vorderbeinen. Alle Unterschiede der auftretenden Kräfte an Vorder- und Hinterbeinen, Medial- und Lateralklauen und für die verschiedenen Gangphasen im Zeitablauf waren signifikant. Die Lastverteilung auf Vorder- und Hinterbeine sowie auf Medial- und Lateralklauen hing sehr stark von der jeweiligen Gangphase ab. VAN DER TOL et al. (2003) kamen zu dem Schluss, dass die ungleichmäßige Lastverteilung auf die Klauen beim Gehen viel gravierender ist als beim Stehen.

VAN DER TOL et al. (2004) untersuchten mittels einer Kraftmessplattform den biomechanischen Effekt eines funktionellen Klauenschnittes auf die Belastungszustände und die Last- bzw. Druckverteilung auf die hinteren Klauenpaare von Kühen. Als Resultat ihrer Erhebungen stellte sich heraus, dass der Klauenschnitt nur zu einer tendenziell besseren Gewichtsverteilung an den Hinterklauen führte. Vor dem Schnitt lasteten 80 % der Gewichtskraft auf den hinteren Lateralklauen und nur 20 % auf den hinteren Medialklauen. Nach dem funktionellen Klauenschnitt verlagerten sich 10 % der Last von den Lateral- auf

die Medialklauen. Dabei wurde gleichzeitig eine signifikante Erhöhung der Kontaktfläche von 27,5 auf 40,0 cm² erreicht. Die Vorderklauen wurden nicht geschnitten. Ihre Kontaktflächen unterschieden sich mit 35 cm² beim ersten Messtermin bzw. 38 cm² beim zweiten nicht signifikant voneinander. Die signifikante Erhöhung der Kontaktflächen an den Hinterklauen führte zu einer signifikanten Reduktion des Durchschnittsdruckes. Auch der Maximaldruck verringerte sich geringfügig. Dies konnte aber statistisch nicht abgesichert werden. Die Maximaldrücke blieben nach dem Klauenschnitt ca. zweimal so hoch wie die Durchschnittsdrücke. Im Großen und Ganzen blieben die Klauen auch nach dem Schnitt unverändert hohen Maximaldrücken ausgesetzt. Die durchschnittlichen Drücke bzw. Maximaldrücke an den Kontaktflächen der Vorderfüße bezifferten sie auf 60 bzw. 124 N/cm². An den Hinterfüßen betragen sie 50 N/cm² bzw. 89 N/cm². An den ungeschnittenen Vorderklauen traten die höchsten Drücke im Ballenbereich der Medial- und Lateralklauen auf. Bei den Hinterklauen wurde der Ballenbereich der Lateralklauen und der vordere Teil der Sohle der Medialklaue besonders belastet. Die durchschnittliche Belastung aller Tiere auf jedem Vorderbein betrug am ersten Messtermin (vor dem Schneiden der Hinterklauen) 1976 N und 2321 N nach dem Schnitt. Die durchschnittliche Belastung aller Tiere auf jedem Hinterbein lag vor dem Schnitt bei 1406 N und bei 1940 N nach dem Schnitt. Die Unterschiede waren allerdings nicht signifikant. Ein Vorderbein trug durchschnittlich 31,1 % und jedes Hinterbein 24,3 % des Körpergewichts.

Aufgrund der unterschiedlichen Messmethoden und der unterschiedlichen Flächenbezeichnungen in der Literatur ist eine direkte Vergleichbarkeit der von den Autoren ermittelten Klauenaufstandsflächen und Kontaktflächendrücke nicht gegeben. Allerdings besteht Einigkeit darüber, dass sowohl beim Stehen als auch beim Gehen, die Vorderklauen den größeren Anteil am Körpergewicht tragen. Außerdem werden an den Vorderextremitäten die Medial-, an den Hinterextremitäten die Lateralklauen mehr belastet.

2.1.2 Laufverhalten des Rindes

Die Vorfahren des Hausrindes waren ursprünglich Steppenbewohner und legten große Wege bei der Nahrungssuche zurück. Die Böden, auf denen sich die Tiere bewegten, waren größtenteils nachgiebig. Im Laufe der Evolution entwickelte sich ein auf diese Anforderungen abgestimmter Bewegungsapparat. Demnach werden Rinder auch als sogenannte „Weichgänger“ bezeichnet (u. a. WANDEL, 1999; VAN DER TOL et al., 2004). An einer intakten Klaue befindet sich ein überstehender Tragrand am Saum der Klauensohle, der den Fuß auf Naturboden etwas einsinken lässt (WANDEL, 1999). Ergebnisse von Versuchen, bei denen Kühe die Wahl hatten, auf hartem oder weichem Boden zu laufen, zeigten eindeutige Präferenzen der Tiere für den nachgiebigen Untergrund (u. a. BENDEL, 2005). Auch OBER und KIESL (1970) berichten, dass Kühe festen und ebenen Boden mit weichen Oberflächen dem harten, rauen, steinigen und unebenen Boden vorziehen, da hier das Risiko des Ausgleitens geringer ist. Auf harten Böden ist das Verletzungsrisiko infolge der Ausgleitgeschwindigkeiten und der auftretenden Kräften vergleichsweise höher. RICHTER (2001) gibt die regelmäßigen Ausgleitgeschwindigkeiten von Rindern mit über 1,5

m/s, in Extremfällen sogar mit bis zu 5 m/s an. STEINER und VAN CAENEGEM (2003) geben einen Bereich um 2,8 m/s an. In verschiedenen Literaturquellen finden sich sehr gut vergleichbare Ergebnisse zu unterschiedlichen Parametern, mit denen das Laufverhalten von Rindern beschrieben werden kann, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

Laufwege:

ZEEB (1987) erfasste die täglichen Laufwege von Bullen in der Camargue in ihrer natürlichen Umwelt als Referenz für das Laufverhalten von Rindern. Sie gingen durchschnittlich 1,8 h/d und legten dabei 6,072 km zurück. Milchkühe im Laufstall hingegen gingen durchschnittlich nur 0,6 h/d und legten dabei 1,08 km zurück. Das Laufen betrug durchschnittlich 5 % der täglichen Aktivitäten der Milchkühe im Laufstall.

Zu vergleichbaren Ergebnissen bei der Aufzeichnung des Laufverhaltens von Kühen im Laufstall mit Kameras kamen KEMPKENS und BOXBERGER (1987). Sie berichten von einer durchschnittlich zurückgelegten Wegstrecke der Tiere in Höhe von 600 m/d bei einer hohen Spannweite zwischen den Einzeltieren. Diese betrug zwischen 200 m/d und 2500 m/d, wobei auffällig war, dass junge Kühe mehr liefen als ältere Tiere, da junge Kühe aufgrund der niedrigen Rangordnung oft Umwege machen oder flüchten mussten.

Auch BOCKISCH (1991) kommt nach einer Literaturübersicht zu durchschnittlichen Laufwegen von Kühen in Höhe von 471 m/d im Laufstall und 3580 m/d auf der Weide.

BENDEL (2005) gibt neben Tagesdistanzen auch kumulierte Laufwege zum Vergleich des Laufverhaltens von Kühen an, die auf Betonspaltenboden und solchen, die auf Spaltenboden mit Gummiauflage gehalten wurden. Hierbei betrug der durchschnittliche Laufweg in 28 Tagen auf Betonspalten 69,8 km bzw. 2,5 km/d, auf Gummi 112,3 km bzw. 4,0 km/d.

Schrittlängen:

Als weiterer Parameter zur Beschreibung des Laufverhaltens findet sich in der Literatur die durchschnittliche Schrittlänge der Tiere, wobei hier zwischen der Schrittlänge zweier aufeinander folgender Schritte einer Gliedmaße (meist Hinterbeine) und der Schrittlänge von Einzelschritten (Distanz zwischen rechter und linker Gliedmaße, meist der Hinterbeine) unterschieden wird. PHILLIPS und MORRIS (2000) geben die durchschnittliche Schrittlänge zweier aufeinander folgender Schritte in einer Vergleichsuntersuchung des Laufverhaltens von Kühen auf Betonlaufgängen eines Laufstalls in verschiedenen Zuständen mit 1,37 m auf trockenem Beton, 1,34 m auf nassem Beton, 1,32 m auf Beton mit geringer Gülleverschmutzung und 1,66 m auf Beton mit hoher Gülleverschmutzung an. In einer späteren Veröffentlichung berichten PHILLIPS und MORRIS (2001) über den Einfluss unterschiedlicher Aggregatgrößen der Mineralbeimengung in verschiedenen Epoxdharzanstrichen auf das Laufverhalten von Milchkühen. Auf dem Anstrich ohne Mineralbeimengung betrug die durchschnittliche Schrittlänge zweier aufeinander folgender Schritte 1,30 m. Auf dem Anstrich mit kleinster Körnung war die durchschnittliche

Schrittlänge 1,37 m, auf jenem mit mittlerer Aggregatgröße 1,35 m und auf dem Anstrich mit der größten Mineralkörnung 1,36 m.

In einem Vorher-Nachher-Versuch verglich BENZ (2002) die durchschnittlichen Schrittlängen der Einzelschritte von Kühen auf zwei Betrieben vor und nach dem Belegen der ursprünglichen Spaltenböden mit Gummimatten. Auf einem Betrieb wurde zusätzlich die durchschnittliche Schrittlänge beim Weidegang erfasst. Diese wurde von BENZ (2002) mit 80,75 cm angegeben. Die durchschnittlichen Schrittlängen auf Spaltenboden waren mit 56,3 cm bzw. 61,6 cm signifikant geringer als auf den Gummimatten (78,4 cm bzw. 69,5 cm).

BENDEL (2005) bestätigt diese Ergebnisse in einer Versuchsanordnung, die der von BENZ (2002) entspricht. Sie beziffert die Schrittlänge der Einzelschritte vor und nach dem Einbau von Gummimatten auf Spaltenboden im Durchschnitt aller untersuchten Tiere auf dem ursprünglichen Betonspaltenboden mit 59,91 cm. Damit waren die Schrittlängen signifikant geringer als nach dem Einbau der Gummimatten (71,64 cm).

Auch TELEZHENKO und BERGSTEN (2005) geben die durchschnittliche Schrittlänge der Einzelschritte auf Spalten mit Gummimatten mit 78,43 cm an. Auf Spalten ohne Gummimatten betrug sie 72,49 cm, auf planbefestigtem Beton 77,96 cm, auf planbefestigtem Beton mit Gummimatten 80,51 cm und auf Sand als Referenzboden 83,26 cm. Hierbei konnten sie keinen signifikanten Unterschied zwischen Spalten mit Gummimatten und planbefestigtem Beton feststellen. Die durchschnittliche Schrittlänge der Einzelschritte auf Spalten mit Gummimatten unterschied sich ebenfalls nicht signifikant von derjenigen, die auf Beton mit Gummimatten gemessen wurde. Des Weiteren wurde die Schrittlänge zweier aufeinander folgender Schritte erhoben. Auf Spaltenboden ohne Gummimatten betrug diese 133,80 cm, auf Spalten mit Gummimatten 148,17 cm, auf Beton 148,81 cm, auf Beton mit Gummimatten 154,13 cm und auf Sand 159,99 cm. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Spalten mit Gummimatten und planbefestigtem Beton gefunden werden. Außerdem nahmen die Autoren eine Einteilung der Kühe nach Lahmheitsgraden vor und werteten die Schrittlänge zweier aufeinander folgenden Schritte, die Einzelschrittlängen und die Ganggeschwindigkeit aus. An dieser Stelle sei allerdings weiterführend auf die Originalliteratur verwiesen.

Schrittzahl pro Zeiteinheit:

Zusätzlich geben einige Autoren zur Beschreibung des Laufverhaltens die durchschnittliche Schrittzahl pro Zeiteinheit aller beobachteten Tiere an. PHILLIPS und MORRIS (2000) konnten auf trockenem Beton 0,58 Schritte/s, auf nassem Beton 0,58 Schritte/s, auf Beton mit geringer Gülleverschmutzung 0,50 Schritte/s und auf Beton mit hoher Gülleverschmutzung 0,39 Schritte/s feststellen. In ihrer bereits beschriebenen Folgeuntersuchung (PHILLIPS und MORRIS, 2001) betrug die Schrittzahl pro Zeiteinheit auf Epoxydharzanstrich ohne Mineralbeimengung 0,65 Schritte/s. Auf dem Anstrich mit kleinster Körnung war diese 0,61 Schritte/s, auf jenem mit mittlerer Aggregatgröße 0,60 Schritte/s und auf dem Anstrich mit der größten Mineralkörnung 0,59 Schritte/s.

BENZ (2002) beobachtete eine signifikant höhere Aktivität nach dem Einbau der Gummimatten (109,8 Schritte/h bzw. 54 Schritte/h) im Vergleich zu den ursprünglichen Spaltenböden auf den beiden untersuchten Betrieben (76,0 Schritte/h bzw. 39,5 Schritte/h).

BENDEL (2005) hingegen konnte nur eine tendenzielle Zunahme der durchschnittlichen Schrittzahl von 118.339 auf 157.117 innerhalb des 28 tägigen Untersuchungszeitraums feststellen.

Ganggeschwindigkeit:

HERRMANN (1997) gibt eine sehr große Spanne der Ganggeschwindigkeit von Kühen auf verschiedenen Milchviehbetrieben mit Spaltenboden an (0,54 m/s bis 0,89 m/s). Auf Laufflächen aus Beton und Klinker war die Ganggeschwindigkeit mit 0,50 m/s bis 0,60 m/s bzw. 0,65 m/s geringer. Auf Gussasphaltlaufflächen beobachtete er mit 0,84 m/s den höchsten Wert. Bei Klassifizierung nach Bodenarten stellte sich heraus, dass die Ganggeschwindigkeit auf Gussasphalt signifikant höher als auf allen untersuchten Spalten-, Beton- und Klinkerböden war.

Auf trockenem Betonboden erhoben PHILLIPS und MORRIS (2000) eine Ganggeschwindigkeit von 0,81 m/s. Auf nassem Betonboden wurden 0,80 m/s, auf Beton mit geringer Gülleverschmutzung 0,67 m/s und auf Beton mit hoher Gülleverschmutzung 0,65 m/s gemessen.

Die Ganggeschwindigkeiten auf einem Epoxydharzanstrich ohne Mineralbeimengung betragen nach PHILLIPS und MORRIS (2001) 0,85 m/s, auf jenem mit der kleinsten Aggregatgröße 0,84 m/s, auf dem Anstrich mit mittlerer Körnung 0,82 m/s und auf dem Boden mit der größten Mineralkörnung 0,81 m/s.

BENZ (2002) stellte auf den beiden untersuchten Betrieben mit Spaltenboden vor dem Einbau der Gummimatten Ganggeschwindigkeiten von 0,76 m/s bzw. 0,79 m/s fest. Nach dem Einbau erhöhten sich diese signifikant auf 1,11 m/s bzw. 0,95 m/s.

Die Ergebnisse von TELEZHENKO und BERGSTEN (2005) fielen dagegen nicht so eindeutig aus. Sie ermittelten auf Betonspaltenboden eine Ganggeschwindigkeit von 0,97 m/s, auf Spaltenboden mit Gummimatten 1,06 m/s, auf planbefestigtem Beton 1,08 m/s, auf planbefestigtem Beton mit Gummimatten 1,01 m/s und auf Sand 1,12 m/s. Hierbei konnten sie weder signifikante Unterschiede zwischen Betonspaltenboden und planbefestigtem Beton mit Gummimatten, noch zwischen Spaltenboden mit Gummimattenaufgabe und Beton mit Gummimatten feststellen. Ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Ganggeschwindigkeit auf Spaltenboden mit Gummimatten und planbefestigtem Beton bestand ebenfalls nicht. Gleiches galt für die Ganggeschwindigkeit auf planbefestigtem Beton und Sand.

Einfluss des Bodens auf Gang und Gangparameter:

Die ausgewertete Literatur zeigt, dass Kühe ihr Laufverhalten den jeweiligen Bodenverhältnissen anpassen. Besonders auf harte, verschmutzte Laufflächen reagierten die Tiere mit deutlichen Gangveränderungen, um das erhöhte Risiko des Ausgleitens zu reduzieren. Der Anpassungsgrad und die Art der Ganganpassung sind von denjenigen Faktoren abhängig, die sich direkt auf die Rutschfestigkeit der Laufflächen auswirken. Hierzu zählen insbesondere die Oberflächenrauheit und der Verschmutzungsgrad.

ZEEB (1987) berichtet von einer geringeren Gangaktivität auf Spaltenboden als auf Betonboden. Aufgrund eines zu geringen Stichprobenumfangs konnte dieses Ergebnis jedoch nicht statistisch abgesichert werden. PHILLIPS und MORRIS (2000) sagen aus, dass durch Wasser hervorgerufene Nässe des Betonbodens keinen Einfluss auf die Gangparameter Ganggeschwindigkeit, Schrittlänge oder Schrittzahl pro Zeiteinheit im Vergleich zu trockenem Betonboden hatte. Allerdings konnte unter anderem eine Verringerung der Aufsetzwinkel der Vorder- und Hinterbeine relativ zum Boden beobachtet werden. Die Verschmutzung der Laufflächen mit Gülle führte zu einer mehr vertikalen Position der Hinterbeine am Ende der Stützphase bei gleichzeitig geringer vertikaler Position der Vorderbeine während der Stützphase. Weiterhin war die Schrittzahl pro Zeiteinheit verringert und die Schrittlänge erhöht. RUSHEN et al. (2004) stellten fest, dass die beobachteten Kühe auf Betonboden mit Gülleverschmutzung um 7 % langsamer gingen als auf trockenem Betonboden. Gleichzeitig war das Ausgleitrisiko im verschmutzten Zustand drei mal so hoch. Auf Gummimatten hingegen war die Ganggeschwindigkeit um 8 % höher als auf Beton. Außerdem rutschten die Tiere deutlich weniger aus. Dies galt sowohl für trockene als auch für verschmutzte Gummimatten. Auch BENZ (2002) und BENDEL (2005) bestätigen höhere Ganggeschwindigkeiten auf Gummimatten. PHILLIPS und MORRIS (2001) fanden weiterhin, dass Kühe auf Epoxydharzanstrichen mit Mineralbeimengungen längere Schritte und eine geringere Schrittzahl pro Zeiteinheit machten als auf einem Anstrich ohne Mineralbeimengungen. Außerdem zeigten die Kühe auf dem Anstrich ohne Mineralbeimengung (geringster Gleitreibungskoeffizient) schnellere, hektischere Bewegungen als auf jenen mit Mineralbeimengungen. Darüber hinaus konnte eine aufrechtere Gangweise mit zunehmender Aggregatgröße der Mineralbeimengung im Bodenanstrich beobachtet werden. Auf dem Bodenanstrich mit der größten Mineralkörnung beobachteten PHILLIPS und MORRIS (2001) die geringste Ganggeschwindigkeit von allen Prüfböden. Die Autoren schlossen daraus, dass solche Mineralkörnungen eine zu raue Lauffläche hervorrufen und daher als nicht geeignet einzustufen sind.

2.1.3 Einfluss von Klauenfeuchte auf Klauenhärte und -abrieb

In der Literatur besteht weitgehend Einigkeit über den Einfluss der Klauenhornfeuchte auf die Klauenhornhärte, den Klauenhornabrieb und die Klauenhorneigenschaften (CAMARA, 1970; MATON, 1987; HERRMANN, 1997; ZÖSCHER, 2000; RUSKE, 2001; MEYER und GEORG, 2001; BORDERAS et al., 2004; RUSHEN et al., 2004; FRANCK et al., 2006). Es wird größtenteils von unterschiedlichen Klauenhorneigenschaften insbe-

sondere der Klauenhornfeuchte und -härte in den verschiedenen Klauenbereichen (z. B. Sohle, Dorsalwand, Tragrand) aber auch von Unterschieden zwischen Vorder- und Hinterklauen berichtet. So schreibt HERRMANN (1997) von einem signifikant höheren Trockensubstanzgehalt in den Vorderklauen. Dies bestätigt auch ZÖSCHER (2000), der ebenfalls einen höheren Trockensubstanzgehalt im Horn von Vorderklauen als in jenem von Hinterklauen fand. Außerdem stellte er sowohl für die vorderen als auch für die hinteren Klauen eine signifikante Abnahme des Trockensubstanzgehaltes von der Zehe über die Seite bis hin zur Sohle fest. FRANCK et al. (2006) hingegen fanden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Feuchtigkeitsgehaltes im Klauenhorn an verschiedenen Messpunkten der Einzelklauen. CAMARA (1970) fand bei älteren Kühen einen höheren Trockensubstanzgehalt als bei Jungtieren. Im Gegensatz zu trocken auf einer Prüfmaschine abgeriebenen Klauenproben stellte er unabhängig von Rasse und Altersgruppe signifikant höhere Abriebmengen Horn bei nass abgeriebenen Klauenproben fest. Dies bestätigen die Ergebnisse von BORDERAS et al. (2004), nach denen die Klauen bereits innerhalb kurzer Zeit viel Wasser aufnehmen und dadurch aufweichen, was zu höheren Abriebmengen führt. Dabei waren die Abriebmengen sowohl in nassem als auch in trockenem Zustand an den Vorderklauen der untersuchten Tiere größer. Weiterhin fand CAMARA (1970) signifikant höhere Abriebmengen mit zunehmendem Alter der Tiere. Ein signifikanter Einfluss ging zudem von der Rasse aus. Er konnte allerdings keine eindeutigen Zusammenhänge aufgrund von teilweise inkonsistenten Korrelationskoeffizienten zwischen dem Trockensubstanzgehalt der Klauenprüfkörper und der Abriebmenge aufzeigen und führte dies auf unkontrollierbare Effekte wie die ungleichmäßige Zusammensetzung der Klauen (Rasse und Alter) und unterschiedliche Herkunft der Klauen zurück.

BORDERAS et al. (2004) und RUSHEN et al. (2004) berichten von Messungen der Klauenhornhärte in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes der untersuchten Klauenhornproben. Es stellte sich heraus, dass gewässerte Klauenproben etwa 30 % des im gesamten Versuch absorbierten Wassers bereits nach einer Stunde aufgenommen hatten. Bei der Shore-D-Härteprüfung fanden BORDERAS et al. (2004) signifikant härteres Horn an der Basis der Abaxial- und Dorsalwand (Tragrand) ($65,6 \pm 10,7$ °SD) als an der Sohle ($45,9 \pm 14,2$ °SD). Allerdings wurde der Tragrand schneller weich und im Vergleich zu den anderen Klauenmesspunkten am weichsten. An der Dorsal- und Abaxialwand wurde das härteste Horn der Klauen mit $77,9 \pm 3,5$ °SD gemessen. Die Wandregion zeigte die geringste Härteveränderung im Wasser. Der durchschnittliche Unterschied in Wand- und Sohlenhärte betrug 29 °SD.

ZÖSCHER (2000) stellte eine signifikante Abnahme der Klauenhornhärte (Shore-D-Härte) vom Kronrand zum Tragrand, von dorsal nach palmar/plantar und in der Sohlenfläche von der Sohlenspitze zum Ballen bei Kühen fest. Keine signifikanten Unterschiede konnte er hingegen zwischen Vorder- und Hinterklauen sowie zwischen medialen und lateralen Klauen nachweisen. Die Sohlenhornhärte im Ballenbereich betrug $36,0 \pm 9,1$ °SD und an der Zehenspitze $49,3 \pm 6,5$ °SD. Die Spannweite verschiedener Positionen am Kronrand war $58,5 \pm 4,0$ bis $63,9 \pm 3,8$ °SD und an verschiedenen Positionen in der Tragrandebene $52,5 \pm 8,8$ bis $63,3 \pm 7,1$ °SD.

SOMERS et al. (2005) führten Härtemessungen des Klauenhorns bei Kühen durch, die auf verschiedenen Böden gehalten wurden. Allerdings wurde mit einem Shore-A-Härte Prüfgerät gemessen. Sie stellten unabhängig von der Laufflächenausführung ebenfalls das härteste Horn an der Klauenwand fest. Die Spannweite betrug hier $92,6 \pm 0,14$ bis $93,1 \pm 0,15$ °SA. Die Spannweite der Messergebnisse an der Zehe war $88,1 \pm 0,18$ bis $90,4 \pm 0,20$ °SA, an der Sohle $82,4 \pm 0,3$ bis $84,0 \pm 0,38$ °SA und am Ballen $36,6 \pm 0,39$ bis $38,9 \pm 0,44$ °SA. Eine statistische Überprüfung auf Unterschiede der Hornhärte erfolgte allerdings nur für die einzelnen Klauenpositionen zwischen den verschiedenen Laufflächenausführungen, nicht aber für die Ergebnisse der unterschiedlichen Messpositionen auf einem Bodenbelag.

MEYER und GEORG (2001) untersuchten die Shore-D-Härte von Kuhklauen ebenfalls im Rahmen einer Vergleichsuntersuchung zum Einfluss verschiedener Laufflächen auf die Eigenschaften von Klauenhorn. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Vorderklauen unabhängig vom Bodenmaterial härter waren als die Hinterklauen. Sie stellten einen Einfluss der Feuchtigkeit der verschiedenen Bodenvarianten auf die Klauenhornhärte fest. Tiere mit trockeneren Klauen hatten auch härtere Klauen.

RUSSKE (2001) überprüfte die Klauenhornhärte (Shore-D-Härte) von Jungrindern an der Dorsalwand und berichtet von Spannweiten der Klauenhornhärte an den Vorderklauen von 68,22 bis 77,85 °SD und an den Hinterklauen von 65,91 bis 74,40 °SD. Die Vorderklauen waren um durchschnittlich 5 °SD härter als die Hinterklauen.

SAMEL (2005) erhob Daten zur Shore-D-Härte des Klauenhorns im Rahmen einer Vergleichsuntersuchung der Klauenwachstumsparameter und der Klauengesundheit zwischen Milchkühen, die in Ställen mit Betonlaufflächen und gummibeschichteten Laufflächen gehalten wurden. Auf Betonboden ergaben die Messungen an der Sohle $59,2 \pm 0,9$ °SD, an der Seitenwand $67,3 \pm 0,9$ °SD und an der Dorsalwand $66,9 \pm 1,1$ °SD. Auf gummibeschichteten Laufflächen konnten an der Sohle $53,8 \pm 1,1$ °SD, an der Seitenwand $63,8 \pm 1,2$ °SD und an der Dorsalwand $66,2 \pm 1,3$ °SD festgestellt werden. Im Stall mit den gummibeschichteten Laufflächen hatten die Kühe in allen Messpositionen eine teils tendenziell, teils signifikant geringere Klauenhornhärte. Es wurden allerdings keine Untersuchungen hinsichtlich Härteunterschiede der einzelnen Messpositionen oder zwischen vorderen und hinteren Gliedmaßen durchgeführt.

Die unterschiedlich hohen Standardabweichungen bzw. Spannweiten der Klauenhornhärtemessungen bei den verschiedenen Autoren lassen sich durch die unterschiedliche Lokalisation und Anzahl der Messpunkte an den Klauen, den unterschiedlichen Stichprobenumfang sowie unterschiedliche Altersgruppen und Rassen erklären.

2.2 Interaktionen zwischen Laufflächen und Klauen sowie deren Bedeutung für Klauenleiden

Die folgenden Abschnitte beleuchten die Wechselwirkungen und Abläufe im System Klaue – Zwischenmedium – Boden. Hierbei ist insbesondere der unmittelbare Kontaktbereich zwischen Klaue und Boden von entscheidender Bedeutung. Erstmals wird das in der Blechumformung zur Beschreibung lokaler Reibungsphänomene bei Mischreibung entwickelte „mechanisch-rheologische Modell“ auf das System Klaue – Zwischenmedium – Boden übertragen. Auf diesem Wege sollen die theoretischen Kenntnisse über die Wirkmechanismen zwischen Klaue und Boden sowie die Bedeutung der Oberflächenrauheit und der geometrischen Oberflächeneigenschaften von Laufflächen auf die Reibung und letztendlich die Rutschfestigkeit erweitert werden.

2.2.1 Auswirkung verschiedener Oberflächentexturen von Laufflächen auf die Klaue und die Reibungskomponenten beim Rindergang

Die Rutschfestigkeit von Laufflächen ist eine der wichtigsten Anforderungen an Laufflächen aus Sicht des Tieres (vgl. Abschnitt 2.3.1). Grundsätzlich hat die Oberflächenrauheit bei harten Laufflächen einen maßgeblichen Einfluss auf die Rutschfestigkeit und es gilt prinzipiell, je höher die Rauheit, desto besser die Rutschfestigkeit (vgl. Abschnitt 2.3.2).

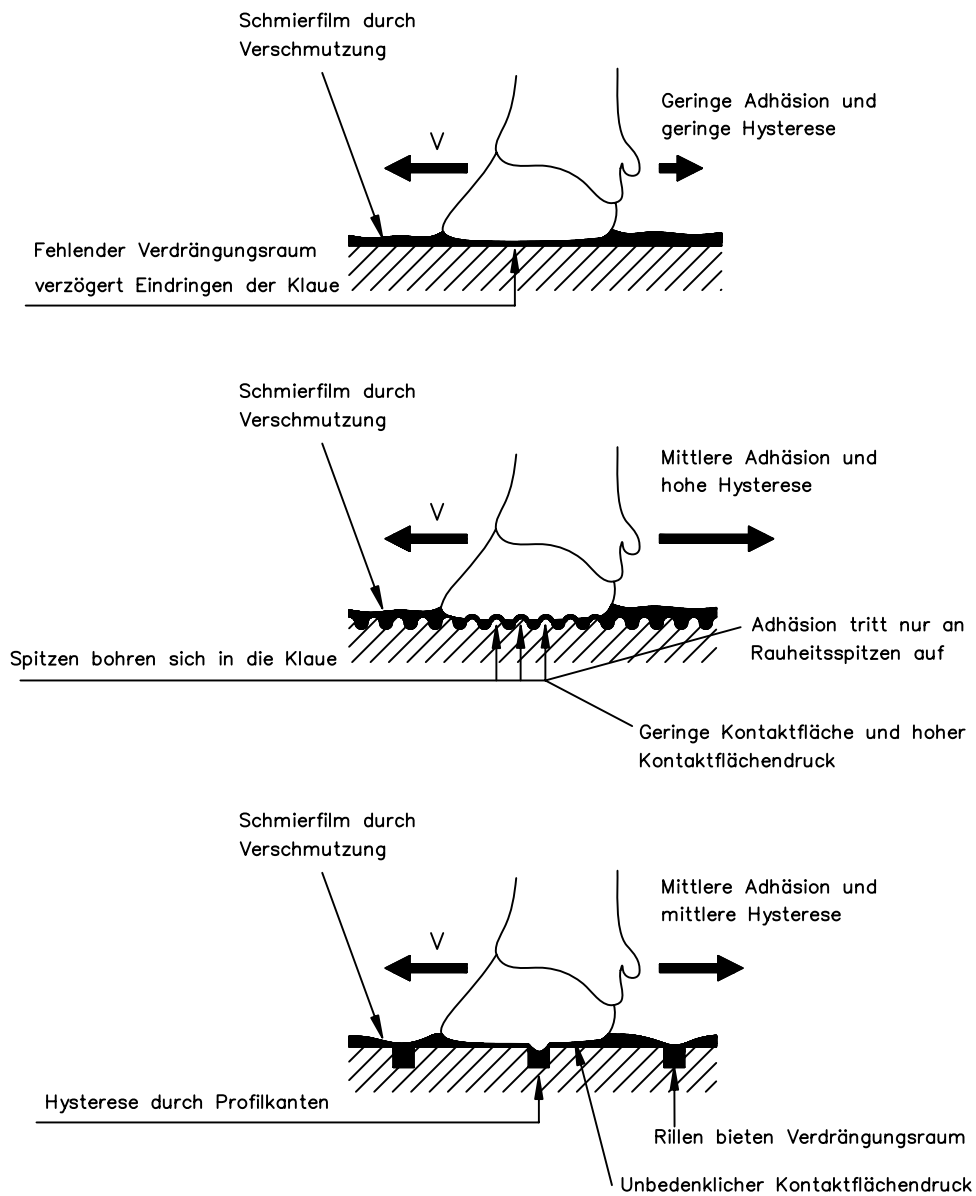
Die Rutschfestigkeit von Laufflächen ist ein komplexer Parameter und abhängig von vielen Rahmenbedingungen und Messgrößen wie beispielsweise Oberflächenrauheit, Gefälle, Verschmutzungsgrad und rheologische Eigenschaften der Verschmutzung, Entmistungsmethode sowie Entmistungshäufigkeit und -art (DE BELIE und ROMBEAUT, 2003). Für ein gleitsicheres Gehen auf den Laufflächen sorgen Reibungskräfte. Diese entstehen, wenn zwei feste Körper aufeinander lateral verschoben werden. Befindet sich ein Schmiermedium zwischen diesen beiden Körpern, so wird von einem Zustand der Mischreibung gesprochen (KRAGELSKI et al., 1983; CZICHOS und HABIG, 2003). Diese Verhältnisse sind auch beim Kontakt zwischen Klaue und Boden auf verschmutzten Laufflächen anzutreffen. Die Eigenschaften von Klauenhorn sind vergleichbar mit denen eines Elastomers (MCKEE und DUMELow, 1995) und haben demnach viskoelastische Eigenschaften (FRANCK et al., 2006) ähnlich wie Autoreifen, Schuhsohlen oder einige Fußböden z. B. in Sporthallen o. ä.. Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Klauenhorns lassen sich Parallelen zum Bereich der Arbeitssicherheit und dem System Boden – Zwischenmedium – Arbeitsschuh bzw. dem Straßenverkehrswesen und dem System Autoreifen – Zwischenmedium – Fahrbahn ziehen.

Elastomere sind weder als Festkörper noch als Flüssigkeiten einzuordnen, sondern besitzen Merkmale beider Materialklassen. Unter viskoelastischem Verhalten wird ein Vorgang verstanden, der elastische und viskose Anteile bei der Verformung eines Körpers beinhaltet, wobei sich die beiden Verhaltensanteile überlagern (KUMMER, 1966; GEYER, 1971; WIEDER, 1988). Die mechanischen Eigenschaften viskoelastischer Stoffe werden durch die Beweglichkeit der Atome und Moleküle untereinander bestimmt, wobei diese wiederum temperaturabhängig ist. Hieraus resultiert ein mechanisches Verhalten,

das sich näherungsweise aus zwei Komponenten zusammensetzt, nämlich den Eigenschaften einer Feder (Elastizität) und denen eines Dämpfers (Viskosität).

Gleitet ein Elastomer in einer Relativbewegung über eine raue Oberfläche, tritt eine Gesamtreibkraft auf, die sich aus den Reibkraftkomponenten Adhäsion und Hysterese zusammensetzt (KUMMER, 1966). Die Adhäsionskomponente entsteht durch die Bildung und das Wiederaufbrechen von adhäsiven Verbindungen an den Kontaktstellen. Diese entstehen durch Anziehungskräfte auf atomarer Ebene (Van-der-Waals-Kräfte). Die Adhäsion ist abhängig von der zwischen den Berührungsflächen wirkenden Scherspannung und der wahren Kontaktfläche (KRAGELSKI, 1983; SKIBA et al., 1987; WIEDER, 1988; SCHRAMM, 2002; CZICHOS und HABIG, 2003). Die Hysteresereibkraftkomponente entsteht durch Energiedissipation als Folge zyklischer Deformationen des weichen viskoelastischen Elastomers durch die Oberflächenrauheiten des härteren Untergrundes (KUMMER, 1966). Bei der Verformung erfolgt eine reversible Speicherung der Bewegungsenergie durch die „Feder“, die durch den „Dämpfer“ aufgrund innerer Reibung irreversibel in Wärme umgewandelt wird. Dadurch ist die für die Deformation erforderliche Energie zur Überwindung der Oberflächenrauheiten des härteren Reibpartners größer als die bei anschließender Wiederentspannung frei werdende Energie. Der hierbei entstehende Energieverlust wird als Dämpfungsverlust bzw. Hystereseverlust bezeichnet (KUMMER, 1966). Aus diesem Verhalten ergibt sich das Kraft-Weg-Verhalten von Feder und Dämpfer, das dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Elastizität und Viskosität entspricht. Dieses Verhalten ist eine materialspezifische Eigenschaft, die für die Deformationskomponente der Gesamtreibkraft von entscheidender Bedeutung ist. Die Höhe der Deformationsreibkraft wird wiederum durch den Grad der Viskoelastizität der Reibpartner, die auf die Reibpartner einwirkende Kraft und die Rauheit der Fläche bestimmt, auf der sich ein viskoelastischer Körper bewegt. Die Rauheit einer Fläche ist wiederum von der Größe, der Form und der Verteilungsdichte der Rauheitsspitzen abhängig (KUMMER, 1966). WALLMANN und ALSTRÖM (2001) sowie SCHRAMM (2002) nennen als wesentliche Einflussfaktoren bei der Mischreibung und der Höhe der auftretenden Gesamtreibkraft im System Autoreifen – Zwischenmedium – Fahrbahn die Materialeigenschaft des Elastomers, die Oberflächenrauheiten des Reibpartners, auf dem der Elastomer gleitet sowie Viskosität und die Oberflächenspannung des Zwischen- oder Schmiermediums. Vergleichbares findet sich in der einschlägigen Literatur zur Arbeitssicherheit (u. a. WIEDER, 1988). Außerdem spielen Gleitgeschwindigkeit, Belastung bzw. Druck und Temperatur eine große Rolle. Ein kritischer Einflussfaktor ist laut SCHRAMM (2002) die wahre Kontaktfläche zwischen Elastomer und Reibpartner, da sich diese nur schwierig experimentell erfassen lässt. Einen Ansatz zur Erfassung der Kontaktflächen und der auftretenden lokalen Drücke zwischen Klaue und Bodenrauheiten lieferten DE BELIE und ROMBAUT (2003) (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Je nach Belagsmaterial, Zustand und Alter sowie dem Entmistungsmanagement der Laufflächen können verschiedene Oberflächenverhältnisse auftreten, denen die Kuh während ihrer Bewegung ausgesetzt ist. Diese genannten Faktoren wirken sich insbesondere auf die Rutschfestigkeit und somit unmittelbar auf das Tierverhalten aus. Die unterschiedlichen Oberflächenverhältnisse sind vereinfacht in Abb. 1 dargestellt.



(Quelle: geändert nach MCKEE und DUMELow, 1995)

Abb. 1: Auswirkungen der Oberflächentexturen auf die Reibungskomponenten im System Klaue – Zwischenmedium – Boden

Abb. 1 oben zeigt schematisch einen glatten, verschmutzten Bodenbelag, auf dem sich eine Klaue während des Gehens mit einer horizontalen Geschwindigkeit v bewegt. Die Erkenntnisse von KUMMER (1966), STARNDBERG (1985), SCHRAMM (2002) und CHANG (2004) für die Systeme Arbeitsschuh – Zwischenmedium – Boden bzw. Reifen – Zwischenmedium – Fahrbahn werden im Folgenden auf das System Klaue – Zwischenmedium – Lauffläche übertragen: Die glatte Lauffläche verfügt aufgrund mangelnder Oberflächenrauheit nicht über einen genügenden Verdrängungsraum für die Verschmutzungsaufgabe. Hierdurch wird das Eindringen der Rauheitsspitzen des Bodens in die Klaue

verzögert oder ganz verhindert, wodurch die Reibkraftkomponenten Adhäsion – durch geringen direkten Klaue-Boden Kontakt (ohne Schmierfilm) und Hysterese – infolge geringer Penetration des Klauenhorns durch herausstehende Spitzen herabgesetzt werden oder nicht zur Ausbildung kommen. Denn kleine Rauheitsspitzen sind nicht in der Lage, den Verschmutzungsfilm zu durchstoßen. Auch WIEDER (1988) kam bei seinen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass auf glatten Belägen je nach Zwischenmedium eine vollständige Trennung der Reibpartner erfolgt, was wiederum zu einer Verringerung der Rutschfestigkeit führt und zwar umso mehr, je kleiner die Rauheitsspitzen sind und je viskoser das Zwischenmedium ist. Darüber hinaus berichtet SCHRAMM (2002), dass sich bei größerer Gleitgeschwindigkeit die Eindringtiefe der Oberflächenrauheiten verringert und dadurch die wahre Kontaktfläche zwischen den Reibpartnern geringer wird. Dies führt ebenfalls zu weniger adhäsiven Verbindungen und geringerer Hysterese des Klauenhorns. Infolge dessen ist die Gesamtreibkraft stark verringert.

In Abb. 1 mittig ist der selbe Sachverhalt für eine rutschfeste aber sehr raue Oberfläche dargestellt. Die große Oberflächenrauheit mit entsprechenden Verdrängungsräumen erlaubt ein schnelles Durchdringen des Schmierfilms, wobei die ausgeprägten Spitzen in die Klaue eindringen und durch die hohe Hysteresekomponente eine gute Rutschfestigkeit bieten. Sie macht den Hauptanteil der auftretenden Reibkraft aus, denn durch die geringe Kontaktfläche der verschmutzungsfreien Spitzen kommen nur geringe Adhäsionskräfte zur Ausprägung (STARNDBERG, 1985; WIEDER, 1988).

Als akzeptable Lösung bezeichnen MCKEE und DUMELow (1995) das Einbringen von Profilierungen in die Laufflächen. So wird eine ausgeglichene Zusammensetzung der Reibkraftkomponenten gewährleistet. Rillen stellen durch ausreichenden Verdrängungsraum ein schnelles Durchdringen des Schmutzfils sicher, wodurch sich dann Adhäsionskräfte an den Kontaktstellen ausbilden können. Gleichzeitig wird durch die Rillen ein Eindringen der Klaue in die Rillen und die Ausbildung der Hysteresekomponente erreicht (Abb. 1 unten).

In Abb. 1 mittig ist eine aufgrund ihrer großen Oberflächenrauheit sehr rutschfeste Lauffläche dargestellt. Derartige Laufflächen können infolge ihrer hohen Rauheit zu Klauenproblemen führen (vgl. Abschnitte 2.1.1 und 2.3.2). Denn die Flächen werden mit zunehmender Rauheit abrasiver und der Klauenhornabrieb kann zu groß werden, sodass Klauenverletzungen auftreten können. Die Rauheit der Laufflächen ist von der Größe und der Form der verwendeten Ausgangsminerale abhängig (vgl. Abschnitt 2.3.2). Des Weiteren führt eine zu hohe Rauheit zu hohen lokalen Punktbelastungen an den Klauen und damit zu Überbelastungen an verschiedenen Klauenbereichen während des Stehens oder Gehens, da sich das auf einer Klaue lastende Gewicht auf eine sehr geringe Spitzenfläche des Bodens verteilt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Durch diese Überbelastungen kann es ebenfalls zu Klauenschäden kommen. Hiervon sind insbesondere die hinteren Lateralklauen betroffen (PETERSE, 1987; VAN DER TOL et al., 2003; VAN AMSTEL et al., 2004). Aus den Arbeiten und Veröffentlichungen von PETERSE (1987), HERRMANN (1997), ZÖSCHER (2000), VAN DER TOL et al. (2002), VAN DER TOL et al. (2003) und VAN AMSTEL et al. (2004) geht hervor, dass die Klauen an den Hintergliedmaßen generell

anfälliger gegenüber Klauenkrankheiten sind als die Vorderklauen. Zusammenfassend ist also ein Kompromiss zwischen einer Oberflächenrauheit zu finden, die den Tieren ein gleitsicheres Gehen ermöglicht, dabei aber möglichst klauenschonend ist.

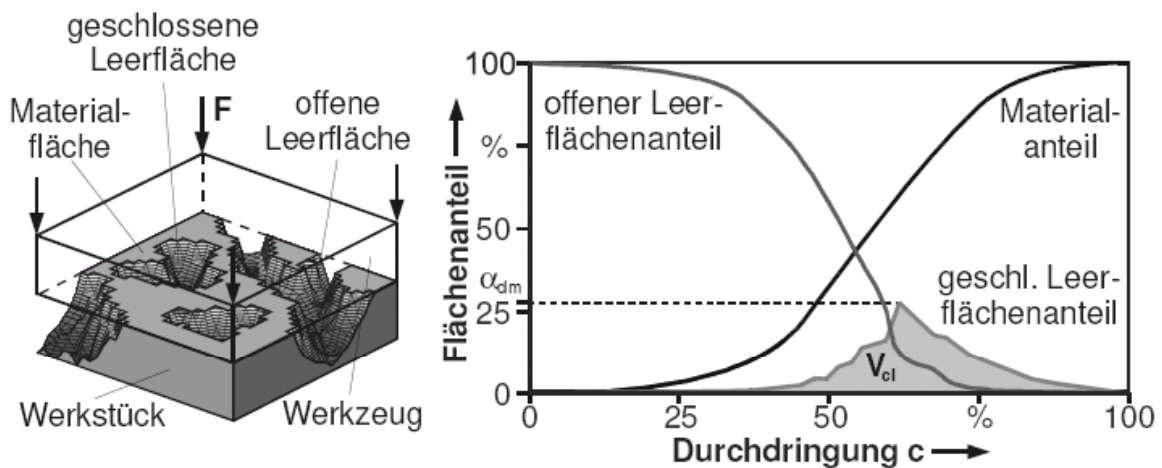
2.2.2 Das mechanisch-rheologische Modell aus der Blechumformung und dessen Übertragung auf den Gang des Rindes auf harten Laufflächen

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Wirkmechanismen und Interaktionen im System Klaue – Zwischenmedium – Boden lassen sich prinzipiell durch ein Modell zur Beschreibung der Mechanik der Mischreibung in der Wirkfuge umformtechnischer Prozesse erweitern. Es handelt sich hierbei um das sogenannte mechanisch-rheologische Modell, das sich den bei der Metallverarbeitung auftretenden Mischreibungsphänomenen zwischen Blechen, Schmierstoff und Werkzeug von einer phänomenologischen, funktionellen Betrachtungsweise nähert. Begründer dieses Modells ist SOBIS (1996). Daraufhin folgten weitere grundlegende Arbeiten von WAGNER (1996), PESTORF (1997) und STAEVES (1998), die auf Basis dieses Ansatzes durch Tiefziehversuche und dreidimensionale Erfassung von Blechoberflächen neue Kenngrößen zur Quantifizierung der im Hinblick auf eine niedrige Reibung bei der Umformung erwünschten Blecheigenschaften ableiteten. Dies war aus der Sicht von SOBIS (1996), WAGNER (1996) und PESTORF (1997) notwendig, da die konventionellen, genormten Kenngrößen nur bedingt zur Beschreibung und Quantifizierung der funktionalen Zusammenhänge hinsichtlich der tribologischen Eigenschaften von Blechen in Umformprozessen geeignet sind und teilweise falsche Aussagen liefern. Weiterhin wurde von STAEVES (1998) eine Systematik zur Beschreibung charakteristischer geometrischer Oberflächenmerkmale der qualitätsbeeinflussenden Blecheigenschaften sowie Kenngrößen zu deren Quantifizierung vorgeschlagen (vgl. Abschnitte 2.5.3 und 2.5.4).

Ausgangsproblem zur Erarbeitung dieses Modells war eine unzureichende Beschreibung bzw. nur bedingte Gültigkeit der lokalen Reibung durch die Coulomb'sche Gleichung (SOBIS, 1996; WAGNER, 1996). Ein wichtiger Kritikpunkt hieran war die Betrachtung der Reibzahl als konstanten Wert, der die von Ort zu Ort unterschiedlichen Reibkräfte in der ganzen Kontaktfläche der Reibpartner mittelt. Dies widerspricht laut SOBIS (1996) der Tatsache, dass die Reibzahl eine lokale und ortsabhängige Größe ist. Zum anderen könnten, so der Autor, anhand der Coulomb'schen Gleichung keine theoretischen Vorhersagen der auftretenden Reibung gemacht werden.

Der grundlegende Reibungszustand bei umformtechnischen Prozessen und der Metallbearbeitung ist die Mischreibung, bei der sowohl die Oberflächen der beiden Reibkörper als auch der Schmierstoff dazwischen eine wichtige Rolle spielen (KRAGELSKI, 1983; CZICHOS und HABIG, 2003). Hierbei sind zwei Kontaktmechanismen bei der Kraftübertragung von herausragender Bedeutung, nämlich der Festkörperkontakt und der Flüssigkeitskontakt. Das mechanisch-rheologische Modell beruht auf der funktionellen, differenzierten Betrachtung der Kraftübertragung vom Werkzeug auf das Werkstück und den hieraus resultierenden, lokal unterschiedlichen Kräfte- und Schmierungsverhältnissen unter-

schiedlicher Teilflächen in der Wirkfuge. Hieraus ergeben sich auch lokal unterschiedliche Reibungsverhältnisse. Infolge dessen sind die geometrischen Topografieeigenschaften von Blechen, die zu bestimmten Teilen verarbeitet werden sollen, von entscheidender Bedeutung für die auftretenden Reibungsverhältnisse und das Umformergebnis (WAGNER, 1996; PESTORF, 1997; STAEVES, 1998). Abb. 2 links illustriert die Aufteilung eines Werkstücks in funktionale Flächenbereiche.



(Quelle: NEUDECKER et al., 2001)

Abb. 2: Mechanisch-rheologisches Modell und Flächenanteile

Nach dem mechanisch-rheologischen Modell wird die Kontaktkraft bei der Blechumformung über Festkörper- und Flüssigkeitskontakt übertragen. Differenzierter betrachtet, geschieht dies beim Festkörperkontakt über die Materialflächen und beim Flüssigkeitskontakt über offene Leerflächen (dynamische Schmieraschen) sowie geschlossene Leerflächen (statische Schmieraschen) (SOBIS, 1996). Drückt der Stempel des Werkzeugs auf die Blechoberfläche, kann der in den geschlossenen Leerflächen befindliche Schmierstoff nicht aus der Wirkfuge gedrückt werden, da diese nach allen Seiten begrenzt sind (Abb. 2 links). Hierdurch bildet sich ein hydrostatischer Druck im Schmierstoff aus, der einen Teil der Kontaktkraft zusätzlich zum Festkörperkontakt auf das Werkstück überträgt. Ein weiterer Teil kann über die offenen Leerflächen übertragen werden, aus denen der Schmierstoff unter dem Stempeldruck seitlich entweichen kann, da diese Flächen an mindestens einer Seite offen sind (Abb. 2 links). Hierfür muss allerdings kontinuierlich Schmierstoff zugeführt werden und es muss eine hohe Gleitgeschwindigkeit erreicht werden, damit sich ein hydrodynamischer Druck ausbilden kann (SOBIS, 1996). Das tribologische Verhalten der Bleche wird von der Höhe des Anteils der Materialflächen sowie der geschlossenen und offenen Leerflächen in der Kontaktzone bestimmt (NEUDECKER et al., 2001).

Grundlage der Ermittlung der funktionalen, dreidimensionalen Kenngrößen zur Beschreibung der Blechoberflächen ist die Bestimmung von Schnittflächenanteilen und Schnittflächenbildern. Senkrechte Schnitte liefern die bekannten Rauheitsprofile, die den konventionellen, genormten Kenngrößen zu Grunde liegen. Bedeutender für die dreidimensionale

Beschreibung der Flächen sind jedoch horizontale, zur Mittelebene parallele, äquidistante Schnitte vom höchsten bis zum tiefsten Punkt der Topografie (Äquidistanzschnitte) (WAGNER, 1996; PESTORF, 1997). Hierbei wird der Abstand der Schnittebene zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie als Durchdringung bezeichnet.

Die Darstellung der verschiedenen Flächenanteile zur Charakterisierung der Bleche erfolgt in Abhängigkeit von der Durchdringung (Abbott-Kurve bzw. Materialanteilkurve). An dieser Stelle sei weiterführend auf die DIN EN ISO 13565-2 - Darstellung der Materialanteilkurve, verwiesen. Am höchsten Punkt der Topografie (Durchdringung = 0 %) liegen ausschließlich offene Leerflächen vor (Abb. 2 rechts). Daher beträgt ihr Anteil bei dieser Schnitttiefe 100 %. Mit zunehmender Schnitttiefe sinkt der Anteil offener Leerflächen auf 0 % ab. Bei 100 % Durchdringung liegen weder offene noch geschlossene Leerflächen, sondern ausschließlich Materialflächen vor. Geschlossene Leerflächen existieren erst ab einer bestimmten Schnitttiefe und erreichen bei einer für die untersuchte Fläche charakteristischen Durchdringung ein Maximum. Zur Beschreibung des Maximalwertes der geschlossenen Leerflächenanteile wurde die Kenngröße α_{clm} definiert (PESTORF, 1997). In den Arbeiten von SOBIS (1996) und WAGNER (1996) sind synonyme Kenngrößen zu finden. Durch Integration der Kurve der geschlossenen Leerflächenanteile über die Durchdringung erfolgt die Ermittlung des geschlossenen Leervolumens V_{cl} . Diese beiden Kenngrößen sind die beiden vielversprechendsten dreidimensionalen Kenngrößen zur Beschreibung der tribologischen Eigenschaften von Blechen (PESTORF, 1997; POPP et al., 1999).

Die modellhaft beschriebenen Wirkmechanismen für die Kraftübertragung und die Kontaktbedingungen während des Umformvorgangs können größtenteils auch auf die Kontaktbedingungen zwischen Klaue und Boden übertragen werden. Hierfür sprechen einige Argumente: Beim Gang des Rindes auf Laufflächen sind ebenfalls zwei Reibpartner (Klaue und Boden) und ein Zwischenmedium (Verschmutzungen aus Kot, Harn, Einstreu- und Futterresten) involviert. Die Ausgangsbedingungen sind prinzipiell ähnlich. Sowohl bei der Umformung als auch beim Rindergang auf Laufflächen handelt es sich um einen Zustand der Mischreibung. Wie in Abschnitt 2.2.1 dargelegt wurde, spielen die Oberflächenrauheit der Reibpartner und das Zwischenmedium eine zentrale Rolle für gleitsicheres Gehen sowohl beim Menschen als auch beim Tier. Grundgedanke bei der Übertragung des mechanisch-rheologischen Modells auf die Kontaktbedingungen beim Rindergang ist, dass die Oberflächen der Klaue und insbesondere die der Böden entscheidend die Reibungsbedingungen in der Kontaktzone und somit die Rutschfestigkeit einer Lauffläche beeinflussen. Auch Laufflächen sind mikroskopisch und sogar makroskopisch betrachtet, Kraterlandschaften mit Material- und Leerflächen, sodass sich aus einer dreidimensionalen Oberflächenerfassung ebenfalls entsprechende dreidimensionale Oberflächenkenngrößen berechnen lassen. Im Gegensatz zur Umform- und Metallverarbeitungstechnik, in der unter günstigen Reibungsbedingungen eine möglichst niedrige Reibzahl verstanden wird (KRAGELSKI, 1983; SOBIS, 1996; WAGNER, 1996; PESTORF, 1997; STAEVES, 1998; CZICHOS und HABIG, 2003), zeichnen sich rutschfeste Laufflächen durch eine hohe Reibzahl aus (u. a. BÄHR und TÜRPIZ, 1976; WEBER, 1985; BOCKISCH, 1991).

Aus Abschnitt 2.1.1 geht hervor, dass die Kontaktkraft beim Gang des Rindes möglichst über eine große Materialfläche übertragen werden sollte, um hohe Punktbelastungen auf die Klaue zu vermeiden. Auf verschmutzten Stallböden liegt ein Zustand der Mischreibung vor, sodass die Kontaktkraft über die Traganteile Materialfläche, offene und geschlossene Leerflächen übertragen wird. Da das Klauenhorn viskoelastische Eigenschaften aufweist (FRANCK et al. 2006), können die Spitzen der Bodenoberfläche in sie eindringen. In diesem Zustand kann aus den offenen Leerflächen der auf den Laufflächen befindliche Schmierfilm aus Kot, Harn, Einstreu- und Futterresten unter dem Gewicht der Kuh zur Seite entweichen. Bei geschlossenen Leerflächen ist dies nicht der Fall, so dass sich in diesen Flächen hydrostatische Drücke aufbauen können, welche die Reibpartner Klaue und Boden durch das Zwischenmedium trennen und dadurch zum Ausgleiten führen können. Hohe Geschwindigkeiten sind beim Ausgleiten ebenfalls gegeben, sodass auch hydrodynamische Effekte die Reibzahl und damit den Rutschwiderstand senken.

2.3 Anforderungen an Laufflächen sowie technische Parameter für ihre Charakterisierung

In diesem Abschnitt sollen die vielfältigen Anforderungen, die an Laufflächen aus tierischer und aus verfahrenstechnischer Sicht zu stellen sind, aufgezeigt werden. Außerdem werden die für Laufflächen wichtigen technischen Eigenschaften, deren Bedeutung für tierische und verfahrenstechnische Gesichtspunkte entsprechend dem bisherigen Stand des Wissens beschrieben und deren Erfassungsmethoden dargelegt.

2.3.1 Anforderungen an Laufflächen aus tierischer und verfahrenstechnischer Sicht

Laufflächen sind dasjenige Bauelement eines Stalls, mit dem die Tiere einen Großteil des Tages am dichtesten in Kontakt stehen (CIGR, 2002). In der Literatur besteht Konsens darüber, dass sich ihre Eigenschaften, Beschaffenheit und Bewirtschaftung unmittelbar oder mittelbar auf die Tiergesundheit, insbesondere die Klauengesundheit, die Leistungen der Tiere und damit auf die Wirtschaftlichkeit der Milchviehhaltung auswirken (vgl. Abschnitt 1). Laufflächen müssen eine Fülle von Anforderungen sowohl aus tierischer als auch aus verfahrenstechnischer Sicht erfüllen. Denn sie dienen als Bewegungs-, Steh- und Liegeflächen, Verkehrsflächen für Personen und Maschinen, Ableitung und Lagerung von Kot, Harn, Futter- und Einstreuresten (u. a. RICHTER, 1997; RICHTER, 2001). Eine gleichzeitige Erfüllung aller Anforderungen ist nicht möglich. Daher ist die Wahl und die Entscheidung für eine bestimmte Art von Laufflächen immer eine betriebsindividuelle Kompromisslösung und von den Prioritäten des Betriebsleiters abhängig (WEBER, 1985; HERRMANN, 1997; CIGR, 2002; BARTUSSEK und OFNER, 2003). Tab. 1 und Tab. 2 geben einen Überblick über die wichtigsten gestellten Anforderungen an Laufflächen aus tierischer und verfahrenstechnischer Sicht in der Literatur.

Tab. 1: Anforderungen an Laufflächen aus tierischer Sicht

Anforderung	Literaturquelle
Trittfestigkeit bzw. Rutschfestigkeit	OBER und KIESL (1970), BÄHR und TÜRPIITZ (1976), TGL 32456, WEBER (1985), ALBUTT und DUMELOW (1987), NILSSON (1988), DIN 18908, HERRMANN (1997), RICHTER (1997), ZEEB und UNGER (1997), WANDEL (1999), GOOCH (2000), RICHTER (2001), HERRMANN und MÜLLER (2001), CIGR (2002), JULI et al. (2002), STEINER und VAN CAENEGEM (2003), RUSHEN et al. (2004)
Vermeidung von Verletzungen und Klauenleiden bzw. -beschädigungen	OBER und KIESL (1970), WEBER (1985), NILSSON (1988), HERRMANN (1997), HERRMANN und MÜLLER (2001), CIGR (2002), STEINER und VAN CAENEGEM (2003)
Ebenheit	DIN 18908, DIN 18202, RICHTER (1997), RICHTER (2001), HERRMANN und MÜLLER (2001), DIN EN 12737, STEINER und VAN CAENEGEM (2003)
Drainierbarkeit bzw. Trockenheit	OBER und KIESL (1970), HERRMANN (1997), WANDEL (1999), GOOCH (2000), HERRMANN und MÜLLER (2001), CIGR (2002), STEINER und VAN CAENEGEM (2003), BORDERAS et al. (2004), RUSHEN et al. (2004)
Thermoregulation	OBER und KIESL (1970), WEBER (1985), NILSSON (1988), RICHTER (1997), RICHTER (2001), CIGR (2002)
Vermeidung von Sozialstress	NILSSON (1988), RICHTER (1997), RICHTER (2001)
Sicherstellung von „gesundem“ Klauenabrieb	WEBER (1985), NILSSON (1988), HERRMANN (1997), ZEEB und UNGER (1997), HERRMANN und MÜLLER (2001), CIGR (2002)
Ungiftigkeit für Tiere	OBER und KIESL (1970), TGL 32456, NILSSON (1988), WANDEL (1999), CIGR (2002), JULI et al. (2002)
Weichheit	NILSSON (1988), BENZ (2002), STEINER und VAN CAENEGEM (2003), RUSHEN et al. (2004), BENDEL (2005)

Tab. 2: Anforderungen an Laufflächen aus verfahrenstechnischer Sicht

Anforderung	Literaturquelle
Mechanische und chemische Belastbarkeit durch Tiere und Arbeitsgeräte	OBER und KIESL (1970), TGL 32456, DIN 18908, RICHTER (1997), WANDEL (1999), RICHTER (2001), CIGR (2002), JULI et al. (2002), DIN EN 12737
Arbeitswirtschaftliche, kostengünstige Bewirtschaftung	WEBER (1985), RICHTER (1997), RICHTER (2001)
Flüssigkeitsundurchlässigkeit	OBER und KIESL (1970), TGL 32456, HERRMANN (1997), RICHTER (1997), ZEEB und UNGER (1997), WANDEL (1999), RICHTER (2001)
Einfache Reinigung und Desinfektion	WEBER (1985), NILSSON (1988), DIN 18908, ALBUTT und DUMELOW (1987), HERRMANN (1997), RICHTER (1997), ZEEB und UNGER (1997), WANDEL (1999), HERRMANN und MÜLLER (2001), RICHTER (2001), CIGR (2002), STEINER und VAN CAENEGEM (2003)
Haltbarkeit	OBER und KIESL (1970), TGL 32456, WEBER (1985), NILSSON (1988), ALBUTT und DUMELOW (1987), HERRMANN (1997), RICHTER (1997), ZEEB und UNGER (1997), GOOCH (2000), HERRMANN und MÜLLER (2001), RICHTER (2001), CIGR (2002), STEINER und VAN CAENEGEM (2003), DIN EN 12737
Niedrige Anschaffungskosten	ALBUTT und DUMELOW (1987), HERRMANN (1997), HERRMANN und MÜLLER (2001), STEINER und VAN CAENEGEM (2003)
Einfache Einbringung	ALBUTT und DUMELOW (1987), HERRMANN (1997), HERRMANN und MÜLLER (2001)

2.3.2 Begriffe und technische Kenngrößen zur Beschreibung von Laufflächen und ihre Bedeutung für die gestellten Anforderungen

Viele der Begrifflichkeiten und Messgrößen stammen aus dem Straßenbau, dem Verkehrswesen, der Bau- und Werkstoffkunde sowie der Arbeitssicherheit, sind in entsprechenden Normen definiert und die Methoden ihrer Erfassung exakt festgelegt. Obwohl ein Großteil der Normen und der hierin festgelegten Messgrößen nicht explizit für Anwendungen im landwirtschaftlichen Bereich formuliert sind, werden sie trotzdem, wo es möglich ist, für die Beurteilung von Laufflächen herangezogen.

Die meisten Begriffe beschreiben oder haben im weitesten Sinne Einfluss auf die Sicherheit, mit der sich Individuen, Tiere oder Fahrzeuge auf dem betrachteten Untergrund fortbewegen können. Darüber hinaus beschreiben weitere Kenngrößen material- oder herstellungsbedingte Eigenschaften. Begonnen werden soll in diesem Abschnitt mit den ersteren. Diese sind im weitesten Sinne auch Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Sicherlich gibt es noch eine Vielzahl technischer Kenngrößen und Qualitätsanforderungen, insbesondere aus baulicher Sicht mit entsprechenden Festlegungen in der Normung. In den nachfolgenden Ausführungen sollen jedoch nur solche Begriffe und technische Kenngrößen behandelt werden, die sich auf Klauengesundheit, Verhalten und Rutschfestigkeit auswirken können und daher bezogen auf die Problematik und die Zielsetzung dieser Arbeit von Bedeutung sind.

Oberflächentextur

Der Begriff Oberflächentextur ist in DIN EN ISO 13473-1 für die Charakterisierung von Fahrbahnbelägen definiert. Hier wird unter Textur die Abweichung einer Fahrbahnoberfläche von einer tatsächlichen ebenen Oberfläche mit definierten horizontalen Wellenlängenbereichen verstanden. Diese beschreiben die geometrische Oberflächengestaltung in unterschiedlichen Maßstäben. Nach diesen Wellenlängenbereichen werden Unebenheiten (0,5 m bis 50 m), Mega- (50 mm bis 500 mm), Makro- (0,5 mm bis 50 mm) und Mikrotexturen (< 0,5 mm) unterschieden. In verschiedenen Literaturquellen zu Laufflächen sind diese Definitionen teilweise ebenfalls gebräuchlich, wobei auch synonym zu Textur der Begriff Rauheit verwendet wird. Teilweise sind anstatt Mikro- und Makrorauheit auch die Begriffe Fein- und Grobrauheit gebräuchlich.

Ebenheit

Die Ebenheit von Laufflächen in Längs- und Querrichtung hat eine unterschiedliche Bedeutung für planbefestigte und perforierte Laufflächen. Die Reinigungseffizienz stationärer oder mobiler Entmistungstechnik und der dauerhafte Sauberkeitszustand hängen entscheidend von der Ebenheit ab und haben damit einen indirekten Einfluss auf die Klauengesundheit. Mechanische Klauenverletzungen hingegen sind direkte Folgen von uneben verlegten Spaltenböden. Anforderungen und Toleranzen für planbefestigte Laufflächen sind in DIN 18202 und für Spaltenboden in DIN 18908 bzw. in DIN EN 12737 festgelegt.

Die Standardüberprüfung der Ebenheit erfolgt entsprechend DIN EN 13036-7 und DIN 18202 mit der Richtlatte.

Rauheit

Im Bereich der Megarauheit liegen laut DIN EN ISO 13473-1 Texturwellenlängen von 50 mm bis 500 mm. Die maximalen Höhendifferenzen variieren üblicherweise im Bereich von 0,1 mm bis 50 mm. Hierunter fallen Profilierungen, die entweder während der Erstellung der Laufflächen mit unterschiedlichen Hilfsmitteln in das noch weiche Material eingedrückt oder im gehärteten Zustand eingefräst werden. In diesem Zusammenhang sind die verschiedensten geometrischen Muster oder auch gefräste Rillen mit einer Steg- und Rillenweite, die den Funktionsmaßen von perforierten Laufflächen ähneln, zu nennen.

In verschiedenen Literaturquellen wie beispielsweise bei RICHTER (2001), PAHLKE (2001) oder STEINER und VAN CAENEGEM (2003) werden solche Profilierungen zum Bereich der Makrorauheit gezählt. PAHLKE (2001) sowie STEINER und VAN CAENEGEM (2003) verstehen unter Makrorauheit „horizontale Ausdehnungen von $> 0,5$ mm bis ca. 10 mm“. Dies entspricht jedoch nicht der Texturbereichsdefinition laut DIN EN ISO 13473-1. Ferner weisen die beschriebenen Profilierungen teilweise horizontale Ausdehnungen von deutlich über 100 mm auf (z. B. bei Rautenmustern oder gefrästen Rillen), sodass bei dieser Definition nur die vertikale Ausdehnung, also die Profilierungstiefe, gemeint sein kann. Es ist richtig, dass im Bereich der Makrotextur laut DIN EN ISO 13473-1 durch Korngrößen und Kornzwischenräume bzw. durch mechanische Einwirkung Spitzetal Werte von 0,1 mm bis 20 mm auftreten können. Da sich die Definitionen der Norm allerdings ausschließlich auf horizontale Wellenlängenbereiche beziehen, ist die Verwendung des Begriffes Makrorauheit (< 50 mm horizontale Ausdehnung) für die Zuordnung der Profilierungen in diesem Zusammenhang also nicht korrekt.

Die Makrorauheit ist eine entscheidende Kenngröße für die sichere Fortbewegung der Tiere auf einer Lauffläche. Sie stellt vor allem bei Nässe und Verschmutzung eine kraftschlüssige Reibungsverbindung zwischen Klaue und Boden sicher (RICHTER, 2001; CIGR, 2002; STEINER und VAN CAENEGEM, 2003). Ähnlich wie bei Fahrbahnen und Fahrzeugreifen müssen Laufflächen eine gewisse Makrorauheit aufweisen, um einen Verdrängungsraum für vorhandene Flüssigkeiten beim Aufsetzen der Klauen zu gewährleisten. Ist keine ausreichende Makrorauheit vorhanden, können sich Schmierschichten zwischen diesen beiden Reibungspartnern bilden, welche die für die schadlose Fortbewegung wichtigen Reibungskräfte herabsetzen. Besagte Rauheit ist vom Mischungsverhältnis der Mineralkörner sowie den verwendeten Bindemitteln abhängig und unterstützt den Abfluss von Flüssigkeiten. Damit spielt die Makrorauheit unter anderem auch eine Rolle für die Drainierbarkeit der Flächen. Zusätzlich kann die Makrorauheit durch die Einbringung eines Besen- oder Rechenstrichs erhöht werden. Eine zu hohe Rauheit kann jedoch zu überhöhtem Klauenabrieb und mechanisch bedingten Klauenverletzungen führen (CAMARA, 1970; BÄHR und TÜRPIZ, 1976; MATON, 1987; MURPHY et al, 1987; NILSSON,

1988; CIGR, 2002; DE BELIE und ROMBAUT, 2003; PAHLKE, 2004; SCHNEIDER, 2006).

Auch bei Laufflächen wird entsprechend DIN EN ISO 13473-1 von Mikrorauheit bzw. Mikrot Texturen ab einer horizontalen Wellenlänge von unter 0,5 mm gesprochen. Auftretende Höhendifferenzen können im Bereich von 0,001 mm bis 0,5 mm vorkommen. Hierdurch entsteht ein Kraftschluss zwischen Klaue und Boden unter trockenen und sauberen Verhältnissen. Darum sollte die Mikrot texture so lange wie möglich erhalten bleiben (SCHULZE, 1979; VAN DER SLUIS et al., 2002). Sie wird bestimmt durch Oberflächeneigenschaften wie Schärfe und Rauheit der einzelnen Splitt- und Sandkörner sowie anderer Oberflächenpartikel, die mit der Klaue in Berührung kommen (VAN DER SLUIS et al., 2002). In diesem Zusammenhang sind nach SCHULZE (1979) zwei für die Mikrorauheit entscheidende Schärfegrade der Oberflächen zu unterscheiden: Zum einen die sogenannte „Kantenschärfe“ der Mineralien, die durch Bruchkanten und Ecken entsteht. Sie umfasst typischerweise die Größenordnung der Mineralkörner von über 0,1 mm. Zum anderen die sogenannte „Flächenschärfe“, die bei Abwesenheit von Makrorauheit durch Kornabmessungen von unter 0,1 mm gekennzeichnet ist. Sie wird hauptsächlich von rund polierten Mineralkörnern gebildet. Ebenso wie bei der Makrorauheit sind wiederum Korngröße und Kornverteilung sowie der Bindemittelanteil für die Mikrorauheit entscheidend (FISCHLEIN, 2000; VAN DER SLUIS et al., 2002). Bei der Herstellung der Beläge kann durch Abreiben bei Beton oder Absanden bei Gussasphalt eine entsprechende Oberflächenbeschaffenheit erzeugt werden. Allerdings nimmt die Mikrorauheit, insbesondere bei Laufflächen aus Beton und bei Spaltenboden mit fortschreitender Nutzungsdauer ab (MULITZE, 1989; DE BELIE, 1997a).

Aus der Literatur geht hervor, dass durch ein ausgewogenes Zusammenwirken von Mikro- und Makrorauheit ein erwünschter Klauenhornabrieb erreicht wird, der sich die Waage mit dem Klauenhornwachstum hält.

Griffigkeit

Eine Definition dieses Begriffs findet sich in DIN EN 13036-4. Griffigkeit beschreibt „die Eigenschaft einer befahrenen Oberfläche, welche die relative Bewegung zwischen dem Kontaktbereich des Schuhwerks von Fußgängern oder eines Fahrzeugreifens und der Oberfläche begrenzt.“ Diese Definition lässt sich ohne Einschränkungen auf das System Klaue-Boden übertragen. Die Griffigkeit ist somit der Beitrag einer Lauffläche zum Kraftschluss zwischen Klaue und Boden insbesondere bei Nässe. Sie wird maßgeblich von der Oberflächentextur bestimmt (u. a. WIEDER, 1988; FISCHLEIN, 2000). Über die Berührungsflächen zwischen Klaue und Boden werden Reibungskräfte zur Beschleunigung, Verzögerung und Einhaltung der Gangrichtung übertragen. Die Griffigkeit ist jedoch nicht konstant, sondern ändert sich in Abhängigkeit von Textur, Klima, Nässe bzw. Verschmutzung und deren Einfluss auf das Laufflächenmaterial (VAN DER SLUIS et al., 2002). Laufflächen mit höherer Makrorauheit gewährleisten in nassem und verschmutztem Zustand eine höhere Griffigkeit (MCKEE und DUMELOW, 1995). Da die Griffigkeit von

unterschiedlichen Texturwellenlängen abhängt, kommen je nach Wellenlängenbereich verschiedene Messverfahren zum Einsatz. Sie überlappen teilweise in ihren Einsatz- bzw. Messbereichen oder sind nicht für den gesamten definierten Bereich der Texturwellenlänge geeignet, sodass die Messbereiche nicht zwangsläufig mit den definierten Texturwellenlängen übereinstimmen.

Zur Bestimmung der Griffigkeit auf Oberflächen, die nach DIN EN 13036-4 nicht zu rau sind ($< 1,2$ mm) und keine Grate bzw. Profilierungen aufweisen, spricht nicht zu weit in den Bereich der Makrorauheit reichen, kann das Pendelgerät, das auch unter den Namen Britisch Portable Tester oder auch Skid-Resistance-Tester (SRT-Gerät) bekannt ist, entsprechend DIN EN 13036-4 angewendet werden. Hierbei handelt es sich um ein mobiles Gerät, mit dem mittels eines Gummigleiters, der an einem Pendelarm aufgehängt ist, der Reibenergieverlust gemessen wird, den eine Oberfläche verursacht. Am Pendelarm ist ein Schleppzeiger angebracht, der auf einer Skala den sogenannten SRT- oder PTV-Wert anzeigt (funktions- und messspezifische Details vgl. Abschnitt 2.4.2). Somit ist dieses Messverfahren vorwiegend für die Messung der Mikrorauheit geeignet. Als weitere Messgeräte kommen im internationalen Straßenverkehrswesen zahlreiche motorisierte Messfahrzeuge zum Einsatz, die nach dem Prinzip des gebremsten Messrades unter definierten Geschwindigkeiten und angenäster Fahrbahn den Gleitreibungskoeffizienten ermitteln. Die Griffigkeit zählt zu den indirekten Kenngrößen, die Informationen über die Oberflächen von Fahrbahnen liefern. Sie sind jedoch stark von Messgerät und Messbedingungen abhängig, da diese maßgeblich das Messergebnis beeinflussen (FISCHLEIN, 2000).

Ein weiteres Verfahren, das eigentlich zur Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten dient, erfasst gleichzeitig ebenfalls einen Teil der Mikrorauheit. Es ist in DIN EN 13036-3 beschrieben und hat einen Gültigkeitsbereich für mittlere Profiltiefen von 0 mm bis 0,4 mm. Hierbei wird ein Ausflussszylinder definierter Konstruktion und mit definiertem Volumen auf die zu prüfende Oberfläche gestellt und die Zeit gemessen, die für den Ausfluss eines vorgegebenen Flüssigkeitsvolumens benötigt wird. Die Ausflusszeit ist proportional zur Texturtiefe und ein Maß für die Drainierbarkeit bzw. die Mikrorauheit. Die Ausflusszeit macht eine indirekte Aussage zur Oberflächenrauheit und kann auch zur Beschreibung der Makrorauheit herangezogen werden (FISCHLEIN, 2000).

Für die exakte Erfassung der Mikrotextrur bzw. Mikrorauheit sind entsprechende Normungen im Bereich der Materialprüfung, insbesondere zur Charakterisierung der Topografien endbehandelter Metalloberflächen, zu finden. Mechanische Tastschnittgeräte, bei denen eine Tastnadel über eine Oberfläche bewegt wird und die dabei ein Oberflächenprofil aufzeichnen, dienen hierbei als Messinstrument. Technische Spezifikationen und Anforderungen an die zu verwendenden Tastschnittgeräte sind in DIN EN ISO 3274 festgelegt. Die Kalibrierung der Tastschnittgeräte ist mit den in EN ISO 5436-1 beschriebenen Normen vorzunehmen.

Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit werden in DIN EN ISO 4288 beschrieben. Die Filterung der erhobenen Daten ist nach DIN EN ISO 11562 vorzunehmen. Benennungen, Definitionen und einige Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit sind in DIN EN ISO 4287, in E DIN EN 10049 und in DIN EN ISO

12085 zu finden. Weitere Kenngrößen, allgemeine Messbedingungen und Vorschriften zur Filterung sind in DIN EN ISO 13565-1 bis 3 genannt.

Die Messung der Makrorauheit erfolgte bis zur Veröffentlichung von DIN ISO 13473 ausschließlich nach DIN EN 13036-1, bei der die Strukturtiefe mit dem sogenannten Sandfleckverfahren erfasst wird. Der Messbereich reicht hierbei von einer mittleren Texturtiefe von 0,25 mm bis 5 mm. Hierbei wird eine bekannte Menge einheitlichen Materials auf eine Prüffläche aufgetragen und die vom Material bedeckte Fläche gemessen. Die mittlere Texturtiefe ergibt sich vereinfacht aus dem Quotient des auf der Messfläche verteilten Materialvolumens und dem mittleren Durchmesser der vom Material bedeckten Fläche. Auf der Fläche des Messflecks ist die Topografie vollständig mit Material aufgefüllt. Die mittlere Texturtiefe beschreibt die durchschnittliche Höhendifferenz zwischen den Tälern und der oberen Materialgrenzfläche, welche die höchsten Punkte der Textur berührt. Sie zählt zu den Messgrößen, die direkte Aussagen über die Oberflächen machen (FISCHLEIN, 2000). In der Norm wird ausdrücklich betont, dass dieses Verfahren keine komplette Bewertung der Oberflächentextur zulässt. Ein ähnliches volumetrisches Verfahren mit Glaskügelchen ist in DIN ISO 10844 beschrieben, das in den letzten Jahren wegen seiner besseren Reproduzierbarkeit verstärkt Anwendung findet.

Seit dem Jahr 2004 ist in DIN ISO 13473 die Erfassung der mittleren Texturtiefe durch sogenannte Profilometer mit mechanischen, akustischen oder optischen Aufnehmern bzw. einer Videokamera festgelegt. Hierin sind u. a. die geforderte Mindestauflösung und technische Anforderungen an die Messgeräte sowie die Datenverarbeitung definiert. Der Gültigkeitsbereich für mittlere Profiltiefen beträgt 0 mm bis 5 mm. Die mit diesen Geräten erfassten Kenngrößen liefern direkte Aussagen über die Oberflächen (FISCHLEIN, 2000).

Rutschfestigkeit, Rutschwiderstand, Gleitsicherheit

In der Literatur werden diese Begriffe synonym verwendet. Je nach Anwendungsbereich wird dieser oder jener bevorzugt. Im Grunde beschreiben sie alle die rutschhemmende Wirkung eines Bodenbelags. Prinzipiell könnte die Rutschfestigkeit als Pendant zur Griffigkeit im Bereich Fahrbahn – Fahrzeug (System Fahrbahn – Reifen) angesehen werden. KUSCHEFSKI (1988) stellt in seiner weiterführenden Literaturrecherche im Vorfeld seiner Untersuchungen heraus, dass es seit Jahrzehnten drei wissenschaftliche Auffassungen gibt, welche Art der Reibung (Haftreibung, Gleitreibung oder beide) für die Rutschhemmung und sicheres Gehen verantwortlich ist. Tatsächlich scheint die Theorie am plausibelsten, dass beide zu bestimmten Phasen des Ganges ihre charakteristische Bedeutung haben. Zu diesen Ergebnissen kommen auch VAN DER TOL et al. (2005). Somit erscheint die Definition u. a. nach RICHTER (2001), PAHLKE (2001) sowie STEINER und VAN CAENEGEM (2003) treffend: Unter Rutschfestigkeit bzw. Rutschwiderstand wird eine Kombination aus Haft- und Gleitreibung verstanden, die in ihrer Summe den Widerstand gegen Ausgleiten bewirkt. Die Rutschfestigkeit eines Bodenbelags ist von vielen Faktoren abhängig (vgl. Abschnitt 2.4.4).

Trittsicherheit

Trittsicherheit bezeichnet nach RICHTER (2001), PAHLKE (2001) sowie STEINER und VAN CAENEGEM (2003) die Summe aus messbaren und nicht messbaren Eigenschaften einer Lauffläche und den individuellen Erfahrungen des Tieres. Informationen zur Trittsicherheit lassen sich demnach nur durch Tierbeobachtungen gewinnen. Ähnlich den Untersuchungen von BÖNIG (1996) für gleitsicheres Gehen beim Menschen könnte die Trittsicherheit als eine Art abwägendes subjektives Risikoempfinden der Kuh gegen Ausgleiten verstanden werden, das sich in Verhaltensadaptionen wie der Wahl einer risikoangepassten Schrittlänge und Schrittfrequenz äußert.

Reibung

Durch die Reibkraft als die der Bewegungskraft entgegen gerichtete Kraft wird eine Fortbewegung auf einem Untergrund überhaupt erst möglich. Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Klaue und Boden ist die entscheidende Größe für ein gleitsicheres Gehen. Die Reibungskräfte sind nach Amontons (1699) und Coulomb (1785) von der Oberfläche der Reibpartner abhängig. Je nach Bewegungszustand werden beim Gehen Haft- und Gleitreibung unterschieden. Je höher die Reibung, desto höher ist die Rutschfestigkeit eines Bodenbelages. Es gibt verschiedene Methoden, die Reibungsverhältnisse auf Bodenbelägen und damit die Rutschfestigkeit in Abhängigkeit vom eingesetzten Prüfkörper und Messgerät zu erfassen (vgl. Abschnitt 2.4.1 und 2.4.2). Über bisherige Ergebnisse zur Reibungsmessung wird in Abschnitt 2.4.3 berichtet.

Drainierbarkeit

Die Drainierbarkeit ist ein Maß für das Ableitungsvermögen von Flüssigkeiten auf Oberflächen. Entsprechend DIN EN 13036-3 wird der Begriff horizontale Entwässerung definiert. Hierunter wird das Vermögen der Fahrbahnoberfläche verstanden, durchgehende Poren auszubilden, über die das Wasser durch einen sich bewegenden Reifen herausgedrückt werden kann. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 13036-3 mit dem Ausflusszylinder. Dies kann ebenfalls auf das System Klaue-Boden übertragen werden (vgl. Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2). Eine gute Drainierbarkeit ist vor allem für planbefestigte Laufflächen von entscheidender Bedeutung. Sie ist von den Faktoren Makro- und Megarauheit sowie Längs- und Quergefälle abhängig. Diese haben einen Einfluss auf die Sauberkeit und Trockenheit der Laufflächen. Da das auf den Laufflächen befindliche Gemisch aus Kot, Harn, Futter- und Einstreuresten wie ein Schmiermittel und je nach Menge und Konsistenz den für die Rutschfestigkeit des Bodens verantwortlichen Oberflächeneigenschaften entgegen wirkt, sind die Flächen möglichst sauber und trocken zu halten (u. a. PFADLER, 1981; NILSSON, 1988). Somit haben die horizontale Entwässerung und das eingearbeitete Gefälle direkte Auswirkungen auf die Rutschfestigkeit und indirekte auf die Klauengesundheit. Auch ZÖSCHER (2000), BORDERAS et al. (2004), RUSHEN et al. (2004) und VAN AMSTEL et al. (2004) betonen die Wichtigkeit von trockenen und sauberen Laufflächen für die Klauengesundheit: Durch den ständigen Kontakt der Klauen mit Fäkalien

und Feuchtigkeit weichen diese zunehmend auf, wodurch der Klauenabrieb erhöht wird (vgl. Abschnitt 2.1.3). Denn Klauenhorn absorbiert schnell Wasser und wird dadurch weicher (BORDERAS et al., 2004). Den Einfluss der Feuchtigkeit auf einem abrasiven Untergrund belegen auch die Ergebnisse von PHILLIPS und MORRIS (2000). Sie untersuchten die Abriebeigenschaften von trockenem und nassem Betonboden mittels eines an einem Testgerät befestigten Kohlenstoffstabes. Sie fanden auf trockenem Betonboden einen geringeren Abrieb als auf nassem, da der Kohlenstoffstab vom Wasser aufgeweicht wurde und dadurch ein höherer Abrieb zu verzeichnen war. Weiterhin fanden BORDERAS et al. (2004) eine signifikant negative Korrelation zwischen der Klauenhärte und dem Schweregrad von Klauenläsionen bei den untersuchten Kühen. Es stellte sich heraus, dass Kühe mit weichem Klauenhorn schwerere Klauenläsionen hatten. Gesunde Kühe hatten dagegen härtere Klauen als kranke. Es konnte jedoch nicht eindeutig belegt werden, ob Aufweichung des Horns oder die Konsequenz der Erkrankungen der Grund waren.

Härte

Die Härte einer Lauffläche bzw. die der Komponenten, aus denen sie hergestellt ist, spielt eine große Rolle für ihre Haltbarkeit. Unter anderem ist es ihre Härte, die sie in die Lage versetzt, den mechanischen Belastungen durch Tiere und Arbeitsgeräte Stand zu halten. Außerdem ist sie die entscheidende Voraussetzung für viele verfahrenstechnische Anforderungen unter arbeitswirtschaftlichen Gesichtspunkten. Insbesondere Lastaufnahmevermögen bzw. Befahrbarkeit und Reinigungsfreundlichkeit sind Kriterien, die eine effiziente und kostengünstige Bewirtschaftung der Laufflächen ermöglichen. Je nach Material kommen unterschiedliche Prüfungsverfahren zur Messung der Härte zum Einsatz. Dies führt dementsprechend auch zu unterschiedlichen Messgrößen und Begrifflichkeiten.

Ein Maß für die Härte als Messgröße für die Belastbarkeit ist unter anderem die Druckfestigkeit. Die Druckfestigkeitsklassen von Beton sind in DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 festgelegt. Die Klassifizierung erfolgt nach der charakteristischen Festigkeit von Zylindern mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Länge bzw. der charakteristischen Festigkeit von Würfeln mit der Kantenlänge von 150 mm nach 28 Tagen. Diese ergeben sich aus dem in DIN EN 12390-3 beschriebenen Prüfverfahren mit einer hydraulischen Druckprüfmaschine. Diese hat die in DIN EN 12390-4 gestellten Anforderungen zu erfüllen. Bei diesem Verfahren werden die Prüfkörper bis zum Bruch belastet, die Höchstlast aufgezeichnet und hieraus die Druckfestigkeit berechnet.

Die Prüfung der Härte von Gussasphalt wird nach DIN 1996-13 bzw. DIN EN 12697-20 an Würfeln oder nach DIN EN 12697-21 an Platten unter Verwendung eines Wasserbades durchgeführt. Hierbei wird die Eindringtiefe von Prüfkörpern mit definierten Belastungen entweder mit einer ebenen Stempelfläche von 100 mm² bei 40° C (Prüfdauer 0,5 h) oder einer Stempelfläche von 500 mm² bei einer Temperatur von 22° C (Prüfdauer 5 h) bzw. 40° C (Prüfdauer 2 h) ermittelt. Je nach Eindringtiefe erfolgt die Einteilung in verschiedene Härteklassen.

Es gibt noch eine Vielzahl von Prüfverfahren für die Qualitätseigenschaften und -anforderungen von Beton und Asphalt, jedoch sollte an dieser Stelle nur die Eigenschaft inklusive desjenigen Prüfverfahrens skizziert werden, die maßgeblich bezeichnend für die Materialien ist.

Da die Kuh ein „Weichgänger“ ist (vgl. Abschnitt 2.1.2) und der Bewegungsapparat nicht für harte Untergründe ausgelegt ist, können hierdurch Klauen- und Gliedmaßenprobleme entstehen, wenn andere negative Einflüsse der Haltungsumwelt (z. B. zu glatte oder zu raue Laufflächen, unzureichendes Entmistungs- oder Klauenmanagement, um nur einige zu nennen) oder Fütterung dies begünstigen. Weiche Laufflächenbeläge tragen dem natürlichen Lokomotions- und Tierverhalten besser Rechnung. Sie leisten durch die Möglichkeit des Einsinkens der Klauen einen zusätzlichen Beitrag zur Rutschfestigkeit (BENZ, 2002; TELEZHENKO und BERGSTEN, 2005; BENDEL, 2005; SAMEL, 2005).

Verschleißfestigkeit

Um eine möglichst lange Erhaltung der Rutschfestigkeit zu gewährleisten, müssen die Laufflächen eine hohe Verschleißfestigkeit aufweisen. Unter dem Begriff Verschleiß wird nach DIN 52108 ein fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers verstanden, der durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers hervorgerufen wird. Er ist neben der Festigkeit des Bindemittels insbesondere von der Polierresistenz der Mineralkörner in den Ausgangsmaterialien abhängig. Somit betrifft die Polierresistenz sowohl den Bereich der Mikro- als auch die unteren Bereiche der Makrorauheit. Auch im Verkehrswesen ist die Polierresistenz der im Straßenbelag verwendeten Mineralien einer der wichtigsten Faktoren zur Gewährleistung ausreichender Reibungseigenschaften und deren Sicherstellung über einen langen Zeitraum hinweg (WALLMANN und ASTRÖM, 2001; VAN DER SLUIS et al., 2002).

Die Verschleißfestigkeit ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit gegen die mechanische Beanspruchung durch Tiere und Arbeitsgeräte. Eine hohe Polierresistenz ist besonders bei planbefestigten Laufflächen aus Beton und bei Spaltenböden entscheidend für eine lange Sicherstellung der Mikrorauheit und der Rutschfestigkeit (RICHTER, 2001).

Die Begriffsdefinition schließt jedoch auch die chemische Verschleißfestigkeit durch den Angriff organischer Substanzen wie Kot, Harn, Futterreste etc. ein. Sie kann durch die Art und Menge entsprechender Mineralien und Zuschlagstoffe (Mineralsieblinien, Sand, Zement), Wasserzementgehalt oder Schutzanstriche bei planbefestigten Betonlaufflächen und Spaltenböden (DE BELIE, 1997a; DE BELIE, 1997b; DE BELIE und MONTENY, 1998; RICHTER, 2000) bzw. die Wahl der Kornzusammensetzung (Füller und die Minerale), der Bindemittelart und -menge sowie der Qualität des Bitumens bei Gussasphalt (WEYDERT et al., 2001; N. N., 1981) beeinflusst werden.

Die mechanische Verschleißfestigkeit kann mit drei unterschiedlichen Verfahren geprüft werden. Diese sind in den Normen DIN 52108 bzw. DIN EN 13892-3 bis 5 beschrieben.

In DIN 52108 bzw. DIN EN 13892-3 wird die Verschleißfestigkeitsprüfung mit dem sogenannten Verschleißprüfgerät nach Böhme vorgenommen. Hierbei werden Materialproben mittels definierter Schleifmittel unter festgelegter Belastung im genannten Prüfgerät bearbeitet. Der Schleifverschleiß wird entweder als Dicken- oder Volumenverlust bestimmt.

DIN EN 13892-4 erläutert die Verschleißwiderstandsmessung nach BCA. Als Maß gilt die mittlere Verschleißtiefe, die durch eine Maschine mit drei gehärteten Stahlrädern erzeugt wird, wobei diese mit einer festgelegten Anzahl von Umdrehungen und einer festgelegten Last über einen ringförmigen Prüfbereich laufen.

Eine weitere Prüfmethode beschreibt DIN EN 13892-5 zur Ermittlung des Verschleißwiderstandes gegen Rollbeanspruchung. Hierbei läuft ein Stahlrad mit einer festgelegten Last 10.000 Zyklen (ca. 24 h) über einen Prüfkörper. Vor und nach der Prüfung wird die Profiltiefe mit einem Tiefensensor gemessen und aus der Differenz die Abriebtiefe ermittelt. Die Menge des Abtrags ergibt sich als Produkt der Abriebtiefe und einer konstanten abgeriebenen Fläche.

Abrasivität

Ein gewisser Grad an Abrasivität der Laufflächen ist nötig, um ein übermäßiges Klauenwachstum zu verhindern (u. a. CIGR, 2002; BONSER et al., 2003). Sie trägt auf diese Weise dazu bei, dass sich Klauenhornwachstum und -abrieb in etwa die Waage halten. Die Abrasivität eines Bodens ist abhängig von der Schärfe (Form und Größe) der verwendeten Sieblinien im Material. Untersuchungen von CAMARA (1970) und NILSSON (1988) belegten, dass der Klauenabrieb bei Beton mit scharfkantigen Körnungen höher ist als bei Betonmischungen mit runden Körnungen. PHILLIPS und MORRIS (2001) fanden eine proportionale Abhängigkeit des Abriebs von der Aggregatgröße. Die Abrasivität ist aber auch von der Verschleißfestigkeit, insbesondere von der Polierresistenz der Mineralien abhängig, was vor allem für Beton und Spaltenboden gilt. Dies fand unter anderem auch NILSSON (1988). SCHLICHTING (1987) untersuchte die Klaueneigenschaften von Kälbern, die in Gruppen auf Tiefstreu, Spaltenboden und Holzspalten mit Gummimatte gehalten wurden. Die Tiere auf Tiefstreu hatten den größten, jene auf Spaltenboden den geringsten Klauenabrieb. MURPHY et al. (1987) sowie VOKEY et al. (2001) berichten, dass die Klauenwachstumsrate von der Abrasivität des Bodens abhängt. SOMERS et al. (2005) fanden hingegen keine signifikanten Unterschiede in Klauenhornwachstum und -abrieb bei der Untersuchung von 12 Milchviehherden, die auf planbefestigtem Beton, gerilltem Beton, Spaltenboden und Stroh gehalten wurden. SAMEL (2005) belegte mit einer Vergleichsuntersuchung von zwei Kuhherden, die unter gleichen Bedingungen auf Beton- bzw. Gummilaufflächen gehalten wurden, dass der Klauenabrieb auf Betonboden signifikant höher war als auf Gummiboden.

Werden die genannten Literaturquellen verglichen, lässt sich der Schluss ziehen, dass für die Abrasivität einer Lauffläche sowohl Mikro- als auch Makrorauheit wichtig sind, also die selben Texturen, denen die rutschfesten Eigenschaften zugeschrieben werden. Abrasi-

vität und Rutschfestigkeit stehen einander über einen gewissen Bereich hinweg diametral gegenüber (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.2). Auch GOOCH (2000) und BONSER et al. (2003) betonen, dass nur ein schmaler Grat zwischen zu hoher Abrasivität und ausreichender Rutschfestigkeit eines Bodens besteht.

2.4 Erfassung der Rutschfestigkeit

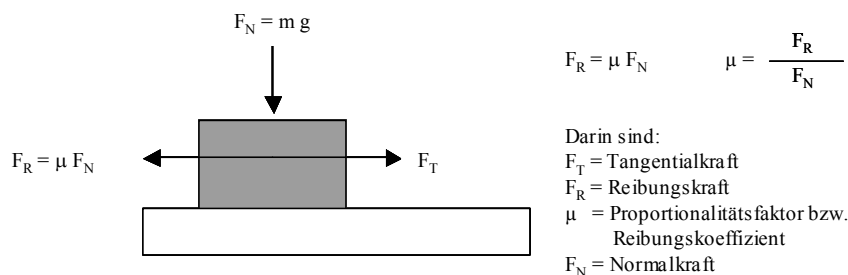
In diesem Abschnitt werden zunächst die Funktionsprinzipien von mobilen Reibzahlmessgeräten und daraufhin eine Auswahl prinzipiell in Frage kommender mobiler Geräte mit ihren wichtigsten technischen Spezifikationen vorgestellt. Die Erkenntnisse bisheriger Forschungen zu Rutschfestigkeitsmessungen von Stallböden werden ebenso behandelt wie die Komplexität der Einflussfaktoren auf die Rutschfestigkeit von Laufflächen sowie die bei den Messungen zu beachtenden Aspekte und auftretenden Probleme.

2.4.1 Funktionsprinzipien von mobilen Reibzahlmessgeräten

Bevor im Folgenden die wichtigsten technischen Spezifikationen grundsätzlich in Frage kommender, mobiler Reibungsmessgeräte vorgestellt werden, sollen zunächst die Prinzipien erläutert werden, die diesen Messgeräten zu Grunde liegen.

Messprinzip 1: Messung der Reibkraft

Für die Relativbewegung eines Festkörpers ohne Schmiermittel fanden Amontons (1699) und Coulomb (1785) folgendes Reibungsgesetz, welches auch als Coulomb'sches Gesetz bezeichnet wird. In Abb. 3 ist der Zusammenhang zwischen Normal- und Reibkraft dargestellt:



Quelle: verändert nach SCHEIL (1993)

Abb. 3: Ermittlung der Reibzahl durch Messen der Reibkraft, Prinzip von Zug-, Fahr- und Rotationstribometer

Nach diesem Prinzip lässt sich die Reibkraft folgendermaßen ermitteln: Auf eine horizontale Unterlage drückt ein Gleitkörper mit einer konstanten, senkrecht wirkenden Normalkraft. Wird während einer Messung der Gleitkörper durch eine horizontal angreifende Normalkraft mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ergibt sich die gemessene horizontal angreifende Reibkraft als Maß für die Reibzahl μ . Denn beide Kräfte sind gleich groß (Prinzip: Aktio = Reaktio).

Die Messung der Reibkraft erfolgt durch Federauslenkung oder Kraftmessdosen (Dehnungsmessstreifen oder Biegestäbe) im Messgerät. Die Kraftmesser können sich aber auch in der Zugvorrichtung befinden. Dieses Prinzip ist auch in einer abgewandelten Form nicht als gezogener, sondern als rotierender Gleitkörper möglich, wobei die Reibzahl dann aus der dem Drehmoment proportionalen Reibkraft ermittelt wird.

Kernaussage des Coulomb'schen Gesetzes ist die Proportionalität von Reibungskraft und Normalkraft. Für den Proportionalitätsfaktor sind in der Literatur die Begriffe Reibzahl, Reibungskoeffizient, Reibwert, Kraftschlussbeiwert und Reibungsbeiwert gebräuchlich. Je nach Bewegungszustand wird auch von Haft- oder Gleitreibungskoeffizient gesprochen.

Haftreibung: Sie tritt bei zwei relativ zueinander unbewegten Körpern auf. Um einen Körper aus dem Ruhezustand in den der Bewegung zu überführen, ist die Überwindung der Haftreibungskraft notwendig. Sie bezeichnet dabei diejenige Kraft, die maximal an einem Körper angreifen kann, ohne dass sich der Körper bewegt. Solange er während des Kraftangriffs in Ruhe verharrt, findet kein Energieverbrauch und daher auch keine Energiedissipation statt. Mathematisch stellt sich die Haftreibung wie folgt dar:

$$F_H = \mu_H F_N$$

Darin sind:

F_H = Haftreibungskraft

μ_H = Haftreibungskoeffizient

F_N = Normalkraft

Gleitreibung: Beim Gleiten – einer translatorischen Relativbewegung zweier Körper – wirkt im allgemeinen die sogenannte Gleitreibungskraft. Sie ist diejenige Kraft, die erforderlich ist, um einen Körper in einer gleichförmigen Bewegung zu halten. Ihre Maßzahl ist der Gleitreibungskoeffizient. Im Gegensatz zur Haftreibung findet hier eine kontinuierliche Energiedissipation statt. Es gilt die Beziehung:

$$F_G = \mu_G F_N$$

Darin sind:

F_G = Gleitreibungskraft

μ_G = Gleitreibungskoeffizient

F_N = Normalkraft

Insgesamt gibt es fünf klassische Reibungsgesetze, die für den Reibungskoeffizienten gelten. Sie beruhen auf den Arbeiten von Da Vinci, Amontons, Euler und Coulomb:

- Die Reibzahl ist unabhängig von der Belastung
- Die Reibzahl ist bei konstanter Normalkraft unabhängig von der (scheinbaren) Berührungsfläche (sog. nominelle geometrische Kontaktfläche)
- Die Reibzahl ist abhängig von der Materialpaarung der Reibpartner
- Die Reibzahl ist (nahezu) unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit
- Die Haftreibzahl ist größer als die Gleitreibzahl

Es muss allerdings betont werden, dass diese Gesetzmäßigkeiten nach heutigen Erkenntnissen nur als Näherungen aufzufassen sind und je nach Material und Anwendungsgebiet nur bedingt oder keine Gültigkeit besitzen (SOBIS, 1996). Insbesondere bei viskoelastischen Materialien gelten diese klassischen Reibungsgesetze nicht mehr oder zumindest nur noch teilweise (u. a. SCHEIL, 1993; SKIBA et al., 1994; SCHRAMM, 2002).

Messprinzip 2: Messung des Rutschwinkels

Im Grunde handelt es sich bei dieser Methode um die Ermittlung der Haftreibung. Dies kann auf zweierlei Arten erfolgen, wie Abb. 4 illustriert. Ein Gleitkörper wird auf eine schiefe Ebene gelegt und der Winkel zwischen horizontalem Boden und schiefer Ebene solange vergrößert, bis der Gleitkörper zu rutschen beginnt (Abb. 4 links). Hierbei wird der Grenzwinkel α_{\max} ermittelt, für den Reibungs- und Hangabtriebskraft gleich groß werden. Für die Normalkraft gilt:

$$F_N = F_g \cos \alpha \quad \text{mit } F_g = \text{Gewichtskraft}$$

Für die Hangabtriebskraft gilt:

$$F_A = F_g \sin \alpha \quad \text{mit } F_A = \text{Hangabtriebskraft}$$

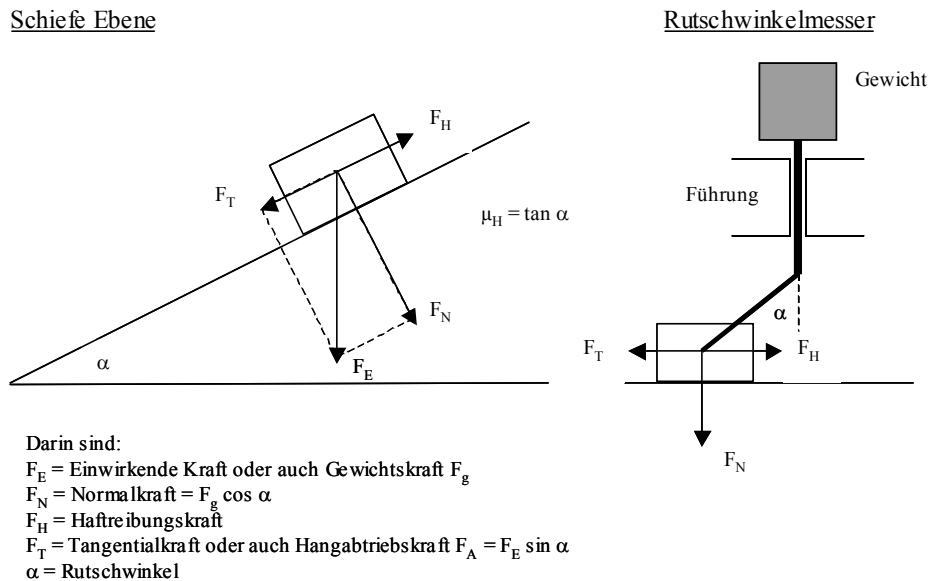
Bei Beginn des Gleitens gilt demnach Reibungskraft = Hangabtriebskraft:

$$\mu_H F_g \cos \alpha_{\max} = F_g \sin \alpha_{\max}$$

$$\mu_H = \tan \alpha_{\max}$$

Somit ist der Haftreibungskoeffizient gleich dem Tangens des Reibungswinkels und ein Maß für die Reibzahl. Besagter Winkel kann auch durch eine andere Methode ermittelt werden: Hierbei wird ein Gleitkörper auf einem horizontalen Boden durch eine nicht orthogonal wirkende Kraft belastet. Die Tangentialkomponente dieser Kraft und die Reibkraft des Bodens wirken einander entgegen. Die Messgröße bei diesem Verfahren ist der

Rutschwinkel zwischen Vertikal- und Belastungsrichtung, bei dem der Gleitkörper zu rutschen beginnt. Auch hier gilt: $\mu_H = \tan \alpha_{\max}$ (Abb. 4 rechts).

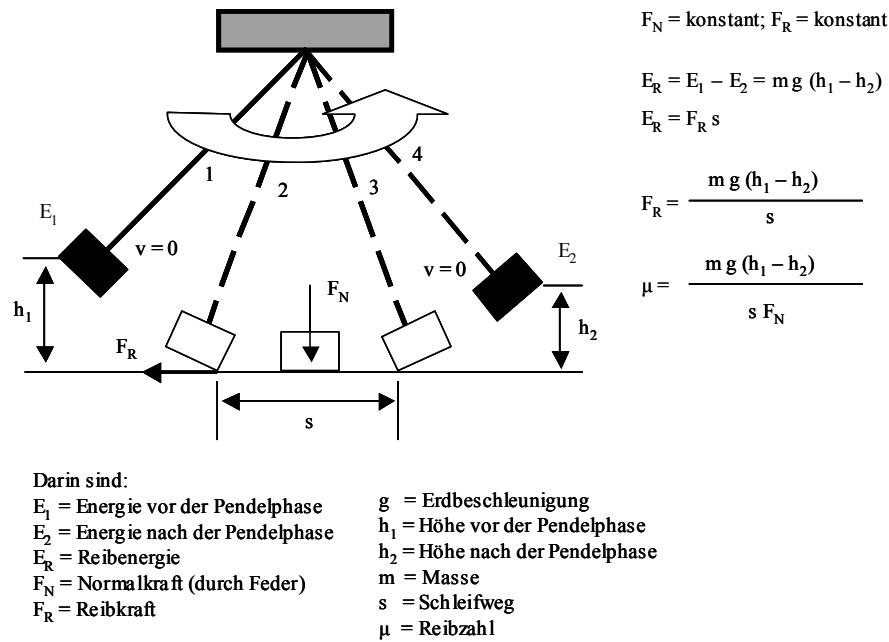


Quelle: verändert nach SCHEIL (1993)

Abb. 4: Ermittlung der Reibzahl durch Messen des Gleitwinkels, Prinzip der schiefen Ebene und des Rutschwinkelmessers

Messprinzip 3: Messung der Reibenergie

Bei dieser Methode der Reibzahlmessung wird der Reibenergieverlust gemessen (Abb. 5). An einem Pendel ist ein Gleitkörper aufgehängt. Dieser fällt aus der Anfangshöhe h_1 , schleift über eine Strecke s über den Boden und erreicht, bedingt durch den Energieverlust, eine geringere Endhöhe h_2 . Wird die Schleifstrecke s und die Normalkraft F_N konstant gehalten, lässt sich aus der Differenz der beiden Höhen ($h_1 - h_2$) die Reibzahl berechnen oder an einer angebrachten Skala ablesen (SCHEIL, 1993; SKIBA et al., 1994).



Quelle: verändert nach SCHEIL (1993)

Abb. 5: Ermittlung der Reibzahl durch Messen der Reibenergie, Prinzip des Pendelgleiters

2.4.2 Mobile Messgeräte zur Messung der Reibzahl

Seit Beginn der Reibungsforschung sind auch Reibungsmessgeräte im Einsatz. Diese unterliegen seit den ersten Ausführungen von Amontons (1699) und Coulomb (1785) einer ständigen Weiterentwicklung und Spezifizierung für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete.

STRANDBERG (1985) zeigte in einer Vergleichsstudie von verschiedenen Reibzahlmessgeräten zur Messung der Rutschfestigkeit von Bodenbelägen in Arbeitsstätten, dass diejenigen Messgeräte die validesten Ergebnisse erzielten, die den menschlichen Gang am besten simulierten. SKIBA et al. (1987) kamen zum gleichen Ergebnis. Auch WIEDER (1988) und SKIBA et al. (1994) betonen die Notwendigkeit der Berücksichtigung der kinematischen Rahmenbedingungen beim menschlichen Gang zur Analyse und Festlegung von Reibzahlen für gleitsicheres Gehen. Hierbei spielt die Gleitgeschwindigkeit eine große Rolle. STRANDBERG (1985) zeigte in Vergleichsuntersuchungen zwischen Reibzahlmessgeräten und Beobachtungen am Menschen, dass erst ab einer Gleitgeschwindigkeit von ca. 0,1 m/s hohe Korrelationen erreicht wurden. Eine Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit auf 1 m/s erbrachte keine höheren Korrelationen. Nachdem MULITZE (1989) bereits eine Vielzahl von Reibungsmessgeräten aus einem breiten Anwendungsspektrum vorgestellt und deren Einsatztauglichkeit für den Stallbereich evaluiert hat, sind bis zum heutigen Zeitpunkt ständig verbesserte Konstruktionen verfügbar. SKIBA et al. (1987), SCHEIL (1993) und SKIBA et al. (1994) sowie NILSSON (1988) stellten jedoch heraus, dass zur damaligen Zeit keine bekannte, mobile Messmethode existierte, die

valide Ergebnisse für das Gesamtproblem Rutschfestigkeit von Schuhsohlen bzw. Stallböden lieferte. Diese Aussage trifft bis heute zu. Denn kein mobiles Messgerät, weder aus dem Bereich der Arbeitssicherheit, dem Verkehrswesen, der Veterinärmedizin oder der Landtechnik ist in der Lage, die komplizierten und komplexen Vorgänge sowie die verschiedenen Belastungszustände während des Gehens in kompakter und damit vor Ort einsetzbarer Bauweise vollständig und zufriedenstellend zu simulieren. Sollen diese Vorgänge dementsprechend nachgebildet werden, geht dies zu Lasten der Mobilität. Denn für den Einsatz vor Ort sind die Messapparaturen dann zu groß. Dies trifft für den sogenannten „Site-Prod-Traveller“ von BONEFELD (1981) für die Bestimmung des Gleitverhaltens auf Bodenbelägen, den von SKIBA et al. (1987) entwickelten „Boden-Schuh-Tester“, den auch KUSCHEFSKI (1988) für die Bewertung der Validität von Reibzahlen als Bewertungskriterium der Gleitsicherheit benutzte, aber auch für den Rindergangsimulator von DUMELOW (1993), zitiert in MCKEE und DUMELOW (1995), zu.

Weitere Faktoren, welche die Reibzahlmessung komplizieren, sind die unterschiedlichen Funktionsweisen, Messbedingungen und Messvoraussetzungen, die eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse teilweise schwierig bis unmöglich machen. Ursache hierfür sind die verschiedenen Messprinzipien und Einsatzbereiche der Messgeräte. Ähnliche Aussagen treffen neben NILSSON (1988) und MULITZE (1989) für den landwirtschaftlichen Bereich auch SKIBA et al. (1987), WIEDER (1988), SCHEIL (1993) und SKIBA et al. (1994) für den Bereich der Arbeitssicherheit. WALLMANN und ASTRÖM (2001) berichten ebenfalls von vielen unterschiedlichen Methoden und Messgeräten zur Erfassung der Reibungseigenschaften des Systems Reifen – Zwischenmedium – Fahrbahn im internationalen Verkehrswesen. Eine direkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse, die mit verschiedenen Messgeräten in unterschiedlichen Ländern erzielt wurden, sei deshalb nicht gegeben.

Allerdings hat die Entwicklung der Reibwertmessung außerhalb der Landwirtschaft, gerade hinsichtlich Konstanzhaltung der Messbedingungen, Reproduzierbarkeit und Handhabung der Messgeräte, Fortschritte gemacht. Weiterhin wurden die zur Zeit verfügbaren Messmethoden und die dazugehörigen Geräte mit dem höchsten Grad an Objektivität, Reliabilität, Validität und Praktikabilität vereinheitlicht und national bzw. international genormt.

Es soll in dieser Arbeit jedoch lediglich auf solche Messgeräte eingegangen werden, mit denen von ihrem Messprinzip, Aufbau und Abmessungen auch Reibungsmessungen in Stallungen vorgenommen werden können. Bei der Zusammenstellung der technischen Spezifikationen der einzelnen Messgeräte (vgl. Tab. 3) sei darauf hingewiesen, dass die aufgeführten Informationen nur so vollständig zusammengestellt werden konnten wie es aus der Literatur hervorging. Fehlende Angaben einzelner Spezifikationen oder Details in der Zusammenstellung waren in der jeweiligen Literaturquelle nicht angegeben oder ließen sich aufgrund fehlender Zusatzinformationen auch nicht mit Sicherheit ableiten.

Viele der in Tab. 3 aufgeführten Geräte sind zwar von ihrer Funktionsweise grundsätzlich für Rutschfestigkeitsmessungen in Ställen geeignet, dennoch können sie aufgrund ihrer zu kleinen oder zu großen Bauweise, mangelnder Robustheit oder veralteter Messtechnik

nicht für diese Messaufgabe eingesetzt werden. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Jedoch lieferte die nachfolgend vorgestellte Auswahl an Messgeräten einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung und Konstruktion des für diese Arbeit verwendeten Gleitreibungsmessgerätes. Insbesondere die Arbeiten von SCHEIL (1993) und SKIBA et al. (1994), in denen Vergleichuntersuchungen mit den Reibzahlmessgeräten British-Portable-Tester (SRT-Gerät), Brungraber Slip Tester Mark II, Schuster Zugtribometer, Tortus Floor Friction Tester und Floor Slide Control 2000 durchgeführt wurden, trugen in großem Maße zur Entscheidung für ein Messprinzip bei und gaben aufschlussreiche Hinweise für wichtige Gerätekomponenten.

Tab. 3: Technische Spezifikationen von mobilen Reibzahlmessgeräten

Autor bzw. Messgerät	Messprinzip	Messgröße	Antriebsmechanik	Prüfstrecke [m]	Messgeschwindigkeit [m/s]	Prüfmaterial	Ballastierung [kg]	Normalkraft [N]	Kontaktfläche [cm ²]	Flächenpressung [N/cm ²]	Messwertaufnahme und -ausgabe	Einsatzbereich
Schuster Zugtribometer	Gezogener Körper (Zugtribometer, ungeführt)	Reibkraft	Manuelles Ziehen mit Seil		0 – 0,5 (bedienungsabhängig)	wahlweise Nitrilkautschuk (NBR), Polyurethan (PUR), Leder	4	ca. 40	10 - 40	1 - 4	Federdynamometer	Fußböden
BÄHR und TÜRPITZ (1976)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt)	Reibkraft	Handkurbel, Stahlseil			drei Rinderklauen					Dynamometer	Laufflächen
BÄHR et al. (1978)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt)	Reibkraft	Elektromotor, Getriebe, Schraubenspindel	0,1	0,0014	Rinderklauen	15 – 75				Federzugkraftmesser, Dynamometer	Laufflächen
BEER und KOVACS (1973, 1974) in BÄHR und TÜRPITZ (1976)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt)	Reibkraft	Elektromotor, Schneckengetriebe, Schraubenspindel		0,001	drei Rinderklauen, später drei Zylinder aus Metamid			Drei Zylinder mit je (D = 1,5) = 14,14		Feder, Hebelwerk, Registriergerät	Laufflächen
NILSSON (1988)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt)	Reibkraft	Elektromotor, Riemenantrieb, Getriebe, Hebelarm		sinsusförmige Bewegung von 0 – 0,06	Polyethylen, klauenähnlich geformter Block mit Tragrand		581, 1519, 2287			Kraftaufnehmer, Drucker	Laufflächen

Tab. 3: Fortsetzung

Autor bzw. Messgerät	Messprinzip	Messgröße	Antriebsmechanik	Prüfstrecke [m]	Messgeschwindigkeit [m/s]	Prüfmaterial	Ballastierung [kg]	Normalkraft [N]	Kontaktfläche [cm ²]	Flächenpressung [N/cm ²]	Messwertaufnahme und -ausgabe	Einsatzbereich
MULITZE (1989)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt oder ungeführt)	Reibkraft	Manuelles Ziehen mit Stahlseil über Umlenkrollen	0,1	0,00006 – 0,075	wahlweise Kunststoffabgüsse von drei Schweineklauen, drei Kunststoffzylinder mit je drei Schlossschraubenköpfen	3,5 – 26 in Schritten von 2,5	Dynamometer			Dynamometer	Laufflächen (insbesondere perforierte Böden)
MULITZE (1989)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt)	Reibkraft	Hydraulikzylinder, Stahlseil	0,1	0,00006 – 0,075	wahlweise Kunststoffabgüsse von drei Schweineklauen, drei Kunststoffzylinder mit je drei Schlossschraubenköpfen	3,5 – 26 in Schritten von 2,5	Kraftmessdose, digitaler Kraftanzeiger				Laufflächen (insbesondere perforierte Böden)
PHILLIPS et al. (1998, 2000) bzw. PHILLIPS und MORRIS (2000, 2001)	Gezogener Körper (Zugtribometer, ungeführt)	Reibkraft	Manuelle Seilwinde			vier Rinderklauen	200					Laufflächen
GROBMAN et al. (2002)	Gezogener Körper (Zugtribometer, ungeführt)	Reibkraft	Elektromotor, spindelgetriebene Zugvorrichtung	0,02 – 0,22	0,00017 – 0,017, Regel: 0,00042	Europalette (Holz), Stahlgitterbox, Kunststoffpalette		1000 – 6000, Regel: 10000			Kraftmessdose, Messverstärker, Computer	Laufflächen in Gütertransportfahrzeugen

Tab. 3: Fortsetzung

Autor bzw. Messgerät	Messprinzip	Messgröße	Antriebsmechanik	Prüfstrecke [m]	Messgeschwindigkeit [m/s]	Prüfmaterial	Ballastierung [kg]	Normalkraft [N]	Kontaktfläche [cm ²]	Flächenpressung [N/cm ²]	Messwertaufnahme und -ausgabe	Einsatzbereich
BONSER et al. (2003)	Gezogener Körper (Zugtribometer, geführt)	Reibkraft	Elektromotor, Seil	0,1	0,0017	Rinderklauenscheiben	(in vivo)		0,1789	0,0117	Kraftmessdose, Messverstärker	Laufflächen
MÜLLER (2003) bzw. DLG Comfort Control	Gezogener Körper (Zugtribometer, ungeführt)	Reibkraft	Linearinheit mit Schrittmotor	0,35	0,01 – 0,03	Polyamid	10	98,12	8,86	11	Kraftmessdose, Messverstärker, Notebook	Laufflächen
DIN 53375	Gezogener Körper (Zugtribometer, ungeführt)	Reibkraft	wahlweise elektrisch oder manuell getriebenes Zugseil mit oder ohne Umlenkrollen	0,06	0,0017 ± 0,00017	Filz	0,2 ± 0,002		40		Dynamometer	Qualitätsprüfung von Folien
E DIN 51131 bzw. GMG 100	Gezogener Körper (Zugtribometer, ungeführt)	Reibkraft	Elektromotor, Rippenriemen, Schwungradmasse, Getriebe, Zugseil; Gerät zieht sich mittels Seil selbst	0,5 < s < 2,5	0,2 – 0,3 ± 0,01	wahlweise PVC, SBR-Kautschuk, Leder	9 – 9,5		drei Gleiter mit je 2,5, mindestens aber 5 bei zwei Gleitern	9 ± 1	Kraftmessdose, Messverstärker, Display, Computer	Fußböden
Tortus Floor Friction Tester	Gezogener Körper (Fahrtribometer, geführt)	Reibkraft	Elektromotor (Gerät selbst-fahrend)		0,017	wahlweise Nitrilkautschuk (NBR), Polyurethan (PUR), Leder		2	0,64	3	Blattfedern und Induktionsspule, analoges Messwerk	Fußböden

Tab. 3: Fortsetzung

Autor bzw. Messgerät	Messprinzip	Messgröße	Antriebsmechanik	Prüfstrecke [m]	Messgeschwindigkeit [m/s]	Prüfmaterial	Ballastierung [kg]	Normalkraft [N]	Kontaktfläche [cm ²]	Flächenpressung [N/cm ²]	Messwertaufnahme und -ausgabe	Einsatzbereich
Floor Slide Control FSC 2000	Gezogener Körper (Fahrtribometer, geführt)	Reibkraft	Elektromotor (Gerät selbst-fahrend)		0 – 0,08	wahlweise Nitrilkautschuk (NBR), Polyurethan (PUR), Leder		24	ca. 4	6	Feder, Hebelwerk, Plotter mit Registrierstreifen	Fußböden
Brungraber Slip-Tester Mark 2	„Geneigtes Bein“	Rutschwinkel	Schwerkraft		0 – 0,2	wahlweise Nitrilkautschuk (NBR), Polyurethan (PUR), Leder	10	50 - 100	ca. 60	1 - 2	Skala	Fußböden
DIN EN 13036-4 bzw. British portable Tester bzw. SRT-Gerät	Pendel	Reibenergie	Schwerkraft		ca. 2,8	wahlweise Nitrilkautschuk (NBR), Polyurethan (PUR), Leder		ca. 25	2,25	11	Skala	Straßen, Fußböden, Sportböden, Laufflächen
DIN V 18032-2 bzw. messgerät „Stuttgart“	Rotations-tribometer	Reibkraft	mechanischer Antrieb über Seil an frei hängendem Gewichtsstück			Leder			drei Gleiter mit je 0,33		Drehmomentmesser, Registriergerät	Sportböden

2.4.3 Bisherige Reibzahlmessungen zur Erfassung der Rutschfestigkeit von Laufflächen

Im Mittelpunkt dieses Abschnittes stehen die wichtigsten Erkenntnisse landtechnischer Forschungen zu Reibzahlmessungen verschiedener Autoren. Da die Spezifikationen der Messgeräte bereits im vorigen Abschnitt vorgestellt wurden, soll hier nicht mehr darauf eingegangen, sondern nur die wesentlichen Erkenntnisse dargelegt werden, welche die verschiedenen Autoren auf unterschiedlichen Belägen erlangten. Auf die Angabe der gemessenen Reibzahlen wird in diesem Abschnitt verzichtet und stattdessen gegebenenfalls auf die entsprechenden Stellen in der Originalliteratur verwiesen, da diese an späterer Stelle der Arbeit den eigenen Untersuchungsergebnissen gegenübergestellt werden.

TÜRPIZ (1968) sowie BEER und KOVACS (1974), zitiert in BÄHR und TÜRPIZ (1976), führten Reibzahlmessungen nach dem Prinzip des gezogenen Körpers durch (vgl. Abschnitt 2.4.1). Bei ihren Untersuchungen konnten sie keinen Unterschied zwischen dem Haft- und dem Gleitreibungskoeffizienten finden. Ferner könne nach ihren Angaben der Einfluss der Geschwindigkeit auf den Gleitreibungskoeffizienten bei konstanter Geschwindigkeit und konstanter Belastung in Vergleichsversuchen vernachlässigt werden. Als Varianten wurden neben trockenen auch nasse und verkotete Flächen gemessen. Durch die Verwendung von Prüfkörpern aus Klauenhorn wurde in den beiden letzten Fällen eine Erhöhung des Gleitreibungskoeffizienten infolge der Feuchtigkeitsaufnahme des Klauenhorns festgestellt. Dies wurde mit einem höheren Formschluss des feuchten Hornmaterials mit der Bodenoberfläche erklärt (durch Erhöhung der Hysteresereibkraftkomponente, vgl. Abschnitt 2.2.1). Darüber hinaus waren die Messwertstreuungen auf nassen und verkoteten Prüfflächen geringer (max. Standardabweichung = 5,6 %). Die Autoren schlossen daraus, dass die durch die Feuchtigkeitsaufnahme im Versuch bedingte Konsistenz der Hornschuhe den normalen Bedingungen am besten entspricht. Auf Gummi ergaben sich keine Unterschiede zwischen nassen und trockenen Belägen. Die ermittelten Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von Material und Zustand finden sich auf Seite 242 der Originalliteratur. BÄHR und TÜRPIZ (1976) geben in dieser Veröffentlichung erstmals Empfehlungen zu Mindestanforderungen an Stallbodenmaterialien in Form des Gleitreibungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Tier- und Aufstallungsart (BÄHR und TÜRPIZ (1976), Seite 243). Auf Basis dieser Untersuchungen wurde 1977 die erste Fassung der TGL 32456 Stallfußboden – Allgemeine Anforderungen verbindlich. Hierin sind unter anderem die o. g. Empfehlungen wiederzufinden.

Auf diese Arbeiten aufbauend veröffentlichten BÄHR et al. (1978) erste Ergebnisse mit einem verbesserten Gleitreibungsmessgerät. Die technischen Verbesserungen sind Tab. 3, Seite 58 zu entnehmen. Es wurden wiederum Gleitreibungsmessungen auf trockenen, nassen und verkoteten Stallbodenproben durchgeführt. Auch bei diesen Versuchen stellte sich heraus, dass die meisten Oberflächen in nassem oder verkotetem Zustand höhere Gleitreibungskoeffizienten aufwiesen als im trockenen. Es wurden die gleichen Erklärungen hierfür gegeben wie bei BÄHR und TÜRPIZ (1976). Messungen auf profilierten Polyethylenplatten zeigten keine Erhöhung des Gleitreibungskoeffizienten durch die Profilierungen. Ebene, leicht aufgeraute Flächen brachten dagegen bessere Ergebnisse. Eine Tabelle

mit den Ergebnissen sämtlicher untersuchter Materialien findet sich bei BÄHR et al. (1978) auf Seite 26.

Mit dem aus dem Straßenwesen bekannten SRT-Gerät führten WEBER (1985), MULITZE (1989), HERRMANN (1997), REIMANN und FREIBERGER (1999) sowie MÜLLER (2003) ihre Griffigkeitsuntersuchungen auf verschiedenen Laufflächen unterschiedlichen Alters durch. WEBER (1985) überprüfte zusätzlich die Wirksamkeit verschiedener Sanierungsmöglichkeiten. REIMANN und FREIBERGER (1999) untersuchten außerdem einige Melkstandbodenbeläge. MULITZE (1989) hingegen führte seine Messungen nur an Beton und Spaltenboden durch, jedoch überwiegend im Bereich der Schweinehaltung. Neue Beton- und Gussasphaltpöden werden von allen Autoren hinsichtlich der Griffigkeit als gut bewertet. Im Laufe der ersten beiden Jahre konnte bei Beton jedoch eine starke Abnahme derselben festgestellt werden. Begründet wird dies mit dem mechanisch bedingten Verschleiß der obersten Schicht durch Schieberentmischung. Im weiteren Verlauf der Nutzungsdauer nimmt die Griffigkeit weiter ab, wobei dies vergleichsweise geringer ausfällt als in den ersten beiden Jahren. Sanierungsmaßnahmen mit Salzsäure und Fräse bescheinigt WEBER (1985) eine geringe Dauerhaftigkeit. Bei Gussasphalt hingegen nahm die Griffigkeit während der ersten beiden Jahre nicht ab. Die Abnahme der Griffigkeit in der Altersklasse zwischen 2 und 5 Jahren und ihr Anstieg in der Altersklasse darüber sei auf Messausreißer sowie zu wenige Messungen zurückzuführen. Bei REIMANN und FREIBERGER (1999) wird dies durch den schnellen Verschleiß der Oberflächenbehandlung mit Quarzsand erklärt. Aus den gut übereinstimmenden Ergebnissen folgern die Autoren, dass dieser Belag über Jahre hinweg seine Griffigkeit behält.

NILSSON (1988) verglich diverse Laufflächenmaterialien in Laboruntersuchungen mit Messungen nach dem Prinzip des gezogenen Körpers. In Vorversuchen, bei denen es galt, die Spezifikationen für das in den Hauptversuchen verwendete Gleitreibungsmessgerät festzulegen, kam er zu folgenden Ergebnissen: Bei Gummimatten und -matratzen konnte kein eindeutiger Haftreibungskoeffizient festgestellt werden. Darüber hinaus zeigte der Haftreibungskoeffizient eine höhere Streuung als der Gleitreibungskoeffizient. Auf diesen Materialien war der Gleitreibungskoeffizient, gemessen mit einem gekerbten Prüfkörper (mit Tragrand) höher als mit einem glatten. Gleiches galt für die höchste (246 kg) im Vergleich zur niedrigsten Belastungsstufe (26 kg). Keine signifikanten Unterschiede konnten hingegen bei den mittleren beiden (74 kg und 169 kg) Belastungen gefunden werden. Auf harten Materialien konnten keine Unterschiede im Gleitreibungskoeffizienten zwischen den verschiedenen Belastungsstufen festgestellt werden. Außerdem konnten weder auf neuen noch auf alten Betonbelägen Unterschiede im Gleitreibungskoeffizienten im trockenen und im nassen Zustand gefunden werden.

In den Hauptversuchen wurden Reibwertuntersuchungen auf verschiedenen Belägen in trockenem, nassen und verkotetem Zustand durchgeführt. Auch hier wurde der Einfluss verschiedener Normalkräfte getestet (vgl. Abschnitt 2.4.2). Für diese Versuchsreihe wurde ausschließlich ein gekerbter Prüfkörper verwendet. Folgendes konnte festgestellt werden: Während der Haftreibungskoeffizient bei weichen Materialien geringer war als der Gleitreibungskoeffizient, traf der umgekehrte Fall bei harten Materialien zu. Darüber hinaus

erhöhte sich der Gleitreibungskoeffizient auf verformbaren Materialien signifikant mit höherer Normalkraft. Bei den Zustandsvergleichen trocken, nass und verkotet stellte sich heraus, dass der Gleitreibungskoeffizient auf harten Materialien im nassen Zustand am geringsten und im verkoteten am höchsten war. Sämtliche Ergebnisse sind bei NILSSON (1988), zweiter Teil, auf den Seiten 45 ff. einzusehen.

Neben den SRT-Messungen führte MULITZE (1989) auch Versuche mit einem stationären und einem mobilen Gleitreibungsmessgerät durch. Außerdem wurden vorzugsweise zwei Kunstklauentypen getestet, wobei der eine aus drei mal drei dreiecksförmig angeordneten Schlossschrauben und der andere aus drei dreiecksförmig angeordneten Kunststoffabgüssen von Schweineklauen bestand. Die Messgeräte unterschieden sich in Messstreckenlänge, Antrieb, Kraft- und Datenaufnehmer. Während das stationäre Gerät den Spannungs- und somit den Kraftverlauf aufzeichnen konnte, erfolgte die Ermittlung der Reibzahl mit dem mobilen Messgerät durch Ablesen des Dynamometers, während der Prüfkörper über die Messstrecke gezogen wurde. Sowohl mit den unterschiedlichen Messgeräten als auch mit den verschiedenen Kunstklauentypen ergaben sich Unterschiede in der Reproduzierbarkeit. Grundsätzlich wurden mit dem Prüfkörper aus Schlossschrauben in trockenem und nassem Zustand geringere Gleitreibungskoeffizienten gemessen als mit dem Prüfkörper aus Kunststoffklauen. Kein eindeutiges Ergebnis konnte mit beiden Prüfkörpern hinsichtlich der Gleitreibungskoeffizienten auf trockenen und nassen Betonmaterialien erzielt werden. Eine Tabelle mit den ermittelten Gleitreibungskoeffizienten findet sich in der Originalliteratur auf Seite 110.

Auch MÜLLER (2003) führte parallel zu den SRT-Messungen Gleitreibungsmessungen mit einem neu entwickelten Gleitreibungsmessgerät. Es war der Prototyp des heute von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) eingesetzten sogenannten Comfort-Control. Er untersuchte ausschließlich harte Laufflächen aus den Materialien Beton, Spaltenboden und Gussasphalt. Er überprüfte die Beläge sowohl in nassem als auch im vor Ort anzutreffenden verkoteten Zustand und fand höhere Gleitreibungskoeffizienten auf verkotetem Beton- und Spaltenboden. Es konnte hierzu keine eindeutige Tendenz auf Gussasphaltlaufflächen festgestellt werden. Bei Messungen auf Spaltenboden orthogonal zum Schlitz konnte ein Einfluss des Schlitzanteils auf den Gleitreibungskoeffizienten gefunden werden. Die Ergebnisse beider Gleitreibungsmessungen zeigten teilweise nicht die gleichen Tendenzen auf wie jene der SRT-Messungen, so dass einer Lauffläche beispielsweise nach Gleitreibungsmessung eine genügende und nach dem SRT-Verfahren eine ungenügende Rutschfestigkeit bescheinigt wurde und umgekehrt, wobei das SRT-Gerät insbesondere auf Spaltenboden tendenziell eine schlechtere Rutschfestigkeit als das Gleitreibungsmessgerät auswies. Die gefundenen Gleitreibungskoeffizienten der unterschiedlichen Beläge unter verschiedenen Bedingungen sind bei MÜLLER (2003) auf Seite 64 ff. nachzulesen.

PHILLIPS et al. (1998) untersuchten den Einfluss der Klauengröße und der Klauenkonfirmation auf die tribologischen Eigenschaften von Rinderklauen toter Tiere. Die Messungen wurden auf Betonboden durchgeführt. Zur Beurteilung der Reibungseigenschaften wurde der Haftreibungskoeffizient herangezogen. Es konnte eine positive Korrelation zwi-

schen dem Klauenvolumen und dem Haftreibungskoeffizienten gefunden werden ($r^2 = 0,498$; $p = 0,09$). Somit neigen größere Klauen weniger zum Ausgleiten als kleinere. Andererseits war der Klauenwinkel negativ mit dem Haftreibungskoeffizienten korreliert ($r^2 = 0,444$; $p = 0,035$). Demnach sind Klauen mit steilem Klauenwinkel rutschanfälliger. Weiterhin wurde ein Zusammenhang zwischen beiden Messgrößen gefunden. Es wurde gefolgert, dass die besseren tribologischen Eigenschaften aufgrund größerer Klauen mit flachen Klauenwinkeln, wie sie bei älteren und schweren Tieren gefunden wurden, nicht auf die größere Kontaktfläche, sondern auf die im Alter zunehmende Rauheit der Klauensohle zurückzuführen sei. In Verbindung mit dem größeren Körpergewicht hätten größere und ältere Tiere eine größere Trittsicherheit. Für die Höhe der Reibungskoeffizienten sei wieder auf die Originalliteratur auf Seite 243 verwiesen.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Laufflächenzustände auf den Gang des Rindes zu untersuchen, wurden von PHILLIPS und MORRIS (2000) neben Experimenten mit Kühen auch die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten der Testbeläge gemessen (Tabelle mit entsprechenden Reibungskoeffizienten in PHILLIPS und MORRIS (2000), Seite 1769). Als Versuchvarianten wurden trockene und nasse Betonlaufflächen sowie solche mit einer Verschmutzungsauflage (Gülle) von 5 cm (und 12,5 cm ohne verwertbare Ergebnisse) untersucht. Sowohl auf trockenen als auch auf nassen Belägen waren die Haftreibungskoeffizienten größer als die Gleitreibungskoeffizienten, wobei sie im verschmutzten Zustand von den Autoren als sehr ähnlich angegeben wurden. Die Gleitreibungskoeffizienten nahmen in der Reihenfolge trockener, nasser und verschmutzter Beton zu. Auf trockenem Beton waren sowohl der Haft- als auch der Gleitreibungskoeffizient am geringsten. Auf nassem Beton konnte der größte Haftreibungskoeffizient gemessen werden, während er auf verschmutztem Beton eine mittlere Stellung einnahm. Erklärt wurde dies ähnlich wie bei BÄHR und TÜRPIZ (1976) sowie BÄHR et al. (1978). Allerdings fiel die Erklärung wesentlich präziser aus: Denn durch die aufgenommene Feuchtigkeit ändert sich die Hysterese- und die Verformungskomponente des toten Klauenhorns (vgl. Abschnitt 2.2.1). Dadurch quellen die Klauen auf und werden weicher, so dass Rauheitsspitzen leichter eindringen können und sich die Kontaktfläche erhöht. Dies äußert sich in erhöhten Gleitreibungskoeffizienten. Lebendes Klauenhorn, so die Autoren, könnte hierdurch möglicherweise weniger beeinflusst werden. An dieser Stelle sei ergänzend angeführt, dass auch WIEDER (1988) sowie KIM und SMITH (2000) feststellten, dass die Schuhsohlenhärte bei Arbeitsschuhen die Höhe des Gleitreibungskoeffizienten beeinflusst. In Ihren Versuchen nahm dieser mit zunehmender Härte des Sohlenmaterials ab.

Den Einfluss eines Klauenschnittes auf die tribologischen Eigenschaften von Klauen geschlachteter Rinder in unterschiedlichen Richtungen untersuchten PHILLIPS et al. (2000). Hierbei wurden die Haftreibungskoeffizienten vor und nach einem Klauenschnitt in vorwärts, rückwärts und seitwärts Richtung gemessen. Nach dem Schnitt waren die Haftreibungskoeffizienten für Bewegungen in alle Richtungen signifikant höher, wobei die Erhöhung in seitwärts Richtung geringer ausfiel als für Bewegungen in vorwärts und rückwärts Richtung. Zwischen den Bewegungen in vorwärts und rückwärts Richtung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Dies wurde mit einem wahrscheinlich besseren Kontakt der Klauen mit dem Boden nach dem Klauenschnitt erklärt, wobei dem ab-

schließenden Raspeln hierbei durch die Erhöhung der Sohlenrauheit ein entscheidender Effekt zugeschrieben wurde. Allerdings konnten keine Aussagen bezüglich der Haltbarkeit dieser Rutschfestigkeitserhöhung durch den Klauenschnitt gemacht werden. Die Tabelle mit den ermittelten Reibungskoeffizienten befindet sich in der Originalquelle auf Seite 608.

PHILLIPS und MORRIS (2001) untersuchten auch die Auswirkungen von unterschiedlichen Korngrößen in verschiedenen Epoxydharzanstrichen sowie ohne Mineralbeimengung auf die Höhe der Haft- und Gleitreibungskoeffizienten der Laufflächen mit diesen Anstrichen. Bei der Variante Epoxydharz ohne Mineral unterschieden sich Haft- und Gleitreibungskoeffizienten nicht voneinander. Bei den anderen Varianten waren die Gleitreibungskoeffizienten größer als die Haftreibungskoeffizienten, wobei sie bei den Anstrichen mit kleiner und mittlerer Korngröße ähnlich und bei der größten Körnung am größten waren (siehe Tabelle in Originalliteratur, Seite 626). Dies wurde durch den Widerstand der Spitzen der größeren Körnung in den Anstrichen erklärt, wodurch es zu Stick-Slip Effekten kommt und hierdurch hohe Zugkraftspitzen auftreten. Aufgrund dieser Ergebnisse und Tierbeobachtungen auf den verschiedenen Testbelägen wurde gefolgert, dass das Optimum des Gleitreibungskoeffizienten für Laufflächen zwischen 0,4 und 0,5 liegt.

BONSER et al. (2003) erfassten die Gleitreibungskoeffizienten von Schlachthofklauen auf einer Prüfstrecke, die mit Schleifpapier unterschiedlicher Körnungen belegt wurde. Als Versuchvarianten wurden die Körnungen 40 (grob) und 220 (fein) sowie trockene und nasse Klauenprüfkörper untersucht (Ergebnisse BONSER et al. (2003), Seite 255). Während die Gleitreibungskoeffizienten bei der größeren Körnung signifikant höher waren, konnte zwischen den Zuständen nass und trocken der Klauenprüflinge auf den jeweiligen Schmirgelpapieren kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

TELEZHENKO und BERGSTEN (2005) erhoben die Gleitreibungskoeffizienten von planbefestigten Betonlaufflächen, Spaltenboden und Gummimatten mittels eines Fahrtribometers unter verschmutzten Bedingungen. Die Gleitreibungskoeffizienten der drei Materialien unterschieden sich signifikant voneinander, wobei planbefestigter Beton den höchsten und Spaltenboden den niedrigsten Gleitreibungskoeffizienten hatte. Die Gummimatten nahmen eine Mittelstellung ein (Ergebnisse TELEZHENKO und BERGSTEN (2005), Seite 189).

2.4.4 Generelle Probleme und spezielle Faktoren bei Reibzahlmessungen auf Laufflächen

Unter Einbeziehung der von SCHEIL (1993) zusammengetragenen Faktoren, welche die Gleitsicherheit beim menschlichen Gang beeinflussen, den von WALLMANN und ASTRÖM (2001) dargestellten Einflussfaktoren auf die Reibungseigenschaften von Straßenbelägen und den in Abschnitten 2.1, 2.2, 2.3.2, 2.4.2 sowie 2.4.3 beschriebenen Faktoren, erfolgt eine Zusammenstellung zu berücksichtigender Einflussgrößen beim gleitsicheren Gang des Rindes. Die daraus erwachsenden Schwierigkeiten bei der Entwicklung einer geeigneten Messmethode der Rutschfestigkeit von Laufflächen in Milchviehställen sind in Tab. 4 aufgeführt:

Tab. 4: Zu berücksichtigende Faktoren bei der Beurteilung der Gleitsicherheit des Systems Klaue – Zwischenmedium – Lauffläche

Einflussfaktor Klaue und Tier	Einflussfaktor Zwischenmedium	Einflussfaktor Lauffläche	Systemfaktoren
Klauengröße, Klauenform, Klauenhärte, Klauenfeuchtigkeit, Rauheit der Klaue, Klauenschnitt, Alter, Rasse	Viskosität, Trockensubstanzgehalt, Konsistenz, Haftfähigkeit, Beladung mit Verschmutzung, Schichtdicke der Verschmutzung	Ebenheit, Gefälle, Oberflächenbeschaffenheit (Makro- und Mikrorauheit), Profilierung (Megatextur), Balkenbreite und Schlitzweite bei Spaltenboden, Entmistungssystem, Entmistungshäufigkeit, Material, Festigkeit, Härte, Zustand	Temperatur, Feuchtigkeit, Flächenpressung in Abhängigkeit von Gewicht und Klauengröße, Ernährungs- und Leistungsniveau, Gleitgeschwindigkeit

Der größte Nachteil bei mobilen Reibzahlmessgeräten ist, wie bereits im Abschnitt 2.4.2 dargelegt, die mangelnde Simulation der real auftretenden Bedingungen beim Gang und beim Ausgleiten, die sich durch die ständig wechselnden Kontakt- und Belastungsbedingungen ergeben (vgl. Abschnitt 2.1.1). Dies betrifft gleichermaßen die Reibzahlmessungen für gleitsicheres Gehen beim Menschen als auch beim Rind. Insbesondere ALBUTT et al (1990), MCKEE und DUMLOW (1995) sowie BONSER et al. (2003) kritisieren, dass die Aussagen der Gleitreibungsmessungen als häufigst genutztes Messverfahren zur Beurteilung der Laufflächenrutschfestigkeit infolge der nicht vorhandenen Gangsimulation auf Flächen unterschiedlichen Verschmutzungsgrades nicht der Realität entsprechen. Denn auf verkoteten Flächen waren die von den Autoren BÄHR und TÜRPIZ (1976), BÄHR et al. (1978), NILSSON (1988) sowie PHILLIPS und MORRIS (2000) gemessenen Gleitreibungskoeffizienten im Vergleich zu gewässerten oder trockenen Böden am höchsten, was auf die höchste Rutschfestigkeit in diesem Zustand hindeutet. Diese Beobachtungen wurden nicht nur von Autoren gemacht, die echtes Klauenmaterial als Prüfkörper einsetzten, sondern auch von denen, die Kunstklauen verwendeten. Diese Ergebnisse der Gleitreibungsmessungen stehen im Widerspruch zu denjenigen, die aus Tierbeobachtungen zur Beurteilung der Rutschfestigkeit von Laufflächen abgeleitet wurden (vgl.

Abschnitt 2.1.2). Weitere Einflussfaktoren auf den gleitsicheren Gang des Rindes gehen vom Tier, dessen Klauenbeschaffenheit und den mechanischen Eigenschaften des Klauenhorns selbst aus (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.4.3). Da es sich bei dem Reibpartner Klaue im System Klaue – Zwischenmedium – Boden um ein natürliches Material handelt, ist die Variation der mechanischen Klauenhorneigenschaften und der Klauenkonfirmation verglichen mit standardisierten Schutzschuhen, die im Bereich der Arbeitssicherheit als Prüfkörper eingesetzt werden, relativ hoch. Dies erschwert die Quantifizierung der Eigenschaften und die Konstanthaltung der Versuchsbedingungen. Im Hinblick auf das Zwischenmedium erachten WALLMANN und ASTRÖM (2001) im Straßenverkehrswesen Messungen der Reibeigenschaften von Straßenbelägen nur unter nassen Bedingungen als sinnvoll, weil trockene Fahrbahnen kein Problem darstellen und das Gleitrisiko erst unter nassen Bedingungen erhöht ist. CHANG (2004) bestätigt dies für den Bereich der Arbeitssicherheit, da erst nasse und verschmutzte Böden ein erhöhtes Ausgleitrisiko bergen. Bei Laufflächen tritt ein erhöhtes Ausgleitrisiko unter verschmutzten Bedingungen auf. Messungen der Rutschfestigkeit von Laufflächen unter diesen Praxisbedingungen gestalten sich im Gegensatz zu jenen in den Bereichen Straßenverkehrswesen oder Arbeitssicherheit sehr schwierig, da die Messbedingungen selbst die Genauigkeit, die Wiederholbarkeit und die Aussagefähigkeit der Messergebnisse beeinträchtigen (vgl. u. a. Abschnitt 3.1.1).

2.5 Erfassung von Oberflächen

Neben den klassischen berührenden Tastschnittgeräten zur Erfassung technischer Oberflächen gibt es verschiedene berührungslose Messverfahren, die für diese Aufgabe eingesetzt werden können. Grundsätzlich können die Messsysteme nach der Messwertaufnahme (mechanisch und optisch) unterschieden werden. Innerhalb der optischen Messsysteme werden wiederum Differenzierungen nach der verwendeten Lichtquelle vorgenommen (Lasermesssysteme, Streifenprojektion, Weißlichtinterferrometrie oder konfokale Messmikroskopie). Weiterhin werden punktweise messende Systeme (taktile und optische Messverfahren), zeilenweise messende Systeme (Lichtschnittverfahren) und Feldmesssysteme, die auch als bildgebende Messsysteme bezeichnet werden (Streifenprojektion, Weißlichtinterferrometrie oder konfokale Messmikroskopie), unterschieden. Punktmessende Verfahren zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit aus. In Abhängigkeit von den eingestellten Parametern (Punktabstand und zu vermessende Fläche) kann die Messdauer allerdings sehr lang (einige Stunden) sein (NEUDECKER et al., 2001). Der Vorteil von Feldmessverfahren liegt in der gleichzeitigen Aufnahme von Höheninformationen in einem größeren Bereich der Topografie, während bei Punktmessverfahren jede Höheninformation einzeln generiert werden muss. Hieraus resultiert eine erheblich kürzere Messdauer beim Feldmessverfahren. Bei den Lasermessverfahren, die je nach Optik zu den punkt- oder zeilenweise messenden Verfahren gezählt werden können, erfolgt wiederum eine Unterteilung der Messprinzipien in Laser-Interferrometrie, holografische Interferrometrie, Speckle-Messtechnik, Laser-Triangulation, Laser-Doppler-Verfahren und Laserspektroskopie.

Alle Verfahren haben aufgrund ihres Messprinzips und ihrer Funktionsweise ihre speziellen Vor- und Nachteile hinsichtlich verschiedener Anwendungen und Messaufgaben. Diese sind nach der Sichtung der Literatur (DONGES und NOLL, 1993; WAGNER, 1996; PESTORF, 1997; STAEVES, 1998; FISCHLEIN, 2000; NEUDECKER et al., 2001; XIE, 2002; SCHRAMM, 2002; KLEIN, 2003) in Tab. 5 zusammengefasst. Außerdem werden die verschiedenen Messsysteme im Hinblick auf die Topografieerfassung von Laufflächen in belegten Milchviehställen beurteilt. Die Funktionsprinzipien der einzelnen Messsysteme sind in der genannten Literatur beschrieben. Unterschiede bzw. Vor- und Nachteile der einzelnen Messsysteme ergeben sich im Wesentlichen durch: Geschwindigkeit der Messung, mögliche Größe der Messfläche und Tastabstände, Messfleckdurchmesser, Tastnadeldradius, Lagerung des Tastsystems (Bezugsebenen- oder Gleitkufensystem), Störanfälligkeit der Geräte gegenüber Umwelteinflüssen wie beispielsweise Schwingungen, Einfluss von Flüssigkeiten oder Verschmutzungen auf dem zu vermessenden Objekt, Einfluss unterschiedlich reflektierender Proben, maximal messbare Flankenwinkel.

Tab. 5: Vor- und Nachteile ausgewählter Oberflächenmesssysteme hinsichtlich der Topografieerfassung von Laufflächen

Messsystem	Messprinzip	Vorteil	Nachteil
Tastschnittgerät	Abtastung des Messobjektes mittels mechanisch aufgehängter Tastnadel	hohe Messgenauigkeit, Verfahren und Kenngrößen genormt und anerkannt	Messzeit abhängig von der gewünschten Punktanzahl und der Messfläche (kann sehr lange dauern), keine 3D-Auswertung möglich
Laser-Triangulation (punktmessend)	Abtastung des Messobjektes mittels Laserspot	hohe Messgenauigkeit, Verfahren und Kenngrößen genormt und anerkannt	Messzeit abhängig von der gewünschten Punktanzahl und der Messfläche (kann sehr lange dauern), keine 3D-Auswertung möglich
Laser-Triangulation, Laser-Linienscanner (zeilenweise messend)	Abtastung des Messobjektes mittels Laserlinie	kurze Messdauer	geringere Auflösung als bei punktmessendem System
Streifenprojektion	Projektion eines Streifenmusters, Messung des vom Messobjekt verzerrten Streifenmusters	Schnelligkeit	festgelegtes Streifengitter ist unabhängig vom verwendeten Objektiv, d.h. bei Vergrößerung des Bildfeldes verschlechtert sich die vertikale und laterale Auflösung
Weißlichtinterferometer	Interferenz eines Referenzlichtstrahls mit dem vom Messobjekt reflektierten Lichtstrahl	hohe Messgenauigkeit	kleines Messfeld, stationäre Laborgeräte, geringe Messgeschwindigkeit, empfindlich gegen äußere Einflüsse
Konfokales Messmikroskop	Messung der Intensität des vom Messobjekt reflektierten Lichtstrahls	hohe Messgenauigkeit	kleines Messfeld, stationäre Laborgeräte, geringe Messgeschwindigkeit, empfindlich gegen äußere Einflüsse

Aufgrund der Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.1.1) und der unterschiedlichsten Einschränkungen der anderen Messprinzipien schien für die zu bearbeitende Aufgabenstellung nur ein laseroptisches Verfahren in Frage zu kommen. Eines der Lasermessprinzipien ist die sogenannte Laser-Triangulation. LAMPALZER (2004) empfiehlt den Einsatz von Laser-Triangulations-Sensoren auf technisch „unkooperativen“ Flächen (technische Oberflächen, die infolge von Materialstrukturen und Bearbeitungsspuren eine bestimmte Textur aufweisen) bei gleichzeitig mittlerem bis großem Messbereich für die Messaufgabe. Denn im Vergleich zu Flächensensoren mit flächenhafter Lichtquelle bieten Laser-Triangulations-Sensoren mit sequentiell linienartiger Beleuchtung eine wesentlich höhere Leuchtdichte und somit ausreichend Licht bei großem Messfeld und großem Arbeitsabstand. Da das Laser-Triangulationsprinzip dem in dieser Arbeit eingesetzten Topografiemessgerät zu Grunde liegt, sollen die Grundlagen nachfolgend dargestellt werden. Außerdem werden Merkmale zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften von technischen Oberflächen sowie Messgrößen zu deren Quantifizierung und die Erkenntnisse bisheriger Forschungen zur Oberflächenrauheit von Stallböden vorgestellt.

2.5.1 Prinzip der Laser-Triangulation

Die Erfassung der Oberfläche mittels Laser-Triangulation funktioniert nach folgendem Prinzip (Abb. 6): Ein Strahl wird von einer Laserdiode über eine Fokuslinse ausgesendet und auf die Oberfläche eines Messobjektes projiziert. Abhängig von den optischen Eigenschaften der Oberfläche, den Materialeigenschaften und der Wellenlänge des Lasers wird das Laserlicht am Ort des Auftreffens in unterschiedlichen Anteilen diffus oder gerichtet gestreut bzw. reflektiert. Dies äußert sich in einer sogenannten Streukeule. Der entstehende Leuchtfleck wird unter einem vorgegebenen Winkel zur Einfallrichtung durch eine Abbildungslinse auf dem Positionsdetektor abgebildet. Dieser sogenannte Triangulationswinkel γ ist gerätespezifisch und muss so gewählt sein, dass eine für die Erkennung ausreichende Intensität durch die Abbildungslinse zum lichtempfindlichen Positionsdetektor geleitet wird. Die Lage des auf dem Positionsdetektor abgebildeten Lichtpunktes ist von der Entfernung des Messobjektes in z-Richtung abhängig. Eine Abstandsänderung zwischen dem Messwertempfänger und der Oberfläche eines Messobjektes (Punkt 1 \rightarrow Punkt 3) hat eine Lateralverschiebung des abgebildeten Lichtpunktes auf dem Positionsdetektor zur Folge (Punkt 1' \rightarrow Punkt 3'). Aus der Lage des Lichtpunktes und der bekannten Abbildungsgeometrie sowie der Einstrahlrichtung lässt sich über trigonometrische Beziehungen der Abstand des Messobjektes zu einer Referenzebene berechnen.

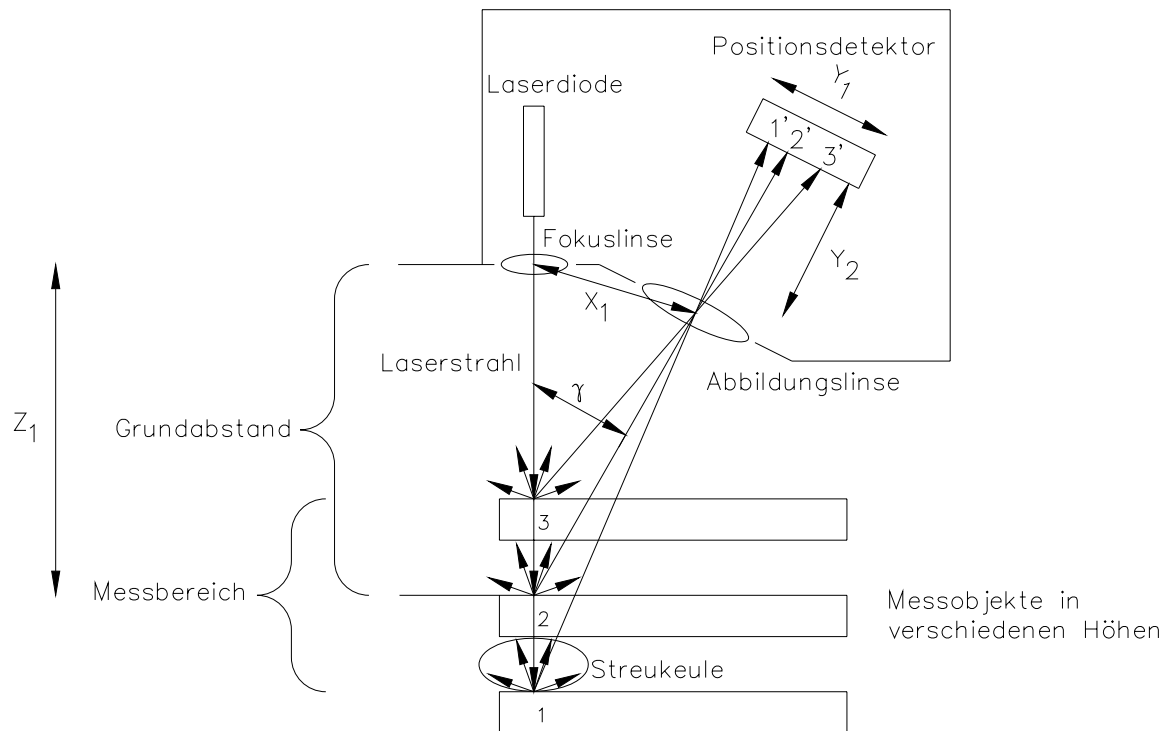


Abb. 6: Messprinzip bei der Laser-Triangulation

Angenommen Z_1 sei der gesuchte Abstand zu einem Messobjekt, dann ergibt sich dieser folgendermaßen:

$$\frac{Z_1}{X_1} = \frac{Y_2}{Y_1} \longrightarrow Z_1 = \frac{Y_2}{Y_1} X_1$$

Darin sind:

- Z_1 = gesuchter Abstand
 - Y_1 = Lage des auf dem Positionsdetektor abgebildeten Lichtpunktes
 - Y_2 = Abstand zwischen Abbildungslinse und Positionsdetektor
 - X_1 = Abstand zwischen Laserstrahl und Abbildungslinse
- } gerätespezifische Kenngrößen

Teilespezifische Maße können mit diesem Verfahren jedoch nicht direkt, sondern erst in nachgelagerten Berechnungsoperationen ermittelt werden. Grundlage des Laser-Triangulationsprinzips ist die sogenannte Scheimpflug-Bedingung. Sie beschreibt die Abbildungsgeometrie unter Anwendung optischer Gesetzmäßigkeiten und der gerätespezifischen Optik. Somit bildet sie die Voraussetzung für eine scharfe Abbildung der Lichtpunkte auf dem Positionsdetektor. Nach ihr ist die Neigung des Positionsdetektors so zu wählen, dass sich Einfallrichtung, Achse in Objektivenebene und die Gerade, auf die der Detektor ausgerichtet ist (wird durch die Beziehung beschrieben) in einem Punkt schnei-

den (DONGES und NOLL, 1993). Auf diese Weise wird gewährleistet, dass auch für verschiedene Abstände des Messobjektes der Lichtpunkt auf dem Positionsdetektor scharf abgebildet wird.

Zeilenweise messende Triangulations-Sensoren sind eine Erweiterung der punktuell messenden Systeme. Sie erfassen die Messobjekte mit einer zusätzlichen Dimension. Hierfür ist jedoch zusätzlich eine Relativbewegung zwischen Messwertaufnehmer und Messobjekt nötig. Sie tasten die Oberfläche nicht mit einem Laserpunkt, sondern mit einer Laserlinie ab. Die Aufweitung der punktförmigen Strahlenquelle zu einer Lichtzeile kann entweder durch eine Zylinderlinse oder durch hochfrequente Ablenkung mittels eines rotierenden Prismas bzw. eines rotierenden Spiegels erfolgen (KLEIN, 2003). Abb. 7 zeigt die Funktionsskizze eines Laserscanners, wie er in dieser Arbeit verwendet wurde.

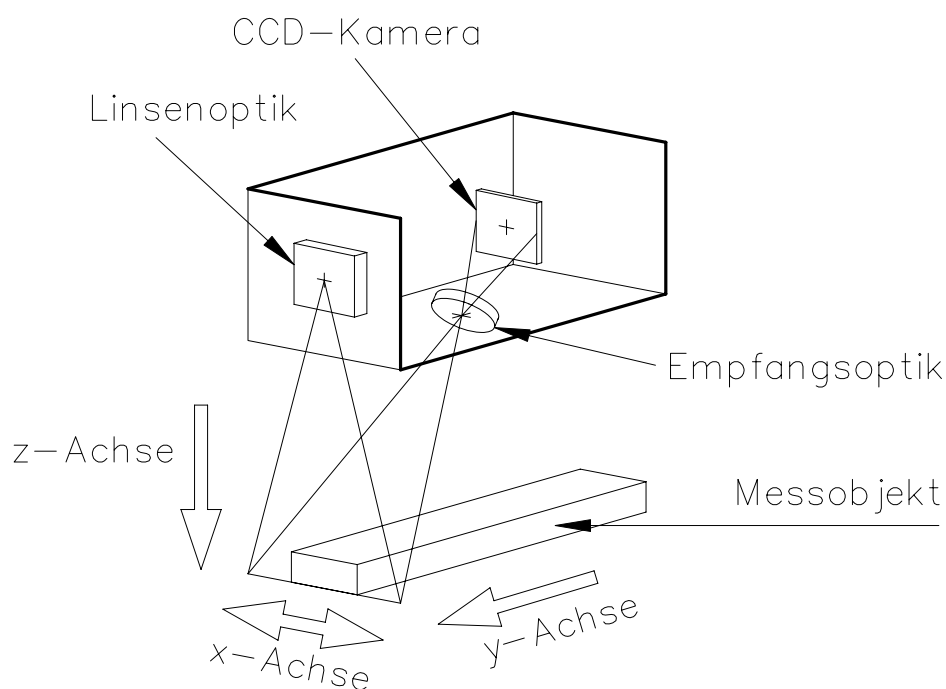


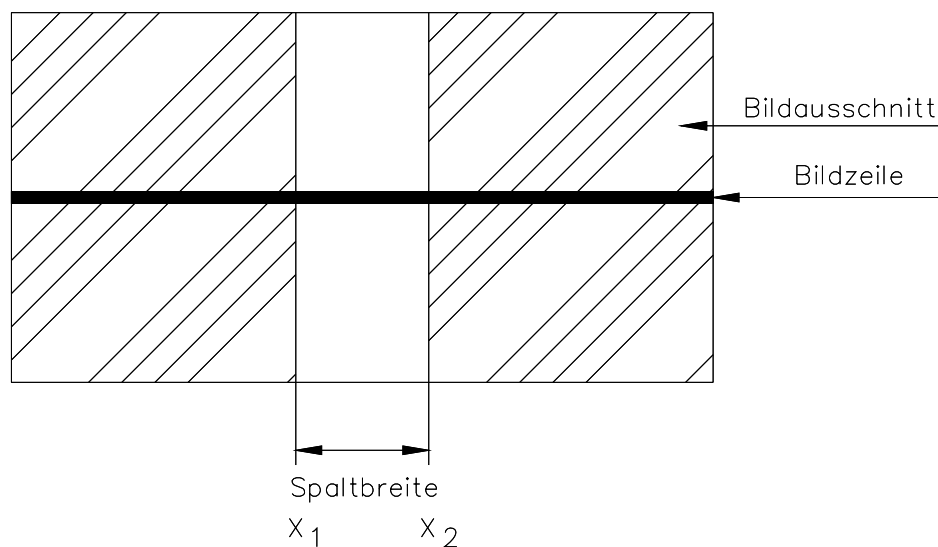
Abb. 7: Funktionsskizze eines einfachen Laserlinien-Triangulationsscanners

Nach dem Auftreffen wird die Lichtzeile von der Oberfläche des Messobjektes reflektiert und auf einem CCD-Array oder PSD (positionsempfindliche Dioden) abgebildet. Dies ist gegenüber dem Messstrahl um einen gerätespezifischen Triangulationswinkel versetzt angeordnet. Die Auflösung und die Genauigkeit eines solchen Messsystems sind in hohem Maße von dem zu erfassenden Messvolumen und der Linienbreite abhängig (KLEIN, 2003; DIN ISO 13473-3). Die tatsächlich realisierbare Genauigkeit ist jedoch in der Regel deutlich geringer als jene von Triangulations-Sensoren mit punktförmiger Abtastcharakteristik. Der Grund hierfür liegt bei vorgegebener Größe eines Positionsdetektors in der begrenzt verfügbaren Pixelanzahl, die von Pixelgröße und -abstand abhängig ist. Somit sind

die Auflösung und die Genauigkeit in z-Richtung und die Linienbreite, also die Auflösung in x-Richtung, gegenläufige Größen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

2.5.2 Bildverarbeitung mit CCD-Technik

Als Positionsdetektoren in den Messwertaufnehmern können sowohl positionsempfindliche Dioden (PSD) oder CCD-Zeilen Anwendung finden. Während sich PSDs in der Regel durch höhere Messraten auszeichnen, erlauben CCD-Zeilen den direkten Einsatz digitaler Korrekturalgorithmen beispielsweise zur Unterdrückung von Streulicht (KLEIN, 2003). Somit sind diese vergleichsweise robuster gegenüber Messfehlern. CCD-Elemente befinden sich in den als Positionsdetektoren verwendeten CCD-Kameras. Sie bestehen aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Elemente (sogenannte Pixel) auf kleinstem Raum. Deren geometrische Anordnung ist in höchstem Maße präzise. Auf diese Weise wird ein Raster gebildet, wobei die Pixel entweder als Zeile oder als Matrix angeordnet sind. Nach dem Auftreffen des reflektierten Lichtes wird dieses von den CCD-Elementen abgebildet. Das aufgenommene Bild wird durch ein Interface digitalisiert und als Datenfeld an einen Rechner übergeben und kann so mit entsprechender Software zu Oberflächeninformationen in Form von verschiedenen Messgrößen weiterverarbeitet werden. Nachfolgend soll die Bildverarbeitung an einem Beispiel erläutert werden (Abb. 8).

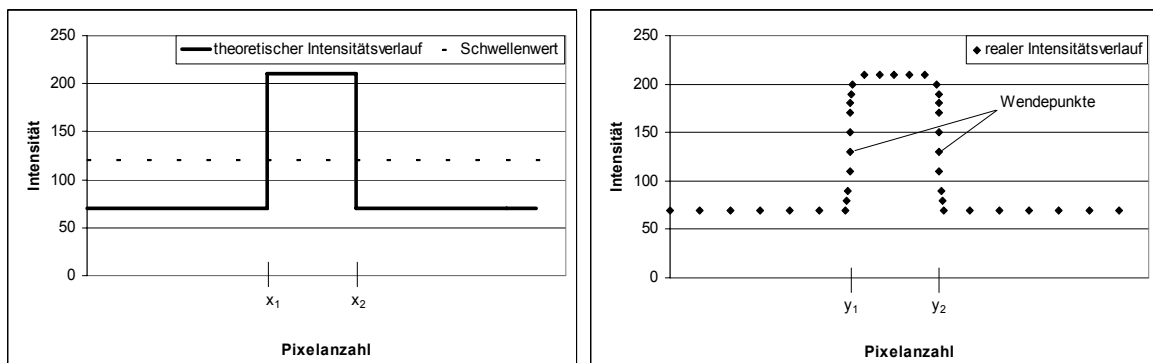


Quelle: verändert nach REPPENING (1994)

Abb. 8: Abbildung eines Spaltes bei der Informationsverarbeitung durch CCD-Zeilen

Nachdem das Bild digitalisiert wurde, enthält jeder Bildpunkt der Matrix eine Helligkeitsinformation in Form eines Grauwertes, der zwischen 0 (schwarz) und 255 (reinweiß, volle Helligkeitssättigung) liegt. Der Bildausschnitt ist eindeutig in verschiedene Helligkeitsstufen trennbar. Die gesuchte Spaltbreite ist der Abstand zwischen den beiden dunklen (hier

schräftigt dargestellten) Bildbereichen. Durch die rechnerische Ermittlung der hellen Bildpunkte (Pixel) und unter Einbeziehung eines Skalierfaktors kann die Spaltenbreite in ein Längenmaß umgerechnet werden (REPPENING, 1994). Grundlage dieser Ermittlung ist in diesem Beispiel eine Schwellenwertanalyse: Sämtliche Pixel mit einem Grauwert bzw. einer Intensität > 120 liegen innerhalb des Spaltes, alle darunter außerhalb. Die Spaltenweite ergibt sich aus der Subtraktion der Pixel $x_2 - x_1$. Durch diesen „Abzählvorgang“ kann jedoch nur eine pixelgenaue Messgenauigkeit erzielt werden, denn Spaltenkanten können auch genau durch ein Pixel der CCD-Zeile verlaufen. Dies ist ein großes Manko, was bei komplizierteren Messaufgaben inakzeptabel ist. Eine Steigerung der Messgenauigkeit kann mit dem sogenannten Subpixeling erreicht werden (REPPENING, 1994). Zur Veranschaulichung dieses Problems zeigt Abb. 9 den theoretischen und den realen Intensitätsverlauf innerhalb einer Bildzeile.



Quelle: verändert nach REPPENING (1994)

Abb. 9: Theoretischer und realer Intensitätsverlauf einer Bildzeile bei der Informationsverarbeitung durch CCD-Zeilen

Charakteristisch für das Subpixeling ist der Intensitätsverlauf im Bereich der Kanten. Im Gegensatz zum theoretischen Intensitätsverlauf gibt es beim realen Intensitätsverlauf keine Sprünge an den Kanten, da die Abbildung der Kante nicht einem einzelnen Pixel zugeordnet, sondern im betreffenden Bereich mittels Softwarealgorithmen berechnet und durch Interpolation geglättet wird. Dies kann auf der Basis der Wendepunkte innerhalb des Intensitätskurvenverlaufes erfolgen. Somit wird das Ergebnis der Spaltenbreite in Pixeln als Dezimale ausgedrückt (REPPENING, 1994).

2.5.3 Merkmale zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften von technischen Oberflächen

In DIN 4760 werden Begriffe und ein Ordnungssystem zur Unterscheidung der verschiedenen Gestaltabweichungen bei Oberflächen festgelegt. Weiterhin sind in DIN 4761 Begriffe zur Beschreibung des Oberflächencharakters festgelegt. Allerdings soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen werden. Vielmehr sollen die in der Industrie verwendeten verschiedenen Kenngrößen zur Charakterisierung und Bewertung von Oberflächeneigenschaften im Mittelpunkt dieses Abschnittes stehen.

Laut STAEVES (1998) wird eine Topografie durch die Summe ihrer Eigenschaften charakterisiert, wobei die jeweilige Eigenschaft durch ein Merkmal und dessen Wert beschrieben wird. Grundsätzlich können die geometrischen Topografieeigenschaften von Oberflächen nach DIN 4761 in mehrere Merkmale unterteilt werden. STAEVES (1998) schlägt den in Tab. 6 zusammengestellten Satz von Merkmalen zur einheitlichen Bezeichnung von Oberflächeneigenschaften vor:

Tab. 6: Begriffe zur einheitlichen Bezeichnung der geometrischen Eigenschaften von Blechoberflächen

Merkmal	Wert	
	hoher Wert	niedriger Wert
Abgeschlossenheit	geschlossen	offen
Leere	leer	voll
Geschlossener Leerflächenanteil	hoher Anteil	geringer Anteil
Feinheit	fein	grob
Dichte der Strukturelemente	dicht	weit
Größe der Strukturelemente	große Elemente	kleine Elemente
Gleichmäßigkeit	stochastisch	deterministisch
Richtung	gerichtet, anisotrop	ungerichtet, isotrop
Welligkeit	wellig	eben

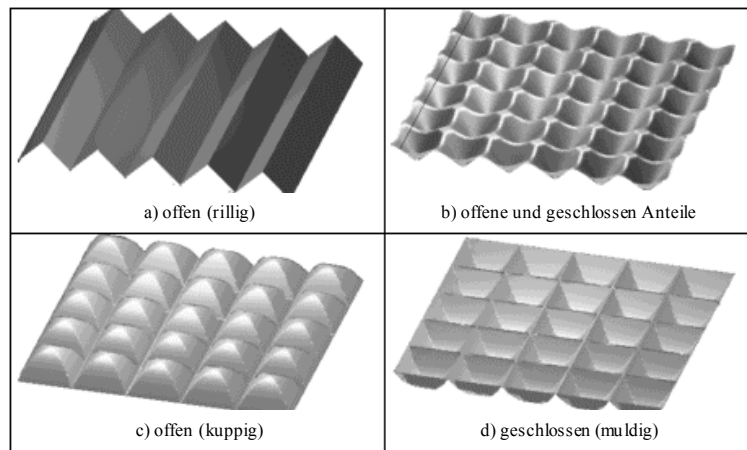
Quelle: STAEVES (1998)

Grundsätzlich bietet sich diese Nomenklatur auch zur Beschreibung der Topografieeigenschaften von Laufflächen an. Im Folgenden soll eine knappe Beschreibung der Oberflächenmerkmale und die Bedeutung der Merkmalsausprägung für die Oberflächentopografie erfolgen. Es werden nur die Begriffe behandelt, die im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind.

Abgeschlossenheit

Zur Unterscheidung werden in DIN 4761 die Begriffe rillig, kuppig, muldig und wellig definiert, wobei laut STAEVES (1998) der Begriff wellig nur zur Beschreibung der langwelligen Anteile in einer Topografie genutzt werden sollte, um Verwechslungen zu vermeiden. Bei einer kuppigen bzw. rilligen Topografie sind die einzelnen Strukturelemente durch tiefe Gräben miteinander verbunden, die zum Messrand hin offen sind, sodass es

auch in einer tieferen Schnittebene ein zusammenhängendes, zum Rand hin offenes Leervolumen gibt (Abb. 10). Solche Topografien werden als offen bezeichnet. Eine geschlossene bzw. muldige Topografie weist einzelne nicht ineinander fließende Vertiefungen auf, die sich in einer ebenen Plateaufläche befinden.

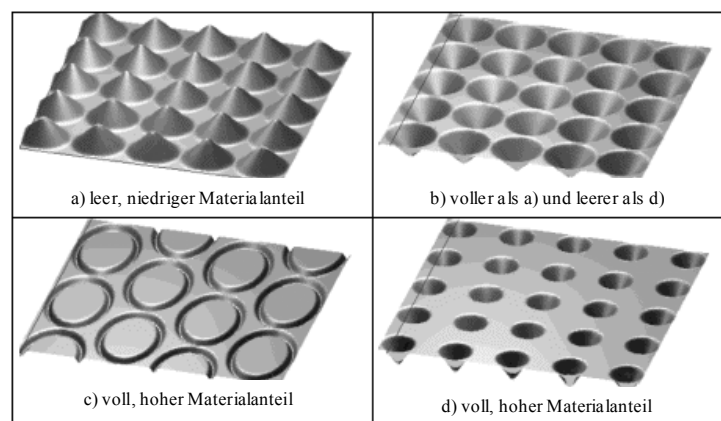


Quelle: verändert nach STAEVES (1998)

Abb. 10: Beispieloberflächen für das Merkmal Abgeschlossenheit

Leere

Weist eine Topografie einen großen Anteil an Leervolumen auf, so wird sie als leer bezeichnet (Abb. 11). Sie unterscheidet sich von einer vollen Topografie durch einen geringeren Traganteil und einen höheren Profilleeregrad. Im Gegensatz hierzu ist eine volle Topografie durch ein hohes Materialvolumen charakterisiert. Beispielsweise sind Topografien, die hauptsächlich aus Plateaus oder großen Kuppen mit vereinzelt Riefen bestehen als voll, solche mit großen Mulden und einzelnen Spitzen als leer anzusprechen.

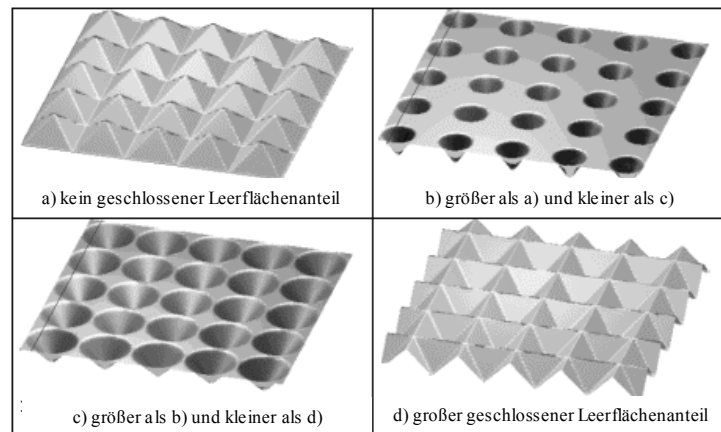


Quelle: verändert nach STAEVES (1998)

Abb. 11: Beispieloberflächen für das Merkmal Leere

Geschlossener Leerflächenanteil

Der geschlossene Leerflächenanteil hängt von der Abgeschlossenheit und der Leere ab (Abb. 12). Die zur Angabe des Maximums des geschlossenen Leerflächenanteils verwendete Messgröße α_{clm} ist aus dem mechanisch-rheologischen Modell abgeleitet (vgl. Abschnitt 2.2.2). Sie gibt an, wie groß das Leervolumen ist, in dem während der Blechumformung hydrostatischer Druck zur Schmierung und Verminderung des Reibwertes aufgebaut werden kann.



Quelle: verändert nach STAEVES (1998)

Abb. 12: Beispieloberflächen für das Merkmal geschlossener Leerflächenanteil

Feinheit

Feine Topografien bestehen aus vielen kleinen oder überlappenden Strukturelementen wie Mulden, Krater, Kuppen oder Rillen, während grobe von wenigen, dafür aber großen Elementen gebildet werden (Abb. 13). Die Anzahl der Spitzen und Täler der betrachteten Oberfläche sind also entscheidend. Größe und Dichte der Strukturelemente sind die ausschlaggebenden Komponenten des Merkmals Feinheit. Diese bilden wiederum zwei weitere Merkmale einer Topografie.

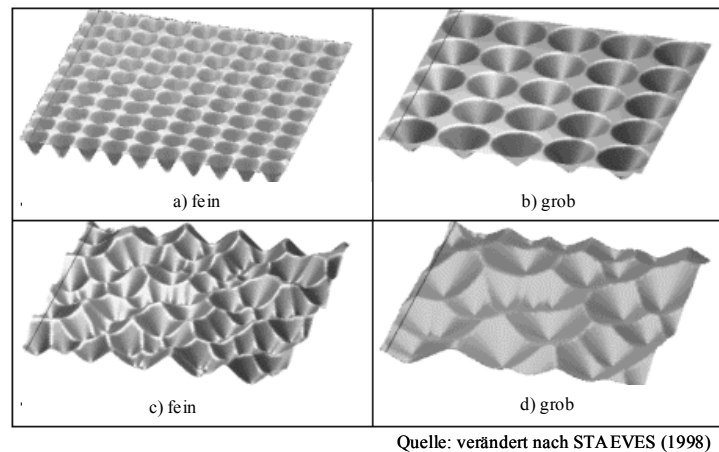


Abb. 13: Beispieloberflächen für das Merkmal Feinheit

Dichte und Größe der Strukturelemente

Dichte und Größe der Strukturelemente hängen stark miteinander zusammen (Abb. 14 und Abb. 15). Bei dichten Topografien liegen die Strukturelemente nahe beieinander, während sie bei weiten größere Abstände aufweisen. Wenn Strukturelemente getrennt voneinander angeordnet sind, wird von einer isolierten Topografie gesprochen. Liegen die Elemente so nahe beieinander, dass sie bereits ineinander übergehen, wird sie als überlappend bezeichnet. Eine feine Topografie kann sowohl aus kleinen isolierten als auch aus kleinen überlappenden Strukturelementen bestehen, während eine grobe Topografie sowohl von großen isolierten als auch von großen überlappenden Elementen gebildet werden. Allerdings kann eine feine Oberfläche auch mit großen überlappenden, eine grobe auch mit kleinen isolierten Strukturelementen erreicht werden (STAEVES, 1998).

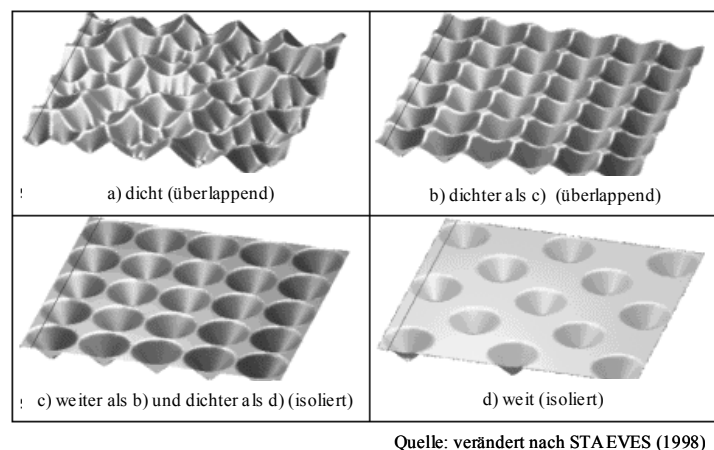


Abb. 14: Beispieloberflächen für das Merkmal Dichte

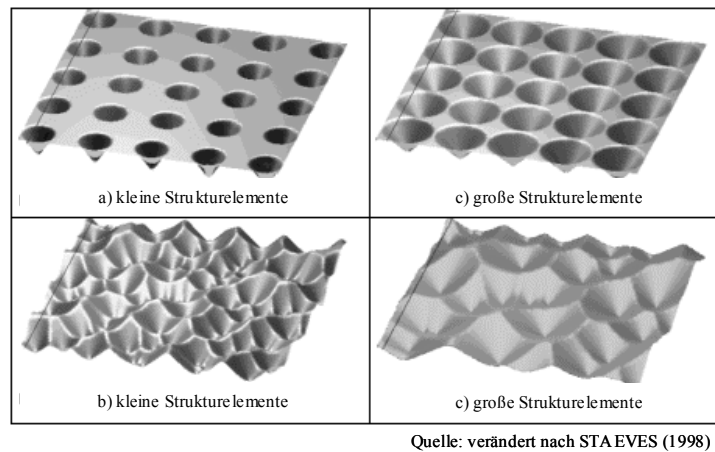


Abb. 15: Beispieloberflächen für das Merkmal Größe der Strukturelemente

Gleichmäßigkeit

Zur Beschreibung dieses Merkmals werden zum einen die Begriffe „gleichmäßig“ und „ungleichmäßig“ (Definition laut DIN 4761) oder auch „deterministisch“ und „stochastisch“ (in der Blechumformung) verwendet. Zu gleichmäßigen bzw. deterministischen Topografien zählen solche, bei denen in mehreren Richtungen Geometriemerkmale in regelmäßigen Abständen auftreten. Unter stochastischen bzw. ungleichmäßigen Topografien werden einzelne Strukturmerkmale verstanden, die sich nicht in regelmäßigen Abständen wiederholen.

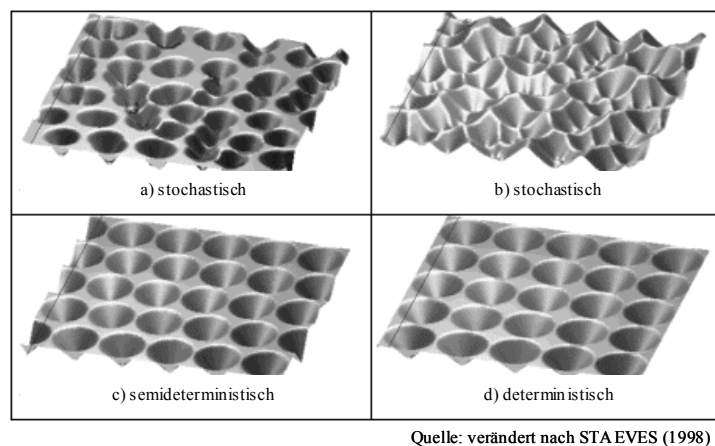
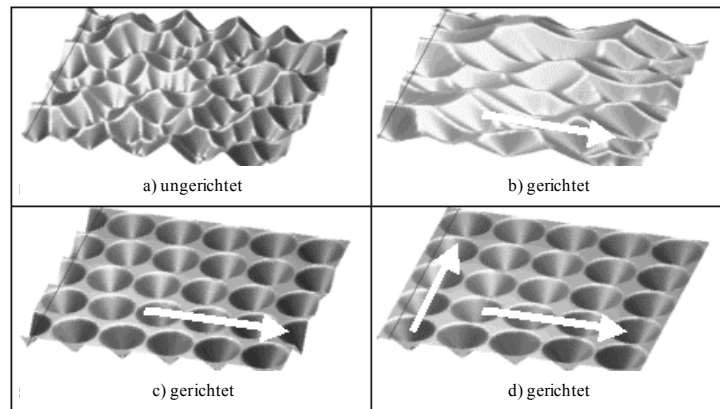


Abb. 16: Beispieloberflächen für das Merkmal Gleichmäßigkeit

Richtung

In DIN 4761 finden zur Beschreibung der Richtung die Begriffe „ungerichtet“ und „gerichtet“ Verwendung, in der Blechumformung werden synonym die Begriffe „isotrop“ und „anisotrop“ gebraucht. Unter ungerichteten bzw. isotropen Oberflächen werden solche Oberflächen verstanden, die in allen Richtungen gleiche geometrische Eigenschaften auf-

weisen. Im Gegensatz dazu stehen gerichtete bzw. anisotrope Oberflächen, die in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche geometrische Eigenschaften zeigen.

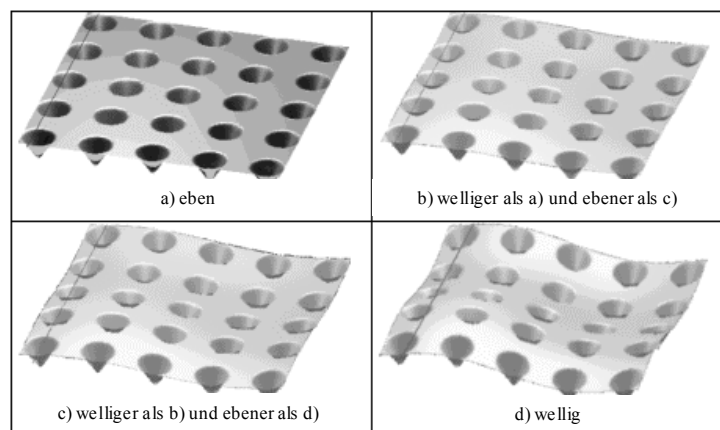


Quelle: verändert nach STAEVES (1998)

Abb. 17: Beispieloberflächen für das Merkmal Richtung

Welligkeit

Die o. g. Merkmale beziehen sich auf die Rauheit einer Topografie. Langwellige Gestaltabweichungen werden in der Messtechnik mittels Filteralgorithmen, die eine bestimmte Grenzwellenlänge besitzen, von der Rauheit getrennt. Zur Beschreibung der Welligkeit werden die Begriffe „eben“ und „wellig“ verwendet (Abb. 18). Während bei ebenen Oberflächen langwellige Gestaltabweichungen nur eine geringe Amplitude aufweisen, zeigen diese bei welligen Oberflächen große Amplituden.



Quelle: verändert nach STAEVES (1998)

Abb. 18: Beispieloberflächen für das Merkmal Welligkeit

2.5.4 Kenngrößen zur Beschreibung technischer Oberflächen

Es gibt eine Vielzahl von Kenngrößen zur Beschreibung der Topografieeigenschaften von technischen Oberflächen. Um die Eigenschaften einer Oberfläche beurteilen zu können, ist es daher unerlässlich, die Informationsfülle des aufgenommenen Oberflächenprofils zu verdichten und auf die wichtigsten, für den jeweiligen Anwendungsbereich funktionsrelevanten Eigenschaften zu reduzieren. Eine Auswahl der Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächenmerkmale der untersuchten Laufflächen wird in Abschnitt 3.4.2 getroffen.

Je nach Anwendungsbereich sind verschiedene Kenngrößen national und international genormt. Dies trifft insbesondere auf Kenngrößen zu, die auf Basis von Rauheitsmessungen mit sogenannten taktilen Messgeräten (mechanische Tastschnittgeräte) in der Keramikindustrie oder der Metallverarbeitung ermittelt werden. Mit zunehmenden Qualitätsanforderungen an die Oberflächen, beispielsweise für die Lackierung oder bei umformtechnischen Prozessen, ist eine exakte Beschreibung der Topografieoberfläche notwendig, um die für die Bearbeitung erforderlichen Eigenschaften zu gewährleisten (PESTORF, 1997; NEUDECKER et al., 2001). Hierfür liefern konventionelle, genormte Kenngrößen (2D-Rauheitskenngrößen) nur bedingt funktionelle Aussagen (NEUDECKER et al., 2001) oder sind nicht in der Lage, die Texturen exakt zu charakterisieren (POPP et al., 1999). Daher wurden in der Vergangenheit im Bereich der Blechumformung funktionelle Kenngrößen entwickelt, die auf der Basis einer dreidimensionalen Oberflächenerfassung berechnet werden und für das tribologische Verhalten der Topografie entscheidend sind (SOBIS, 1996; WAGNER, 1996; PESTORF, 1997).

Grundsätzlich werden die Oberflächenkenngrößen in horizontale, vertikale und hybride Kenngrößen sowie reine 3D-Kenngrößen (Flächenkenngrößen) eingeteilt. In diesem Abschnitt soll ein Überblick über wichtige Oberflächenkenngrößen gegeben werden. Die im Weiteren aufgeführten 2D-Kenngrößen entstammen überwiegend den Normen DIN EN ISO 4287, DIN EN ISO 13565-2, DIN EN ISO 13565-3 und E DIN EN 10049, die reinen 3D-Kenngrößen (Flächenkenngrößen) den Arbeiten von SOBIS (1996), WAGNER (1996) und PESTORF (1997). Grundlage dieser Kenngrößen ist das mechanisch-rheologische Modell (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese sind allerdings noch nicht genormt. Gleiches gilt für die vertikalen Kenngrößen im 3D-Fall. Daher kann es gegenüber anderen Veröffentlichungen zu Abweichungen bei der Benennung der Kenngrößen kommen. Bereits bei den genannten Autoren differieren die Bezeichnungen der Kenngrößen teilweise. Daher werden als Quellen für die in Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9 und Tab. 10 aufgeführten Kenngrößen lediglich die Quellen mit identischen Benennungen für die einzelnen Kenngrößen genannt. Für Details bezüglich der Berechnungsgrundlagen und der Berechnungsalgorithmen der verschiedenen Kenngrößen sei auf die Normen bzw. die Arbeiten der genannten Autoren verwiesen. Dort finden sich zum Teil noch weitere Kenngrößen.

Die Einteilung in horizontale, vertikale und hybride 2D-Kenngrößen ergibt sich aus der Berücksichtigung der Messpunkte bei der Kenngrößenberechnung. Während bei den horizontalen Oberflächenkenngrößen nur die Lage der Punkte in der Ebene berücksichtigt wird, ist bei den vertikalen Messgrößen lediglich die Höhe jedes Einzelpunktes von Be-

deutung. Bei den hybriden Kenngrößen geht sowohl die Höhe jedes Einzelpunktes als auch die relative Lage in der Ebene, also zwei Profildimensionen, in die Berechnung ein.

Vertikale Kenngrößen können sowohl für Einzelprofile als auch für Flächen berechnet werden (Tab. 7). Sie leiten sich aus einer einfachen Auswertung der vertikalen Abstände zu einer Bezugslinie bzw. im 3D-Fall zu einer Bezugsebene ab. Kenngrößen, die sich auf ein Einzelprofil beziehen, sind mit dem Buchstaben „R“ wie „roughness“ gekennzeichnet. Für eine Auswertungsfläche, die aus sehr vielen Einzelprofilen besteht, wird das „R“ durch ein „S“ wie „surface“ in der Kenngrößenbezeichnung ersetzt. Erstere werden somit zu den 2D-Kenngrößen, letztere zu den 3D-Kenngrößen gezählt. In der Oberflächenmesstechnik und bei der Kommunikation zwischen Materiallieferanten und Verarbeitern werden fast ausschließlich vertikale 2D-Oberflächenkenngrößen verwendet, da Messgeräte und Berechnungsalgorithmen genormt sind (STAEVES, 1998).

Zwei weitere Kenngrößengruppen bilden die sogenannten „horizontalen“ und „hybriden“ Oberflächenkenngrößen (Tab. 8 und Tab. 9). Horizontale Kenngrößen werden ausschließlich aus den Profilinformatoren in Abtastrichtung gewonnen. Sie beschreiben mittlere Häufigkeiten, mittlere Abstände oder mittlere Breiten von Profilkuppen bzw. Profiltälern. Bei der dreidimensionalen Oberflächenauswertung finden die beiden Kenngrößengruppen keine Anwendung (WinSAM, 2002).

In der Vergangenheit wurden Anstrengungen unternommen, die aus dem mechanisch-rheologischen Modell (vgl. Abschnitt 2.2.2) abgeleiteten Kenngrößen zu vereinheitlichen und zu normen, da diese eine funktionsrelevante Charakterisierung von technischen Oberflächen zulassen. Eine Auswahl dieser Kenngrößen ist in Tab. 10 dargestellt.

Tab. 7: Auswahl vertikaler Oberflächenkenngrößen für den 2D- und 3D-Fall

Kenngröße	Kürzel 2D	Kürzel 3D	Einheit	Norm/Quelle	Beschreibung
arithmetischer Mittenrauwert	R _a	S _a	μm	DIN EN ISO 4287, E DIN EN 10049	arithmetischer Mittelwert der Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie bzw. -ebene
quadratischer Mittenrauwert	R _q	S _q	μm	DIN EN ISO 4287	quadratischer Mittelwert der Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie bzw. -ebene
Profiltiefe/ Topografietiefe	R _t	S _t	μm	DIN EN ISO 13565-2	Abstand des höchsten und niedrigsten Punktes eines/r Profils/Topografie
Kernrautiefe	R _k	S _k	μm	DIN EN ISO 13565-2	Tiefe des Rauheitskerns
reduzierte Spitzenhöhe	R _{pk}	S _{pk}	μm	DIN EN ISO 13565-2	Mittlere Höhe der Spitzen über dem Rauheitskern
reduzierte Riefentiefe	R _{vk}	S _{vk}	μm	DIN EN ISO 13565-2	Mittlere Tiefe der Täler unterhalb des Rauheitskerns
kleinster Materialanteil (Kernrauheit)	M _{r1}	S _{r1}	%	DIN EN ISO 13565-2	Materialanteil, bestimmt durch die Schnittlinie, die die herausragenden Spitzen vom Rauheitskern abtrennt (unterer Grenzwert des Materialanteils im Kernbereich)
größter Materialanteil (Kernrauheit)	M _{r2}	S _{r2}	%	DIN EN ISO 13565-2	Materialanteil, bestimmt durch die Schnittlinie, die die tiefen Täler vom Rauheitskern abtrennt (oberer Grenzwert des Materialanteils im Kernbereich)
Schiefe des Profils	R _{sk}	S _{sk}		DIN EN ISO 4287	Maß für die Asymmetrie der Amplitudendichtekurve der Ordinatenwerte
Kurtosis des Profils	R _{ku}	S _{ku}		DIN EN ISO 4287	Maß für die Steilheit der Amplitudendichtekurve der Ordinatenwerte

Tab. 8: Auswahl horizontaler Oberflächenkenngrößen für den 2D-Fall

Kenngröße	Kürzel	Einheit	Norm/Quelle	Beschreibung
Spitzenanzahl	R _{pc}	cm ⁻¹	E DIN EN 10049	Zahl von Profilelementen, die nacheinander eine obere und eine untere Schnittlinie überschreiten, wobei die beiden Schnittlinien parallel und symmetrisch zur Mittellinie sind
mittlere Rillenbreite der Profilelemente	R _{Sm}	mm	DIN EN ISO 4287	Mittelwert der Breite der Profilelemente

Tab. 9: Auswahl hybrider Oberflächenkenngrößen für den 2D-Fall

Kenngröße	Kürzel	Einheit	Norm/Quelle	Beschreibung
quadratischer Mittelwert der Profilsteigungen	RΔ _q		DIN EN ISO 4287	Quadratischer Mittelwert der örtlichen Profilsteigungen dZ/dX

Tab. 10: Auswahl reiner 3D-Kenngrößen (Flächenkenngrößen) aus dem mechanisch-rheologischen Modell

Kenngröße	Kürzel	Einheit	Norm/Quelle	Beschreibung
maximal geschlossener Leerflächenanteil	α_{clm}	%	PESTORF (1997), STAEVES (1998), WinSAM (2002)	größter geschlossener Leerflächenanteil in einer beliebigen Durchdringung
geschlossenes Leervolumen	V_{cl}	mm^3/m^2		Volumen der geschlossenen Leerbereiche über die Topografietiefe
Leervolumen	V_{vo}	mm^3/m^2		Volumen der Leerbereiche über die Topografietiefe
offenes Leervolumen	V_{op}	mm^3/m^2		Volumen der offenen Leerbereiche über die Topografietiefe
Materialvolumen	V_{ma}	mm^3/m^2		Volumen der Materialbereiche über die Topografietiefe
untere Durchdringung	c_{bot}	μm		Durchdringung des niedrigsten betrachteten Punktes der Topografie
obere Durchdringung	c_{top}	μm		Durchdringung des höchsten betrachteten Punktes der Topografie
Durchdringung mit maximalem geschlossenem Leerflächenanteil	c_{clm}	μm		Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie
bezogene Durchdringung mit maximalem Leerflächenanteil	γ_{clm}	%	WinSAM (2002)	Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie bezogen auf die Topografietiefe
maximale durchschnittliche geschlossene Leerflächengröße	A_{clm}	Messpunkte		größter Wert der durchschnittlichen geschlossenen Leerflächengröße
geschlossener Leerflächenanteil bei maximaler geschlossener Leerflächengröße	$\alpha_{cl(Aclm)}$	%		Anteil geschlossener Leerflächen in der Durchdringung mit der maximalen durchschnittlichen geschlossenen Leerflächengröße
Anzahl geschlossener Leerflächen bei maximal geschlossenem Leerflächenanteil	$N_{cl(clm)}$	mm^{-2}		Anzahl der Leerflächen in der Durchdringung mit dem maximalen Leerflächenanteil
maximale Anzahl geschlossener Leerflächen	N_{clm}	mm^{-2}	STAEVES (1998), WinSAM (2002)	größte Anzahl geschlossener Leerflächen in einer beliebigen Durchdringung
maximale Anzahl Materialflächen	N_{mam}	mm^{-2}		größte Anzahl Materialflächen in einer beliebigen Durchdringung
maximale Anzahl offener Leerflächen	N_{opm}	mm^{-2}	WinSAM (2002)	größte Anzahl offener Leerflächen in einer beliebigen Durchdringung
geschlossene Leerflächenanzahl bei maximaler durchschnittlich geschlossener Leerflächengröße	$N_{cl(Aclm)}$	mm^{-2}		Anzahl geschlossener Leerflächen in der Durchdringung mit der maximalen durchschnittlichen geschlossenen Leerflächengröße

2.5.5 Bisherige Untersuchungen zur Erfassung der Oberflächenrauheit von Laufflächen

Bisher sind nur wenige Ergebnisse landtechnischer Forschungen zur Untersuchung der Oberflächeneigenschaften von Laufflächen bekannt. Diese beschränken sich auf einige Laboruntersuchungen mit verschiedenen Prüfflächen oder Probekörpern. Untersuchungen in belegten Ställen sind kaum bekannt.

DE BELIE (1997b) untersuchte die Oberflächenrauheit von Spaltenböden im neuen Zustand und in verschiedenen Zeitintervallen (4,5 und 9 Monate) nach dem Einbau in einen Mastschweinestall mit dem Sandfleckverfahren nach DIN EN 13036-1 (vgl. Abschnitt 2.3.2). Eine ausführliche Beschreibung der eingesetzten Testapparatur findet sich in DE BELIE (1995). Das Maß für die Oberflächenrauheit bei diesem Verfahren ist die sogenannte „mittlere Profiltiefe“. Es wurden Spaltenbodenelemente aus verschiedenen Betonmischungen, aus Betonen mit unterschiedlichen Zementen, aus Beton mit Flugasche- und mit Microsilicazusatz sowie aus Betonen mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen, wie beispielsweise Epoxydharzanstrich, untersucht (Spezifikationen und Details der verschiedenen Testspaltenböden siehe Originalliteratur, S. 312). Generell waren die mittleren Profiltiefen bei allen Spaltenböden nach neunmonatiger Einsatzzeit größer als im Neuzustand. Die geringsten mittleren Profiltiefen im Neuzustand von 0,15 mm und 0,19 mm wurden bei einem speziellen Oberflächenanstrichprodukt bzw. bei Spaltenboden mit Epoxydharzanstrich gemessen. Spaltenbodenelemente aus Beton mit Microsilicazusatz hatten mit 0,37 mm die größte mittlere Profiltiefe. Beton mit Hochofenschlacke zeigte nach neunmonatigem Einsatz mit 0,95 mm die höchste mittlere Profiltiefe.

DE BELIE und MONTENY (1998) erhoben unter anderem den arithmetischen Mittenrauwert R_a zur Beschreibung der Oberflächenrauheit verschiedener Betone infolge eines chemischen Verschleißtests mit mehreren Testzyklen. Als Messinstrument wurden Lasersensoren eingesetzt. An jedem Prüfkörper wurden nach jedem Testzyklus fünf gleichmäßig über den Prüfkörper verteilte Oberflächenprofile erfasst. Die Auswertungstrecke zur Berechnung des arithmetischen Mittenrauwert R_a betrug 50 mm. Ohne Kontakt der Betonprüfkörper mit den organischen Säuren lag die Spanne der arithmetischen Mittenrauwerte zwischen 0,05 mm und 0,23 mm bei den verschiedenen Betonvarianten. Nach sechs Testzyklen lagen die arithmetischen Mittenrauwerte der unterschiedlichen Betone zwischen 0,24 mm und 0,92 mm.

PHILLIPS und MORRIS (2000) erfassten die Oberflächenrauheit von Betonlaufgängen in einem Milchviehstall mittels eines mechanischen Tastschnittgerätes, wie es zur Kontrolle der Oberflächengüte in der Metall- und Keramikindustrie standardmäßig eingesetzt wird. Die Genauigkeit des Gerätes wurde mit 1 μm angegeben. Insgesamt wurden 20 Messungen in einem Abstand von 5 cm an 4 Messstellen innerhalb des Ganges durchgeführt. Die mittlere Profiltiefe betrug $5,8 \pm 0,0087$ mm und war an allen Messstellen gleich.

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlich rauer Oberflächen auf die auftretenden Kontaktflächendrücke zwischen Klauen und Boden stellten DE BELIE und ROMBAUT (2003) fünf verschiedene Prüfflächen aus Beton her. Diese hatten, bedingt durch ihr Her-

stellungsverfahren, unterschiedliche Oberflächengestalten und -rauheiten, die sie durch Metall und Holzglattscheiben, einen Besenstrich und zwei unterschiedlich starke Waschungsgrade erhielten. Für die Rauheitsmessungen kam ein stationäres berührungsloses Lasermesssystem zum Einsatz. Die Auflösung des Laserprofilometers betrug 0,01 mm. Insgesamt wurden 2 x 5 parallele Profile auf jedem Prüfboden erfasst. Jedes Profil bestand aus 530 Messpunkten mit 3,3 mm Länge je Einzelprofil. Aus diesen Profilen wurde der arithmetische Mittenrauwert R_a als Mittelwert der einzelnen arithmetischen Mittenrauwerte der Einzelprofile berechnet. Die Auswertlänge betrug bei allen Prüfböden 50 mm. Eine Ausnahme bildete hier der Belag „Metallglattscheibe“ mit lediglich 10 mm Auswertlänge aufgrund zu großer Welligkeitsanteile der Oberfläche. Als Ergebnis stellte sich eine Abhängigkeit der Oberflächenrauheit von der Fertigungsmethode der Prüfböden heraus. So hatte „Metallglattscheibe“ den geringsten arithmetischen Mittenrauwert von 0,03 mm. Die arithmetischen Mittenrauwerte von „Holzglattscheibe“, „Besenstrich“ und dem Beton mit dem geringeren Waschungsgrad betragen 0,15 mm, 0,22 mm und 0,30 mm. Den größten Wert zeigte der Beton mit dem größeren Waschungsgrad mit 0,56 mm. Außerdem konnte mit zunehmender Oberflächenrauheit eine steigende Standardabweichung des arithmetischen Mittenrauwertes festgestellt werden. Die Oberflächenrauheit der gewaschenen Betone wurde wegen entsprechend großer, herausstehender Kieselsteine von DE BELIE und ROMBAUT (2003) als Makrorauheit angesprochen.

2.6 Bestehende Defizite bei der Rutschfestigkeits- und Oberflächen- erfassung von Laufflächen

In den vorangegangenen Abschnitten sind eine Vielzahl von Problemen, ungeklärter Fragen und Defiziten hinsichtlich der Erfassung sowie der qualitativen und quantitativen Beschreibung der Rutschfestigkeit und der Oberflächen von Laufflächen aufgezeigt worden. Im folgenden werden die wichtigsten noch einmal stichpunktartig zusammengefasst. Alle diese Punkte führen letztendlich zu mangelnder Vergleichbarkeit und Kommunizierbarkeit der Messergebnisse. Eine objektive Beurteilung der Laufflächen ist somit nur schwer möglich.

Erfassung und Beschreibung der Rutschfestigkeit

- Probleme mit der Validität mobiler Messgeräte aufgrund mangelnder Simulation des Rindergangs
- Fehlen einheitlicher Prüfbedingungen, da diese einen großen Einfluß auf die Ergebnisse haben (Zwischenmedium, etc.)
- Fehlen standardisierter Messtechnik (Probleme mit Genauigkeit und Reproduzierbarkeit verschiedener Messgeräte)
- Fehlen einheitlicher Berechnungsmodi zur Berechnung des Haft- und Gleitreibungskoeffizienten (meist wird nur die Formel angegeben, die Anzahl der in die Berechnung

eingehenden Messwerte und die ausgewerteten Bereiche der Gleitreibungskurven werden nicht genannt)

- Fehlen von standardisierten Kenngrößen zur Bewertung der Rutschfestigkeit, Vergleiche werden bisweilen auch zwischen unterschiedlichen Kenngrößen vorgenommen (in der Literatur finden sich gleichermaßen Haft- und Gleitreibungskoeffizienten sowie der SRT-Wert)
- Festsetzung von Mindestanforderungen oder Grenzwerten aufgrund der Ergebnisse mobiler Reibzahlmessgeräte ohne Validierung der geforderten Grenzwerte durch Tierbeobachtungen problematisch

Erfassung und Beschreibung der Oberflächen:

- Mangelnde Stalltauglichkeit von berührungsloser Messtechnik
- Forderung nach maximaler Messflächengröße bei gleichzeitig maximaler Auflösung und Genauigkeit
- Notwendigkeit der flächenhaften Oberflächenerfassung
- Fehlen von standardisierten Oberflächenkenngrößen, die das Gebrauchsverhalten von Laufflächen (Gewährung einer ausreichenden Rutschfestigkeit bei gleichzeitig nicht zu hoher Rauheit) berücksichtigen (der Einfluß der Oberflächen auf die Rutschfestigkeit ist zwar bekannt, kann aber weder qualitativ noch quantitativ treffend beschrieben werden)

3 Material und Methoden

Die methodische Vorgehensweise in der vorliegenden Arbeit war in vier Abschnitte unterteilt (Abb. 19). Zuerst wurden aus bereits veröffentlichten Ergebnissen zu Rutschfestigkeits- und Topografiemessungen sowie nationalen und internationalen Normen aus dem nicht landwirtschaftlichen Bereich Anforderungen und Vorgaben zum Messverfahren und zur Messtechnik recherchiert. Diese Forderungen wurden durch die speziellen Anforderungen für Messungen auf Laufflächen in Milchviehställen ergänzt. Anschließend wurden die konstruierten Messgeräte in Vorversuchen getestet, weiter spezifiziert und eine Versuchsroutine entwickelt.

Im zweiten Schritt erfolgte die Auswahl der Untersuchungsbetriebe nach Material und Alter der Laufflächen, die Festlegung der Messstellen und deren Anzahl in den Ställen. Anschließend wurden die Messungen auf den jeweiligen Betrieben durchgeführt. Die erhobenen Rohdaten wurden mittels Spezialsoftware der Messgeräte aufbereitet, um daraufhin statistische Auswertungen durchführen zu können und zu entsprechenden Ergebnissen zu gelangen.

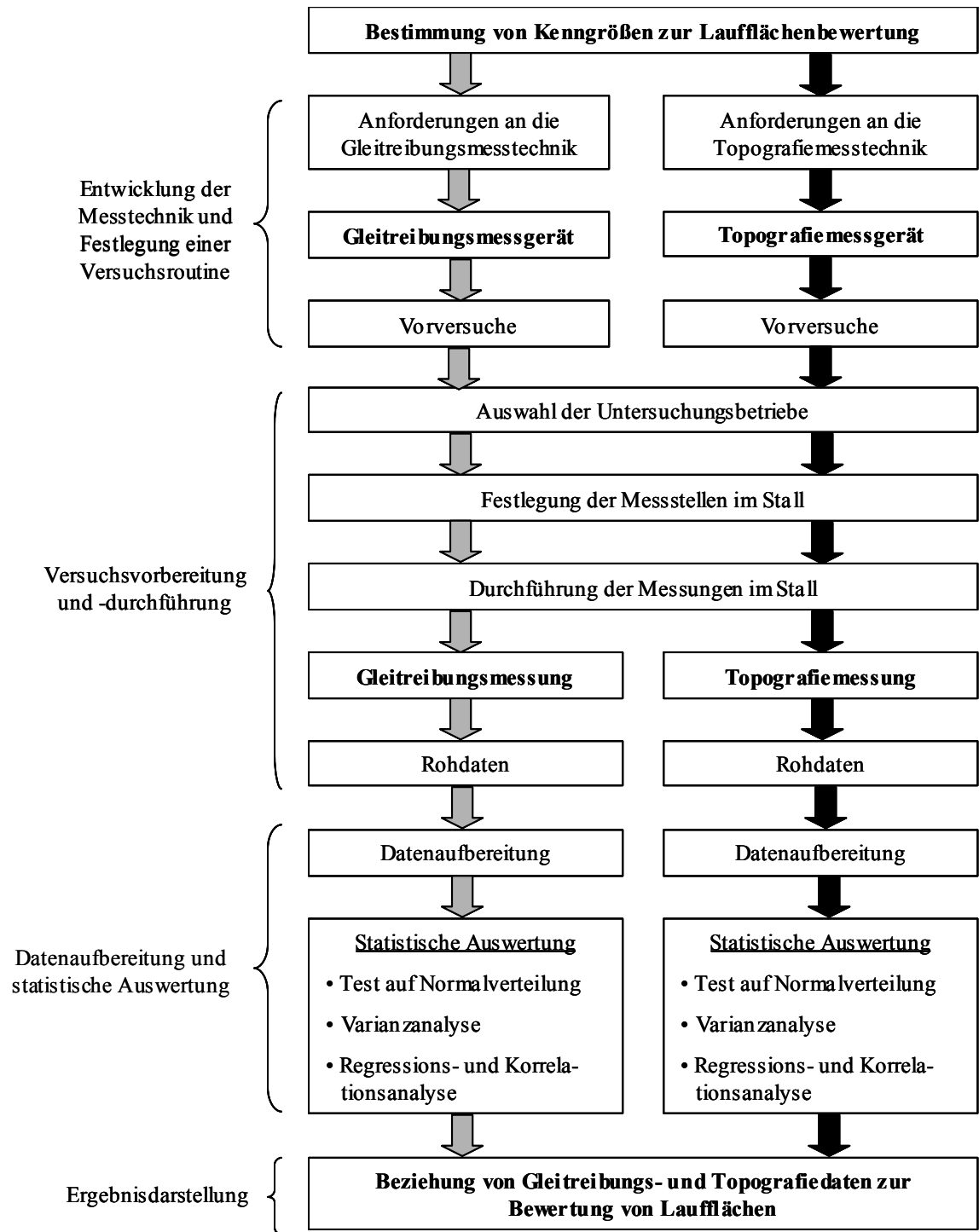


Abb. 19: Flussdiagramm der methodischen Vorgehensweise zur Bestimmung von Kenngrößen für die Bewertung von Laufflächen

3.1 Entwicklung der Messtechnik

3.1.1 Anforderungen

Dieser Abschnitt bildet die Schnittstelle zwischen dem Literaturteil sowie dem Material- und Methodenteil dieser Arbeit. Denn die Anforderungen an die zu konstruierende Messtechnik ergaben sich teils aus der Auswertung der Literatur sowie der nationalen und internationalen Normung für die jeweiligen Messverfahren (vgl. Abschnitte 2.1, 2.3.2, 2.4 und 2.5) und teils aus den eigens für die Messaufgabe (Rutschfestigkeits- und Topografiemessungen auf Laufflächen in belegten Boxenlaufställen) erwachsenden Anforderungen (vgl. Tab. 11). Die praktischen Anforderungen an das Rutschfestigkeits- und das Topografiemessgerät waren größtenteils identisch. Aus den an die Geräte gestellten Anforderungen ergaben sich teilweise Widersprüche bzw. Gegensätze, die in diesem Abschnitt aufgezeigt werden sollen. Außerdem werden alternative Lösungen bei sich gegenseitig beeinträchtigenden oder ausschließenden Anforderungen vorgestellt.

Gleitreibungsmessgerät

Der größte Gegensatz lag in der Forderung nach einer validen Methode zur Rutschfestigkeitsmessung, welche die auftretende Ausgleitgeschwindigkeit, die auftretenden Belastungen und die hieraus resultierenden Flächenpressungen simuliert und in einem kompakten, mobilen Messgerät vereint. In Abschnitt 2.4.2 und Abschnitt 2.4.4 wurde bereits dargelegt, dass bis heute ein solches Messgerät weder im außerlandwirtschaftlichen noch im landwirtschaftlichen Bereich existiert.

Auf Basis der in Abschnitt 2.4.2 bereits angeführten Vergleichsuntersuchungen von 5 mobilen Reibzahlmessgeräten der Autoren SCHEIL (1993) und SKIBA et al. (1994) schien von allen getesteten Geräten das Schuster Zugtribometer für die Reibzahlmessung von Laufflächen am geeignetsten. Das Gerät misst die Reibkraft nach dem Prinzip des gezogenen Körpers. Es ist in der Lage, sowohl Gleit- als auch Haftreibung zu erfassen. Durch sein einfaches und leicht zu übertragendes Messprinzip ließ es vielfältige Variationen und Modifikationen für die Anwendung in Kuhställen zu. In den genannten Untersuchungen wurden die Geräte sowohl unter wissenschaftlichen Kriterien (Reliabilität, Objektivität und Validität) als auch unter praktischen Gesichtspunkten bei Felderhebungen betrachtet. Die Präzisionsuntersuchungen von SCHEIL (1993) ergaben eine gute Objektivität und Reliabilität des Schuster Zugtribometers. Es belegte hinsichtlich beider Anforderungen den zweiten Platz im Test. Auch bei der Beurteilung der praktischen Einsatzfähigkeit bescheinigten SKIBA et al. (1994) diesem Gerät mit Rang zwei eine gute Eignung. Allerdings nannten sie auch folgende wichtige Nachteile bzw. Schwachstellen des Schuster Zugtribometers: Als nachteilig wurde die schlechte Ablesbarkeit der Haft- und Gleitreibung am Federdynamometer während der Messung und die ungleichmäßige Zuggeschwindigkeit infolge des manuellen Ziehens des Gerätes angesehen. Die Autoren schlugen hier einen motorischen Antrieb sowie eine technische Einrichtung zur Messwertanzeige vor. Diesen beiden Vorschlägen wurde bei der Entwicklung des eigenen Gleitreibungsmessgerätes in besonderem Maße Rechnung getragen (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Zur Messung der Gleitreibung lag zum Zeitpunkt der eigenen Gerätentwicklung im Jahre 2004 außerdem ein deutscher Normenentwurf aus dem Bereich der Arbeitssicherheit vor, den es zur Zeit der Untersuchungen von SCHEIL (1993) und SKIBA et al. (1994) noch nicht gab. Es handelt sich um E DIN 51131 (Prüfung von Bodenbelägen: Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Verfahren zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten). Hierin ist das Messverfahren und das Messgerät mit allen technischen Spezifikationen beschrieben und die einzuhaltenden Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit, Mindestlänge der Messstrecke, Messgeschwindigkeit, Flächenpressung, Prüfkörpermaterial und deren Präparation festgeschrieben (vgl. Abschnitt 2.4.2). In Anbetracht des Umstandes, dass es nicht gelungen wäre, ein mobiles Messgerät zu konstruieren, das alle Facetten des Rindergangs simuliert, wurden die Anforderungen der E DIN 51131 als Entwicklungs- und Konstruktionsgrundlage für das für die Laufflächenmessungen einzusetzende Gleitreibungsmessgerät herangezogen. Eine eins zu eins Umsetzung dieser Norm für den Stallbereich war jedoch nicht möglich, da das in der Norm beschriebene Gleitreibungsmessgerät zur Messung auf vergleichsweise glatten Fußböden und nicht zur Messung von rauen Beton- oder Asphaltbelägen spezifiziert ist. So musste beispielsweise ein klauenähnlicher Prüfkörper verwendet und eine geringere Messgeschwindigkeit gewählt werden, wobei die Festlegung der endgültigen Geschwindigkeit noch in Vorversuchen bestimmt werden musste (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Auf den Einfluss des Zwischenmediums auf die Gleitreibungsmessung wurde bereits in Abschnitt 2.4.4 hingewiesen. Laut SKIBA et al. (1987) sollte sich ein Testverfahren an den ungünstigen, in der Praxis vorkommenden Bedingungen ausrichten. Dies wären im Falle der Laufflächenuntersuchung zweifellos verschmutzte Bedingungen. Bei der gleichzeitigen Erfüllung der Anforderungen an Reproduzierbarkeit und Genauigkeit einerseits und Messungen unter Praxisbedingungen (verschmutzte Laufflächen) andererseits erwächst jedoch ein erheblicher Konflikt. Dies hat mehrere Gründe: Zum einen werden die Messungen des Gleitreibungskoeffizienten durch die Schmutzaufgabe in den Laufgängen verfälscht. Zum anderen sind wegen der Schleifspurenbildung durch den Prüfkörper keine Wiederholungsmessungen möglich. Des Weiteren wirken sich durch diese Verschmutzungen indirekt Einflüsse des Fütterungs- und Stallmanagements der Betriebe auf die Messungen aus. Denn die eingesetzten Futtermittel haben Einfluss auf die Konsistenz und die Viskosität der auf den Laufflächen befindlichen Gülle. Hierdurch werden die rheologischen Eigenschaften der Gülle und somit auch die tribologischen Eigenschaften des Systems Prüfkörper – Zwischenmedium – Lauffläche beeinflusst. Ferner ist die Entmistungshäufigkeit bei planbefestigten bzw. das Verhältnis von Balkenbreite zu Schlitzweite bei perforierten Böden für die Sauberkeit der Laufflächen von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis der Gleitreibungsmessungen. Ein weiterer Einfluss auf die Schmutzbelastung einzelner Messpunkte geht von der Frequentierung der Bereiche aus, in welchen die Messstellen lokalisiert sind. Die endgültige Festlegung der Messbedingungen erfolgte erst nach der Auswertung der Vorversuche (vgl. Abschnitt 3.2.1).

In Tab. 11 sind die Anforderungen an das Gleitreibungsmessgerät dargestellt. Widersprüchliche oder sich gegenseitig beeinträchtigende Anforderungen sind entsprechend gekennzeichnet.

Tab. 11: Anforderungen an das zu konstruierende Gleitreibungsmessgerät

Lfd. Nr.	Anforderung	Wichtigkeit	Konflikt mit / Widerspruch zu
1	Reproduzierbarkeit	++	6
2	Genauigkeit	++	6
3	Simulation des Rindergangs (Messgeschwindigkeit, Normalkraft und Flächenpressung)	++	7,8,9,18
4	Simulation der Klaueneigenschaften (Dimension, Form, Härte)	++	
5	Einsatz und Funktionssicherheit auf mikro- (< 0,5 mm) und makrorauen (> 0,5 mm) Böden	++	
6	Messungen unter Praxisbedingungen	±	1,2
7	Stalltauglichkeit	++	3
8	Mobilität und Transportierbarkeit	+	3
9	Kompakte Bauweise im Rahmen der messtechnischen Erfordernisse	+	3
10	Bedienbarkeit durch eine Person	+	
11	Vollständige und schnelle Reinigung & Desinfektion	+	
12	Datenerfassung über eine definierte, repräsentative Fläche	++	
13	Durchführung einer Messung & Bedienungsfreundlichkeit	±	
14	Kontrolle und Visualisierung des Messergebnisses vor Ort	±	
15	Schnelligkeit einer Messung	±	
16	Automatisches Vorliegen eines Messprotokolls	-	
17	einfache Datenhandhabung	±	
18	Preis	+	3

++ sehr wichtig, + wichtig, ± weniger wichtig, - unerheblich

Topografiemessgerät

Ebenso wie bei den Gleitreibungsmessungen stehen der Forderung nach Messungen unter Praxisbedingungen (verschmutzte Laufflächen) die Anforderungen an Reproduzierbarkeit und Genauigkeit entgegen (Tab. 12). Mehr noch: Sie machen eine Messung mit dem Laserscanner unmöglich, da die auf den Laufflächen befindliche Flüssigkeit zu Reflektionsstörungen des Laserlichtes führt und so erhebliche Messfehler auftreten bzw. kein reflektierter Laserstrahl mehr auf die CCD-Kamera gelangt (vgl. Abschnitt 2.5.1 und Abschnitt 2.5.2). Ein weiterer Konflikt ergab sich aus dem Bestreben, sowohl mit dem Gleitreibungs- als auch mit dem Topografiemessgerät eine Messfläche von der selben Größe bei gleichzeitig höchstmöglicher Auflösung in z-Richtung (< 5 µm) zu erfassen. Es liegt im Messsystem begründet, dass die Laserlinienbreite bzw. der Messbereich in x-Richtung negativ mit der Auflösung in z-Richtung korreliert ist. Um solche Auflösungen zu erreichen, wäre ein Laser-Linienscanner nicht mehr in Frage gekommen. Eine solche Auflösung lässt sich beispielsweise mit konfokalen Weißlichtmikroskopen erzielen, die allerdings weder für den mobilen Einsatz noch für die widrigen Einsatzbedingungen in Kuhställen geeignet und zudem sehr teuer sind. Außerdem gilt für diese Geräte prinzipiell: Je höher die Anforderungen an die Auflösung, desto kleiner die Messfläche (vgl. Tab. 5, Seite 69).

Für die Entwicklung und Konstruktion des Topografiemessgerätes waren, soweit möglich, die Vorgaben der DIN ISO 13473 (Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen) und insbesondere DIN ISO 13473-3 (Anforderungen und Einteilung von Profilometern), maßgeblich. Obwohl es hierbei einige Einschränkungen in der Übertragbarkeit auf die zu bearbeitende Aufgabenstellung gab: Die genannte Norm gilt explizit nur für die Erfassung der Makrotextur auf Fahrbahnbelägen, vornehmlich mit Profilometern, die eine punktförmige Abtastcharakteristik aufweisen. Zur Erfassung der Mikrorauheit mit berührungsloser Messtechnik ist noch kein Verfahren genormt. Trotzdem dienen die Vorgaben der DIN ISO 13473, welche für Tastschnittgeräte gelten, als Orientierung. Außerdem sind Laufflächen von ihrer Oberflächenbeschaffenheit Fahrbahndecken ähnlich, sodass die Norm dennoch für die Entwicklung des Topografiemessgerätes sinnvoll erschien.

Bei der Auswahl der Datenverarbeitungssoftware wurde Wert darauf gelegt, dass sie grundsätzlich die Anforderungen und Vorgaben zur Profilfilterung laut DIN ISO 13473 und DIN EN ISO 11562 erfüllt. Darüber hinaus sollte sie eine Auswahl an Filteralgorithmen sowie zahlreiche Untersuchungs-, Ausrichtungs- und Visualisierungsmöglichkeiten für die gewonnenen Datensätze bieten.

Tab. 12: Anforderungen an das zu konstruierende Topografiemessgerät

Lfd. Nr.	Anforderung	Wichtigkeit	Konflikt mit / Widerspruch zu
1	Reproduzierbarkeit	++	6
2	Genauigkeit	++	6
3	Identische Größe der Messfläche wie Gleitreibungsmessgerät	+	4
4	sehr hohe Auflösung in z-Richtung	++	3,8,9,17
5	Einsatz und Funktionssicherheit auf mikro- (< 0,5 mm) und makrorauen (> 0,5 mm) Böden	++	3
6	Messungen unter Praxisbedingungen	±	1,2
7	Stalltauglichkeit	++	4
8	Mobilität und Transportierbarkeit	+	4
9	Kompakte Bauweise im Rahmen der messtechnischen Erfordernisse	+	4
10	Bedienbarkeit durch eine Person	+	
11	Vollständige und schnelle Reinigung & Desinfektion	+	
12	Durchführung einer Messung & Bedienungsfreundlichkeit	±	
13	Kontrolle und Visualisierung des Messergebnisses vor Ort	±	
14	Schnelligkeit einer Messung	±	
15	Automatisches Anfertigen eines Messprotokolls	-	
16	einfache Datenhandhabung	±	
17	Preis	+	4

++ sehr wichtig, + wichtig, ± weniger wichtig, - unerheblich

3.1.2 Technische Ausführung des Gleitreibungsmessgerätes

Gemäß den Erkenntnissen aus der Literatur und den festgelegten Anforderungen wurde das in Abb. 20 dargestellte Gleitreibungsmessgerät realisiert.

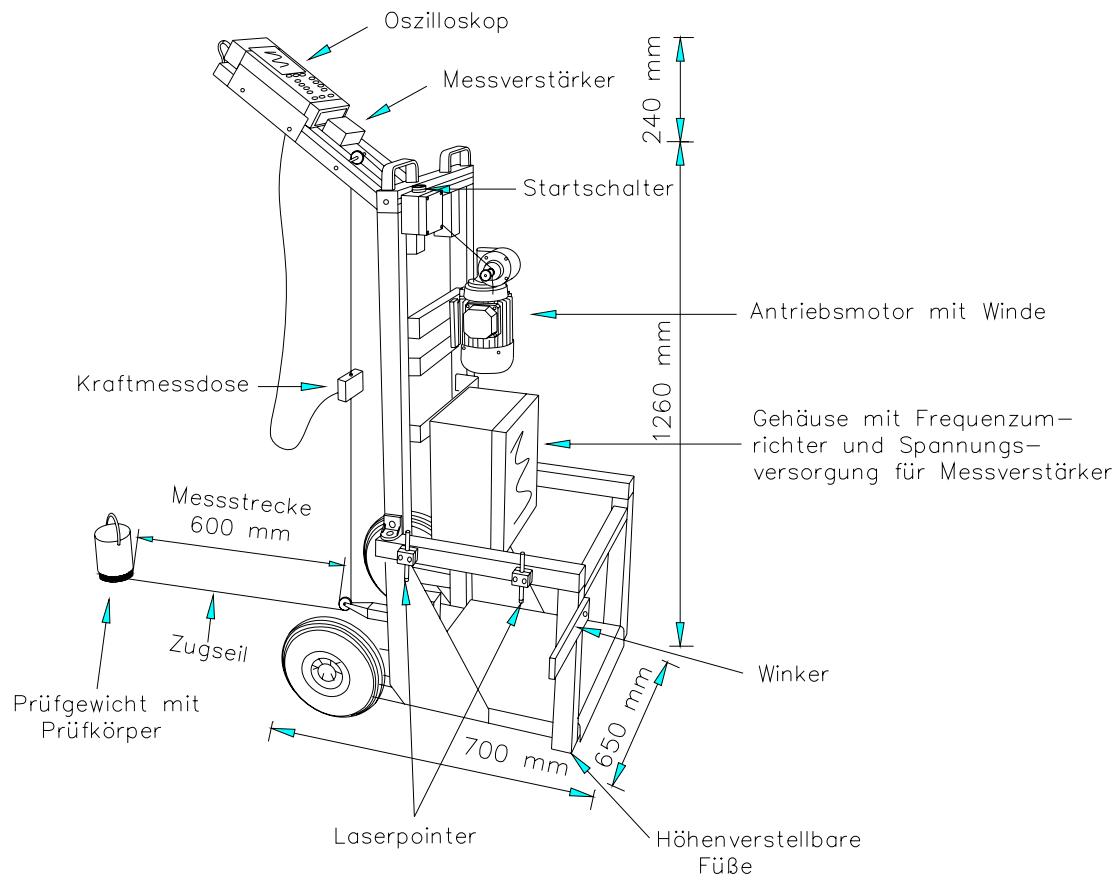


Abb. 20: Schematische Darstellung des Gleitreibungsmessgerätes

Der Rahmen des Gleitreibungsmessgerätes besteht aus einer Konstruktion von 45 mm Aluminium Vierkantrohren. Für die einfache Handhabung im Stall wurde das Gerät mit Rädern versehen, die während der Messungen keinen Bodenkontakt haben, sodass eine sichere Aufstellung ermöglicht wird. Hierbei sind insbesondere die vier höhenverstellbaren Füße von entscheidender Bedeutung.

Die eigentliche Messeinrichtung besteht aus dem Prüfkörper mit Prüfgewicht, dem Antriebsmotor mit Seilwinde, einer Kraftmessdose und zugehörigem Messverstärker sowie einem mobilen Oszilloskop zur Datenaufzeichnung. Im Folgenden soll auf konstruktive Details und die o. g. messtechnischen Komponenten eingegangen werden:

Die Form und Dimension des Prüfkörpers ergab sich aus den im Abschnitt 2.1 und 2.3 dargelegten Erkenntnissen der dort angeführten Autoren, ergänzend zu den Vorarbeiten von MÜLLER (2003). Wie in Abschnitt 2.1.3 berichtet, weisen verschiedene Klauenbereiche verschiedene Härtegrade auf. Die Ergebnisse der Autoren variieren hierbei teilwei-

se stark. Die Härte des Prüfkörpers wurde in Anlehnung an die Auswertung der Literatur in Abschnitt 2.1.3 aus Polyamid (PA 6) gefertigt, denn es hat mit einer Shore-D-Härte von 73 ± 1 °SD, eine vergleichbare Härte wie die Dorsalwand einer Rinderklaue. Das Gewicht zur Ballastierung des Prüfkörpers wurde von MÜLLER (2003) übernommen. Abb. 21 zeigt eine schematische Darstellung des eingesetzten Prüfkörpers.

Schnitt: A–B

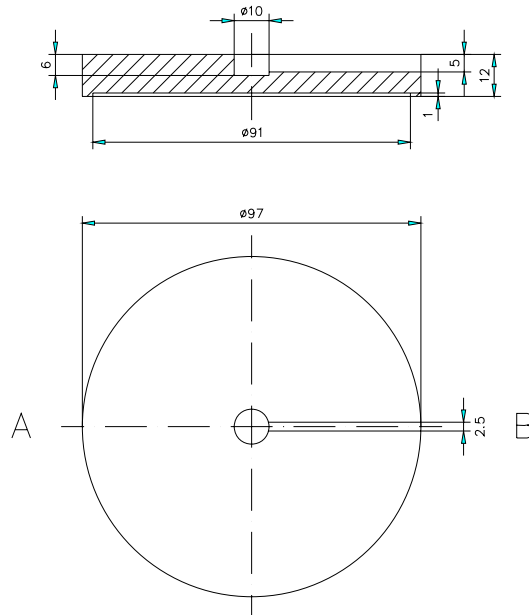


Abb. 21: Eingesetzter Prüfkörper zur Gleitreibungsmessung

Die Befestigung des Zugseils erfolgt mittels einer Zentralbohrung und angeschlossener Nut zur Führung des Zugseils in der Oberseite der Prüfscheibe. In diese wird der am Ende des Seils befindliche Knoten eingehängt. Somit wird eine zentrische Krafteinlenkung gewährleistet und durch den niedrigen Zugpunkt (5 mm über Grund) ein Verkippen in den Spalt bei orthogonaler Zugrichtung zum Schlitz auf perforierten Böden verhindert. Eine formschlüssige Fixierung des Knotens in der Prüfscheibe wird durch das abnehmbare Prüfgewicht erreicht, welches eine entsprechende Aussparung an der Unterseite hat. Prüfkörper und Prüfgewicht werden als eine Einheit durch einen 0,18 KW starken Wechselstrommotor über die Prüffläche gezogen. Die Kraft des Motors wird durch ein spielfreies Schneckengetriebe auf eine Winde übertragen, auf der das Zugseil in parallelen Windungen aufgewickelt wird. Die zweimalige Zugkraftumlenkung erfolgt über zwei leichtlaufende Umlenkrollen an der Ober- und Unterseite der Apparatur. Zur Kraftmessung ist eine Kraftmessdose (Hottinger Baldwin RSCA C1 - 50 kg) in das Zugseil integriert.

Die Messsignale werden über einen Messverstärker (SOEMER LAC 65.1) in ein mobiles Oszilloskop mit Speichermöglichkeit (FLUKE SkopeMeter 192B) übertragen. Beide werden Netzstrom unabhängig betrieben. Eine mechanische Abschaltung bringt den Motor am

Ende der Messstrecke zum Stillstand. Für eine konstante Antriebsgeschwindigkeit sorgt ein stufenlos einstellbarer Frequenzumrichter. Hiermit können effektive Messgeschwindigkeiten von 0 – 0,392 m/s realisiert werden, die in Vorversuchen noch näher zu untersuchen waren.

An der seitlichen Rahmenkonstruktion befinden sich zwei Laserpointer sowie ein Winker zur exakten Messgerätepositionierung. Auf diese wird jedoch in Abschnitt 3.3.3 eingegangen. Das Gerät wird zur sicheren Aufstellung während der Messungen im Stall mit 60 kg ballastiert. Tab. 13 gibt Aufschluss über die wichtigsten technischen Daten des Gleitreibungsmessgerätes. Bis auf die für die Messungen auf Stallbodenbelägen vorgenommenen Anpassungen (andere Form, Dimension und Material des Prüfkörpers sowie Zuggeschwindigkeit) erfüllt das Gerät die Anforderungen der E DIN 51131. Allerdings weicht die Länge der Auswertstrecke wegen boden- und konstruktionsbedingter Einschwingvorgänge zu Anfang der Messung von der geforderten Mindestlänge der Gesamtmessstrecke ab (vgl. Abschnitt 3.4.1).

Tab. 13: Technische Spezifikationen des Gleitreibungsmessgerätes

Mechanische und messtechnische Spezifikationen des Messgerätes:	
Gesamte Messstrecke	0,60 m
Ausgewertete Messstrecke	0,46 m
Messgeschwindigkeit (Ergebnis Vorversuche)	0,115 m/s
Material und Shore-D-Härte (°SD) Prüfkörper	PA 6; 73 + 1 °SD
Geschwindigkeitskonstanz	+ 1 % bei Messgeschwindigkeit
Motorleistung	180 W
Fußungsfläche	8,86 cm ²
Masse des Prüfkörpers inkl. Gewicht	10 kg
Flächenpressung	11,08 N/cm ²
Echtzeit Abtastrate	400 S/s
Technische Daten der Kraftmessdose:	
Messbereich	0-500 N
Genauigkeitsklasse nach OIML R 60	C1
Linearitätsabweichung	+ 0,1 %
Technische Daten des Messsignalverstärkers:	
Linearität vom Endwert	< 0,01 %
Eingangssignal	0,3 mV/V bis 3,0 mV/V
Nullpunktunterschied VOUT zu IOUT	< 2 % vom Endwert
Linearitätsfehler	< 50 ppm vom Endwert
Technische Daten des Oszilloskops:	
Bandbreite	60 MHz
Max. Echtzeit-Abtastrate	500 MS/s
Eingangsempfindlichkeit	5 mV/Div...100V/Div
A/D Wandler	8 Bit
Datenausgabe	als .fvf-Datei über optisch isolierte RS-232 Schnittstelle

Quelle: Spezifische Einstellungen und Herstellerangaben zu den im Messsystem verwendeten Komponenten

3.1.3 Technische Ausführung des Topografiemessgerätes

Im folgenden Abschnitt wird das eingesetzte Topografiemessgerät mit seinen wichtigsten technischen Spezifikationen vorgestellt. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 22 zu sehen.

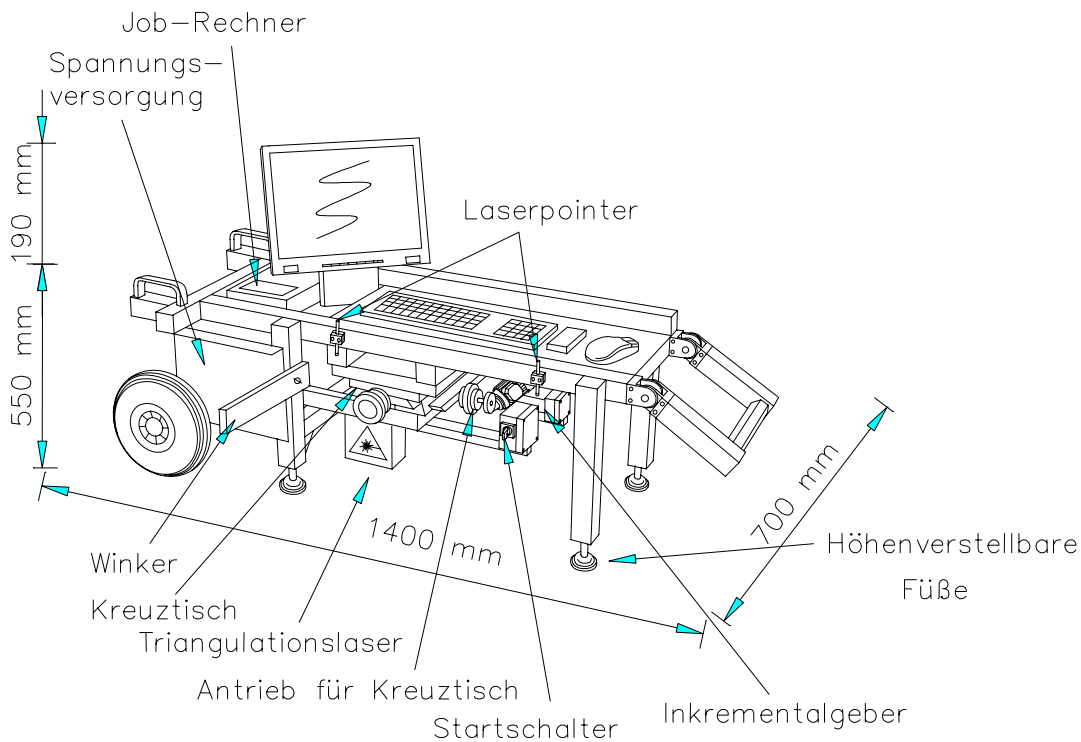


Abb. 22: Schematische Darstellung des Topografiemessgerätes

Der Rahmen des Topografiemessgerätes besteht ebenfalls aus einer Konstruktion von 45 mm Aluminium Vierkantrohren. Höhenverstellbare Füße ermöglichen eine ebene Aufstellung des Gerätes. Das mechanische Herzstück des Topografiemessgerätes bildet ein äußerst steifer Kreuztisch, der sowohl in Längs- als auch in Querrichtung verschiebbar ist. Dieser trägt den Lasermesskopf (MEL M2D 15/10). Hierbei handelt es sich um einen Laser-Linienscanner, der nach dem Prinzip der einfachen Laser-Triangulation arbeitet. Der Kreuztisch ist zum Bewegen in Längsrichtung mit einem Elektroantrieb ausgestattet, der für einen konstanten Vorschub sorgt und über eine Gewindespindel erfolgt. Am Anfang und Ende der Messstrecke sind jeweils mechanische Endschalter zur Abschaltung des Antriebs angebracht. Ein Inkrementalgeber liefert Informationen über die zurückgelegte Messstrecke. Diese werden zusammen mit den vom Sensor aufgenommenen Oberflächen-daten mittels einer Software verarbeitet, auf dem Bildschirm visualisiert und als Binär-datensatz auf dem Job-Rechner gespeichert. Aufgrund seiner Auflösung und des Messbereichs sind mit dem Scanner laut Definition in DIN EN ISO 13473-1 sowohl Bereiche der Mikro- als auch der Makrorauheit erfassbar.

Ebenso wie bei dem Gleitreibungsmessgerät dienen Laserpointer und Winker zur exakten Messgerätpositionierung. Das gesamte Gerät ist akkubetrieben. Die wichtigsten technischen Spezifikationen des Topografiemessgerätes sind in Tab. 14 aufgeführt.

Die Konstruktionsanforderungen an das gesamte Messsystem, die Ausrichtung des Sensors, der Messbereich und die Profilaufnahme- bzw. Länge der Messstrecke entsprechen den Anforderungen der DIN EN ISO 13473-1 und DIN ISO 13473-3. Laut Klassifizierung in DIN ISO 13473-3 für die zu untersuchenden Texturwellenlängenbereiche handelt es sich bei dem eingesetzten Sensor um einen Aufnehmer, der in die Wellenlängenbereichsklasse AC fällt. Durch die Laserlinienbreite werden allerdings die Anforderungen an die Auflösung nicht ganz erfüllt. Dies ist ein bekanntes Problem auf welches in der Norm ebenfalls eingegangen wird: Da Laserlinienbreite (also auch Auflösung in x-Richtung) und die Auflösung in z-Richtung gegenläufige Größen sind, ist diese ein begrenzender Faktor des Messsystems. Die in DIN ISO 13473-3 formulierten Anforderungen sind ursprünglich für Profilometer mit einer punktförmigen Abtastcharakteristik formuliert. Hiermit ist eine wesentlich höhere Auflösung zu erzielen als mit Laser-Linienscannern. Somit kann die in der Norm genannte Anforderung als Abschätzung benutzt werden, solange hier kein praktikables und technisch akzeptables Verfahren genormt ist, das für die endgültige Auflösungsfestlegung herangezogen werden kann.

Der eingesetzte Laser-Linienscanner ergab sich als Kompromiss zwischen Laserlinienbreite und Auflösung, um die für die Rutsicherheit maßgeblichen Texturbereiche untersuchen zu können. Weiterhin war es wichtig, eine möglichst breite Messfläche im Rahmen der Auflösungsvorgaben durch die Rauheitsbereiche für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Oberflächenrauheit und den tribologischen Eigenschaften der Laufflächen bereit zu stellen.

Tab. 14: Technische Spezifikationen des Topografiemessgerätes

Bereich der Texturwellenlänge	AC
Oberflächenabtastung	berührungslos
Funktionsprinzip des Sensors	einfache Triangulation
Aufnahmefläche	186 mm x 10 mm
Ausgewertete Fläche	186 mm x 9,22 mm
Scan Tiefe z	15 mm
Scan Weite x	10 mm
Auflösung in z-Richtung	0,03 mm
Auflösung in x-Richtung	0,02 mm
Auflösung in y-Richtung	0,04 mm
Lichtquelle	LASER 660 nm, 1 mW
Abtastrate (Scan-Rate)	full Frame 50 scans/s
Zulässiges Umgebungslicht	5000 Lux
Schutzart	IP 64
Übertragungsrate	12 Bit
Datenausgabe	als .bin-Datei über Ethernet oder USB-Schnittstelle

Quelle: Spezifische Einstellungen und Herstellerangaben zu den im Messsystem verwendeten Komponenten sowie DIN ISO 13473-3

3.2 Vorversuche

3.2.1 Gleitreibungsmessgerät

Um die Wiederholbarkeit und die Präzision des Messgerätes unter verschiedenen Einsatzbedingungen zu überprüfen und diese festzulegen, wurden zahlreiche Vorversuche durchgeführt. Sie fanden einerseits in der Baulehrschau der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, am Institut für Tierhaltung und Tierschutz in Grub, teils in den hauseigenen Räumlichkeiten am Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik in Freising-Weihenstephan statt. Es wurden Versuche mit verschiedenen Messgeschwindigkeiten auf unterschiedlichen Prüfflächen in nassem und trockenem Zustand durchgeführt. Insgesamt hatten die ausgewerteten Vorversuche einen Umfang von 38 verschiedenen Messsituationen. Je Situation wurden 10 Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dies erschien angebracht, um abgesicherte Messwerte zu erhalten. Denn auf einigen Materialien, insbesondere auf sehr rauen Materialien und Gummimatten, waren mitunter hohe Streuungen der Messergebnisse auf ein und derselben Messstelle zu beobachten. Diese 10 Wiederholungsmessungen wurden an je drei unterschiedlichen Prüfstellen des gleichen Prüfmaterials durchgeführt. Somit ergab sich je nach Material und Situation ein Stichprobenumfang von 30 Messungen, aus denen die Mittelwertbildung erfolgte. Insgesamt gingen demnach 1140 Einzelmessungen in die Auswertung der Vorversuche zur Gleitreibungsmessung ein.

Um eine Messgeschwindigkeit zu erreichen, die im Rahmen der messtechnischen und konstruktiven Voraussetzungen möglichst nahe an der Ausgleitgeschwindigkeit des Rindes liegt, wurden für die Versuche drei auf sämtlichen Probeflächen prinzipiell mögliche Messgeschwindigkeiten am stufenlos einstellbaren Frequenzumrichter programmiert. Diese betragen 0,057 m/s, 0,115 m/s und 0,172 m/s. Tab. 15 zeigt die Ergebnisse der Geschwindigkeitsuntersuchungen auf trockenen Probematerialien. Die Prüfung auf statistische Unterschiede wurde jeweils innerhalb der Materialien für die drei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Datenverarbeitung und statistischen Auswertmethodik ist in Abschnitt 3.4.3 zu finden. Signifikante Mittelwertunterschiede sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet.

Tab. 15: Ergebnisse der Vorversuche zur Auswahl der Messgeschwindigkeit bei der Gleitreibungsmessung auf trockenen Prüfmaterialien

Material	Gleitreibungskoeffizient μG und Standardabweichung s bei einer Messgeschwindigkeit von:					
	0,057 m/s		0,115 m/s		0,172 m/s	
	μG	s	μG	s	μG	s
Beton, 22 Jahre, unbenutzt (Be)	0,39 ^a	0,020	0,40 ^a	0,010	0,40 ^a	0,007
Gussasphalt, 22 Jahre, unbenutzt (Ga)	0,40 ^a	0,019	0,39 ^a	0,012	0,41 ^a	0,012
Spaltenboden, 4 Jahre, unbenutzt (Sp)	0,28 ^a	0,004	0,28 ^a	0,004	0,30 ^a	0,004
Gummimatte Laufgang (Kraiburg), 1 Jahr, unbenutzt (GuLau)	0,81 ^a	0,052	0,83 ^a	0,009	/	/
Gummi-Liegeboxenmatte (Kraiburg), 1 Jahr, unbenutzt (GuLie)	0,57 ^a	0,030	0,63 ^b	0,012	0,57 ^a	0,021
Betonestrich, Epoxydharzanstrich, 45 Jahre im Werkstatteinsatz (BeEpo)	0,21 ^a	0,004	0,21 ^a	0,002	0,21 ^a	0,002

n = 30 Messungen je Material und Messbedingung

(Tukey $\alpha = 0,05$)

Die fehlenden Werte bei Gummimatte Laufgang sind dadurch zu erklären, dass bei dieser Geschwindigkeit keine Messungen mehr durchgeführt werden konnten, da der Prüfkörper aufgrund massiver Stick-Slip-Vorgänge durch das Einsinken und die viskoelastischen Eigenschaften der Matte mehr oder weniger über die Messstrecke gesprungen ist.

Im trockenen Zustand konnten auf den harten Bodenmaterialien zwischen den drei Geschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Dies deckt sich mit dem Coulomb'schen Reibungsgesetz. Der signifikante Unterschied der mittleren Geschwindigkeit auf der Gummi-Liegeboxenmatte zu den anderen beiden Geschwindigkeiten ließ sich nicht schlüssig erklären.

Für einige ausgewählte Materialien wurde die Überprüfung der Messgeschwindigkeit auf nassen Prüfflächen durchgeführt. Zur Benetzung der Prüfflächen wurde Wasser mit einer Gießkanne ausgebracht. Die statistische Prüfung auf signifikante Unterschiede erfolgte jeweils innerhalb der Materialien für die drei verschiedenen Geschwindigkeiten (Tab. 16).

Tab. 16: Ergebnisse der Vorversuche zur Auswahl der Messgeschwindigkeit bei der Gleitreibungsmessung auf nassen Prüfmaterialien

Material	Gleitreibungskoeffizient μG und Standardabweichung s bei einer Messgeschwindigkeit von:					
	0,057 m/s		0,115 m/s		0,172 m/s	
	μG	s	μG	s	μG	s
Beton, 22 Jahre, unbenutzt (Be)	0,36 ^a	0,004	0,35 ^a	0,003	0,33 ^a	0,005
Gussasphalt, 22 Jahre, unbenutzt (Ga)	0,40 ^{ab}	0,015	0,41 ^a	0,012	0,39 ^b	0,005
Gummimatte Laufgang (Kraiburg), 1 Jahr, unbenutzt (GuLau)	0,71 ^a	0,007	0,55 ^b	0,005	/	/
Gummi-Liegeboxenmatte (Kraiburg), 1 Jahr, unbenutzt (GuLie)	0,67 ^a	0,009	0,60 ^b	0,006	0,52 ^c	0,019
Floatglas, neu	0,29 ^a	0,006	0,27 ^{ab}	0,002	0,25 ^b	0,006

n = 30 Messungen je Material und Messbedingung

(Tukey $\alpha = 0,05$)

Auf Beton waren zwischen den drei unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Auch bei Gussasphalt unterschieden sich die geringe und mittlere Geschwindigkeit nicht. Wird die Messung mit der höchsten Geschwindigkeit auf der Laufgangmatte außer Acht gelassen, ist festzustellen, dass der Gleitreibungskoeffizient auf den verformbaren Materialien mit zunehmender Messgeschwindigkeit abnahm. Auch bei Glas schien diese Tendenz vorhanden zu sein, obwohl sich die gemessenen Gleitreibungskoeffizienten bei geringer und mittlerer Geschwindigkeit nicht signifikant unterschieden.

Zusammenfassend erfolgt ein Vergleich zwischen trockenen und nassen Materialien. Statistische Vergleiche wurden in diesem Fall nur für die Zustände trocken/nass innerhalb eines Materials und einer Prüfgeschwindigkeit angestellt (Tab. 17).

Tab. 17: Ergebnisse unterschiedlicher Messgeschwindigkeiten ausgewählter Prüfflächen im trockenen und nassen Zustand

Material	Gleitreibungskoeffizient μG und Standardabweichung s unter verschiedenen Materialzuständen bei einer Messgeschwindigkeit von:											
	0,057 m/s				0,115 m/s				0,172 m/s			
	trocken		nass		trocken		nass		trocken		nass	
	μG	s	μG	s	μG	s	μG	s	μG	s	μG	s
(Be)	0,39 ^a	0,020	0,36 ^a	0,004	0,40 ^a	0,010	0,35 ^b	0,003	0,40 ^a	0,007	0,33 ^b	0,005
(Ga)	0,40 ^a	0,019	0,40 ^a	0,015	0,39 ^a	0,012	0,41 ^b	0,012	0,41 ^a	0,012	0,39 ^b	0,005
(GuLau)	0,81 ^a	0,052	0,71 ^b	0,007	0,83 ^a	0,009	0,55 ^b	0,005	/	/	/	/
(GuLie)	0,57 ^a	0,030	0,67 ^b	0,009	0,63 ^b	0,012	0,60 ^b	0,006	0,57 ^a	0,021	0,52 ^b	0,019

$n = 30$ Messungen je Material und Messbedingung

(Tukey $\alpha = 0,05$)

Insgesamt zeigte die Auswertung keine eindeutigen Ergebnisse. Während sich bei der niedrigsten Messgeschwindigkeit die Gleitreibungskoeffizienten auf Beton und Gussasphalt in trockenem und nassem Zustand jeweils nicht signifikant voneinander unterschieden, galt dies nicht für Messungen mit höheren Geschwindigkeiten auf diesen Belägen. Darüber hinaus lieferten die verformbaren Materialien ebenfalls kein einheitliches Ergebnis.

Zusätzlich zu den Vorversuchen mit trockenen und nassen Prüfbelägen wurden auf einem Betrieb mit Gummimatten auf planbefestigten Laufflächen jeweils 5 Messstellen bei einer Messgeschwindigkeit von 0,115 m/s unter verschmutzten Bedingungen durchgeführt. Nachdem sich schon binnen dieser sehr kleinen Messreihe abzeichnete, dass unter diesen Messbedingungen keine ausreichende Wiederholpräzision aufgrund zu vieler Störfaktoren zu erwarten war, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt (vgl. außerdem Abschnitt 2.4.4).

Die Entscheidung zur Festlegung der endgültigen Messgeschwindigkeit und der Messbedingungen für die Hauptuntersuchungen wurde von den Ergebnissen der Vorversuche, den Anforderungen an das Messverfahren und den Erkenntnissen aus der Literatur zu unter-

schiedlichen Teilen beeinflusst. Der Entscheidungsprozess wurde durch folgende Punkte maßgeblich bestimmt:

- Möglichst hohe Messgeschwindigkeit, die sich an der Ausgleitgeschwindigkeit des Rindes orientiert ($1,5 \text{ m/s} < v < 2,8 \text{ m/s}$) (vgl. Abschnitt 2.1.2)
- Anforderungen der E DIN 51131 (Messgeschwindigkeit $0,2 \text{ m/s} < v < 0,3 \text{ m/s}$)
- Möglichkeit der Messung von rauen und elastischen Laufflächenbelägen ohne Veränderung des Gerätesetups
- Gleiche Bedingungen (nasse Prüfflächen) wie in DIN EN 13036-4 für SRT-Messungen vorgegeben, für eventuelle Vergleichbarkeit
- Möglichst reale Bedingungen im Stall, allerdings mangelnde Reproduzierbarkeit aufgrund zu vieler Störfaktoren bei verschmutzten Laufflächen (vgl. Abschnitt 2.4.4)

Die Ergebnisse dieser Vorversuche zur Festlegung der Messbedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Nachdem in der vorliegenden Arbeit nur harte Laufflächen zu untersuchen waren, hätte eigentlich die höchste Messgeschwindigkeit gewählt werden können. Davon wurde aber aus folgenden zwei Gründen abgewichen: Zum einen waren alle in den Vorversuchen untersuchten Beläge zwar keine neuen, dennoch handelte es sich um saubere Ausstellungsbeläge bzw. bei dem Betonbelag mit Epoxydharzanstrich um einen, der sich in einem Messlaboratorium befand. Somit waren die genannten Prüfflächen noch nie den Strapazen von Tieren und Stallalltag ausgesetzt. Daher war damit zu rechnen, dass die Laufflächen auf den Untersuchungsbetrieben, insbesondere solche, die bereits längere Zeit im Einsatz sind, keine homogene Oberflächentextur aufweisen wie die Flächen aus den Vorversuchen und entsprechend rauer sind. Dies war besonders für Gussasphalt zu erwarten. Zum anderen sollte es mit dem Gleitreibungsmessgerät möglich sein, sämtliche Laufflächenbeläge zu messen, ohne von den festgelegten Gerätespezifikationen abweichen zu müssen. Andererseits sollte die Messgeschwindigkeit möglichst schnell sein, um den Anforderungen der E DIN 51131 gerecht zu werden und soweit es die Gegebenheiten zuließen, möglichst nahe an den Bereich der Ausgleitgeschwindigkeit des Rindes zu gelangen. Daher wurde für die Hauptuntersuchungen die mittlere Geschwindigkeit von $0,115 \text{ m/s}$ ausgewählt. Dies entsprach zwar nicht mehr der E DIN 51131, gewährleistete aber, dass bei dieser Geschwindigkeit auch Messungen auf sehr rauen Laufflächen und solchen mit Gummimatten durchgeführt werden können.

Weiterhin schien nur eine Messung auf nassen Laufflächen ohne Verschmutzungen zielführend zu sein. Denn nur unter diesen Messbedingungen ist die Rutschfestigkeit des jeweiligen Materials ohne störende Einflussfaktoren ermittelbar.

3.2.2 Topografiemessgerät

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit und der Präzision des Topografiemessgerätes wurden ebenfalls zahlreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Diese fanden vor allem in den hauseigenen Räumlichkeiten, aber auch in der Baulehrschau der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft am Institut für Tierhaltung und Tierschutz in Grub statt. An dieser Stelle sollen die wichtigsten Ergebnisse der Messlaboruntersuchungen vorgestellt werden.

Zwei fabrikneue Spaltenbodenelemente wurden vermessen, wobei auf einem 3 und dem anderen 4 unterschiedliche Messflächen erfasst wurden. Jede der Flächen wurde jeweils 25 mal gescannt. Weiterhin wurden Messungen an der rauen Seite einer neuen melaminharzbeschichteten Siebdruckplatte durchgeführt, und zwar 6 verschiedene Messflächen mit jeweils 5 Wiederholungen. Insgesamt wurden 325 Messungen durchgeführt. Als Vergleichsgröße der zahlreichen in der Auswertungssoftware verfügbaren Messgrößen wurde der arithmetische Mittenrauwert S_a ausgewählt, da dessen zweidimensionales Pendant (R_a) auch in der Metallverarbeitung eine genormte Kenngröße ist und als Standardgröße zur Oberflächenbeschreibung verwendet wird.

Tab. 18 zeigt die arithmetischen Mittenrauwerte und die dazugehörigen Standardabweichungen der Wiederholungsmessungen der verschiedenen Prüfmaterialien. Da die maximale Auflösung des Laser-Linienscanners in z-Richtung vom Hersteller mit 0,03 mm angegeben wird, liegt die berechnete Standardabweichung als Maß für die Wiederholungspräzision unterhalb dieser Grenze. Die dargestellten Werte belegen demnach eine sehr gute Wiederholpräzision des Topografiemessgerätes.

Tab. 18: Ergebnisse der Vorversuche zur Überprüfung der Wiederholbarkeit von Messungen mit dem Topografiemessgerät auf ausgewählten Prüfflächen

Material	Messstelle	Anzahl Messungen n	Arithmetischer Mittenrauwert S_a [mm]	Standardabweichung s [mm]
Spaltenbodenprobe 1	1	25	0,1791	0,0067
	2	25	0,1669	0,0070
	3	25	0,1511	0,0044
Spaltenbodenprobe 2	1	25	0,0896	0,0030
	2	25	0,0899	0,0056
	3	25	0,0802	0,0028
	4	25	0,0883	0,0048
Siebdruckplatte	1	5	0,0504	0,0024
	2	5	0,0518	0,0026
	3	5	0,0551	0,0026
	4	5	0,0502	0,0029
	5	5	0,0495	0,0035
	6	5	0,0488	0,0027

3.2.3 Versuchsroutine

Um eine Durchführungsroutine für die Messungen auf den Betrieben festzulegen, wurden gleichzeitige Messungen mit dem Gleitreibungsmessgerät und dem Topografiemessgerät in der Baulehrschau der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft am Institut für Tierhaltung und Tierschutz in Grub durchgeführt. Hierbei ging es vor allem um eine Festlegung der Anzahl und die Anordnung der Messflächen des Topografiemessgerätes innerhalb der Messflächen des Gleitreibungsmessgerätes, da diese nicht gleich groß waren. Die Messfläche des Gleitreibungsmessgerätes betrug 600 mm x 97 mm, die Laserlinienbreite des Topografiemessgerätes 22 mm und der maximale Hub des Scannerkopfes 186 mm. Allerdings liegen verfahrensbedingt nur 10 mm der Laserlinie im Schärfe- und damit im Messbereich des Laserscanners (vgl. Abb. 23). Somit erfasste die Topografiemessung nur Ausschnitte aus der Gleitreibungsmessfläche. Weiterhin sollte eine Zeitoptimierung für den Ablauf der Messungen erreicht werden.

Grundsätzlich mussten die Messflächen des Topografiemessgerätes im Bereich der konstanten Messgeschwindigkeit des Gleitreibungsmessgerätes positioniert werden, da die konstante Geschwindigkeit die Voraussetzung zur Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten ist. Daher wurden die Messflächen des Topografiemessgerätes erst 200 mm, gemessen vom äußeren Rand des Gleitreibungsprüfkörpers, in die Messfläche des Gleitreibungsmessgerätes gelegt. Um auch auf rauen Oberflächen eine topografische Erfassung der vom Gleitreibungsprüfkörper überfahrenen Fläche zu garantieren (der Gleitreibungsprüfkörper ist auf solchen Belägen nicht spurtreu), wurden die drei parallelen Messflächen des Topografiemessgerätes jeweils 12,5 mm von den Rändern der Gleitreibungsmessfläche positioniert. Die Anzahl der Topografiemessstellen ergab sich aus der Arbeitsroutine mit den Messgeräten, da im Versuchsablauf gerade drei Topografiemessungen an einer Messstelle möglich waren, während an einer nachfolgenden bereits Gleitreibungsmessungen durchgeführt werden konnten.

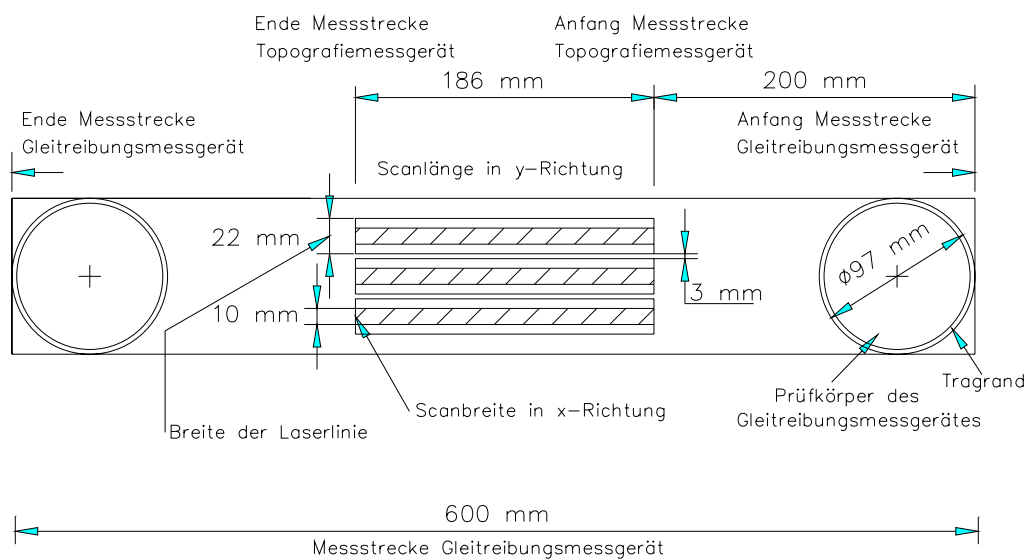


Abb. 23: Aufstellungsschema der Messgeräte für die Versuchsdurchführung

3.3 Versuchsvorbereitung und Versuchsdurchführung

3.3.1 Auswahl der Ställe

Zur Untersuchung der Laufflächen wurden nur harte Beläge wie Gussasphalt, Beton und Spaltenboden ausgewählt, da nach bisherigem Stand der Kenntnisse nur bei diesen Belägen im Laufe der Zeit Probleme mit der Rutschfestigkeit und im Zusammenhang damit auch Klauen- und Gliedmaßenprobleme auftreten.

Um die Veränderung der Rutschfestigkeit der Beläge im Laufe der Zeit zu erfassen, wurden die Laufflächen in eine neue und eine alte Altersklasse eingeteilt. Beläge innerhalb einer Altersklasse wurden in Abhängigkeit von ihrer Materialklasse als gleich angesehen. Abb. 24 verdeutlicht die Einteilung der Beläge in Alters- und Materialklassen und den Umfang der Untersuchungen. Auswahlkriterien waren ausschließlich Laufflächenmaterial und Alter der Laufflächen. Eine Auswahl von Daten der untersuchten Laufställe findet sich in Anhang 1.

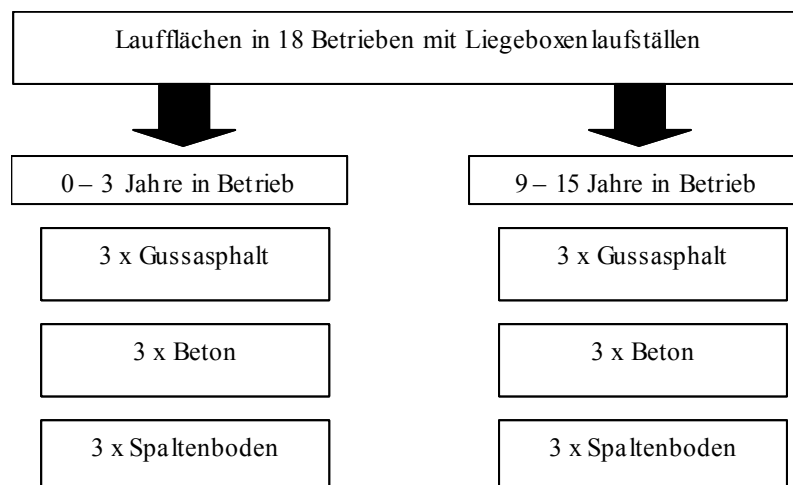


Abb. 24: Umfang der Untersuchungen

3.3.2 Auswahl der Messstellen im Stall

Die Auswahl der Messpunkte in den jeweiligen Ställen erfolgte nach einem vorher festgelegten Schema. Anhand der Stallgrundrisse und in Absprache mit den Betriebsleitern wurden vorwiegend solche Messstellen ausgewählt, die häufig von den Kühen frequentiert werden. Eine Übersicht über die Lage der Messpunkte ist in Abb. 25 zu sehen.

Um Aufschluss über die Haltbarkeit der unterschiedlichen Bodenmaterialien und den Einfluss der Frequentierung verschiedener Stallbereiche, in denen die einzelnen Messstellen lagen, zu bekommen, wurde eine Einteilung der insgesamt zehn Messstellen je Stall in sechs hoch und vier niedrig frequentierte Messstellen vorgenommen. Von den sechs als hochfrequentiert erachteten Messpunkten wurden je Stall jeweils zwei im Bereich vor und hinter dem am häufigsten begangenen Übertrieb ausgewählt. Insgesamt acht der Mess-

punkte waren in jedem Stall identisch und jeweils vier befanden sich in einer Achse. Die anderen beiden waren je nach den Verhältnissen vor Ort frei wählbar (Kreise), wobei jedoch nur solche ausgesucht wurden, die augenscheinlich oft begangen werden. Hierzu zählten beispielsweise die Übergänge selbst, sofern sie aus dem selben Material wie die Laufgangbeläge bestanden, Melkstandein- bzw. austriebe oder Bereiche vor Kraftfutterstationen und Tränken. Es war ebenfalls möglich, dass in Abhängigkeit vom Stallgrundriss mehrere Auswahlkriterien bei einer Messstelle gleichzeitig erfüllt waren. Die schematischen Grundrisse der untersuchten Milchviehbereiche der Ställe sowie die Systematik der Messstellenklassifizierung sind in Anhang 2 und 3 dokumentiert. Hierbei wurden die Messstellen je nach Lage im Stall mit einem dreistelligen Zahlencode versehen.

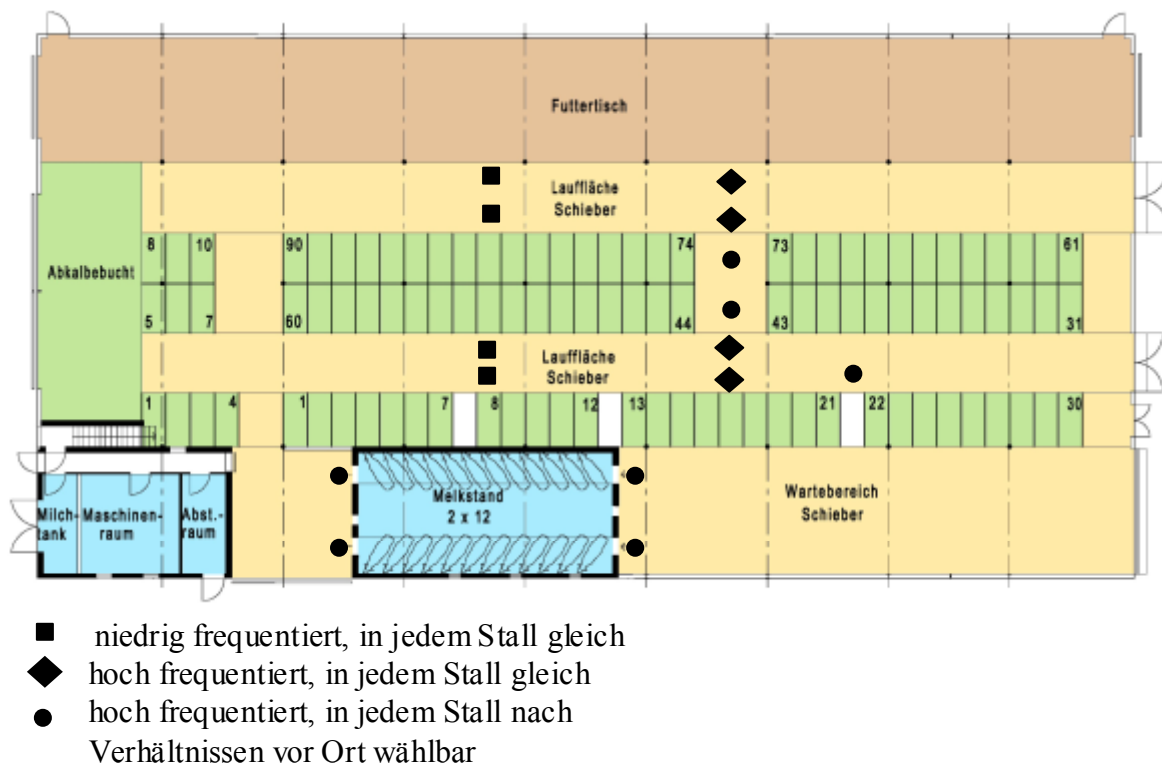


Abb. 25: Auswahl der Messpunkte in den Ställen

3.3.3 Durchführung der Messungen

Die beschriebenen Messpunkte wurden mit Wasser und Bürste gründlich gereinigt. Dies war insbesondere für die Topografiemessungen mit dem Laserscanner notwendig, damit die optisch gewonnenen Informationen über die Oberfläche des Bodenbelags nicht durch anhaftende Futter-, Einstreu- oder Kotpartikel verfälscht werden. Aufgrund der in den Abschnitten 2.4.4 und 3.1.2 beschriebenen Problematik bei Gleitreibungsmessungen auf verschmutzten Messflächen erfolgte die Ermittlung der Reibwerte ebenfalls auf gesäuberten Messstellen. Um den praktischen Verhältnissen im Stall Rechnung zu tragen, wurde

das zur Reinigung der Messstellen verwendete Wasser auf den Messstellen belassen. Diese Vorgehensweise stützt sich auf die Überlegung, dass es bei ganzjähriger Stallhaltung in einhäusigen Stallungen nur selten zum Abtrocknen der Laufflächen kommt. Weiterhin werden auch die Griffigkeitsmessungen nach DIN EN 13036-4 mit dem SRT-Gerät unter nassen Verhältnissen durchgeführt, sodass sich diese Vorgehensweise anbietet, um gegebenenfalls eine spätere Vergleichbarkeit mit den durchgeführten Messungen zu gewährleisten. Abb. 26 zeigt unterschiedliche Bodenmaterialien nach der Reinigung kurz vor der ersten Gleitreibungsmessung.



Abb. 26: Verschiedene Bodenbeläge, präpariert für die Gleitreibungsmessungen

Nach der Reinigung wurden 10 Wiederholungsmessungen an einer Messstelle durchgeführt. Anschließend wurden die Messdaten aus dem mobilen Oszilloskop auf ein Laptop übertragen und das Gleitreibungsmessgerät mittels Laserdistometer im Stall eingemessen. Dies war zum einen für die spätere exakte Positionierung des Topografiemessgerätes innerhalb der Messfläche des Reibgerätes nötig, zum anderen können die Messstellen jederzeit im Stall wieder lokalisiert und beispielsweise in bestimmten Zeitintervallen erneut untersucht werden. Im Anschluss wurde die Messstelle mit einem Heißluftföhn getrocknet, da das auf der Fläche verbliebene Reinigungswasser keine Messung mit dem Laser-Linienscanner zuließ.

Zur exakten Positionierung des Laser-Linienscanners innerhalb der Prüffläche des Gleitreibungsmessgerätes wurde das in Abschnitt 3.2.3 vorgestellte Aufstellungsschema für die beiden Messgeräte angewendet und wie folgt vorgegangen: Nach vorangegangener Gleitreibungsmessung wurde ein Stativ mit einer Laserlinienprojektionsvorrichtung hinter dem Gleitreibungsmessgerät aufgestellt. Die auf den Boden projizierte Laserlinie diente zur anfänglichen Grundaufstellung und anschließender Parallelverschiebung des Topografiemessgerätes. Mit der Laserlinie, den Laserpointern und Winkern, die an beiden Geräten montiert sind, Meterstab und Laserdistometer konnte das Topografiemessgerät exakt an der Laserlinie aufgestellt und innerhalb der Prüffläche des Gleitreibungsmessgerätes zweimal parallel versetzt werden (vgl. Abb. 23, Seite 104). Für exakte Messungen der Oberflächentopografie war es nötig, das Messgerät an jedem Messpunkt mit einer Wasserwaage in Längs- und Querrichtung mittels der höhenverstellbaren Füße auszurichten. Dies war insbesondere bei planbefestigten Flächen mit einem Gefälle zur mittigen Entwässerungsrinne unabdingbar.

Auf diese Weise wurden Topografiedaten von drei Ausschnitten aus der Prüffläche des Gleitreibungsmessgerätes gewonnen. Zur Dokumentation der Klimabedingungen während der Messungen wurden jeweils die Bodentemperatur mit einem Stabthermometer sowie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit nach der Messstellengrundreinigung erfasst. Diese Daten finden sich in Anhang 4.

Aus praktischen Gesichtspunkten wurde darauf verzichtet, auf perforierten Böden orthogonal zu den Schlitzen zu messen. Dies hatte mehrere Gründe: Mit dem vorhandenen Gleitreibungsmessgerät sind prinzipiell solche Messungen möglich und in Vorversuchen in der Baulehrschau zu Grub auch erfolgreich durchgeführt worden. Allerdings waren diese Messungen in den Untersuchungsbetrieben wegen zu hoher Fertigungstoleranzen und Mängel in der Verlegung der Spaltenbodenelemente nicht möglich bzw. die Messergebnisse zu verwerfen. Denn durch Ankanten des Prüfkörpers und die erforderliche Kraft zur Überwindung des Hindernisses wurden die Grenzen des Messbereichs des Oszilloskops überschritten. Hierzu genügten schon minimale Abweichungen von einer exakten ebenen Verlegung der Spaltenbodenelemente. Ein weiterer Grund für die ausschließliche Durchführung der Messungen in Längsrichtung der Balken war das Bestreben, Zusammenhänge zwischen optischen Kenngrößen und Reibwerten herzustellen. Dies ist allerdings nicht möglich, wenn die Messparameter durch die Messung von Schlitzanteilen bei der optischen Rauheitsmessung verfälscht werden.

Stellvertretend für den Messablauf auf allen Bodenmaterialien sind die Gerätschaften im Einsatz auf Spaltenboden gezeigt (Abb. 27).

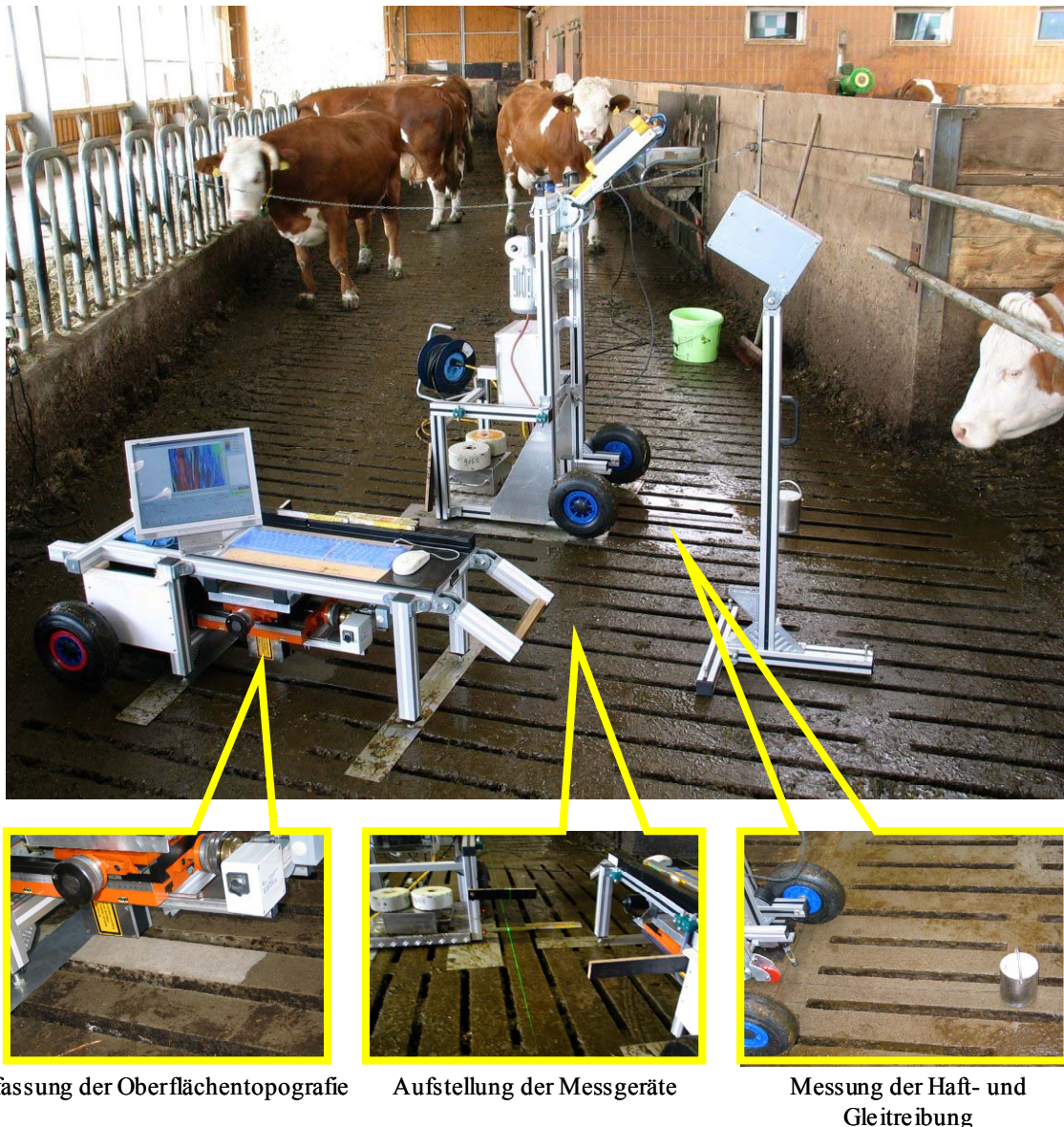


Abb. 27: Einsatz der Messgeräte in der Praxis

3.4 Datenaufbereitung und statistische Auswertung

3.4.1 Verarbeitung der Reibungsmessdaten

Die Daten der 10 Wiederholungsmessungen wurden mit der FLUKE-View Software aus dem mobilen Oszilloskop auf ein Laptop ausgelesen und von dort aus in Microsoft Excel zur Weiterverarbeitung importiert.

Da das Oszilloskop die Spannung im Zeitverlauf aufzeichnet, mussten die erhobenen Spannungsdaten zuerst in Kraft und abschließend als Quotient aus Reib- und Normalkraft in Reibwerte umgerechnet werden. Bei der Kalibrierung des gesamten Messsystems mittels eines 10 kg Eichgewichtes wurde der Messbereich festgelegt. Hieraus ergab sich ein Umrechnungsfaktor von ausgegebener Spannung zu resultierender Reibkraft in Höhe von

1 : 20 ($1V = 20N$). Auf einer Hublänge von 0,60 m wurden insgesamt 2400 Messpunkte aufgezeichnet. In die Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten gingen allerdings nicht alle aufgezeichneten Messwerte ein. Da die Geschwindigkeitskonstanz eine Grundvoraussetzung zur Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten ist, wurden von den 5,7 Sekunden dauernden Messungen lediglich vier Sekunden herangezogen. Denn eine Geschwindigkeitskonstanz war in der ersten und den letzten 0,7 Sekunden der Messung nicht gegeben. Hier beeinflussten Einschwingvorgänge bzw. Stick-Slip-Effekte die Messung, die bis zu einer Sekunde dauern konnten, bevor eine konstante Messgeschwindigkeit erreicht war. Kurz vor Abschluss einer Messfahrt führt der mechanische Endschalter zuerst zu einem Abfall und anschließend wieder zu einem Anstieg der aufgezeichneten Spannung, weshalb auch dieser letzte Abschnitt nicht in die Auswertung einging. Durch diese beiden Restriktionen ergab sich nach der Umrechnung der verwertbaren Messdauer eine Auswertstrecke in Höhe von 0,46 m bzw. 1601 Messpunkten.

Der Haftreibungskoeffizient einer Einzelmessung ergab sich jeweils aus dem größten Messwert zu Anfang der Messkurve. Der Gleitreibungskoeffizient wurde als Durchschnitt der 1601 Messwerte innerhalb des vier sekundigen Auswertungszeitraumes ermittelt. Somit berechnete sich der Haftreibungskoeffizient einer Messstelle als Mittelwert von 10, der Gleitreibungskoeffizient als Mittelwert von 16010 Messwerten. Abb. 28 zeigt die zur Berechnung der Haft- und Gleitreibungskoeffizienten herangezogenen Datenbereiche.

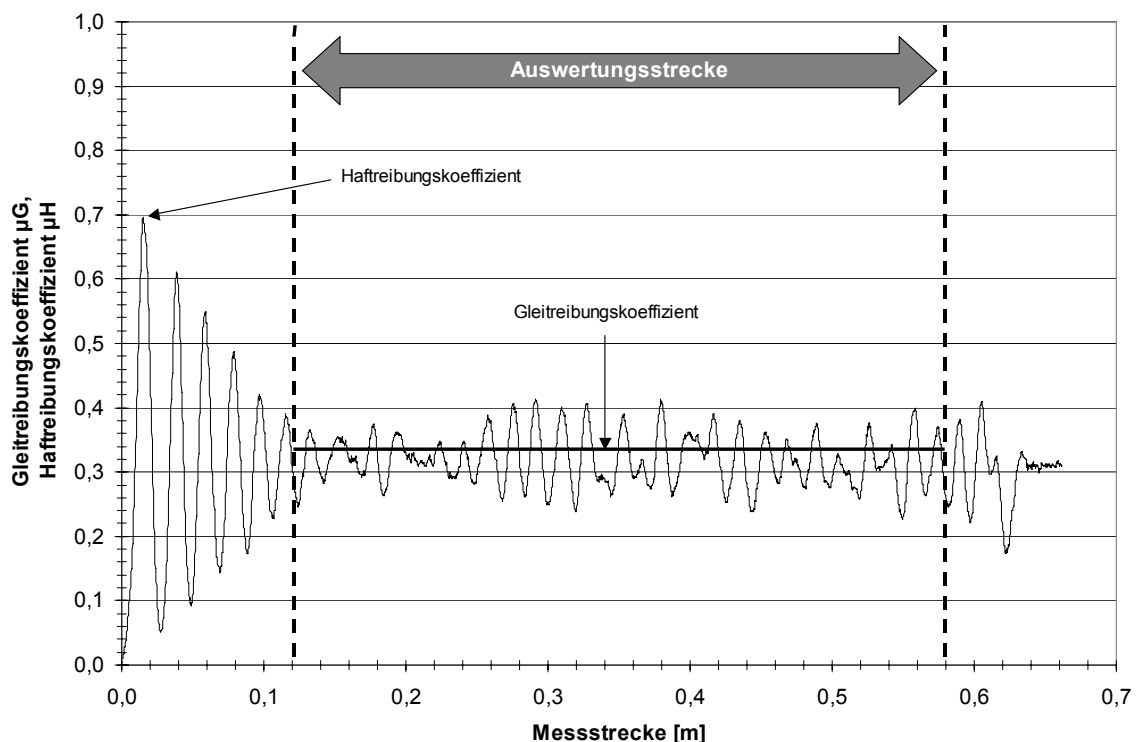


Abb. 28: Datenbereiche zur Ermittlung des Haft- und Gleitreibungskoeffizienten

Zur genauen Analyse der Gleitreibungskurve innerhalb der Auswertungstrecke wurde der Graph jeweils in einem Intervall von 5 Messwerten untersucht. Dabei waren insbesondere die lokalen Maxima und Minima sowie deren vertikale Abstände von Interesse. Unter einem lokalen Minimum bzw. einem lokalen Maximum, im Folgenden auch negative bzw. positive Amplitude genannt, wurde der niedrigste bzw. höchste Messwert innerhalb des o. g. Intervalls verstanden. Aus dem vertikalen Abstand positiver und negativer Amplituden wurden dann jeweils einzelne Spitze-Spitze Werte berechnet, wobei in der Berechnungsvorschrift auf jedes Maximum ein Minimum folgen musste (vgl. Abb. 29). Als durchschnittliches Maß für die in der Gleitreibungskurve vorkommenden vertikalen Amplitudenabstände wurde die Kenngröße „arithmetischer Spitze-Spitze Wert“ μ_{ssa} definiert. Dieser ergab sich bei einer Einzelmessung als Mittelwert sämtlicher Spitze-Spitze Werte innerhalb der Auswertungstrecke. Die Namensgebung dieser Kenngröße erfolgte in Anlehnung an den aus der Elektrotechnik bekannten Wert zur Quantifizierung lokaler Spannungsspitzen U_{ss} (BRECHMANN et al., 2002). Allerdings gilt dieser laut Definition nicht für den Durchschnitt aller auftretenden Spitze-Spitze Werte innerhalb der betrachteten Spannungskurve. Prinzipiell beschreiben beide Kenngrößen jedoch lokale Spitzen innerhalb der Graphen, wobei der arithmetische Spitze-Spitze Wert μ_{ssa} aus Spannungskurven ermittelt wurde, die in Gleitreibungskurven umgerechnet wurden. Die Berechnung des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes erfolgte jedoch nicht nach der aus der Elektrotechnik bekannten Formel, sondern nach der Formel für die mittlere Höhe der Profilelemente R_c innerhalb der Einzelmessstrecke entsprechend DIN EN ISO 4287 aus der Oberflächenanalytik. Hierin ist die Höhendifferenz eines Profilelementes Z_t gleich der Summe aus der Höhe der Spitze und der Tiefe des Tals in einem Profilelement. Zur Ermittlung des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes wurden nicht die in der Norm geforderten horizontalen und vertikalen Zählschwellen, sondern wie bereits erwähnt, ein Intervall von 5 Messwerten verwendet.

Für die Beschreibung der Ausschlagsanzahl innerhalb der Gleitreibungskurve wurde die Kenngröße „Anzahl positiver Amplituden“ NPA definiert. Diese ergab sich aus der Anzahl der positiven Ausschläge der Gleitreibungskurve innerhalb der Auswertungstrecke einer Einzelmessung. Die Anzahl positiver Amplituden beschreibt wie der R_{Pc} Wert in E DIN EN 10049 die Anzahl der Spitzen innerhalb der ausgewerteten Messstrecke. In der Norm müssen eine obere und eine untere Schnittlinie, die parallel sind, nacheinander überschritten werden, und die Anzahl der Spitzen bzw. der Profilelemente wird je cm angegeben. Hierauf wurde bei der Definition der Kenngröße Anzahl positiver Amplituden verzichtet, da die Gleitreibungskurven je nach Boden auf sehr unterschiedlichen Niveaus liegen. Es hätten also für verschiedene Böden unterschiedliche Schnittlinien definiert werden müssen. Daher wurden die Maxima innerhalb eines Auswertungsintervalls von 5 Messwerten gezählt. So wurde eine Unabhängigkeit vom Niveau der Gleitreibungskurve erzielt. Um eine spätere Anwendung der Messgröße Anzahl positiver Amplituden auch bei Gleitreibungsmessgeräten mit anderen Mess- bzw. Auswertungstreckenlängen zu ermöglichen, kann besagte Messgröße auch auf ein bestimmtes Längenmaß standardisiert werden (z. B. NPA/mm). Da sich die Kenngröße in der vorliegenden Arbeit jedoch immer auf die selbe Auswertungstrecke bezieht, wurde hierauf ebenfalls verzichtet. Die arithmetischen

Spitze-Spitze Werte und die Anzahl positiver Amplituden für eine Messstelle berechneten sich als arithmetischer Mittelwert aus 10 Wiederholungsmessungen.

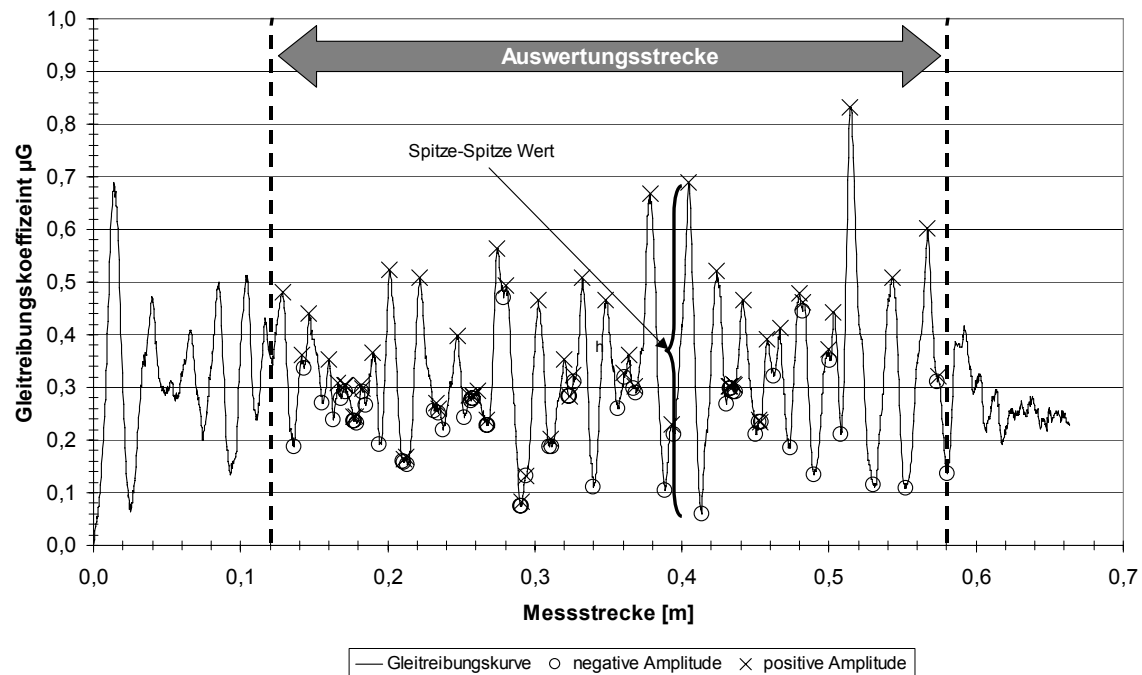


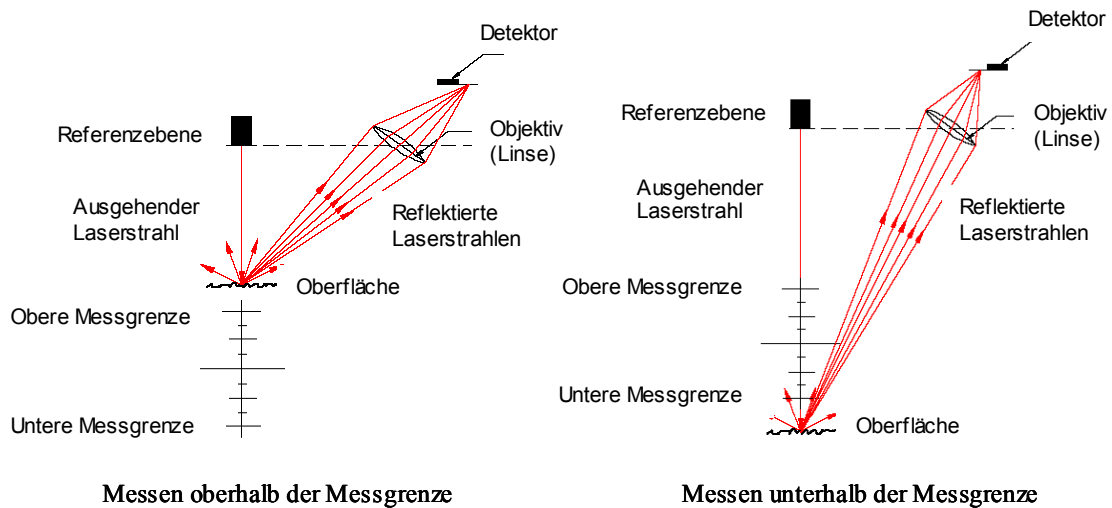
Abb. 29: Positive und negative Amplituden und Beispiel eines Spitze-Spitze Wertes in der Gleitreibungskurve

3.4.2 Verarbeitung der Topografiemessdaten

Die produzierten Datensätze der Topografiemessung wurden zunächst auf dem Job-Rechner des Messgerätes im Binärformat gespeichert. Im Anschluss wurden sie via Ethernet ebenfalls auf ein Laptop übertragen, wo sie mit der Oberflächenanalysesoftware WinSAM (Surface Analysis Module, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie Universität Erlangen-Nürnberg, Version 2.6) bearbeitet wurden. Diese Software basiert auf der Arbeit von SOBIS (1996).

Aufgrund diverser Messfehler konnten die Datensätze jedoch nicht direkt in WinSAM zu entsprechenden Kenngrößen verarbeitet werden. Auf diese Problematik soll im folgenden Abschnitt kurz eingegangen werden.

Während des Scannens einer Oberfläche wird die Laserlinie senkrecht auf die zu vermessende Oberfläche projiziert und ein Teil des Laserlichtes vom Objekt auf den Detektor reflektiert. Hieraus wird dann nach dem Triangulationsprinzip der Abstand zum Objekt berechnet (vgl. Abschnitt 2.5.1). Allerdings kann es je nach Abstand zur Messoberfläche zu mehr oder weniger starken Fehlmessungen oder Messausreißern kommen. Eine Darstellung hierzu findet sich bei EL-TORNACHI (2003).

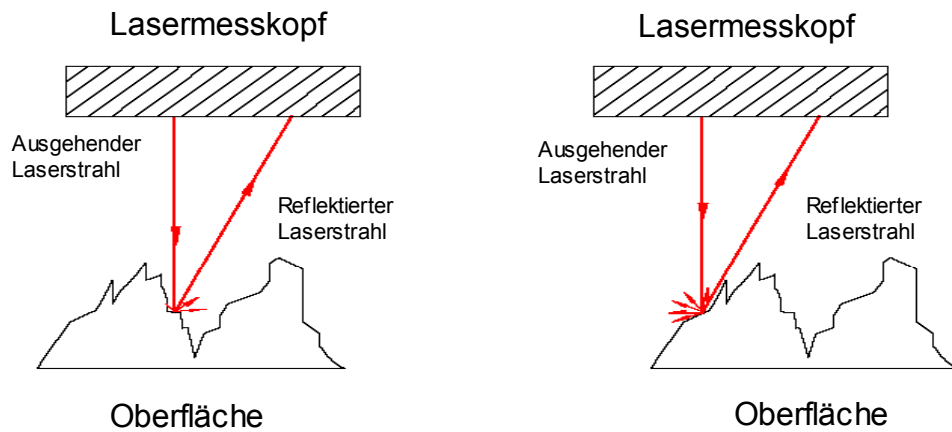


Quelle: verändert nach EL-TORNACHI (2003)

Abb. 30: Auftretende Messfehler bei Laser-Triangulationssystemen (1)

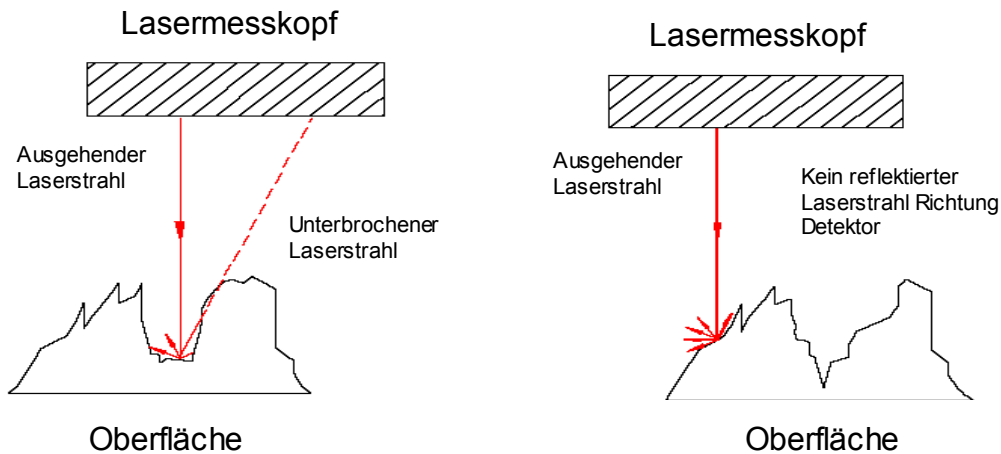
Diese Art der Fehlmessung kann durch eine korrekte Höheneinstellung des Messkopfes über der Messoberfläche reduziert werden. Die Messdaten müssen allerdings trotzdem korrigiert werden.

Ein weiteres Problem stellen Messausreißer dar, die durch die Oberflächenbeschaffenheit hervorgerufen werden und die laut DIN ISO 13473-3 ebenfalls korrigiert werden müssen. Sie sind in Abb. 31 gezeigt und haben folgende Ursachen:



Quelle: verändert nach EL-TORNACHI (2003)

Ununterbrochene Reflektion des Laserstrahls Richtung Detektor (führt nicht zu Ausreißern)



Quelle: verändert nach EL-TORNACHI (2003)

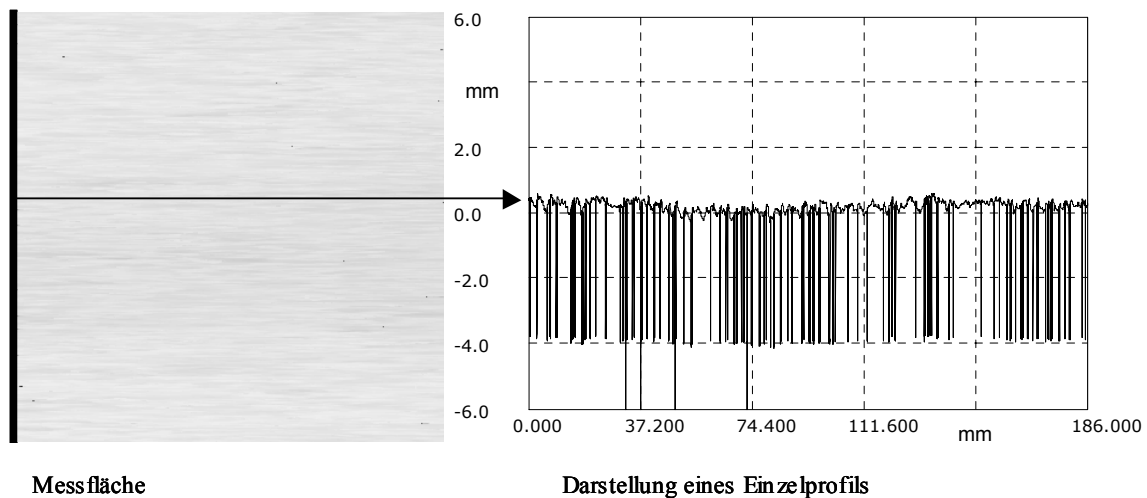
Unterbrechung oder fehlende Reflektion des Laserstrahls Richtung Detektor (führt zu Ausreißern)

Abb. 31: Auftretende Messfehler bei Laser-Triangulationssystemen (2)

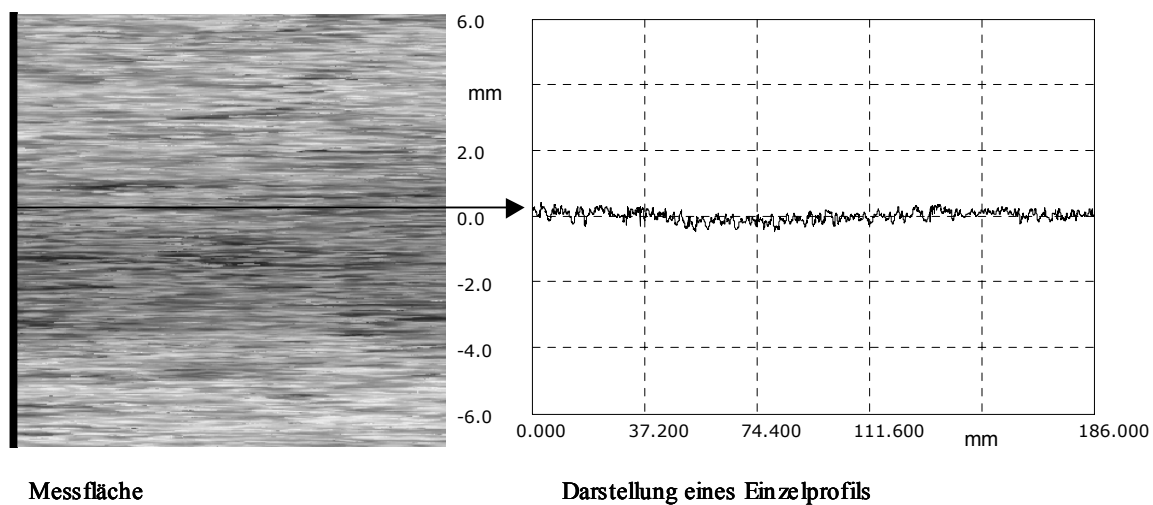
Durch die Unterbrechung oder das Fehlen der Laserstrahlreflektion Richtung Detektor werden Messausreißer verursacht, die nicht verhindert werden können, da deren Ursache durch das Triangulationssystem bedingt ist. Von solchen Fehlmessungen berichten auch STAEVES (1998) sowie DROLL und KUTZBACH (2001) beim Einsatz eines 3D-Laserscanners auf Ackerboden zum Vermessen der Reifenabdrücke und der Bodenverdichtung von Landmaschinen.

Zur Demonstration dieses Problems bei dem eingesetzten Messsystem zeigt Abb. 32 ein exemplarisches Profil eines fabrikneuen Spaltenbodenprobestückes in Vorschubrichtung des Lasermesskopfes über eine Länge von 186 mm. Links neben dem Profil ist die kom-

platte Messfläche dargestellt. Die schwarze Linie innerhalb der Messflächen ist das rechts dargestellte Einzelprofil.



Einzelprofil aus der Gesamtmessfläche vor Messausreißerentfernung und Filterung



Einzelprofil aus der Gesamtmessfläche nach Messausreißerentfernung und Filterung

Abb. 32: Messausreißerentfernung mit dem Programm WinSAM

Zunächst mussten also sämtliche Datensätze eine in der Software implementierte Prozedur zur Messausreißerentfernung durchlaufen. Hierbei werden ungültige Messwerte entfernt und durch Interpolation ersetzt wie es unter anderem in DIN ISO 13473-1 gefordert wird. Weiterhin wurden die zu verarbeitenden Datensätze in den Randbereichen der x-Richtung (Breite der Laserlinie 283 Punkte entspricht 10 mm) um 10 Punkte am Anfang und um 12 Punkte am Ende verkürzt, da im Randbereich der Laserlinie immer noch verstärkt Messausreißer auftraten, die auch mit der „Ausreißer entfernen“-Prozedur nicht zu eliminieren

waren. Somit verblieben anstatt 283 Bildpunkten und 10 mm lediglich noch 261 Bildpunkte und eine 9,22 mm breite nutzbare Laserlinie. Unter Multiplikation mit dem Maximalhub des Scannerkopfes, ergab sich eine auswertbare Messfläche von 1714,92 mm². Die für Rauheitsanalysen störenden langwelligen Topografieanteile innerhalb dieser verbliebenen Auswertungsfläche wurden entsprechend DIN ISO 13473-1 und 2 sowie EN ISO 13565-1 durch einen Regressionsfilter (in WinSAM enthalten) unterdrückt. Allerdings wurden die Daten vom Programm für den vorliegenden 3D-Fall mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch eine Ebene anstatt durch eine Gerade approximiert.

Das Ergebnis dieser Filterung war der Rauheitsdatensatz, aus dem entsprechende Kenngrößen berechnet werden konnten. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wurden vom Programm jeweils 0,5 % der höchsten und 0,5 % der niedrigsten Punkte innerhalb der Datensätze nicht mit in die Berechnung einbezogen. Die verschiedenen Oberflächenkenngrößen je Messstelle wurden aus den Datensätzen von drei parallelen Messspuren mit je einer Vorwärts- und einer Rückwärtsüberfahrt des Scanners als Durchschnitt berechnet. Die gewonnenen Ergebnisse wurden abschließend in Microsoft Excel exportiert, um dort weiterverarbeitet zu werden. Erklärbare Ausreißer in den berechneten Messgrößen z. B. durch Löcher im Belag, welche die einzelnen optischen Kenngrößen an einer Messstelle extrem beeinflussten, wurden, um die Streuung der Werte nicht maßgeblich zu verfälschen, durch den Mittelwert zuzüglich einer Standardabweichung der jeweiligen Messgröße an der betreffenden Messstelle ersetzt.

Insgesamt wurde zur quantitativen Beschreibung eine Vielzahl von 3D-Oberflächenkenngrößen ermittelt. Diese konnten teilweise direkt aus den 3D-Messergebnissen oder durch die Bildung von Kennfunktionen wie die Materialanteilskurve, den Verlauf des Leerflächenanteils und des geschlossenen Leerflächenanteils ermittelt werden (vgl. Abschnitte 2.2.2 und 2.5.4).

Mit der Auswertungssoftware WinSAM ist zwar die Berechnung vieler der in Abschnitt 2.5.4 dargestellten 2D-Kenngrößen ebenfalls möglich. Da sich aber 3D-Oberflächenkenngrößen, wie in den Abschnitten 2.2.2 und 2.5.4 angeführt, zur Beschreibung und Quantifizierung der tribologischen Zusammenhänge besser eignen, wurden ausschließlich solche Kenngrößen (vertikale Kenngrößen und Flächenkenngrößen) berechnet. Allerdings waren hiervon nicht alle geeignet, um qualifizierte Aussagen über Unterschiede zwischen den Laufflächenmaterialien und Zusammenhänge mit den Kenngrößen der Gleitreibungsmessung herzustellen. In Anhang 5 sind sämtliche berechneten Oberflächenkenngrößen in Korrelationsmatrizen für jedes der drei Laufflächenmaterialien dargestellt. In den Ergebnisteil wurden allerdings nur die aussagekräftigsten aufgenommen.

Zur Beschreibung und Quantifizierung wichtiger geometrischer Oberflächeneigenschaften der Laufflächen (vgl. Tab. 7, Seite 83) wurden die in Tab. 19 aufgeführten Kenngrößen ausgewählt. Da Laufflächen teilweise um das Tausendfache rauer sind als Blechoberflächen, wurden die Einheiten an die Anforderungen der zu bearbeitenden Aufgabenstellung angepasst. Daher stimmen die Einheiten der in Tab. 19 aufgeführten Kenngrößen nicht mit denen aus Tab. 6, Seite 75 überein.

Tab. 19: Verwendete Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften von Laufflächen

Merkmal	Bedeutung	Kenngrößen-abkürzung	Kenngröße	Einheit	Beschreibung	
Abgeschlossenheit	Lage der abgeschlossenen Schmierflächen	c_{clm}	Durchdringung mit maximalem Leerflächenanteil	mm	Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie	
		γ_{clm}	bezogene Durchdringung mit maximalem Leerflächenanteil	%	Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie bezogen auf die Topografietiefe	
Leere	allgemeine, aus 2D für den 3D-Fall abgeleitete Kenngrößen	S_t	Topografietiefe	mm	Abstand des höchsten und tiefsten Punktes der Topografie	
		S_a	arithmetischer Mittenauswert	mm	arithmetischer Mittelwert der Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie	
		S_{pk}	reduzierte Spitzenhöhe	mm	gemittelte Höhe der Spitzen über dem Kernbereich	
	Anteile plateauförmiger Flächen	Höhe der Spitzen	S_k	Kernrauheit	mm	Tiefe des Rauheitskerns ohne Spitzen und ohne Täler
			S_{vk}	reduzierte Riefentiefe	mm	gemittelte Tiefe der Riefen unter dem Kernbereich
			V_{cl}	geschlossenes Leervolumen	cm^3/m^2	Volumen der geschlossenen Leerbereiche über die Topografietiefe
			V_{op}	offenes Leervolumen	cm^3/m^2	Volumen der offenen Leerbereiche über die Topografie
Schmierstoffreserve	Anzahl der Spitzen	V_{ma}	Materialvolumen	cm^3/m^2	Volumen der Materialbereiche über die Topografietiefe	
		N_{nam}	maximale Anzahl Materialflächen	mm^{-2}	größte Anzahl Materialflächen in einer beliebigen Durchdringung	
		N_{opm}	maximale Anzahl offener Leerflächen	mm^{-2}	größte Anzahl offener Leerflächen in einer beliebigen Durchdringung	
Feinheit	Anzahl der Täler	N_{clm}	maximale Anzahl geschlossener Leerflächen	mm^{-2}	größte Anzahl geschlossener Leerflächen in einer beliebigen Durchdringung	
		V_{cl}	siehe oben	siehe oben	siehe oben	
Abgeschlossenheit und Leere	Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils	α_{clm}	maximaler geschlossener Leerflächenanteil	%	größer geschlossener Leerflächenanteil in einer beliebigen Durchdringung	
		N_{clm}	siehe oben	siehe oben	siehe oben	
Abgeschlossenheit und Feinheit	Anzahl geschlossener Leerflächen	N_{clm}	siehe oben	siehe oben	siehe oben	

Quelle: verändert nach STAEVES (1998) und WinSAM (2002)

3.4.3 Statistische Auswertungen

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Statistikprogrammpaket SAS (SAS Institute, Version 8.2), durchgeführt. Zunächst wurden alle Messdaten auf Normalverteilung getestet. Dies erfolgte mit dem Shapiro-Wilk-Test auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$. Nach diesem Test wurde angenommen, dass die Stichproben aus normalverteilten und varianzhomogenen Grundgesamtheiten stammen. Sämtliche Mittelwerte und Standardabweichungen wurden mit der MEANS-Prozedur berechnet.

Zur Varianzanalyse wurde die GLM-Prozedur eingesetzt. Mittelwertvergleiche erfolgten mit dem Tukey-Test. Dieser Test eignet sich sehr gut, da er auch beim multiplen Test das Signifikanzniveau α (multiples Niveau α) garantiert.

Um die Zusammenhänge zwischen Oberflächenkennwerten und jenen der Reibwertmessung zu untersuchen, wurden Korrelations- und Regressionsanalyse mittels CORR- und REG-Prozedur durchgeführt. Ziel hierbei war es, zu überprüfen, inwieweit die Gleitreibungsmessung zur Beschreibung der Rutschfestigkeit von Laufflächen geeignet ist.

Zur statistischen Signifikanzdarstellung in den Abbildungen und Tabellen wurden die folgenden Abkürzungen verwendet:

*** höchst signifikant ($p \leq 0,001$)

** hoch signifikant ($p \leq 0,01$)

* signifikant ($p \leq 0,05$)

n.s. nicht signifikant ($p \geq 0,05$)

gleiche Buchstaben bedeuten keine signifikanten Unterschiede

4 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in drei Abschnitten. Diese Teilung ergibt sich aus der methodischen Vorgehensweise analog zur eingesetzten Messtechnik und aus der Zielsetzung dieser Arbeit. Zu Anfang dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Reibwertmessungen vorgestellt. Daran schließen sich die Ergebnisse der Topografiemessung an. Die Erkenntnisse beider Messverfahren werden im dritten Abschnitt abschließend zusammengeführt.

4.1 Reibwertmessungen

Zur systematischen Darstellung der Ergebnisse ist dieser Abschnitt ebenfalls in drei Teile gegliedert. Zuerst werden die Ergebnisse zu den beiden bekannten Messgrößen der Reibwertmessung (Haft- und Gleitreibungskoeffizient) vorgestellt. Anschließend werden die aus diesen Erkenntnissen neu aus den Gleitreibungskurven abgeleiteten Kenngrößen dargestellt (arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden). Am Ende des Abschnitts werden diese mit den bisher genutzten Kenngrößen verglichen, um den zusätzlichen Erkenntnisgewinn einzuschätzen.

4.1.1 Haft- und Gleitreibungskoeffizienten

An sämtlichen Messstellen der untersuchten Laufflächen wurden sowohl Gleit- als auch Haftreibung erfasst. Grundsätzlich stellte sich heraus, dass diese Messgrößen je nach Material und Alter der Laufflächen mit sehr großen Streuungen innerhalb der 10 Messstellen in den Ställen behaftet waren. Da sich aus diesem Grund keine signifikanten Unterschiede in den Messgrößen der Reibwertmessung feststellen ließen, musste von der anfänglich beabsichtigten Auswertung nach hoch und niedrig frequentierten Messstellen Abstand genommen werden.

Bevor jedoch die Ergebnisse vorgestellt werden, ist in Abb. 33 exemplarisch jeweils eine für die entsprechenden Laufflächen repräsentative Gleitreibungskurve dargestellt. Die Laufflächen zeigten einerseits trotz unterschiedlicher Verläufe teilweise gleiche oder zumindest ähnlich hohe Gleitreibungskoeffizienten. Andererseits konnten die Gleitreibungskurven zweier verschiedener Laufflächen ähnlich, die Höhe des Gleitreibungskoeffizienten dennoch unterschiedlich sein.

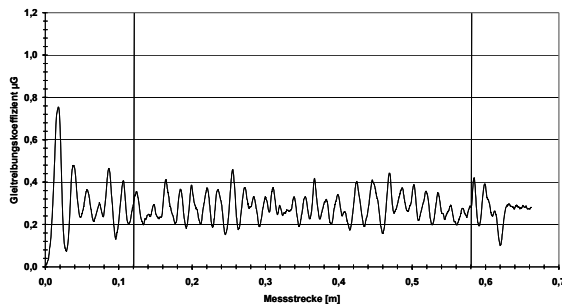
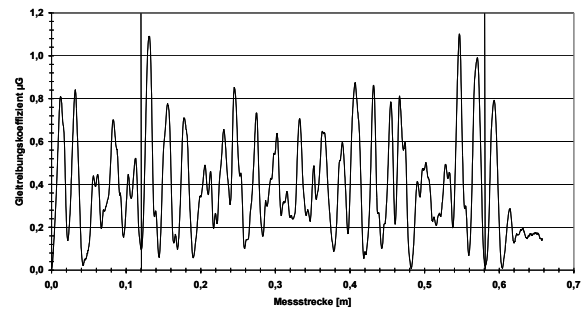
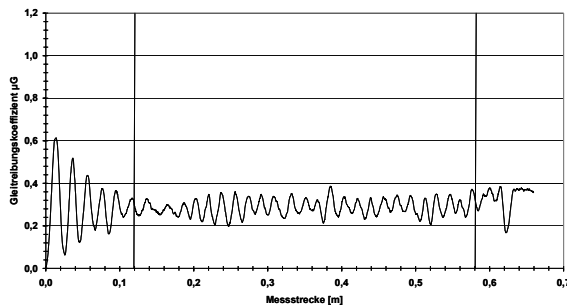
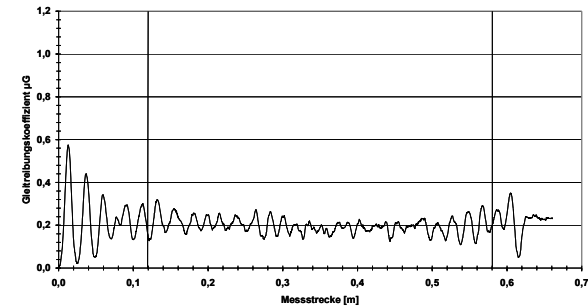
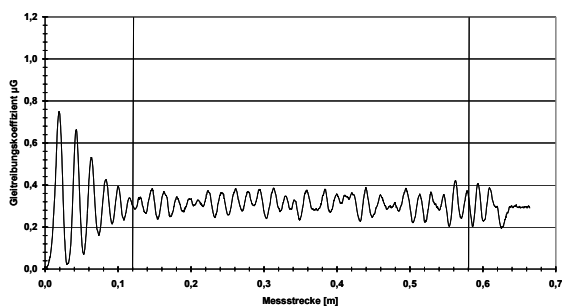
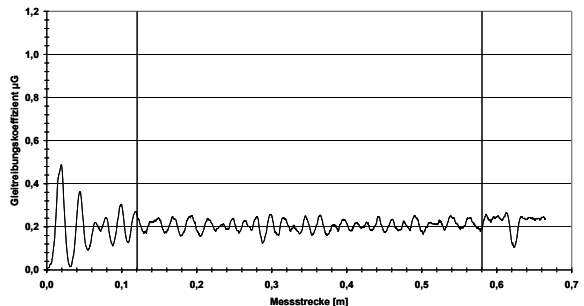
Gussasphalt neu, $\mu G = 0,29$ Gussasphalt alt, $\mu G = 0,44$ Beton neu, $\mu G = 0,30$ Beton alt, $\mu G = 0,21$ Spaltenboden neu, $\mu G = 0,32$ Spaltenboden alt, $\mu G = 0,21$

Abb. 33: Exemplarische Gleitreibungskurven verschiedener Laufflächen

In Abb. 34 ist der durchschnittliche Haftreibungskoeffizient der 10 Messstellen pro Betrieb dargestellt. Auffällig war, dass der Haftreibungskoeffizient sowohl auf den verschiedenen Belägen, an den unterschiedlichen Messstellen in einem Stall aber auch innerhalb der 10 Wiederholungsmessungen an einer Messstelle sehr stark schwankte. Diese großen Streuungen gehen auch aus Abb. 34 hervor. Die Mittelwerte der durchschnittlichen Haftreibungskoeffizienten bei den Gussasphaltlaufflächen ließen keine eindeutige Entwicklungstendenz mit zunehmendem Alter erkennen, denn die Mittelwerte der 10 Messstellen pro Stall lagen alle auf ähnlichem Niveau. Bei Beton und Spaltenboden kann offenbar ein Rückgang des durchschnittlichen Haftreibungskoeffizienten beobachtet werden.

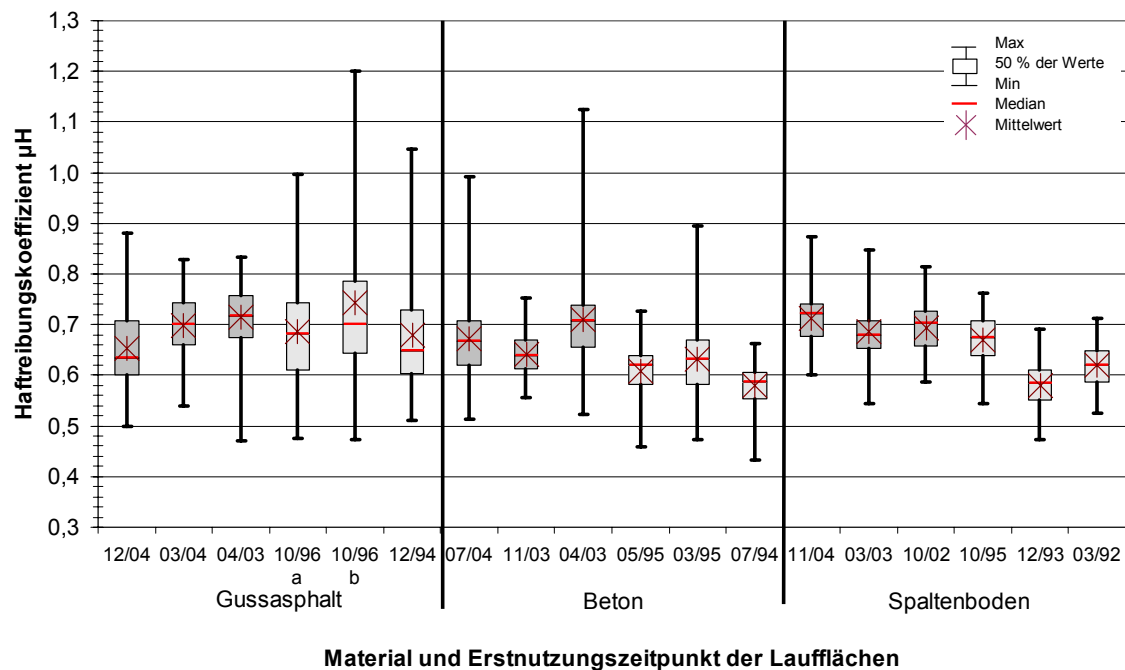


Abb. 34: Durchschnittliche Haftreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Betrieben

Um zu überprüfen, ob der Haftreibungskoeffizient geeignet ist, die Beläge nach Material und Altersklassen zu unterscheiden, wurden die Messergebnisse der Einzelbetriebe in entsprechende Klassen zusammengefasst (Abb. 35). In jede der 6 dargestellten Klassen gingen die Daten von 10 Messstellen pro Stall mit je 10 Wiederholungsmessungen an einer Messstelle ein. Dies ergab einen Datenumfang von insgesamt 300 Messungen je Klasse.

Was sich bereits in der Einzelbetrachtung der durchschnittlichen Haftreibungskoeffizienten je Betrieb andeutete, kommt nun deutlich zum Ausdruck: Durch die hohen Messwert-schwankungen bei ähnlichen durchschnittlichen Haftreibungskoeffizienten konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Belagsklassen neuer und alter Gussasphalt sowie neuer Beton- und Spaltenboden festgestellt werden. Gleiches galt für alten Beton und alten Spaltenboden.

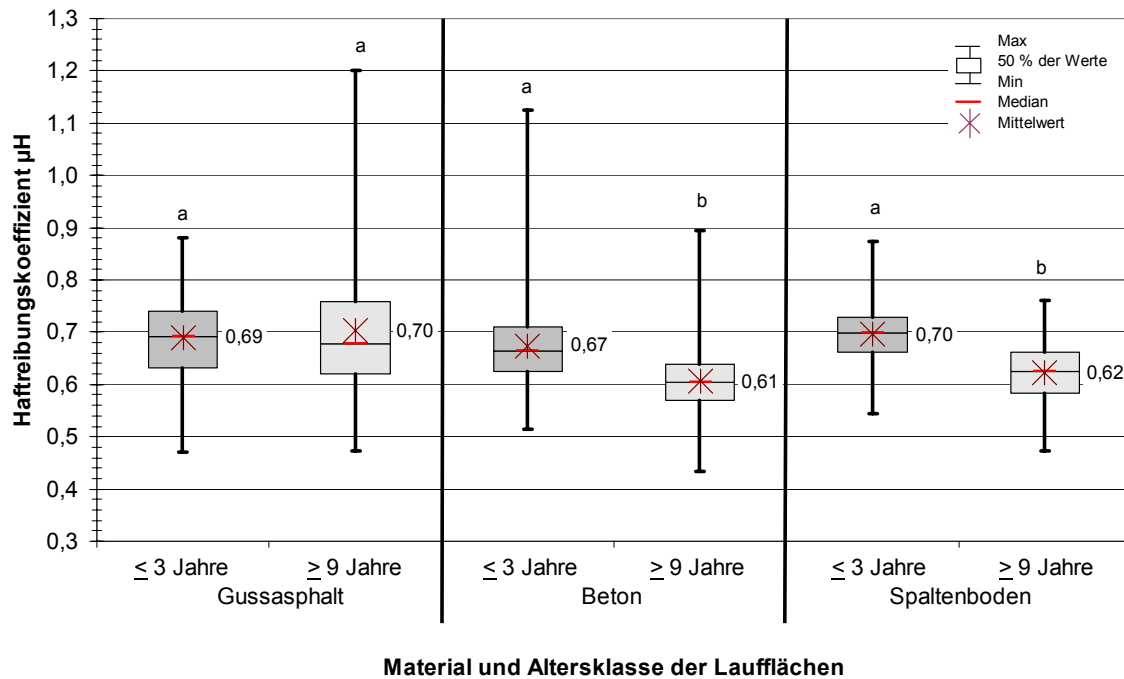


Abb. 35: Durchschnittliche Haftreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen

An den selben Messstellen zur Messung des Haftreibungskoeffizienten erfolgten auch die Gleitreibungsmessungen. Da die Messung der Haft- und Gleitreibungskräfte je Messstelle in einem Arbeitsgang erfolge, war die Datengrundlage zur Berechnung der jeweiligen Koeffizienten dieselbe (vgl. Abb. 28, Seite 110). Die Ergebnisse der Gleitreibungsmessungen je Stall sind in Abb. 36 zu sehen. Auch hier stechen u. a. wieder die drei alten Laufflächen aus Gussasphalt mit besonders hohen Messwertstreuungen hervor. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Messung des Haftreibungskoeffizienten zeichnete sich hier ab, dass der Gleitreibungskoeffizient mit fortgeschrittener Nutzungsdauer zunimmt. Eine umgekehrte Entwicklung ließ sich bei Beton und Spaltenboden beobachten. Auffällig war, dass sogar von neuen Gussasphalt-, Beton- und Spaltenböden der in der Literatur geforderte Mindestgleitreibungskoeffizient von $\mu_G = 0,4$ (vgl. Abschnitt 5.2) im Durchschnitt der einzelnen Messstellen pro Stall nicht erreicht wurde.

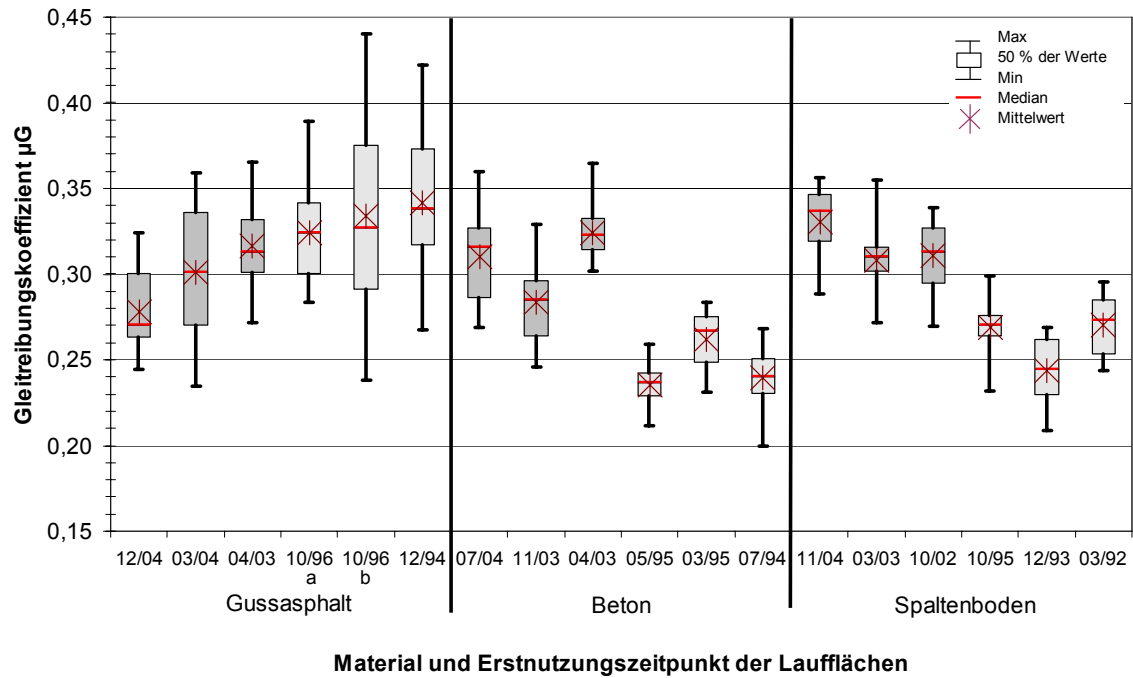


Abb. 36: Durchschnittliche Gleitreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Betrieben

Um den Einfluss des Bodenalters zu untersuchen, wurden die Messdaten, wie bereits beschrieben, nach Material und Alter klassifiziert (Abb. 37). Der Messumfang je Klasse entsprach dem der Messung des Haftreibungskoeffizienten, also 300 Messungen je Klasse.

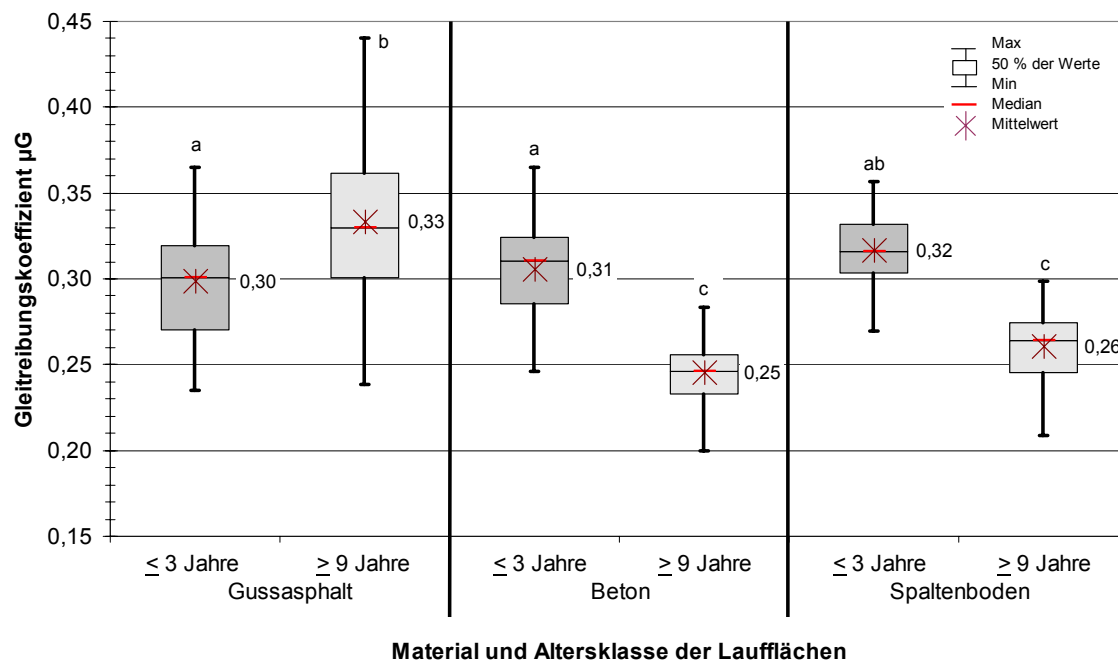


Abb. 37: Durchschnittliche Gleitreibungskoeffizienten der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen

Es zeigte sich, dass Gussasphalt nach fortgeschrittener Nutzungsdauer einen statistisch abgesicherten höheren durchschnittlichen Gleitreibungswert aufwies. Bei Beton und Spaltenboden wurden die Ergebnisse der Messung des Haftreibungswertes bestätigt. Auch hier waren die Werte in der Klasse der alten Kategorie deutlich geringer.

Des Weiteren konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Gleitreibungskoeffizienten von neuem Gussasphalt, neuem Beton und Spaltenboden nachgewiesen werden. Aber auch besagter Durchschnittswert alter Gussasphaltbeläge spiegelte trotz nachgewiesenem signifikantem Unterschied zu neuem Gussasphalt und neuem Beton nicht die „visuell festgestellte“ und bei den Messungen im Stall „gefühlte Rutschfestigkeit“ wider. Gleiches galt für alten Gussasphalt und neuen Spaltenboden, die sich ebenfalls nicht in ihren Gleitreibungskoeffizienten unterschieden. Durch diese subjektiven Bewertungen waren Laufflächen aus altem Gussasphalt im Vergleich zu den drei neuen Materialien wesentlich rutschfester als durch den Gleitreibungswert ausgewiesen wurde.

Auch mit der Messgröße Gleitreibungskoeffizient konnte die Rutschfestigkeit der verschiedenen Material und Altersklassen der Laufflächen nicht trennscharf voneinander abgegrenzt werden. Dies wurde unmittelbar bei der Betrachtung unterschiedlicher Belagsmaterialien mit identischem Gleitreibungskoeffizienten deutlich. Bereits mit bloßem Auge ließen sich Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit erkennen (Abb. 38), die aber offensichtlich nicht durch den Gleitreibungskoeffizienten zum Ausdruck gebracht werden konnten.



Gussasphalt
12/2004



Spaltenboden
11/2004



Beton
11/2003



Gussasphalt
07/1994

Abb. 38: Verschiedene Bodenbeläge mit identischem Gleitreibungskoeffizienten

Abb. 38 zeigt Aufnahmen von Messstellen unterschiedlicher Laufflächen mit identischem Gleitreibungskoeffizienten ($\mu G = 0,32$). Sie unterstreichen, dass der Gleitreibungskoeffizient die gezeigten Materialien nicht ausreichend differenzieren konnte, obwohl bereits augenscheinliche Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit der Beläge bestanden.

4.1.2 Arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden

Die unbefriedigende Differenzierung der Laufflächen durch Haft- und Gleitreibungskoeffizient führte zur Ableitung der beiden neuen Kenngrößen „arithmetischer Spitze-Spitze Wert“ μ_{ssa} und „Anzahl positiver Amplituden“ NPA aus der Gleitreibungskurve. Dies erfolgte auf Basis der unterschiedlichen Kurvenverläufe der gemessenen Böden. Abb. 39 zeigt exemplarisch die Verläufe der Gleitreibungskurven von 4 Messstellen mit einem Gleitreibungskoeffizienten von $\mu_G = 0,32$.

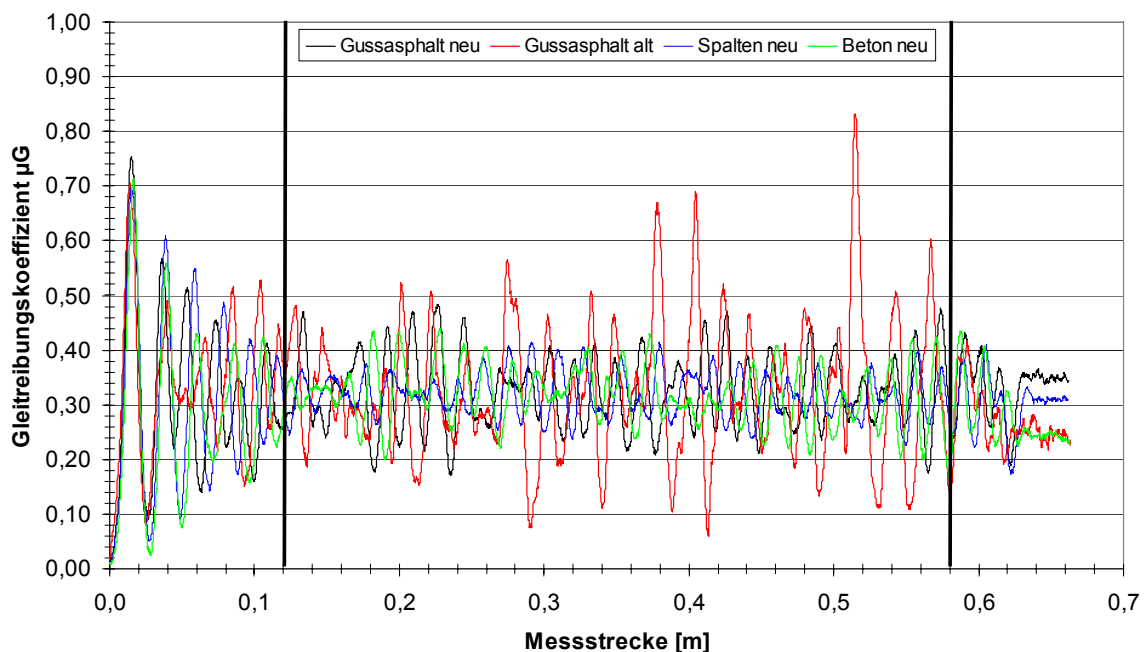


Abb. 39: Verlauf der Gleitreibungskurven von Belägen mit identischem Gleitreibungskoeffizient

Die Graphen verlaufen unterschiedlich, obwohl hinsichtlich des Gleitreibungswertes keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden konnten. Daraufhin wurde der in Abschnitt 3.4.1 beschriebene Algorithmus angewendet, um den arithmetischen Spitze-Spitze Wert sowie die Anzahl positiver Amplituden innerhalb sämtlicher Gleitreibungskurven zu bestimmen.

Alte Laufflächen aus Gussasphalt zeigten hierbei, wie in Abb. 39 zu erkennen, einen sehr unruhigen, ungleichmäßigen Kurvenverlauf mit deutlich größerem arithmetischem Spitze-Spitze Wert und einer geringeren Anzahl positiver Amplituden als die anderen betrachteten Beläge. Weiterhin konnte nach Untersuchung der gesamten Datengrundlage jeweils eines Belages (ohne Einteilung in Altersklassen) ein negativer Zusammenhang zwischen der Anzahl positiver Amplituden und dem arithmetischem Spitze-Spitze Wert festgestellt

werden. Für alle drei Laufflächenmaterialien galt: Mit zunehmender Anzahl positiver Amplituden in der Gleitreibungskurve sank der arithmetische Spitze-Spitze Wert.

Auch nach Alter und Materialklassen eingeteilt, zeigte sich, dass der arithmetische Spitze-Spitze Wert und die Anzahl positiver Amplituden eine gegenläufige Entwicklung aufweisen. Somit war der arithmetische Spitze-Spitze Wert im Falle der Laufflächen aus Gussasphalt mit fortgeschrittener Nutzungsdauer signifikant höher. Zwar ließ sich bei der Anzahl positiver Amplituden kein signifikanter Unterschied feststellen, es wurde jedoch eine abnehmende Tendenz beobachtet, die nicht statistisch abgesichert werden konnte. Bei Beton und Spaltenboden war der arithmetische Spitze-Spitze Wert in der neuen Altersklasse größer, wobei zugleich die Anzahl positiver Amplituden geringer war. Keine signifikanten Unterschiede in der Anzahl positiver Amplituden konnten zwischen neuem und altem Gussasphalt sowie neuem Beton nachgewiesen werden. Gleiches galt für Beläge aus neuem Gussasphalt, altem Beton und neuem Spaltenboden. Die Klasse Spaltenböden ≥ 9 Jahre unterschied sich in der Anzahl positiver Amplituden signifikant von allen anderen.

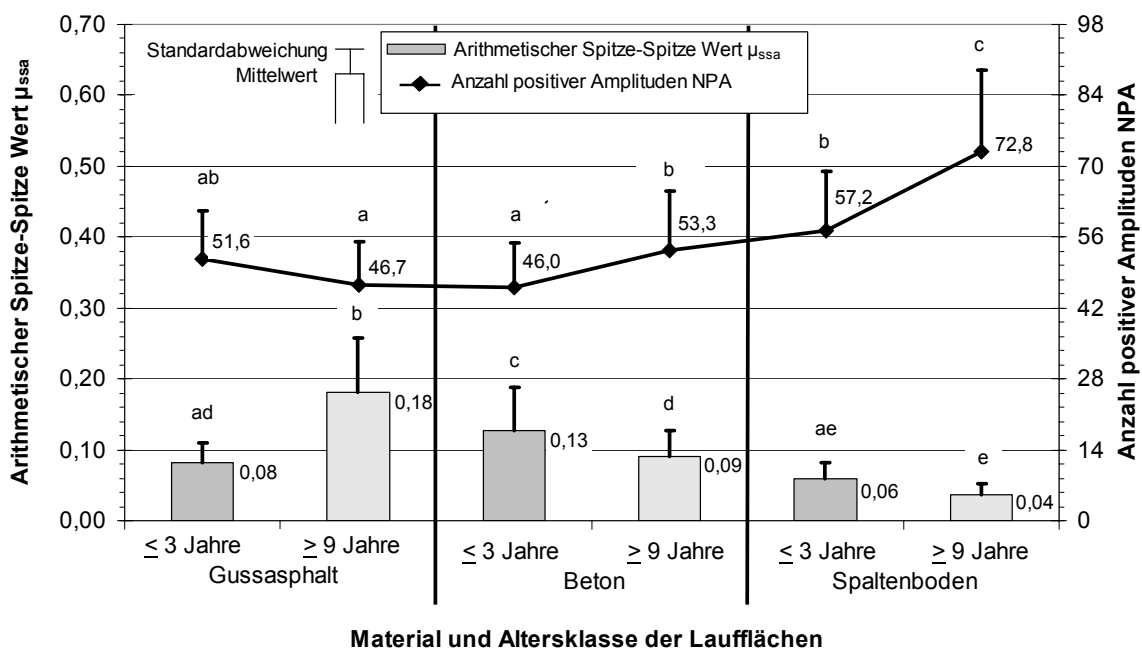


Abb. 40: Arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden nach Materialien und Altersklassen

4.1.3 Vergleich der Messgrößen aus der Gleitreibungsmessung

Auch die Messgrößen „arithmetischer Spitze-Spitze Wert“ und „Anzahl positiver Amplituden“ waren ebenso wie der Gleitreibungskoeffizient, jeder einzeln betrachtet, nicht in der Lage, sämtliche Beläge der beiden Altersklassen zu unterscheiden. Zusammengekommen boten die drei Messgrößen jedoch die Möglichkeit, die 18 untersuchten Laufflächen klassenweise zu unterscheiden.

Unter zusätzlicher Aufführung des Haftreibungskoeffizienten sind in Tab. 20 die untersuchten Messgrößen der Gleitreibungsmessung zusammenfassend dargestellt.

Tab. 20: Vergleich verschiedener Messgrößen der Gleitreibungsmessung bei den unterschiedlichen Materialien und Altersklassen

	Gussasphalt ≤ 3 Jahre	Gussasphalt ≥ 9 Jahre	Beton ≤ 3 Jahre	Beton ≥ 9 Jahre	Spaltenboden ≤ 3 Jahre	Spaltenboden ≥ 9 Jahre
Haftreibungskoeffizient μ_H	0,69 ^a	0,70 ^a	0,67 ^a	0,61 ^b	0,70 ^a	0,62 ^b
Gleitreibungskoeffizient μ_G	0,30 ^a	0,33 ^b	0,31 ^a	0,25 ^c	0,32 ^{ab}	0,26 ^c
arithmetischer Spitze-Spitze Wert μ_{ssa}	0,08 ^{ad}	0,18 ^b	0,13 ^c	0,09 ^d	0,06 ^{ac}	0,04 ^e
Anzahl positiver Amplituden NPA	51,6 ^{ab}	46,7 ^a	46,0 ^a	53,3 ^b	57,2 ^b	72,8 ^c

n = 300 Messungen je Material und Altersklasse

(Tukey $\alpha = 0,05$)

Um zu klären, welche Abhängigkeiten zwischen den Messgrößen bestehen, wurden Korrelationskoeffizienten berechnet (Tab. 21). Hierbei wurde jedoch bewusst auf eine Altersklassifizierung der Laufflächenmaterialien verzichtet, da die Messgrößen unabhängig von Material und Belagsalter Aussagekraft besitzen sollten.

Tab. 21: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen den verschiedenen Kenngrößen aus der Gleitreibungsmessung

	$\mu_H - \mu_G$	$\mu_{ssa} - \mu_G$	NPA - μ_G	NPA - μ_{ssa}
Gussasphalt	0,65***	0,69***	- 0,44***	- 0,74***
Beton	0,79***	0,63***	- 0,59***	- 0,85***
Spaltenboden	0,85***	0,60***	- 0,60***	- 0,94***

n = 600 Messungen je Material

Es zeigte sich, dass die Korrelationen zwischen den einzelnen Messgrößen auf den Belägen sehr unterschiedlich sind. Allesamt waren sie höchst signifikant und die Art des Zusammenhangs (Vorzeichen) war auf jedem Laufflächenmaterial gleich.

Der stärkste Zusammenhang zwischen Haft- und Gleitreibungskoeffizient zeigte sich bei Spaltenboden. Gleiches galt für den Zusammenhang zwischen der Anzahl positiver Amplituden und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert. Während bei ersterem eine positive Korrelation gegeben war, d. h. mit steigendem Haftreibungskoeffizienten stieg auch der Gleitreibungskoeffizient, handelte es sich bei der Korrelation zwischen der Anzahl positiver Amplituden und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert um einen negativen Zusammenhang. So nahm, wie bereits beschrieben, der arithmetische Spitze-Spitze Wert mit zunehmender Anzahl positiver Amplituden im Graphen der Gleitreibungsmessung ab. Eine weitere positive Korrelation bestand zwischen dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert und dem Gleitreibungskoeffizienten, wobei dieser bei Gussasphalt am stärksten ausgeprägt war. Hingegen war bei Spaltenboden die negative Korrelation zwischen der Anzahl positiver Amplituden und dem Gleitreibungskoeffizienten am größten.

Dies bedeutet zusammenfassend: Die Gleitreibungsmessung liefert nicht nur die Höhe des Haft- und Gleitreibungskoeffizienten, sondern der Kurvenverlauf gibt zusätzlich noch Aufschluss über die Rauheit einer Lauffläche. Denn wie die Ergebnisse besagter Messgrößen, eingeteilt in Material und Altersklassen, belegten, galt bei der Gleitreibungsmessung: Je glatter ein Belag, desto ruhiger der Kurvenverlauf, desto größer die Anzahl positiver Amplituden und umso geringer war der arithmetische Spitze-Spitze Wert. Umgekehrte Verhältnisse galten für raue Laufflächen.

Abschließend soll die Tauglichkeit der bisher beschriebenen Messgrößen der Gleitreibungsmessung zur Beschreibung der Laufflächenrutschfestigkeit verglichen werden. In Tab. 22 sind die Beläge der 18 Untersuchungsbetriebe klassifiziert in Matrizenform dargestellt. In den Zellen sind die zur Unterscheidung der verschiedenen Laufflächenklassen geeigneten Messgrößen aufgeführt. Eine Messgröße wurde als geeignet angesehen, wenn anhand dieser Messgröße ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den betrachteten Materialien und Altersklassen ausgewiesen werden konnte.

Tab. 22: Geeignete Messgrößen der Gleitreibungsmessung zur Unterscheidung verschiedener Materialien und Altersklassen

	Gussasphalt ≤ 3 Jahre	Gussasphalt ≥ 9 Jahre	Beton ≤ 3 Jahre	Beton ≥ 9 Jahre	Spaltenboden ≤ 3 Jahre	Spaltenboden ≥ 9 Jahre
Gussasphalt < 3 Jahre	/	μ_G, μ_{ssa}	μ_{ssa}	μ_H, μ_G	keine	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA
Gussasphalt > 9 Jahre	μ_G, μ_{ssa}	/	μ_G, μ_{ssa}	$\mu_H, \mu_G,$ $\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA
Beton < 3 Jahre	μ_{ssa}	μ_G, μ_{ssa}	/	$\mu_H, \mu_G,$ $\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA
Beton > 9 Jahre	μ_H, μ_G	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G,$ $\mu_{ssa},$ NPA	/	μ_H, μ_G, μ_{ssa}	$\mu_{ssa},$ NPA
Spaltenboden < 3 Jahre	keine	$\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G,$ $\mu_{ssa},$ NPA	/	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA
Spaltenboden ≥ 9 Jahre	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G,$ $\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_{ssa},$ NPA	$\mu_H, \mu_G, \mu_{ssa},$ NPA	/

Die Rutschfestigkeit alter und neuer Laufflächen aus dem selben Material ließ sich mit Ausnahme des Gussasphalt mittels aller vorgestellten Messgrößen unterscheiden. Signifikante Unterschiede bei alten und neuen Gussasphaltlaufflächen ließen sich durch Gleitreibungskoeffizient und arithmetischen Spitze-Spitze Wert nachweisen.

Zur Unterscheidung zwischen Materialien der neuen Altersklasse eigneten sich weniger Messgrößen. Zwischen neuem Gussasphalt und neuem Beton konnte lediglich ein Unterschied im arithmetischen Spitze-Spitze Wert nachgewiesen werden, während sich die Laufflächen aus neuem Gussasphalt und neuem Spaltenboden in keiner Messgröße der Gleitreibungsmessung unterschieden. Bei neuen Beton- und Spaltenbodenlaufflächen bestanden signifikante Unterschiede im arithmetischen Spitze-Spitze Wert sowie in der Anzahl positiver Amplituden.

Innerhalb der Laufflächen, die bereits über neun Jahre in Betrieb waren, bestanden hinsichtlich aller vier Messgrößen deutliche Unterschiede zwischen Gussasphalt und den beiden anderen Belägen. Beton und Spaltenboden ließen sich hingegen nur durch den arithmetischen Spitze-Spitze Wert und die Anzahl positiver Amplituden unterscheiden.

4.2 Topografiemessungen

Die Ergebnisse der Topografiemessung werden ebenso wie die in Abschnitt 2.5.4 vorgestellten Oberflächenkenngrößen getrennt nach vertikalen Kenngrößen und Flächenkenngrößen behandelt. Diese Einteilung ergibt sich aus der Berücksichtigung der Messpunkte bei der Kenngrößenberechnung (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Bei sämtlichen untersuchten Laufflächen handelte es sich um stochastische (ungleichmäßige), isotrope (ungerichtete) Topografien. Der Einfluss längerwelliger Gestaltabweichungen im Bereich der Megatextur in der Topografie wurde durch den Ebenenfilter unterdrückt, sodass die Oberflächenkenngrößen nur aus dem Rauheitsdatensatz berechnet wurden (vgl. Abschnitt 3.4.2). Zur Beschreibung der geometrischen Topografieeigenschaften

und zum Vergleich der Laufflächen verblieben daher die Merkmale „Leere“, „Abgeschlossenheit“, „geschlossener Leerflächenanteil“ sowie indirekt „Größe und Dichte der Strukturelemente“ (vgl. Tab. 6, Seite 75).

4.2.1 Vertikale Oberflächenkenngrößen

In Abschnitt 2.5.4 wurden die zur Beschreibung technischer Oberflächen gängigen Kenngrößen vorgestellt. Die 3D-Kenngrößen wurden weitestgehend, wenn sinnvoll und plausibel, ebenfalls zur Charakterisierung der Laufflächen herangezogen.

In der Blech- und Keramikindustrie gelten der arithmetische Mittenrauwert R_a und die Spitzenanzahl R_{pc} zur Beschreibung der Oberflächentopografie als Standard. Die Spitzenanzahl wird nach einer in DIN EN 10049 festgeschriebenen Berechnungsvorschrift ermittelt. Sie ist jedoch für erheblich feinere Oberflächen ausgelegt, sodass diese Vorschrift keine plausiblen Ergebnisse für die Laufflächen lieferte oder mit dem extra für die vorliegende Arbeit modifizierten WinSAM-Version nicht aus den vorhandenen Daten ermittelt werden konnte. Trotzdem standen in WinSAM genügend weitere Oberflächenkenngrößen zur Verfügung, die zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften bei Laufflächen herangezogen werden konnten.

Auf die Darstellung von Messgrößen, die sich direkt aus anderen berechnen lassen, wie beispielsweise der quadratische Mittenrauwert S_q oder auch obere c_{top} sowie untere Durchdringung c_{bot} , wurde verzichtet. Weiterhin werden die Kenngrößen kleinster Materialanteil der Kernrauheit S_{r1} , größter Materialanteil der Kernrauheit S_{r2} , Schiefe S_{sk} und Kurtosis S_{ku} der Amplitudendichtefunktion nicht aufgeführt, da die Laufflächen durch sie nicht unterschieden werden konnten. Dennoch wurden aber alle genannten Oberflächenkenngrößen ebenfalls berechnet und den gleichen Auswertungsoperationen unterzogen (vgl. Anhang 5).

Zur Untersuchung der Unterschiede bei den verbleibenden Messgrößen wurden die Laufflächen wieder in die bekannten Klassen zusammengefasst. Aussagekräftige vertikale Kenngrößen sind in Abb. 41 vergleichend aufgeführt. Diese Kenngrößen eignen sich zur Quantifizierung des Topografiemerkmals Leere (vgl. Abschnitt 2.5.4), wobei die aufgeführten Kenngrößen verschiedene Bedeutungen für die Oberflächen haben und unterschiedliche Oberflächendetails quantifizieren, wie beispielsweise die Spitzenhöhe oder die Riefentiefe.

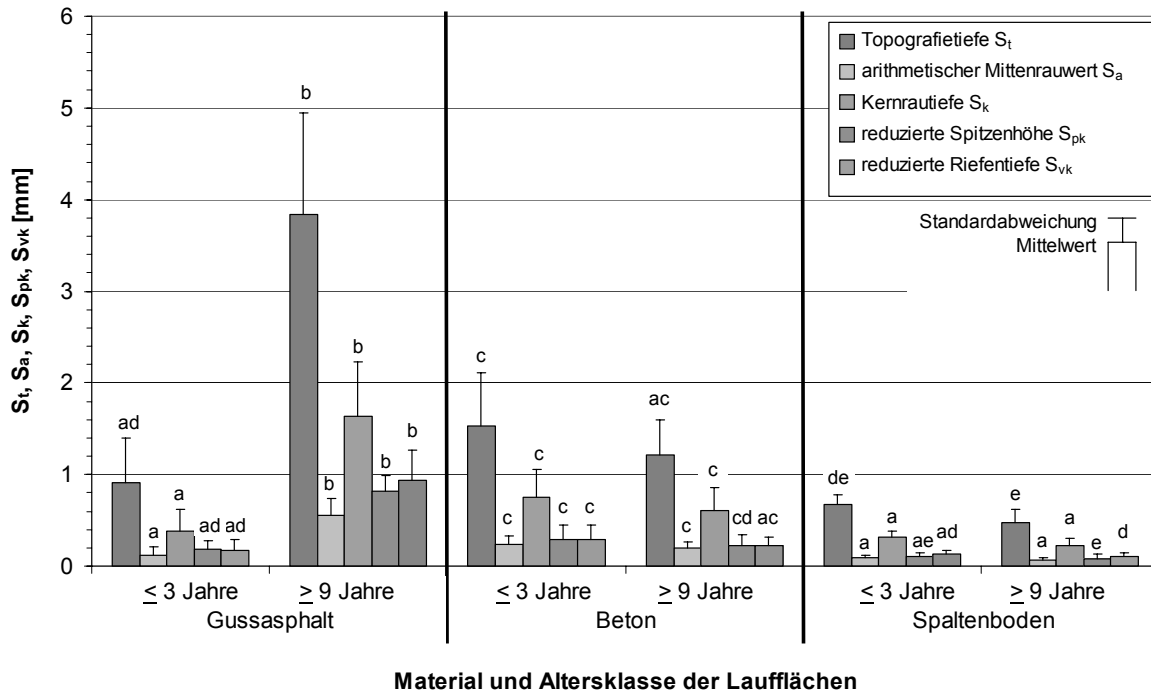


Abb. 41: Vergleich des Oberflächenmerkmals Leere der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter vertikaler Oberflächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen

Wie bereits in den vorigen Abschnitten gezeigt, gab es erhebliche Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit der Laufflächen. Innerhalb eines Stalls waren an den verschiedenen Messstellen sehr heterogene Oberflächenverhältnisse anzutreffen, die sich bei einzelnen Oberflächenkenngrößen in ähnlich hohen Streuungen bemerkbar machten wie bei den Messgrößen der Gleitreibungsmessung.

Alte Gussasphaltlaufflächen zeigten eine signifikant höhere Topografietiefe als neue, wobei sich die neuen Laufflächen weder von altem Beton- noch von neuem Spaltenboden unterschieden. Letztere zeigten keine signifikanten Unterschiede in dieser Kenngröße zwischen den Altersklassen. Prinzipiell konnte für alle dargestellten Kenngrößen der Leere die Beobachtung gemacht werden, dass die Klasse der alten Gussasphaltlaufflächen signifikant höhere Werte aufwies als diejenigen der neuen Klasse, während sich zwischen den Altersklassen von Beton- und Spaltenboden keine signifikanten Unterschiede feststellen ließen. Das bedeutet, dass die Topografien von Gussasphaltlaufflächen im Alter zunehmend leerer werden. Bei Beton- und Spaltenböden änderte sich das Merkmal Leere nicht signifikant. Zwischen den verschiedenen Materialien der unterschiedlichen Altersklassen konnten teilweise in einzelnen Kenngrößen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede konstatiert werden.

Alle dargestellten Oberflächenkenngrößen bestätigten die Ergebnisse der Reibwertmessungen. Sie zeigten, dass sich die Oberflächenbeschaffenheit der Laufflächen im Laufe der Nutzungsdauer ändert. Je nach Material und Materialqualität war die Änderung verschieden und unterschiedlich stark ausgeprägt (Tab. 23).

Tab. 23: Vergleich der Höhe und der Änderungen ausgewählter vertikaler Kenngrößen zur Beschreibung des Oberflächenmerkmals Leere der untersuchten Laufflächenklassen

Oberflächenkenngröße	Altersklasse / Differenz	Gussasphalt	Beton	Spaltenboden
Topografietiefe S_t	≤ 3 Jahre	0,91	1,53	0,67
	≥ 9 Jahre	3,84	1,21	0,48
	Differenz absolut [mm]	2,93	-0,31	-0,19
	Differenz relativ [%]	322,4	-20,6	-27,9
Arithmetischer Mittenrauwert S_a	≤ 3 Jahre	0,12	0,24	0,10
	≥ 9 Jahre	0,56	0,19	0,07
	Differenz absolut [mm]	0,43	-0,04	-0,02
	Differenz relativ [%]	348,2	-18,6	-25,4
Kernrautiefe S_k	≤ 3 Jahre	0,38	0,75	0,32
	≥ 9 Jahre	1,64	0,61	0,22
	Differenz absolut [mm]	1,26	-0,13	-0,09
	Differenz relativ [%]	334,8	-17,9	-29,0
Reduzierte Spitzenhöhe S_{pk}	≤ 3 Jahre	0,18	0,29	0,11
	≥ 9 Jahre	0,81	0,23	0,05
	Differenz absolut [mm]	0,63	-0,06	-0,06
	Differenz relativ [%]	353,4	-20,6	-55,6
Reduzierte Riefentiefe S_{vk}	≤ 3 Jahre	0,17	0,29	0,13
	≥ 9 Jahre	0,94	0,22	0,10
	Differenz absolut [mm]	0,76	-0,07	-0,03
	Differenz relativ [%]	446,3	-24,5	-21,5

Die Topografietiefe und der arithmetische Mittenrauwert zeigen die maximale bzw. die durchschnittliche Höhe der Topografie. Bei Laufflächen aus Gussasphalt erhöhten sich diese Werte im Vergleich zu neuen Böden um 332,4 % bzw. um 348,2 %. Im Zuge der Erhöhung der gesamten Topografietiefe im Laufe der Nutzungsdauer konnte auch eine Zunahme der Kernrautiefe in Höhe von 334,8 % festgestellt werden. Auch die beiden Größen reduzierte Spitzenhöhe und reduzierte Riefentiefe mit einer Zunahme von 353,4 % bzw. 446,3 % stützen die Beobachtung einer leeren reibeisenartigen Oberflächenstruktur bei alten Gussasphaltlaufflächen.

Bei den Topografietiefen von Beton und Spaltenboden konnten nur moderate Abnahmen in Höhe von 20,6 % bzw. 27,9 % und bei den arithmetischen Mittenrauwerten Abnahmen in Höhe von 18,6 % bzw. 25,4 % beobachtet werden. Bei Beton fiel die Differenz in der Kernrautiefe mit 17,9 % ähnlich aus, auf Spaltenboden war sie mit 29,0 % etwas größer. Auf altem Spaltenboden war die reduzierte Spitzenhöhe mit 55,6 % geringer als auf neuem. Trotz schlechterer Betonqualität bei allen untersuchten Betonlaufflächen und Einbau vor Ort war die Differenz zwischen neuen und alten Belägen aus Beton mit 20,6 % erstaunlicherweise geringer. Bei der reduzierten Riefentiefe waren die Differenzen zwischen altem und neuem Beton mit 24,5 % bzw. altem und neuem Spaltenboden mit 21,5 % ähnlich. Allerdings ist beim Vergleich der Differenzen in den dargestellten Kenngrößen darauf zu achten, dass das Niveau aller auf Spaltenboden gemessenen Werte erheblich geringer war als auf Betonböden. Die tendenzielle Abnahme des Merkmals Leere, quantifiziert durch die o. g. Kenngrößen auf Laufflächen aus Beton oder Spaltenboden, konnte nicht statistisch abgesichert werden (vgl. Abb. 41, Seite 132).

Die dargestellten Kenngrößen zeigten zwischen den Altersklassen der drei Materialien die gleichen Entwicklungen und Zusammenhänge. Dies liegt in einer Abhängigkeit der Messgrößen untereinander begründet. Einen Überblick über die Art und die Höhe des Zusammenhangs geben die Korrelationen in Tab. 24:

Tab. 24: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen ausgewählten vertikalen Oberflächenkenngrößen der Leere

Gussasphalt					
	S_t	S_a	S_k	S_{pk}	S_{vk}
S_t	/	0,99***	0,98***	0,93***	0,96***
S_a	0,99***	/	0,99***	0,89***	0,95***
S_k	0,98***	0,99***	/	0,86***	0,94***
S_{pk}	0,93***	0,89***	0,86***	/	0,84***
S_{vk}	0,96***	0,95***	0,94***	0,84***	/
Beton					
S_t	/	0,93***	0,88***	0,80***	0,84***
S_a	0,93***	/	0,98***	0,61***	0,73***
S_k	0,88***	0,98***	/	0,51***	0,64***
S_{pk}	0,80***	0,61***	0,51***	/	0,59***
S_{vk}	0,84***	0,73***	0,64***	0,59***	/
Spaltenboden					
S_t	/	0,93***	0,91***	0,79***	0,75***
S_a	0,93***	/	0,99***	0,83***	0,55***
S_k	0,91***	0,99***	/	0,79***	0,49***
S_{pk}	0,79***	0,83***	0,79***	/	0,35***
S_{vk}	0,75***	0,55***	0,49***	0,35***	/

n = 1080 Messungen; vollständige Korrelationstabellen aller untersuchten Messgrößen siehe Anhang 5

Die Korrelationsmatrix zeigt, dass auf Laufflächen aus Gussasphalt zwischen allen aufgeführten vertikalen Oberflächenkenngrößen hohe bis sehr hohe Korrelationen bestanden. Mittlere und geringe Korrelationen zwischen einigen Messgrößen waren insbesondere auf Beton, aber auch auf Spaltenboden festzustellen. Darüber hinaus zeigten die Messgrößen

der Leere bei Gussasphalt eine stärkere Abhängigkeit von der Topografietiefe als bei den beiden anderen Laufflächenmaterialien.

4.2.2 Flächenkenngrößen

Während die vertikalen Oberflächenkenngrößen grundsätzliche Informationen über die Topografie der Laufflächen liefern, eignen sich die Flächenkenngrößen besser zur detaillierten Analyse der geometrischen Ausgestaltung der Bodenbeläge. Sie lassen beispielsweise zusätzliche Aussagen über die Abgeschlossenheit und die Feinheit der verschiedenen Böden zu. Darüber hinaus gibt es zusätzlich zu den vertikalen Kenngrößen der Leere auch flächenbezogene Kenngrößen der Leere, die sich jedoch von den entsprechenden vertikalen Kennwerten ableiten (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Nach dem mechanisch-rheologischen Modell (vgl. Abschnitt 2.2.2) können in der Umformtechnik Bleche für unterschiedliche Tiefziehzwecke zusätzlich zu den gängigen vertikalen 2D-Kenngrößen arithmetischer Mittenrauwert R_a und Anzahl der Spitzen R_{pc} mittels einer charakteristischen Abbott-Kurve beschrieben werden. Eine solche Darstellung der Messergebnisse und Charakterisierung der Laufflächen war zwar möglich, lieferte aber aufgrund der hohen Messwertstreuungen bei den verschiedenen Messstellen im Stall bzw. allen Messstellen einer Klasse keine statistisch signifikante Unterscheidungsmöglichkeit. Denn im Falle der vorliegenden Arbeit konnten diese Darstellungen der verschiedensten Laufflächen unterschiedlichen Materials und Alters durchaus gleich oder ähnlich aussehen, sodass keine sichere Identifizierung der sechs Klassen anhand solcher Diagramme möglich war.

Zuerst wurde wie bei der Auswertung der vertikalen Oberflächenkenngrößen die geometrische Topografieeigenschaft Leere mit den in WinSAM zur Verfügung stehenden Flächenkenngrößen untersucht. Abb. 42 zeigt die unterschiedlichen Laufflächenklassen im Vergleich hinsichtlich Materialvolumen sowie offenem und geschlossenem Leervolumen.

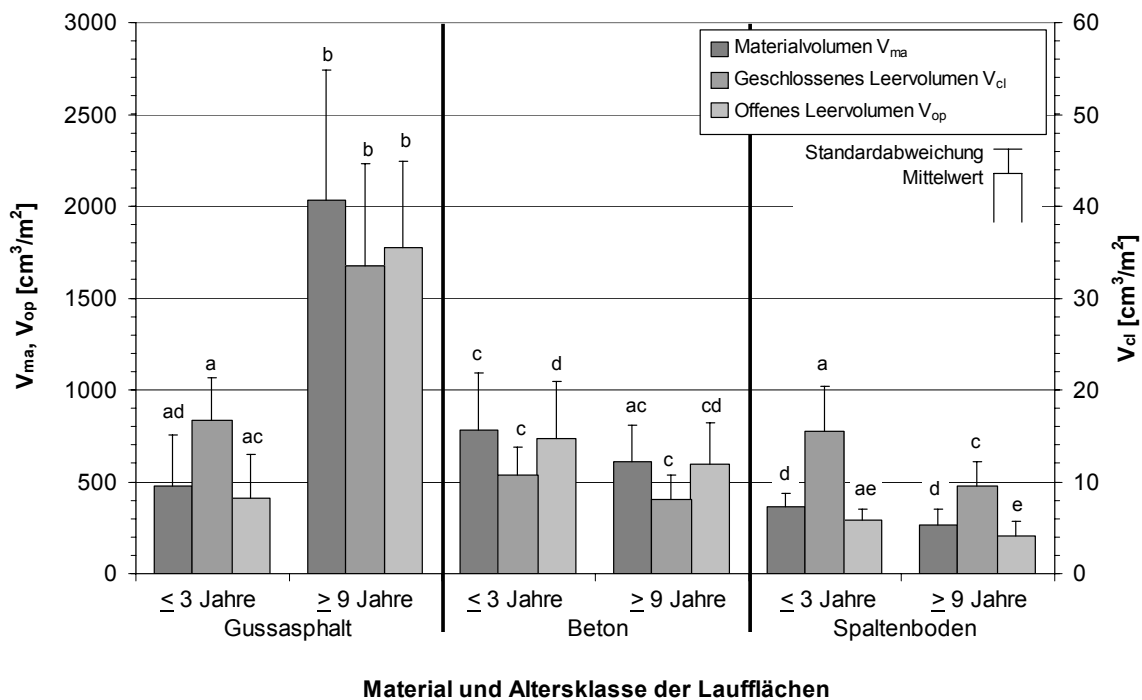


Abb. 42: Vergleich des Oberflächenmerkmals Leere der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter Flächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen

Wie aus Abb. 42 hervorgeht, lagen Material- und offenes Leervolumen innerhalb einer Material- und Altersklasse auf ähnlichem Niveau, während das geschlossene Leervolumen um ein Vielfaches geringer war.

Wie auch bereits an den Kenngrößen der Gleitreibungsmessung und den vertikalen Oberflächenkenngrößen verdeutlicht wurde, sind auch bei den betrachteten Größen grundsätzlich die selben Zusammenhänge und Größenunterschiede zu erkennen: Sämtliche Volumina waren bei alten Gussasphaltlaufflächen zwei bis vier mal größer als bei neuen, während sie sich bei Betonlaufflächen im neuen Zustand nicht signifikant vom alten unterscheiden. Gleiches galt mit Ausnahme des geschlossenen Leervolumens auch für Spaltenböden. Allerdings konnten wiederum tendenziell geringere Werte in den Messgrößen auf alten Beton- und Spaltenböden beobachtet werden, die jedoch nicht statistisch abgesichert werden konnten.

Ebenso wie bei den vertikalen Oberflächenkenngrößen konnten zwischen Gussasphaltlaufflächen und Spaltenböden der neuen Altersklasse in keiner der dargestellten Kenngrößen signifikante Unterschiede festgestellt werden. Hinsichtlich des Materialvolumens und des offenen Leervolumens unterschieden sich neue Gussasphaltlaufflächen auch nicht signifikant von jenen aus altem Beton.

Die Ergebnisse der vertikalen Oberflächenkenngrößen und deren Bedeutung für die Unterschiede in den geometrischen Topografieeigenschaften der verschiedenen Laufflächen wurden durch jene der Volumenauswertung bestätigt. Allerdings ließen sich anhand der vertikalen Kenngrößen keine oder nur bedingte Aussagen über die Anzahl der für die

Oberflächenbeschaffenheit entscheidenden Materialflächen und offenen bzw. geschlossenen Leerflächen sowie deren Anteile an der gesamten Messfläche treffen. Die maximale Anzahl Materialflächen und die maximale Anzahl offener Leerflächen in einer beliebigen Durchdringung sind Messgrößen der Feinheit. Die maximale Anzahl der geschlossenen Leerflächen hingegen beschreibt gleichermaßen Abgeschlossenheit und Feinheit (vgl. Tab. 19, Seite 117).

Daher wurde zuerst die maximale Anzahl der volumenbildenden Flächen innerhalb der Topografien der verschiedenen Laufflächenklassen untersucht (Abb. 43). Generell fiel hierbei auf, dass die maximale Anzahl der geschlossenen Leerflächen bei sämtlichen Laufflächen größer war als jene der Materialflächen und dass beide um ein Vielfaches größer waren als die maximale Anzahl offener Leerflächen in der Topografie.

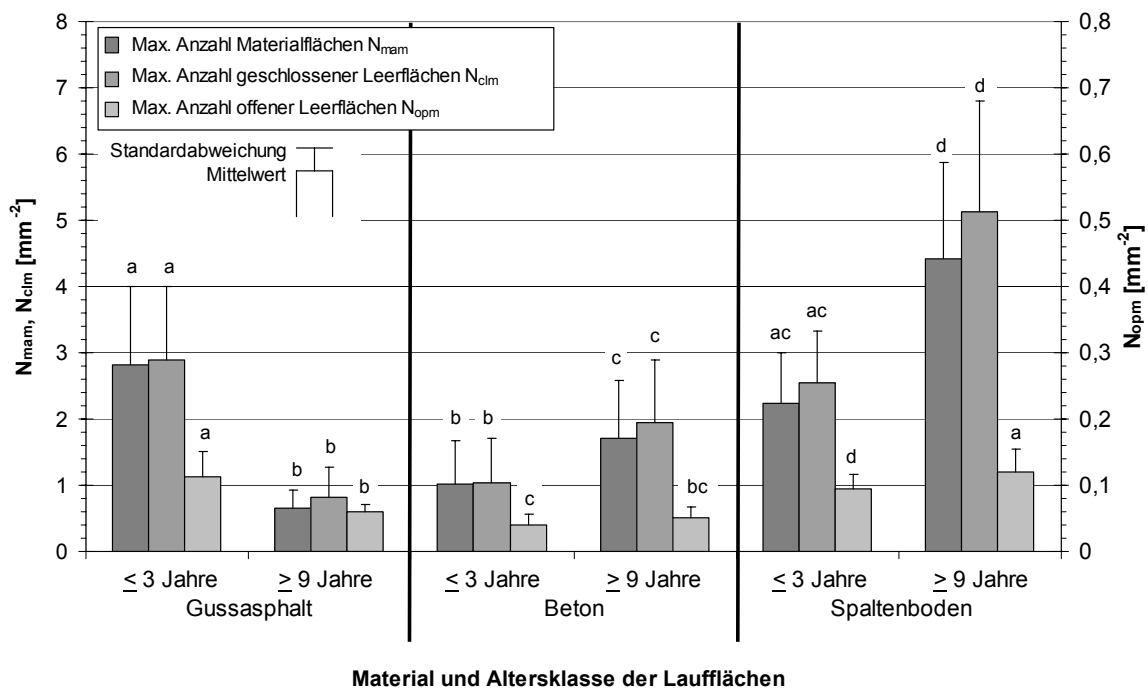


Abb. 43: Vergleich des Oberflächenmerkmals Feinheit der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter Flächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen

Es konnten signifikant geringere Flächenanzahlen bei alten Laufflächen aus Gussasphalt festgestellt werden. Eine Abnahme dieser Kenngrößen zeigt, dass diese Flächen in fortgeschrittenem Alter grober werden (vgl. Tab. 6, Seite 75). Eine umgekehrte Entwicklung ließ sich anhand dieser Kenngrößen bei Beton- und Spaltenböden belegen. Sowohl bei Laufflächen aus Beton als auch bei solchen aus Spaltenboden waren die maximale Anzahl Materialflächen und die maximale Anzahl geschlossener Leerflächen in der alten Altersklasse signifikant höher. Dies galt auch für die maximale Anzahl offener Leerflächen bei Spaltenboden. Eine nicht statistisch abgesicherte zunehmende Tendenz in dieser Kenngröße zeigten die Betonlaufflächen. Verglichen mit Beton- zeigten Spaltenböden in jeder

Kenngroße den höheren Anstieg. Eine Zunahme dieser Kenngroßen bedeutet, dass die Oberflächen sowohl von Beton- als auch von Spaltenböden mit der Zeit feiner werden (vgl. Tab. 6, Seite 75).

Werden Abb. 42 und Abb. 43 vor dem Hintergrund der Volumenbildung und der Volumenzusammensetzung betrachtet, stellt sich die Frage, inwieweit die Höhe der dargestellten Volumina (V_{ma} , V_{op} und V_{cl}) von den entsprechenden Flächenanzahlen (N_{mam} , N_{opm} und N_{clm}) der verschiedenen Bodenbeläge beeinflusst wird. Weiterhin ist zu klären, welche Rückschlüsse diese Ergebnisse bezüglich der geometrischen Topografieigenschaften bei den untersuchten Materialien zulassen.

Hierzu wurden die betreffenden Volumina der maximalen Anzahl der entsprechenden volumenbildenden Flächen gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung von Materialvolumen und maximaler Anzahl Materialflächen, offenem Leervolumen und maximaler Anzahl offener Leerflächen sowie geschlossenem Leervolumen und maximaler Anzahl geschlossener Leerflächen lieferten grundsätzlich sehr ähnliche Aussagen wie Abb. 44, Abb. 45 und Abb. 46 zu entnehmen ist.

Bei den Belägen aus Gussasphalt war die maximale Anzahl sämtlicher Flächen im alten Zustand trotz einer deutlich größeren Topografietiefe und damit auch größerer Volumina signifikant geringer als im neuen. Sowohl bei altem Beton- als auch bei altem Spaltenboden waren die maximale Anzahl der Material-, offenen und geschlossenen Leerflächen signifikant größer als im neuen oder es war zumindest eine zunehmende Tendenz erkennbar, wobei die maximalen Anzahlen der verschiedenen Flächen in beiden Altersklassen bei Spaltenboden signifikant größer waren als bei Beton. Alle Kenngroßen zeigten die größte Feinheit bei Spaltenboden, insbesondere in der alten Altersklasse. Neue Gussasphaltlaufflächen und neuer Spaltenboden unterschieden sich lediglich in der maximalen Anzahl offener Leerflächen, während zwischen neuem Gussasphalt und Spaltenböden der alten Klasse hinsichtlich dieser Kenngroße keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten. Das heißt, neue Laufflächen aus Gussasphalt und neuer Spaltenboden konnten hinsichtlich der beschriebenen Feinheitskenngroßen ebenso wie in allen vertikalen und flächenbezogenen Oberflächenkenngroßen der Leere als sehr ähnlich eingestuft werden.

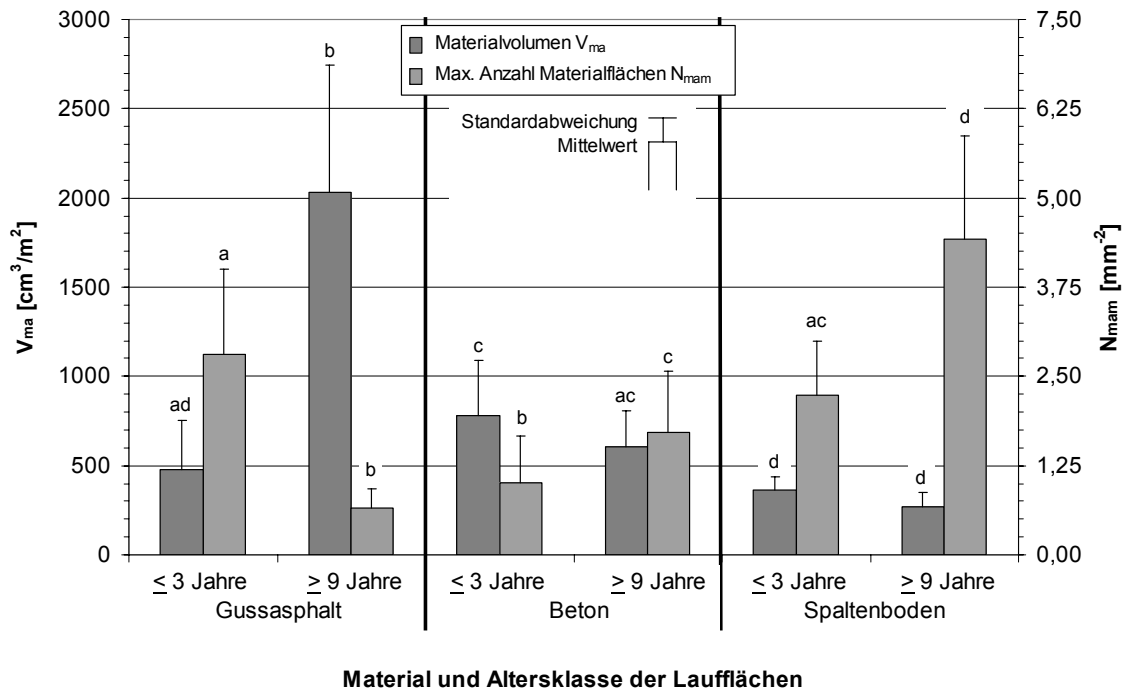


Abb. 44: Vergleich des Materialvolumens und der maximalen Anzahl Materialflächen der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen

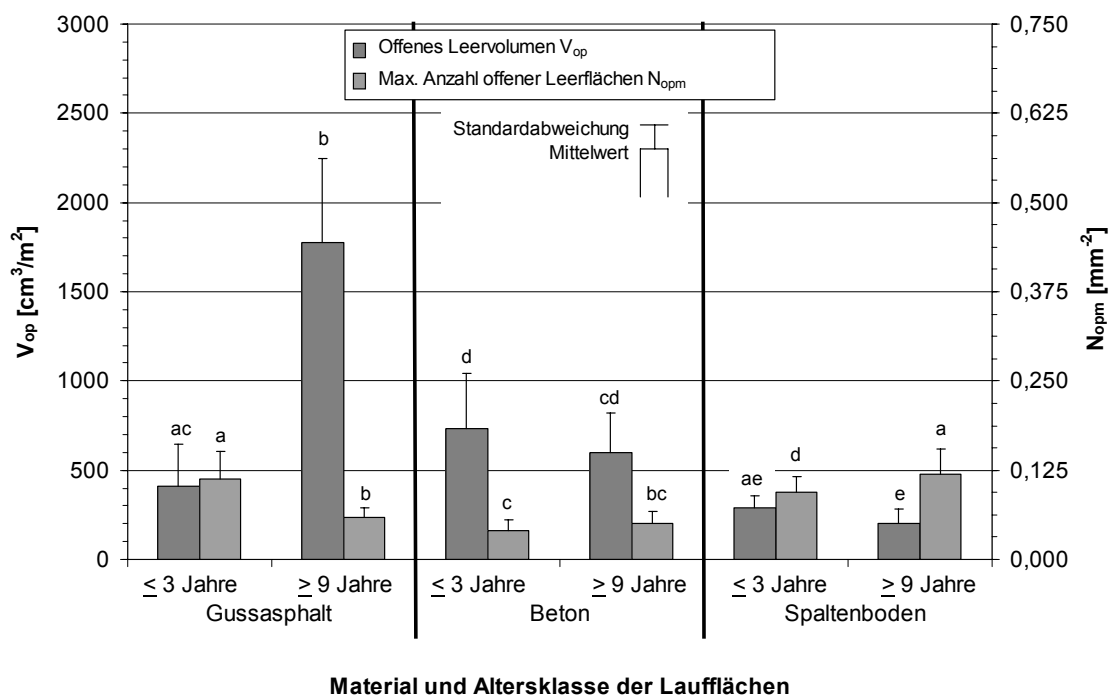


Abb. 45: Vergleich des offenen Leervolumens und der maximalen Anzahl offener Leerflächen der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen

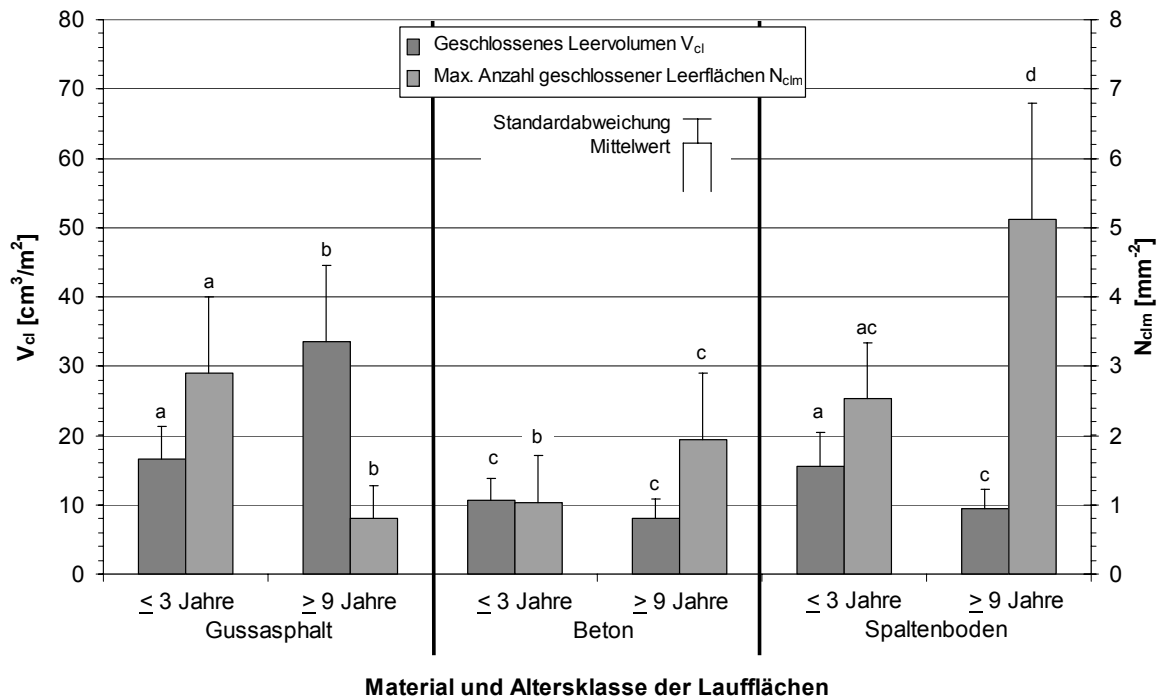


Abb. 46: Vergleich des geschlossenen Leervolumens und der maximalen Anzahl geschlossener Leerflächen der untersuchten Laufflächen nach Materialien und Altersklassen

Die Entwicklungen der maximalen Anzahlen der verschiedenen Flächen und der zugehörigen Volumina bedeuten für die Veränderung der Topografieeigenschaften der unterschiedlichen Belagsmaterialien folgendes: Da sich die verschiedenen Volumina aus der Integration der Einzelprofile der entsprechenden Flächen über die gesamten Messflächen ergeben, kann von einer Veränderung der Anzahl und der Größe der volumenbildenden Strukturelemente ausgegangen werden. Wenn bei Gussasphaltlaufflächen sämtliche Volumina im alten Zustand größer waren als im neuen und die maximale Anzahl der besagten Flächen abnahm, dann müssen die einzelnen volumenbildenden Strukturelemente, welche zusammen die geometrischen Topografieeigenschaften ausmachen, größer werden. Bei Laufflächen aus Beton und Spaltenboden waren die Verhältnisse genau umgekehrt: Die einzelnen Volumina waren im alten Zustand geringer als im neuen, während die maximalen Anzahlen der oberflächenbestimmenden Einzelflächen teilweise gleich blieben bzw. meist zunahmen. Bei sinkenden Volumina und gleichzeitiger Zunahme der maximalen Anzahl der Einzelflächen müssen die Strukturelemente kleiner werden. Für die Topografieeigenschaften von Gussasphaltlaufflächen bedeutet dies eine Abnahme, für jene aus Beton und Spaltenboden eine Zunahme der Feinheit.

Ein weiteres Merkmal der Oberflächenbeschaffenheit ist die „Abgeschlossenheit“. Kenngrößen hierfür sind „relativer Abstand der Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil bezogen auf den höchsten Punkt der betrachteten Topografie“ und „absoluter Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie“. Weiterhin beschreibt der „maximale

geschlossene Leerflächenanteil“ sowohl Abgeschlossenheit als auch Leere. Gleiches gilt für das „geschlossene Leervolumen“. Neben ihrer Eignung zur Quantifizierung der Feinheit beschreibt die „maximale Anzahl geschlossener Leerflächen“ auch die Abgeschlossenheit (vgl. Tab. 19, Seite 117). Abb. 47 zeigt die Ergebnisse der Abgeschlossenheitskenngrößen für die untersuchten Laufflächenklassen.

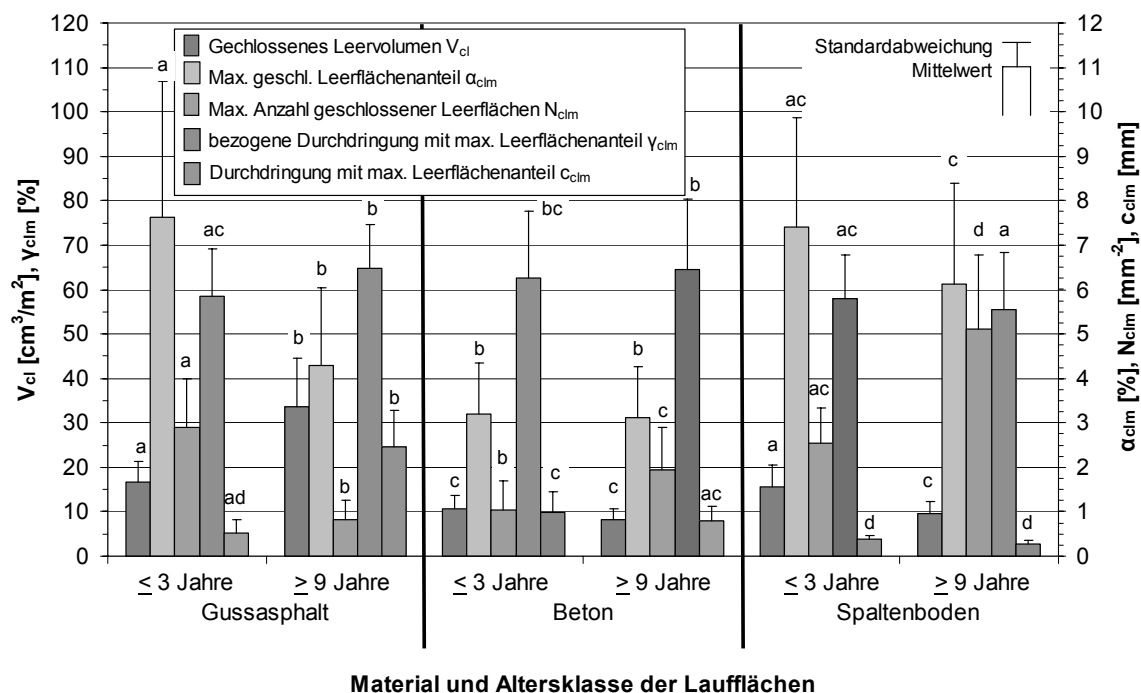


Abb. 47: Vergleich des Oberflächenmerkmals Abgeschlossenheit der untersuchten Laufflächen mittels ausgewählter Flächenkenngrößen nach Materialien und Altersklassen

Anhand der Kenngröße geschlossenes Leervolumen konnte eine signifikant höhere Abgeschlossenheit auf alten Gussasphalt Laufflächen im Vergleich zu neuen aufgezeigt werden (Abb. 47). Bei Betonbelägen konnten hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersklassen nachgewiesen werden. Alte Spaltenböden zeigten ein signifikant geringeres geschlossenes Leervolumen als neue. Wird die Topografietiefe der jeweiligen Belagsklassen berücksichtigt, lässt sich folgendes ableiten: Da die Topografietiefe die Integrationsgrenzen bei der Errechnung aller Volumina beeinflusst, änderten sich zwangsläufig auch die Volumina.

Weiterhin zeigt die Abbildung einen größeren maximalen geschlossenen Leerflächenanteil bei Laufflächen aus neuem Gussasphalt als bei alten. Gleichzeitig konnten keine signifikanten Unterschiede zu neuem Spaltenboden festgestellt werden. Beton und Spaltenboden unterschieden sich ebenfalls nicht signifikant hinsichtlich dieser Kenngröße zwischen den Altersklassen. Gleiches galt für alte Gussasphaltlaufflächen und solche aus neuem sowie altem Beton. Allerdings konnte zwischen den Altersklassen von Beton- und Spaltenboden

wiederum eine nicht statistisch abgesicherte Abnahme hinsichtlich des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils festgestellt werden, wobei das Niveau dieser Kenngröße in beiden Altersklassen des Spaltenbodens deutlich höher war als auf jenen der Betonlaufflächen. Durch den signifikant geringeren maximalen geschlossenen Leerflächenanteil sind die alten Beläge aus Gussasphalt im Vergleich zu neuen anhand dieser Kenngröße als offener einzustufen.

Dies wurde durch die Kenngröße maximale Anzahl geschlossener Leerflächen bestätigt, denn diese war bei alten Gussasphaltlaufflächen ebenfalls signifikant geringer. Im Gegensatz zur Kenngröße maximaler geschlossener Leerflächenanteil war die maximale Anzahl geschlossener Leerflächen in der alten Altersklasse von Beton- und Spaltenböden jeweils signifikant höher. Kein signifikanter Unterschied konnte zwischen altem Beton- und neuem Spaltenboden festgestellt werden. Obwohl der maximale Anteil geschlossener Leerflächen keine signifikante Änderung hinsichtlich des Merkmals Abgeschlossenheit auswies, zeigte die maximale Anzahl geschlossener Leerflächen sowohl bei alten Beton- und Spaltenböden eine höhere Abgeschlossenheit als bei neuen.

Um diesen Sachverhalt näher zu erörtern, wurden die Belagsklassen hinsichtlich der Lage des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils verglichen. Hierzu wurden die Kenngrößen relativer Abstand der Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil bezogen auf den höchsten Punkt der betrachteten Topografie und absoluter Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie herangezogen. Diese Oberflächenkenngrößen zeigen nicht wie das geschlossene Leervolumen eine Aufteilung der Topografie in verschiedene Räume, sondern geben Auskunft darüber, in welcher Lage sich der maximale Anteil geschlossener Leerflächen entweder absolut in Millimetern oder relativ in Prozent vom höchsten betrachteten Punkt der Topografie befindet.

Die relative Betrachtung wies bei altem Gussasphalt eine signifikant tiefere Lage des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils aus. Bei Beton und Spaltenboden konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersklassen festgestellt werden. Diese Kenngröße zeigte demnach bis auf Gussasphalt bei keinem der untersuchten Materialien eine signifikante Änderung des Merkmals Abgeschlossenheit. Des Weiteren unterschieden sich die Belagsklassen neuer Gussasphalt, neuer und alter Spaltenboden nicht signifikant voneinander, wobei sich die beiden erst genannten auch nicht signifikant von neuen Betonlaufflächen unterschieden. Ferner konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen alten Gussasphaltlaufflächen, neuen und alten Betonlaufflächen festgestellt werden.

Die Kenngröße absoluter Abstand der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten Punkt der Topografie lieferte das gleiche Ergebnis hinsichtlich der Veränderungen des Merkmals Abgeschlossenheit zwischen den Altersklassen der Laufflächenmaterialien. Darüber hinaus unterschieden sich die Belagsklassen alter Beton, neuer und alter Spaltenboden sowie neuer Gussasphalt nicht signifikant voneinander.

Die aufgezeigten Ergebnisse der verschiedenen Flächenkenngrößen haben unterschiedliche Bedeutungen für die Entwicklung der Topografieeigenschaften der Laufflächenmaterialien im Laufe der Nutzungsdauer. Hierdurch gestaltete sich die Interpretation der unterschiedlichen Kenngrößen schwierig und führte teilweise zu widersprüchlichen Aussagen. Dies wird jedoch in Abschnitt 5.3 noch eingehend diskutiert werden.

Im Laufe der Auswertung der Flächenkenngrößen sind bereits einige Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Messgrößen deutlich geworden. Einen Gesamtüberblick liefern die in Anhang 5 aufgeführten Korrelationsmatrizen, in denen jeweils die behandelten Oberflächenkenngrößen für jede Laufflächenart aufgeführt sind. Je nach Belag sind die Zusammenhänge unterschiedlich stark, was unter anderem auf sehr unterschiedliche Streuungen der einzelnen Oberflächenkennwerte auf den verschiedenen Laufflächen zurückzuführen ist.

Abschließend gibt Tab. 25 einen Überblick über die durchschnittliche absolute Höhe der behandelten Flächenkenngrößen und deren durchschnittliche Änderung im Vergleich zwischen neuen und alten Laufflächenmaterialien. An diesem Zahlenmaterial werden die bereits in den vorangegangenen Abbildungen beschriebenen Unterschiede zwischen den einzelnen Belags- und Altersklassen noch einmal deutlich.

Tab. 25: Vergleich der Höhe und der Änderungen ausgewählter Flächenkenngrößen zur Beschreibung verschiedener Oberflächenmerkmale der Laufflächenklassen

Oberflächenkenngröße	Altersklasse / Differenz	Gussasphalt	Beton	Spaltenboden
Materialvolumen V_{ma}	≤ 3 Jahre	479,76	782,05	361,02
	> 9 Jahre	2030,38	606,94	267,64
	Differenz absolut [cm^3/m^2]	1550,62	-175,11	-93,39
	Differenz relativ [%]	323,2	-22,4	-25,9
Offenes Leervolumen V_{op}	≤ 3 Jahre	413,07	735,39	290,30
	> 9 Jahre	1776,40	598,69	203,67
	Differenz absolut [cm^3/m^2]	1363,33	-136,70	-86,63
	Differenz relativ [%]	330,0	-18,6	-29,8
Geschlossenes Leervolumen V_{cl}	≤ 3 Jahre	16,65	10,71	15,55
	> 9 Jahre	33,55	8,06	9,48
	Differenz absolut [cm^3/m^2]	16,90	-2,64	-6,07
	Differenz relativ [%]	101,5	-24,7	-39,0
Maximale Anzahl Materialflächen N_{mam}	≤ 3 Jahre	2,81	1,01	2,24
	> 9 Jahre	0,66	1,71	4,42
	Differenz absolut [mm^{-2}]	-2,15	0,70	2,19
	Differenz relativ [%]	-76,6	68,7	97,9
Maximale Anzahl offener Leerflächen N_{opm}	≤ 3 Jahre	0,11	0,04	0,10
	> 9 Jahre	0,06	0,05	0,12
	Differenz absolut [mm^{-2}]	-0,05	0,01	0,02
	Differenz relativ [%]	-47,8	24,5	26,0
Maximale Anzahl geschlossener Leerflächen N_{clm}	≤ 3 Jahre	2,90	1,04	2,54
	> 9 Jahre	0,81	1,94	5,13
	Differenz absolut [mm^{-2}]	-2,09	0,91	2,58
	Differenz relativ [%]	-72,0	87,5	101,8
Maximal geschlossener Leerflächenanteil α_{clm}	≤ 3 Jahre	7,62	3,19	7,40
	> 9 Jahre	4,30	3,11	6,12
	Differenz absolut [%]	-3,32	-0,08	-1,28
	Differenz relativ [%]	-43,6	-2,4	-17,3
bezogene Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil γ_{clm}	≤ 3 Jahre	58,6	62,7	58,0
	> 9 Jahre	64,7	64,5	55,6
	Differenz absolut [%]	6,1	1,8	-2,5
	Differenz relativ [%]	10,3	2,9	-4,3
Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil c_{clm}	≤ 3 Jahre	0,53	0,97	0,39
	> 9 Jahre	2,47	0,79	0,27
	Differenz absolut [mm]	1,94	-0,18	-0,12
	Differenz relativ [%]	366,7	-19,0	-30,9

Im Gegensatz zu den beiden anderen Laufflächenmaterialien war bei Laufflächen aus Gussasphalt eine deutliche Zunahme aller Volumenkenngößen nach fortgeschrittener Nutzungsdauer zu beobachten, wobei sie bei dem offenen Leervolumen mit 330,1 % am größten war. Bei allen Volumenkenngößen zeigten Spaltenböden größere relative Abnahmen als Betonböden. Dies traf insbesondere auf das geschlossene Leervolumen zu. Beim Materialvolumen und beim offenen Leervolumen konnten auch höhere absolute Abnahmen festgestellt werden. Bei den maximalen Flächenanzahlen waren die relativen und absoluten Abnahmen aller Kenngößen auf Spaltenböden größer. Auch auf Gussasphaltlaufflächen konnte eine Abnahme der maximalen Flächenanzahlen festgestellt werden. Im Falle der maximalen Anzahl Materialflächen sowie der maximalen Anzahl geschlossener Leerflächen betrug die Abnahme über 70 %. Die absoluten und relativen Abnahmen des maximal geschlossenen Leerflächenanteils auf Gussasphaltlaufflächen waren im Vergleich zu Beton- und Spaltenböden um ein Vielfaches größer. Die bezogene Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil zeigte bei Gussasphaltlaufflächen eine Zunahme von 10,3 %, auf jenen aus Beton fiel diese mit 2,9 % geringer aus. Im Gegensatz dazu zeigten Spaltenböden eine Abnahme von 4,9 %. Die Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil wies eine um 366,7 % tiefere Lage des maximal geschlossenen Leerflächenanteils auf alten Gussasphaltlaufflächen aus. Auf Beton und Spaltenboden lag dieser mit 19 % bzw. 30,9 % höher.

4.3 Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Gleitreibungs- und Topografiemessung

In diesem Abschnitt sollen nun die gewonnenen Erkenntnisse aus der Topografiemessung herangezogen werden, um zu klären, inwieweit die Kenngößen der Gleitreibungsmessung mit den Oberflächenkenngößen zusammenhängen.

Den Oberflächen der verschiedenen Laufflächenmaterialien und Altersklassen lassen sich charakteristische Topografiemerkmale zuschreiben, die in ihrer Summe die geometrischen Oberflächeneigenschaften ausmachen. Wie auch in der Metall- und Keramikindustrie bestimmen sie die tribologischen Eigenschaften der Laufflächen. Um zu klären, welche Oberflächeneigenschaften bei welchem Material und welcher Altersklasse die Rutschfestigkeit bestimmen, wurden zunächst wichtige vertikale Oberflächenkenngößen herangezogen. Da die Einflüsse der einzelnen Oberflächenkenngößen auf die Kenngößen der Gleitreibungsmessung bei allen Laufflächen in Höhe und Tendenz meist sehr ähnlich waren, werden jeweils nur die wichtigsten exemplarisch in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Wie bereits gezeigt, ist die Topografietiefe der Beläge eine zentrale Größe. Abb. 48 zeigt stellvertretend für eine Kenngöße, die das Merkmal Leere beschreibt, den Zusammenhang zwischen der Topografietiefe und dem Gleitreibungskoeffizienten.

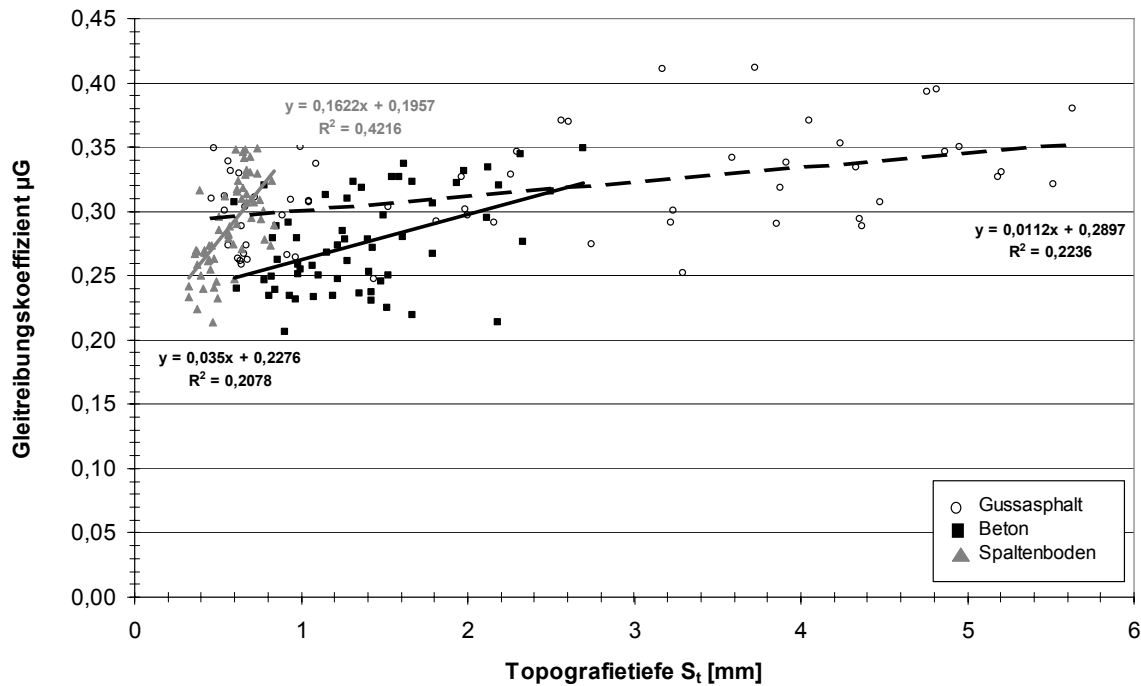


Abb. 48: Zusammenhang zwischen Topograftiefe und Gleitreibungskoeffizient auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

Generell bewirkte eine höhere Topograftiefe auf allen Materialien einen höheren Gleitreibungskoeffizienten. Gleiches galt auch für die anderen Kenngrößen der Leere. Die Messwerte und Regressionsgeraden der drei Laufflächenmaterialien liegen auf unterschiedlichen Niveaus. Die Messwertstreuung war erwartungsgemäß bei Gussasphalt am größten und bei Spaltenboden am geringsten. Es stellte sich anhand der Grafik heraus, dass die Zunahme der Topograftiefe bei Laufflächen aus Gussasphalt für die Höhe des Gleitreibungswertes eine geringere Rolle spielte als bei den anderen beiden Belägen, da die Regressionsgerade einen verhältnismäßig geringen Anstieg aufweist. An dieser Stelle muss die Aussagefähigkeit des Gleitreibungskoeffizienten zur Bewertung der Rutschfestigkeit in Frage gestellt werden. Am Beispiel der Gussasphaltbeläge, insbesondere der alten, konnte festgestellt werden, dass diese Messgröße alleine die für die Klauengesundheit wichtige Oberflächenbeschaffenheit in Form von höheren Messwerten nicht zufriedenstellend berücksichtigt (vgl. Abb. 38, Seite 125).

Die beiden neu definierten Kenngrößen der Gleitreibungsmessung arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden erwiesen sich als besser geeignet, die Oberflächenbeschaffenheit der Laufflächen auch bei der Gleitreibungsmessung wieder zu geben. Abb. 49 und Abb. 50 zeigen exemplarisch den Zusammenhang des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes bzw. der Anzahl positiver Amplituden und der Topograftiefe als eine Kenngröße des Topografiemerkmals Leere.

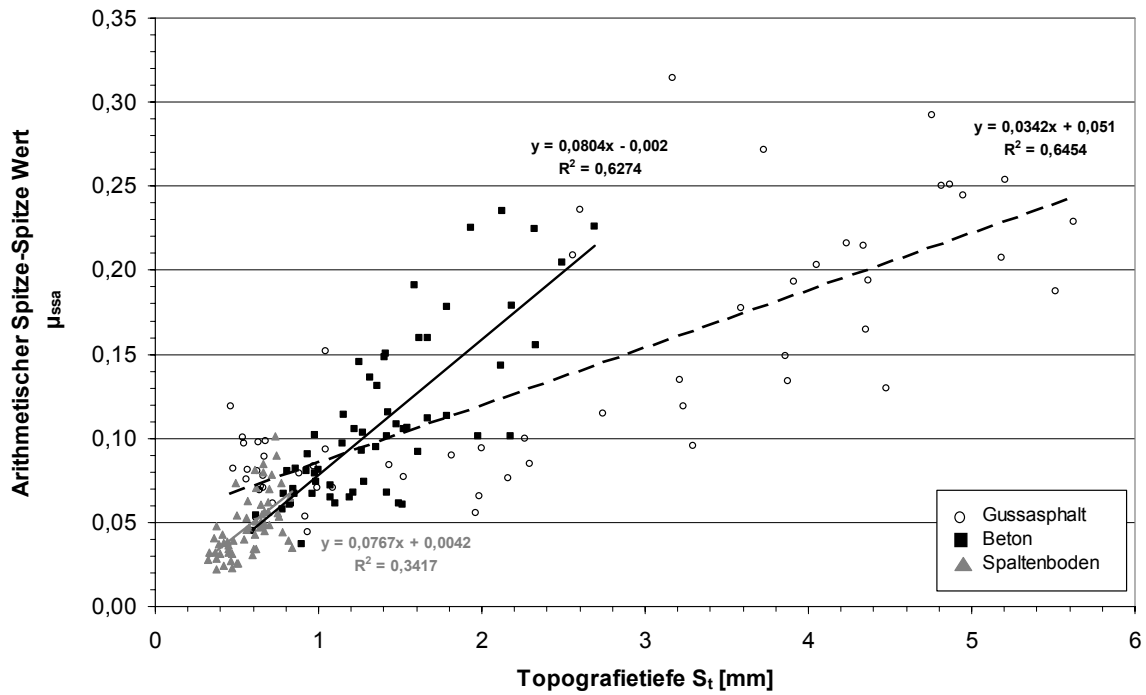


Abb. 49: Zusammenhang zwischen Topografietiefe und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

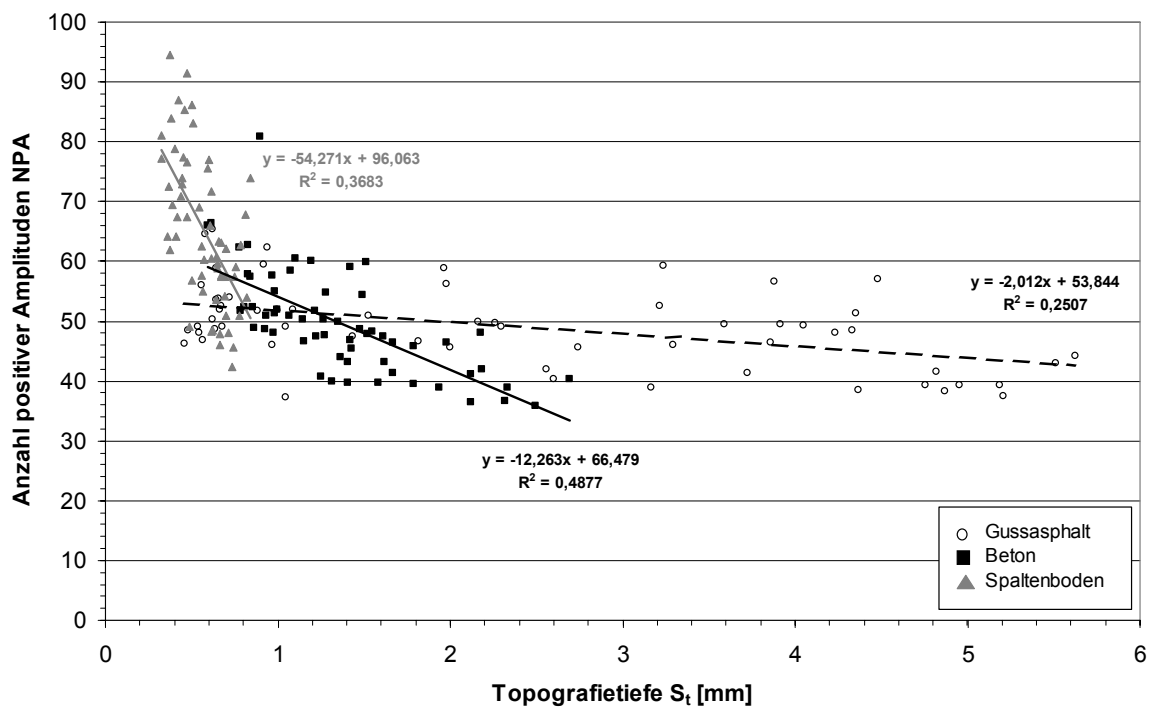


Abb. 50: Zusammenhang zwischen Topografietiefe und Anzahl positiver Amplituden auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

Auf allen Laufflächenmaterialien konnte eine Zunahme des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes bei gleichzeitiger Abnahme der Anzahl positiver Amplituden im Verlauf der Gleitreibungskurven festgestellt werden (Abb. 49 und Abb. 50). Die Bestimmtheitsmaße waren bei allen Belägen höher als es bei der Überprüfung des Einflusses der Topografietiefe auf den Gleitreibungskoeffizienten der Fall war. Dies legt die Annahme nahe, dass diese beiden Kenngrößen der Gleitreibungsmessung die Oberflächenbeschaffenheit besser berücksichtigen als es der Gleitreibungskoeffizient vermag. Allerdings bleibt festzuhalten, dass auch die Anzahl positiver Amplituden von der Höhe des Bestimmtheitsmaßes nicht als wesentlich besser zur Beschreibung der Rutschfestigkeit von Gussasphaltlaufflächen angesehen werden kann.

Bei den beiden Materialien zur Planbefestigung war der Zusammenhang zwischen Topografietiefe und arithmetischem Spitze-Spitze Wert (Abb. 49) am höchsten, wobei Beton durch die Abnahme der Rutschfestigkeit im Alter sensibler mit einer Zunahme des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes auf eine Erhöhung der Topografietiefe reagierte. Gleiches galt für die Erhöhung der Topografietiefe auf die Anzahl positiver Amplituden (Abb. 50). Die deutlichsten Veränderungen wies Spaltenboden bei den besagten Kenngrößen auf, da die Messwerte hier nur in einem geringen Bereich streuten, was auf die industrielle Fertigung zurückzuführen ist. Aus der Perspektive der Nutzungsdauer betrachtet, müssen die Grafiken umgekehrt interpretiert werden. Einen Gesamtüberblick über die Zusammenhänge anhand der errechneten Pearson Korrelationskoeffizienten gibt Tab. 26.

Tab. 26: Pearson Korrelationskoeffizienten zwischen ausgewählten vertikalen Oberflächenkenngrößen und den Kenngrößen der Gleitreibungsmessung

Gussasphalt					
	S_t	S_a	S_k	S_{pk}	S_{vk}
μH	0,03 n.s.	-0,02 n.s.	0,03 n.s.	0,14 n.s.	-0,04 n.s.
μG	0,47***	0,42***	0,41***	0,50***	0,44***
μ_{ssa}	0,80***	0,75***	0,73***	0,79***	0,77***
NPA	-0,50***	-0,46***	0,44***	-0,45***	-0,52***
Beton					
μH	0,43***	0,38**	0,37**	0,35**	0,38**
μG	0,46***	0,37**	0,35**	0,38**	0,40**
μ_{ssa}	0,79***	0,64***	0,58***	0,77***	0,62***
NPA	-0,70***	-0,61***	-0,56***	-0,65***	-0,52***
Spaltenboden					
μH	0,46***	0,33*	0,32**	0,22 n.s.	0,46***
μG	0,65***	0,54***	0,55***	0,47***	0,44***
μ_{ssa}	0,58***	0,51***	0,51***	0,39**	0,41**
NPA	-0,60***	-0,55***	0,55***	-0,45***	-0,38**

n = 60 Messstellen je Material

Die Tabelle bestätigt die Annahme, dass der Haftreibungskoeffizient nur bedingt zur Beschreibung der Rutschfestigkeit geeignet oder je nach Laufflächenmaterial sogar gänzlich ungeeignet war. Dies lag zum einen an den hohen Streuungen und seiner Ermittlung, zum

anderen aber auch daran, dass sich die vertikalen Oberflächenkenngrößen auf eine Mess- bzw. Auswertungsfläche bezogen. Während es bei Beton- und Spaltenboden teilweise signifikante bis höchst signifikante sehr geringe bis geringe Korrelationen gab, waren auf Gussasphaltauflflächen keine signifikanten Zusammenhänge nachzuweisen.

Der Gleitreibungskoeffizient zeigte bei allen Laufflächenmaterialien hoch bis höchst signifikante Korrelationskoeffizienten. Hierbei handelte es sich um geringe bis mittlere Korrelationen. Deutlicher kam das Oberflächenmerkmal Leere in Form des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes in Verbindung mit der Anzahl positiver Amplituden zum Ausdruck. Anhand der mittleren bis hohen höchst signifikanten Korrelationskoeffizienten konnte abgeleitet werden, dass diese beiden Kenngrößen die Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigen und diese sich auch mit der Gleitreibungsmessung erfassen lassen.

Die Laufflächen ließen sich mittels der flächenbezogenen Kenngrößen hinsichtlich ihrer Oberflächeneigenschaften noch detaillierter beschreiben. Zur Quantifizierung des Merkmals Leere wird stellvertretend das offene Leervolumen der Laufflächenmaterialien herangezogen. Abb. 51 und Abb. 52 zeigen die Zusammenhänge zwischen dem offenen Leervolumen und dem Gleitreibungskoeffizienten bzw. dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert.

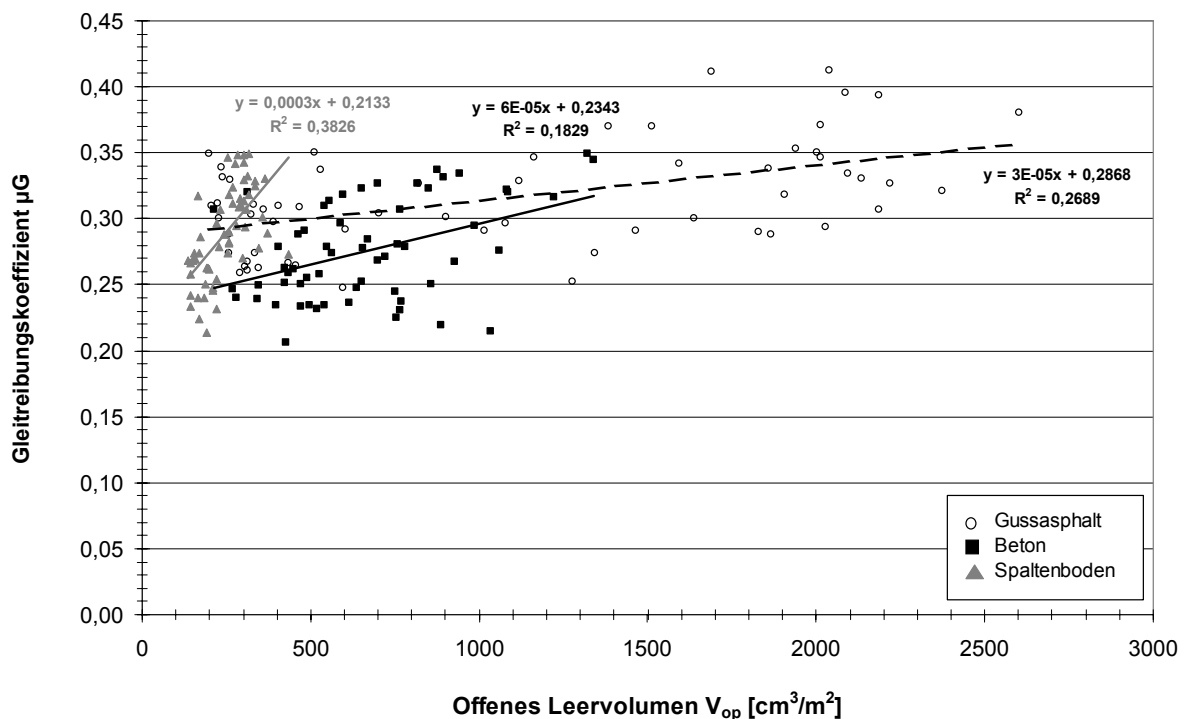


Abb. 51: Zusammenhang zwischen offenem Leervolumen und Gleitreibungskoeffizient auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

Die Zusammenhänge, die zwischen den vertikalen Kenngrößen der Leere festgestellt wurden, konnten durch die Flächenkenngrößen bestätigt werden. Eine Zunahme der Leere

bewirkte bei allen untersuchten Laufflächen eine Erhöhung des Gleitreibungskoeffizienten (Abb. 51). Bei Gussasphaltauflähen fiel wiederum die hohe Streuung der Messwerte auf. Dies war insbesondere auf die sehr heterogenen Messstellen auf den alten Gussasphaltauflähen zurückzuführen. Infolge dessen zeigte die Regressionsgerade nur einen moderaten Anstieg. Eine Mittelstellung in der Steigung nahmen die Betonböden ein, wenn gleich auch das Bestimmtheitsmaß vergleichsweise gering war. Bei Spaltenböden waren erwartungsgemäß die geringsten Streuungen zu beobachten. Auch das Bestimmtheitsmaß war im Vergleich zu den anderen beiden Materialien höher.

Generell zeigten alle Beläge mit zunehmendem Leeregrad einen Anstieg des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes (Abb. 52). Bei den Gleitreibungsmessungen auf den betreffenden Belägen äußerte sich dies in unruhigeren Kurvenverläufen (vgl. Abb. 39, Seite 126).

Das höchste Bestimmtheitsmaß wiesen Betonlaufflächen bei der Untersuchung des Zusammenhangs von offenem Leervolumen und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf. Die Messwerte rangierten in einem um die Hälfte kleineren Streubereich als bei Gussasphaltauflähen. Durch einen ähnlich steilen Anstieg der Regressionsgeraden wie bei Spaltenböden zeigten diese beiden Laufflächen einen vergleichbaren Anstieg des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes infolge einer Zunahme der Topografieleere. Gussasphalt zeigte wiederum eine sehr hohe Streuung der Messwerte.

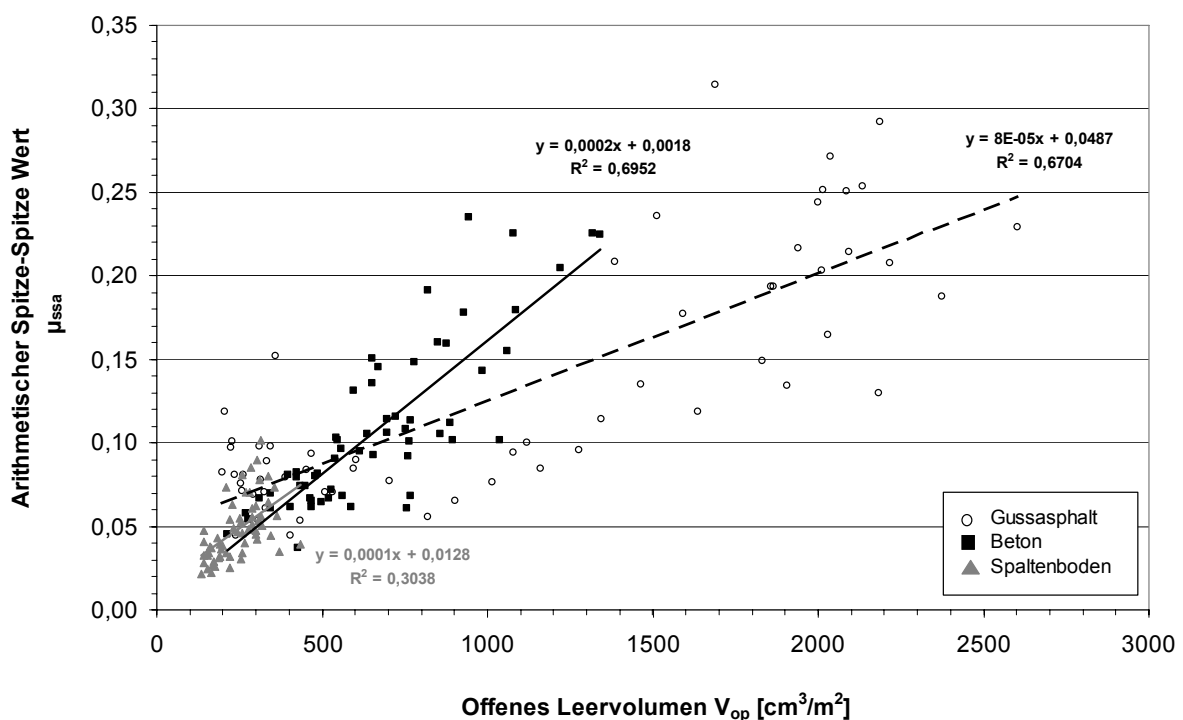


Abb. 52: Zusammenhang zwischen offenem Leervolumen und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

Weitere Topografieeigenschaften sind Abgeschlossenheit und Feinheit. An der Kenngröße maximale Anzahl geschlossener Leerflächen sind die Zusammenhänge mit dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert aus der Gleitreibungsmessung auf den untersuchten Laufflächenmaterialien dargestellt (Abb. 53).

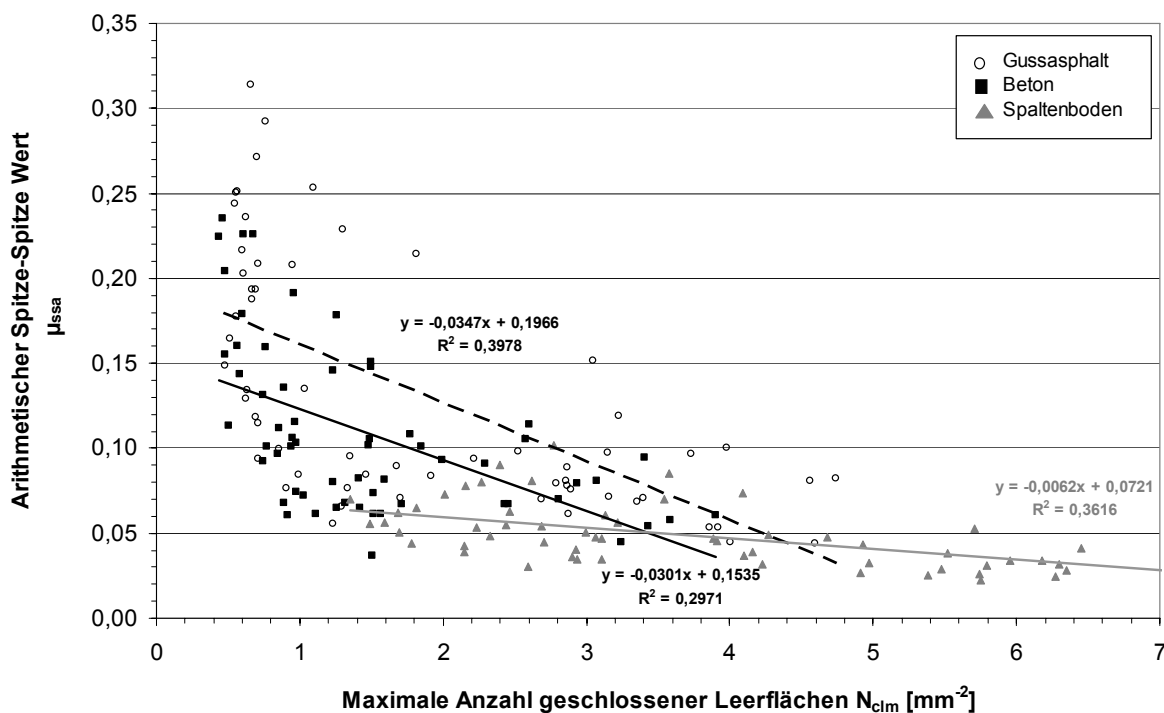


Abb. 53: Zusammenhang zwischen maximaler Anzahl geschlossener Leerflächen und arithmetischem Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

Eine höhere Abgeschlossenheit und Feinheit hatte auf allen Belägen einen niedrigeren arithmetischen Spitze-Spitze Wert zur Folge (Abb. 53). Das bedeutete generell einen zunehmend ruhigeren Verlauf der Gleitreibungskurven. Gussasphalt- und Betonlaufflächen zeigten einen ähnlichen Abfall der Regressionsgeraden, wobei sowohl die Streuung der Messwerte als auch das Bestimmtheitsmaß bei Gussasphalt wiederum höher waren. Den geringsten Abfall der Regressionsgeraden bei zugleich geringstem Bestimmtheitsmaß zeigten Spaltenböden. Obwohl die Verteilung der Daten bei Gussasphalt mehr einer logarithmischen ähnelt, wurde trotzdem Linearität unterstellt, da ein logarithmischer Zusammenhang zwischen den beiden dargestellten Kenngrößen in Anbetracht der linearen Zusammenhänge bei den beiden anderen Laufflächenmaterialien nicht plausibel war.

Einen weiteren, auf planbefestigten Laufflächen sogar besseren Zusammenhang zwischen der Abgeschlossenheit und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert ist in Abb. 54 dargestellt.

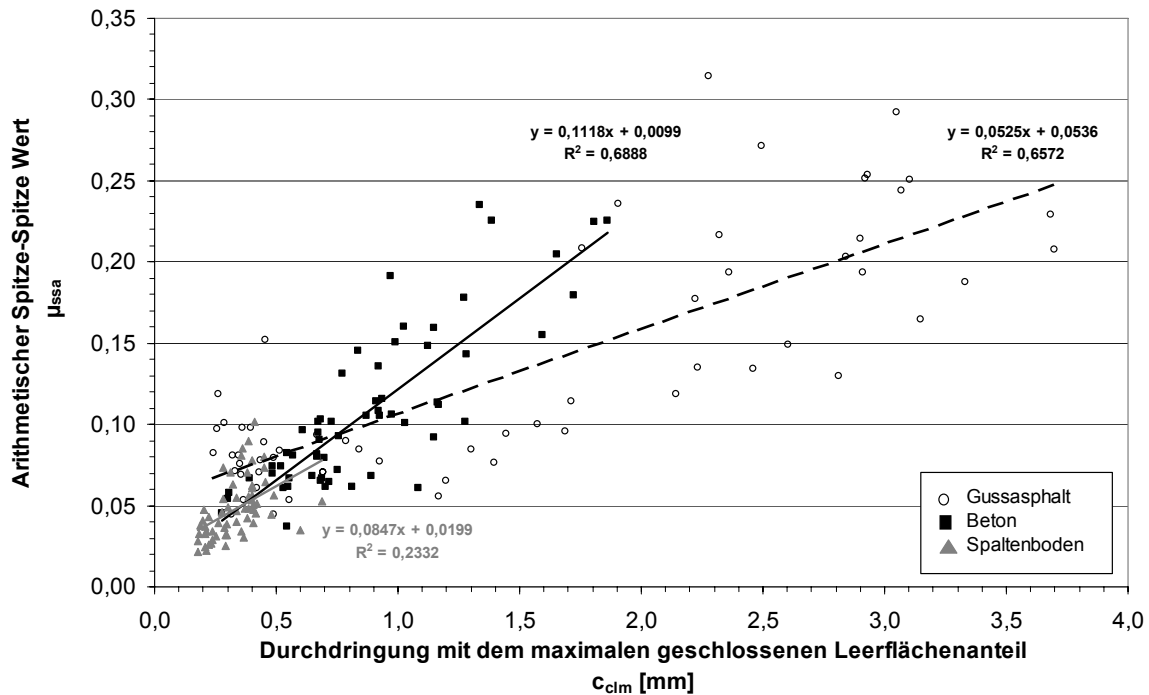


Abb. 54: Zusammenhang zwischen der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert auf den untersuchten Laufflächenmaterialien

Abb. 54 zeigt bei allen Belägen eine Zunahme des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes infolge eines größeren Abstandes der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil zum höchsten betrachteten Punkt der Topografie, d. h. je tiefer der maximale geschlossene Leerflächenanteil in der Topografie lag. Die größten Messwertstreuungen waren wieder bei Gussasphalt zu konstatieren. Dieser zeigte auch den geringsten Anstieg der Regressionsgeraden. Das höchste Bestimmtheitsmaß für diesen Zusammenhang lieferten Betonlaufflächen.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Zusammenhänge der verschiedenen Kenngrößen der beiden Messverfahren gibt Tab. 27.

Tab. 27: Pearson Korrelationskoeffizienten ausgewählter Flächenkenngrößen und Kenngrößen der Gleitreibungsmessung

Gussasphalt									
	V_{ma}	V_{op}	V_{cl}	N_{mam}	N_{opm}	N_{clm}	α_{clm}	c_{clm}	γ_{clm}
μH	-0,03 n.s.	0,09 n.s.	0,09 n.s.	-0,03 n.s.	0,02 n.s.	-0,08 n.s.	0,16 n.s.	0,04 n.s.	0,07 n.s.
μG	0,43***	0,52***	0,37**	-0,36**	-0,27*	-0,35**	-0,16 n.s.	0,49***	0,27*
μ_{ssa}	0,76***	0,82***	0,58***	-0,65***	-0,62***	-0,63***	-0,59***	0,81***	0,39**
NPA	-0,51***	-0,48***	-0,41**	0,47***	0,43***	0,46***	0,39**	-0,49***	-0,16 n.s.
Beton									
μH	0,42***	0,41***	0,43***	-0,42***	-0,25 n.s.	-0,42***	-0,09 n.s.	0,39**	-0,01 n.s.
μG	0,44***	0,43***	0,56***	-0,42***	-0,30*	-0,46***	0,00 n.s.	0,40**	0,04 n.s.
μ_{ssa}	0,68***	0,83***	0,29*	-0,57***	-0,54***	-0,55***	-0,34**	0,83***	0,38**
NPA	-0,60***	-0,73***	-0,31*	0,59***	0,54***	0,56***	0,34**	-0,71***	-0,35*
Spaltenboden									
μH	0,48***	0,36**	0,52***	-0,37**	-0,08 n.s.	-0,36**	0,32*	0,36**	-0,12 n.s.
μG	0,59***	0,62***	0,53***	-0,61***	-0,30*	-0,60***	0,23 n.s.	0,62***	0,12 n.s.
μ_{ssa}	0,54***	0,55***	0,48***	-0,58***	-0,39**	-0,60***	0,12 n.s.	0,55***	0,12 n.s.
NPA	-0,54***	-0,60***	-0,40**	0,64***	0,54***	0,68***	-0,05 n.s.	-0,60***	-0,19 n.s.

n = 60 Messstellen je Material; vollständige Korrelationstabellen aller untersuchten Messgrößen siehe Anhang 5

Somit stützten die Korrelationskoeffizienten zwischen den aufgeführten Kenngrößen generell die Annahme, dass über den arithmetischen Spitze-Spitze Wert und die Anzahl positiver Amplituden die Oberflächeneigenschaften der Laufflächen berücksichtigt werden können. Es zeigte sich auch, dass sich unterschiedliche Topografieeigenschaften in verschiedenen Messgrößen der Gleitreibungsmessung äußern. Hierbei waren die Korrelationskoeffizienten zwischen den verschiedenen Oberflächenkenngrößen und den Kenngrößen arithmetischer Spitze-Spitze Wert und der Anzahl positiver Amplituden im Graphen der Gleitreibungsmessung fast immer höher als zwischen den Oberflächenkenngrößen und dem Gleitreibungskoeffizient. Insbesondere auf planbefestigten Laufflächen, die vor Ort hergestellt wurden und keine so große Oberflächenhomogenität aufwiesen wie industriell gefertigte Spaltenböden, eigneten sich die neu definierten Kenngrößen besser als der bisherige Gleitreibungskoeffizient.

5 Diskussion

Auch in diesem Abschnitt soll die aus den vorherigen Abschnitten bekannte Struktur eingehalten und zuerst die Messverfahren, die Methodik der Datenerfassung und anschließend die Ergebnisse diskutiert werden.

5.1 Messtechnik und Methodik

5.1.1 Gleitreibungsmessung

SCHULZE (1979) fasst die wichtigsten Erkenntnisse aus internationalen Vergleichsuntersuchungen von Gleitreibungsmessgeräten für Griffigkeitsuntersuchungen im Straßenbau zusammen: Verschiedene Messverfahren zeigten für dieselbe Fahrbahnoberfläche unter gleichen Versuchsbedingungen unterschiedliche Reibwerte an. Umgekehrt würden unter verschiedenen Messbedingungen (andere Messgeschwindigkeit, andere Messreifen, anderer Nässegrad der Fahrbahn) gleiche Reibwerte ausgewiesen. Bei Zahlengleichheit von verschiedenen Gleitreibungswerten unterschiedlicher Herkunft könnte also keineswegs von gleicher Griffigkeit ausgegangen werden. Unterschiedliche Messgeräte zeigten im Vergleich zwar eine ähnliche Rangfolge der Griffigkeit verschiedener Fahrbahnen an, trotzdem sei eine Vergleichbarkeit nicht gegeben. Zwischen den Messgeräten bestünden zwar mehr oder weniger hohe Korrelationen, diese würden aber um so geringer, je stärker die Messbedingungen voneinander abweichen. Alle Messgeräte seien in der Lage, wirklich glatte Beläge als solche zu identifizieren, die Probleme treten allerdings bei Belägen von mittlerem und hohem Griffigkeitsniveau auf.

Aus der Literatur (STRANDBERG, 1985; SKIBA et al., 1987; NILSSON, 1988; SCHEIL, 1993; SKIBA et al., 1994; FISCHLEIN, 2000; WALLMANN und ASTRÖM, 2001; KIM, 2004a), die sich mit Reibwertmessungen, gleich aus welchem Fachgebiet, beschäftigt, geht ein eindeutiges Ergebnis hervor, das auch bereits in den Abschnitten 2.4.2, 2.4.4 und 2.6 herausgestellt wurde: Es gibt bisher noch kein international anerkanntes bzw. genormtes Reibzahl- bzw. Gleitreibungsmessgerät. Jedes der national verwendeten Geräte für verschiedene Messaufgaben hat seine Vor- und Nachteile hinsichtlich des Messvorgangs oder der technischen Spezifikationen. Dies gilt auch für die Messgeräte, mit denen verschiedene Autoren die Messung der Rutschfestigkeit von Laufflächen durchführten (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Messeinrichtungen unterscheiden sich nicht nur in der Antriebsmechanik und dadurch in der Prüfgeschwindigkeit, sondern auch in der Prüfstrecke, den Komponenten zur Kraftaufnahme, der Messwertausgabe und der Messwertanzeige (vgl. Tab. 3, Seite 41), wobei der messtechnische Fortschritt zur Erhöhung der Objektivität und der Reliabilität im Laufe der Jahre deutlich festzustellen ist. Die Unterschiede werden sogar schon bei den verschiedenen Prüfvarianten der einzelnen Verfasser deutlich. Einen maßgeblichen Einfluss haben beispielsweise das Material und die Form des Prüfkörpers, wie aus den Ausführungen von TÜRPIITZ (1968) zitiert in BÄHR und TÜRPIITZ (1976), BEER und KOVACS (1974), zitiert in

BÄHR und TÜRPIZ (1976), BÄHR et al. (1978), NILSSON (1988), MULITZE (1989), PHILLIPS et al. (1998) sowie PHILLIPS et al. (2000) u. a. hervor geht. Außerdem hat je nach Rauheit des zu prüfenden Bodenmaterials und der Härte des Prüfkörpers die Flächenpressung infolge der aufgebrachten Normalkraft einen erheblichen Einfluss auf die Höhe des Gleitreibungskoeffizienten (STRANDBERG, 1985; WIEDER, 1988; WAGNER, 1996; KIM und SMITH, 2000). Dies gilt insbesondere bei einem Reibpartner mit viskoelastischen Materialeigenschaften. Denn die Rauheitserhebungen der harten Böden verursachen Verformungen, Verschleiß und Abrieb des weicheren Reibpartners, was in einer Erhöhung der Hysteresereibkraftkomponente resultiert (WIEDER, 1988; FISCHLEIN, 2000; KIM, 2004a; KIM, 2004b) (vgl. außerdem Abschnitt 2.2.1). Daher sind die Ergebnisse von BÄHR et al. (1978) vor dem Hintergrund zu bewerten, dass die ausgewiesenen Gleitreibungskoeffizienten als Mittelwert von Messungen mit drei unterschiedlichen Normalkräften berechnet wurden.

Trotz der Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten von der Härte des viskoelastischen Materials, der Abhängigkeit von der Flächenpressung und der Gleitgeschwindigkeit, wurde als Prüfkörper des für die vorliegende Arbeit entwickelten Gleitreibungsmessgerätes ein viskoelastischer Kunststoff mit klauenähnlicher Härte gewählt, um den Klaueneigenschaften so gut wie möglich Rechnung zu tragen (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2). Diese Wahl wurde ebenfalls durch die Überlegung begünstigt, den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Härte des Prüfkörpers und damit Auswirkungen auf die Höhe der Messergebnisse weitestgehend auszuschließen (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.4.3). Geringfügige Oberflächenveränderungen am Prüfkörper blieben mit fortschreitendem Einsatz zwar nicht aus, bei der Quantifizierung des Einflusses durch Oberflächenveränderungen und Verschleißpartikel während der Gleitreibungsmessung mit viskoelastischen Stoffen auf harten Oberflächen besteht derzeit jedoch noch Forschungsbedarf (MANNING et al., 1998; KIM, 2004a; KIM, 2004b). Um einem sich andeutenden Verschleiß des Prüfkörpers und den hierdurch erwachsenden Beeinträchtigungen vorzubeugen, wurde ein Prüfkörper lediglich für die Messungen auf zwei Betrieben verwendet.

Als grundlegend problematisch hinsichtlich Reliabilität und Objektivität werden Gleitreibungsmessgeräte mit manuellen Kurbel- oder Zugvorrichtungen von SCHEIL (1993) sowie SKIBA et al. (1994) bei ihrer Bewertung von mobilen Reibzahlmessgeräten gesehen (vgl. Abschnitt 2.4.2), da solche Geräte die Grundvoraussetzung zur Gleitreibungsmessung, nämlich die Geschwindigkeitskonstanz während einer Messung nicht erfüllen. Außerdem verfügen diese Geräte oft nur über eine mechanische Messwertanzeige, die ein Ablesen während der Messung erfordert, wodurch wiederum zusätzliche Schwankungen in der Messgeschwindigkeit auftreten. Somit erscheinen diese Messgeräte nicht als probates Mittel, um zuverlässige und reproduzierbare Gleitreibungsmessungen durchzuführen. Entsprechend sind die Ergebnisse von MULITZE (1989) mit dem mobilen Messgerät, sowie die Messungen von BENZ (2002) mit einer Federwaage zu bewerten. Aus den genannten Gründen wurden bei dem neu entwickelten Gleitreibungsmessgerät ein durchzugsstarker Elektromotor und ein programmierbarer Frequenzumrichter eingesetzt. Hierdurch werden die Genauigkeitsanforderungen der E DIN 51131 zur Konstanzhaltung der Messgeschwindigkeit erfüllt (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2). Außerdem wurde ein Oszil-

loskop mit Speichermöglichkeit zur Messwertaufzeichnung verwendet, wodurch keine Fehler beim Ablesen der Gleitreibungskoeffizienten entstehen.

Ein weiteres Problem bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Autoren ist die Datengrundlage zur Berechnung der Gleitreibungskoeffizienten. Dies liegt daran, dass bei einigen Autoren nicht angegeben wird, aus wie vielen Wiederholungsmessungen pro Messstelle und aus wie vielen Messstellen je Belag die Gleitreibungskoeffizienten ermittelt wurden. Aufgrund der hohen Messwertstreuung auf den einzelnen Messstellen, aber auch aufgrund der inhomogenen Oberflächenstrukturen, bedingt durch Herstellung und durch unterschiedliche Beanspruchung im Stall, ist es unbedingt erforderlich, mehrere Wiederholungsmessungen an einer Messstelle und an mehreren Messstellen im Stall durchzuführen. Dies gilt insbesondere bei ungeführten Zugtribometern, da bei diesen Geräten laut SCHEIL (1993) und SKIBA et al. (1994) die Wiederholbarkeit schlechter ist und eine höhere Streuung der Messwerte auftreten kann als bei geführten Geräten. Zum anderen wird meist nicht angegeben, wie bzw. aus wie vielen Einzelmesswerten ein Gleitreibungskoeffizient berechnet wurde, ob eventuelle Einschwingvorgänge bei der Berechnung unberücksichtigt blieben oder ob der Mittelwert aus allen aufgezeichneten Messwerten gebildet wurde. In diesem Zusammenhang betont SCHULZE (1979) die Notwendigkeit der Berücksichtigung solcher messgerätbedingten Einschwingvorgänge durch entsprechende Korrekturbeträge. Erwähnenswert ist vor diesem Hintergrund die Arbeit von SCHEIL (1993). Er glättete auftretende Reibzahlspitzen durch Einschwingvorgänge infolge von Stick-Slip-Verhalten beim Übergang von Haft- in Gleitreibung durch rechnerische Integration der Reibzahlen über einen kleinen Zeitraum. Bei den eigenen Untersuchungen gingen diese Einschwingvorgänge nicht in die Ermittlung der Gleitreibungskoeffizienten ein, denn diese erfolgte erst nach dem Erreichen der endgültigen Messgeschwindigkeit (vgl. Abb. 28, Seite 110).

Der Einfluss der unterschiedlichen Berechnungsmethoden auf die absolute Höhe des Gleitreibungskoeffizienten wird bei der Betrachtung der Ergebnisse von MÜLLER (2003) deutlich. Hier werden die Gleitreibungskoeffizienten nach vier unterschiedlichen Berechnungsmodi ermittelt. Sie ergeben sich als Mittelwert aus den 25, 20 und 15 höchsten Werten einer Messung oder allen Messwerten, wobei die Gleitreibungskoeffizienten bei sämtlichen untersuchten Materialien und Varianten umso höher sind, je weniger von den höchsten Messwerten in die Berechnung eingehen. Je geringer die Anzahl der Messwerte, aus denen der Gleitreibungskoeffizient berechnet wird, desto mehr werden die besonders hohen positiven Amplituden in der Gleitreibungskurve gewichtet. Die Folge ist eine Überschätzung des Gleitreibungskoeffizienten und infolge dessen fälschlicherweise die Ausweisung einer guten Rutschfestigkeit mancher Laufflächen. Dies spiegelt jedoch nicht das Ausgleitrisiko und das Gefahrenpotential für die Tiere wider.

Die Ergebnisse der Überprüfung der Wiederholbarkeit mit dem neuen Gleitreibungsmessgerät wurden bereits in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt. Im allgemeinen zeichnen sich Reibungsmessungen durch eine schlechte Wiederholbarkeit aus (SCHULZE, 1979; KRAGELSKI et al., 1983; CZICHOS und HABIG, 2003). Insbesondere Griffigkeitsmessungen sind schlecht bzw. überhaupt nicht wiederholbar, da jeder Reibungsvorgang mit Ver-

schleiß einhergeht, der die Reibpartner verändert (SCHULZE, 1979; KIM und SMITH, 2000; KIM, 2004a; KIM, 2004b). Die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen unter „gleichen Bedingungen“ können erheblich voneinander abweichen. Hierfür nennt SCHULZE (1979) vier Ursachen: die Schwierigkeit der Konstanthaltung der Messbedingungen, die Messunsicherheit des Gerätes, die Ungleichmäßigkeit des Messgegenstandes und die zeitliche Veränderung des Messgegenstandes.

Um die Messgenauigkeit eines Messverfahrens einschätzen zu können, muss einerseits zwischen den unvermeidbaren Abweichungen der Messergebnisse unterschieden werden, weil sie in der Natur des Messgegenstandes und des Messverfahrens liegen und daher bei jedem Messgerät auftreten und solchen Abweichungen, die durch die Spezifikationen und Konstruktion des Messgerätes bedingt sind (SCHULZE, 1979).

Zur Abschätzung der Wiederholgenauigkeit des für die vorliegende Arbeit entwickelten Gleitreibungsmessgerätes wurden lediglich Wiederholungsmessungen auf unbenutzten Belägen durchgeführt, um die in der Praxis auftretenden Streuungen der Oberflächenrauheit der Laufflächen einzugrenzen. Zusätzlich wurden Messungen auf einer Floatglasplatte durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Wegen ihrer glatten Oberfläche werden solche Platten auch als Referenzoberfläche genutzt (MANNING et al., 1998; MANNING und JONES, 2001). Bei der Wiederholungsstandardabweichung des Gleitreibungskoeffizienten als Maß für die Wiederholbarkeit lag das Gleitreibungsmessgerät sowohl bei trockenen als auch bei nassen Prüfbelägen mit $0,002 \leq s \leq 0,012$ im Bereich des von WIEDER (1988) verwendeten Site-Prod-Traveller Gangsimulators. Er erzielte je nach Oberflächenrauheit der Prüfbeläge und Zwischenmedium Wiederholungsstandardabweichungen von 0,001 bis 0,02 des gemessenen Gleitreibungskoeffizienten. SKIBA et al. (1987) bescheinigten dem sogenannten „Boden-Schuh-Tester“, der im Rahmen der Entwicklung eines normgerechten Prüfverfahrens zur Ermittlung der Gleitsicherheit von Schuhsohlen konstruiert wurde, mit Wiederholungsstandardabweichungen des gemessenen Gleitreibungskoeffizienten zwischen 0,01 und 0,02 eine sehr gute Reproduzierbarkeit. SCHEIL (1993) sowie SKIBA et al. (1994) geben die mittlere Wiederholungsstandardabweichung bei einem Vergleichstest von 5 mobilen Reibzahlmessgeräten mit verschiedenen Gleitern, unterschiedlichen Zwischenmedien (Luft, Wasser, Öl, Glycerin) und auf verschiedenen Prüfböden mit $0,01 \leq s \leq 0,03$ des gemessenen Gleitreibungskoeffizienten an (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.4.2). Bei den trockenen Versuchvarianten waren die Wiederholungsstandardabweichungen der verschiedenen Messgeräte mit $0,01 \leq s \leq 0,04$ etwas höher als unter nassen Bedingungen mit verschiedenen Zwischenmedien ($0,01 \leq s \leq 0,03$). VAN DER SLUIS et al. (2002) geben die Toleranz der Messgeräte bei der Festlegung von Griffigkeitsgrenzwerten für Autobahnen (Gleitreibungskoeffizienten gemessen mit der SCRIM (Sideway Force Routine Investigation Machine, Fahrtribometer mit Reibrad an einem LKW montiert) mit 0,03 des gemessenen Gleitreibungskoeffizienten an. Aus diesem Vergleich geht eine sehr gute Wiederholbarkeit der Gleitreibungsmessungen mit dem neu entwickelten Gleitreibungsmessgerät hervor.

Allerdings weisen alle mobilen Messgeräte letztendlich Schwächen in der Validität hinsichtlich der beim Gang auftretenden Belastungen und Geschwindigkeiten während der

unterschiedlichen Gangphasen auf (vgl. Abschnitte 2.4.4 und 2.6). TELEZHENKO und BERGSTEN (2005) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass das von ihnen eingesetzte PFT-Gleitreibungsmessgerät (geschobenes Fahrtribometer mit Reibrad) nur begrenzte Möglichkeiten bietet, Gleitreibungskoeffizienten auf weichen Materialien zu messen. Denn aufgrund der zu geringen Normalkraft von 112 N sinkt dieses Gerät nicht genügend ein, um ein realitätsnahes Einsinken der Klauen zu simulieren. Hierdurch würde der Beitrag der Hysterese Komponente zur Erhöhung der Gesamtreibkraft und damit der Rutschfestigkeit zu gering ausfallen. Daher unterschätzte das PFT die Höhe des Gleitreibungskoeffizienten. In dieser Hinsicht stellt auch das in dieser Arbeit verwendete Gleitreibungsmessgerät keine Ausnahme dar. Dies ist jedoch eine Einschränkung, die zu Gunsten der Gerätemobilität in Kauf genommen werden musste.

Aufgrund der beschriebenen Unterschiede sind die in unterschiedlichen Veröffentlichungen vorgestellten Gleitreibungskoeffizienten diverser Böden nicht vergleichbar, solange sie nicht wenigstens mit dem gleichen Messgerät erhoben wurden. Darüber hinaus spielen die äußeren Messbedingungen eine Rolle, die bei den Messungen mit anzugeben sind. Dies ist umso wichtiger bei der Überprüfung der Laufflächenrutschfestigkeit, da beispielsweise die Verschmutzungsbedingungen und die Zusammensetzung der Verschmutzung an verschiedenen Messstellen im Stall sehr unterschiedlich sein können. Der Einfluss von Art und der Menge der Verschmutzung geht u. a. aus den Untersuchungen von PHILLIPS und MORRIS (2000) hervor. Beispielsweise heben MÜLLER (2003), REUBOLD (2004a), REUBOLD (2004d) sowie TELEZHENKO und BERGSTEN (2005) die Tauglichkeit ihrer Gleitreibungsmessgeräte für Messungen unter „Praxisbedingungen“, sprich im verkoteten Zustand der Laufflächen hervor und geben die so ermittelten Gleitreibungskoeffizienten als repräsentativ für verschiedene Bodenmaterialien an. Auch HERRMANN (1997) schlägt SRT-Messungen unter verschmutzten Bedingungen zur Erhöhung des Praxisbezuges vor. Grundsätzlich sollte ein Gleitreibungsmessgerät durchaus in der Lage sein, unter solchen Bedingungen zu messen, jedoch stellt sich die Frage nach der Aussagefähigkeit der gewonnenen Messwerte. Durch Messungen unter solchen Bedingungen wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit jenen von anderen Autoren, die sich ohnehin sehr schwierig gestaltet, zusätzlich erheblich eingeschränkt. Aus den Ergebnissen der verschiedenen Prüfvarianten der o. g. Verfasser und den doch teilweise großen Unterschieden (vgl. Abschnitt 2.4.3), wird deutlich, dass neben den Prüfmaterialien selbst, der Zustand trocken, nass oder verkotet eine große Rolle spielt (BÄHR und TÜRPIZ, 1976; BÄHR et al., 1978; PHILLIPS und MORRIS, 2000). Die ohnehin schon hohe Varianz des Gleitreibungskoeffizienten bei Felderhebungen wird durch solche uneinheitlichen Messbedingungen zusätzlich erhöht. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Prüfung unter diesen Umständen nicht nur aufgrund der Tatsache abgelehnt, dass unter verschmutzten Bedingungen nur eine einzige Messfahrt wegen der verrichteten Räumarbeit und die dadurch hervorgerufene Spurbildung möglich ist, sondern auch aufgrund des Einflusses diverser anderer Einflussfaktoren auf den einzelnen Untersuchungsbetrieben. Hierzu zählen: Das Fütterungsregime sowie die Häufigkeit der Entmistung und die Effizienz des Entmistungssystems auf die Menge, die Konsistenz und die Viskosität der auf den Laufflächen befindlichen Verschmutzungen. Diese verändern allesamt die tribologischen Eigenschaften des

Systems Prüfkörper – Zwischenmedium – Boden. Unter diesen „Praxisbedingungen“ wird lediglich ein „Schnappschuss“ einer Messfläche zu einem ganz bestimmten Tageszeitpunkt erfasst. Es erscheint also nicht zweckmäßig die Rutschfestigkeit von Laufflächen aus verschiedenen Materialien und unterschiedlichen Alters durch einen Gleitreibungskoeffizienten zu charakterisieren, dessen Höhe durch zahlreiche, unter „Praxisbedingungen“ nicht quantifizierte Faktoren beeinflusst wird.

Um die Rutschfestigkeit der Böden unter „Praxisbedingungen“ zu erfassen und darauf basierend Aussagen zu treffen, welche Beläge unter welchen Bedingungen am besten geeignet sind, müssten sämtliche Umweltbedingungen, unter der die Reibwerte erhoben werden, mit erfasst werden. Hierzu zählen Temperatur, Luftfeuchte, Menge der Verschmutzungsaufgabe sowie Konsistenz und Viskosität der Verschmutzung. Der Einfluss dieser Größen müsste im einzelnen unter konstanten Bedingungen getestet und für solche „Praxismessungen“ quantifizierbar gemacht werden, damit eine Art Korrekturfaktor berechnet und die Laufflächen unter gleichen Bedingungen beurteilt werden können.

Ein weiterer wünschenswerter Aspekt, den alle Autoren, die Messungen vor Ort durchgeführten, haben vermissen lassen, ist die Darlegung der Messstellen in den Ställen. So konnte zwar in den eigenen Untersuchungen kein eindeutiger Unterschied zwischen hoch- und niedrig frequentierten Messstellen in den Laufställen festgestellt werden, trotzdem ist dies ein Aspekt, der bei der Versuchsplanung und -durchführung bedacht und dargestellt werden sollte. In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine systematische Auswahl der Messstellen für alle Untersuchungsbetriebe vorgestellt und die Messstellen in den Grundrisskizzen zur Verfügung gestellt (vgl. Anhang 2).

Im Hinblick auf eine bessere Vergleichbarkeit der Messergebnisse und im Zuge der Vereinheitlichung des Messverfahrens erscheint es sehr wichtig, dass sich auf ein einheitliches Auswertungssystem geeinigt wird. Es ist zu vermuten, dass die Datenbasis, auf welcher der Gleitreibungskoeffizient (Anzahl der verwendeten Messwerte und ausgewertete Bereiche der Gleitreibungskurven) berechnet wird, bei dem Einsatz moderner und hochwertiger Messtechnikkomponenten mehr Einfluss auf die absolute Höhe des Gleitreibungskoeffizienten hat als das gesamte Messsystem. Im außerlandwirtschaftlichen Bereich wurden und werden bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt vor allem im Verkehrswesen und im Bereich der Arbeitssicherheit Bestrebungen zur Vereinheitlichung der Gerätespezifikationen und der Messbedingungen unternommen (WALLMANN und ASTRÖM, 2001). Allerdings behinderte eine Vielzahl von Faktoren die Entwicklung eines standardisierten Messverfahrens und gültiger Richtlinien (KIM, 2004b). Für landwirtschaftliche Anwendungen (Ermittlung der Rutschfestigkeit von Laufflächen) ist eine derartige Entwicklung zur Zeit nicht in Sicht. Infolge der aufgezeigten Kritikpunkte wurde bei der Entwicklung der Messtechnik Wert auf eine größtmögliche Normenkonformität im Rahmen des beabsichtigten Einsatzzwecks und der Einsatzbedingungen gelegt. Auch bei der Datenverarbeitung wurde darauf geachtet, dass sowohl die Berechnungsmodi als auch der Umgang mit den Daten nachvollziehbar und reproduzierbar waren. Dies wird als ein Vorschlag und Beitrag zur Vereinheitlichung des Messverfahrens verstanden, der auch die Berechnung weiterer Kenngrößen aus der Gleitreibungsmessung einschließt.

5.1.2 Topografiemessung

Es gibt zahlreiche Messsysteme zur Topografie Vermessung technischer Oberflächen. Wie aus den Abschnitten 2.5 und 3.1.3 hervorgeht, sind jedoch nicht alle aufgeführten Systeme zur Aufnahme von Laufflächenoberflächen geeignet. Gegen die Oberflächenerfassung mit Tastschnittgeräten sprachen vor allem die höhere Messgeschwindigkeit und die dreidimensionale Messwertaufnahme und -auswertung für einen Laser-Linienscanner. Eine hohe Messgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Erfassung eines vergleichsweise großen Messfeldes war für die Messung in belegten Milchviehställen ein wichtiger Faktor, da Teilbereiche der Ställe für die Tiere gesperrt werden mussten, wodurch sich die Viehdichte und die Unruhe in den verbleibenden Stallteilen erhöhte. Als alternatives Messprinzip stand die Streifenprojektion zur Debatte. Dieses Feldmessverfahren ist zwar schneller als ein Laser-Linienscanner, jedoch gab es kein Gerät, das die Anforderungen an die vertikale und laterale Auflösung zu einem vertretbaren Preis bieten konnte. Weißlichtinterferometer und konfokale Messmikroskope bieten zwar eine hohe Auflösung und eine hohe Genauigkeit, sind allerdings zum einen sehr teuer und zum anderen lediglich stationäre Labormesseinrichtungen mit sehr geringer Messfeldgröße, sodass diese Geräte ebenfalls nicht für den mobilen Robusteinsatz in Frage kamen.

Die Schwierigkeiten, die sich bei der Auswahl eines Laser-Triangulationssensors, insbesondere bei einem Laser-Linienscanner, stellten (da solche Geräte von noch weniger Herstellern angeboten werden als punktweise messende Sensoren), beschreibt KLEIN (2003) sehr treffend. Er kritisiert, dass sich die Auswahl eines geeigneten Triangulationssensors sehr schwierig gestaltet, da eine vergleichende Beurteilung anhand von Herstellerangaben dadurch erschwert würde, dass die meisten Hersteller nur Angaben über erzielbare Auflösung und Reproduzierbarkeit der Sensoren gäben, nicht aber über die erzielbare Genauigkeit. Pauschale Angaben über die tatsächlich erzielbare Genauigkeit seien problematisch und hingen vom Anwendungsfall ab.

Im Folgenden sollen von den zur Oberflächenerfassung verfügbaren Messsystemen ausschließlich Messsysteme anderer Autoren diskutiert werden, die ebenfalls auf dem Prinzip der Laser-Triangulation basieren. Da es diesbezüglich kaum landtechnische Veröffentlichungen gibt, sollen auch Geräte von Autoren aus anderen Fachdisziplinen mit besprochen werden. Die Vollständigkeit der Angaben über die im einzelnen verwendeten Geräte sind jedoch in den Veröffentlichungen sehr unterschiedlich.

FISCHLEIN (2000) nutzte zur Erfassung der Oberflächentopografie von Fahrbahndecken neben einem mechanischen Tastschnittgerät einen punktweise messenden Laserscanner, der nach dem Prinzip der doppelten Triangulation arbeitete. Ein wesentlicher Vorteil dieses Prinzips gegenüber der einfachen Laser-Triangulation ist, dass durch die Abtastung der Topografie mit einem Laserstrahl, der auf zwei Detektoren reflektiert wird, unterschiedliches Reflexionsverhalten, Transparenz und Mehrfachreflexionen von Oberflächenelementen sowie Abschattungen weitestgehend kompensiert werden. Dies führt zu einer besseren Auflösung und Genauigkeit und infolge dessen zu einer besserer Reproduzierbarkeit. Der

Messbereich betrug ± 3 mm, die vertikale Auflösung des genutzten Sensors 0,0006 mm, der Bezugsabstand (Abstand des Sensors vom Messobjekt) 15 mm, wobei der mögliche Arbeitsbereich zwischen 12 und 18 mm lag. Auch SCHRAMM (2002) verwendete einen Sensor, der nach dem gleichen Prinzip arbeitet. Er konnte hiermit bei seinen Fahrbahnuntersuchungen eine Aufnahmelänge von bis zu 200 mm erfassen. Er gab den vertikalen Messbereich mit ± 3 mm und den maximalen Arbeitsabstand mit 60 mm an. Die vertikale Auflösung betrug 0,0016 mm und in der Horizontalen 0,025 mm. XIE (2002) führte seine Untersuchungen neben einem Streifenprojektionsmesssystem mit einem punktmessenden Laserprofilometer mit einfacher Triangulation durch. Er gab folgende Daten für den Sensor an: Messstrecke: 600 mm, Messbereich: ± 15 mm, vertikale Auflösung: 0,008 mm. DE BELIE und ROMBAUT (2003) nutzten für die Rauheitsmessungen ein stationäres, berührungsloses Lasermesssystem. Die vertikale Auflösung des Laserprofilometers betrug 0,01 mm.

Es liegt im Messprinzip begründet, dass die Lasersensoren der genannten Autoren eine deutlich höhere Scanfrequenz und eine höhere vertikale Auflösung haben. Hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ist das Verfahren der Doppel-Triangulation der einfachen Triangulation überlegen. Ziel dieser Arbeit war es, Zusammenhänge zwischen den Oberflächeneigenschaften und der Rutschfestigkeit von Laufflächen zu finden. Idealerweise wären die Messflächen des Gleitreibungs- und des Topografiemessgerätes identisch gewesen, sodass sich die Datenauswertung der beiden Messverfahren auf die selben Flächen beziehen ließe. Da kein optisches Oberflächenmesssystem der Messfläche des Gleitreibungsmessgerätes bei gleichzeitig hoher vertikaler Auflösung entsprach, musste ein Kompromiss zwischen einer vertretbaren Messflächengröße, einer akzeptablen vertikalen Auflösung und dem Preis für das anzuschaffende Messsystem gemacht werden (vgl. außerdem Abschnitte 2.5.1, 2.6 und 3.1.1).

Die Messunsicherheit optischer Messsysteme hängt wesentlich stärker von äußeren Faktoren ab als diejenige taktile Messsysteme (vgl. Abschnitt 2.5.1). Als wesentliche Einflussfaktoren sind hier die Intensität und die Intensitätsverteilung des remittierten Lichtes und das vom Detektor des Sensors empfangene Licht zu nennen (DONGES und NOLL, 1993; KLEIN, 2003). Diese werden durch die Reflexionseigenschaften der zu vermessenden Oberfläche beeinflusst, wie beispielsweise die Rauheit und Farbe bzw. die Helligkeit. Außerdem ist der Auftreffwinkel für die Messunsicherheit von großer Bedeutung (KLEIN, 2003). Denn je größer dieser Winkel beispielsweise an steilen Kanten ist, desto weniger Licht erreicht den Detektor und führt so zu systematischen Messfehlern und einer verfälschten Abbildung der Oberflächengeometrie (vgl. Abb. 30, Seite 113 und Abb. 31, Seite 114). Hierin liegt der Vorteil der Doppel-Triangulation. Durch Abtastung mit einem Laserstrahl, der auf zwei Empfangselemente reflektiert wird, lassen sich Messfehler durch Abschattungen und Neigungseinflüsse reduzieren.

DONGES und NOLL (1993) sowie REPPENING (1994) betonen, dass die Senkrechtabtastung, also der senkrechte Einfall des Laserlichtes auf die zu vermessende Oberfläche unter schwierigen Bedingungen von besonderer Wichtigkeit zur Vermeidung von Fehlmessungen ist. Um Messfehler unter Feldversuchsbedingungen im Stall zu minimieren,

war besonders der Gefälleausgleich auf planbefestigten Laufflächen hin zur Entwässerungsrinne bzw. der Seilführung des Schiebers und der Ausgleich durch uneben verlegte Balken auf Spaltenboden mittels Wasserwaage und den am Topografiemessgerät verstellbaren Gewindefüße wichtig (vgl. Abb. 22, Seite 97). Dennoch traten Messfehler durch eine zu geringe Intensität des reflektierten Laserlichtes infolge von Abschattungen auf. Diese waren auch aufgrund der Laufflächentopografien nicht zu vermeiden. Diese Messfehler wurden vom Messsystem durch eine Intensitätsmessung des reflektierten Laserlichtes während des Scannens im Datensatz kenntlich gemacht. Bei der Datenaufbereitung wurden diese Messfehler weitestgehend mittels digitaler Korrekturalgorithmen interpoliert. Darüber hinaus verbleibende Ausreißer wurden manuell in der Software WinSAM korrigiert und durch Interpolation ersetzt (vgl. Abschnitt 3.4.2). Diese Vorgehensweise wurde in den Vorversuchen erarbeitet. Die hierbei erzielte Wiederholungsstandardabweichung in Vorversuchen zeigte sehr gut wiederholbare Topografiemessungen von verschiedenen Prüfoberflächen im Rahmen der erzielbaren Gerätespezifikationen (vgl. Abschnitt 3.2.2).

5.2 Einordnung der Ergebnisse aus der Gleitreibungsmessung

Aufgrund der mangelnden Simulation der wechselnden Belastungen, der abweichenden Geschwindigkeit und der wechselnden Kontaktflächen durch mobile Reibzahlmessgeräte sind auch deren Messgrößen vor diesem Hintergrund zu sehen und zu interpretieren. In der Literatur wird die Verwendung von Reibungskoeffizienten durchaus kritisch und problematisch gesehen. Dies konnte durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ebenfalls bestätigt werden, wobei der Haftreibungskoeffizient als aussagekräftige Messgröße noch kritischer zu bewerten ist als der Gleitreibungskoeffizient. Dies ging bereits aus den Abschnitten 4.1.1, 4.1.3 und 4.3 hervor. Aufgrund der Mittelwerte der durchschnittlichen Haftreibungskoeffizienten bei den Gussasphaltlaufflächen war anhand der Daten der Einzelbetriebe keine eindeutige Entwicklungstendenz mit zunehmendem Alter erkennbar. Denn die Mittelwerte der 10 Messstellen pro Stall lagen alle auf ähnlichem Niveau. Bei Beton und Spaltenboden konnte offenbar ein Rückgang des durchschnittlichen Haftreibungskoeffizienten beobachtet werden (vgl. Abb. 34, Seite 121). Eingeteilt nach Material und Altersklassen konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Belagsklassen neuer und alter Gussasphalt sowie neuer Beton- und Spaltenboden festgestellt werden. Gleiches galt für alten Beton und alten Spaltenboden (vgl. Abb. 35, Seite 122).

NILSSON (1988) kam zu der Erkenntnis, dass der Haftreibungskoeffizient bei seinen Untersuchungen eine zu hohe Streuung aufwies oder bei manchen Prüfböden nicht eindeutig zu ermitteln war. Dies galt insbesondere für Gummimatten. Bei der Validierung des Boden-Schuh-Testers stellte KUSCHEFSKI (1988) höhere Korrelationskoeffizienten zwischen dem Gleitreibungskoeffizienten und der von Testpersonen subjektiv empfundenen Gleitsicherheit als zwischen dem Haftreibungskoeffizienten und der von Testpersonen subjektiv empfundenen Gleitsicherheit fest. Auch SKIBA et al. (1987) betonen, dass der Haftreibungskoeffizient allein als Beurteilungskriterium für die Rutschfestigkeit von Bo-

denbelägen und Schuhsohlen und als Messgröße bei der Geräteentwicklung zu Fehleinschätzungen der Rutschfestigkeit führt.

Dieses Problem liegt in der Berechnung des Haftreibungskoeffizienten begründet und soll am Beispiel der eigenen Untersuchungen erläutert werden: Laut Definition ist der Haftreibungskoeffizient der Quotient aus der zur Überwindung der Haftreibungskraft notwendigen Tangentialkraft und der Normalkraft, die auf denjenigen Körper ausgeübt wird, der in Bewegung gebracht werden soll. Eben hierin liegt das Problem dieser Messgröße: Im Verlauf der gesamten Reibwertmessung ist der Haftreibungskoeffizient die maximale positive Amplitude am Anfang der Reibungskurve. Im Gegensatz zum Gleitreibungskoeffizienten, der im Falle dieser Arbeit als Durchschnitt von insgesamt 1601 Messwerten je Einzelkurve berechnet wurde, war der Haftreibungskoeffizient lediglich ein einziger Wert. Bezogen auf eine Messstelle gingen somit in die Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten 16010 Messwerte ein, in die des Haftreibungskoeffizienten einer Messstelle lediglich 10, wodurch er sehr sensibel auf die Oberflächenbeschaffenheit der Messstelle reagierte (vgl. Abschnitt 3.4.1). Bereits innerhalb dieser 10 Werte der Wiederholungsmessungen auf einer Messstelle unterlag der Haftreibungskoeffizient erheblichen Schwankungen. Ein Versatz des Prüfkörpers bei den Wiederholungsmessungen um lediglich 1 mm konnte zu stark abweichenden Messergebnissen führen.

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die Aussagekraft dieser Messgröße bei derzeit verfügbaren Messgeräten zur Beschreibung der Rutschfestigkeit von Laufflächen als zweifelhaft einzuschätzen ist. Denn im Gegensatz zu industriell gefertigten Bodenbelägen in Werkstätten, Schwimmbädern, Sporthallen oder Schlachthöfen, bei denen der Haftreibungskoeffizient durchaus Aussagekraft besitzen kann, weisen Laufflächen, insbesondere die vor Ort hergestellten aus Beton und Gussasphalt, keine homogenen Oberflächen auf. Denn die genannten Materialien sind Mischungen verschiedener Sieblinien mit entsprechenden Füll- und Bindemitteln, die erst beim Stallbau gefertigt werden. Selbst wenn die Mischungsverhältnisse festgelegt und vorgeschrieben sind, werden zur Herstellung entsprechend großer Laufflächen mehrere Mischungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten verarbeitet. Das heißt, die Laufflächen werden oft als Teilflächen fertig gestellt. Eine erhebliche Rolle hinsichtlich der Oberflächenhomogenität spielen daher die an einer Teilfläche im Stall verarbeitete Mischung und der Zeitpunkt bzw. die Dauer ihrer Verarbeitung sowie die Bearbeitungsintensität. Da die Oberflächenbeschaffenheit dieser Beläge durch Handarbeit wie beispielsweise Abziehen mit einer Latte oder Abreiben bei Beton und das Abstreuen bei Gussasphalt erzielt wird, sind hierdurch trotz einheitlicher Sand-, Splitt- oder Zuschlagskörnungen keine einheitlichen Oberflächen zu erwarten. Auch FISCHLEIN (2000) betont, dass beispielsweise nur die Kornzusammensetzung der Beläge noch keine direkte Aussage über die Ausprägung der Oberflächenstruktur zulässt, da diese neben der Kornform abhängig vom Bindemittelgehalt, dem Fülleranteil (bei Gussasphalt), etc., aber auch vom Verschleißzustand und der Verdichtung beim Herstellungsprozess ist.

Alle diese Aspekte erklären die starken Streuungen zwischen den Messstellen innerhalb eines Stalls, die ebenfalls bei der Messgröße Gleitreibungskoeffizient zu beobachten waren. Allerdings ist dieser durch die Berechnung aus einer großen Anzahl von Einzelmess-

werten nicht so schwankungsbehaftet wie der Haftreibungskoeffizient. VAN DER SLUIS et al. (2002) berichten über eine groß angelegte Griffigkeitsuntersuchung von Autobahnen. Hierbei stellten sich ebenfalls große Streuungen der Gleitreibungskoeffizienten sowohl innerhalb einer Einzelmessstrecke (allerdings 100 m lang) als auch zwischen den untersuchten Autobahnen, wobei diese Unterschiede nur teilweise auf Materialunterschiede der Fahrbahndecken zurückzuführen waren.

Beim Vergleich der Ergebnisse von Gleitreibungsmessungen verschiedener Autoren ist unklar, wodurch die Unterschiede verursacht werden, ob durch unterschiedliche Messgeräte oder durch die unterschiedlichen Oberflächenrauheiten der Böden. So sind die Veröffentlichungen von TÜRPIITZ (1968) zitiert in BÄHR und TÜRPIITZ (1976) sowie BEER und KOVACS (1974) zitiert in BÄHR und TÜRPIITZ (1976) die einzigen, in denen keine Unterschiede zwischen Haftreibungs- und Gleitreibungskoeffizienten gefunden wurden. Dies könnte an den verwendeten Messgeräten bzw. der Ablesung des Dynamometers während des Zugvorgangs oder am verwendeten Klauenmaterial liegen. Trotz der unterschiedlichen Messgeräte und Messbedingungen zeigt Tab. 28 eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Gleitreibungsmessungen verschiedener Autoren. Hierin sind nur solche Materialien aufgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit bei den Vor- bzw. Hauptversuchen untersucht wurden bzw. mit ihnen vergleichbar sind.

Tab. 28: Vergleich der Gleitreibungsergebnisse verschiedener Autoren mit den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen

Autor	Material	μ G trockener Zustand	μ G nasser Zustand	μ G verkoteter Zustand
BÄHR und TÜR-PITZ (1976)	Spaltenboden	0,27-0,29	/	/
	Asphalt	0,75-0,79	0,78-0,86	0,57-0,63
	Kaltbitumenestrich	0,36-0,40	0,36-0,43	/
	Gummimatte	0,65	0,53	0,55
	Betonestrich (DDR)	0,46	0,65	0,62
	Betonestrich (Ungarn)	0,70-0,86	0,70-0,92	0,56-0,81
BÄHR et al. (1978)	Beton neu	0,50	0,57	0,58
	Gummimatte	0,62	0,67	0,67
	Gummimatte mit Kronenprofil	0,61	0,51	0,66
NILSSON (1988) ¹	Beton mit Stahlkelle abgezogen	0,28	0,18	0,49
	geglätteter Beton	0,28	0,23	0,31
	verschiedene Gummimatten	0,30-1,37	0,51-1,25	0,43-0,81
MULITZE (1989) ²	Beton-Balken	0,80	0,83	/
	Beton-Spaltenboden	0,83	0,78	/
PHILLIPS und MORRIS (2000)	planbefestigter Beton (4 Jahre)	0,43	0,51	0,54
PHILLIPS und MORRIS (2001)	Epoxydharzanstrich ohne Aggregatbeimengung	0,34	/	/
	Epoxydharzanstrich (Aggregatgröße: 0,5 mm)	0,61	/	/
	Epoxydharzanstrich (Aggregatgröße: 1,2 mm)	0,58	/	/
	Epoxydharzanstrich (Aggregatgröße: 2,5 mm)	0,74	/	/
MÜLLER (2003) ³	planbefestigter Beton 1999, unbenutzt	/	0,33	/
	planbefestigter Beton 1999	/	0,27	0,28
	Gussasphalt 1995, Betrieb I	/	0,27	/
	Gussasphalt 1995, Betrieb II	/	0,29	/
	Gussasphalt Durchschnitt der beiden Betriebe	/	0,27	0,25
	Spaltenboden (Flächenelemente) 1993	/	0,28	/
	Spaltenboden (Drillingselemente) 1991	/	0,26	/
	Spaltenboden (Flächenelemente) 1987	/	0,21	/
	Spaltenboden Durchschnitt der Einbaujahre 1987, 1991, 1993	/	0,25	0,27

TELEZHENKO und BERGSTEN (2005)	planbefestigter Beton, 8 Jahre	/	/	$0,58^c \pm 0,03$
	Spaltenboden, 8 Jahre	/	/	$0,31^a \pm 0,04$
	Gummimatte	/	/	$0,46^b \pm 0,04$
eigene Voruntersuchungen	Beton, 22 Jahre, unbenutzt	$0,40 \pm 0,010$	$0,35 \pm 0,003$	/
	Gussasphalt, 22 Jahre, unbenutzt	$0,39 \pm 0,012$	$0,41 \pm 0,012$	/
	Spaltenboden, 4 Jahre, unbenutzt	$0,28 \pm 0,004$	/	/
	Gummimatte Laufgang (Kraiburg), 1 Jahr, unbenutzt	$0,83 \pm 0,009$	$0,55 \pm 0,005$	/
	Gummi-Liegeboxenmatte (Kraiburg), 1 Jahr, unbenutzt	$0,63 \pm 0,012$	$0,60 \pm 0,006$	/
	Betonestrich, Epoxdharzanstrich, 45 Jahre im Werkstatteinsatz	$0,21 \pm 0,002$	/	/
eigene Hauptuntersuchungen	Gussasphalt ≤ 3 Jahre	/	$0,30^a \pm 0,03$	/
	Gussasphalt ≥ 9 Jahre	/	$0,33^b \pm 0,04$	/
	planbefestigter Beton ≤ 3 Jahre	/	$0,31^a \pm 0,03$	/
	planbefestigter Beton ≥ 9 Jahre	/	$0,25^c \pm 0,02$	/
	Spaltenboden ≤ 3 Jahre	/	$0,32^{ab} \pm 0,02$	/
	Spaltenboden ≥ 9 Jahre	/	$0,26^c \pm 0,02$	/

¹ Es sind nur Ergebnisse mit einer Normalkraft von 0,581 kN aufgeführt, da diese von den drei von NILSSON (1988) getesteten Varianten derjenigen, die für die eigenen Messungen eingesetzt wurde, am ähnlichsten ist.

² Es sind nur Ergebnisse mit dem motorisch betriebenen Gleitreibungsmessgerät und dem Kunstklauentyp III (Prüfkörper aus drei Kunststoffabgüssen von Schweineklauen) aufgeführt, da diese den Spezifikationen des für die eigenen Untersuchungen eingesetzten Messgerätes am ähnlichsten sind.

³ Es sind nur Ergebnisse aufgeführt, bei denen die Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten durch die Mittelwertbildung aller Einzelmesswerte erfolgte, da diese Auswertungsmethode der eigenen am ähnlichsten ist.

Aufgrund der verschiedenen Messgeräte, mit denen die oben aufgeführten Ergebnisse der verschiedenen Autoren erzielt wurden, soll auf einen Vergleich der absoluten Höhe der Gleitreibungskoeffizienten auf den einzelnen Materialien verzichtet werden. Denn die einzelnen Einflussfaktoren wie beispielsweise die Messgerätspezifikationen oder die unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten an einer oder mehreren Messstellen im Stall auf die Höhe der Gleitreibungskoeffizienten können nicht quantifiziert werden. Diese Faktoren resultieren in einer hohen Varianz der Gleitreibungskoeffizienten, was einen Vergleich hinfällig macht. Vom Standpunkt der Gerätspezifikationen ließen sich die eigenen Ergebnisse am besten mit denen von MÜLLER (2003) vergleichen. Allerdings zieht er zur Beurteilung der Laufflächen die Auswertmethodik der Mittelwerte aus den höchsten 25,

20 und 15 Einzelmesswerten heran. Aufgrund dessen kommt er zu wesentlich höheren Gleitreibungskoeffizienten als die in der vorliegenden Arbeit auf vergleichbaren Belägen erzielten. Allerdings wurden in Tab. 28 nur diejenigen Ergebnisse aufgeführt, bei denen alle Einzelmesswerte zur Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten herangezogen wurden.

Die Ergebnisse der Autoren, die Griffigkeitsuntersuchungen mit dem im Straßenverkehrswesen genutzten SRT-Gerät durchführten, widersprechen den eigenen Ergebnissen hinsichtlich der Entwicklung der Rutschfestigkeit von Gussasphaltlaufflächen. WEBER (1985), HERRMANN (1997), REIMANN und FREIBERGER (1999) und MÜLLER (2003) stellten bei älteren Gussasphaltflächen eine geringere Rutschfestigkeit als bei neueren fest. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit belegen eine höhere Rutschfestigkeit bei den älteren Belägen. Dies wird durch die Ergebnisse der Topografiemessungen (vgl. Abschnitte 4.2 und 4.3) untermauert. Auf Basis der Topografiemessungen der alten Gussasphaltlaufflächen lässt sich für die geringere Rutschfestigkeit, ausgewiesen durch das SRT-Gerät, folgender Erklärungsansatz ableiten: Wie in den Abschnitten 4.2 und 4.3 dargestellt, sind ältere Gussasphaltlaufflächen leerer, grober und offener als neue. Aufgrund dieser geometrischen Eigenschaften steht wenig flächenhaftes Material, das eine hohe Bremswirkung und damit einen großen Reibenergieverlust erzeugen kann, zur Verfügung. Stattdessen wird die Bremswirkung lediglich durch die herausstehenden spitzen Splittsteine hervorgerufen, die den pendelnd aufgehängten, relativ harten Gummiklotz weniger abbremsen. Diese Annahmen werden durch DIN EN 13036-4 bestätigt, denn hier wird der Anwendungsbereich des SRT-Messverfahrens auf Flächen beschränkt, die nicht zu rau sind, da das Gerät vorwiegend zur Bewertung der Mikrorauheit geeignet ist (vgl. Abschnitt 2.3.2). Somit könnte das gute Abschneiden der Gussasphaltlaufflächen bei den genannten Autoren, die SRT-Messungen durchführten, auf die Schwächen des Messprinzips zurückzuführen sein.

In allen Fachdisziplinen, die sich Reibungsphänomenen widmen, ergeben sich aus den neueren Forschungsergebnissen zunehmend Einschränkungen der Coulomb'schen Reibungstheorie und dessen Reibungsgesetze (u. a. KUMMER, 1966; SOBIS, 1996). Die statische Auffassung der Reibung tritt in den Hintergrund und Reibungsphänomene werden nach jüngstem Stand der Erkenntnisse als lokale und zeitabhängige Phänomene von hoher Komplexität betrachtet (SOBIS, 1996). Hierbei müssen örtlich auftretende Druckverhältnisse ebenso beachtet werden wie Gleitgeschwindigkeit, Oberflächenveränderungen der Reibpartner durch Verschleiß und Abriebpartikelverlagerung sowie der Einfluss verschiedener Arten und Mengen von schmierend wirkenden Zwischenmedien (SOBIS, 1996; WAGNER, 1996; MANNING et al., 1998; KIM und SMITH, 2000; SCHRAMM, 2002; KIM, 2004a; KIM, 2004b). Darüber hinaus sind die Reibungsmechanismen unter verschmutzten oder nassen Bedingungen (Mischreibung) noch komplexer als im trockenen Zustand. Damit stellt sich die Gleitreibungsmessung als ein wesentlich schwierigerer Prozess dar als eine Kraftmessung mit definierter Belastung und Messgeschwindigkeit.

Grundsätzlich gilt, dass der Gleitreibungskoeffizient für eine bestimmte Materialpaarung nicht konstant ist, sondern vielmehr einen typischen Wert für eine Materialpaarung unter

ganz bestimmten Bedingungen annimmt (KRAGELSKI et al., 1983; CZICHOS und HABIG, 2003; KIM, 2004a). KIM (2004a) bezeichnet daher die Frage nach dem Gleitreibungskoeffizienten eines bestimmten Materials als unsinnig. Die Frage müsse vielmehr nach dem Gleitreibungskoeffizienten einer Materialpaarung unter definierten Bedingungen gestellt werden. Daher ist es eigentlich hinfällig, die Gleitreibungskoeffizienten einzelner Laufflächenmaterialien zu vergleichen, da die gemessenen Gleitreibungskoeffizienten lediglich unter den in Anhang 4 aufgeführten Umweltbedingungen gelten. Darüber hinaus beziehen sich die vorgestellten Ergebnisse ausschließlich auf die Materialpaarung Polyamidprüfscheibe mit einer Shore-D-Härte von 73 ± 1 °SD unter gewässerten Bedingungen auf den untersuchten Laufflächen mit einem Gleitreibungsmessgerät, dessen Spezifikationen in Abschnitt 3.1.2 aufgelistet sind. Durch die Verwendung eines Prüfkörpers mit geringerer Shore-D-Härte wären die Gleitreibungskoeffizienten vermutlich höher gewesen. Jedoch würde dies nicht zu Änderungen der aufgezeigten Zusammenhänge und den Veränderungen der Rutschfestigkeit auf den einzelnen Belägen im Laufe der Nutzungsdauer führen. Die Abhängigkeit der Höhe der Reibkomponenten von der Materialhärte zeigte auch FISCHLEIN (2000) bei Griffigkeitsuntersuchungen verschieden harter Reifenmischungen auf unterschiedlich rauen Fahrbahnen.

Die Betonung der Gültigkeit von Gleitreibungskoeffizienten verschiedener Materialpaarungen lediglich unter den angegebenen Messbedingungen in Verbindung mit dem genutzten Messgerät kommt bei den meisten Veröffentlichungen über Reibwertmessungen, insbesondere in landtechnischen Veröffentlichungen zu kurz. Stattdessen erfolgten Empfehlungen für Grenzwertsetzungen, ab denen Laufflächen für Tiere bestimmter Gewichts- und Nutzungsklassen als nicht mehr rutschsicher einzustufen sind (BÄHR und TÜRPIITZ, 1976; BÄHR et al., 1978; TGL 32456). Seither gilt ein Gleitreibungskoeffizient bei Laufflächen für Milchvieh in Höhe von $\mu G = 0,4$. Die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) verschiebt diesen Grenzwert ihrerseits in ihren Tests auf $\mu G = 0,45$, um eine größere Sicherheit zu gewährleisten (REUBOLD, 2004b; REUBOLD, 2004c). CIGR (2002) gibt einen optimalen Bereich der Mindestanforderung an Laufflächen von $\mu G = 0,33$ bis $0,5$ an. PHILLIPS und MORRIS (2001) kommen nach Tierbeobachtungen auf unterschiedlich rauen Prüfbelägen zu einem optimalen Gleitreibungskoeffizient in Höhe von $\mu G = 0,4$ bis $0,5$. VAN DER TOL et al. (2005) kritisieren, dass die meisten Mindestgleitreibungskoeffizienten, die durch Gleitreibungsmessungen erhalten wurden, nie validiert wurden und Beweise für die aufgestellten Grenzwerte, die ein Ausgleiten wirklich verhindern können, bis heute ausstünden. Dies deckt sich mit den Aussagen von MANNING und JONES (2001) für den Bereich der Arbeitssicherheit.

Tatsächlich stimmen die Aussagen, die anhand von Gleitreibungskoeffizienten über die Rutschfestigkeit von Laufflächen getroffen werden können, nicht zwangsläufig mit den Aussagen überein, die anhand von Tierbeobachtungen gemacht werden können. Sie repräsentieren nicht die tatsächliche Rutschfestigkeit in Form einer Quantifizierung des vorhandenen Ausgleitrisikos für die Tiere in der Praxis. So fanden BÄHR und TÜRPIITZ (1976), BÄHR et al. (1978) sowie PHILLIPS und MORRIS (2000) bei Gleitreibungsmessungen, dass nasse und vor allem verschmutzte Laufflächen rutschfester sind als trockene, was für die Praxis allerdings nicht zutrifft (vgl. Abschnitt 2.4.3). ALBUTT und DUME-

LOW (1987) sowie ALBUTT et al. (1990) zeigten, dass Kühe auf gülleverschmutzten Betonauflflächen verschiedener Herstellungsvarianten teilweise doppelt so weit rutschten wie auf den vergleichbaren trockenen Betonvarianten bzw. sogar teilweise viermal so weit wie auf Erdboden.

Aufgrund des Vergleichs der Ganggeschwindigkeit mit den Gleitreibungskoeffizienten, die auf verschieden rauhen Belägen oder auf solchen mit unterschiedlichen Verschmutzungsgraden ermittelt wurden, ist eine Ableitung bestimmter Mindestanforderungen an Böden ebenfalls problematisch (vgl. Abschnitt 2.1.2). PHILLIPS und MORRIS (2000), PHILLIPS und MORRIS (2001) sowie TELEZHENKO und BERGSTEN (2005) führten solche Untersuchungen mit Messgeräten durch, die nach verschiedenen Messprinzipien arbeiten, jedoch sind die ermittelten Gleitreibungskoeffizienten nicht direkt vergleichbar. Die empfohlenen Mindestanforderungen an die Rutschfestigkeit von Laufflächen in Form eines bestimmten Gleitreibungskoeffizienten können daher trotz Validierung durch Tierbeobachtungen voneinander abweichen. Es ist deshalb nur ein Ranking innerhalb einzelner Veröffentlichungen möglich und nur generelle Erkenntnisse (beispielsweise verschmutzte Böden sind rutschiger als trockene) sind auf andere Untersuchungen übertragbar, nicht aber die absolute Höhe des Gleitreibungskoeffizienten.

VAN DER TOL et al. (2005) näherten sich der Ermittlung der erforderlichen Rutschfestigkeit von Laufflächen mit einem anderen Ansatz. Sie ermittelten die auftretenden Kräfte an den einzelnen Extremitäten von Kühen mit einer Kraftmessplattform. Dabei wurden die auftretenden Kräfte bei typischen Situationen wie beispielsweise Flucht, Kurvengehen oder abruptem Stehenbleiben gemessen und anschließend die erforderlichen Gleitreibungskoeffizienten nach dem Prinzip $Aktio = Reaktio$ als Verhältnis von Normalkraft und Reibkraft berechnet. Dabei stellte sich heraus, dass die Rutschfestigkeit der getesteten Laufflächen außer beim einfachen Geradeausgehen nicht ausreichend ist. Für die o. g. Gangsituationen berechneten sie erforderliche Reibungskoeffizienten von 0,7 bis 0,85. Damit lagen diese deutlich höher als diejenigen, die mit Gleitreibungsmessungen auf vergleichbaren Flächen ermittelt wurden.

In diesem Zusammenhang muss die Frage nach der Relevanz von Mindestanforderungen hinsichtlich der Rutschfestigkeit bzw. Mindestgleitreibungskoeffizienten gestellt werden. Aus der Literatur der Fachgebiete Arbeitssicherheit und Tribologie gehen zur Festlegung von Mindestgleitreibungskoeffizienten von Böden und Schuhsohlen deutliche Aussagen hervor: KRAGELSKI et al. (1983) sowie CZICHOS und HABIG (2003) halten Reibwerttabellen mit bestimmten Reibpaarungen für wenig aussagekräftig. Sie böten daher wenig Orientierungshilfen für die Praxis. Denn die Höhe der ausgewiesenen Gleitreibungskoeffizienten sei von zu vielen Faktoren wie dem Messgerät, den Umweltbedingungen, unter denen sie ermittelt wurden sowie den Interaktionen zwischen den Reibpartnern selbst (Verschleiß und Oberflächenveränderungen) abhängig. Auch MANNING et al. (1998) erachten die Spezifikation und Festsetzung von Mindestwerten für Reibkombinationen aus Boden und Schuhsohlen mit Zwischenmedien als wenig sinnvoll, solange nicht bekannt ist, inwiefern Verschleiß die Oberflächen der Reibpartner beeinflusst. Darüber hinaus könnte, so die Autoren, jede Festsetzung von Mindestgrenzwerten für Gleitreibwerte unter

trockenen Bedingungen zu einer Erhöhung der Anzahl der Verletzungen bei Unfällen unter nassen Bedingungen führen, da diese Grenzwerte das tatsächliche Ausgleitrisiko unterschätzen. In einer späteren Veröffentlichung berichten MANNING und JONES (2001), dass ein niedrigster Wert, der Ausgleitunfälle tatsächlich verhindern könnte, derzeit nicht bekannt sei, denn er hänge von der Messmethode und den Messbedingungen ab. KIM (2004a) bezeichnet es als großes Risiko, die Rutschfestigkeit von Böden oder Schuhen anhand eines Wertes, dem Gleitreibungskoeffizient einzustufen. Denn ein einziger Wert sei nicht in der Lage, das Risiko des Ausgleitens zu quantifizieren.

Nach diesen Ausführungen liegt es nahe, dass eine Festsetzung von Mindestgleitreibungskoeffizienten für Laufflächen ebenfalls müßig ist, wenigstens solange es weder eine Festlegung einheitlicher Prüfbedingungen, noch ein Messgerät bzw. wenigstens grundlegende Anforderungen an die Genauigkeit und Spezifikationen des Messgerätes gibt, die hinsichtlich der wissenschaftlichen und praktischen Anforderungen an Messverfahren und -gerät für diese Messaufgabe national bzw. international anerkannt sind. Mit E DIN 51131 aus dem Bereich der Arbeitssicherheit, deren Spezifikationen bei der Konstruktion des für die eigenen Untersuchungen verwendeten Gleitreibungsmessgerätes maßgeblich waren, ist ein erster Schritt, wenigstens auf nationaler Ebene gemacht. Nichtsdestotrotz bleiben die Validitätsprobleme mobiler Messgeräte, die aus der mangelnden Gangsimulation resultieren, weiterhin bestehen. Gleitreibungsmessungen sind also nicht per se hinfällig. Die Rahmenbedingungen und Messgeräte bedürfen lediglich einer Vereinheitlichung, wodurch die Messergebnisse dann für Hersteller und Kunden kommunizierbar werden.

Für Untersuchungen der Rutschfestigkeit und deren Haltbarkeit vor Ort werden nach wie vor Messgrößen und praktische Messmethoden benötigt, mit deren Hilfe Bewertungen vorgenommen werden können. Aufgrund der beschriebenen Problematik erscheint die Verwendung des Haftreibungskoeffizienten als aussagefähige Messgröße wenig sinnvoll, zumal auch der Gleitreibungskoeffizient im Verlauf des Ausgleitvorgangs die wichtigere Größe ist (vgl. Abschnitt 2.3.2). Aber auch der Gleitreibungskoeffizient besitzt als Messgröße Unzulänglichkeiten, die sowohl von der Messtechnik als auch von der Berechnungsweise her rühren. Im Laufe der Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit stellte sich ein weiteres Manko des Gleitreibungskoeffizienten der untersuchten Reibpaarung Polyamidprüfscheibe-Laufflächen heraus. Dies ist insbesondere beim Vergleich der Rutschfestigkeit von Laufflächen von Bedeutung: Trotz augenscheinlich unterschiedlicher Oberflächenrauheit unterschieden sich die Gleitreibungskoeffizienten verschiedener Materialpaarungen nicht signifikant voneinander (vgl. Abschnitt 4.1.1). Das liegt daran, dass die Oberflächen der Beläge nicht genügend berücksichtigt werden bzw. unzureichend in die Messgröße Gleitreibungskoeffizient eingehen. Aufgrund der unterschiedlichen Verläufe der Gleitreibungskurve lag die Ableitung neuer Messgrößen aus der Gleitreibungskurve nahe, mit denen die auf verschiedenen Rauheitsverhältnissen der Belagsoberflächen basierenden Unterschiede quantifiziert werden können. So zeigten alte Laufflächen aus Gussasphalt bei gleichem Gleitreibungskoeffizienten einen deutlich unruhigeren Verlauf der Gleitreibungskurve als neue Beton- oder Spaltenböden (vgl. Abb. 39, Seite 126). Dies ist auf spitze, herausstehende Steine zurückzuführen. Damit der Prüfkörper samt Gewicht diese überfahren oder ihnen ausweichen konnte, war eine erhöhte Zugkraft notwendig,

was sich in einer vergleichsweise hohen Lage der lokalen Maxima äußerte. Waren die Steine überwunden, fiel der Zugkraftbedarf schlagartig entsprechend weit ab und stieg wieder an, sobald der Prüfkörper erneut an einem Stein an- oder aufkantete. Somit lassen sich die hohen arithmetischen Spitze-Spitze Werte erklären. Diese wurden umso größer, je rauer die Laufflächen waren. Für alle untersuchten Laufflächen konnte folgende Aussage gemacht werden: Je rauer die Laufflächen, desto höher der arithmetische Spitze-Spitze Wert und desto niedriger die Anzahl positiver Amplituden. Allerdings war es auch mit den beiden neu definierten Kenngrößen alleine nicht möglich, alle Beläge, die sich hinsichtlich des Gleitreibungskoeffizienten nicht signifikant voneinander unterschieden, eindeutig zu differenzieren. Sie boten aber die Möglichkeit, die 18 untersuchten Laufflächen unter Verwendung aller Kenngrößen der Gleitreibungsmessung zu unterscheiden. Teilweise unterschieden sich die Klassen nur durch den arithmetischen Spitze-Spitze Wert und die Anzahl positiver Amplituden signifikant voneinander (vgl. Tab. 22, Seite 130).

Anhand der neu definierten Messgrößen arithmetischer Spitze-Spitze Wert μ_{ssa} und der Anzahl positiver Amplituden NPA ergänzend zum Gleitreibungskoeffizienten lassen sich Laufflächen vor Ort differenzierter beurteilen. Sie liefern bereits durch die Gleitreibungsmessung ergänzende Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit der Laufflächen (nur indirekt, nicht direkt wie die Topografiemessung). Dies wird durch gute Korrelationen mit verschiedenen 3D-Oberflächenkenngrößen aus der Topografiemessung bestätigt (vgl. Abschnitt 4.3).

5.3 Einordnung der Ergebnisse aus der Topografiemessung

Prinzipiell weisen Laufflächen, je nach Belag und Zustand, ähnliche Texturbereiche auf wie Fahrbahndecken. Daher hätten zur Charakterisierung der Oberflächentextur theoretisch auch die aus dem Straßenverkehrswesen standardisierten und in DIN EN 13036-1, DIN EN 13036-3 und DIN EN ISO 13473-1 genormten Kenngrößen verwendet werden können. Da die Topografien berührungslos vermessen werden sollten, kamen die Kenngrößen aus DIN EN 13036-1 und DIN EN 13036-3 nicht in Frage, da diese nach dem Sandfleckverfahren bzw. mit dem Ausflussmesser ermittelt werden (vgl. Abschnitt 2.3.2). Nach DIN EN ISO 13473-1 können die Kenngrößen mittlere Profiltiefe (MPD) und die geschätzte Profiltiefe (ETD) auch mit optischen Profilometern erfasst werden. SCHRAMM (2002) stellte jedoch fest, dass die Unterschiede in der Höhe des Gleitreibungskoeffizienten in seinen Untersuchungen auf verschiedenen rauen Fahrbahnen mit der in DIN EN 13036-1 und DIN EN ISO 13473-1 genormten mittleren Profiltiefe (MPD) allein nicht zu erklären waren. Er berichtet weiter, dass auch eine Korrelationsanalyse mit den Parametern aus DIN EN ISO 13565 und DIN EN ISO 4287 keinen direkten Einfluss auf den Fahrbahnreibwert zeigte. BREUER und BAIERL (1991) kamen zu dem Ergebnis, dass zwischen Rautiefenmessung und Gleitreibungskoeffizienten praktisch kein Zusammenhang zu erkennen war. DAMES und LINDNER (1989) berichten von Untersuchungen über die Verringerung des Reibungswiderstandes im Zusammenhang mit den Endpolierwerten verschiedener Gesteinsarten, die typischerweise im Straßenbau eingesetzt werden.

Es wurde geprüft, ob die Veränderung an den Rauheitselementen der Prüfkörper in Form der Glättung des Feinprofils durch Polieren mit der Poliermaschine nach Wehner/Schulze anhand von Rauheitskenngrößen beschreibbar ist. Dafür wurden verschiedene Prüfkörper vor und nach der Polierprozedur mit einem Tastschnittgerät vermessen und die Kenngrößen nach DIN 4768 ermittelt. Als Ergebnis stellten die Autoren fest, dass mit keiner dieser Kenngrößen ein hinreichender Zusammenhang mit den gemessenen Polierkenngrößen gefunden werden konnte. Auch WIEDER (1988), SOBIS (1996), WAGNER (1996), POPP et al. (1999) und NEUDECKER et al. (2001) bestätigen, dass die genormten Oberflächenkenngrößen, die aus zweidimensionalen Profilschnitten ermittelt werden, nicht oder nur bedingt in der Lage sind, funktionale Aussagen zu den tribologischen Eigenschaften von Materialien zu machen. Als Beispiel hierfür sei der arithmetische Mittenrauwert R_a im Falle der 2D-Auswertung genannt. In der vorliegenden Arbeit wurde zwar auch der arithmetische Mittenrauwert für die gesamte Messfläche (also im 3D-Fall) ermittelt und dargestellt, laut SOBIS (1996) mittelt diese Kenngröße die Messwerte allerdings zu stark. Infolge dessen gehen wertvolle Informationen über die geometrischen Oberflächeneigenschaften verloren (SOBIS, 1996; STAEVES, 1998). Gleiches gilt auch für den quadrierten Mittenrauwert (STAEVES, 1998). STAEVES (1998) berichtet, dass der R_a -Wert in der von ihm ausgewerteten Literatur als eine der am wenigsten aussagefähigen Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächeneigenschaften gilt. Denn diese Kenngröße in Verbindung mit einer 2D-Messung sei nicht in der Lage, eine Oberfläche eindeutig zu beschreiben. So können beispielsweise Oberflächen mit völlig verschiedenen geometrischen Oberflächeneigenschaften identische R_a -Werte haben (SOBIS, 1996). Darüber hinaus können die mit taktilen und optischen Messgeräten ermittelten Ergebnisse dieser Oberflächenkenngrößen trotz Normung in der Regel nur begrenzt miteinander verglichen werden. (NEUDECKER et al., 2001). Denn die Messprinzipien, Gerätespezifikationen und Filteralgorithmen unterscheiden sich teilweise deutlich.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden die Laufflächen ausschließlich dreidimensional vermessen und ausgewertet. Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit erschien jedoch nur ein funktioneller Ansatz mit entsprechenden Oberflächenkenngrößen sinnvoll, der die Interaktionen zwischen den Reibpartnern bei Anwesenheit eines Schmiermediums berücksichtigt. Mit dem mechanisch-rheologischen Modell aus der Umformtechnik (vgl. Abschnitt 2.2.2) konnte ein schlüssiger Modellansatz theoretisch auf das System Klaue – Zwischenmedium – Lauffläche übertragen werden. Der Vorteil dieses Modells liegt in den daraus abgeleiteten funktionalen Oberflächenkenngrößen, die auf einer dreidimensionalen Vermessung und Auswertung der Topografien basiert (vgl. Abschnitte 2.2.2 und 2.5.4). Diese sind zwar noch nicht genormt und es bestehen, je nach Veröffentlichung, bisweilen Diskrepanzen in der Nomenklatur und der Berechnung der Kenngrößen, jedoch erschienen diese Kenngrößen in Verbindung mit dem Ansatz des mechanisch-rheologischen Modells vielversprechend zu sein. Eine allgemeine Anwendung der 3D-Messgrößen, die von den genormten Rauheitskenngrößen abgeleitet wurden („S“-Kenngrößen) und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Anwender ist allerdings ebenfalls nicht gegeben (PESTORF, 1997), da noch keine genormte Messvorschrift für die Größe der Auswertungsfläche, die Filterung und die Auflösung vorliegt.

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass der Vergleich absoluter Höhen von Rauheitskenngrößen ebenfalls hinfällig ist. Dies liegt zum einen an unterschiedlichen Messgeräten und Berechnungsvorschriften, zum anderen aber auch an sehr hohen Streuungen in der Oberflächenbeschaffenheit der Beläge. Selbst wenn die Böden aus dem selben Material, die Mischungen aus den selben Bindemitteln, Sieblinien und Zuschlagsstoffen bestünden, wäre eine Vergleichbarkeit dennoch nicht gegeben, da sich nicht nachvollziehen ließe, inwieweit sich differierende Ergebnisse auf Unterschiede in der Mess- und Auswertungstechnik zurückführen lassen oder wirklich von den Belägen ausgehen. Ein Vergleich wäre außerdem prinzipiell nur bei genormten Oberflächenkenngrößen denkbar. Diese wurden allerdings im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich anhand ganzer Messflächen und nicht an Einzelprofilen ermittelt. Die Datengrundlagen sind aufgrund dessen völlig verschieden und somit nicht vergleichbar. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt auf den Ergebnisvergleich mit anderen Autoren verzichtet. Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher lediglich auf die Interpretation der von den verschiedenen Kenngrößen ausgewiesenen Veränderungen. In Abschnitt 5.3 werden dann die in der eigenen Untersuchung gefundenen Zusammenhänge mit jenen anderer Autoren verglichen.

Wie in Abschnitt 4.2.2 aufgezeigt, liefern verschiedene Messgrößen für das selbe Oberflächenmerkmal unterschiedlich hohe Werte, was letztendlich zur Ausweisung qualitativ unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften führte. Als Konsequenz ergaben sich Interpretationsschwierigkeiten und teilweise widersprüchliche Aussagen der Kenngrößen hinsichtlich ein und des selben Oberflächenmerkmals. Die Vor- und Nachteile vieler Oberflächenkenngrößen in der Blechverarbeitung sind jedoch noch nicht bekannt (STAEVES, 1998). Dies trifft auch im Hinblick auf die bearbeitete Aufgabenstellung zu. Es können aus diesem Grund nur Vermutungen hinsichtlich der Vorzüglichkeit verschiedener Oberflächenkenngrößen zur Beschreibung der Veränderungen der Topografieeigenschaften von Laufflächen angestellt werden. Für die Entwicklung der Oberflächeneigenschaften der verschiedenen Laufflächenmaterialien bedeutet dies:

Gussasphalt: Alle Kenngrößen der Leere in Form der Volumenkenngößen zeigten im Alter um ein Vielfaches höhere Werte als im Neuzustand. Dies deutet auf eine erhebliche Zunahme des Leeregrades der Topografien hin (vgl. Tab. 6, Seite 75). Gleichzeitig konnte eine Abnahme aller Flächenkenngrößen festgestellt werden. In Verbindung mit zunehmenden Volumina wurden die Oberflächenstrukturelemente größer. Die Topografien alter Gussasphaltbeläge waren also grober als neue (vgl. Tab. 6, Seite 75). Zwischen den Altersklassen bei den Gussasphaltbelägen zeigten alle Kenngrößen der Abgeschlossenheit jeweils einen signifikanten Unterschied. Insbesondere die Kenngrößen, welche die Lage des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils quantifizieren, zeigten, dass dieser auf alten Belägen vergleichsweise tiefer in der Topografie lokalisiert war. Dies und ein geringerer geschlossener Leerflächenanteil sprechen dafür, die alten Gussasphaltlaufflächen, verglichen mit den neuen, als offener zu bezeichnen (vgl. Tab. 6, Seite 75). Alle genannten Änderungen waren signifikant.

Beton: Die ausgewiesenen Änderungen in den Kenngrößen waren bis auf jene in der maximalen Anzahl Materialflächen und in der maximalen Anzahl geschlossener Leerflächen nicht signifikant (vgl. Abb. 42, Seite 136, Abb. 43, Seite 137 und Abb. 47, Seite 141). Das bedeutet, es konnte lediglich eine signifikante Änderung des Oberflächenmerkmals Feinheit festgestellt werden. Demnach wurden Betonlaufflächen im Alter feiner. Die einzelnen Volumina wiesen im alten und neuen Zustand keine signifikanten Unterschiede auf, während die maximalen Anzahlen der oberflächenbestimmenden Einzelflächen teilweise gleich blieben bzw. meist zunahmen. Bei gleichbleibenden Volumina und gleichzeitiger Konstanz bzw. Zunahme der maximalen Anzahl der Einzelflächen, wurden die Strukturelemente kleiner und die Oberfläche somit feiner.

Spaltenboden: Auf diesen Belägen zeigten sich weder im Materialvolumen noch im offenen Leervolumen signifikante Änderungen (vgl. Abb. 42, Seite 136). Zwar konnten signifikante Änderungen im geschlossenen Leervolumen festgestellt werden (vgl. Abb. 42, Seite 136). Wird berücksichtigt, dass auch in allen vertikalen Kenngrößen der Leere auf Spaltenboden zwischen den Altersklassen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden konnte (vgl. Abb. 41, Seite 132), kann davon ausgegangen werden, dass sich die Spaltenböden im Merkmal Leere nicht signifikant veränderten. In allen Kenngrößen der Feinheit (maximale Anzahl verschiedener Flächen) wurden signifikante Unterschiede nachgewiesen (vgl. Abb. 43, Seite 137), was eine Zunahme des Merkmals Feinheit, bedingt durch die Nutzungsdauer, bedeutet. Zur Deutung der Aussagen der verschiedenen Messgrößen zur Beschreibung des Oberflächenmerkmals Abgeschlossenheit müssen hier bei der Aussagekraft einiger Kenngrößen Einschränkungen gemacht werden (vgl. Tab. 19, Seite 117): Die Kenngröße geschlossenes Leervolumen zeigte auf alten Spaltenböden signifikant höhere Werte als auf neuen. Demnach wären alte Spaltenböden als offener anzusprechen. Wird die Aussagefähigkeit des geschlossenen Leervolumens unter Berücksichtigung der gleichzeitigen Änderungen der Topografietiefe betrachtet und berücksichtigt, dass sich dieses Volumen zwangsläufig durch die weiteren Integrationsgrenzen vergrößert, liegt die Annahme nahe, dass diese Kenngröße eine höhere Aussagekraft zur Beschreibung des Merkmals Leere als für das Merkmal Abgeschlossenheit besitzt. Eine gegenteilige Aussage machte die Kenngröße maximale Anzahl geschlossener Leerflächen. Ihr zufolge waren alte Spaltenböden signifikant geschlossener als neue. Aufgrund des Umstandes, dass diese Kenngröße sowohl die Feinheit als auch die Abgeschlossenheit einer Topografie beschreibt (vgl. Tab. 19, Seite 117), kann vermutet werden, dass ihre Aussagefähigkeit zur treffsicheren Beschreibung des Oberflächenmerkmals Abgeschlossenheit infolge der gleichzeitigen Beschreibung zweier verschiedener Merkmale als geringer einzuschätzen ist als diejenige einer Kenngröße, die ausschließlich zur Quantifizierung der Abgeschlossenheit dient (c_{clm} oder γ_{clm}). Darüber hinaus steht sie den anderen beiden Kenngrößen maximale Anzahl Materialflächen und maximale Anzahl offener Leerflächen prinzipiell näher und scheint somit zur Beschreibung der Feinheit besser geeignet als zur Beschreibung der Abgeschlossenheit. Da die beiden Varianten der Kenngröße Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil und auch der maximale Anteil geschlossener Leerflächen α_{clm} selbst keine signifikanten Unterschiede auswiesen (vgl.

Abb. 47, Seite 141), kann davon ausgegangen werden, dass sich Spaltenböden ebenso wie Beton nicht im Grad der Abgeschlossenheit während der Nutzungsdauer verändern.

5.4 Zusammenhänge zwischen Gleitreibungsmessung und Topografiemessung

Bei der Beurteilung von Kenngrößen zur Beschreibung von Laufflächen und den Zusammenhängen zwischen diesen verschiedenen Kenngrößen ist die Kenntnis der Natur ihrer Aussage aufgrund ihres Messverfahrens (direkte oder indirekte Messgrößen) und der Probleme bei ihrer Ermittlung wichtig. Dies ist insbesondere bei der Einordnung und Interpretation der Ergebnisse wichtig, da die Streuung der Messwerte aus den beiden unabhängigen Messverfahren Gleitreibungsmessung und Topografiemessung sowohl innerhalb der verschiedenen Messstellen in einem Stall als auch innerhalb einer Material- und Altersklasse teilweise sehr hoch waren. Von großen Streuungen solcher Messgrößen auf Fahrbahnabschnitten berichten ebenfalls VAN DER SLUIS et al. (2002) und XIE (2002) in ihren Untersuchungen. XIE (2002) betont, dass die Oberflächentextur von Fahrbahnen in großem Maße wegabhängig und daher eine genaue mathematische Beschreibung der Fahrbahntextur in Abhängigkeit vom Weg nicht möglich sei. Eine Beschreibung sei nur mittels einer Methode analog zur Frequenzanalyse möglich, um die Erfassung der Fahrbahntextur mittels statistischer Methoden zu ermöglichen. SCHULZE (1979) kritisiert Rauheitskenngrößen verschiedener Messverfahren aus dem Straßenbau oder dem Maschinenwesen, da diese keine zufriedenstellenden Zusammenhänge mit den ermittelten Gleitreibungskoeffizienten aufzeigen könnten. Er führt als ein Beispiel die Ermittlung der Rautiefe nach dem Sandfleckverfahren an. Bei der Gegenüberstellung der ermittelten Rautiefen und der auf diesen Flächen ermittelten Gleitreibungskoeffizienten bestünde nur ein loser Zusammenhang. Im Durchschnitt gelte zwar, je höher die Rautiefe, desto höher der Gleitreibungskoeffizient, jedoch bedeuteten solche Aussagen wenig angesichts der hohen Streuung um die Regressionsgerade. Als Gründe hierfür nannte er, dass das Sandfleckverfahren oder ähnliche einfache Rauheitskenngrößen (z. B. auch genormte) nicht den unterschiedlichen Schärfegrad der Oberflächen bewerteten. Außerdem ging die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Rauheitselemente in solche einfachen Kenngrößen nicht ein. Nur mit zusammengesetzten Rauheitskenngrößen, die auch die Dichte der Aufeinanderfolge der Rauheitselemente berücksichtigten und die Oberflächenmerkmale durch Parameter statistischer Verteilung beschrieben, gelänge es, die Streuung um die Regression beim Vergleich mit der zugeordneten Griffigkeit zu verringern und das auch nur in Grenzen. Diese Grenzen zeigten sich im Zuge der vorliegenden Arbeit sehr deutlich. Aufgrund der hohen Messwertstreuungen war die von SCHULZE (1979) und XIE (2002) vorgeschlagene Beschreibung der Rauheitsverteilungen mittels statistischer Methoden und Verteilungsfunktionen einzelner Material- und Belagsklassen der Laufflächen nicht möglich, denn die meisten Oberflächenmessgrößen sind in hohem Maße von der Messstelle abhängig (CHANG, 1999). Einziges Mittel, um dieses Problem einzugrenzen, sind mehrere Messungen an verschiedenen Messstellen, um repräsentative Werte zu erhalten (CHANG, 1999).

Rauheit ist auf vielfältige Art und Weise definierbar, die Aufgabe besteht jedoch darin, diejenigen Rauheitsmerkmale zu erkennen und in Kenngrößen zu fassen, die für das betrachtete Gebrauchsverhalten wesentlich sind (SCHULZE, 1979). Angesichts der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand die Aufgabe darin, die für die Rutschfestigkeit von Stallböden relevanten Oberflächenkenngrößen zu selektieren. Hierzu muss einschränkend angemerkt werden, dass sich die zu selektierenden Kenngrößen auf die Zusammenhänge zwischen einer, in ihrer Härte einer Kuhklaue ähnlichen Polyamidprüfscheibe und gewässerten Laufflächen verschiedener Materialien beziehen.

Aus der Literatur geht hervor, dass die besten Zusammenhänge in Form von hohen Korrelationskoeffizienten zwischen Oberflächenrauheit und Reibungsphänomenen aus funktionellen Ansätzen hervorgehen, die auf ein bestimmtes Gebrauchsverhalten abzielen. Konsequenterweise müssen bei den Untersuchungen der Rutschfestigkeit von Laufflächen die direkten Kontaktbedingungen an den Berührungsflächen zwischen den Rauheitselementen des Bodens und der Klaue unter Berücksichtigung der tatsächlich wirkenden Kräfteverhältnisse während verschiedener Bewegungssituationen des Rindes im Mittelpunkt des Interesses stehen. Untersuchungen hierzu wurden von DE BELIE und ROMBAUT (2003) sowie VAN DER TOL et al. (2005) unter Verwendung von Druckfolien bzw. Kraftmessplattformen vorgestellt. Auch FISCHLEIN (2000) berichtet von Untersuchungen der effektiven Berührungsflächen zwischen Reifen und Fahrbahn. Vor diesem Hintergrund sind auch die auftretenden Reibungskräfte mit ihren Komponenten (Adhäsion und Hysterese) zu betrachten, die durch die unterschiedlichen Rauheits- und Härteverhältnisse zwischen den Reibpartnern bei Anwesenheit eines Zwischenmediums hervorgerufen werden. KIM und SMITH (2002), KIM (2004a) und KIM (2004b) gehen noch einen Schritt weiter und betonen, dass sich infolge von Gleitreibungsmessungen die Oberflächenrauheit beider Reibpartner verändert. Dies ist prinzipiell auch bei Kuhklauen in Form des Klauenabriebs zutreffend. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache präsentiert KIM (2004a) und KIM (2004b) ein neues Tribologiekonzept, bei dem die Rauheitsveränderungen der Reibpartner durch einen Formschlussindex quantifiziert werden und dies den ermittelten Gleitreibungskoeffizienten gegenüber gestellt wird. Er konnte dieses Konzept anhand zufriedenstellender Korrelationskoeffizienten validieren.

Wie bereits in vorigen Abschnitten beschrieben, schien die theoretische Übertragung des mechanisch-rheologischen Modells unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen eine konsequente Weiterentwicklung dieser Betrachtungsweise zu sein. Dieses Modell lieferte 3D-Oberflächenkenngrößen, die zumindest in der Blechumformung auf deterministischen Oberflächen von Feinblechen ihre Funktionsrelevanz bereits unter Beweis gestellt hatten (SOBIS, 1996; WAGNER, 1996; PESTORF, 1997; STAEVES, 1998). Hier konnten verschieden texturierte Feinbleche beispielsweise anhand der Material- und Leerflächenanteilkurven charakterisiert werden. Allerdings sind die Einwände von SCHULZE (1979) berechtigt: Er betont, dass es nicht zu erwarten sei, dass sich Rauheitsmessgrößen, die in Bezug auf ein bestimmtes Gebrauchsverhalten von Oberflächen geeignet sind, auch hinsichtlich eines anderen Gebrauchsverhaltens andersartiger Oberflächen als ebenso geeignet erweisen. Aus dem Bereich der Verkehrs- oder Arbeitssicherheit sind keine Untersuchungen der Beschreibung der Fahrbahn oder Bodenbeläge mittels funktioneller 3D-

Kenngrößen bekannt, die eine funktionsrelevante Quantifizierung in Materialflächen und Leerflächen ermöglicht und dadurch die effektiven Berührungsflächen der Reibpartner beschreibt.

Zur Überprüfung, ob die aus dem mechanisch-rheologischen Modell abgeleiteten Oberflächenkenngrößen sich ebenfalls zur Quantifizierung bestimmter geometrischer Oberflächeneigenschaften von Laufflächen eignen und ob sich bestimmte Oberflächeneigenschaften auf die Höhe der in der Gleitreibungsmessung ermittelten Kenngrößen auswirken, wurden die verschiedenen Kenngrößen der beiden Messverfahren einander in Abschnitt 4.3 gegenübergestellt und Korrelationskoeffizienten ermittelt. Zuerst sollen die gefundenen Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Leere und den Kenngrößen der Gleitreibungsmessung diskutiert werden. Anschließend wird auf die Oberflächenmerkmale Feinheit und Abgeschlossenheit eingegangen. Hierbei wird aus den bereits ausgeführten Gründen nicht mehr auf die Zusammenhänge zwischen dem Haftreibungskoeffizienten und verschiedenen Oberflächenkenngrößen eingegangen. Des weiteren erfolgt eine Betrachtung der Korrelationskoeffizienten, die von anderen Autoren zwischen verschiedenen Oberflächenkenngrößen und dem Gleitreibungskoeffizienten ermittelt wurden. Dabei liegt das Augenmerk jedoch lediglich auf Korrelationen zwischen dem Gleitreibungskoeffizienten und denjenigen Oberflächenkenngrößen, die auch im Rahmen der eigenen Untersuchungen ermittelt wurden.

Der Zusammenhang zwischen den vertikalen Oberflächenkenngrößen der Leere und dem Gleitreibungskoeffizient war auf allen Laufflächenmaterialien hoch bis höchst signifikant, wobei die höchsten Korrelationskoeffizienten mit Ausnahme bei den Laufflächen aus Gussasphalt mit der Kenngröße Topografietiefe festzustellen waren (vgl. Tab. 26, Seite 148). Auf Beton- und Spaltenböden betragen die Korrelationskoeffizienten $r = 0,46$ bzw. $r = 0,65$, auf Gussasphaltpöden war der Korrelationskoeffizient zwischen der Topografietiefe und dem Gleitreibungskoeffizienten mit $r = 0,47$ geringfügig niedriger als zwischen der reduzierten Spitzenhöhe und dem Gleitreibungskoeffizienten mit $r = 0,50$. Dabei sei jedoch auf die sehr hohen Streuungen der Werte um die Regressionsgeraden aufmerksam gemacht, die entsprechend der Rauheit der Flächen in der Reihenfolge Gussasphalt, Beton, Spaltenboden abnahmen (vgl. Abb. 48, Seite 146). Die Korrelationskoeffizienten zwischen dem arithmetischen Mittenrauwert S_a und dem Gleitreibungskoeffizienten war mit $r = 0,54$ auf Spaltenböden am höchsten und mit $r = 0,37$ auf Betonlaufflächen am geringsten. Eine Mittelstellung nahmen die Beläge aus Gussasphalt mit $r = 0,42$ ein.

CHANG (1999) gibt durchschnittliche Korrelationskoeffizienten zwischen den verschiedenen Oberflächenmessgrößen und den Reibungsindices an, die auf Basis der Reibzahlmessungen mit vier verschiedenen Reibzahlmessgeräten auf unterschiedlich rauen Fliesen ermittelt wurden. Unter nassen Bedingungen gab er einen Korrelationskoeffizienten zwischen dem arithmetischen Mittenrauwert R_a und dem Reibungsindex in Höhe von $r = 0,451$. Der Korrelationskoeffizient mit der Kernrauheit R_k betrug $r = 0,491$ und der mit der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} $r = 0,498$. Diese Kenngrößen zeigten von allen untersuchten die höchsten Zusammenhänge mit den Reibungsindices. Unter trockenen Bedingungen lagen die Korrelationskoeffizienten für die aufgeführten Größen etwas niedriger. Außer-

dem fand er einen linearen Anstieg des Korrelationskoeffizienten zwischen den Oberflächenmessgrößen und dem Rauheitsindex in Abhängigkeit von der Anzahl der Einzelrauheitsmessungen. Der Effekt der Anzahl der Einzelrauheitsmessungen auf die Höhe des Korrelationskoeffizienten war jedoch nicht signifikant.

KIM und SMITH (2000) berichten von Korrelationskoeffizienten, die sie aus Untersuchung zum Einfluss der Oberflächenrauheit von Blech- und Plexiglasoberflächen auf die Rutschfestigkeit von Schuhsohlen verschieden harter Materialien durchführten. Alle Datenerhebungen erfolgten unter sauberen und trockenen Bedingungen. Die Korrelationskoeffizienten zwischen dem arithmetischen Mittenrauwert R_a und dem Gleitreibungskoeffizienten auf unterschiedlich rauen Metalloberflächen betragen in zwei aufeinander folgenden Messreihen: weiche Sohle aus PU: $r = 0,743$ bzw. $r = 0,947$, mittelharte Sohle aus PVC: $r = 0,953$ bzw. $r = 0,931$, harte Sohle aus Nitrilkautschuk: $r = 0,990$ bzw. $r = 0,977$.

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten zwischen den Reibzahlen und den verschiedenen Oberflächenkenngrößen der vorliegenden Arbeit mögen im Vergleich zu jenen von KIM und SMITH (2000) niedrig erscheinen, diejenigen von CHANG (1999) liegen im Bereich der eigenen Ergebnisse. Es sei jedoch nochmals darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit aufgrund der bereits dargestellten Punkte nicht direkt mit denen der genannten Autoren vergleichbar sind.

Die aus dem mechanisch-rheologischen Modell abgeleiteten Oberflächenkenngrößen der Leere zeigten auf allen Laufflächenmaterialien hoch bis höchst signifikante Korrelationskoeffizienten bei der Gegenüberstellung mit dem Gleitreibungskoeffizienten (vgl. Tab. 27, Seite 153). Hierbei war die Korrelation mit dem offenen Leervolumen auf Spaltenboden mit $r = 0,62$ am größten und auf Beton mit $r = 0,43$ am geringsten. Gussasphalt nahm mit $r = 0,52$ eine Mittelstellung ein. Die Zusammenhänge, welche die vertikalen Oberflächenkenngrößen aufzeigten, wurden bestätigt. Die Reihung der Messwertstreuung auf den verschiedenen Materialien war ebenfalls die gleiche wie bei den vertikalen Oberflächenkenngrößen.

Deutlich höhere Korrelationskoeffizienten sowohl mit den vertikalen als auch mit den aus dem mechanisch-rheologischen Modell abgeleiteten Oberflächenkenngrößen der Leere zeigten die beiden neu definierten Kenngrößen der Gleitreibungsmessung (vgl. Tab. 24, Seite 134 und Tab. 27, Seite 153). Auf Gussasphaltbelägen zeigten alle vertikalen Kenngrößen der Leere Korrelationskoeffizienten mit dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert zwischen $r = 0,73$ und $0,80$, wobei der Zusammenhang mit der Topografietiefe am größten war. Auf Betonlaufflächen bewegten sich die Korrelationskoeffizienten zwischen $r = 0,58$ und $0,79$. Auch auf diesem Material war die Topografietiefe diejenige Kenngröße mit der größten Aussagekraft. Bei Spaltenboden bewegten sich die Korrelationen mit $r = 0,39$ bis $0,58$ auf einem niedrigeren Niveau als auf den beiden anderen Belagsmaterialien. Der größte Zusammenhang zwischen Leere und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert wurde auch hier von der Topografietiefe ausgewiesen. Die Höhe der Zusammenhänge zwischen den vertikalen Oberflächenkenngrößen der Leere und der Anzahl positiver Amplituden in Form der Korrelationskoeffizienten betragen auf Gussasphalt zwischen $r = -0,44$ und $-0,52$, auf Beton zwischen $r = -0,52$ und $-0,70$ und auf Spaltenboden zwischen $r = -0,38$

und -0,60, wobei bis auf Gussasphalt die Topografietiefe wiederum die höchsten Zusammenhänge auswies. Bei den aus dem mechanisch-rheologischen Modell abgeleiteten Oberflächenkenngrößen der Leere bewegte sich die Höhe der ermittelten Korrelationskoeffizienten in ähnlichen Bereichen (vgl. Tab. 27, Seite 153). Auffällig war, dass die Korrelationen mit zunehmender Rauheit der Laufflächen prinzipiell anstiegen, wodurch diese Kenngrößen insbesondere auf rauen Laufflächen ergänzende Informationen zum Gleitreibungskoeffizienten liefern. In Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 wurde festgestellt, dass Gussasphaltlaufflächen im Alter eine signifikant größere Leere aufwiesen, Beton- und Spaltenböden hingegen keine signifikanten Änderungen der Leere zeigten. Es kann somit behauptet werden, dass die beiden neu definierten Kenngrößen einen Beitrag leisten, die Rutschfestigkeit und die mögliche Abrasivität insbesondere rauer Beläge differenzierter zu beurteilen.

Signifikante Änderungen hinsichtlich der Feinheit zwischen neuen und alten Laufflächen wurden bei allen drei Materialien festgestellt. Diese waren von unterschiedlicher Natur. Während Gussasphaltböden nach fortgeschrittener Nutzungsdauer signifikant grober waren, wurden Beton- und Spaltenböden signifikant feiner. Bei zweidimensionalen Messungen und Auswertungen gibt es zur Quantifizierung der horizontalen Ausdehnung der Rauheitselemente die Kenngrößen Spitzenzahl R_{Pc} und mittlere Breite der Profilelemente R_{Sm} (vgl. Tab. 8, Seite 83). Diese standen in der genutzten, modifizierten WinSAM-Version für eine Flächenauswertung nicht zur Verfügung. Hierfür hätte es einer Programmierung neuer Algorithmen und der Implementierung dieser Kenngrößen bedurft, was nur durch einen höheren Zeit- und Kostenaufwand zu realisieren gewesen wäre. Diese neuen Kenngrößen hätten sicher sehr hilfreiche Informationen geliefert.

Bis auf eine Ausnahme auf Spaltenboden waren zwischen allen Kenngrößen der Feinheit teilweise deutlich höhere Korrelationskoeffizienten zwischen den verschiedenen Oberflächenkenngrößen und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert bzw. der Anzahl positiver Amplituden zu konstatieren als zwischen den einzelnen Kenngrößen und dem Gleitreibungskoeffizienten (vgl. Tab. 27, Seite 153). Die Korrelationen mit dem Gleitreibungskoeffizienten stiegen allerdings mit zunehmender Rauheit der Laufflächen in der Reihenfolge Gussasphalt, Beton, Spaltenboden. Gleichzeitig stiegen die Korrelationen mit der Anzahl positiver Amplituden in der gleichen Reihenfolge, während eine eindeutige Aussage in diesem Zusammenhang für den arithmetischen Spitze-Spitze Wert nicht gemacht werden konnte. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Feinheit mit abnehmender Rauheit einen höheren Einfluss auf die Rutschfestigkeit bekommt.

Die Aussagen der verschiedenen Kenngrößen zur Beschreibung der Abgeschlossenheit warfen gewisse Schwierigkeiten bei der Interpretation auf (vgl. Abschnitte 4.2.2 und 5.3). Unter Berücksichtigung einiger Limitationen bestimmter Oberflächenkenngrößen (geschlossenes Leervolumen V_{cl} und maximale Anzahl geschlossener Leerflächen N_{clm}) wurden anhand des maximalen geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm} , der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil c_{clm} und der bezogenen Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil γ_{clm} folgende Aussagen getroffen (vgl. Abschnitt 5.3): Alter Gussasphalt war nach fortgeschrittener Nutzungsdauer offener, Beton-

und Spaltenböden zeigten keine signifikante Änderung der Abgeschlossenheit. Das Oberflächenmerkmal Abgeschlossenheit, quantifiziert durch den maximalen geschlossenen Leerflächenanteil α_{clm} zeigte auf keinem der untersuchten Laufflächenmaterialien eine signifikante Korrelation mit dem Gleitreibungskoeffizienten. Dies war angesichts des verwendeten Prüfkörpers mit Tragrand, der zur Gleitreibungsmessung verwendet wurde, zu erwarten. Auf Gussasphalt waren die Zusammenhänge je nach Belagsmaterial verschieden und auch von unterschiedlicher Signifikanz (vgl. Tab. 27, Seite 153). Hier betragen die Korrelationskoeffizienten zwischen dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil α_{clm} und dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert bzw. der Anzahl positiver Amplituden $r = -0,59$ bzw. $r = 0,39$, auf Beton $r = -0,34$ bzw. $r = 0,34$ und auf Spaltenboden $r = 0,12$ bzw. $r = 0,05$, wobei diese nicht signifikant waren. Die bezogene Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil γ_{clm} lieferte sehr unterschiedliche Korrelationen auf den verschiedenen Laufflächenmaterialien. Diese Oberflächenkenngröße zeigte auf Spaltenboden mit keiner Kenngröße der Gleitreibungsmessung eine signifikante Korrelation auf. Die Zusammenhänge mit dem Gleitreibungskoeffizienten auf Beton und der Anzahl positiver Amplituden auf Gussasphalt waren ebenfalls nicht signifikant. Auf Gussasphalt war die Korrelation mit $r = 0,27$ signifikant und jene mit dem arithmetischen Spitze-Spitze Wert mit $r = 0,39$ hoch signifikant, auf Beton betrug sie $r = 0,38$ und war ebenfalls hoch signifikant. Die Korrelation zwischen der bezogenen Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil γ_{clm} und der Anzahl positiver Amplituden war mit $r = -0,35$ signifikant. Ähnlich hohe Zusammenhänge wie bei den Kenngrößen der Leere waren zwischen der Durchdringung mit dem größten geschlossenen Leerflächenanteil c_{clm} und den Kenngrößen der Gleitreibungsmessung zu konstatieren. Allerdings sind diese auf die Abhängigkeit dieser Oberflächenkenngröße von der Topografietiefe zurückzuführen.

Nach diesen Ausführungen kommt der Topografietiefe von allen ermittelten Oberflächenkenngrößen eine zentrale Bedeutung zu, denn sie hat offensichtlich den höchsten Einfluss auf die Kenngrößen der Gleitreibungsmessung. Die Oberflächenmerkmale Leere und Feinheit spielen eine erhebliche Rolle bei der Charakterisierung der Oberflächenbeschaffenheit von Laufflächen. Diese lassen sich prinzipiell, wie anhand der Korrelationen aufgezeigt, ebenfalls mit der Gleitreibungsmessung ermitteln. Alte Gussasphaltlaufflächen zeigten beispielsweise hohe Topografietiefen und großen Volumina in Verbindung mit verhältnismäßig wenigen, dafür aber großen einzelnen Profilelementen. Daher waren sie als leer und grob anzusprechen. Die Beläge wiesen große Zwischenräume zwischen den Mineralkörnern auf, was bereits mit bloßem Auge sichtbar war. Dies bewirkte bei der Gleitreibungsmessung ein An- bzw. Aufkanten des Prüfkörpers und sogar einen vorübergehenden Formschluss bzw. ein „Verkrallen“ des Prüfkörpertragrandes mit spitzen, freiliegenden Splittsteinen. Hierdurch kam es zu einem sprunghaften Anstieg bzw. nach dem Überwinden oder Ausweichen der Steine wieder zu einem Abfall der Kraft. In der Gleitreibungskurve äußerte sich dies in einem unruhigen Kurvenverlauf, in hohen Gleitreibungskoeffizienten, hohen arithmetischen Spitze-Spitze Werten und einer gleichzeitig geringen Anzahl positiver Amplituden. Auch WIEDER (1988), MANNING et al. (1998), CHANG (1999), KIM und SMITH (2000), PHILLIPS und MORRIS (2001), MANNING und JONES (2001), KIM (2004a) und KIM (2004b) stellten eine Zunahme der Reibzahl mit stei-

gender Oberflächenrauheit fest. Im Gegensatz dazu bewirkte eine feine Oberfläche wie z. B. eine alte Beton- oder Spaltenbodenlauffläche ein Gleiten des Prüfkörpers auf den zahlreichen kleinen, abgerundeten und polierten Strukturelementen, die durch mechanischen und chemischen Verschleiß entstanden sind. Infolge kleiner Kornzwischenräume, angezeigt durch niedrige Topografietiefen und geringe Volumina, bot sich dem Prüfkörper keine Möglichkeit, irgendwo an- oder aufzukanten, sondern er glitt wie auf einem Kugelfeld. Hierfür war kein hoher Zugkraftaufwand nötig. Daher waren die ermittelten Gleitreibungskoeffizienten auf solchen Laufflächen auf niedrigem Niveau. Darüber hinaus zeichneten sich die Gleitreibungskurven durch einen sehr ruhigen Verlauf mit geringen arithmetischen Spitze-Spitze Werten und gleichzeitig hohen Anzahlen positiver Amplituden aus.

SCHULZE (1979) hebt hervor, dass aus Gegenüberstellungen von Rauheitskenngrößen und Griffigkeitswerten Erkenntnisse über die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Rauheit und Griffigkeit nur in geringem Maße gewonnen werden könnten, da die große Streuung um die Regression die Zusammenhänge verdeckten. Außerdem könnten grundsätzliche Zusammenhänge am besten unter Einbeziehung von Extremen erkannt werden, was bei Fahrbahnoberflächen kaum möglich sei. Grundsätzlich sind die Einwände von SCHULZE (1979) berechtigt, doch ist nach den Erfahrungen und Erkenntnissen aus der eigenen Arbeit zu hinterfragen, ob der Gleitreibungskoeffizient alle Facetten der Griffigkeit erfassen kann. Denn nach heutigem Stand der Kenntnisse sind die für die Griffigkeit einer Oberfläche verantwortlichen Reibungsmechanismen nicht von statischer Natur und daher sehr komplex (SOBIS, 1996; WAGNER, 1996; MANNING et al., 1998; KIM und SMITH, 2000; SCHRAMM, 2002; KIM, 2004a; KIM, 2004b). Daher stehen viele der genannten Autoren dem Gleitreibungskoeffizienten zur Beschreibung der Rutschfestigkeit bzw. der Griffigkeit kritisch gegenüber. Auch SCHULZE (1979) berichtet von enormen Schwierigkeiten bei der Gleitreibungsmessung.

Sicherlich sind die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Gleitreibungs- und der Topografiemessung bei den untersuchten Laufflächen auch mit erheblichen Streuungen belastet und zwar um so mehr, je rauer die Laufflächen waren (vgl. Abschnitt 4.3). Allerdings konnten mit alten Gussasphaltlaufflächen, alten Beton- und Spaltenböden beide Extreme der in der Praxis auftretenden Rutschfestigkeitszustände von Laufflächen abgedeckt werden. Differenzierungsschwierigkeiten traten, wie auch SCHULZE (1979) berichtet, nur bei Laufflächen mit Gleitreibungskoeffizienten im mittleren Bereich auf. Denn hier konnten anhand des Gleitreibungskoeffizienten keine signifikanten Unterschiede trotz augenscheinlich unterschiedlichen Oberflächenrauheiten aufgezeigt werden (vgl. Abschnitt 4.1.2).

Die beiden neuen Kenngrößen der Gleitreibungsmessung arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden, welche in ihrer Höhe deutlicher von den Oberflächeneigenschaften beeinflusst werden, zeigten infolge dessen meist wesentlich höhere Korrelationen. Generelle Einflüsse bestimmter Oberflächenmerkmale konnten aufgezeigt werden und Zusammenhänge wurden deutlich. Die hohen Streuungen sind durch die Heterogenität der in einer Klasse zusammengefassten Messstellen bedingt. Die neuen Kenn-

größen liefern bereits durch die Gleitreibungsmessung Informationen (nur indirekt, nicht direkt wie die Topografiemessung) über die Beschaffenheit der Laufflächenoberfläche, die der Gleitreibungskoeffizient zur Beurteilung der Rutschfestigkeit nicht liefern konnte.

Wie auch in den Arbeiten von SOBIS (1996), WAGNER (1996), MANNING et al. (1998), KIM und SMITH (2000), SCHRAMM (2002), KIM (2004a) und KIM (2004b) stellte sich auch in der vorliegenden Arbeit heraus, dass eine ausreichende Charakterisierung der Rutschfestigkeit von Laufflächen nicht allein durch den Gleitreibungskoeffizienten erfolgen kann. Denn die auftretenden Reibungsmechanismen sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, die bereits ausführlich in vorangegangenen Abschnitten besprochen wurden und die teilweise auch noch nicht zufriedenstellend erforscht sind. Auch die Laufflächeneigenschaften sind nicht nur mit einem Parameter zu charakterisieren, da verschiedene Oberflächenmerkmale die Rutschfestigkeit in unterschiedlicher Art und Weise beeinflussen.

5.5 Interpretation der Messergebnisse – Ursachen für die Veränderungen der Laufflächen

Die eigenen Untersuchungen bestätigen einmal mehr die Probleme, die in der Praxis mit der Haltbarkeit verschiedener Laufflächenmaterialien auftreten. Die Laufflächen tragen zu Klauen- und Gliedmaßenproblemen bei, indem sie entweder zu glatt oder zu rau werden (DE BELIE, 1997a). Je nach Land und Region sind die Haltbarkeitsprobleme unterschiedlicher Natur, was an den Rezepturen und den vor Ort vorkommenden und verwendeten Mineralien liegt, die für die Herstellung der Böden verwendet werden. Während beispielsweise NILLSON (1988), DE BELIE (1997a) und DE BELIE (1997b) berichten, dass Beton- und Spaltenböden mit fortschreitender Nutzungsdauer zu rau werden, kommen WEBER (1985), HERRMANN (1997), REIMANN und FREIBERGER (1999) sowie MÜLLER (2003) u. a. zu dem Ergebnis, dass diese Beläge im Alter zu glatt sind. Des Weiteren fanden WEBER (1985), HERRMANN (1997), REIMANN und FREIBERGER (1999) sowie MÜLLER (2003) im Gegensatz zu den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen und den Berichten von PAHLKE (2004) und SCHNEIDER (2006), dass Gussasphaltbeläge bereits nach mehr oder weniger langer Nutzungsdauer an Rutschfestigkeit bzw. Griffigkeit verlieren. Dabei betont SCHNEIDER (2006), dass Gussasphalt nicht per se ein Problem sei, denn es gebe Beläge mit ähnlicher Rauheit, die sich auf manchen Betrieben bewährt hätten, während sie auf anderen einen zu hohen Klauenabrieb verursachten. Dies sei oft auf Managementgründe wie beispielsweise Klauenpflege, Fütterung oder Genetik zurückzuführen. Auch MACUHOVA et al. (2007) fanden keine signifikanten Einflüsse von alten oder schlechten Böden auf Klauengesundheit oder Milchleistung bei einer schriftlichen Befragung von ca. 7000 bayerischen Milchviehbetrieben mit Boxenlaufställen. Der Managementeinfluss spielte eine entscheidende Rolle beim Auftreten von Klauen- und Gliedmaßenproblemen und bei der Höhe des betrieblichen Leistungsniveaus. Auch MANSKE (2002) nennt vielfältige Gründe, welche die tierindividuelle Prädisposition oder diejenige einer Herde für verschiedene Klauenkrankheiten beeinflussen.

SCHNEIDER (2006) berichtet weiterhin von einer Regionalität der Probleme mit Gussasphaltbelägen in Laufställen, wobei insbesondere die Beläge in Süddeutschland stark betroffen seien. An dieser Stelle sei angemerkt, dass auch die Laufflächen aller drei eigens untersuchten Betriebe sehr rau waren. PAHLKE (2004) hebt hervor, dass Gussasphaltböden, insbesondere an stark frequentierten Stellen, sehr rau werden. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus den eigenen Untersuchungen. Alte Böden waren von ungleichmäßiger Oberflächenbeschaffenheit. Es waren Vertiefungen durch Klauenabdrücke vor dem Fressgitter oder Fahrspuren durch die Schieberrollen, insbesondere bei freier Bewitterung der Laufflächen in einem Cuchettenstall festzustellen. Hierauf verweist auch SCHNEIDER (2006). Die Belagsdegradation gipfelte auf zwei Betrieben in großflächigen Ausbrüchen und einer vollständigen Ablösung der Gussasphaltdeckschicht an der Rinne für die Schieberseilführung, vor den Kraftfutterstationen und den Übertrieben zwischen den Laufgängen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Rutschfestigkeit und die Oberflächentopografie der drei gängigsten harten Laufflächentypen in neuem und altem Zustand dreidimensional erfasst und die Unterschiede anhand des gewonnenen Datenmaterials qualitativ und quantitativ beschrieben. Doch worin liegen die Ursachen der unterschiedlichen Oberflächenveränderungen bei den einzelnen Materialien, die zu Änderungen der Rutschfestigkeit bzw. der Abrasivität der Beläge führen?

Zunächst soll der Gussasphalt betrachtet werden. Gussasphalt ist ein hohlraumfreies Gemisch aus Bitumen, Füller, Sand, Splitt und Kies (N. N., 1981). Für die Verwendung als Stallboden muss er säurebeständig sein (u. a. RITTEL und NEUHAUSER, 1990). Hierfür müssen säurefeste Mineralstoffe wie karbonatfreier Füller, Sand und Splitt beispielsweise aus Quarz, Schiefer, Diabas, Granit oder Basalt verwendet werden (N. N., 1981; RITTEL und NEUHAUSER, 1990). An Straßengussasphalt werden diese Anforderungen nicht gestellt, dennoch, so PAHLKE (2004), kämen Straßenmischungen manchmal für Ställe zum Einsatz. Die Einflussfaktoren, die dazu führten, dass Gussasphaltbeläge rau werden, seien bis heute noch nicht vollständig geklärt und derzeit könnten auch die Firmen nur Vermutungen anstellen, berichten PAHLKE (2004) und SCHNEIDER (2006). PAHLKE (2004) nennt mehrere Problemquellen wie ungeeignete Rezepturen, fehlerhaften Einbau oder mangelhafte Nachbearbeitung. Weiterhin halten die Ergebnisse straßenbaulicher und landtechnischer Forschungstätigkeiten einige Antworten bereit.

Aus den eigenen Untersuchungen und unter Berücksichtigung verschiedener Literaturquellen lässt sich die Entwicklung von anfänglich unbedenklichen Gussasphaltlaufflächen hin zu solchen mit zu hoher Rauheit und Ablösungserscheinungen folgendermaßen skizzieren: Infolge der mechanischen, aber insbesondere der chemischen Belastungen, denen die Laufflächen ausgesetzt sind, verlieren die Beläge durch Auflösungsvorgänge an Bindemittel und Füller. Eine Abnahme des Bindemittelgehaltes in Verbindung mit einer Tendenz zur Verhärtung des verbleibenden Bindemittels stellten auch ZIRKLER und KHAZAI-MOGHADAM (1982) bei der Untersuchung verschiedener Straßenprüfflächen in den ersten 5 Jahren nach der Verkehrsübergabe fest, obwohl die Straßenbeläge lediglich saurem Regen ausgesetzt waren. Aber auch dieser greift die Mineralien in der Straßenoberflä-

che chemisch an und die Oberflächen werden abgestumpft, wodurch Regen ebenfalls Rauheit aufbaut (SCHULZE, 1979). VAN CAENEGEM et al. (1999) heben bei den Ergebnissen ihrer Untersuchungen zur chemischen Beständigkeit verschiedener Beton- und Asphaltmischungen gegenüber Gärtsaft hervor, dass die Beständigkeit der Asphalte sowohl vom Bitumengehalt für eine vollständige Umhüllung der einzelnen Zuschlagskörner als auch von der Art des Zuschlagmaterials (Sand und Kies) abhängig sei. Hierbei wiesen kristalline Gesteine eine höhere chemische Beständigkeit auf als beispielsweise Kalkstein. Aber auch diese Gesteine würden mit der Zeit angegriffen. VAN CAENEGEM et al. (1999) fanden weiterhin, dass der Zusatz von Polymeren weder bei Walz- noch bei Gussasphalt eine gesicherte Verbesserung der chemischen Beständigkeit bewirkte. Insbesondere in Außenklimaställen, so PAHLKE (2004), sollte zusätzlich bei der Wahl des Bitumens eine Abstimmung auf die zu erwartenden Temperaturen und die Sonneneinstrahlung erfolgen. RENKEN et al. (2003) berichten in diesem Zusammenhang, dass härtere Bindemittel bei gleicher Korngrößenverteilung günstigere Verformungseigenschaften hätten.

Der in der Literatur beschriebene Bindemittelverlust wurde in der eigenen Untersuchung durch die Zunahme der Topografietiefe und hoher Volumina bei alten Gussasphaltbelägen deutlich. Außerdem zeigten die Oberflächenkenngrößen eine zunehmende Grobheit und Offenheit an. Die im Vergleich zu neuen Gussasphaltlaufflächen größeren Rauheitselemente und Kornzwischenräume waren bereits mit bloßem Auge zu erkennen. Im Gegensatz zu neuen Belägen zeigten die Oberflächen kein „vergossenes Finish“ mehr, in dem die Körner verschiedener Größen vollständig von Bindemittel umhüllt und geschützt waren. Durch den Bindemittelverlust um die Minerale werden diese chemisch angreifbar und diejenigen, die eine geringe chemische Resistenz aufweisen, werden wie das Bindemittel aus dem Belag herausgelöst. So geht die Mikrorauheit des Abstreusandes, dessen Einfluss in den ersten Jahren nach der Laufflächenherstellung noch da ist, im Laufe der Nutzungsdauer verloren (DAMES et al., 1988). In letzter Konsequenz bleibt oft nur noch der Splitt übrig, der chemisch resistent ist und gleichzeitig einen hohen Polierwiderstand hat. Der Gussasphalt gewinnt infolge dessen im Alter an Makrorauheit, was sich in vergleichsweise hohen Gleitreibungskoeffizienten, unruhigen Gleitreibungskurven und hohen arithmetischen Spitze-Spitze-Werten in Verbindung mit einer geringen Anzahl positiver Amplituden äußerte. Auch DAMES et al. (1988) bestätigen, dass ein höherer Hohlraumgehalt durch Verringerung des Bindemittelgehaltes in Form einer offeneren Oberflächentextur zu höheren oder zumindest gleich hohen Gleitreibungskoeffizienten führte. Durch einen höheren Hohlraumgehalt würde die Grobheit verstärkt. Dennoch sei die Griffbarkeit neben dem Hohlraumgehalt von einer Reihe anderer Einflussgrößen wie z. B. Oberflächentextur, der Größe der Zuschlagskörnungen sowie deren Verteilung und insbesondere der Polierbarkeit der Minerale abhängig. Neben dem Mineralbestand selbst hat das Mineralgefüge sowie die Textur und Struktur Einfluss auf die Polierbarkeit und damit auf die Reibungseigenschaften des Belages (DAMES und LINDNER, 1989).

Die Abnahme der Rutschfestigkeit von Beton- und Spaltenböden infolge der Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit hat prinzipiell die gleichen Ursachen wie bei Gussasphaltlaufflächen und ist im Wesentlichen auch auf die chemische und mechanische Resistenz der Zuschlagsstoffe und des Bindemittels Zement zurückzuführen. Bezüglich der Folgen

mechanischer und chemischer Erosion stimmen die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen nicht mit denen der Veröffentlichungen von DE BELIE (1995), DE BELIE (1997a) und DE BELIE (1997b) überein. Sie fand eine Erhöhung der Oberflächenrauheit in Form einer größeren Rautiefe auf den Balken von Spaltenböden in Schweineställen. Des Weiteren berichtet sie von einer Erhöhung der Schlitzweiten, wobei dieser Parameter im Rahmen der eigenen Untersuchungen nicht erhoben wurde.

Anhand der eigenen Ergebnisse stellten sich die Unterschiede bzw. die Entwicklung von Beton- und Spaltenböden im Laufe der Nutzungsdauer wie folgt dar: Da weder zwischen den Oberflächenmerkmalen Leere und Abgeschlossenheit signifikante Unterschiede zwischen alten und neuen Beton- bzw. Spaltenböden nachgewiesen werden konnten, ist davon auszugehen, dass dem Merkmal Feinheit bei den Änderungen in der Rutschfestigkeit die Schlüsselrolle zukommt. Im Gegensatz zu den Belägen aus Gussasphalt erhöhten sich die Kornzwischenräume bei den Betonlaufflächen und den Betonbalken des Spaltenbodens nicht, denn es wurden keine signifikanten Änderungen der Topografietiefe und der Volumina festgestellt. Allerdings bestanden dennoch signifikante Unterschiede hinsichtlich der Feinheit beim Vergleich von Beton- und Spaltenboden gleichen Alters. Anhand der maximalen Anzahl der verschiedenen Teilflächen nach dem mechanisch-rheologischen Modell (N_{mam} , N_{opm} , N_{clm}) waren die Spaltenböden in beiden Altersklassen wesentlich feiner als die vergleichbaren Betonlaufflächen. Dies wird auch anhand der verschiedenen Zuschlagskörnungen erklärlich, die typischerweise zur Herstellung von Betonlaufflächen bzw. zur Herstellung der Spaltenbodenelemente verwendet werden. Für planbefestigte Betonlaufflächen werden in der Regel Kieskörnungen mit 0/32 mm bzw. alternativ Schotterkörnungen mit 0/32 mm oder 0/45 mm verwendet (RICHTER, 1997), bei Spaltenboden darf das Größtkörn 16 mm nicht überschreiten (DIN 18908). SCHULZE (1979) macht für die Höhe der Gleitreibungskoeffizienten im unteren Geschwindigkeitsbereich (im Straßenverkehr unter 50 km/h), in dem sich auch alle Fortbewegungsarten des Rindes abspielen, maßgeblich den Schärfegrad der Straßenoberfläche unabhängig von der Grobheit verantwortlich. Durch hohe Verkehrsbelastungen würden Gesteine mit geringem Polierwiderstand ihre anfängliche Kantenschärfe (z. B. bei Bruchsand oder Splitt) durch Abrundung der Kanten und Bruchstellen verlieren. Dies trifft auch für Beton- und Spaltenböden zu, wobei die mechanische Belastung durch den Viehbesatz und stationäre bzw. mobile Entmistungseinrichtungen hervorgerufen werden. Weiterhin wirken sich Urinstein, Kot-, Futter- und Einstreupartikel auf die Oberfläche aus. So geht dann auch die Flächenschärfe und infolge dessen auch die anfängliche „griffigkeitsverleihende“ Mikrorauheit, insbesondere bei Spaltenböden, im Laufe der Jahre verloren. Auf diese Weise degradierte Laufflächen zeigten niedrige Gleitreibungskoeffizienten, „ruhige“ Gleitreibungskurven und geringe arithmetische Spitze-Spitze Werte bei gleichzeitig großer Anzahl positiver Amplituden. Daher betonen DAMES et al. (1988), DAMES und LINDNER (1989), BREUER und BAIERL (1991) sowie VAN DER SLUIS et al. (2002) die enorme Wichtigkeit des Polierwiderstandes der Mineralzuschläge aller Korngrößen für die dauerhafte Stabilität des Belaggefüges und die Griffbarkeit von Fahrbahnbelägen. Insbesondere die Sandkomponente muss eine hohe Polierresistenz aufweisen, da sonst die Mikrorauheit schnell verloren geht (VAN DER SLUIS et al., 2002). Dies gilt ohne Einschränkung für

alle Laufflächen, insbesondere aber für Spaltenböden. DAMES et al. (1988) fanden, dass diejenigen Fahrbahnen, welche die höchsten Gleitreibungskoeffizienten hatten, aus Sanden hergestellt wurden, bei denen im Labor ebenfalls die höchsten Polierwiderstände mit der Methode nach Wehner/Schulze gemessen wurden. DAMES und LINDNER (1989) berichten, dass einige Gesteinsarten, insbesondere Kalkstein, nach relativ kurzer Zeit mit der Poliermaschine nach Wehner/Schulze ihren Endpolierwert erreichten (Wert, bei dem sich auch mit weiterem Polieren kaum noch Änderungen hervor rufen lassen). Andere Gesteine wie beispielsweise Grauwacke oder Kies bräuchten wesentlich länger und wiederum andere, z. B. Quarzit, Gabbro oder Hochofenschlacke, erreichten diesen Wert gar nicht. Diese Unterschiede zeigten sich relativ schnell in den Untersuchungen. Danach ändere sich Zustand auch unter extremer Poliereinwirkung meist nur noch wenig. Dies bestätigt die Aussage von MULITZE (1989), nach der die Oberflächenrauheit von Betonspaltenböden in den ersten 5 Jahren einer wesentlich stärkeren Veränderung unterliegt als in den Folgejahren.

Für Laufflächen muss zusätzlich noch eine besondere chemische Resistenz der verwendeten Minerale gefordert werden, gleichgültig, ob es sich um Beläge handelt, deren Bindemittel Bitumen oder Zement ist, wie Untersuchungen von VAN CAENEGEM et al. (1999) belegen.

Die Anfälligkeit des Betons gegen organische Säuren beruht auf Materialeigenschaften wie der chemischen Zusammensetzung und der Durchlässigkeit des Betons sowie der Alkalität und Reaktivität des Zements (WEYDERT et al., 2001). Untersuchungen von WEYDERT et al. (2001) sowie DE BELIE und MONTENY (1998) belegen einen hohen und schnellen chemischen Betonverschleiß in Flach- und Hochsilos für Silage durch Sickersäfte bereits nach wenigen Jahren bzw. von Böden in Schweineställen in der Nähe der Fütterungsautomaten durch Milch- und Essigsäure, insbesondere bei Flüssigfütterung. Der Verschleiß innerhalb des Betons ist abhängig vom Grad der chemischen Einwirkung, also dem pH-Wert und der Menge der Säure (WEYDERT et al., 2001).

RICHTER (2000) wiederum verweist darauf, dass die Beschaffenheit der Zuschläge einen großen Einfluss auf die Betonqualität ausübt. Als Haupteinflussfaktoren auf die Betonqualität, insbesondere die Druckfestigkeit nennt er den Wasserzementwert, daneben die Zementsorte und Zementmenge. Mit einem steigenden Wasserzementwert verschlechtern sich fast alle Eigenschaften wie beispielsweise Festigkeit, Wasserundurchlässigkeit, Rissempfindlichkeit, Frostbeständigkeit und auch die chemische Beständigkeit (VAN CAENEGEM et al., 1999; RICHTER, 2000; WEYDERT, et al. 2001). In einer weiteren Veröffentlichung betont RICHTER (2001), dass ein Beton von hoher Qualität (besser als B 25 (C25/30)) mechanischen und chemischen Angriffen im Stall besser widersteht. Ein Beton der Festigkeitsklasse B 35 (C30/37) erhöhe die Verschleißfestigkeit etwa um 20 bis 30 % gegenüber einem Beton der Festigkeitsklasse B 25 (C25/30). Ferner führt er aus, dass ein Beton der Festigkeitsklasse B 25 (C25/30) etwa nach 5 bis 7 Jahren aufgeraut werden müsse. Betone mit höheren Festigkeitsklassen erhöhten diesen Zeitraum. Diese Zeitangaben können zwar mit den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen nicht bestätigt werden, da die untersuchten Betonlaufflächen bereits wesentlich älter waren. Dennoch wurden

keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Gleitreibungskoeffizienten zwischen den Laufflächenklassen alter Beton und alter Spaltenböden gefunden. Hierbei überstiegen die planbefestigten Betonlaufflächen nicht die Betonfestigkeitsklasse B 25 (C25/30), wohingegen die Spaltenböden laut DIN EN 12737 im Falle von Stahlbeton mindestens aus C 35/45 oder bei Spannbeton aus C 45/55 gefertigt sein müssen und diese Norm auch erfüllen. Trotz höherer Betonqualität kann mit Sicherheit behauptet werden, dass sowohl die Laufflächen aus Beton als auch die Spaltenböden hinsichtlich ihrer Rutschsicherheit allesamt dringend sanierungsbedürftig waren. Allerdings zögerten die Landwirte, die Böden zu ersetzen oder flächige Sanierungsmaßnahmen durchzuführen, wie auch DE BELIE (1997a) fand. Stattdessen werden kleine, vereinzelte, provisorische Reparaturen durchgeführt oder im Extremfall abgewartet, bis Spaltenbalken zu dünn, die Armierungen durchgerostet und infolge dessen durchgebrochen sind. Die wichtigsten Gründe für diese Haltung sind hohe Kosten und ein hoher Zeitaufwand für Ersatz- oder Sanierungsmaßnahmen. Außerdem ist es schwierig, solche Maßnahmen bei laufendem Stallbetrieb durchzuführen. Im Hinblick auf die Haltbarkeit scheint also auch im Falle von Spaltenböden, die Polierresistenz und die chemische Beständigkeit der Minerale die Schlüsselrolle bei der Erhaltung der Rutschfestigkeit zu spielen. VAN CAENEGEM et al. (1999) und WEYDERT et al. (2001) kamen zu dem Ergebnis, dass die Zementsorte bei der chemischen Beständigkeit nur eine geringe Rolle spielt, wie in Vergleichen von Portland-Zement, Hochofenschlacke (Hüttensand), Flugasche und Silicastaub deutlich wurde. Nach VAN CAENEGEM et al. (1999) und WEYDERT et al. (2001) sind Guss- und Walzasphalt beständiger gegen chemischen Verschleiß als Beton. Auch der teilweise Ersatz des Portland Zements durch Flugasche oder Silicastaub führte nicht zu einer Verbesserung der chemischen Resistenz, während der Ersatz des Betons durch Bitumen zu besseren Ergebnissen führte (WEYDERT et al., 2001). Im Gegensatz hierzu stehen die Ergebnisse von DE BELIE et al. (1996), DE BELIE et al. (1997), DE BELIE und MONTENY (1998), MONTENY et al. (2001) und VINCKE et al. (2002). In verschiedenen chemischen und mikrobiologischen Verschleißtests mit verschiedenen Betonproben, die mit unterschiedlichen Zementzusätzen wie Flugasche, Hochofenschlacke, Silicastaub oder verschiedenen Polymerzusätzen hergestellt wurden, fanden die Autoren teilweise signifikante Unterschiede. Hierbei spielte der pH-Wert der Testflüssigkeit und die Einwirkzeit bzw. -häufigkeit eine entscheidende Rolle.

5.6 Interpretation der Ergebnisse – Bedeutung der Laufflächenveränderungen für die Interaktionen zwischen Laufflächen und Klauen

Um die Auswirkungen der verschiedenen Laufflächen diskutieren zu können, sollen die verschiedenen Material- und Altersklassen entsprechend der Rauheitsdefinitionen nach DIN EN ISO 13473-1 klassifiziert werden (Tab. 29).

Tab. 29: Einteilung der Texturbereiche der untersuchten Laufflächenklassen nach DIN EN ISO 13473-1

Material	Topografietiefe S_t (mm)	Ausdehnung horizontal (mm)	Ausdehnung vertikal (mm)	Texturbereich
Gussasphalt ≤ 3 Jahre	0,91	0,5 bis 50	0,1 bis 20	makro
Gussasphalt ≥ 9 Jahre	3,84	0,5 bis 50	0,1 bis 20	makro
Beton ≤ 3 Jahre	1,53	0,5 bis 50	0,1 bis 20	makro
Beton ≥ 9 Jahre	1,21	0,5 bis 50	0,1 bis 20	makro
Spaltenboden ≤ 3 Jahre	0,67	0,5 bis 50	0,1 bis 20	makro
Spaltenboden ≥ 9 Jahre	0,48	< 0,5	0,001 bis 0,5	mikro

Die Einteilung erfolgte, da keine Flächenkenngröße für die Quantifizierung der horizontalen Ausdehnung der Profilelemente in WinSAM zur Verfügung stand, unter der Annahme, dass die horizontale und die vertikale Ausdehnung der Rauheitselemente gleich waren. Hierzu muss allerdings angemerkt werden, dass die Bewertung von Fahrbahnoberflächen grundsätzlich in mehreren Skalenbereichen stattfinden muss. Es liegt also eine Mehrskaligkeit der Fahrbahnoberflächen vor, wobei die Mikrorauheit zur Kennzeichnung des Schärfegrades und die Makrorauheit zur Kennzeichnung des Profils verwendet wird (SCHULZE, 1979; FISCHLEIN, 2000; SCHRAMM, 2002). Die Autoren verweisen darauf, dass die Straßenbeläge im oberen Bereich (Kontaktbereich zwischen Reifen und Fahrbahn) ein anderes Rauheitsspektrum zeigen als im Gesamtprofil, was auf die heterogene Zusammensetzung aus Mineralien unterschiedlicher Größe und dem dazwischenliegenden Bitumen zurückzuführen ist. Hierdurch wird die Mikrorauheit bei der flächigen Texturvermessung von der Makrorauheit überdeckt. Die gleichen Verhältnisse können für die Laufflächenbeläge angenommen werden. Entsprechend der Einteilung der Laufflächen in Tab. 29 zeigte nur Spaltenboden nach fortgeschrittener Nutzungsdauer anhand der Zahlenwerte einen Wechsel des Texturbereichs von Makro- in Mikrorauheit. Der Unterschied der Topografietiefe war jedoch nicht signifikant, sodass nicht von einem statistisch abgesicherten Wechsel des Texturbereichs gesprochen werden kann. Alte Gussasphaltlaufflächen wiesen demnach eine um mehr als das Vierfache höhere Makrorauheit gegenüber den neuen Flächen auf. Der Unterschied war signifikant. Bei Betonlaufflächen war eine Verringerung der Makrorauheit zu konstatieren, aber auch hier war der Unterschied in der Topografietiefe nicht signifikant. Die Veränderungen der Belagsoberflächen haben bei den

verschiedenen Materialien unterschiedliche Auswirkungen auf die Rutschfestigkeit und die Klauengesundheit, wobei diese einerseits unter dem Gesichtspunkt der Rutschfestigkeit und andererseits unter dem Gesichtspunkt der mechanischen Auswirkungen auf die Klaue betrachtet werden müssen.

Bei Gussasphaltlaufflächen ging die anfängliche Kantenschärfe der Sandkörner als maßgebliche Komponente der Mikrorauheit im Laufe der Jahre verloren. Durch entsprechendes Absanden des frisch eingebrachten Gussasphaltes wird auf diese Weise eine Mikrorauheit generiert. Die Makrorauheit hat in den ersten Jahren noch einen geringen Einfluss auf die Griffigkeit, da der Großteil der Griffigkeit auf die Kantenschärfe des Bruchsand zurückzuführen ist (DAMES et al., 1988). Infolge der chemischen Auflösung von Füller und Bindemittel wird auch dieser Sand aufgelöst bzw. durch die hohen mechanischen Belastungen von Vieh und Entmistungstechnik aus dem Belag herausgerissen oder wegpoliert. Als Folge war bei den alten Laufflächen eine höhere Leere, Grobheit und Offenheit festzustellen. SCHULZE (1979) führt aus, dass mit wachsender Korngröße der Schärfe-grad zwar erhalten bleibt, aber zunehmend Makrorauheit durch immer größere Kornzwischenräume entsteht, wodurch wiederum hohe Gleitreibungskoeffizienten erreicht werden. Dies kann anhand der eigenen Ergebnisse bestätigt werden: Die spitzen Splittsteine bewirkten eine höhere Makrorauheit, die zu hohen Gleitreibungskoeffizienten, hohen arithmetischen Spitze-Spitze Werten bei gleichzeitig geringer Anzahl positiver Amplituden führten. Somit wirkt sich diese Entwicklung der Gussasphaltlaufflächen gerade unter verschmutzten Bedingungen prinzipiell positiv auf die Rutschfestigkeit aus. Durch die großen Kornzwischenräume (hohe Werte der Oberflächenkenngrößen V_{op} und V_{cl}) (vgl. Abb. 42, Seite 136) steht genügend Verdrängungsraum für die Verschmutzungen beim Aufsetzen der Klaue zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.2). Die hohen Spitzen (hohe Werte der Oberflächenkenngrößen S_{pk} und N_{mam}) bewirken den größten Anteil der Hysteresekomponente an der Gesamtreibkraft, da sich die Adhäsionskomponente durch die Schmutzaufgabe kaum auswirken kann (vgl. Abb. 1 (mitte), Seite 35). Durch den Splitt und die großen Kornzwischenräume erfolgt ein Formschluss zwischen Klaue und Boden (RICHTER, 2001; STEINER und VAN CAENAGEM, 2003), der für eine gute Rutschfestigkeit sorgt. Andererseits ist die hohe Makrorauheit infolge des Bindemittelverlustes und der dadurch großen Kornzwischenräume als problematisch anzusehen. Denn solche Flächen sind sehr abrasiv und bewirken einen hohen Klauenabrieb sowie hohe Punktbelastungen, die mit großen Kontaktflächendrücken einhergehen (vgl. Abschnitte 2.1.1 und 2.3.2). Des Weiteren wird bei großen Kornzwischenräumen eine mechanische Reinigung erschwert, da das Entmistungsgerät nicht in diese Zwischenräume hineinkommt, sondern den Schmutzbelag lediglich über die Vertiefungen planiert, was wiederum zu einem erhöhten Infektionsdruck führen kann (DE BELIE, 1997a).

Auch bei Beton- und Spaltenboden ging die anfängliche Kantenschärfe der Sandkörner als maßgebliche Komponente der Mikrorauheit im Laufe der Jahre verloren. Im Gegensatz zu den Gussasphaltlaufflächen bildete sich aufgrund anderer Zuschlagskorngrößen keine höhere Makrorauheit heraus. Sowohl bei Beton- als auch bei Spaltenboden konnte im Alter eine geringere Rauheit des Gesamtprofils festgestellt werden. Das maßgebliche Oberflächenmerkmal hierfür war die Feinheit, die bei Spaltenboden sowohl im neuen als auch im

alten Zustand noch stärker ausgeprägt war als bei den Betonlaufflächen. Im Laufe der Zeit wurden die Mineralkörner rund poliert, sodass die alten Beläge kaum noch Kanten-, sondern gegenwärtig fast ausschließlich Flächenschärfe besitzen. Diese reicht nicht aus, um ein hohes Griffigkeitsniveau zu gewährleisten. Die Gleitreibungsmessungen zeigten lediglich geringe Gleitreibungskoeffizienten, geringe arithmetische Spitze-Spitze Werte bei gleichzeitig hoher Anzahl positiver Amplituden. Dies deckt sich mit den Ausführungen von SCHULZE (1979), nach denen die Kantenschärfe der Zuschlagsstoffe und deren Polierwiderstand, insbesondere des Bruchsand, von entscheidender Bedeutung für die Griffigkeit ist. Derartige Oberflächen bergen bei verschmutzten Laufflächen ein hohes Ausgleitrisiko und sind besonders gefährlich für die Tiere, insbesondere wenn Aktivitäten durchgeführt werden, die den Laufflächen eine besondere Rutschfestigkeit abverlangen. Unter diesen Umständen ist die Klaue nicht in der Lage, den Schmutzfilm zu durchstoßen und auf Rauheitserhebungen zu treffen. Es bildet sich weder eine genügend große zwischenmediumfreie Kontaktfläche noch eine hohe Adhäsionskomponente aus. Die Hysteresekomponente ist ebenfalls gering (vgl. Abb. 1 (oben), Seite 35). Eine hohe Rauheit ist jedoch umso wichtiger, je viskoser das im Kontaktbereich der Reibpartner befindliche Zwischenmedium ist (WIEDER, 1988). Denn die Rauheitserhebungen wirken sich auf die Größe der tatsächlichen Kontaktfläche aus. Schmiermedien mit höherer Viskosität werden hierbei schlechter aus den Vertiefungen verdrängt (SCHRAMM, 2002; CHANG, 2004). Im Zusammenhang mit der Schmierung glatter Flächen und der Höhe des Gleitreibungskoeffizienten stellte sich in der Umformtechnik die Abgeschlossenheit mit ihren Kenngrößen geschlossenes Leervolumen V_{cl} , maximaler Anteil geschlossener Leerflächen α_{clm} und maximale Anzahl geschlossener Leerflächen N_{clm} als zentrales Oberflächenmerkmal heraus (SOBIS, 1996; WAGNER, 1996; PESTORF, 1997; STAEVES, 1998; POPP et al., 1999; NEUDECKER et al., 2001). Bei der Charakterisierung der Topografien von Laufflächen konnte dies nicht gefunden werden (vgl. Tab. 27, Seite 153), was mehrere Gründe haben könnte:

Der Maßstab der betrachteten Rauheiten ist in der Blechumformung teilweise bis zum Faktor 1000 kleiner als bei Laufflächen. In diesem Fachgebiet ist ausschließlich die Mikrorauheit nach DIN EN ISO 13473-1 von Interesse. Bei der flächigen Oberflächenvermessung überdeckt der Einfluss der Makrorauheit jenen der Mikrorauheit, wie bereits ausgeführt.

Obwohl sich bei den Gleitreibungsmessungen Wasser auf den Messflächen befand, konnte dieses keinen trennenden Einfluss auf die sich berührenden Reibpartner ausüben, um so die Reibkräfte zu senken. Bei der Verwendung eines planen und weicheren Prüfkörpers (also ohne Tragrand), gleichzeitig höherer Flächenpressung und Anwesenheit einer großen Menge viskoser Verschmutzungsaufgabe, wie sie eine gehende Kuh vorfindet, ist ein signifikanter Einfluss zumindest denkbar. Gemäß dem mechanisch-rheologischen Modell (vgl. Abb. 2, Seite 38) ist eine hohe Abgeschlossenheit einem guten Drainagevermögen abträglich. Zu einem solchen gehört die Eigenschaft, zusammenhängende Kanäle auszubilden und die Oberfläche hierdurch zu entwässern. Dies ist in der Blechumformung nicht erwünscht, da während der Bearbeitung möglichst niedrige Gleitreibungskoeffizienten erreicht werden sollen. Beton- und Spaltenböden unterschieden sich zwar im alten und

neuen Zustand nicht signifikant im Grad ihrer Abgeschlossenheit, dennoch waren die alten Beläge signifikant rutschiger als die neuen, was sich für die Tiere unter verschmutzten Bedingungen noch deutlicher auswirkt als es sich in der Gleitreibungsmessung gezeigt hat. Bei geringer Mikrorauheit aufgrund fehlender Kantenschärfe und gleichzeitig geringer oder fehlender Makrorauheit stehen infolge einer geringen Topografietiefe nur wenig Verdrängungsräume (offenes Leervolumen V_{op} und geschlossenes Leervolumen V_{cl}) zur Verfügung. Diese kleinen Kornzwischenräume sind bereits bei geringer Verschmutzung vollkommen ausgefüllt. Die verbliebenen, rund polierten Rauheitselemente verschwinden vollständig unter einer zusammenhängenden Verschmutzungsauflage, die beim Auftreten der Klaue nicht aus den Kornzwischenräumen entweichen kann und daher kein Durchstoßen des Schmutzfilms möglich ist. Adhäsion und Hysterese kommen somit nicht ausreichend zur Ausbildung. Dies kann so weit gehen, dass kein Mischreibungszustand mehr vorliegt, sondern vielmehr eine Flüssigkeitsreibung entsteht, die bei hohen Fortbewegungs- und Gleitgeschwindigkeiten einem Aquaplaningeffekt gleichkommt.

Auf zu glatten Laufflächen kann es außerdem dazu kommen, dass sich Klauenwachstum und -abrieb aufgrund einer zu geringen Abrasivität der Flächen, nicht mehr die Waage halten.

SCHULZE (1979) zieht nach Untersuchungen der Texturbereiche, die für eine hohe Griffigkeit bei verschiedenen Geschwindigkeiten von Bedeutung sind, folgendes Fazit: Fahrbahnen, die nur mit geringen Geschwindigkeiten befahren werden (< 50 km/h), bräuchten lediglich einen ausreichenden Schärfegrad, keine Grobrauheit. Im Falle schneller Geschwindigkeiten (> 100 km/h) wäre beides nötig. Dies trifft so nicht auf die Texturbereiche von Laufflächen zu. Denn je viskoser ein Schmiermedium ist, desto höher muss die Rauheit sein, da dieses schwieriger aus den Vertiefungen zu verdrängen ist (WIEDER, 1988; SCHRAMM, 2002; CHANG, 2004). Also sind für die Gewährleistung einer ausreichenden Rutschfestigkeit beide Texturbereiche angesprochen (RICHTER, 2001; STEINER und VAN CAENEGEM, 2003), was im Laufe der vorliegenden Arbeit ebenfalls herausgearbeitet und auch quantifiziert werden konnte.

LECLERCQ et al. (1997) fassen die Hauptfaktoren, die sich auf die Rutschfestigkeit auswirken, wie folgt zusammen: Menge und Viskosität der Verschmutzung, Permeabilität und Rauheit des Bodens sowie Reinigungseffizienz. Eine besonders ungünstige Faktorkonstellation, die ein hohes Ausgleitrisiko birgt und zu niedrigen Gleitreibungskoeffizienten führt, sei ein glatter Boden mit einer großen Menge viskoser Verschmutzung. Dies kann ohne Einschränkung auch für Laufflächen übernommen werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand der Literatur ist ersichtlich, dass Probleme mit Stallböden schon seit mehr als 35 Jahren bekannt sind. Die Aktualität dieses Themas bis zum heutigen Zeitpunkt zeigt vor allem zwei Dinge: Erstens, es besteht nach wie vor Forschungsbedarf hinsichtlich der Ursachen, die zu Problemen mit verschiedenen Laufflächenmaterialien führen und zweitens als Folge dessen, es hat in den vergangenen Jahren kaum Neuentwicklungen im Bereich der Laufflächenmaterialien abgesehen von speziellen Gummimatten gegeben. Allerdings sind die Vor- und Nachteile dieser Laufflächenbeläge mangels genügender Praxiserfahrungen noch nicht vollständig bekannt. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und sinkender Milchpreise in Verbindung mit unzureichend geklärten Fragen der Haltbarkeit und der Hygiene besitzen diese Produkte eine relativ geringe Verbreitung und Landwirte stehen dieser Alternative eher abwartend und skeptisch gegenüber. Des weiteren geht aus Untersuchungen (u. a. VOCKEY et al., 2001; SAMEL, 2005; MACUHOVA et al., 2007) hervor, dass der Einbau von Gummimatten nicht zwangsläufig zu weniger Klauen- und Gliedmaßenproblemen sowie zu höheren tierischen Leistungen führt. Daher werden auch in naher Zukunft harte Laufflächenmaterialien die Regel in Milchviehställen bleiben. Aus diesem Grunde wurden in dieser Arbeit nur harte Laufflächen betrachtet.

Der Einfluss der Oberflächen auf die Reibungsverhältnisse wird schon seit Jahrhunderten wissenschaftlich untersucht. Dies zeigt die Komplexität dieser Thematik. Mit Hilfe der für diese Arbeit konstruierten Messtechnik und der gewonnenen Erkenntnissen konnte ein Fortschritt in Bezug auf das Verständnis und die Ursachen der Rutschfestigkeit von Laufflächen gemacht werden. Dennoch besteht dringend weiterer Forschungsbedarf. Denn für Untersuchungen der Rutschfestigkeit und deren Haltbarkeit vor Ort werden nach wie vor einheitliche Messgrößen und Messverfahren benötigt, mit deren Hilfe Bewertungen vorgenommen werden können, um entsprechende Empfehlungen zu geben. Um auf diesem Gebiet weitere Fortschritte zu erzielen, muss es das Ziel sein, sich auf einheitliche Spezifikationen entsprechender Messgeräte, einheitliche Messbedingungen, Kenngrößen und einheitliche Berechnungsmodi der Kenngrößen zu einigen, sodass die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen vergleich- und kommunizierbar werden. So kann sichergestellt werden, dass die ohnehin schon hohen Streuungen der Ergebnisse nicht zusätzlich durch verschiedene Messverfahren erhöht werden.

Ein Schritt in diese Richtung wurde mit dieser Arbeit getan. Sowohl das entwickelte Gleitreibungsmessgerät als auch das Topografiemessgerät wurden, so weit als möglich, nach den Vorgaben nationaler und internationaler Normen gebaut. Auch wenn diese nicht explizit für landwirtschaftliche Belange formuliert sind, ist hiermit eine gewisse Standardisierung der Messtechnik sichergestellt. Nichtsdestotrotz bleiben die Validitätsprobleme mobiler Reibungsmessgeräte, die aus der mangelnden Gangsimulation resultieren, weiterhin bestehen. Allerdings wird durch die Standardisierung der Messtechnik eine Kommunizierbarkeit der Ergebnisse erzielt, die bis zum heutigen Zeitpunkt nicht gewährleistet ist. Hierzu tragen auch die vorgeschlagenen Berechnungsmodi der Kenngrößen bei, die aus den Reibungsdaten abgeleitet wurden.

Nach den Erfahrungen und Erkenntnissen aus der vorliegenden Arbeit ist die Aussagefähigkeit des allgemein zur Beschreibung der Rutschfestigkeit oder Griffigkeit genutzten Gleitreibungskoeffizienten zu hinterfragen. Denn es stellte sich heraus, dass der Gleitreibungskoeffizient alleine nicht die „gefühlte“ oder „visuell bewertete“ Griffigkeit erfassen konnte. Trotz augenscheinlich unterschiedlicher Oberflächenrauheit unterschieden sich die Gleitreibungskoeffizienten verschiedener Materialpaarungen nicht signifikant voneinander. Das liegt daran, dass die Oberflächen der Beläge nicht genügend berücksichtigt werden bzw. unzureichend in die Messgröße Gleitreibungskoeffizient eingehen, da der Gleitreibungskoeffizient lediglich der gemittelte Quotient aus allen gemessenen Reibkräften und der Normalkraft ist. Eine ausreichende Beurteilung der Rutschfestigkeit von Laufflächen kann demnach nicht allein anhand des Gleitreibungskoeffizienten erfolgen.

Aufgrund der unterschiedlichen Verläufe der Gleitreibungskurve lag die Ableitung neuer Messgrößen aus der Gleitreibungskurve nahe, mit denen die auf verschiedenen Rauheitsverhältnissen der Belagsoberflächen basierenden Unterschiede quantifiziert werden können. Erst die differenzierte Betrachtung der Gleitreibungskurvenverläufe und deren Erscheinungsbild (z. B. „ruhig“ oder „unruhig“) liefert wichtige Informationen über die Oberflächeneigenschaften einer Lauffläche. Denn die Rauheitsspitzen der harten Beläge (bei Gummimatten sind es die viskoelastischen Eigenschaften des Materials) verursachen den Kräfteverlauf bei Gleitreibungsmessungen, der durch den Gleitreibungskoeffizienten als Mittelwert über alle Messwerte allein nicht beschrieben werden kann. Die beiden neuen Kenngrößen der Gleitreibungsmessung arithmetischer Spitze-Spitze Wert und Anzahl positiver Amplituden, werden in ihrer Höhe, insbesondere auf rauen Belägen, deutlicher von den Oberflächeneigenschaften beeinflusst. Sie zeigten infolge dessen meist wesentlich höhere Korrelationen mit ausgewählten Oberflächenkenngrößen und liefern wichtige ergänzende Informationen zum Gleitreibungskoeffizienten. Zur Einschätzung der „gefühlten“ oder „visuell bewerteten“ Rutschfestigkeit sind jedoch alle drei Kenngrößen erforderlich. Jede isoliert betrachtet, besitzt wenig Aussagekraft (vgl. Tab. 22, Seite 130). Durch die Korrelationsanalyse von Kenngrößen der Gleitreibungs- und Topografiemessung konnten generelle Einflüsse bestimmter Oberflächenmerkmale aufgezeigt und Abhängigkeiten deutlich gemacht werden.

In der Praxis stellt sich das Problem der Definition eines zu rauen Bodenbelages. Dies gilt insbesondere für das Material Gussasphalt. Auf zu rauen Flächen können Klauenwachstum und -abrieb, die sich in etwa die Waage halten sollten, aus dem Gleichgewicht geraten, sodass ein zu großer Klauenabrieb die Folge sein kann. Das Sohlen- und Ballenhorn der Kühe wird zu dünn und der Eindringwiderstand gegen die spitzen Steine des Belages sinkt. Somit gehen die Tiere teilweise „wie auf Nadeln“, was sehr schmerzhaft ist. Gleichzeitig steigt das Risiko von mechanisch-traumatischen Klauenverletzungen, welche wiederum Eintrittspforten für Infektionskrankheiten sein können. Anhand der beiden neu definierten Kenngrößen können solche Beläge, die, wie sich gezeigt hat, nicht durch besonders hohe Gleitreibungskoeffizienten als sehr rau identifiziert werden können, nun besser eingeschätzt und die Gleitreibungskoeffizienten differenzierter beurteilt werden. So bieten diese beiden Kenngrößen zusätzliche Einordnungshilfen für die Praxis: Beim Vergleich zweier Laufflächen, die identische Gleitreibungskoeffizienten aufwiesen, ist zu vermuten,

dass diejenige Lauffläche mit dem höheren arithmetischen Spitze-Spitze Wert bei gleichzeitig geringerer Anzahl positiver Amplituden abrasiver auf die Klauen wirkt, zu höheren Punktbelastungen führt und damit schädlicher für Klauen ist als eine mit gegenteiligen Messwerten. Es besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Validierung der aufgezeigten Kenngrößen, dies gilt insbesondere für die beiden neu definierten Kenngrößen der Gleitreibungsmessung aber auch für die unterschiedlichen Oberflächenkenngrößen, mit denen bestimmte Oberflächenmerkmale quantifiziert werden können. Durch Tierbeobachtungen und Klauenbonitierung an Tieren (oder auch Abriebversuche im Labor) ist die Auswirkung von Böden mit verschiedenen arithmetischen Spitze-Spitze Werten und Anzahlen positiver Amplituden zu überprüfen. Ziel dieser Untersuchungen muss es sein, verschiedene arithmetische Spitze-Spitze Werte und Anzahlen positiver Amplituden entsprechenden Klauenbefunden oder Klauenabriebszuständen zuzuordnen.

Um sich der „gefühlten“ bzw. „visuell bewerteten“ Rutschfestigkeit und deren Wirkung zu nähern, ist daraufhin ein Korrekturfaktor einzuführen, der sich entweder erhöhend oder erniedrigend auf den Gleitreibungskoeffizienten auswirkt. Demnach ist für raue Böden, die einen hohen arithmetischen Spitze-Spitze Wert bei gleichzeitig geringer Anzahl positiver Amplituden aufweisen, eine Erhöhung des Gleitreibungskoeffizienten vorzunehmen. Umgekehrt ist eine Erniedrigung des Gleitreibungskoeffizienten auf sehr glatten Böden mit niedrigen arithmetischen Spitze-Spitze Werten bei gleichzeitig geringer Anzahl positiver Amplituden zu fordern.

Bei den Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächenmerkmale, welche die Rutschfestigkeit oder auch die Abrasivität verschiedener Laufflächenmaterialien charakterisieren, ist sicherzustellen, dass diese Kenngrößen funktionsrelevante Eigenschaften im System Klaue – Zwischenmedium – Lauffläche beschreiben. Mit dem mechanisch-rheologischen Modell aus der Umformtechnik konnte ein schlüssiger Modellansatz theoretisch auf dieses System übertragen werden. Der Vorteil dieses Modells liegt in den daraus abgeleiteten funktionalen Oberflächenkenngrößen, die auf einer dreidimensionalen Vermessung und Auswertung der Topografien basieren. Allerdings liegt auch hier noch keine genormte Messvorschrift für die Größe der Auswertungsfläche, die Filterung und die Auflösung vor. Hier wäre eine Weiterentwicklung und Einigung ebenfalls wünschenswert. Um auf diesem Gebiet Fortschritte zu erzielen, erscheint nur eine flächenhafte Auswertung der Oberflächdaten sinnvoll. Hierzu sind solche Messverfahren anzuwenden, die komplette Flächen vermessen wie beispielsweise Laser-Linienscanner. Hinsichtlich eines solchen Verfahrens wären Messgeräte wünschenswert, die eine noch größere Messfläche bei gleichzeitig höherer Auflösung und Genauigkeit aufnehmen.

Weitere Untersuchungen der Topografien könnten besonders im Hinblick auf eine flächenhafte Analyse in der Horizontalen erfolgen. Dies könnte mittels der Spitzenzahl pro cm^2 entsprechend dem R_{pc} -Wert bei der 2D-Auswertung und dem mittleren Abstand der Profilunregelmäßigkeiten in der Fläche, in Anlehnung an die horizontale 2D-Kenngröße R_{Sm} geschehen. Hierzu sind Algorithmen zu programmieren und in WinSAM zu implementieren.

Vordergründig gilt es allerdings, die Wirkungen verschiedener Oberflächenmerkmale auf die Rutschfestigkeit und auf den Klauenabrieb in vivo zu untersuchen. Hierzu sind spezielle Prüfflächen herzustellen, die definierte Oberflächeneigenschaften haben. In der Blechverarbeitung sind die Auswirkungen verschiedener Oberflächen mit definierten Eigenschaften in Serien von Tiefziehversuchen untersucht und die aus dem mechanisch-rheologischen Modell abgeleiteten Kenngrößen auf diese Weise validiert worden. Die Untersuchung der Auswirkung verschiedener Laufflächen auf lebende Tiere gestaltet sich hingegen weitaus schwieriger und erfordert einen hohen Zeitaufwand.

Der Forderung, die Kenngrößen zur Beschreibung der Laufflächenoberflächen auf ein Mindestmaß aussagekräftiger Größen zu reduzieren, kann derzeit nur unter Vorbehalt nachgekommen werden bzw. eine endgültige Auswahl erst nach der Validierung erfolgen. Denn technische Oberflächen, so auch Laufflächen, haben gewisse Oberflächeneigenschaften, die sich aus der Summe bestimmter Oberflächenmerkmale ergeben (vgl. Tab. 6, Seite 75) und die mittels entsprechender Kenngrößen quantitativ beschrieben werden können. So lange der Einfluss der einzelnen Merkmale auf die Rutschfestigkeit und die Abrasivität der Oberflächen jedoch nicht abschließend geklärt ist, können nur Vermutungen hinsichtlich der am besten geeigneten Kenngrößen zur Beschreibung der verschiedenen Oberflächenmerkmale angestellt werden. In den Untersuchungen hat sich die Topografiertiefe S_t zur Beschreibung des Merkmals Leere als eine zentrale Kenngröße herausgestellt. Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil c_{clm} zur Beschreibung der Abgeschlossenheit. Diese beiden Kenngrößen sind insbesondere bei rauen Laufflächen von großer Bedeutung. Aber auch die Feinheit muss bei diesen Böden berücksichtigt werden. Für besonders glatte Laufflächen hat sich das Oberflächenmerkmal Feinheit als ausschlaggebend herauskristallisiert. Eine aussagekräftige Kenngröße zur Quantifizierung dieses Oberflächenmerkmals ist die maximale Anzahl geschlossener Leerflächen N_{clm} .

Die Aufstellung eines statistischen Regressionsmodells, das die Rutschfestigkeit als abhängige Variable mittels Oberflächenkenngrößen aus der Topografiemessung beschreibt, war aufgrund eines zu geringen Stichprobenumfangs allerdings nicht möglich. Dies wurde zwar versucht, jedoch führten zu große Streuungen der einzelnen Oberflächenkenngrößen zu nicht signifikanten und unplausiblen Regressionskoeffizienten. Hierfür wird ein größerer Stichprobenumfang benötigt.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und die bisher vorgeschlagenen weiterführenden Untersuchungen führen konsequenterweise zur Festlegung von Mindestanforderung an die Rutschfestigkeit und Oberflächeneigenschaften von Laufflächen. Ziel muss es sein, eine Rangfolge des Ausgleitrisikos bestimmter Beläge unter bestimmten Bedingungen zu erstellen und hieraus praxisnahe Empfehlungen für die Rutschfestigkeit von Laufflächen bzw. ihre Oberflächeneigenschaften zu geben. Unter Einbeziehung aller vorher gewonnenen Erkenntnisse ist hierzu eine Untersuchung mit einer großen Anzahl von Belägen unterschiedlicher Materialien und unterschiedlichen Alters durchzuführen. Die Rutschfestigkeit und Topografieeigenschaften dieser Beläge sind mit anerkannten Standardgeräten zu messen und anhand anerkannter Kenngrößen zu quantifizieren. Auf diesen

Prüfflächen sind in großem Umfang Tierbobachtungen und ein Monitoring der Ausgleitvorfälle durchzuführen. Außerdem ist der Schweregrad des Ausgleitens bis hin zu Stürzen zu erfassen. Dazu sind ergänzend bestimmte Situationen zu provozieren, die vom Bewegungsablauf hohe Anforderungen an die Rutschfestigkeit des Bodens stellen (Kurvengehen, Flucht, abruptes Stehenbleiben) und Ausgleitvorfälle ebenfalls zu quantifizieren. Alle Untersuchungen sind im gewässerten Zustand und mit verschiedenen definierten Verschmutzungsgraden durchzuführen.

Abschließend kann konstatiert werden, dass mit Gleitreibungsmessungen, die Veränderungen der Rutschfestigkeit von Laufflächen vor Ort zwar quantifiziert, die Ursachen hierfür allerdings nur durch die Erkenntnisse aus Topografiemessungen erklärt werden können. Für die praktische Prüfung auf landwirtschaftlichen Betrieben wird die Gleitreibungsmessung mit den neu definierten Kenngrößen als ausreichende Methode zur differenzierten Beurteilung der Laufflächeneigenschaften Rutschfestigkeit aber auch der Oberflächenbeschaffenheit angesehen. Für eine gezielte Materialprüfung zur Weiterentwicklung von Laufflächenmaterialien kann die optische Topografiemessung sehr hilfreich sein, beispielsweise um in Beanspruchungs- und Abriebtests die Materialzusammensetzung hinsichtlich ihres Verhaltens und ihrer Beständigkeit gegen chemischen und mechanischen Verschleiß zu verbessern.

7 Zusammenfassung

Laut ADR (2006) sind Klauen- und Gliedmaßenprobleme mit 9,7 % bundesweit die viert häufigste Abgangsursache aller in der Leistungsprüfung befindlichen Kühe, die direkt einem Krankheitsbild zugeordnet werden kann. Die regionalen Schwankungen reichten 2005 von 7,3 % in Schleswig-Holstein bis 16,3 % in Sachsen. In Bayern belegten Klauen- und Gliedmaßenprobleme mit 9,4 % der Prüfungskühe ebenfalls den vierten Platz bei den Abgangsursachen, die direkt zugeordnet werden konnten (LKV BAYERN, 2005).

Die Einflussfaktoren auf Klauen- und Gliedmaßenprobleme und daraus resultierende Lahmheiten sind vielfältig. Oft wirken mehrere Faktoren zusammen, begünstigen oder verstärken sich wechselseitig. Zu den häufigst genannten Einflussfaktoren zählen Umweltfaktoren wie Boden und Liegeboxen. Die Böden bzw. Laufflächen spielen in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle. Die Eigenschaften von harten Laufflächen wie beispielsweise Rutschfestigkeit, Abrasivität und leichte Reinigung hängen von ihren Oberflächeneigenschaften ab. Diese ändern sich jedoch im Laufe der Nutzungsdauer und können je nach Material zu unterschiedlichen Auswirkungen auf Klauen und Gliedmaßen führen. Die Problematik der Haltbarkeit von Laufflächenbelägen insbesondere die Gewährleistung einer ausreichenden Rutschfestigkeit aber gleichzeitig nicht zu rauen Oberfläche ist so alt wie der Laufstall selbst. Allerdings fehlen bis heute objektive Kenngrößen und einheitliche Messmethoden zur Beurteilung von Laufflächeneigenschaften.

Bisher stützte sich die Bewertung der Laufflächen hauptsächlich auf die Beurteilung der Rutschfestigkeit. Diese kann mittels unterschiedlicher Prüfverfahren ermittelt werden. Eine häufig genutzte Methode ist das aus dem Straßenverkehrswesen bekannte SRT-Verfahren. Hierbei wird der Reibenergieverlust eines pendelnd aufgehängten Gummigleiters gemessen, der aus einer definierten Höhe fallen gelassen wird und über eine definierte Messstrecke schleift. Eine weitere Methode ist die Gleitreibungsmessung, wobei die Reibkraft gemessen wird, die entsteht, wenn ein Prüfkörper mit definierter Gewichtskraft und konstanter Geschwindigkeit horizontal über eine bestimmte Strecke bewegt wird. Allerdings sind die Ergebnisse der Gleitreibungsmessungen aus bisherigen Veröffentlichungen schwer vergleichbar, da oft mit unterschiedlich spezifizierten Messgeräten gearbeitet wurde. Dies reicht von verschiedenen Prüfkörpern aus Klauenhorn oder Kunststoff, über verschiedene Messgeschwindigkeiten und -strecken, unterschiedliche Kraftaufnahmesysteme bis hin zu verschiedenen Belastungen der Prüfkörper.

Ein Ziel dieser Arbeit war es, sich bei der Gleitreibungsmessung am bestehenden Standard zur Prüfung der rutschhemmenden Eigenschaften von Industrie- und Werkstattböden (E DIN 51131) zu orientieren und diesen mit entsprechenden Anpassungen hinsichtlich der Stalltauglichkeit, für die Prüfung von Laufflächen in Milchviehställen umzusetzen. Weiterhin sollten die Topografieeigenschaften der Laufflächen mit einem berührungslosen Messsystem erhoben, die bestehenden Kenngrößen zur Beschreibung der Rutschfestigkeit überprüft, bei Bedarf ergänzt sowie Zusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und Rutschfestigkeit hergestellt werden.

Die Vorgaben an die zu konstruierende Messtechnik ergaben sich teils aus der Auswertung der Literatur sowie der nationalen und internationalen Normung für die jeweiligen Messverfahren und teils aus den eigens für die Messaufgabe (Rutschfestigkeits- und Topografiemessungen auf Laufflächen in belegten Boxenlaufställen) erwachsenden Anforderungen.

Insgesamt wurden 18 Betriebe mit Laufställen ausgewählt und in die Altersklassen ≤ 3 Jahre und ≥ 9 Jahre eingeteilt. Die gezielte Auswahl nach Material und Altersklasse der Laufflächen diente zur Veranschulichung der teilweise gravierenden Veränderungen der Laufflächeneigenschaften im Laufe der Nutzungsdauer. In jeder Altersklasse befanden sich jeweils drei Ställe mit Laufflächen aus Gussasphalt, Beton und Spaltenboden. Pro Stall wurden jeweils 10 Messstellen untersucht, die anhand eines vorher festgelegten Schemas ausgewählt wurden. Alle Messungen wurden im gereinigten Zustand durchgeführt, wobei das Reinigungswasser für die Gleitreibungsmessungen auf den Messstellen verblieb. Für die Topografiemessungen wurden die Messflächen getrocknet, da Wasser die optischen Aufnahmen durch das berührungslose Messsystem (Laser-Linienscanner) stört. Als Datengrundlage für die Auswertungen standen 180 Messstellen zur Verfügung. Bei den Gleitreibungsmessungen ergaben sich bei 10 Wiederholungsmessungen je Messstelle 1800 Datensätze, bei den Topografiemessungen mit sechs Messungen je Messstelle waren es insgesamt 1080 Datensätze.

Bisherige Kenngrößen zur Quantifizierung der Rutschfestigkeit von Laufflächen wie Haft- und Gleitreibungskoeffizient zeigten, verglichen mit den optisch erfassten Kenngrößen zur Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften gewisse Schwächen. Denn es stellte sich einerseits heraus, dass der Haftreibungskoeffizient μ_H zu wenig reproduzierbar war und aufgrund zu hoher Streuung keine verlässlichen Aussagen zuließ. Andererseits war der Gleitreibungskoeffizient μ_G alleine nicht in der Lage, die beim Begehen der Laufflächen

während der Untersuchungen „gefühlte“ oder „visuell bewertete“ Griffigkeit aufzuzeigen, da sich die Gleitreibungskoeffizienten verschiedener Materialpaarungen trotz augenscheinlich unterschiedlicher Oberflächenrauheit nicht signifikant voneinander unterscheiden. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt darin, dass der Gleitreibungskoeffizient lediglich der gemittelte Quotient aus allen gemessenen Reibkräften und der Normalkraft ist. Grundsätzlich konnten jedoch signifikante Unterschiede hinsichtlich der Rutschfestigkeit zwischen neuen und alten Laufflächen einer Materialklasse durch den Gleitreibungskoeffizienten ausgewiesen werden. Zur Differenzierung aller Material- und Altersklassen war der Gleitreibungskoeffizient jedoch nicht in der Lage.

Erst die differenzierte Betrachtung der Gleitreibungskurvenverläufe und deren Erscheinungsbild (z. B. „ruhig“ oder „unruhig“) lieferte wichtige Informationen über die Oberflächeneigenschaften einer Lauffläche. Denn die Rauheitsspitzen der harten Beläge (bei Gummimatten sind es die viskoelastischen Eigenschaften des Materials) verursachen den Kräfteverlauf bei Gleitreibungsmessungen, der durch den Gleitreibungskoeffizienten als Mittelwert über alle Messwerte allein nicht beschrieben werden kann.

Daraufhin wurden aus den Verläufen der Gleitreibungskurven der verschiedenen Laufflächen die beiden neuen Messgrößen „arithmetischer Spitze-Spitze Wert“ μ_{ssa} und „Anzahl positiver Amplituden“ NPA in Anlehnung an vergleichbare Messgrößen aus der Elektrotechnik bzw. der Oberflächenanalytik abgeleitet. Die Aussagekraft der beiden neuen Kenngrößen, insbesondere die des arithmetischen Spitze-Spitze Wertes, konnte je nach Laufflächenmaterial durch mittlere bis hohe, höchst signifikante Korrelationen mit den optisch erfassten Oberflächenkenngrößen untermauert werden. Die beiden neu definierten Kenngrößen waren gegenläufig. Dies bedeutet zusammenfassend: Je glatter ein Belag, desto ruhiger der Kurvenverlauf, desto größer die Anzahl positiver Amplituden und umso geringer war der arithmetische Spitze-Spitze Wert. Umgekehrte Verhältnisse galten für raue Laufflächen.

In Verbindung mit dem bisher genutzten Gleitreibungskoeffizienten bieten die beiden neuen Kenngrößen, die Möglichkeit die Rutschfestigkeit von Laufflächen unter Berücksichtigung der Oberfläche auch mit der Gleitreibungsmessung zu beurteilen. Dies stellt eine deutliche Verbesserung dar, da identische Gleitreibungskoeffizienten nun differenziert werden können.

Die Ergebnisse der Topografiemessung lieferten einen Beitrag zum Verständnis der Ursachen von abnehmender Rutschfestigkeit auf Beton- und Spaltenboden sowie zunehmender

Rauheit von Gussasphaltlaufflächen. Denn die für die Rutschfestigkeit entscheidenden Reibungseigenschaften sind, wie aus der Tribologie bekannt, in hohem Maße von der Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner (Klaue und Lauffläche) abhängig. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchung zeigten ebenfalls die Abhängigkeit der Laufflächeneigenschaften von der Oberflächenbeschaffenheit. Anhand der ermittelten Oberflächenmessgrößen ist es nun möglich, die Topografieeigenschaften der verschiedenen Laufflächenmaterial- und -altersklassen qualitativ und quantitativ zu beschreiben, einzuordnen und zu bewerten. Bei den Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächenmerkmale, welche die Rutschfestigkeit oder auch die Abrasivität verschiedener Laufflächenmaterialien charakterisieren, ist sicherzustellen, dass diese Kenngrößen funktionsrelevante Eigenschaften im System Klaue – Zwischenmedium – Lauffläche beschreiben. Hierzu konnte mit dem mechanisch-rheologischen Modell aus der Umformtechnik ein schlüssiger Modellansatz theoretisch auf dieses System übertragen werden. Der Vorteil dieses Modells liegt in den daraus abgeleiteten funktionalen Oberflächenkenngrößen, die auf einer dreidimensionalen Vermessung und Auswertung der Topografien basieren. Der zentrale Ansatzpunkt dieses Modells liegt in der Aufteilung der zu beschreibenden Oberfläche in Materialflächen, offene und geschlossene Leerflächen. Diese Einteilung kann ebenfalls für Laufflächen vorgenommen werden, um die Verhältnisse der Kraftübertragung beim Gang von Rindern auf harten Laufflächen zu analysieren. Sowohl bei der Blechumformung als auch beim Rindergang auf verschmutzten Laufflächen liegt ein Zustand der Mischreibung vor. Die Kräfte werden durch Festkörper- und Flüssigkeitskontakt übertragen. Differenzierter betrachtet, geschieht dies beim Festkörper- über die Materialflächen und beim Flüssigkeitskontakt über offene Leerflächen (dynamische Schmieraschen) sowie geschlossene Leerflächen (statische Schmieraschen). Im Falle der Blechumformung dient Öl als Schmierstoff, im Falle der Klaue, die auf die Lauffläche aufsetzt, wirkt ein Gemisch aus Kot, Harn und Futterresten als Schmiermedium. Drückt der Stempel des Werkzeugs auf die Blechoberfläche, kann der in den geschlossenen Leerflächen befindliche Schmierstoff nicht aus der Wirkfuge gedrückt werden, da diese nach allen Seiten begrenzt sind. Hierdurch bildet sich ein hydrostatischer Druck im Schmierstoff aus, der einen Teil der Kontaktkraft zusätzlich zum Festkörperkontakt auf das Werkstück überträgt. Ein weiterer Teil kann über die offenen Leerflächen übertragen werden, aus denen der Schmierstoff unter dem Stempeldruck seitlich entweichen kann, da diese Flächen an mindestens einer Seite offen sind. Hierfür muss allerdings kontinuierlich Schmierstoff zugeführt werden und es muss eine hohe Gleitgeschwindigkeit erreicht werden, damit sich ein hydrodynamischer Druck ausbilden kann.

Das tribologische Verhalten der Bleche wird von der Höhe des Anteils der Materialflächen sowie der geschlossenen und offenen Leerflächen in der Kontaktzone bestimmt. Die gleichen Zusammenhänge können für die auf der Lauffläche aufsetzende Klauen übertragen werden. Anhand des mechanisch-rheologischen Modells können Laufflächen hinsichtlich verschiedener Eigenschaften beurteilt werden, die sich auf Tiergesundheit, Tierverhalten und verfahrenstechnische Gesichtspunkte auswirken.

Der Forderung, die Kenngrößen zur Beschreibung der Laufflächentopografien auf ein Mindestmaß aussagekräftiger Größen zu reduzieren, kann derzeit nur unter Vorbehalt nachgekommen werden bzw. eine endgültige Auswahl erst nach der Validierung erfolgen. Denn technische Oberflächen, so auch Laufflächen, haben gewisse Oberflächeneigenschaften, die sich aus der Summe bestimmter Oberflächenmerkmale ergeben und die mittels entsprechender Kenngrößen quantitativ beschrieben werden können. In der vorliegenden Arbeit hat sich die „Topografietiefe“ S_t zur Beschreibung des Merkmals „Leere“ als eine zentrale Kenngröße herausgestellt. Eine weitere wichtige Kenngröße ist die „Durchdringung mit dem maximalen geschlossenen Leerflächenanteil“ c_{clm} zur Beschreibung der „Abgeschlossenheit“. Diese beiden Kenngrößen sind insbesondere bei rauen Laufflächen von großer Bedeutung. Aber auch die Feinheit muss bei diesen Böden berücksichtigt werden. Für besonders glatte Laufflächen hat sich das Oberflächenmerkmal „Feinheit“ als ausschlaggebend herauskristallisiert. Eine aussagekräftige Kenngröße zur Quantifizierung dieses Oberflächenmerkmals ist die „maximale Anzahl geschlossener Leerflächen“ N_{clm} . Allerdings bedürfen diese Kenngrößen dringend einer Validierung anhand von Tierbeobachtungen und Klauenbefunden in weiterführenden Arbeiten.

Hauptansatzpunkt in der Diskussion um die Verbesserung von harten Laufflächenbelägen ist eine Sicherstellung der Haltbarkeit der Oberflächentopografie über eine lange Nutzungsdauer. Dies muss durch den Einsatz von Bindemitteln und Zuschlagsstoffen erfolgen, die eine hohe chemische Resistenz aufweisen. Des Weiteren ist eine hohe mechanische Resistenz der Zuschlagstoffe zu fordern. Die verwendeten Mineralien sollten einen hohen Polierwiderstand besitzen.

Für die praktische Prüfung auf landwirtschaftlichen Betrieben wird die Gleitreibungsmessung mit den neu definierten Kenngrößen als ausreichende Methode zur differenzierten Beurteilung der Laufflächeneigenschaften Rutschfestigkeit aber auch der Oberflächenbeschaffenheit angesehen. Für eine gezielte Materialprüfung zur Weiterentwicklung und Verbesserung von Laufflächenmaterialien kann die optische Topografiemessung sowohl

bei Gussasphalt als auch bei Beton- und Spaltenböden sehr hilfreich sein, beispielsweise um in Beanspruchungs- und Abriebtests die Materialzusammensetzung hinsichtlich ihres Verhaltens und ihrer Beständigkeit gegen chemischen und mechanischen Verschleiß zu verbessern.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und die vorgeschlagenen weiterführenden Untersuchungen führen konsequenterweise zur Festlegung von Mindestanforderung an die Rutschfestigkeit und Oberflächeneigenschaften von Laufflächen. Ziel muss es sein, eine Rangfolge des Ausgleitrisikos bestimmter Beläge unter bestimmten Bedingungen zu erstellen und hieraus praxisnahe Empfehlungen für die Rutschfestigkeit von Laufflächen bzw. ihre Oberflächeneigenschaften zu geben.

8 Summary

In Germany claw and leg diseases are according to ADR (2006) the fourth frequent cause for culling of all testing cows which could be assigned directly to a clinical picture. In 2005 the regional variation showed a range from 7.3 % in Schleswig-Holstein to 16.3 % in Saxony. In Bavaria claw and leg diseases rank fourth place regarding the causes of culling which could be assigned directly to a clinical picture (LKV BAYERN, 2005).

The factors influencing claw and leg diseases often followed by lamenesses are multiple. Many times several factors interact, promoting or amplifying each other. Environmental influences like walking floors and lying boxes are most frequently named factors in literature. Especially floors and walking alleys respectively play an important role. The properties of hard walking floors, for example slip-resistance, abrasiveness and ease of cleaning, depend on their surface features. But these are changing during their service life and may cause different effects on claw and legs depending on material. The problem of durable flooring materials in dairy barns is as old as the loose housing system itself. To provide sufficient slip-resistance for a long period of time and at the same time surfaces that are not too rough is very difficult. However, objective measuring parameters as well as a uniform measuring method to assess walking surfaces by their characteristics are lacking until today.

In the past the assessment of walking floors was mainly based on the judgement of skid-resistance, which could be measured by different methods. A frequently used method is the so called SRT-method (skid-resistance test). It measures the energy loss of a pendulum with a fixed rubber specimen, which is dropped of a defined height and slips over a defined distance. Another method is the measurement of sliding friction. Here the frictional force is determined, which results from the horizontal dragging of a specimen with a defined weight and constant velocity over a certain distance. But the results of the sliding friction measurements in several publications are hard to compare because of differently equipped measuring devices. The variation of the differences between the measuring devices reaches from various specimen, made of claw horn or plastic, changing measuring velocities and distances, miscellaneous force-recording systems to different weights of the specimen.

One objective of this work was to translate the standard for measuring sliding friction on floors for human use (E DIN 51131) with corresponding adaptations regarding the use in stables for the examination of floors for dairy cattle. Furthermore, topography characteris-

tics of the flooring materials should be examined with a touchless measuring system, existing measuring parameters for describing slip-resistance should be checked and completed if necessary and connections between surface characteristics and slip-resistance should be established.

The demands for the measuring devices partly resulted from the evaluation of literature as well as the national and international standardization for the concerning measuring methods and partly from special requests of the measuring tasks (measurement of slip-resistance and topography measurement of walking floors in dairy stables).

In total 18 dairy farms with loose housing systems were selected and classified in two groups. The first group with floors aging 3 years or younger and the second group with floors aging 9 years or older. The specific selection of the floors by material and age was done to highlight serious changes of the walking floor's surface properties during their service life. Each group consisted of three stables with mastic asphalt, concrete and slatted floor. A total of 10 measuring points per barn was selected on the basis of a defined scheme and examined. All measurements were conducted in cleaned condition. For measuring sliding friction the cleaning water remained on the measuring points. For the topography measurements the measuring points were dried, because water disturbed the recordings with the touchless measuring system (laser-linescanner). The database used for evaluation consisted of 180 measuring points. Sliding friction measurements on each measuring point comprised 10 repeated measurements, resulting in a total of 1,800 data sets. Topography measurements consisted of 6 repeated measurements at each measuring point, resulting in 1,080 data sets that could be evaluated.

Existing measuring parameters which describe slip-resistance, such as coefficient of static or sliding friction, showed certain disadvantages compared with the optical seized parameters. It turned out that the coefficient of static friction μ_H was of low repeatability due to a high variability at the same measuring point. Therefore on the basis of this coefficient no reliable statement could be made. Furthermore the coefficient of sliding friction μ_G also was not able to show the "felt and visually evaluated" slip-resistance of walking floors during the measurements in the stables. The different material combinations (specimen and different flooring materials) showed no significant differences regarding the coefficient of sliding friction, although, all floors had different surface roughnesses. The main reason for this was that the coefficient of sliding friction is the mean coefficient of all measured frictional forces and the normal force. However, significant differences regarding slip-

resistance could be basically determined between new and old walking floors of the same material class by the coefficient of sliding friction. But this parameter was not able to differentiate between all material and age groups of the selected floors.

Only the differentiated examination of the sliding friction curves and their image (e. g. “even” or “turbulent”) provided important information about the surface of a floor. The roughness points of hard flooring materials (on rubber mats there are the viscoelastic properties of the material) cause the development of force during the measurements of sliding friction, which cannot be described by the coefficient of sliding friction as the mean coefficient of all values.

As a result there were two new measuring parameters derived from the recordings of the sliding friction measurements. One of the new parameters is called “arithmetical peak-peak value” μ_{ssa} and the other “number of positive peaks” NPA, similar to measuring parameters in electrical engineering and surface analytics. The expressiveness of the newly defined parameters, in particular the one of the arithmetical peak-peak value, had been underpinned by high correlation coefficients with the surface parameters which were of highest significance. The two newly defined parameters are opponent: the smoother a floor, the more even was the image of the sliding friction curve, the higher was the number of positive peaks and the lower was the arithmetical peak-peak value. The connections for rough walking floors were vice versa.

In addition to the known coefficient of sliding friction these two newly defined parameters allowed to judge the slip-resistance of floors in relation to surface roughness by using the sliding friction measurement. This is a clear improvement, because now identical coefficients of sliding friction can now be differentiated.

The results of the topography measurements contributed to understand the causes of decreasing slip-resistance on concrete and slatted floors on the one hand and the increasing roughness of mastic asphalt floors on the other hand. As we know from tribology, the frictional properties highly depend on the surface features of the friction partners (claws and walking floor). The results of the own investigations also showed the dependency of the walking floor’s anti-slip properties on surface characteristics. By means of the newly established surface parameters it is now possible to describe the surface properties of different flooring materials and ages qualitatively and quantitatively. Furthermore they could be ranked and judged. However, it has to be assured that the parameters for the description of surface properties, which characterise the slip-resistance and the abrasivity of different

flooring materials, also describe features which are relevant for functions in the system claw – intermedium – walking floor. For this, a conclusive model approach could be theoretically transferred to this system from the mechanical-rheological-model of the metal shaping technology. The advantages of this model are the functional surface parameters which are based on a three dimensional measurement and evaluation of the topographies. A central point of this model is the division of the sheet metal surface according to functional load bearing areas. The load applied to the surface during the shaping process is transmitted by three different kinds of bearing ratios, namely material areas, open void areas and closed void areas. This division can also be applied for walking floors to analyse the force transmission during the gait of cattle. Both in metal shaping and in cattle gait on polluted walking floors there are mixed friction conditions. Forces are transmitted by material and liquid contact. This is done in case of the solid contact by material areas and in case of liquid contact by open void areas (dynamic lubricant pockets) and closed void areas (static lubricant pockets). During the metal shaping process, oil serves as lubricant. In case of the cattle claw which touches down on the walking floor it is the manure that acts as lubricant. When the stamp pulls on the metal sheet, the metal surface respectively the lubricant which is in the closed void areas cannot be pulled out of the contact area between stamp and metal surface because closed void areas are bordered with material in all directions. As a consequence, a hydrostatic pressure develops in the lubricant which transmits a part of the contact force to the workpiece in addition to the solid contact. Another part could be transmitted by the open void areas. In contrast to the closed void areas the lubricant can be pulled out of the open void areas by the stamp sideways because they are open on at least one side. To establish a hydrodynamic pressure, lubricant has to be supplied continuously and the sliding velocity has to be high. The tribological behaviour of sheet metals is determined by the ratios of material areas, open void areas and closed void areas in the contact zone. The same connections are transferable to the system claw – intermedium – walking floor. By means of the mechanical-rheological-model walking floors could be judged regarding these special properties which effect animal health, animal behaviour and technical aspects.

A reduction of the parameters for the description of the walking floor's topographies to a minimum could not be done yet immediately. This final selection of significant parameters requires further validations, because the surface properties of technical surfaces like walking floors, result from the sum of different surface features which can be described by

suitable parameters, qualitatively and quantitatively. In presented work, the parameter “depth of topography” S_t for the description of the surface feature “emptiness” has proven to be a central parameter. A further important parameter was the “penetration with the maximum closed void area ratio” c_{clm} for the quantification of the feature “insularity”. Both parameters were of great importance, especially on coarse walking floors. The surface feature “fineness” is crucial for very smooth floors but needs also to be considered on coarse floors. A significant parameter for this feature was the “maximum number of closed void areas” N_{clm} . However, all these parameters need to be validated in further investigations.

The main approach for improving hard flooring materials is to secure the durability of the surface topography for a long period of time. This can be reached only by using binders and aggregates with a high mechanical and chemical resistance. Furthermore, the used mineral aggregates must have a high resistance against polishing.

For practical examinations on farms the sliding friction measurement and the new defined parameters are regarded as a sufficient method to give a differentiated judgement on the floor characteristics slip-resistance and surface topography. To examine the material in order to develop improved flooring materials, the optical topography measurement could be useful for mastic asphalt as well as for concrete and slatted floors e. g. to improve the mechanical and chemical resistance of the material composition in durability and abrasion tests.

The knowledge gathered in the presented research work together with the continuing work that was suggested, should consequently lead to a definition of minimum requests for the slip-resistance and surface properties of walking floors. The aim should be to rank the risk of slipping incidents on different floors under certain conditions to give practical recommendations regarding slip-resistance and surface properties.

9 Literaturverzeichnis

- ADR (2006): Rinderproduktion: Zucht, Besamung, Leistungsprüfung in Deutschland; Hrsg. Arbeitsgemeinschaft Deutscher Rinderzüchter e. V., Bonn
- ALBUTT, R. W. und DUMELow, J. (1987): An on-line computer technique for measuring foot movement of cattle to assess the skid resistance of various floor surfaces; in: Cattle housing systems, lameness and behaviour, pp. 56-62; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- ALBUTT, R. W. et al. (1990): Slip-resistance of solid concrete floors in cattle buildings; Journal of Agricultural Engineering Research 45, pp. 137-147
- BÄHR, H. und TÜRPItz, L. (1976): Die Trittsicherheit von Stallfußböden und der Einflussfaktor Reibwiderstand, Agrartechnik Jg. 26, 5/76, S. 241-243
- BÄHR, H. et al. (1978): Erste Ergebnisse zur Stallfußbodenbeurteilung mit einem neuen Gleitreibungsmessgerät, Agrartechnik Jg. 28, 1/78, S. 25-27
- BARTUSSEK, H. und OFNER, E. (2003): Technical design and construction of floors, of lying areas and areas for animal circulation and manure disposal in passages of cattle and pig houses; in: Proceedings of the conference "buildings on animal production farms", Velenje, Slovenija, October 21-22, pp. 137-149
- BENZ, B. (2002): Elastische Beläge für Betonspaltenböden in Liegeboxenlaufställen; Dissertation Universität Hohenheim
- BENDEL, J. (2005): Auswirkungen von elastischen Bodenbelägen auf das Verhalten von Milchrindern im Laufstall; Dissertation Technische Universität München
- BERGSTEN, C. et al. (2003): Effects of biotin supplementation on performance and claw lesions on a commercial dairy farm; Journal of Dairy Science 86, pp. 3953-3962
- BOCKISCH, F.-J. (1991): Quantifizierung von Interaktionen zwischen Milchkühen und deren Haltungsumwelt als Grundlage zur Verbesserung von Stallsystemen und ihrer ökonomischen Bewertung; Verlag der Ferber'schen Universitätsbuchhandlung Gießen
- BONEFELD, X. (1981): Die Bestimmung des Gleitverhaltens von Schuhsohlen auf Bodenbelägen; Forschungsbericht 265 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven
- BÖNIG, S. (1996): Experimentelle Untersuchung zur Festlegung von normgerechten Reibzahlgrenzwerten für gleitsicheres Gehen; Dissertation Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal
- BONSER, R. H. C. et al. (2003): Assessing the frictional and abrasion-resisting properties of hooves and claws; Biosystems Engineering 86 (2), pp. 253-256
- BORDERAS, T. F. et al. (2004): Claw hardness of dairy cows: Relationship to water content and claw lesions; Journal of Dairy Science 87, pp. 2085-2093

- BREUER, J.-U. und BAIERL, V. (1991): Einfluss der Splittqualität auf die Griffbarkeit und Lebensdauer von Oberflächenbehandlungen an einer Versuchsstrecke; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 592; Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg
- CAMARA, S. (1970): Untersuchungen über den Klauenabrieb bei Rindern; Dissertation Christian-Albrechts-Universität Kiel
- CHANG, W.-R. (1999): The effect of surface roughness on the measurement of slip resistance; International Journal of Industrial Ergonomics 24, pp. 299-313
- CHANG, W.-R. (2004): Preferred surface microscopic geometric features on floors as potential interventions for slip and fall accidents on liquid contaminated surfaces; Journal of Safety Research 35, pp. 71-79
- CIGR (2002): Design recommendations of beef cattle housing, Report of the CIGR Section II, Working Group No. 14 Cattle Housing, September 2002, East Lansing, Michigan, USA; Hrsg. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning
- COOK, N. B. et al. (2004): Environmental influences on claw horn lesions associated with laminitis and subacute ruminal acidosis in dairy cows; Journal of Dairy Science 87 (E. Suppl.), pp. E. 36-E. 46
- CZICHOS, H. und HABIG, K.-H. (2003): Tribologie Handbuch; GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden
- DAMES, J et al. (1988): Einfluss der Polierbarkeit von Sand auf die Griffbarkeit von Asphaltbetondeckschichten; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 528; Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg
- DAMES, J. und LINDNER, J. (1989): Ermittlung der Endpolierwerte von im Straßenbau verwendeten Gesteinen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 574; Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg
- DE BELIE, N. (1995): Measurement of surface erosion of concrete slats; Journal of Agricultural Engineering Research 61, pp. 63-66
- DE BELIE, N. et al. (1996): Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids; Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 11, pp. 1717-1725
- DE BELIE, N. (1997a): A survey on concrete floors in pig houses and their degradation; Journal of Agricultural Engineering Research 66, pp. 151-156
- DE BELIE, N. et al. (1997): Attack of concrete floors in pig houses by feed acids: Influence of fly ash addition and cement-bound surface layers; Journal of Agricultural Engineering Research 68, pp. 101-108
- DE BELIE, N. (1997b): On-farm trial to determine the durability of different concrete slats for fattening pigs; Journal of Agricultural Engineering Research 68, pp. 311-316

- DE BELIE, N. und MONTENY, J. (1998): Resistance of concrete containing styrol acrylic acid ester latex to acids occurring on floors for livestock housing; Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1621-1628
- DE BELIE, N. und ROMBAUT, E. (2003): Characterisation of claw-floor contact pressures for standing cattle and the dependency on concrete roughness; Biosystems Engineering 85 (3), pp. 339-346
- DEMBELE, I. et al. (2006): Factors contributing to the incidence and prevalence of lameness on Czech dairy farms; Czech Journal of Animal Science 51 (3), pp. 102-109
- DIN EN 206-1 (2001): Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 1045-2 (2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 1996-13 (1984): Prüfung von Asphalt – Teil 13: Eindringversuch mit ebenem Stempel; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 3274 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 4760 (1982): Gestaltabweichung, Begriffe, Ordnungssystem; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 4761 (1978): Oberflächencharakter: Geometrische Oberflächentextur-Merkmale, Begriffe, Kurzzeichen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 4768 (1974): Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten: Begriffe, Messbedingungen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 4287 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 4288 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 5436-1 (2000): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Normale: Teil 1: Maßverkörperungen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN ISO 10844 (1997): Akustik: Anforderungen an Prüfstrecken zur Geräuschmessung an Straßenfahrzeugen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 11562 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Messtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern; Beuth-Verlag, Berlin

- DIN EN ISO 12085 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Motivkenngrößen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 12390-3 (2002): Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 12390-4 (2000): Prüfung von Festbeton – Teil 4: Bestimmung der Druckfestigkeit, Anforderungen an Prüfmaschinen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 12697-20 (2004): Asphalt: Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 20: Eindringversuch an Würfeln oder Marshall-Probekörpern; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 12697-21 (2004): Asphalt: Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 21: Eindringversuch unter Verwendung von Platten; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 12737 (2004): Betonfertigteile – Spaltenoden für die Tierhaltung; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13036-1 (2001): Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen: Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13036-3 (2003): Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen: Prüfverfahren – Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13036-4 (2003): Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen: Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13036-7 (2003): Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen: Prüfverfahren – Teil 7: Messung von Einzelunebenheiten von Verkehrsflächen: Messung mit der Richtlatte; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 13473-1 (2004): Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN ISO 13473-2 (2004): Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN ISO 13473-3 (2004): Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 3: Anforderungen und Einteilung von Profilometern; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 13565-1 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen; Beuth-Verlag, Berlin

- DIN EN ISO 13565-2 (1998): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilskurve; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN ISO 13565-3 (2000): Geometrische Produktspezifikationen (GPS): Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren: Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13892-3 (2004): Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 3: Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach Böhme; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13892-4 (2003): Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 4: Bestimmung des Verschleißwiderstandes nach BCA; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN EN 13892-5 (2003): Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen – Teil 5: Bestimmung des Widerstandes gegen Rollbeanspruchung von Estrichen und Nutzestrichen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN V 18032-2 (2001): Sporthallen: Hallen für Turnen, Spielen und Mehrzwecknutzung – Teil 2: Sportböden, Anforderungen, Prüfungen; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18908 (1992): Fußböden für Stallanlagen: Spaltenböden aus Betonfertigteilen oder aus Holz – Maße, Lastannahmen, Bemessung, Einbau; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 18202 (2005): Toleranzen im Hochbau; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 52108 (2002): Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe: Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme – Schleifscheiben-Verfahren; Beuth-Verlag, Berlin
- DIN 53375 (1986): Prüfung von Kunststofffolien: Bestimmung des Reibungsverhaltens; Beuth-Verlag, Berlin
- DONGES, A und NOLL, R. (1993): Lasermesstechnik – Grundlagen und Anwendung; Hüthig Buch Verlag Heidelberg
- DROLL, P. und KUTZBACH, H. D. (2001): Laserscanner zur 3D-Oberflächenvermessung; Landtechnik 56, Heft 6, S. 148-149
- E DIN EN 10049 (2003): Messung des arithmetischen Mittenrauwertes R_a und der Spitzenzahl R_{pC} an metallischen Flacherzeugnissen; Beuth-Verlag, Berlin
- E DIN 51131 (1999): Prüfung von Bodenbelägen: Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Verfahren zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten; Beuth-Verlag, Berlin
- EL-TORNACHI, M. K. (2003): Rauheit von Betonoberflächen – 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen, Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung; Dissertation Universität Dortmund

- FATEHI, J. et al. (2003): Genetic parameters for feet and leg traits evaluated in different environments; *Journal of Dairy Science* 86, pp. 661-666
- FEßL, L. (1968): Biometrische Untersuchungen der Bodenfläche der Rinderklauen und die Belastungsverteilung auf die Extremitätenpaare; *Zbl. Vet-med A* 15, S. 844-858
- FISCHLEIN, H. (2000): Untersuchung des Fahrbahnoberflächeneinflusses auf das Kraftschlussverhalten von PKW-Reifen; *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik*, Nr. 414, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
- FRANCK, A. et al. (2006): Biomechanical properties of bovine claw horn; *Biosystems Engineering* 93 (4), pp. 459-467
- GREEN, L. E. et al. (2002): The impact of clinical lameness on milk yield of dairy cows; *Journal of Dairy Science* 85, pp. 2250-2256
- GOOCH, C. A. (2000): Considerations in flooring; in: *Proceedings from the conference "Dairy housing and equipment systems – Managing and planning for profitability" in Pennsylvania*; Hrsg. NRAES (Natural Resource, Agriculture and Engineering Service) February 1-3, pp. 278-293
- GÖTTE, T. und HEISIG, A. (1999): Prüfung der Rutschhemmung von Bodenbelägen vor Ort – Das Gleitmessgerät GMG 100; *Sonderdruck aus: Die BG, Heft 11/99*
- GÖTTE, T. und MEWES, D. (2003): Prüfung und Bewertung der Rutschhemmung von Bodenbelägen; *Die BG, Heft 08/03*, S. 327-332
- GROßMANN, G. et al. (2002): Reibungszahlen zwischen Ladung und Ladefläche, *TÜ, Bd. 43 Nr. 4*, S. 58-61
- HEGDES, J. et al. (2001): A longitudinal field trial of the effect of biotin on lameness in dairy cows; *Journal of Dairy Science* 84, pp. 1969-1975
- HERRMANN, H.-J. (1997): Einfluss unterschiedlicher Bodenausführung von Laufflächen auf das Verhalten und die Klauengesundheit von Kühen; *Dissertation Universität Gesamthochschule Kassel*; Hrsg. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Bauwesen Hessen e. V. (ALB Hessen), Kassel
- HERRMANN, H. J. und MÜLLER, K. (2001): Anforderungen an Stallfußböden in der Rinderhaltung; *BfL* 3/2001, S. 10-12
- HIRT, A. et al. (2003): *Tierschutzgesetz*; Verlag Franz Vahlen München
- IRPS, H. (1983): Untersuchungsergebnisse über die Anforderungen an den Stallfußboden in der Rinderhaltung; *Landbauforschung Völkenrode*, Jg. 33, Heft 1, S. 1-10
- JULI, R. et al. (2002): Planbefestigte Stallböden für Rinder; *Arbeitsblatt landwirtschaftliches Bauwesen*; Hrsg. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und ländliches Bauwesen Bayern e. V. (ALB Bayern), Freising

- KEMPKENS, K. und BOXBERGER, J. (1987): Locomotion of cattle in loose housing systems; in: Cattle housing systems, lameness and behaviour, pp. 107-118; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- KIM, I.-J. und SMITH, R. (2000): Observation of the floor surface topography changes in pedestrian slip resistance measurements; *International Journal of Industrial Ergonomics* 26, pp. 581-601
- KIM, I.-J. (2004a): Development of a new analysing model for quantifying pedestrian slip resistance characteristics: Part I – Basic concepts and theories; *International Journal of Industrial Ergonomics* 33, pp. 394-401
- KIM, I.-J. (2004b): Development of a new analysing model for quantifying pedestrian slip resistance characteristics: Part II – Experiments and validation; *International Journal of Industrial Ergonomics* 33, pp. 403-414
- KLEIN, H. (2003): Berührungslose Digitalisierung freigeformter Oberflächen mit Hilfe eines optischen Abstandssensors; *Berichte aus der Produktionstechnik*, Band 26/2003, Shaker Verlag Aachen
- KRAGELSKI, I. V. et al. (1983): Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß; Carl Hanser Verlag München Wien
- KUMMER, H. W. (1966): Unified theory of rubber and tire friction; Dissertation Pennsylvania State University: Eng. Res. Bull. B-94
- KUSCHEFSKI, A. (1988): Zur Validität von Reibzahlen als Bewertungskriterien der Gleitsicherheit; Dissertation Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal
- LAMPALZER, R. (2004): Physikalische Grenzen von optischen 3D-Sensoren mit phasenmessender Triangulation; Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- LECLERQ et al. (1997): Analysis of measurements of slip resistance of soiled surfaces on site; *Applied Ergonomics* 28 (4), pp. 283-294
- LKV BAYERN (2005): Leistungs- und Qualitätsprüfung in der Rinderzucht in Bayern; Hrsg. Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e. V., München
- MACUHOVA, J. et al. (2007): Umfrageergebnisse zu Laufflächen und Klauenpflege aus bayerischen Milchviehbetrieben (unveröffentlicht)
- MAIR, A. (1989): Untersuchung der Druckverteilung unter Rinderklauen mit bildverarbeitenden Methoden; Dissertation Technische Universität München
- MANNING, D. P. et al. (1998): The surface roughness of a soling material determines the coefficient of friction on water-lubricated surfaces; *Journal of Safety Research* 29 (4), pp. 275-283

- MANNING, D. P. und JONES, C. (2001): The effect of roughness, floor polish, water, oil and ice on underfoot friction: current safety footwear solings are less slip resistant than microcellular polyurethane; *Applied Ergonomics* 32, pp. 185-196
- MANSKE, T. (2002): Hoof lesions and lameness in Swedish dairy cattle; Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences Skara
- MATON, A. (1987): The influence of the housing system on claw disorders with dairy cows; in: *Cattle housing systems, lameness and behaviour*, pp. 151-158; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- MCKEE, C. I. und DUMELow, J. (1995): A review of the factors involved in developing effective non-slip floors for pigs; *Journal of Agricultural Engineering Research* 60, pp. 35-42
- MEYER, W. und GEORG, H. (2001): Einfluss der Laufflächengestaltung auf die Klauengesundheit von Milchkühen; *Landtechnik* 56, 4/2001, S. 258-259
- MONTENY, J. et al. (2001): Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete; *Cement and Concrete Research* 31, pp. 1359-1365
- MULITZE, P. (1989): Die Bestimmung der Trittsicherheit perforierter Stallfußböden für die Schweinehaltung; Dissertation Justus-Liebig-Universität Giessen
- MÜLLER, K. (2003): Entwicklung eines mobilen Gerätes zur Messung der Rutschfestigkeit in Milchviehställen; Diplomarbeit Justus-Liebig-Universität Giessen
- MURPHY, P. A. et al. (1987): A survey of lameness in beef cattle housed on slats and on straw; in: *Cattle housing systems, lameness and behaviour*, pp. 67-72; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- NEUDECKER, T. et al. (2001): Messvorschrift zur Bestimmung funktionaler 3D-Oberflächenkenngrößen für die Blechumformung; in: *Idee – Vision – Innovation*; Hrsg. Vollertsen, F. und Kleiner, M., S. 391-408
- N. N. (1981): Informationen über Gussasphalt 13; Hrsg. Beratungsstelle für Asphaltverwendung e. V., Braunschweig
- NILSSON, C. (1988): Floors in animal houses; Dissertation Swedish University of Agricultural Sciences Lund
- OBER, J. und KIESL, H.-P. (1970) Stallfußböden: Ein Untersuchungs- und Erfahrungsbericht; Schriftenreihe der ABTL Nordrhein-Westfalen, Heft 11
- PAHLKE, M. (2001): Planbefestigt aber wie?; *DLZ* 1/2001, S. 110-114
- PAHLKE, M. (2004): Klauenraspel Gussasphalt; *DLZ* 1/2004, S. 86-89
- PESTORF, M. (1997): Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik; Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

- PETERSE, D. J. (1987): Influence of loading on the claws; in: Cattle housing systems, lameness and behaviour, pp. 45-49; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- POPP, U. et al. (1999): Surface characterisation with regard to the tribological behaviour of sheet metal in forming processes; in: Sheet Metal 1999, pp. 301-310; Hrsg. Geiger, M., Bamberg-Meisenbach
- PFADLER, W. (1981): Ermittlung optimaler Funktionsmaße von Spaltenböden in Milchviehlaufställen; Dissertation Technische Universität München
- PHILLIPS, C. J. C. et al. (1998): Effect of hoof characteristics on the propensity of cattle to slip ; The Veterinary Record 142, pp. 242-245
- PHILLIPS C. J. C. et al. (2000): Frictional properties of cattle hooves and their confirmation after trimming; The Veterinary Record 146, pp. 607-609
- PHILLIPS, C. J. C. und MORRIS, I. D. (2000): The locomotion of dairy cows on concrete floors that are dry, wet or covered with a slurry of excreta; Journal of Dairy Science 83, pp. 1767-1772
- PHILLIPS, C. J. C. und MORRIS, I. D. (2001): The locomotion of dairy cows on floor surfaces with different frictional properties; Journal of Dairy Science 84, pp. 623-628
- REIMANN, W. und FREIBERGER, F. (1999): Fester Tritt auch bei den Kosten; DLZ 3/99, S. 132-136
- RENKEN, P. et al. (2003): Einfluss der Modifizierung von Bindemitteln durch Polymere und/oder Naturasphalt auf Standfestigkeit, Kälteverhalten und Verarbeitbarkeit von Gussasphalt; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 862; Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn
- REUBOLD, H. (2004a): Besser mit Gummi; DLG-Test.de 2/2004, S. 8-13
- REUBOLD, H. (2004b): DLG-Prüfbericht 5403, Huber Laufflächenbelag für Rinder Typ N 15 plus; Hrsg. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. (DLG), Groß-Umstadt
- REUBOLD, H. (2004c): DLG-Prüfbericht 5378, Huber Komfortbelag N 20; Hrsg. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. (DLG), Groß-Umstadt
- REUBOLD, H. (2004d): Vier Laufgang-Beläge im Test; TOP AGRAR 11/2004, S. R 12-R 15
- REPPENING, F. (1994): Berührungsloses Vermessen von warmen Schmiedeteilen mit Hilfe der Laser-Triangulation; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik Nr. 419; VDI Verlag Düsseldorf
- RICHTER, T. (1997): Bauausführung dauerhafter planbefestigter Stallfußböden, Zement-Merkblatt Landwirtschaft Nr. LB 12; Hrsg. Bundesverband der deutschen Zementindustrie e. V., Köln

- RICHTER, T. (2000): Beton für landwirtschaftliche Bauvorhaben, Zement-Merkblatt Landwirtschaft Nr. LB 3; Hrsg. Bundesverband der deutschen Zementindustrie e. V., Köln
- RICHTER, T. (2001): Trittsicherheit von Stallfußböden aus Beton; BfL 3/2001, S. 13-17
- RITTEL, L. und NEUHAUSER, H. (1990): Asphalt für Fahrhiloböden; Hrsg. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und ländliches Bauwesen Bayern e. V. (ALB Bayern), Freising
- RUSSKE, A. K. (2001): Entwicklung der Klauenform und Klauenhorneigenschaften bei Jungrindern der Rassen Deutsche Holsteins und Deutsches Braunvieh; Dissertation Tierärztliche Hochschule Hannover
- RUSHEN, J. et al. (2004): Designing better environments for cows to walk and stand; Advances in Dairy Technology (16), pp. 55-64
- SAMEL, M. (2005): Gummibeschichtete Laufflächen für Milchkühe und deren Einfluss auf Klauenwachstumsparameter und Klauengesundheit im Vergleich zu betonierten Laufflächen; Dissertation Tierärztliche Hochschule Hannover
- SCHEIL, M. (1993): Analyse und Vergleich von instationären Reibzahlmessgeräten – ein Beitrag zur Gleitsicherheit beim menschlichen Gang; Dissertation Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal
- SCHLICHTING, M. C. (1987): Adaption of cattle to different floor types; in: Cattle housing systems, lameness and behaviour, pp. 87-97; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- SCHNEIDER, J. H. (2006): Gussasphalt: Immer mehr Probleme; TOP AGRAR 2/2006, S. R 28-R 30
- SCHRAMM, E. J. (2002): Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung der Nassbremseigenschaften von PKW-Reifen; Dissertation Universität Regensburg
- SCHULZE, K.-H. (1979): Griffigkeit und Rauheit; Handbuch des Straßenbaus, Band 1: Grundlagen und Entwurf, S. 183-258; Hrsg. Wehner, B., Siedek, P. und Schulze, K.-H.; Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- SCOTT, G. B. (1987): Variation in load distribution under the hooves of Frisian heifers; in: Cattle housing systems, lameness and behaviour, pp. 29-36; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- SKIBA, R. et al. (1987): Entwicklung eines normgerechten Prüfverfahrens zur Ermittlung der Gleitsicherheit von Schuhsohlen; Forschungsbericht 526; Hrsg. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund

- SKIBA, R. et al. (1994): Vergleichsuntersuchung zur instationären Reibzahlmessung auf Fußböden; Forschungsbericht 701; Hrsg. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund
- SOBIS, T. (1996): Beitrag zur Mechanik der Mischreibung in der Wirkfuge umformtechnischer Prozesse; Prozesssimulation in der Umformtechnik; Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Institut für Fertigungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; Reihe: PSU: Prozesssimulation in der Umformtechnik, Band 10, Springer Verlag Berlin
- SOMERS, J. G. C. et al. (2003): Prevalence of claw disorders in Dutch dairy cows exposed to several floor systems; *Journal of Dairy Science* 86, pp. 2082-2093
- SOMERS, J. G. C. et al. (2005): Development of claw traits and claw lesions in dairy cows kept on different floor systems; *Journal of Dairy Science* 88, pp. 110-120
- STAEVES, J. (1998): Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung; *Berichte aus Produktion und Umformtechnik*, Band 41, Shaker Verlag Aachen
- STEINER, B. und VAN CAENEGEM, L. (2003): Laufflächen in Ställen tiergerechter gestalten – Ausführung und Sanierung von planbefestigten Laufflächen für Rindvieh; FAT-Bericht Nr. 594; Hrsg. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon
- STRANDBERG, L. (1985): The effect of conditions underfoot on falling and overexertion accidents; *Ergonomics* 28 (1), pp. 131-147
- TELEZHENKO, E. und BERGSTEN, C. (2005): Influence of floor type on the locomotion of dairy cows; *Applied Animal Behaviour Science* 93, pp. 183-197
- TGL 32456 (1983): Stallfußböden – allgemeine Anforderungen, VEB Landbauprojekt Potsdam, Ministerium für Land-, Forst- und Nahrungsmittelgüterwirtschaft, Bereich Landbau und Meliorationsbau, Berlin
- THYSEN, I. (1987): Foot and leg disorders in dairy cattle in different housing systems; in: *Cattle housing systems, lameness and behaviour*, pp. 166-178; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- VAN AMSTEL, S. R., et al. (2004): Moisture content, thickness and lesions of sole horn associated with thin soles in dairy cattle; *Journal of Dairy Science* 87, pp. 757-763
- VAN CAENEGEM, L. et al. (1999): Asphaltböden, eine Alternative für Gärfutterstillos?; FAT-Bericht Nr. 543; Hrsg. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon
- VAN DER SLUIS, S. et al. (2002): Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen; *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 841; Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn

- VAN DER TOL, P. P. J. et al. (2002): The pressure distribution under the bovine claw during square standing on a flat substrate; *Journal of Dairy Science* 85, pp. 1476-1481
- VAN DER TOL, P. P. J. et al. (2003): The vertical ground reaction force and the pressure distribution on the claws of dairy cows while walking on a flat substrate; *Journal of Dairy Science* 86, pp. 2875-2883
- VAN DER TOL, P. P. J. et al. (2004): The effect of preventive trimming on weight bearing and force balance on the claws of dairy cattle; *Journal of Dairy Science* 87, pp. 1732-1738
- VAN DER TOL, P. P. J. et al. (2005): Frictional forces required for unstrained locomotion in dairy cattle; *Journal of Dairy Science* 88, pp. 615-624
- VINCKE, E. et al. (2002): Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete; *International Biodeterioration & Biodegradation* 49, pp. 283-292
- VOKEY, F.-J. et al. (2001): Effects of alley and stall surfaces on indices of claw and leg health in dairy cattle housed in a free-stall barn; *Journal of Dairy Science* 84, pp. 2686-2699
- WAGNER, S. (1996): 3D-Beschreibung der Oberflächen von Feiblechen; Dissertation Universität Stuttgart
- WALLMANN, C.-G. und ASTRÖM, H. (2001): Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety. A literature review; VTI meddelande 911A, 2001; Hrsg. Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping
- WANDEL, H. (1999): Laufflächen für Milchvieh – Anforderungen, Auswahl Erneuerungen; in: Fachtagung Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen am 18./19. März in Stuttgart-Hohenheim; Hrsg. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und ländliches Bauwesen Baden-Württemberg e. V. (ALB Baden Württemberg), Stuttgart
- WARNICK, L. D. et al. (2001): The effect of lameness on milk production in dairy cows; *Journal of Dairy Science* 84, pp. 1988-1997
- WEBER, R. (1985): Trittsicherheit von Stallbodenbelägen; FAT-Bericht 280; Hrsg. Eidgenössische Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), Tännikon
- WEYDERT, M. et al. (2001): Resistance of concrete, asphaltic concrete and mastic asphalt to silage juice; *Journal of Agricultural Engineering Research* 79, pp. 151-157
- WIEDER, R. M. (1988): Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Gleitsicherheit beim menschlichen Gang; Dissertation Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal
- WinSAM (2002): Betriebsanleitung zur Analysesoftware WinSAM (Surface Analysis Modul); Hrsg.: Geiger, M., Lehrstuhl für Fertigungstechnologie Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

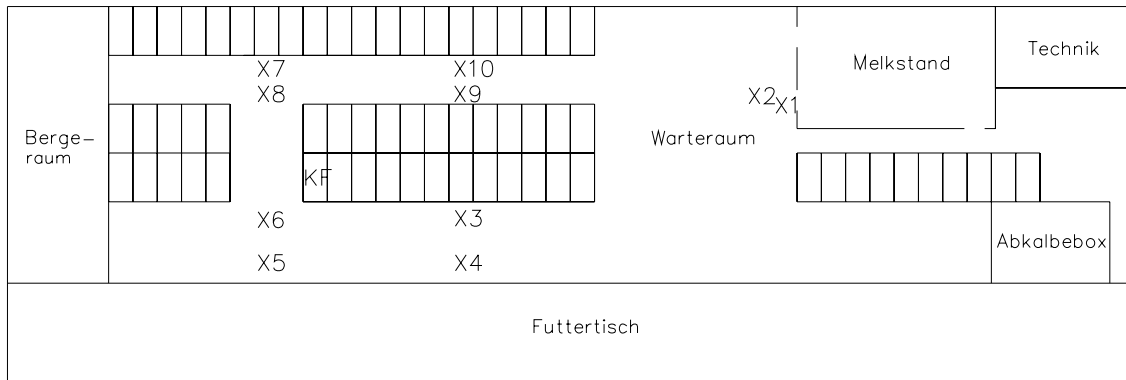
- XIE, C. (2002): Experimentelle Untersuchungen zur Interaktion zwischen PKW-Reifen und Fahrbahn beim Bremsen; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Nr. 486, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
- ZEEB, K. (1987): The influence of the housing system on locomotory activities; in: Cattle housing systems, lameness and behaviour, pp. 101-106; Hrsg. Wierenga, H. K. und Peterse, D. J.; Martinus Nijhoff Publishers Brüssel
- ZEEB, K. und UNGER, W. (1997): Laufgänge und Laufhöfe richtig betonieren, S. 52-54; in: TOP AGRAR extra – Kuhställe billiger bauen, Landwirtschaftsverlag Munster
- ZIRKLER, E. und KHAZAI-MOGHADEM, M. (1982): Untersuchung des Einflusses von Vergütungsmitteln auf Formbeständigkeit und Lebensdauer von Gussasphalt und Asphaltbeton, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 180; Hrsg. Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien
- ZÖSCHER, M. (2000): Mechanische Eigenschaften von Klauenhorn beim Rind: Elastizitätsmodul, Kugeleindruckhärte und Shore-D-Härte in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt und der Position der Klaue; Dissertation Veterinärmedizinische Universität Wien

10 Anhang

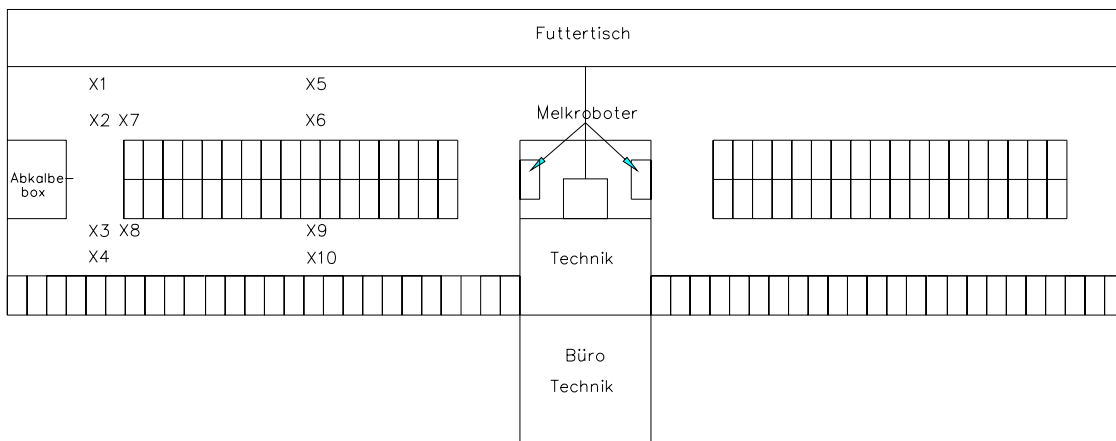
Anhang 1: Ausgewählte Daten der untersuchten Betriebe

Betrieb	Stallausführung	Entmistung	Schieberleisten	Kuhbesatz im Messbereich	Liegeboxenreihen
Gussasphalt 12/2004	Außenklimastall	Faltschieber	Metall	44	3
Gussasphalt 03/2004	Außenklimastall	Klappschieber	Kunststoff	48	3
Gussasphalt 04/2003	Außenklimastall	Klappschieber	Kunststoff	63	5
Gussasphalt 10/1996a	Offenfrontstall	Klappschieber	Kunststoff	70	3
Gussasphalt 12/1996b	Kaltstall	Klappschieber	Metall	40	3
Gussasphalt 12/1994	Kaltstall	Klappschieber	Kunststoff	55	2
Beton 07/2004	Außenklimastall	Klappschieber	Kunststoff	52	3
Beton 11/2003	Außenklimastall	Klappschieber	Kunststoff	35	3
Beton 04/2003	Außenklimastall	Klappschieber	Kunststoff	36	3
Beton 05/1995	Warmstall	Klappschieber	Kunststoff	40	2
Beton 03/1995	Warmstall	Klappschieber	Kunststoff	36	3
Beton 07/1994	Warmstall	Klappschieber	Metall	37	2
Spaltenboden 11/2004	Außenklimastall	/	/	80	3
Spaltenboden 03/2003	Kaltstall	/	/	51	5
Spaltenboden 10/2002	Außenklimastall	/	/	62	4
Spaltenboden 10/1995	Warmstall	/	/	44	2
Spaltenboden 12/1992	Warmstall	Mobil	Gummi	72	5
Spaltenboden 03/1992	Warmstall	/	/	46	4

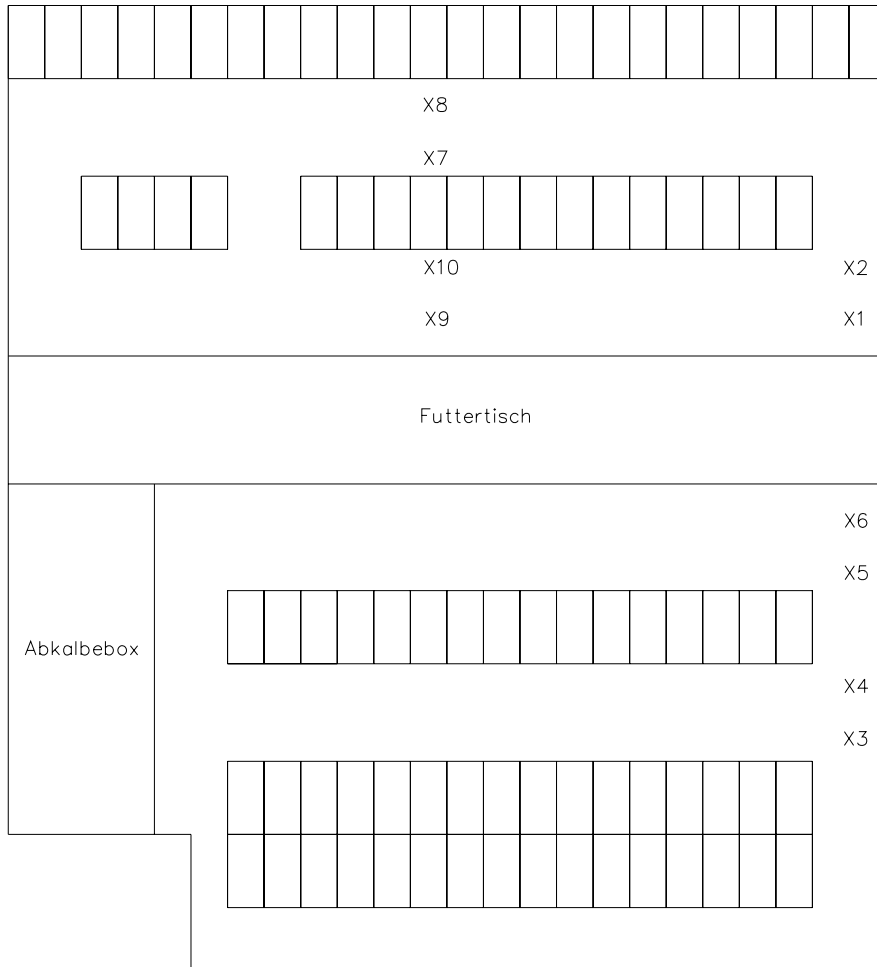
Anhang 2: Grundrisse bzw. Grundrissausschnitte der untersuchten Ställe



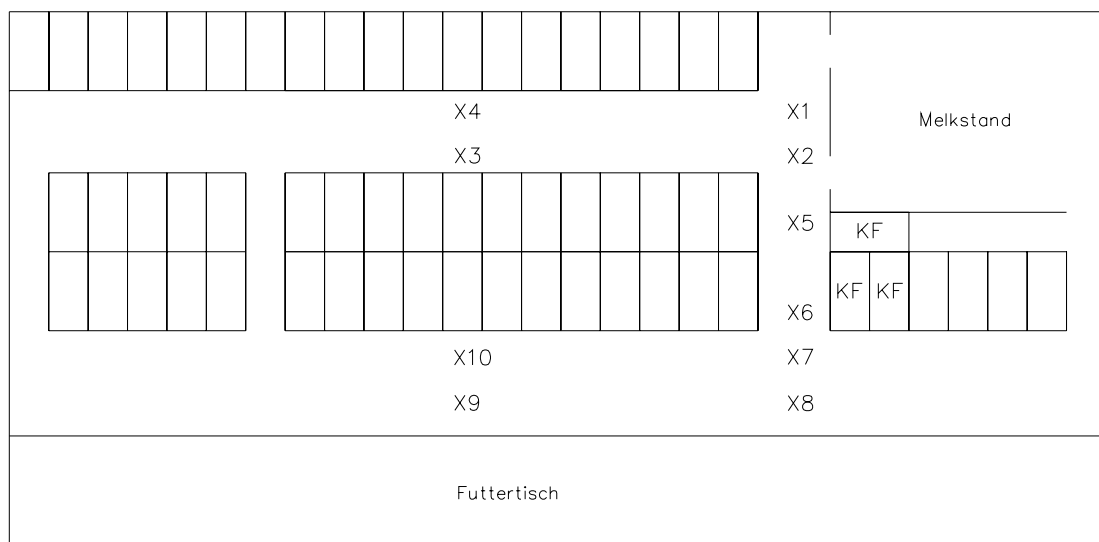
Gussasphalt 12/2004



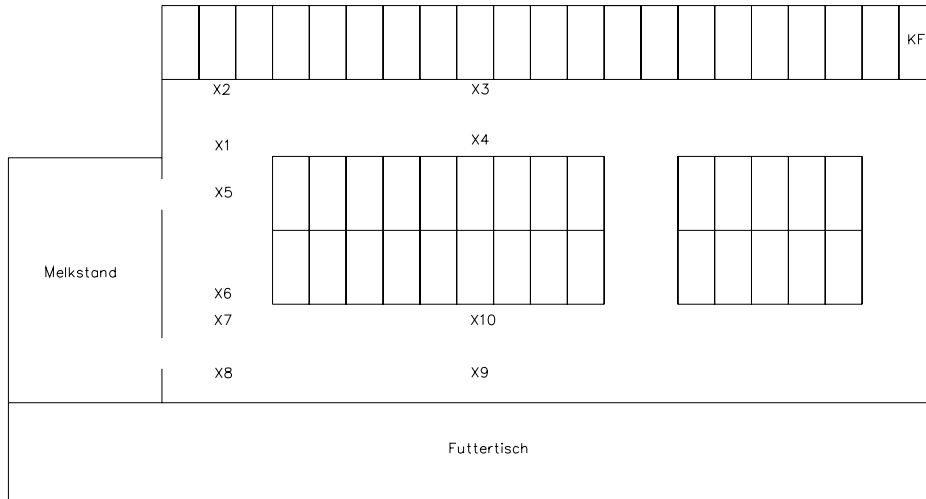
Gussasphalt 03/2004



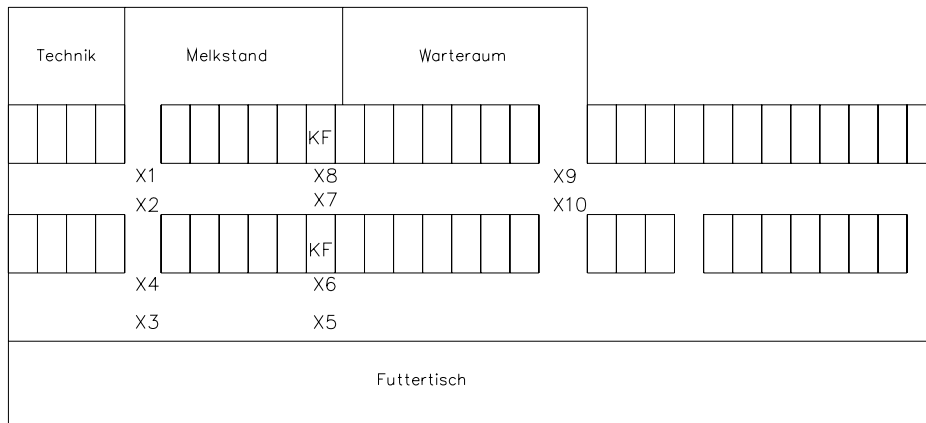
Gussasphalt 04/2003



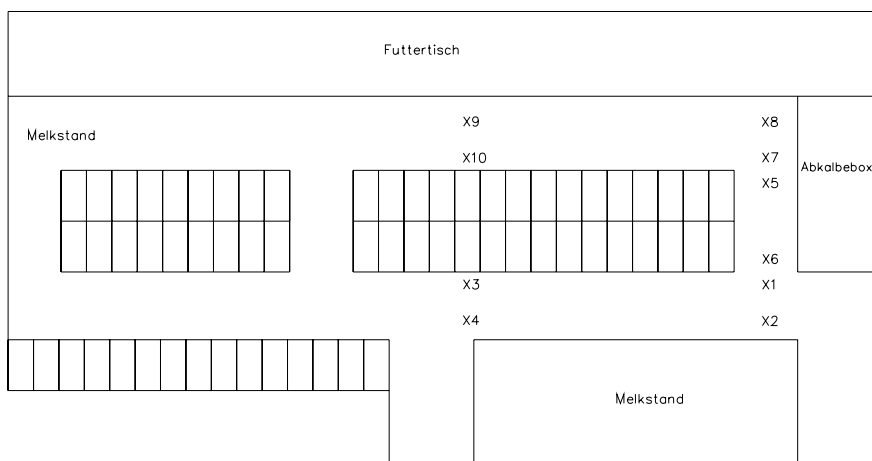
Gussasphalt 10/1996a



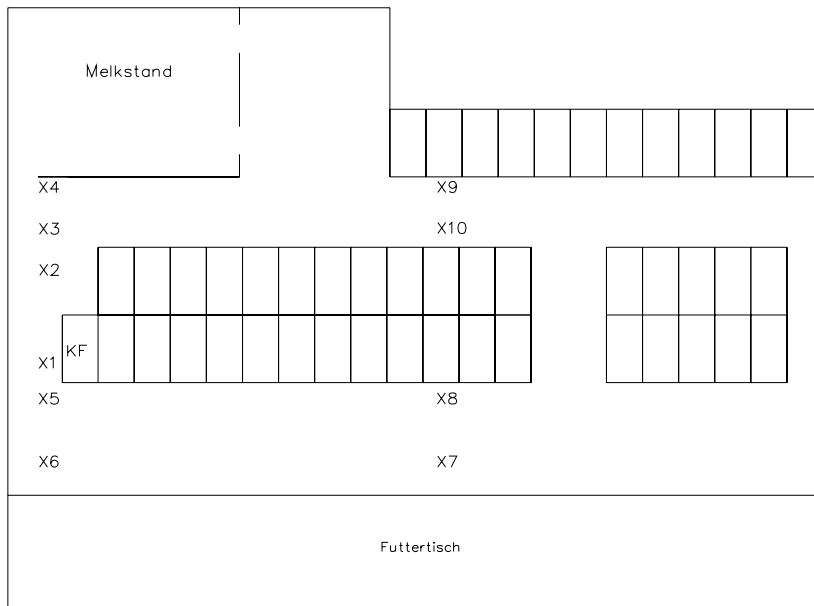
Gussasphalt 10/1996b



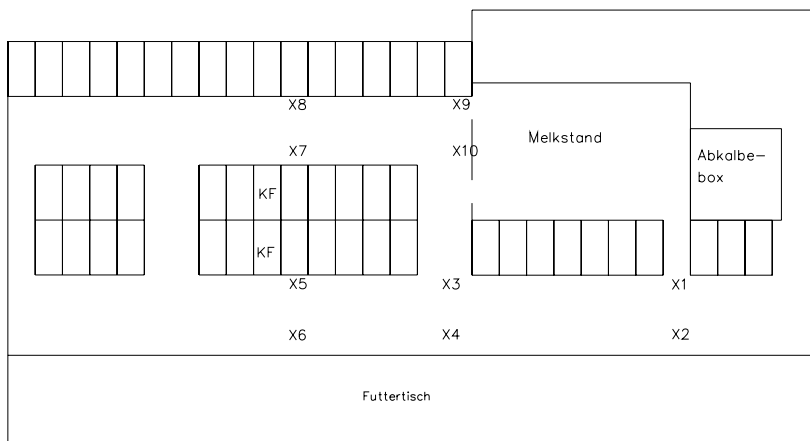
Gussasphalt 12/1994



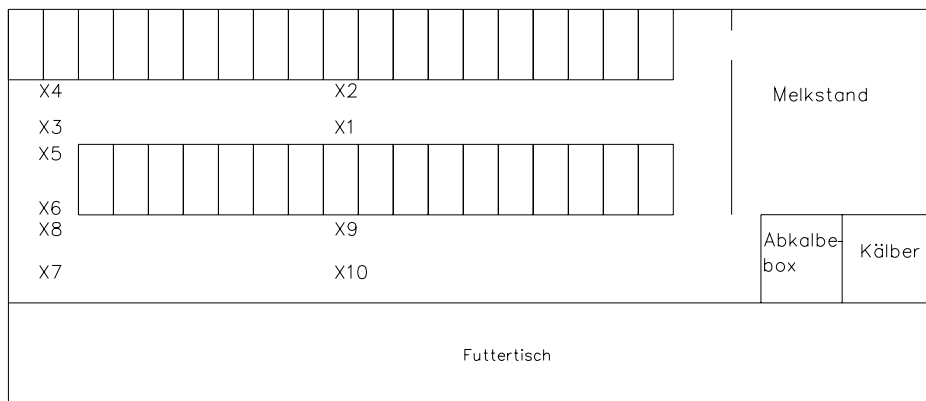
Beton 07/2004



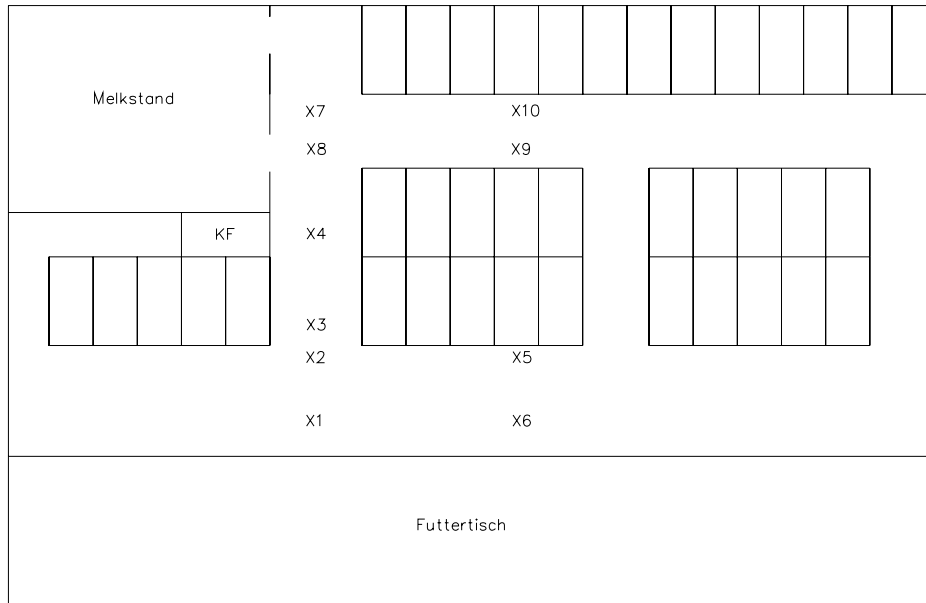
Beton 11/2003



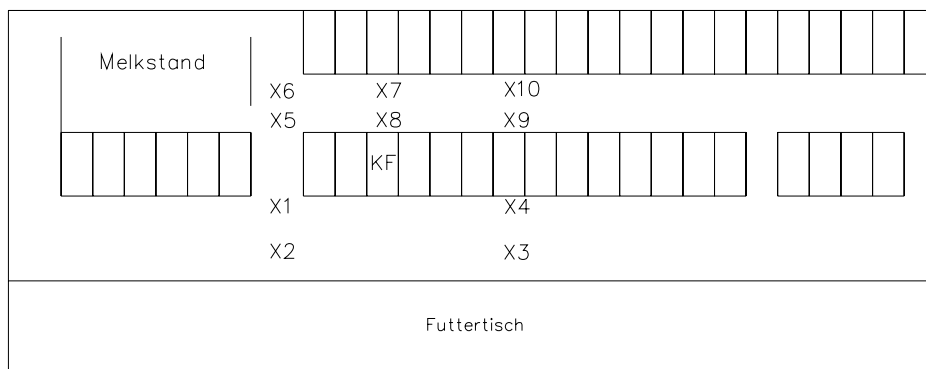
Beton 04/2003



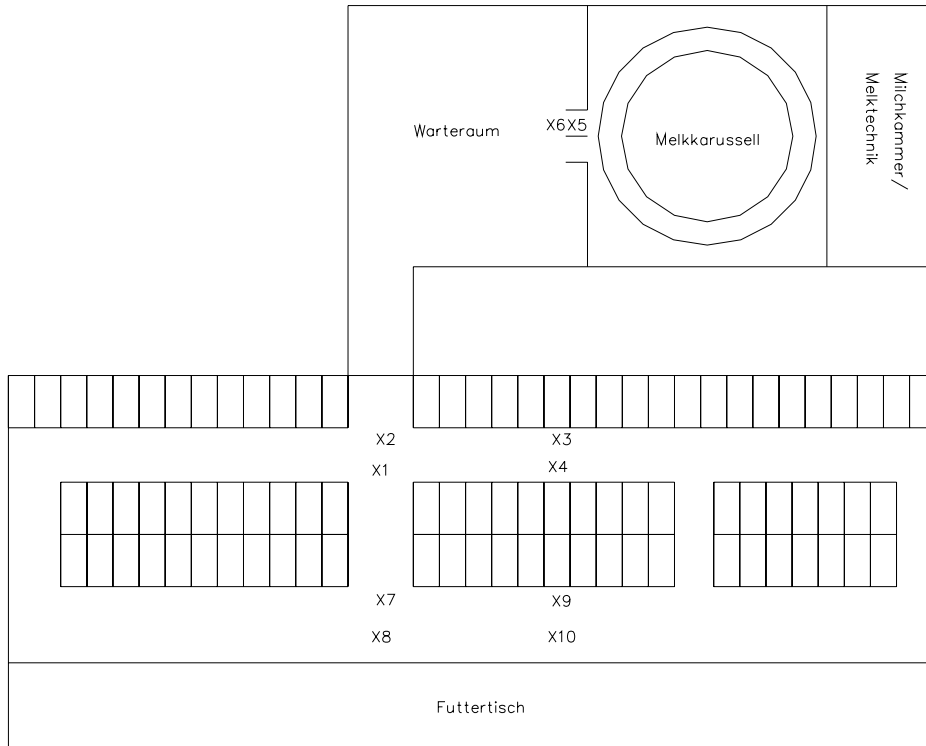
Beton 05/1995



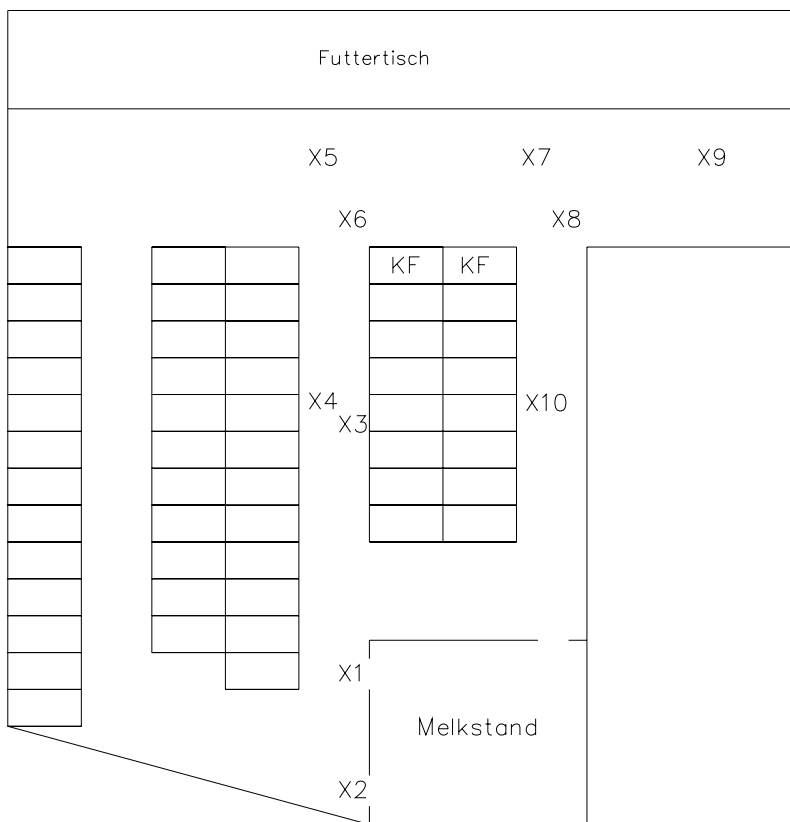
Beton 03/1995



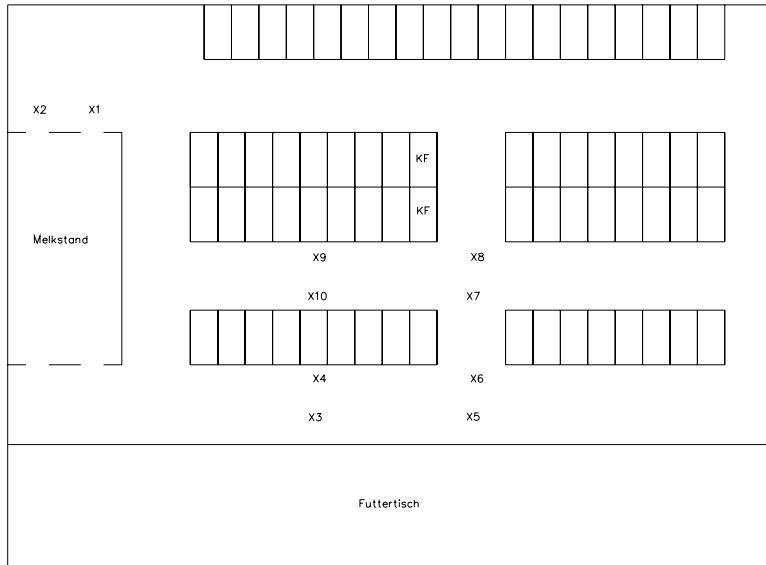
Beton 07/1994



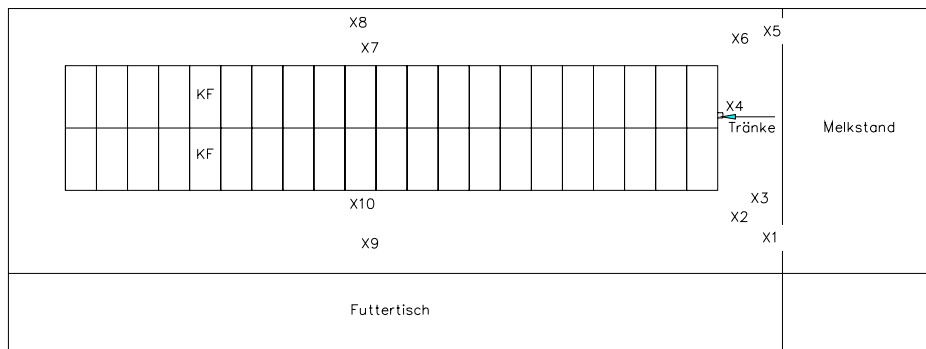
Spaltenboden 11/2004



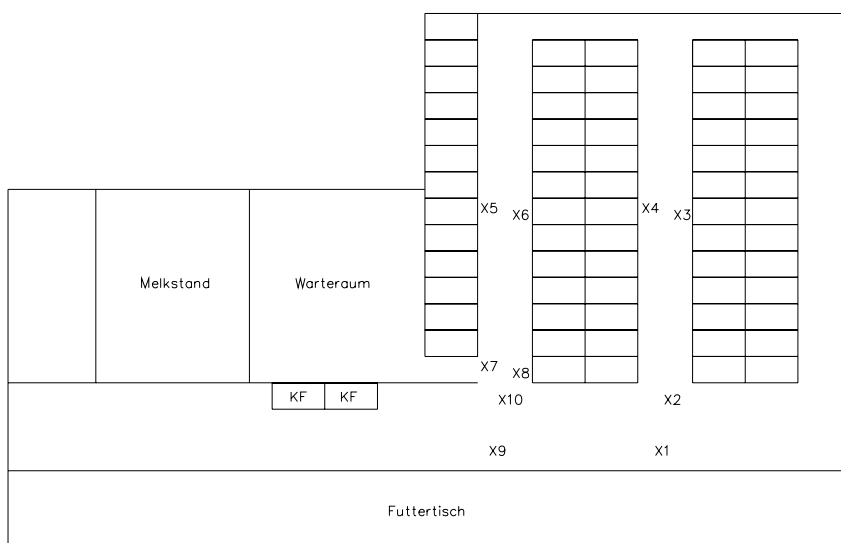
Spaltenboden 03/2003



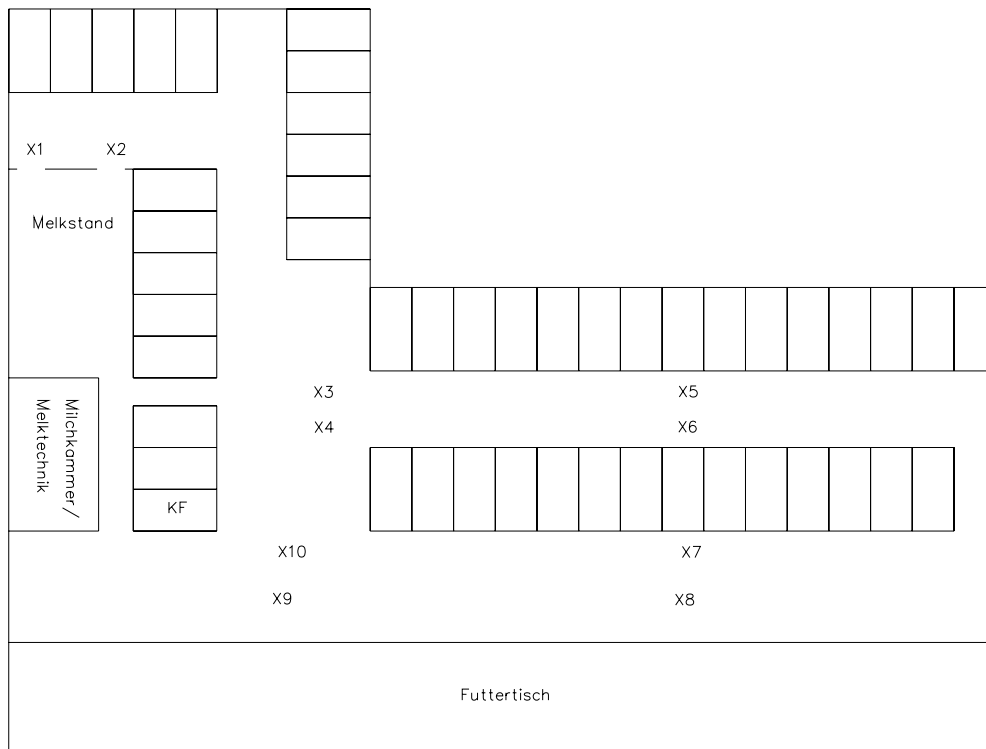
Spaltenboden 10/2002



Spaltenboden 10/1995



Spaltenboden 12/1993



Spaltenboden 03/1992

Anhang 3: Messstellencodierung in den untersuchten Ställen

Legende der Codierungen:

hf: hoch frequentiert

nf: niedrig frequentiert

Erste Ziffer		Zweite Ziffer		Dritte Ziffer	
1	Fressgang	1	Hauptübergang	1	Eintritt Fressgang
				2	ca. 1,20 m vor Fressgitter
				3	Eintritt Liegeboxengang
				4	ca. 0,5 bis 1,20 m vor Liegebox
				5	hinterer Bereich des Fressgangs, falls nicht gleichzeitig vor Liegebox
				6	hinterer Bereich des Liegeboxengangs, falls nicht gleichzeitig vor Liegebox
2	Liegeboxengang	2	außerhalb des Hauptübergangs	1	ca. 1,50 m vor Fressgitter, wenn Messstelle zwischen Liegeboxenreihen
				2	ca. 0,5 bis 1,20 m vor Liegebox
				3	hinterer Bereich des Fressgangs, falls nicht gleichzeitig vor Liegebox
				4	hinterer Bereich des Liegeboxengangs, falls nicht gleichzeitig vor Liegebox
0	frei wählbar	3	frei wählbar	1	Eingang Melkstand
				2	Ausgang Melkstand
				3	auf Übertrieb vor Fressgangeintritt
				4	auf Übertrieb vor Liegeboxengangeintritt
				5	vor Tränke
				6	Eintritt Fressgang
				7	Eintritt Liegeboxengang
				8	vor Kraftfutterstation
				9	hinterer Bereich des Liegeboxengangs

Codierung der Messstellen

Betrieb	Messstelle	Status	Hauptcode	Nebencode
Gussasphalt 12/2004	1	hf	031	
	2	hf	031	
	3	nf	122	
	4	nf	121	
	5	hf	112	
	6	hf	111	
	7	hf	213	
	8	hf	214	
	9	nf	222	
	10	nf	222	
Gussasphalt 03/2004	1	hf	112	
	2	hf	111	
	3	hf	213	
	4	hf	214	
	5	nf	121	
	6	nf	122	
	7	hf	136	
	8	hf	237	
	9	nf	222	
	10	nf	222	
Gussasphalt 04/2003	1	hf	112	
	2	hf	111	
	3	hf	216	
	4	hf	213	
	5	hf	111	
	6	hf	112	
	7	nf	221	
	8	nf	223	
	9	nf	122	
	10	nf	122	
Gussasphalt 10/1996a	1	hf	216	231
	2	hf	213	
	3	hf	222	
	4	hf	222	
	5	hf	034	
	6	hf	033	
	7	nf	111	038
	8	nf	112	
	9	nf	121	
	10	nf	122	
Gussasphalt 10/1996b	1	hf	213	
	2	hf	214	
	3	nf	222	
	4	nf	222	
	5	hf	034	031
	6	hf	033	
	7	hf	111	
	8	hf	112	
	9	nf	121	
	10	nf	122	

Betrieb	Messstelle	Status	Hauptcode	Nebencode
Gussasphalt 12/1994	1	hf	214	032
	2	hf	213	
	3	hf	112	
	4	hf	111	
	5	nf	121	
	6	nf	123	
	7	nf	222	
	8	nf	222	
	9	nf	039	031
	10	nf	037	031
Beton 07/2004	1	hf	113	
	2	hf	116	
	3	nf	222	
	4	nf	223	
	5	hf	034	
	6	hf	033	
	7	hf	111	
	8	hf	112	
	9	nf	121	
	10	nf	122	
Beton 11/2003	1	hf	033	
	2	hf	034	
	3	hf	213	
	4	hf	216	
	5	hf	111	
	6	hf	112	
	7	nf	121	
	8	nf	122	
	9	nf	222	
	10	nf	222	
Beton 04/2003	1	hf	032	123
	2	hf	032	121
	3	hf	111	
	4	hf	112	
	5	nf	122	
	6	nf	121	
	7	nf	222	
	8	nf	222	
	9	hf	222	031
	10	hf	213	
Beton 05/1995	1	nf	222	
	2	nf	222	
	3	hf	213	
	4	hf	214	
	5	hf	034	
	6	hf	033	
	7	hf	112	
	8	hf	111	
	9	nf	122	
	10	nf	123	

Betrieb	Messstelle	Status	Hauptcode	Nebencode
Beton 03/1995	1	hf	112	
	2	hf	111	
	3	hf	033	
	4	hf	034	038
	5	nf	122	
	6	nf	121	
	7	hf	216	
	8	hf	213	
	9	nf	222	
	10	nf	222	
Beton 07/1994	1	hf	111	
	2	hf	112	
	3	nf	122	
	4	nf	125	
	5	hf	213	031
	6	hf	216	031
	7	hf	038	
	8	hf	039	
	9	nf	222	
	10	nf	222	
Spaltenboden 11/2004	1	hf	213	
	2	hf	215	
	3	nf	222	
	4	nf	222	
	5	hf	031	
	6	hf	031	
	7	hf	111	
	8	hf	112	
	9	nf	122	
	10	nf	121	
Spaltenboden 03/2003	1	hf	031	
	2	hf	031	
	3	nf	222	
	4	nf	222	
	5	hf	112	
	6	hf	111	
	7	hf	112	
	8	hf	111	
	9	nf	121	
	10	nf	222	
Spaltenboden 10/2002	1	hf	031	
	2	hf	031	
	3	nf	121	
	4	nf	123	
	5	hf	112	
	6	hf	111	
	7	hf	213	
	8	hf	216	
	9	nf	222	
	10	nf	222	

Betrieb	Messstelle	Status	Hauptcode	Nebencode
Spaltenboden 10/1995	1	hf	112	032
	2	hf	111	
	3	hf	033	
	4	hf	034	035
	5	hf	031	
	6	hf	213	
	7	nf	222	
	8	nf	224	
	9	nf	121	
	10	nf	122	
Spaltenboden 12/1993	1	hf	112	
	2	hf	111	
	3	nf	222	
	4	nf	222	
	5	nf	222	
	6	nf	222	
	7	hf	031	111
	8	hf	031	111
	9	hf	112	
	10	hf	111	
Spaltenboden 03/1992	1	hf	031	
	2	hf	031	
	3	hf	113	
	4	hf	113	
	5	nf	222	
	6	nf	222	
	7	nf	123	
	8	nf	121	
	9	hf	112	
	10	hf	111	

Anhang 4: Umweltparameter während der Untersuchungen

Betrieb	Datum der Untersuchung	Messstelle	Uhrzeit	Bodentemperatur (°C)	Raumtemperatur (°C)	rel. Luftfeuchtigkeit (%)
Gussasphalt 12/2004	16.11.2005	1	8:15	8,6	10,0	78,8
		2	8:50	9,1	8,9	77,7
		3	9:25	10,6	10,3	80,7
		4	9:55	11,1	11,1	80,7
		5	10:10	10,1	11,1	74,2
		6	10:35	10,0	11,0	74,0
		7	11:05	11,4	11,1	76,0
		8	11:25	10,3	11,7	69,3
		9	12:00	11,2	11,6	69,4
		10	12:15	11,3	11,8	69,0
Gussasphalt 03/2004	19.9.2005	1	10:30	10,0	9,4	71,2
		2	11:30	10,0	11,8	69,5
		3	12:35	11,9	13,2	61,8
		4	13:30	12,4	14,3	63,4
		5	14:30	12,8	13,9	62,0
		6	15:20	12,8	13,6	63,3
		7	16:10	12,7	12,8	63,4
		8	16:50	11,7	11,9	66,5
		9	17:30	12,8	14,4	57,5
		10	18:00	12,8	13,0	65,0
Gussasphalt 04/2003	29.9.2005	1	9:00	10,3	12,0	74,0
		2	9:30	11,0	12,4	85,0
		3	10:25	12,3	14,8	79,5
		4	10:50	12,2	15,3	76,8
		5	11:25	13,3	16,7	72,5
		6	12:00	13,8	17,5	71,2
		7	12:50	15,8	21,4	57,0
		8	13:30	17,1	21,5	51,1
		9	14:15	18,0	26,3	36,5
		10	14:50	15,5	23,4	49,8
Gussasphalt 10/1996a	26.10.2005	1	9:25	13,2	16,7	68,0
		2	9:55	14,1	17,2	71,0
		3	10:20	14,6	16,2	68,6
		4	10:40	15,2	16,5	72,6
		5	11:30	14,0	12,3	73,0
		6	11:50	14,2	16,2	70,0
		7	12:20	14,3	16,3	70,3
		8	12:45	15,5	16,9	71,0
		9	13:15	16,1	17,5	71,2
		10	13:40	16,6	19,6	63,0

Betrieb	Datum der Untersuchung	Messstelle	Uhrzeit	Bodentemperatur (°C)	Raumtemperatur (°C)	rel. Luftfeuchtigkeit (%)
Gussasphalt 10/1996b	27.10.2005	1	11:20	13,7	13,7	82,9
		2	11:45	11,8	14,2	73,0
		3	12:10	12,2	14,5	76,1
		4	12:55	14,4	16,5	70,3
		5	13:15	12,8	16,6	66,7
		6	13:30	12,7	17,1	66,0
		7	13:50	13,0	18,1	64,1
		8	14:10	13,0	17,3	70,0
		9	14:35	13,0	17,9	67,5
		10	15:00	13,3	17,5	73,2
Gussasphalt 12/1994	31.10.2005	1	9:55	10,0	8,5	92,0
		2	10:10	9,9	8,4	94,8
		3	10:40	9,2	8,5	89,8
		4	11:10	9,4	9,5	88,7
		5	11:40	10,2	9,4	85,1
		6	12:00	10,3	9,8	84,4
		7	12:30	10,7	10,4	81,7
		8	12:55	10,9	11,1	79,3
		9	13:20	10,3	11,2	81,2
		10	13:45	10,7	12,8	77,8
Beton 07/2004	18.10.2005	1	9:30	6,5	6,8	66,0
		2	10:00	6,5	6,5	65,2
		3	10:30	7,2	7,5	66,0
		4	11:00	6,5	8,0	60,0
		5	11:30	7,8	8,6	58,7
		6	12:00	7,8	9,4	65,5
		7	12:30	8,6	10,3	51,2
		8	13:10	9,2	10,7	52,5
		9	13:45	9,9	11,1	51,9
		10	14:15	9,8	11,9	52,3
Beton 11/2003	25.10.2005	1	11:10	11,6	12,2	80,3
		2	11:30	11,2	12,7	78,2
		3	11:50	11,4	13,4	74,4
		4	12:05	11,4	13,7	73,4
		5	12:35	12,3	14,2	74,7
		6	13:00	13,2	14,7	77,8
		7	13:20	14,2	19,1	73,5
		8	13:50	14,0	18,1	61,6
		9	14:15	13,1	15,8	70,7
		10	14:40	13,1	15,7	73,2

Betrieb	Datum der Untersuchung	Messstelle	Uhrzeit	Bodentemperatur (°C)	Raumtemperatur (°C)	rel. Luftfeuchtigkeit (%)
Beton 04/2003	6.10.2005	1	9:45	14,7	15,7	76,1
		2	10:15	15,5	15,5	72,9
		3	10:45	15,1	15,8	71,0
		4	11:10	14,9	15,7	70,5
		5	11:40	16,0	16,3	73,2
		6	12:10	15,6	17,8	67,2
		7	13:15	16,4	17,8	63,1
		8	13:45	16,7	18,3	63,3
		9	14:05	16,1	18,4	62,5
		10	14:25	16,0	20,8	56,3
Beton 05/1995	18.11.2005	1	9:30	6,5	5,2	77,3
		2	9:55	6,4	4,1	83,1
		3	10:15	4,4	3,7	83,3
		4	10:35	5,4	4,5	80,2
		5	10:55	4,3	4,0	83,8
		6	11:15	4,7	4,4	81,8
		7	11:50	6,2	3,7	90,5
		8	12:15	5,7	4,2	91,6
		9	12:40	8,1	3,7	85,0
		10	13:00	7,5	4,5	85,0
Beton 03/1995	21.11.2005	1	9:30	9,6	9,1	75,6
		2	10:00	8,7	7,7	81,4
		3	10:25	9,1	9,6	86,4
		4	10:45	8,3	9,3	83,3
		5	11:05	12,2	9,6	87,5
		6	11:30	10,8	9,7	85,0
		7	12:00	6,0	9,0	83,0
		8	12:20	7,9	7,9	82,0
		9	12:40	11,2	8,3	83,3
		10	13:00	11,2	7,6	90,4
Beton 07/1994	17.11.2005	1	9:15	7,9	5,5	70,5
		2	9:35	8,0	5,1	73,2
		3	9:55	7,2	6,7	77,5
		4	10:15	7,1	5,5	80,7
		5	10:40	7,2	5,6	75,4
		6	11:05	6,6	5,7	73,7
		7	11:30	9,0	7,1	69,0
		8	11:50	9,0	6,6	70,8
		9	12:20	9,4	7,0	73,4
		10	12:50	9,5	7,0	68,4

Betrieb	Datum der Untersuchung	Messstelle	Uhrzeit	Bodentemperatur (°C)	Raumtemperatur (°C)	rel. Luftfeuchtigkeit (%)
Spaltenboden 11/2004	21.9.2005	1	9:20	9,0	12,1	58,0
		2	10:15	10,0	12,3	73,6
		3	11:05	11,2	13,3	69,3
		4	11:35	11,2	14,1	60,5
		5	12:49	11,0	12,7	66,6
		6	13:30	10,8	12,8	68,6
		7	13:45	12,2	14,5	56,7
		8	15:10	11,9	15,1	55,8
		9	16:10	13,4	15,7	55,6
		10	16:35	13,4	16,2	52,6
Spaltenboden 03/2003	19.10.2005	1	8:50	7,7	7,7	76,3
		2	9:20	7,1	7,1	77,1
		3	9:50	9,3	8,1	72,5
		4	10:20	8,8	7,8	70,3
		5	10:50	8,6	8,4	68,1
		6	11:30	7,7	8,3	69,5
		7	12:10	7,9	8,3	68,1
		8	12:30	8,0	8,4	66,8
		9	13:00	8,5	8,2	68,4
		10	13:35	8,8	8,8	62,0
Spaltenboden 10/2002	26.9.2005	1	9:00	10,2	14,5	78,4
		2	9:30	11,4	14,4	84,7
		3	10:40	14,5	16,6	77,5
		4	10:50	13,3	17,1	75,3
		5	11:50	14,8	18,4	73,7
		6	12:30	15,3	18,6	68,0
		7	13:10	17,0	19,8	67,9
		8	13:50	16,5	20,0	67,0
		9	14:20	16,5	20,1	65,4
		10	15:00	16,6	20,5	66,9
Spaltenboden 10/1995	4.10.2005	1	9:00	15,0	15,2	86,3
		2	9:20	14,7	15,2	85,4
		3	9:50	14,5	15,4	88,2
		4	10:10	14,6	15,8	86,2
		5	10:45	14,8	16,2	86,9
		6	11:05	14,6	15,8	86,8
		7	11:50	15,5	15,9	86,4
		8	13:40	15,6	16,6	87,5
		9	14:10	16,1	18,1	84,0
		10	14:30	16,5	18,2	86,0

Betrieb	Datum der Untersuchung	Messstelle	Uhrzeit	Bodentemperatur (°C)	Raumtemperatur (°C)	rel. Luftfeuchtigkeit (%)
Spaltenboden 12/1993	20.10.2005	1	9:30	9,5	9,5	73,3
		2	9:50	7,8	7,2	80,4
		3	10:20	11,5	9,0	86,2
		4	10:50	10,7	11,6	74,8
		5	11:30	12,7	13,4	72,6
		6	12:00	11,8	12,9	69,5
		7	12:40	11,4	14,4	70,3
		8	13:10	12,0	14,1	67,6
		9	13:40	10,9	14,4	69,0
		10	14:10	11,9	14,1	67,2
Spaltenboden 03/1992	29.9.2005	1	9:30	15,2	14,3	80,3
		2	10:00	15,0	14,0	83,1
		3	10:30	14,4	15,0	87,6
		4	11:15	15,0	14,8	84,0
		5	11:40	15,4	15,3	85,4
		6	12:20	16,0	15,2	83,3
		7	13:00	15,5	16,3	83,4
		8	13:30	15,6	16,0	87,9
		9	14:30	16,2	16,1	84,9
		10	15:00	16,1	16,1	80,6

Anhang 5: Korrelationskoeffizienten zwischen Kenngrößen der Reibungsmessung und der Topografiemessung

Gussasphalt

Kenngröße	μG	μH	NPA	μ_{ssa}	c_{top}	c_{bot}	S_t	S_a	S_q	S_k
μG		0,650	-0,435	0,693	0,518	-0,426	0,473	0,418	0,433	0,409
		<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001
μH	0,650		-0,182	0,237	0,087	0,025	0,026	-0,021	-0,010	-0,027
	<0,001		0,165	0,068	0,511	0,848	0,842	0,872	0,942	0,837
NPA	-0,435	-0,182		-0,736	-0,478	0,511	-0,501	-0,455	-0,467	-0,439
	0,001	0,165		<0,001	0,000	<0,001	<0,001	0,000	0,000	0,000
μ_{ssa}	0,693	0,237	-0,736		0,818	-0,776	0,803	0,750	0,765	0,734
	<0,001	0,068	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{top}	0,518	0,087	-0,478	0,818		-0,959	0,988	0,973	0,979	0,961
	<0,001	0,511	0,000	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{bot}	-0,426	0,025	0,511	-0,776	-0,959		-0,991	-0,982	-0,986	-0,972
	0,001	0,848	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_t	0,473	0,026	-0,501	0,803	0,988	-0,991		0,988	0,993	0,977
	0,000	0,842	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
S_a	0,418	-0,021	-0,455	0,750	0,973	-0,982	0,988		0,999	0,993
	0,001	0,872	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
S_q	0,433	-0,010	-0,467	0,765	0,979	-0,986	0,993	0,999		0,989
	0,001	0,942	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
S_k	0,409	-0,027	-0,439	0,734	0,961	-0,972	0,977	0,993	0,989	
	0,001	0,837	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
S_{pk}	0,504	0,139	-0,452	0,791	0,957	-0,883	0,926	0,894	0,905	0,857
	<0,001	0,291	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{vk}	0,442	-0,035	-0,522	0,771	0,924	-0,980	0,964	0,954	0,961	0,935
	0,000	0,788	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{r1}	-0,163	-0,085	0,153	-0,083	0,149	-0,098	0,122	0,111	0,118	0,047
	0,213	0,517	0,243	0,526	0,257	0,456	0,351	0,396	0,369	0,719
S_{r2}	-0,401	-0,099	0,352	-0,354	-0,213	0,241	-0,231	-0,219	-0,233	-0,177
	0,002	0,454	0,006	0,006	0,102	0,064	0,076	0,093	0,073	0,175
V_{ma}	0,426	-0,025	-0,511	0,776	0,959	-1,000	0,991	0,982	0,986	0,972
	0,001	0,848	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{op}	0,519	0,086	-0,477	0,819	1,000	-0,959	0,988	0,974	0,979	0,961
	<0,001	0,512	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{cl}	0,370	0,089	-0,411	0,578	0,740	-0,752	0,754	0,711	0,724	0,682
	0,004	0,499	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
a_{clm}	-0,156	0,157	0,385	-0,588	-0,717	0,709	-0,720	-0,738	-0,733	-0,738
	0,234	0,232	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{clm}	0,491	0,038	-0,492	0,811	0,991	-0,970	0,990	0,982	0,985	0,973
	<0,001	0,772	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
γ_{clm}	0,275	0,075	-0,168	0,389	0,486	-0,323	0,402	0,419	0,416	0,425
	0,034	0,571	0,201	0,002	<0,001	0,012	0,001	0,001	0,001	0,001
N_{clm}	-0,350	-0,078	0,458	-0,631	-0,825	0,765	-0,800	-0,797	-0,799	-0,777
	0,006	0,553	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{opm}	-0,265	0,019	0,431	-0,620	-0,776	0,718	-0,752	-0,750	-0,751	-0,736
	0,041	0,886	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{mam}	-0,356	-0,027	0,472	-0,647	-0,845	0,790	-0,824	-0,822	-0,824	-0,804
	0,005	0,839	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
$N_{cl(Aclm)}$	-0,367	-0,095	0,474	-0,646	-0,827	0,768	-0,803	-0,798	-0,801	-0,777
	0,004	0,469	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
$a_{cl(Aclm)}$	0,195	0,264	-0,332	0,344	0,316	-0,277	0,298	0,238	0,255	0,193
	0,135	0,042	0,009	0,007	0,014	0,032	0,021	0,067	0,049	0,139
$N_{cl(clm)}$	0,045	0,102	0,215	-0,257	-0,235	0,200	-0,218	-0,213	-0,214	-0,200
	0,732	0,438	0,099	0,048	0,071	0,126	0,094	0,102	0,100	0,126
S_{sk}	0,022	0,190	0,136	-0,011	-0,010	0,214	-0,122	-0,145	-0,139	-0,169
	0,868	0,145	0,301	0,933	0,938	0,100	0,352	0,269	0,289	0,196
S_{ku}	0,149	0,288	-0,112	0,053	-0,127	0,120	-0,124	-0,234	-0,209	-0,261
	0,257	0,026	0,395	0,688	0,335	0,363	0,345	0,072	0,110	0,044

Kenngröße	S _{pk}	S _{vk}	S _{r1}	S _{r2}	V _{ma}	V _{op}	V _{el}	α _{clm}	c _{clm}	γ _{clm}
μG	0,504	0,442	-0,163	-0,401	0,426	0,519	0,370	-0,156	0,491	0,275
	<0,001	0,000	0,213	0,002	0,001	<0,001	0,004	0,234	<0,001	0,034
μH	0,139	-0,035	-0,085	-0,099	-0,025	0,086	0,089	0,157	0,038	0,075
	0,291	0,788	0,517	0,454	0,848	0,512	0,499	0,232	0,772	0,571
NPA	-0,452	-0,522	0,153	0,352	-0,511	-0,477	-0,411	0,385	-0,492	-0,168
	0,000	<0,001	0,243	0,006	<0,001	0,000	0,001	0,002	<0,001	0,201
μ_{ssa}	0,791	0,771	-0,083	-0,354	0,776	0,819	0,578	-0,588	0,811	0,389
	<0,001	<0,001	0,526	0,006	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002
c_{top}	0,957	0,924	0,149	-0,213	0,959	1,000	0,740	-0,717	0,991	0,486
	<0,001	<0,001	0,257	0,102	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{bot}	-0,883	-0,980	-0,098	0,241	-1,000	-0,959	-0,752	0,709	-0,970	-0,323
	<0,001	<0,001	0,456	0,064	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,012
S_t	0,926	0,964	0,122	-0,231	0,991	0,988	0,754	-0,720	0,990	0,402
	<0,001	<0,001	0,351	0,076	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
S_a	0,894	0,954	0,111	-0,219	0,982	0,974	0,711	-0,738	0,982	0,419
	<0,001	<0,001	0,396	0,093	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
S_q	0,905	0,961	0,118	-0,233	0,986	0,979	0,724	-0,733	0,985	0,416
	<0,001	<0,001	0,369	0,073	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
S_k	0,857	0,935	0,047	-0,177	0,972	0,961	0,682	-0,738	0,973	0,425
	<0,001	<0,001	0,719	0,175	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
S_{pk}		0,839	0,344	-0,173	0,883	0,956	0,766	-0,644	0,932	0,502
		<0,001	0,007	0,186	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{vk}	0,839		0,042	-0,362	0,980	0,923	0,726	-0,679	0,936	0,258
	<0,001		0,748	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,047
S_{r1}	0,344	0,042		0,348	0,098	0,146	0,264	-0,061	0,126	0,260
	0,007	0,748		0,006	0,456	0,264	0,042	0,641	0,338	0,045
S_{r2}	-0,173	-0,362	0,348		-0,240	-0,213	-0,192	0,010	-0,206	0,196
	0,186	0,004	0,006		0,064	0,102	0,142	0,941	0,114	0,134
V_{ma}	0,883	0,980	0,098	-0,240		0,959	0,752	-0,709	0,970	0,323
	<0,001	<0,001	0,456	0,064		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,012
V_{op}	0,956	0,923	0,146	-0,213	0,959		0,734	-0,720	0,990	0,487
	<0,001	<0,001	0,264	0,102	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{el}	0,766	0,726	0,264	-0,192	0,752	0,734		-0,274	0,752	0,324
	<0,001	<0,001	0,042	0,142	<0,001	<0,001		0,034	<0,001	0,012
α_{clm}	-0,644	-0,679	-0,061	0,010	-0,709	-0,720	-0,274		-0,713	-0,388
	<0,001	<0,001	0,641	0,941	<0,001	<0,001	0,034		<0,001	0,002
c_{clm}	0,932	0,936	0,126	-0,206	0,970	0,990	0,752	-0,713		0,505
	<0,001	<0,001	0,338	0,114	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
γ_{clm}	0,502	0,258	0,260	0,196	0,323	0,487	0,324	-0,388	0,505	
	<0,001	0,047	0,045	0,134	0,012	<0,001	0,012	0,002	<0,001	
N_{clm}	-0,828	-0,715	-0,279	0,080	-0,765	-0,825	-0,606	0,739	-0,806	-0,563
	<0,001	<0,001	0,031	0,542	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{opm}	-0,765	-0,674	-0,192	0,021	-0,718	-0,778	-0,463	0,899	-0,758	-0,541
	<0,001	<0,001	0,142	0,875	<0,001	<0,001	0,000	<0,001	<0,001	<0,001
N_{mam}	-0,838	-0,745	-0,283	0,063	-0,790	-0,845	-0,629	0,752	-0,830	-0,576
	<0,001	<0,001	0,029	0,631	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{cl(Aclm)}	-0,833	-0,720	-0,280	0,091	-0,768	-0,827	-0,615	0,750	-0,810	-0,571
	<0,001	<0,001	0,030	0,491	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
α_{cl(Aclm)}	0,432	0,251	0,411	0,013	0,278	0,315	0,303	-0,293	0,291	0,217
	0,001	0,053	0,001	0,919	0,032	0,014	0,019	0,023	0,024	0,096
N_{cl(clm)}	-0,255	-0,178	-0,171	-0,127	-0,200	-0,238	0,099	0,715	-0,224	-0,259
	0,049	0,174	0,192	0,332	0,126	0,067	0,451	<0,001	0,085	0,046
S_{sk}	0,167	-0,297	0,547	0,347	-0,214	-0,010	-0,018	0,062	-0,056	0,562
	0,201	0,021	<0,001	0,007	0,101	0,939	0,890	0,641	0,673	<0,001
S_{ku}	-0,038	-0,087	0,000	-0,117	-0,119	-0,129	0,084	0,256	-0,155	-0,337
	0,770	0,508	0,998	0,372	0,363	0,326	0,523	0,048	0,236	0,008

Kenngröße	N_{clm}	N_{opm}	N_{mam}	$N_{cl(Aclm)}$	$\alpha_{cl(Aclm)}$	$N_{cl(clm)}$	S_{sk}	S_{ku}
μ_G	-0,350	-0,265	-0,356	-0,367	0,195	0,045	0,021	0,317
	0,006	0,041	0,005	0,004	0,135	0,732	0,876	0,015
μ_H	-0,078	0,019	-0,027	-0,095	0,264	0,102	0,217	0,398
	0,553	0,886	0,839	0,469	0,042	0,438	0,096	0,002
NPA	0,458	0,431	0,472	0,474	-0,332	0,215	0,206	-0,114
	0,000	0,001	0,000	0,000	0,009	0,099	0,115	0,392
μ_{ssa}	-0,631	-0,620	-0,647	-0,646	0,344	-0,257	-0,034	0,168
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,007	0,048	0,795	0,207
c_{top}	-0,825	-0,776	-0,845	-0,827	0,316	-0,235	0,020	-0,097
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,014	0,071	0,882	0,470
c_{bot}	0,765	0,718	0,790	0,768	-0,277	0,200	0,188	0,170
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,032	0,126	0,150	0,203
S_t	-0,800	-0,752	-0,824	-0,803	0,298	-0,218	-0,094	-0,138
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,021	0,094	0,474	0,302
S_a	-0,797	-0,750	-0,822	-0,798	0,238	-0,213	-0,117	-0,258
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,067	0,102	0,372	0,050
S_q	-0,799	-0,751	-0,824	-0,801	0,255	-0,214	-0,111	-0,224
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,049	0,100	0,399	0,091
S_k	-0,777	-0,736	-0,804	-0,777	0,193	-0,200	-0,143	-0,301
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,139	0,126	0,277	0,022
S_{pk}	-0,828	-0,765	-0,838	-0,833	0,432	-0,255	0,201	0,045
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,049	0,124	0,740
S_{vk}	-0,715	-0,674	-0,745	-0,720	0,251	-0,178	-0,266	-0,124
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,053	0,174	0,040	0,355
S_{r1}	-0,279	-0,192	-0,283	-0,280	0,411	-0,171	0,602	0,009
	0,031	0,142	0,029	0,030	0,001	0,192	<0,001	0,946
S_{r2}	0,080	0,021	0,063	0,091	0,013	-0,127	0,391	-0,290
	0,542	0,875	0,631	0,491	0,919	0,332	0,002	0,027
V_{ma}	-0,765	-0,718	-0,790	-0,768	0,278	-0,200	-0,188	-0,170
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,032	0,126	0,150	0,203
V_{on}	-0,825	-0,778	-0,845	-0,827	0,315	-0,238	0,020	-0,100
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,014	0,067	0,882	0,455
V_{cl}	-0,606	-0,463	-0,629	-0,615	0,303	0,099	0,014	0,159
	<0,001	0,000	<0,001	<0,001	0,019	0,451	0,916	0,233
α_{clm}	0,739	0,899	0,752	0,750	-0,293	0,715	0,034	0,430
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,023	<0,001	0,797	0,001
c_{clm}	-0,806	-0,758	-0,830	-0,810	0,291	-0,224	-0,027	-0,140
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,024	0,085	0,840	0,296
γ_{clm}	-0,563	-0,541	-0,576	-0,571	0,217	-0,259	0,598	-0,153
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,096	0,046	<0,001	0,250
N_{clm}		0,915	0,981	0,994	-0,513	0,395	-0,165	0,234
		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	0,207	0,077
N_{opm}	0,915		0,908	0,920	-0,469	0,633	-0,152	0,297
	<0,001		<0,001	<0,001	0,000	<0,001	0,246	0,024
N_{mam}	0,981	0,908		0,976	-0,464	0,388	-0,146	0,259
	<0,001	<0,001		<0,001	0,000	0,002	0,266	0,050
$N_{cl(Aclm)}$	0,994	0,920	0,976		-0,528	0,424	-0,162	0,224
	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	0,001	0,216	0,091
$\alpha_{cl(Aclm)}$	-0,513	-0,469	-0,464	-0,528		-0,430	0,293	0,198
	<0,001	0,000	0,000	<0,001		0,001	0,023	0,136
$N_{cl(clm)}$	0,395	0,633	0,388	0,424	-0,430		-0,208	0,173
	0,002	<0,001	0,002	0,001	0,001		0,110	0,193
S_{sk}	-0,122	-0,123	-0,097	-0,124	0,258	-0,229		-0,149
	0,353	0,349	0,460	0,347	0,046	0,079		0,255
S_{ku}	0,141	0,164	0,159	0,141	0,274	0,041	-0,149	
	0,283	0,211	0,224	0,283	0,034	0,757	0,255	

Beton

Kenngröße	μ_G	μ_H	NPA	μ_{ssa}	c_{top}	c_{bot}	S_t	S_a	S_q	S_k
μ_G		0,792	-0,591	0,626	0,433	-0,443	0,456	0,373	0,390	0,353
		<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,000	0,000	0,003	0,002	0,006
μ_H	0,792		-0,547	0,592	0,415	-0,417	0,433	0,382	0,395	0,369
	<0,001		<0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,004
NPA	-0,591	-0,547		-0,852	-0,736	0,602	-0,698	-0,609	-0,629	-0,557
	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
μ_{ssa}	0,626	0,592	-0,852		0,835	-0,682	0,792	0,638	0,672	0,578
	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{top}	0,433	0,415	-0,736	0,835		-0,843	0,962	0,873	0,902	0,816
	0,001	0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{bot}	-0,443	-0,417	0,602	-0,682	-0,843		-0,958	-0,913	-0,932	-0,868
	0,000	0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_t	0,456	0,433	-0,698	0,792	0,962	-0,958		0,930	0,955	0,877
	0,000	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
S_a	0,373	0,382	-0,609	0,638	0,873	-0,913	0,930		0,996	0,981
	0,003	0,003	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
S_q	0,390	0,395	-0,629	0,672	0,902	-0,932	0,955	0,996		0,966
	0,002	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
S_k	0,353	0,369	-0,557	0,578	0,816	-0,868	0,877	0,981	0,966	
	0,006	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
S_{pk}	0,382	0,347	-0,648	0,767	0,893	-0,629	0,795	0,612	0,667	0,513
	0,003	0,007	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{vk}	0,405	0,384	-0,516	0,615	0,710	-0,915	0,845	0,729	0,769	0,640
	0,001	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{r1}	0,045	0,077	-0,261	0,267	0,237	0,089	0,081	-0,035	-0,003	-0,125
	0,731	0,556	0,044	0,039	0,068	0,500	0,539	0,788	0,982	0,342
S_{r2}	0,009	0,066	-0,022	0,011	-0,011	0,249	-0,133	-0,085	-0,109	0,019
	0,944	0,617	0,865	0,931	0,932	0,055	0,311	0,516	0,406	0,884
V_{ma}	0,443	0,417	-0,602	0,682	0,843	-1,000	0,958	0,913	0,932	0,868
	0,000	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{op}	0,428	0,411	-0,734	0,834	1,000	-0,841	0,961	0,873	0,902	0,815
	0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{cl}	0,562	0,430	-0,314	0,287	0,175	-0,285	0,239	0,181	0,185	0,180
	<0,001	0,001	0,015	0,026	0,180	0,027	0,066	0,166	0,157	0,168
a_{clm}	0,004	-0,090	0,340	-0,335	-0,477	0,494	-0,506	-0,528	-0,532	-0,522
	0,975	0,494	0,008	0,009	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{clm}	0,397	0,390	-0,713	0,830	0,954	-0,823	0,927	0,825	0,857	0,755
	0,002	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
γ_{clm}	-0,015	0,038	-0,355	0,377	0,365	-0,018	0,203	0,119	0,138	0,080
	0,912	0,771	0,005	0,003	0,004	0,894	0,120	0,364	0,292	0,543
N_{clm}	-0,462	-0,417	0,563	-0,545	-0,666	0,651	-0,686	-0,711	-0,706	-0,727
	0,000	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{opm}	-0,297	-0,250	0,545	-0,541	-0,739	0,714	-0,757	-0,810	-0,804	-0,819
	0,021	0,054	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{mam}	-0,422	-0,416	0,590	-0,566	-0,703	0,646	-0,703	-0,719	-0,717	-0,730
	0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
$N_{cl(Aclm)}$	-0,399	-0,320	0,494	-0,496	-0,619	0,663	-0,667	-0,690	-0,685	-0,702
	0,002	0,013	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
$a_{cl(Aclm)}$	0,299	0,146	-0,313	0,391	0,321	-0,406	0,378	0,227	0,243	0,225
	0,020	0,265	0,015	0,002	0,012	0,001	0,003	0,081	0,061	0,084
$N_{cl(clm)}$	-0,183	-0,037	0,046	-0,089	-0,071	0,140	-0,109	0,009	-0,012	0,004
	0,161	0,780	0,728	0,498	0,590	0,287	0,407	0,946	0,929	0,974
S_{sk}	0,036	0,055	-0,341	0,311	0,376	0,083	0,157	0,081	0,098	0,061
	0,785	0,674	0,008	0,016	0,003	0,526	0,231	0,537	0,458	0,641
S_{ku}	0,060	-0,017	0,002	0,112	0,023	0,064	-0,020	-0,334	-0,263	-0,423
	0,651	0,895	0,989	0,393	0,859	0,630	0,880	0,009	0,043	0,001

Kenngröße	S _{pk}	S _{vk}	S _{r1}	S _{r2}	V _{ma}	V _{on}	V _{cl}	α _{clm}	c _{clm}	γ _{clm}
μG	0,382	0,405	0,045	0,009	0,443	0,428	0,562	0,004	0,397	-0,015
	0,003	0,001	0,731	0,944	0,000	0,001	<0,001	0,975	0,002	0,912
μH	0,347	0,384	0,077	0,066	0,417	0,411	0,430	-0,090	0,390	0,038
	0,007	0,002	0,556	0,617	0,001	0,001	0,001	0,494	0,002	0,771
NPA	-0,648	-0,516	-0,261	-0,022	-0,602	-0,734	-0,314	0,340	-0,713	-0,355
	<0,001	<0,001	0,044	0,865	<0,001	<0,001	0,015	0,008	<0,001	0,005
μ _{ssa}	0,767	0,615	0,267	0,011	0,682	0,834	0,287	-0,335	0,830	0,377
	<0,001	<0,001	0,039	0,931	<0,001	<0,001	0,026	0,009	<0,001	0,003
c _{top}	0,893	0,710	0,237	-0,011	0,843	1,000	0,175	-0,477	0,954	0,365
	<0,001	<0,001	0,068	0,932	<0,001	<0,001	0,180	0,000	<0,001	0,004
c _{bot}	-0,629	-0,915	0,089	0,249	-1,000	-0,841	-0,285	0,494	-0,823	-0,018
	<0,001	<0,001	0,500	0,055	<0,001	<0,001	0,027	<0,001	<0,001	0,894
S _t	0,795	0,845	0,081	-0,133	0,958	0,961	0,239	-0,506	0,927	0,203
	<0,001	<0,001	0,539	0,311	<0,001	<0,001	0,066	<0,001	<0,001	0,120
S _a	0,612	0,729	-0,035	-0,085	0,913	0,873	0,181	-0,528	0,825	0,119
	<0,001	<0,001	0,788	0,516	<0,001	<0,001	0,166	<0,001	<0,001	0,364
S _q	0,667	0,769	-0,003	-0,109	0,932	0,902	0,185	-0,532	0,857	0,138
	<0,001	<0,001	0,982	0,406	<0,001	<0,001	0,157	<0,001	<0,001	0,292
S _k	0,513	0,640	-0,125	0,019	0,868	0,815	0,180	-0,522	0,755	0,080
	<0,001	<0,001	0,342	0,884	<0,001	<0,001	0,168	<0,001	<0,001	0,543
S _{pk}		0,593	0,481	0,008	0,628	0,894	0,104	-0,345	0,871	0,476
		<0,001	0,000	0,950	<0,001	<0,001	0,429	0,007	<0,001	0,000
S _{vk}	0,593		-0,101	-0,468	0,915	0,709	0,270	-0,406	0,716	-0,055
	<0,001		0,442	0,000	<0,001	<0,001	0,037	0,001	<0,001	0,676
S _{r1}	0,481	-0,101		0,379	-0,089	0,239	-0,083	0,037	0,290	0,575
	0,000	0,442		0,003	0,500	0,066	0,529	0,781	0,025	<0,001
S _{r2}	0,008	-0,468	0,379		-0,249	-0,011	0,010	0,060	-0,016	0,359
	0,950	0,000	0,003		0,055	0,933	0,941	0,649	0,901	0,005
V _{ma}	0,628	0,915	-0,089	-0,249		0,841	0,285	-0,494	0,822	0,017
	<0,001	<0,001	0,500	0,055		<0,001	0,027	<0,001	<0,001	0,895
V _{on}	0,894	0,709	0,239	-0,011	0,841		0,166	-0,482	0,954	0,367
	<0,001	<0,001	0,066	0,933	<0,001		0,206	<0,001	<0,001	0,004
V _{cl}	0,104	0,270	-0,083	0,010	0,285	0,166		0,437	0,131	-0,138
	0,429	0,037	0,529	0,941	0,027	0,206		0,000	0,318	0,292
α _{clm}	-0,345	-0,406	0,037	0,060	-0,494	-0,482	0,437		-0,485	-0,157
	0,007	0,001	0,781	0,649	<0,001	<0,001	0,000		<0,001	0,232
c _{clm}	0,871	0,716	0,290	-0,016	0,822	0,954	0,131	-0,485		0,533
	<0,001	<0,001	0,025	0,901	<0,001	<0,001	0,318	<0,001		<0,001
γ _{clm}	0,476	-0,055	0,575	0,359	0,017	0,367	-0,138	-0,157	0,533	
	0,000	0,676	<0,001	0,005	0,895	0,004	0,292	0,232	<0,001	
N _{clm}	-0,473	-0,466	-0,046	-0,184	-0,651	-0,662	-0,437	0,288	-0,652	-0,244
	0,000	0,000	0,729	0,160	<0,001	<0,001	0,000	0,026	<0,001	0,060
N _{opm}	-0,534	-0,500	-0,062	-0,124	-0,714	-0,738	-0,215	0,495	-0,714	-0,249
	<0,001	<0,001	0,637	0,347	<0,001	<0,001	0,098	<0,001	<0,001	0,055
N _{mam}	-0,525	-0,458	-0,104	-0,206	-0,646	-0,700	-0,411	0,313	-0,688	-0,319
	<0,001	0,000	0,428	0,114	<0,001	<0,001	0,001	0,015	<0,001	0,013
N _{cl(Aclm)}	-0,403	-0,515	0,082	-0,070	-0,662	-0,616	-0,415	0,258	-0,645	-0,266
	0,001	<0,001	0,533	0,597	<0,001	<0,001	0,001	0,047	<0,001	0,040
α _{cl(Aclm)}	0,259	0,309	-0,052	-0,003	0,406	0,317	0,402	0,040	0,325	0,031
	0,046	0,016	0,691	0,985	0,001	0,014	0,001	0,763	0,011	0,812
N _{cl(clm)}	-0,063	-0,163	0,137	-0,010	-0,140	-0,071	0,033	0,111	-0,085	0,080
	0,630	0,214	0,297	0,937	0,287	0,588	0,805	0,399	0,518	0,545
S _{sk}	0,544	-0,221	0,737	0,539	-0,084	0,377	-0,084	-0,047	0,343	0,644
	<0,001	0,090	<0,001	<0,001	0,525	0,003	0,526	0,721	0,007	<0,001
S _{ku}	0,306	0,157	0,173	-0,239	-0,064	0,024	-0,037	0,132	0,016	0,001
	0,017	0,231	0,186	0,066	0,630	0,856	0,782	0,315	0,903	0,992

Kenngröße	N_{clm}	N_{opm}	N_{mam}	$N_{cl(Aclm)}$	$\alpha_{cl(Aclm)}$	$N_{cl(clm)}$	S_{sk}	S_{ku}
μ_G	-0,462	-0,297	-0,422	-0,399	0,299	-0,183	0,036	0,060
	0,000	0,021	0,001	0,002	0,020	0,161	0,785	0,651
μ_H	-0,417	-0,250	-0,416	-0,320	0,146	-0,037	0,055	-0,017
	0,001	0,054	0,001	0,013	0,265	0,780	0,674	0,895
NPA	0,563	0,545	0,590	0,494	-0,313	0,046	-0,341	0,002
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,015	0,728	0,008	0,989
μ_{ssa}	-0,545	-0,541	-0,566	-0,496	0,391	-0,089	0,311	0,112
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	0,498	0,016	0,393
c_{top}	-0,666	-0,739	-0,703	-0,619	0,321	-0,071	0,376	0,023
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,012	0,590	0,003	0,859
c_{bot}	0,651	0,714	0,646	0,663	-0,406	0,140	0,083	0,064
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,287	0,526	0,630
S_t	-0,686	-0,757	-0,703	-0,667	0,378	-0,109	0,157	-0,020
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,407	0,231	0,880
S_a	-0,711	-0,810	-0,719	-0,690	0,227	0,009	0,081	-0,334
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,081	0,946	0,537	0,009
S_q	-0,706	-0,804	-0,717	-0,685	0,243	-0,012	0,098	-0,263
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,061	0,929	0,458	0,043
S_k	-0,727	-0,819	-0,730	-0,702	0,225	0,004	0,061	-0,423
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,084	0,974	0,641	0,001
S_{pk}	-0,473	-0,534	-0,525	-0,403	0,259	-0,063	0,544	0,306
	0,000	<0,001	<0,001	0,001	0,046	0,630	<0,001	0,017
S_{vk}	-0,466	-0,500	-0,458	-0,515	0,309	-0,163	-0,221	0,157
	0,000	<0,001	0,000	<0,001	0,016	0,214	0,090	0,231
S_{r1}	-0,046	-0,062	-0,104	0,082	-0,052	0,137	0,737	0,173
	0,729	0,637	0,428	0,533	0,691	0,297	<0,001	0,186
S_{r2}	-0,184	-0,124	-0,206	-0,070	-0,003	-0,010	0,539	-0,239
	0,160	0,347	0,114	0,597	0,985	0,937	<0,001	0,066
V_{ma}	-0,651	-0,714	-0,646	-0,662	0,406	-0,140	-0,084	-0,064
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,287	0,525	0,630
V_{op}	-0,662	-0,738	-0,700	-0,616	0,317	-0,071	0,377	0,024
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,014	0,588	0,003	0,856
V_{cl}	-0,437	-0,215	-0,411	-0,415	0,402	0,033	-0,084	-0,037
	0,000	0,098	0,001	0,001	0,001	0,805	0,526	0,782
α_{clm}	0,288	0,495	0,313	0,258	0,040	0,111	-0,047	0,132
	0,026	<0,001	0,015	0,047	0,763	0,399	0,721	0,315
c_{clm}	-0,652	-0,714	-0,688	-0,645	0,325	-0,085	0,343	0,016
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,011	0,518	0,007	0,903
γ_{clm}	-0,244	-0,249	-0,319	-0,266	0,031	0,080	0,644	0,001
	0,060	0,055	0,013	0,040	0,812	0,545	<0,001	0,992
N_{clm}		0,916	0,982	0,911	-0,337	-0,100	-0,241	0,373
		<0,001	<0,001	<0,001	0,009	0,448	0,064	0,003
N_{opm}	0,916		0,903	0,861	-0,311	-0,092	-0,244	0,415
	<0,001		<0,001	<0,001	0,016	0,486	0,060	0,001
N_{mam}	0,982	0,903		0,879	-0,315	-0,137	-0,324	0,347
	<0,001	<0,001		<0,001	0,014	0,298	0,012	0,007
$N_{cl(Aclm)}$	0,911	0,861	0,879		-0,353	-0,083	-0,061	0,338
	<0,001	<0,001	<0,001		0,006	0,526	0,644	0,008
$\alpha_{cl(Aclm)}$	-0,337	-0,311	-0,315	-0,353		-0,342	-0,007	0,213
	0,009	0,016	0,014	0,006		0,008	0,957	0,103
$N_{cl(clm)}$	-0,100	-0,092	-0,137	-0,083	-0,342		0,146	-0,389
	0,448	0,486	0,298	0,526	0,008		0,266	0,002
S_{sk}	-0,241	-0,244	-0,324	-0,061	-0,007	0,146		0,069
	0,064	0,060	0,012	0,644	0,957	0,266		0,601
S_{ku}	0,373	0,415	0,347	0,338	0,213	-0,389	0,069	
	0,003	0,001	0,007	0,008	0,103	0,002	0,601	

Spaltenboden

Kenngröße	μ_G	μ_H	NPA	μ_{ssa}	c_{top}	c_{bot}	S_t	S_a	S_q	S_k
μ_G	0,845	0,845	-0,596	0,601	0,639	-0,589	0,649	0,539	0,549	0,554
		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
μ_H	0,845		-0,433	0,462	0,392	-0,488	0,461	0,327	0,340	0,325
	<0,001		0,001	0,000	0,002	<0,001	0,000	0,011	0,008	0,011
NPA	-0,596	-0,433		-0,936	-0,609	0,537	-0,607	-0,547	-0,547	-0,552
	<0,001	0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
μ_{ssa}	0,601	0,462	-0,936		0,569	-0,533	0,585	0,506	0,508	0,510
	<0,001	0,000	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{top}	0,639	0,392	-0,609	0,569		-0,784	0,944	0,950	0,953	0,945
	<0,001	0,002	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
c_{bot}	-0,589	-0,488	0,537	-0,533	-0,784		-0,944	-0,805	-0,831	-0,767
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_t	0,649	0,461	-0,607	0,585	0,944	-0,944		0,928	0,944	0,906
	<0,001	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
S_a	0,539	0,327	-0,547	0,506	0,950	-0,805	0,928		0,998	0,987
	<0,001	0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
S_q	0,549	0,340	-0,547	0,508	0,953	-0,831	0,944	0,998		0,981
	<0,001	0,008	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
S_k	0,554	0,325	-0,552	0,510	0,945	-0,767	0,906	0,987	0,981	
	<0,001	0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
S_{pk}	0,475	0,222	-0,453	0,392	0,896	-0,590	0,786	0,829	0,835	0,789
	0,000	0,088	0,000	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{vk}	0,436	0,426	-0,380	0,409	0,526	-0,897	0,755	0,552	0,594	0,487
	0,000	0,001	0,003	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
S_{r1}	-0,033	-0,204	-0,060	0,000	0,211	0,049	0,083	0,214	0,206	0,139
	0,802	0,118	0,651	0,998	0,105	0,710	0,530	0,100	0,114	0,288
S_{r2}	0,198	-0,148	-0,246	0,163	0,560	-0,113	0,358	0,544	0,519	0,590
	0,129	0,258	0,058	0,213	<0,001	0,392	0,005	<0,001	<0,001	<0,001
V_{ma}	0,590	0,481	-0,541	0,537	0,789	-0,999	0,948	0,809	0,835	0,772
	<0,001	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{op}	0,619	0,361	-0,598	0,551	0,998	-0,763	0,932	0,949	0,952	0,942
	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
V_{cl}	0,531	0,521	-0,400	0,481	0,419	-0,565	0,523	0,373	0,383	0,417
	<0,001	<0,001	0,002	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,002	0,001
a_{clm}	0,232	0,319	-0,045	0,122	-0,058	-0,104	0,024	-0,145	-0,133	-0,094
	0,074	0,013	0,731	0,355	0,660	0,429	0,854	0,270	0,310	0,473
c_{clm}	0,619	0,365	-0,596	0,549	0,951	-0,748	0,900	0,887	0,891	0,887
	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
γ_{clm}	0,123	-0,119	-0,187	0,115	0,363	0,067	0,158	0,273	0,254	0,306
	0,347	0,365	0,153	0,380	0,004	0,612	0,227	0,035	0,050	0,017
N_{clm}	-0,598	-0,376	0,679	-0,601	-0,825	0,690	-0,805	-0,790	-0,790	-0,812
	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{opm}	-0,304	-0,076	0,539	-0,389	-0,696	0,501	-0,635	-0,721	-0,714	-0,725
	0,018	0,565	<0,001	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N_{mam}	-0,612	-0,365	0,637	-0,576	-0,854	0,678	-0,814	-0,821	-0,819	-0,840
	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
$N_{cl(Aclm)}$	-0,508	-0,315	0,615	-0,530	-0,752	0,646	-0,744	-0,727	-0,727	-0,750
	<0,001	0,014	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
$a_{cl(Aclm)}$	0,260	0,194	-0,308	0,246	0,342	-0,501	0,449	0,317	0,333	0,318
	0,044	0,138	0,016	0,058	0,008	<0,001	0,000	0,014	0,009	0,013
$N_{cl(clm)}$	0,216	0,199	0,003	0,047	0,148	-0,089	0,127	0,094	0,093	0,151
	0,097	0,128	0,983	0,720	0,258	0,498	0,334	0,474	0,479	0,251
S_{sk}	0,151	-0,119	-0,232	0,145	0,464	0,079	0,204	0,392	0,367	0,407
	0,250	0,364	0,075	0,268	0,000	0,546	0,118	0,002	0,004	0,001
S_{ku}	-0,205	-0,022	0,306	-0,261	-0,425	-0,006	-0,222	-0,476	-0,435	-0,532
	0,116	0,868	0,017	0,044	0,001	0,963	0,089	0,000	0,001	<0,001

Kenngröße	S _{pk}	S _{vk}	S _{r1}	S _{r2}	V _{ma}	V _{on}	V _{cl}	α _{clm}	c _{clm}	γ _{clm}
μG	0,475	0,436	-0,033	0,198	0,590	0,619	0,531	0,232	0,619	0,123
	0,000	0,000	0,802	0,129	<0,001	<0,001	<0,001	0,074	<0,001	0,347
μH	0,222	0,426	-0,204	-0,148	0,481	0,361	0,521	0,319	0,365	-0,119
	0,088	0,001	0,118	0,258	0,000	0,005	<0,001	0,013	0,004	0,365
NPA	-0,453	-0,380	-0,060	-0,246	-0,541	-0,598	-0,400	-0,045	-0,596	-0,187
	0,000	0,003	0,651	0,058	<0,001	<0,001	0,002	0,731	<0,001	0,153
μ_{ssa}	0,392	0,409	0,000	0,163	0,537	0,551	0,481	0,122	0,549	0,115
	0,002	0,001	0,998	0,213	<0,001	<0,001	<0,001	0,355	<0,001	0,380
c_{top}	0,896	0,526	0,211	0,560	0,789	0,998	0,419	-0,058	0,951	0,363
	<0,001	<0,001	0,105	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,660	<0,001	0,004
c_{bot}	-0,590	-0,897	0,049	-0,113	-0,999	-0,763	-0,565	-0,104	-0,748	0,067
	<0,001	<0,001	0,710	0,392	<0,001	<0,001	<0,001	0,429	<0,001	0,612
S_t	0,786	0,755	0,083	0,358	0,948	0,932	0,523	0,024	0,900	0,158
	<0,001	<0,001	0,530	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	0,854	<0,001	0,227
S_a	0,829	0,552	0,214	0,544	0,809	0,949	0,373	-0,145	0,887	0,273
	<0,001	<0,001	0,100	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,270	<0,001	0,035
S_q	0,835	0,594	0,206	0,519	0,835	0,952	0,383	-0,133	0,891	0,254
	<0,001	<0,001	0,114	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	0,310	<0,001	0,050
S_k	0,789	0,487	0,139	0,590	0,772	0,942	0,417	-0,094	0,887	0,306
	<0,001	<0,001	0,288	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,473	<0,001	0,017
S_{pk}		0,353	0,544	0,649	0,598	0,914	0,105	-0,273	0,851	0,463
		0,006	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,426	0,035	<0,001	0,000
S_{vk}	0,353		-0,164	-0,195	0,895	0,502	0,519	0,179	0,522	-0,219
	0,006		0,211	0,136	<0,001	<0,001	<0,001	0,171	<0,001	0,092
S_{r1}	0,544	-0,164		0,581	-0,044	0,251	-0,457	-0,533	0,242	0,486
	<0,001	0,211		<0,001	0,740	0,053	0,000	<0,001	0,062	<0,001
S_{r2}	0,649	-0,195	0,581		0,125	0,589	-0,135	-0,369	0,567	0,666
	<0,001	0,136	<0,001		0,341	<0,001	0,302	0,004	<0,001	<0,001
V_{ma}	0,598	0,895	-0,044	0,125		0,770	0,565	0,099	0,755	-0,055
	<0,001	<0,001	0,740	0,341		<0,001	<0,001	0,450	<0,001	0,674
V_{on}	0,914	0,502	0,251	0,589	0,770		0,360	-0,116	0,946	0,379
	<0,001	<0,001	0,053	<0,001	<0,001		0,005	0,376	<0,001	0,003
V_{cl}	0,105	0,519	-0,457	-0,135	0,565	0,360		0,793	0,448	-0,023
	0,426	<0,001	0,000	0,302	<0,001	0,005		<0,001	0,000	0,860
α_{clm}	-0,273	0,179	-0,533	-0,369	0,099	-0,116	0,793		-0,006	-0,126
	0,035	0,171	<0,001	0,004	0,450	0,376	<0,001		0,963	0,339
c_{clm}	0,851	0,522	0,242	0,567	0,755	0,946	0,448	-0,006		0,561
	<0,001	<0,001	0,062	<0,001	<0,001	<0,001	0,000	0,963		<0,001
γ_{clm}	0,463	-0,219	0,486	0,666	-0,055	0,379	-0,023	-0,126	0,561	
	0,000	0,092	<0,001	<0,001	0,674	0,003	0,860	0,339	<0,001	
N_{clm}	-0,625	-0,480	-0,005	-0,427	-0,697	-0,813	-0,505	-0,077	-0,828	-0,349
	<0,001	0,000	0,971	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,559	<0,001	0,006
N_{opm}	-0,616	-0,295	-0,239	-0,563	-0,508	-0,710	-0,071	0,311	-0,695	-0,409
	<0,001	0,022	0,066	<0,001	<0,001	<0,001	0,590	0,015	<0,001	0,001
N_{mam}	-0,673	-0,459	-0,062	-0,481	-0,686	-0,845	-0,487	-0,038	-0,863	-0,414
	<0,001	0,000	0,637	0,000	<0,001	<0,001	<0,001	0,774	<0,001	0,001
N_{cl(Aclm)}	-0,558	-0,453	0,021	-0,371	-0,653	-0,740	-0,487	-0,106	-0,794	-0,396
	<0,001	0,000	0,873	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	0,422	<0,001	0,002
α_{cl(Aclm)}	0,160	0,499	-0,168	-0,010	0,502	0,321	0,439	0,301	0,408	0,081
	0,222	<0,001	0,199	0,941	<0,001	0,013	0,000	0,019	0,001	0,540
N_{cl(clm)}	-0,001	0,058	-0,317	-0,031	0,091	0,107	0,660	0,731	0,180	0,141
	0,996	0,657	0,014	0,812	0,490	0,415	<0,001	<0,001	0,168	0,281
S_{sk}	0,670	-0,336	0,718	0,833	-0,067	0,496	-0,211	-0,366	0,507	0,809
	<0,001	0,009	<0,001	<0,001	0,612	<0,001	0,106	0,004	<0,001	<0,001
S_{ku}	-0,355	0,233	-0,230	-0,597	-0,001	-0,430	-0,122	0,138	-0,461	-0,617
	0,005	0,073	0,076	<0,001	0,996	0,001	0,351	0,294	0,000	<0,001

Kenngroße	N_{clm}	N_{opm}	N_{mam}	N_{cl(Aclm)}	α_{cl(Aclm)}	N_{cl(clm)}	S_{sk}	S_{ku}
μG	-0,598	-0,304	-0,612	-0,508	0,260	0,216	0,151	-0,205
	<0,001	0,018	<0,001	<0,001	0,044	0,097	0,250	0,116
μH	-0,376	-0,076	-0,365	-0,315	0,194	0,199	-0,119	-0,022
	0,003	0,565	0,004	0,014	0,138	0,128	0,364	0,868
NPA	0,679	0,539	0,637	0,615	-0,308	0,003	-0,232	0,306
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,016	0,983	0,075	0,017
μ_{ssa}	-0,601	-0,389	-0,576	-0,530	0,246	0,047	0,145	-0,261
	<0,001	0,002	<0,001	<0,001	0,058	0,720	0,268	0,044
c_{top}	-0,825	-0,696	-0,854	-0,752	0,342	0,148	0,464	-0,425
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,008	0,258	0,000	0,001
c_{bot}	0,690	0,501	0,678	0,646	-0,501	-0,089	0,079	-0,006
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,498	0,546	0,963
S_t	-0,805	-0,635	-0,814	-0,744	0,449	0,127	0,204	-0,222
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,000	0,334	0,118	0,089
S_a	-0,790	-0,721	-0,821	-0,727	0,317	0,094	0,392	-0,476
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,014	0,474	0,002	0,000
S_q	-0,790	-0,714	-0,819	-0,727	0,333	0,093	0,367	-0,435
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,009	0,479	0,004	0,001
S_k	-0,812	-0,725	-0,840	-0,750	0,318	0,151	0,407	-0,532
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,013	0,251	0,001	<0,001
S_{pk}	-0,625	-0,616	-0,673	-0,558	0,160	-0,001	0,670	-0,355
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,222	0,996	<0,001	0,005
S_{vk}	-0,480	-0,295	-0,459	-0,453	0,499	0,058	-0,336	0,233
	0,000	0,022	0,000	0,000	<0,001	0,657	0,009	0,073
S_{r1}	-0,005	-0,239	-0,062	0,021	-0,168	-0,317	0,718	-0,230
	0,971	0,066	0,637	0,873	0,199	0,014	<0,001	0,076
S_{r2}	-0,427	-0,563	-0,481	-0,371	-0,010	-0,031	0,833	-0,597
	0,001	<0,001	0,000	0,004	0,941	0,812	<0,001	<0,001
V_{ma}	-0,697	-0,508	-0,686	-0,653	0,502	0,091	-0,067	-0,001
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,490	0,612	0,996
V_{on}	-0,813	-0,710	-0,845	-0,740	0,321	0,107	0,496	-0,430
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,013	0,415	<0,001	0,001
V_{cl}	-0,505	-0,071	-0,487	-0,487	0,439	0,660	-0,211	-0,122
	<0,001	0,590	<0,001	<0,001	0,000	<0,001	0,106	0,351
α_{clm}	-0,077	0,311	-0,038	-0,106	0,301	0,731	-0,366	0,138
	0,559	0,015	0,774	0,422	0,019	<0,001	0,004	0,294
c_{clm}	-0,828	-0,695	-0,863	-0,794	0,408	0,180	0,507	-0,461
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,168	<0,001	0,000
γ_{clm}	-0,349	-0,409	-0,414	-0,396	0,081	0,141	0,809	-0,617
	0,006	0,001	0,001	0,002	0,540	0,281	<0,001	<0,001
N_{clm}		0,854	0,980	0,972	-0,570	-0,159	-0,317	0,502
		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,226	0,014	<0,001
N_{opm}	0,854		0,829	0,851	-0,451	0,170	-0,449	0,541
	<0,001		<0,001	<0,001	0,000	0,193	0,000	<0,001
N_{mam}	0,980	0,829		0,938	-0,539	-0,162	-0,393	0,562
	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	0,217	0,002	<0,001
N_{cl(Aclm)}	0,972	0,851	0,938		-0,587	-0,169	-0,280	0,483
	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	0,198	0,031	<0,001
α_{cl(Aclm)}	-0,570	-0,451	-0,539	-0,587		0,101	-0,105	-0,037
	<0,001	0,000	<0,001	<0,001		0,444	0,424	0,778
N_{cl(clm)}	-0,159	0,170	-0,162	-0,169	0,101		-0,022	-0,096
	0,226	0,193	0,217	0,198	0,444		0,868	0,468
S_{sk}	-0,317	-0,449	-0,393	-0,280	-0,105	-0,022		-0,651
	0,014	0,000	0,002	0,031	0,424	0,868		<0,001
S_{ku}	0,502	0,541	0,562	0,483	-0,037	-0,096	-0,651	
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,778	0,468	<0,001	

Lebenslauf

Name: Michael Kilian
geboren: 29. 06. 1977 in Siegen
Eltern: Reinhard Kilian
Anneliese Kilian, geb. Reuscher
wohnhaf in: 85376 Giggenhausen
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Schulbildung:

1984-1988: Grundschule Braunfels-Philippstein
1988-1997: Gymnasium Philippinum Weilburg
Abschluss: Abitur

Studium:

10/1998-04/2004: Studium der Agrarwissenschaften, Justus-Liebig-Universität Gießen, Schwerpunkt: Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus
Abschluss: Dipl. Ing. agr.

Berufliche Tätigkeit:

05/2004-06/2006: wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan

Danksagung

Zum Schluss möchte ich allen danken, die maßgeblich am Gelingen dieser Arbeit beteiligt waren:

Bei Herrn Prof. Dr. Hermann Seufert möchte ich mich für seine freundliche Empfehlung an das Institut für Landtechnik in Weihenstephan und damit für die Möglichkeit zur Bearbeitung des Themas bedanken. Außerdem sei ihm und Herrn Prof. Dr. Hans-Peter Schwarz für die freundliche Übernahme der Gutachten gedankt. Danken möchte ich auch den Prüfern Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Wilhelm Opitz von Boberfeld und Herrn Prof. Dr. Vladimir Dzapo sowie Herrn Prof. Dr. Steffen Hoy für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Besonderer Dank gilt meinem Arbeitsgruppenleiter Herrn Dr. Bernhard Haidn für unzählige fruchtbare Diskussionen und fachliche Anregungen sowie für die Betreuung bei der Abfassung der Arbeit. Meinen Kollegen Herrn Dr. Jan Harms und Frau Dr. Juliana Macuhova möchte ich ebenfalls für die vielen ergiebigen Diskussionen während dieser Arbeit danken. Insbesondere Herrn Dr. Jan Harms und Herrn Rudolf Peis gebührt ein herzlicher Dank für die tatkräftige und effiziente Unterstützung bei der Datenaufbereitung. Frau Dr. Juliana Macuhova sei an dieser Stelle für die Unterstützung bei den statistischen Untersuchungen mit SAS gedankt.

Weiterhin geht ein besonderes Dankeschön an alle Personen, die an der Entwicklung und Konstruktion der Messtechnik beteiligt waren. Hierzu zählen allen voran Herr Dr. Hans Stanzel aus unserem Hause und Herr Reinhold Müller vom Institut für Landtechnik in Gießen. Weiterhin waren an der Konstruktion Herr Karl-Heinz Bröker und Herr Christian Konrad beteiligt, der darüber hinaus sämtliche CAD-Zeichnungen für diese Arbeit angefertigt hat. Auch ihnen sei herzlich gedankt. Ein besonderer Dank geht an die Herren Uwe Popp und Stephan Weidel vom Institut für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg für die Anpassung der Oberflächenanalysesoftware WinSAM sowie die stets freundliche und sofortige Unterstützung bei Anwendungsproblemen oder Fragen, die im Zusammenhang mit besagter Software auftraten. Ferner möchte ich mich bei meinem Cousin Raphael Krumm für die Anfertigung von Präzisionsoberflächenlehren und Herrn Johann Eberl für die tatkräftige Unterstützung bei der praktischen Versuchsdurchführung auf den landwirtschaftlichen Betrieben bedanken. Ein ganz besonderer Dank geht in diesem Zusammenhang an alle Betriebsleiter und deren Familien für die Gestattung der Untersuchungen in ihren Ställen und die gute Verpflegung.

Des weiteren sei dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung dieses Forschungsprojektes sowie der Mehl-Mühlhens Stiftung für die Finanzierung des Lasermessgerätes gedankt.

Auch bei meinen Eltern möchte ich mich für die Ermöglichung meiner schulischen Ausbildung und des Studiums bedanken. Meinen Geschwistern insbesondere meiner verstorbenen Schwester Lea sowie meinen Freunden Carsten Dietz und Bernd Förster möchte ich dafür danken, dass sie mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Meinem Vater Reinhard Kilian, meinem Onkel Dieter Krumm, Dr. Bernhard Haidn, Bernd und Christine Förster sowie Yasmin Martin und Stefan Thurner sei für das Korrekturlesen gedankt.

Von Herzen danken möchte ich schließlich meiner Freundin Viktoria Kuffner, die mir mit ihrer Geduld und ihrem Verständnis stets liebevoll zur Seite stand.