

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

Automatische Erkennung von Lahmheiten bei Milchkühen
mittels Leistungs- und Aktivitätsdatenanalyse

Von Katharina Schindhelm
aus Dresden
München 2016

Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department der

Tierärztlichen Fakultät

der Ludwig-Maximilians-Universität

München

Lehrstuhl für Tierschutz, Verhaltenskunde, Tierhygiene und Tierhaltung

Arbeit angefertigt unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr. Dr. Michael Erhard

Mitbetreuung durch

PD Dr. Sven Reese

Angefertigt an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

am Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Mentor: Dr. Bernhard Haidn

**Gedruckt mit der Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians Universität München**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun
Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Dr. Michael Erhard
Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Gabriela Knubben-Schweizer

Tag der Promotion: 16. Juli 2016

Meinen Eltern

Inhalt

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....	3
2.1	Lahmheit	3
2.1.1	Aufbau der Klaue	3
2.1.2	Erkrankungen der Klaue als Lahmheitsursache	7
2.1.2.1	Erkrankungen der knöchernen Strukturen und Gelenke	7
2.1.2.2	Erkrankungen der Sehnen und Sehenscheiden	8
2.1.2.3	Erkrankungen der Klauenlederhaut	8
2.1.2.4	Erkrankungen der äußeren Haut	9
2.1.3	Auswirkungen auf die Fortbewegung	10
2.2	Locomotionscore als Goldstandard zur Beurteilung von Lahmheiten	11
2.2.1	Beurteilung des Lahmheitsgrades anhand von vier Gangmerkmalen und allgemeinem Verhalten ...	12
2.2.2	Beurteilung des Lahmheitsgrades anhand von sechs Gangmerkmalen	12
2.2.3	Beurteilung des Lahmheitsgrades anhand von Rückenkrümmung und Gliedmaßenbelastung	13
2.3	Systeme zur automatischen Lahmheitserfassung	13
2.3.1	Direkte Verfahren	13
2.3.1.1	Analyse der Gliedmaßenbelastung im Stand	13
2.3.1.2	Analyse der Gliedmaßenbelastung in der Fortbewegung	14
2.3.1.3	Analyse von Videoaufnahmen	15
2.3.2	Indirekte Verfahren	16
2.3.2.1	Infrarot-Thermografie	16
2.3.2.2	Analyse von Leistungsdaten	16
2.3.2.3	Analyse von Aktivitätsdaten	18
2.3.3	Kombination von Leistungs- und Aktivitätsdaten	20
3	ZIELSTELLUNG.....	24
4	TIERE, MATERIAL UND METHODEN	25
4.1	Tiere.....	25
4.2	Stallanordnung und Herdenmanagement	25
4.2.1	Haltungssystem	25
4.2.2	Herdenmanagement	26
4.2.3	Fütterung	27
4.3	Erfassung der Klauengesundheit	27
4.3.1	Locomotionscore	27
4.3.1.1	Beurteilerreliabilität	29
4.3.2	Behandlung und Diagnosen	29

4.4	Automatische Datenerfassung	31
4.4.1	Durchgangstore: Erfassung des Tierverkehrs	32
4.4.2	AMS: Messung der Milchleistung und des Tiergewichts	33
4.4.3	Wiegetröge: Messung der Futteraufnahme	33
4.4.4	Pedometer: Messung der Aktivität	34
4.5	Datenverarbeitung	34
4.5.1	Erstellung der Tagesdatensätze	34
4.5.1.1	Im AMS erfasste Parameter	34
4.5.1.2	An den Wiegetrögen erfasste Parameter	35
4.5.1.3	Aktivitätsparameter	35
4.5.1.4	Zusammenführung aller erhobenen Daten	35
4.5.2	Aufbereitung der Tagesdatensätze	38
4.6	Einzelparameter	38
4.6.1	Dunnett-t-Test	38
4.6.2	ROC-Kurven Analyse	38
4.6.3	Verlaufswerte der Einzelparameter	40
4.6.3.1	Aktuelle Woche (Extremwerte d_1 bis $d_{3/5}$)	40
4.6.3.2	Vorwoche (Verhältnis $d_1/(d_8 - d_{14})$)	41
4.7	Kombination der Parameter	42
4.7.1	Modell 1: Logistische Regression	42
4.7.2	Modell 2: Multifaktorielle Parameterwichtung	43
4.7.2.1	Festlegung der Grenzwerte	43
4.7.2.2	Wichtung der Parameter (Modell E_1)	44
4.7.2.3	Einbeziehung der Einflussfaktoren Laktationsstatus und Laktationszahl (Modell E_2)	46
4.7.2.4	Integration weiterer Parameter	46
4.7.2.5	Einbeziehung der Summen der Vortage	47
5	ERGEBNISSE	48
5.1	Klauengesundheit	48
5.1.1	Locomotionscore	48
5.1.1.1	Beurteilerreliabilität	48
5.1.2	Bestandsklauenpflege	49
5.1.3	Erkrankungen der als lahm definierten Tiere	49
5.2	Einzelparameter	50
5.2.1	Dunnett-t-Test	50
5.2.2	ROC-Kurven-Analyse	56
5.3	Kombination der Parameterwerte	58
5.3.1	Modell 1: Binärlogistische Regression	58
5.3.2	Modell 2: Multifaktorielle Parameterwichtung	60
5.3.2.1	Festlegung der Grenzwerte	60
5.3.2.2	Wichtung der Parameter (Modell E_1)	61
5.3.2.3	Laktationsstatus und Laktationszahl (Modell E_2)	61

5.3.2.4	Integration weiterer Parameter	62
5.3.2.5	Einbeziehung der Summen der Vortage (Modell F).....	63
6	DISKUSSION	65
6.1	Klauengesundheit	65
6.1.1	Beurteilung der Klauengesundheit	65
6.1.2	Definition eines Lahmheitsfalls durch das Referenzsystem.....	65
6.1.2.1	Reliabilität des Referenzsystems	65
6.1.2.2	Validität des Referenzsystems	66
6.1.2.3	Detektion von an den Klauen erkrankten Tieren im Versuch.....	67
6.1.3	Binäre Klassifizierung.....	67
6.1.4	Unterschiedlicher Verlauf verschiedener Klauenerkrankungen.....	67
6.1.5	Lahmheits- und Erkrankungsprävalenz.....	68
6.2	Einzelparameter	68
6.2.1	Erfassung und Bearbeitung der Daten.....	68
6.2.1.1	Verwendete Sensoren	68
6.2.1.2	Tagesdaten.....	69
6.2.1.3	Verwendung von Verlaufsdaten	69
6.2.2	Leistungsparameter	70
6.2.2.1	Melkparameter.....	70
6.2.2.2	Futteraufnahmemenge und Tiergewicht	71
6.2.2.3	Tag-Nacht-Verhältnisse.....	72
6.2.3	Futteraufnahmeverhalten	72
6.2.4	Aktivität	72
6.2.4.1	Allgemeine Aktivität	72
6.2.4.2	Liegedauer	73
6.2.4.3	Liegeereignisse	73
6.3	Kombination der Parameter.....	76
6.3.1	Auswahl der Parameter	76
6.3.2	Verwendete Daten.....	76
6.3.3	Vergleich Regression und Multifaktorielle Parameterichtung	76
6.3.4	Einordnung der Ergebnisse	79
6.4	Ausblick	83
6.5	Schlussfolgerung	83
7	ZUSAMMENFASSUNG	84
8	SUMMARY.....	86
9	LITERATURVERZEICHNIS	88
10	BILDQUELLEN.....	97

11	ANHANG	98
12	EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG/DECLARATION OATH	112
13	DANKSAGUNG	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sagittalschnitt der lateralen Zehe (linke Vordergliedmaße) eines Rindes.....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Hornbildung an der Klauenlederhaut.....	5
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Klauenabschnitte am Sagittalschnitt	7
Abbildung 4: Pedometer am Fuß einer Kuh	18
Abbildung 5: Innenansicht AMS-Stall.....	26
Abbildung 6: Durchführung des Locomotionscorings im Stall	28
Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Diagnosen und Behandlungen	30
Abbildung 8: Stallgrundriss mit Lage der Durchgangstore und der Funktionsbereiche	32
Abbildung 9: Aktiv gesteuerte Durchgangstore zwischen Liege- und Fressbereich	32
Abbildung 10: Wiegetröge mit den darüber befestigten Prozessrechnern.....	33
Abbildung 11: Darstellung der Datenerfassung.....	34
Abbildung 12: Beispiel-ROC-Kurve	39
Abbildung 13: Darstellung der Entwicklungsschritte, Modell 1.....	43
Abbildung 14: Darstellung der Entwicklungsschritte der optimalen Punktzahlen, Modell 2	46
Abbildung 15: Verlauf des durchschnittlichen LMS der Herde während des Versuchs	48
Abbildung 16: Bei der Bestandsklauenpflege erfasste Befunde.....	49
Abbildung 17: Ursachen der in der Modellentwicklung verwendeten Lahmheitsfälle	50
Abbildung 18: Liegedauer nach LMS.....	56
Abbildung 19: ROC-Kurve des Parameters Futteraufnahmedauer.....	58
Abbildung 20: ROC-Kurve der Anwendung der Formel aus Modell D.....	60
Abbildung 21: ROC-Kurve des Modells E ₂	62
Abbildung 22: ROC-Kurve des Modells F	64
Abbildung 23: Darstellung des Zusammenhangs der im Versuch verwendeten Parameter... ..	75
Abbildung 24: Tagesmilchleistung nach LMS	101
Abbildung 25: Maximalen Zwischenmelkzeit nach LMS	101
Abbildung 26: Tiergewichtsmedian nach LMS	102
Abbildung 27: Verteilung der Futteraufnahmemenge nach LMS	102
Abbildung 28: Anteil der Dauer der Futteraufnahme tagsüber nach LMS.....	103
Abbildung 29: Anteil der Anzahl der Mahlzeiten tagsüber nach LMS	103
Abbildung 30: Anteil der Anzahl der Trogbesuche tagsüber nach LMS.....	104
Abbildung 31: Anteil der Liegedauer tagsüber nach LMS	104
Abbildung 32: Anteil der Abliegeereignisse tagsüber nach LMS	105
Abbildung 33: Anteil der Aktivitätskennzahl tagsüber nach LMS.....	105
Abbildung 34: Anzahl der Mahlzeiten nach LMS	106
Abbildung 35: Anzahl der Trogbesuche nach LMS	106
Abbildung 36: Durchschnittliche Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit nach LMS.....	107
Abbildung 37: Durchschnittliche Futteraufnahmemenge pro Trogbesuch.....	107
Abbildung 38: Durchschnittliche Dauer einer Mahlzeit nach LMS	108

Abbildung 39: Durchschnittliche Dauer eines Besuchs nach LMS	108
Abbildung 40: Dauer der Futteraufnahme nach LMS	109
Abbildung 41: Futteraufnahmeintensität nach LMS.....	109
Abbildung 42: Liegedauer nach LMS.....	110
Abbildung 43: Anzahl der Abliegeereignisse nach LMS	110
Abbildung 44: Durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses nach LMS	111
Abbildung 45: Aktivitätskennzahl nach LMS	111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lahmheitsprävalenz bei Milchkühen in verschiedenen Ländern.....	1
Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Klauenkrankheiten und damit verbundener Lahmheit.	11
Tabelle 3: Zusammenhang verschiedener Parameter mit dem LMS laut Literatur.....	20
Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuche zur kombinierten Analyse	21
Tabelle 5: Futterzusammensetzung in Phase I und in Phase II	27
Tabelle 6: Bewertungshäufigkeit nach LMS und Tiernummer (Zusammenfassung)	28
Tabelle 7: Diagnoseschlüssel der Klauenerkrankungen.....	30
Tabelle 8: In der Auswertung verwendete Parameter	36
Tabelle 9: Kreuztabelle zur dichotomen Verteilung „lahm“ und „nicht lahm“	39
Tabelle 10: Anzahl der Tagesdatensätze mit LMS nach der Zufallsauswahl	40
Tabelle 11: Berechnung der Minima bzw. Maxima der Parameter.....	41
Tabelle 12: Gradeinteilung nach Spezifität der Wertegruppen	44
Tabelle 13: Punktzahlen der Parameter im ersten Schritt der Entwicklung von Modell E ₁	45
Tabelle 14: Statistische Lagemaße der Parameter.....	51
Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der ROC-Kurvenanalyse.....	57
Tabelle 16: Zusammensetzung der binärlogistischen Modelle	59
Tabelle 17: Kreuztabellen der vier besten Modelle der binärlogistischen Regression	59
Tabelle 18: Grenzwerte G _x der Parameter.....	61
Tabelle 19: Im letzten Schritt in Modell E ₁ verwendete Punktzahlen.....	61
Tabelle 20: In Modell E ₂ verwendete Punktzahlen	62
Tabelle 21: Cramérs V der Parameter in Modell E ₂	63
Tabelle 22: Statistische Gütekriterien der beiden Modelle E ₂ und F	63
Tabelle 23: Kreuztabellen der Modelle	78
Tabelle 24: Forschungsprojekte zur Lahmheitsdetektion	81
Tabelle 25: Beispieldaten für ROC-Kurve	98
Tabelle 26: LMS-Häufigkeit nach Tiernummer.....	99

Abkürzungsverzeichnis

AK	Aktivitätskennzahl
AMS	Automatisches Melksystem
ANOVA	Analysis of Variance
AUC	Area Under the Curve
BCS	Body Condition Score
DD	Dermatitis digitalis
DFA	Dauer der Futteraufnahme
DID	Dermatitis interdigitalis
dim	days in milk
DLE	Dauer eines Liegeereignisses
DLM	Dynamisches Lineares Modell
DS	Doppelte Sohle
FA	Futteraufnahme
FAE	Futteraufnahmeereignis
FAI	Futteraufnahmeintensität
FATB	Futteraufnahmemenge pro Trogbesuch
GLMM	Generalized Linear Mixed Model
HS	Hornspalt
KI	Konfidenzintervall
lak	Anzahl der Laktationen
LD	Liegedauer
LI	Limax
LMS	Locomotionscore
MCUSUM Chart	Multivariate Cumulative Sum Chart
n. s.	nicht signifikant
PH	Phlegmone
PLS-Regression	Partial Least Squares Regression
PMR	Partial Mixed Ration
RE	Rehe (aseptische Entzündung der Lederhaut)
RFID	radio-frequency identification
ROC	Receiver Operating Characteristic
RSG	Rusterholzsches Sohlengeschwür
SD	Standardabweichung
SG	Sohlengeschwür
TB	Anzahl der Besuche am Trog
TM	Trockenmasse
WLD	Weiß-Linie-Defekt

Publikationen

Teile dieser Arbeit wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

Schindhelm, K.; Haidn, B.; Reese, S. (2015): Früherkennung von Klauenerkrankungen durch automatische Aktivitäts- und Leistungsanalyse bei Milchkühen. *In: U. Bauer, A. Gräff, G. Wendl (Hrsg.) 12. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung*, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) S. 158-163

Schindhelm, K.; Haidn, B.; Reese, S. (2015): Early Detection in Cows Through Analysis of Automatically Recorded Activity and Performance Data. *In: N. Tadich. B. (Hrsg.) 18th International Symposium 10th International Conference on Lameness in Ruminants*, Valdivia: Universidad Austral de Chile

Schindhelm, K.; Haidn, B.; Fiedler, A.; Reese, S. (2016): Developing A Lameness Detection Model Using Automatically Recorded Performance And Behavior Data. *In: World Buiatric Congress Dublin 2016* (noch nicht veröffentlicht)

1 Einleitung und Problemstellung

Die Klauengesundheit beeinflusst bei Milchkühen das Wohlbefinden und den Gesundheitsstatus der Tiere maßgeblich [42], [117]. Kühe mit Klauenerkrankungen zeigen eine deutlich verminderte Leistung [3], [109] und verursachen hohe Behandlungskosten. Eilers 2008 [28] führt aus, dass sich Kalkulationen für die durchschnittlich pro Lahmheitsfall entstehenden Gesamtkosten nach Angabe verschiedener Autoren [25], [85], [97], [76] zwischen 130 € und 600 € bewegen. Zudem können schwere Lahmheiten die Ursache für einen frühzeitigen Abgang sein. Nach LKV-Bayern [54] waren 2014 mit 9,3 % aller Abgangsursachen die Klauen- und Gliedmaßenkrankungen von besonderer Bedeutung. Weltweit reicht die durchschnittliche Lahmheitsprävalenz bei Milchkühen in Laufställen von einem Fünftel bis über die Hälfte der Tiere pro Herde (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Lahmheitsprävalenz bei Milchkühen in verschiedenen Ländern

Region	Lahmheitsprävalenz
Deutschland und Österreich [24]	36 %
Österreich [67]	34 %
Tschechische Republik [102]	31 %
Großbritannien [4]	37 %
Minnesota (USA) [29]	25 %
Kanada [116]	28 %
Kalifornien (USA) [116]	31 %
Nordost-USA [116]	55 %
Indien [68]	20 %

Um die durch Klauenerkrankungen entstehenden Schmerzen und Leiden sowie wirtschaftliche Verluste zu vermeiden, ist ein frühzeitiges Erkennen von Problemen an der Klaue sehr wichtig. Je früher eine Lahmheit erkannt und die Ursache behoben wird, desto geringer sind die Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Tieres, die Heilungsdauer und die wirtschaftlichen Folgen durch Leistungseinbußen und Behandlungskosten [57], [56]. In kleineren Betrieben kann dies durch aufmerksame Beobachtung der Tiere vom Stallpersonal umgesetzt werden.

Allerdings stieg zwischen 1999 und 2015 der Anteil der Milchviehbetriebe, die 50 Kühe oder mehr halten, erheblich: für Bayern [99] von 4,2 % auf 23,4 % und für die Bundesrepublik Deutschland von 14,1 % auf 38,5 % [100]. Mit steigender Tierzahl eines Milchviehbetriebes wird eine ausreichende Einzeltierüberwachung immer schwerer umsetzbar.

Zudem unterschätzen Landwirte häufig das Auftreten von Lahmheiten im eigenen Stall. In einer in der Tschechischen Republik [102] durchgeführten Untersuchung erkannten die

Landwirte im Durchschnitt nur ein Fünftel der tatsächlich aufgetretenen Lahmheiten. Whay et al. 2002 [119] stellten in Großbritannien ebenfalls eine Fehleinschätzung durch die Landwirte fest. Diese erkannten durchschnittlich nur ein Viertel der lahmen Tiere.

Hilfsmittel zur automatisierten Erfassung des Tierverhaltens werden immer besser und effektiver, sodass eine frühzeitige automatisierte Erkennung von Lahmheiten mithilfe dieser automatisch gewonnenen Informationen ein wertvolles Hilfsmittel zur Verbesserung bzw. Aufrechterhaltung der Klauengesundheit im Milchviehbetrieb sein kann. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Aspekte des Verhaltens sich bei einer Lahmheit verändern und in welchem Stadium der zugrundeliegenden Erkrankung. Des Weiteren sind die Art und das Ausmaß der Veränderung, beeinflussende Faktoren und die Interaktion der einzelnen Verhaltensmerkmale untereinander noch nicht umfassend und abschließend geklärt und deshalb Gegenstand der aktuellen Forschung.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Für eine Einschätzung, Bewertung und evtl. Weiterentwicklung der Systeme zur automatischen Lahmheitserkennung ist das Verständnis der Funktionsweise einer Rinderklaue, der Ursachen für Klauenerkrankungen und der Möglichkeit der weitgehend gesicherten Lahmheitserkennung über den Goldstandard „Locomotionscore“ Grundvoraussetzung.

2.1 Lahmheit

„Die Lahmheit wird definiert als Gangveränderung aufgrund einer schmerzbedingten, funktionellen oder strukturellen Störung des Bewegungsapparates.“ [5]. In ca. 90 % der bei Milchkühen auftretenden Lahmheitsfälle liegt die Ursache in Läsionen an der Klaue bzw. dem Fuß [59]. Andere, weiter proximal gelegene Ursachen, wie Nervenschädigungen oder Frakturen, kommen wesentlich seltener vor. Aus diesem Grund soll hier vor allem auf die Erkrankungen der Klaue und des Zehenendorgans eingegangen werden.

2.1.1 Aufbau der Klaue

Die knöcherne Grundstruktur der Klaue bzw. das Zehenendorgan besteht aus dem Kronbein, Klauenbein und Klauensesambein [53]. Diese bilden das Klauengelenk mit der Klauenrolle. Hier setzen die Endsehnen der Beuge- und Streckmuskeln der Zehen an (s. **Abbildung 1**).

Auf den Knochen und Sehnen liegen die drei Hautschichten von innen nach außen: Unterhaut (Subcutis), Lederhaut (Corium) und Oberhaut (Epidermis). Die Unterhaut fungiert als Verschiebeschicht zwischen Knochen, Sehnen und der Haut. Hier kann Fettgewebe eingelagert sein. An stark mechanisch belasteten Stellen wie z. B. dem Ballenbereich ist dieses durch Bindegewebe eingefasst und von fast flüssiger Konsistenz. Durch diesen spezialisierten Aufbau dient es der Stoßverteilung beim Auftreten [60].

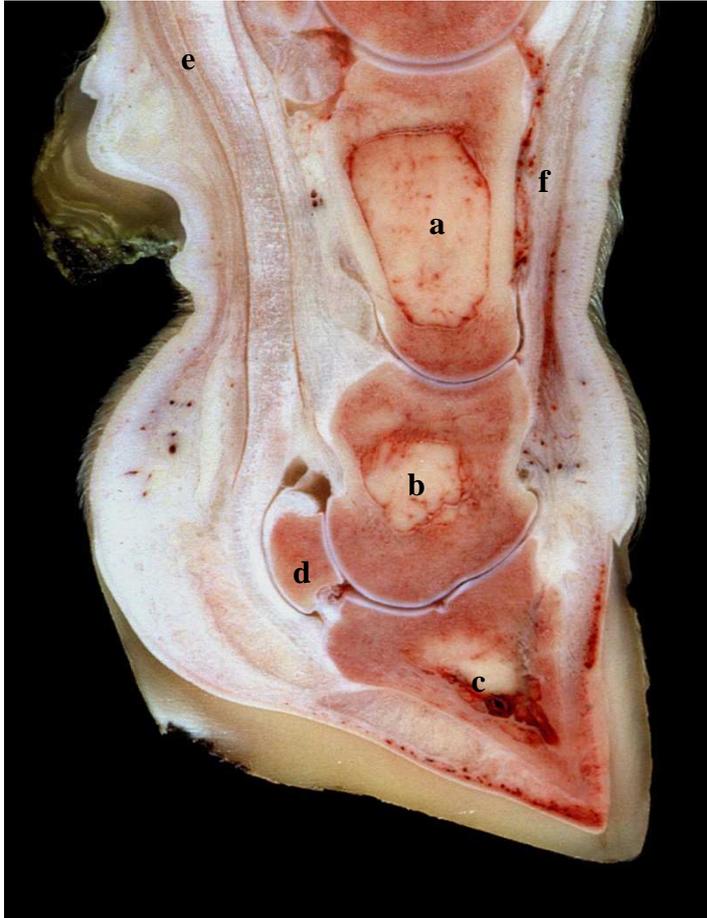


Abbildung 1: Sagittalschnitt der lateralen Zehe (linke Vordergliedmaße) eines Rindes [30]; **a** = Fesselbein, **b** = Kronbein, **c** = Klauenbein und **d** = Klauensesambein, **e** = Beugesehnen, **f** = Strecksehnen

Abbildung zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Johann Maierl aus: Fiedler/Maierl/Nuss. Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. 1. Aufl. Stuttgart: Schattauer 2004; S. 17 (Nutzung vom Verlag genehmigt)

Die auf die Unterhaut nach außen folgende Lederhaut besteht aus zwei Schichten: Die Faserschicht innen ist mit der Unterhaut verbunden. Im Wand- und Sohlenabschnitt der Zehe ist sie jedoch direkt mit dem Knochengewebe verwachsen, hier hat sich die Unterhaut vollständig zurückgebildet, sodass beim Auftreten wirkende Kräfte direkt auf das Klauenbein übertragen werden. Die nach außen auf die Faserschicht folgende Papillenschicht besteht aus zahlreichen fingerförmigen Vorwölbungen in Form von Blättchen oder Papillen, die sehr stark durchblutet und von Nervenfasern und Lymphgefäßen durchzogen sind [53] (s. **Abbildung 2**).

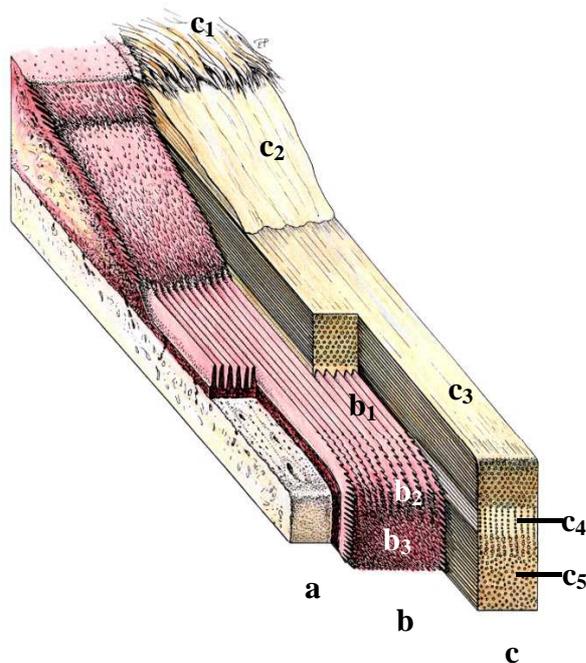
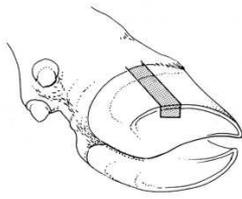


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Hornbildung an der Klauenlederhaut [30];
a = Klauenbein, **b** = Lederhaut mit **b₁** = Lederhautblättchen, **b₂** = Kappenpapillen und **b₃** = Terminalpapillen, **c** = Hornschicht mit **c₁** = Saumhorn, **c₂** = Kronhorn, **c₃** = Wandhorn, **c₄** = Weiße Linie, **c₅** = Sohlenhorn

Abbildung zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Johann Maierl aus: Fiedler/Maierl/Nuss. Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. 1. Aufl. Stuttgart: Schattauer 2004; S. 7 (Nutzung vom Verlag genehmigt)

Auf diesen Papillen liegen die Zellen der Oberhaut. Diese Schicht enthält keine Nerven, Lymph- oder Blutgefäße, die Nährstoffversorgung erfolgt allein durch Diffusion aus der Lederhaut. Die Zellen der Oberhaut bilden an der Zehe durch die nach außen fortschreitende harte Verhornung den Hornschuh, der die Zehe wie eine Kapsel umfasst [31]. Die Oberhaut proximal des Hornschuhs, also der Zehenballen und die behaarte Haut, bildet hier durch weiche Verhornung die äußere Hautschicht. Das durch weiche Verhornung entstehende Gewebe ist wesentlich weniger widerstandsfähig und nutzt sich schneller ab als hartes Horn [30].

Die Klaue kann grob in fünf Abschnitte eingeteilt werden [31] (s. **Abbildung 3**):

- a. *Saumabschnitt* mit dem weichen und wenig widerstandsfähigen Saumhorn, das nach unten über das Kronhorn wächst und dessen Wassergehalt reguliert.
- b. *Kronabschnitt* mit dem härtesten Teil des Hornschuhs, dem Kronhorn, das nach unten geschoben und erst bei Kontakt zum Boden abgerieben wird.
- c. *Wandabschnitt* bezeichnet den Bereich zwischen Kron- und Sohlenabschnitt ohne Unterhaut. Die Lederhaut ist direkt mit dem Knochen verwachsen und liegt hier in Blättchen vor (s. **Abbildung 2**). Dadurch ist das Klauenbein am Wandhorn aufgehängt. Der Übergang vom Wandhorn zum Sohlenhorn stellt die weiße Linie dar. Die Lederhaut liegt in Form von Kappenpapillen vor (s. **Abbildung 2**). Hier wird weniger dichtes Horn produziert.
- d. *Sohlenabschnitt* mit sehr hartem Horn, ebenfalls ohne Unterhaut. Die Lederhaut liegt in Form von Terminalpapillen vor (s. **Abbildung 2**).
- e. *Ballenabschnitt* mit dem vorderen Ballen aus hartem Horn und dem hinteren Ballen aus weichem Horn, jeweils mit Unterhaut und eingelagertem Ballenfettkörper

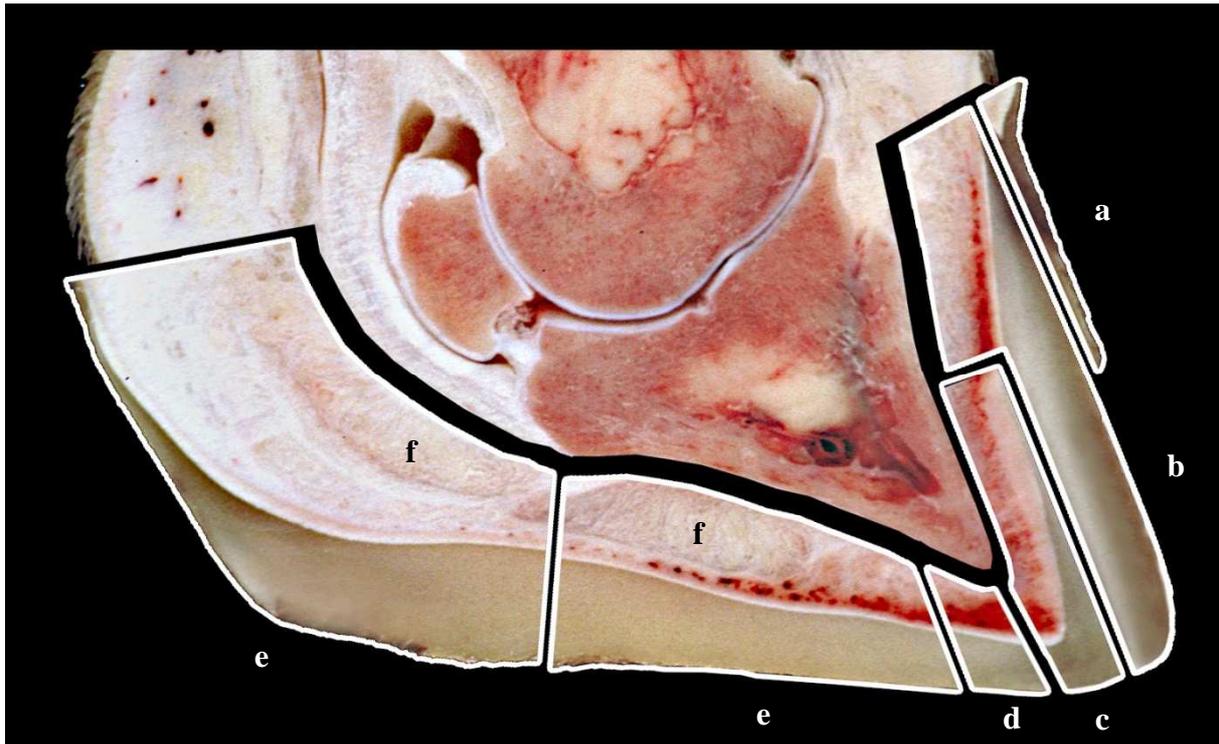


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Klauenabschnitte am Sagittalschnitt [30]

a = Saumabschnitt, **b** = Kronabschnitt, **c** = Wandabschnitt, **d** = Sohlenabschnitt, **e** = Ballenabschnitt, **f** = Ballenfettpolster

Abbildung zur Verfügung gestellt von Herrn PD Dr. Johann Maierl aus: Fiedler/Maierl/Nuss. Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. 1. Aufl. Stuttgart: Schattauer 2004; S. 10 (Nutzung vom Verlag genehmigt)

2.1.2 Erkrankungen der Klaue als Lahmheitsursache

Die verschiedenen Erkrankungen an der Klaue und den angrenzenden Strukturen haben unterschiedliche Auswirkungen auf Art und Verlauf der Lahmheit. Es kann zwischen akutem, progredientem und chronischem Verlauf oder völligem Ausbleiben der Lahmheit unterschieden werden. Dies soll im Weiteren erläutert werden.

2.1.2.1 Erkrankungen der knöchernen Strukturen und Gelenke

Die knöchernen Strukturen des Zehenendorgans können, wenn auch selten, von Missbildungen wie überzähligen Zehen oder Verknöcherung der Gelenke betroffen sein. Je nach beteiligten Strukturen kann das zu erheblichen Einschränkungen bei der Fortbewegung führen [30].

Akut auftretende Lahmheiten sind häufig die Folge von Zerrungen oder Verstauchungen der Gelenke oder von Frakturen der beteiligten Fußknochen. Die häufigste Fraktur ist die des Klauenbeins. Die Ursache ist meist ein starkes auf den Fuß einwirkendes Trauma. Pathologische Frakturen als Folge von entzündlichen Vorgängen, die die Knochenstruktur beschädigen, werden ebenfalls beobachtet [30].

Septische Entzündungen der Knochen oder der Gelenke treten meist als Folge von aufsteigenden Entzündungen aus Strukturen weiter distal oder durch hämatogene Streuung nach genereller Infektion auf [30] und haben einen progredienten Verlauf.

Chronische Lahmheiten aufgrund Erkrankungen des knöchernen Skeletts des Fußes erscheinen in Form von Arthrose, die wegen des geringeren Alters von Nutztieren im Vergleich zum Menschen selten vorkommt [30].

2.1.2.2 Erkrankungen der Sehnen und Sehnenscheiden

Akute Lahmheiten aufgrund von Problemen der Sehnen oder Sehnenscheiden werden nach einem An- oder Abriss oder Durchtrennung vor allem der tiefen Beugesehne beobachtet [12].

Besonders häufig im Vergleich zu anderen Erkrankungen der Sehnen und Sehnenscheiden kommt die Entzündung der Fesselbeugesehnenscheide vor, also der gemeinsamen Sehnenscheide der oberflächlichen und der tiefen Beugesehne. Sie kann sich aus einer direkten Verletzung (z. B. nach dem typischen Gabelstich in der Anbindehaltung) oder einer aufsteigenden Infektion ausgehend von einer Läsion an der Klaue entwickeln. Lahmheiten aufgrund dieser Erkrankung entwickeln sich progredient [12].

2.1.2.3 Erkrankungen der Klauenlederhaut

2.1.2.3.1 Aseptische Entzündung oder „Rehe“

Laut Shearer et al. 2015 [95] entsteht die aseptische Entzündung der Klauenlederhaut zunächst aufgrund von Ausschüttung vasoaktiver Substanzen, die die Mikrozirkulation stören und somit zu einer Unterversorgung des Gewebes führen. Warum es ursprünglich zu der Ausschüttung dieser Substanzen kommt, war und ist noch immer Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Viele Ursachen kommen in Betracht, zum Beispiel übermäßige Fütterung von leicht verdaulichen Kohlenhydraten („Kraftfutter“) [96], Hormonumstellung in der Transitphase [51], Stoffwechselprobleme [112] oder eine Allgemeininfektion [75]. Ossent et al. [74] beschreiben diesen Vorgang als erste von drei Phasen der aseptischen Klauenlederhautentzündung, die wenige Stunden bis Tage dauern kann.

In der zweiten Phase resultieren die degenerativen Prozesse, die auf die gestörte Mikrozirkulation mit Transsudation und Diapedesisblutung folgen, in Entzündung, Ödembildung und Nekrosen. Das führt wiederum zu einer Schwächung der Verbindung zwischen Lederhaut und Epidermis (also dem Hornschuh). Da das Klauenbein über die Papillen der Lederhaut am Hornschuh aufgehängt ist, sinkt die Zehe in der Folge im Hornschuh nach unten und komprimiert die darunter liegenden Bereiche der Lederhaut zwischen Knochen und Sohlenhorn.

Die dabei entstehenden Verletzungen der Lederhaut werden in der dritten Phase, nach acht bis neun Wochen, sichtbar. Hornbildungsstörungen, die aus der Schädigung der Lederhaut resultieren, können sich in Deformationen des Hornschuhs aufgrund der Bildung weniger stabilen

Horns, doppelter Sohle durch Zusammenhangstrennung von Lederhaut und Epidermis an der Sohle oder in Geschwüren der Lederhaut unterschiedlicher Lokalisation (Sohlengeschwür, Ballengeschwür und Sohlenspitzen-geschwür, Weiße-Linie-Defekt, Hornkluft) zeigen.

Aseptische Entzündungen der Lederhaut und die damit einhergehende Lahmheit entwickeln sich je nach Ursache (s. o.) akut, progredient oder zu einem chronischen Geschehen.

2.1.2.3.2 Septische Entzündung

Septische Entzündungen der Klauenlederhaut entstehen vor allem durch das Eindringen von Keimen durch die Epidermis. Ursachen können Verletzungen durch das Eindringen eines spitzen Gegenstandes (z. B. eines Nagels) in den Hornschuh bis auf die darunterliegende stark durchblutete Lederhaut sein [30]. Die Lahmheit tritt hier plötzlich auf, da die Lederhaut direkt schmerzhaft verletzt wird.

Eine weitere Eintrittspforte kann die weiße Linie sein. Die weiße Linie stellt den Übergang von der Hornproduktion durch die Wand- auf Sohlenlederhautpapillen dar. An dieser Stelle wird im Vergleich zum Wand- und Sohlenhorn minderwertiges Horn produziert. Der Hornschuh weist deshalb hier eine Schwachstelle auf. Das Horn ist bröckeliger und anfälliger für das Eindringen von Keimen. Als Reaktion des Körpers darauf entsteht eine eitrige oder seröse Entzündung unter dem Hornschuh, die sowohl durch die Entzündung selbst, als auch durch den Druck, der durch die Flüssigkeitsansammlung entsteht, zu starken Schmerzen führt. Dieser Effekt verschlimmert sich mit Ausbreitung der Infektion in tiefere Schichten [30]. Auch ursprünglich nichtinfektiöse Entzündungsgeschehen wie Sohlengeschwüre können sich sekundär infizieren, sobald die Lederhaut durch Wegbröckeln des darüber liegenden geschädigten Horns frei liegt [101].

Septischen Entzündungen der Lederhaut und die daraus entstehende Lahmheit entwickeln sich progredient mit dem Grad, in dem Lederhaut oder umgebendes Gewebe betroffen sind.

2.1.2.4 Erkrankungen der äußeren Haut

2.1.2.4.1 Ballenhornfäule

Ballenhornfäule ist definiert als eine Zersetzung des Ballenhorns. Es entstehen Furchen und Vertiefungen, die aber auf diesen Bereich der Klaue beschränkt sind. Sie kann prädisponierend für andere, Lahmheiten auslösende Krankheiten, wirken, führt selbst aber nicht zu Schmerzen bei der Fortbewegung. Häufig wird Ballenhornfäule in typischen V-förmigen Furchen beobachtet, wenn gleichzeitig Dermatitis digitalis vorliegt, ein ursächlicher Zusammenhang wird beschrieben [50].

2.1.2.4.2 Limax, Hyperplasia interdigitalis

Die Wucherung der Haut zwischen den Zehen, auch Limax genannt, entsteht durch einen ständigen Dehnungsreiz bei genetisch bedingten Spreizklauen, durch fehlerhafte oder fehlende Klauenpflege, ungeeignete Haltungsformen, v.a. mit Laufflächen, die nicht an die natürlichen Anforderungen der Tiere angepasst sind. Es ist auch häufig mit Dermatitis digitalis vergesellschaftet [91]. Der Zwischenklauenwulst selber ruft zunächst keine Lahmheit hervor. Erst wenn hier sekundär eine Entzündung entsteht, kann dies zu teilweise starker Lahmheit führen [30].

2.1.2.4.3 Hornspalt

Hornspalten verlaufen vertikal im Hornschuh und sind oft die Folge der Bildung minderwertigen Horns nach Verletzungen am Kronsaum. Aber auch horizontale Spalten können auftreten und sind oft Folge einer massiven Hornbildungsstörung (Rehe). Ist der Riss nur oberflächlich, so ist keine Lahmheit zu beobachten. Dringt er bis auf die Lederhaut, kann er schwere Lahmheit verursachen [30].

2.1.2.4.4 Dermatitis digitalis

Dermatitis digitalis (Mortellaro'sche Krankheit) bezeichnet eine bakterielle Entzündung der Haut an der Klaue des Rindes mit einem typischen klinischen Bild. Die am häufigsten verwendete Einteilung der Läsionen erfolgt anhand des Stadiums [121]: Zunächst bildet sich ein Ulkus (ulzerative oder granulomatöse Phase). Die typische Lokalisation hierfür ist an der Plantar- oder Palmarfläche der Klaue oberhalb des Zwischenklauenspalts. Die Schmerzhaftigkeit dieser Läsion ist individuell sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund kann eine vorhandene Läsion nicht eindeutig als Ursache für eine auftretende Lahmheit interpretiert werden. Es folgt eine zweite, dyskeratotische proliferative Phase, die in eine dritte, chronische übergehen kann. An einem Tier können alle Stadien der Krankheit gleichzeitig auftreten und jede Phase kann wieder in eine andere übergehen. Die Faktoren, die die Ausbildung der verschiedenen Läsionen verursachen, sind noch nicht umfassend und abschließend geklärt.

2.1.2.4.5 Dermatitis interdigitalis und Phlegmone

Die Entzündung der Haut im Zwischenklauenspalt hat zunächst bei oberflächlicher Ausprägung keine Auswirkung auf das Gangbild. Entwickelt sie sich aber durch Ausbreitung in tieferes Gewebe zu einer diffusen Unterhautentzündung (Phlegmone), verursacht sie starke Schmerzen. Die Eintrittspforte für die Erreger befindet sich häufig im Zwischenklauenspalt und diese breiten sich von dort in der Zehe aus. Die Tiere weisen häufig reduziertes Allgemeinbefinden und Fieber auf, zudem gehen sie akut stark lahm [43].

2.1.3 Auswirkungen auf die Fortbewegung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass unterschiedliche Erkrankungen der Zehe zu unterschiedlicher Ausprägung und Verlauf von Lahmheiten führen. Plötzlich auftretende Lahmheiten werden häufig durch traumatisch bedingte Verletzungen hervorgerufen. Lahmheiten aufgrund

infektiöser oder entzündlicher Geschehen verursachen eher einen progredienten Verlauf. Die Auswirkungen chronischer Erkrankungen sind wiederum andauernd und gleichbleibend. In **Tabelle 2** sind diese Zusammenhänge zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Klauenkrankheiten und damit verbundener Lahmheit

betroffene Struktur und Erkrankung	Verlauf der Lahmheit			
	akut	progredient	chronisch	fehlt
knöchernen Strukturen und Gelenke				
Missbildung	x	x	x	
Frakturen/Fissuren	x			
Infektion der Knochen und Gelenke		x		
Arthrosen		x	x	
Verstauchungen, Zerrungen	x			
Sehnen und Sehnenscheiden				
An- oder Abriss, Durchtrennung	x			
Entzündung		x	x	
Klauenlederhaut				
septische Entzündung	x	x		
aseptische Entzündung				
Phase1	x	x	x	
Phase2		x	x	
Phase3		x	x	
äußere Haut				
Ballenhornfäule		x		x
Dermatitis digitalis	x	x	x	x
Dermatitis interdigitalis		x		
Phlegmone	x	x		
Hyperplasia interdigitalis		x	x	x

2.2 Locomotionscore als Goldstandard zur Beurteilung von Lahmheiten

Die Erkennung von Lahmheiten als Folge von Klauenerkrankungen unterschiedlichster Ausprägung wird vor allem durch visuelle Beobachtung umgesetzt. Es existieren verschiedene in Wissenschaft und Praxis verwendete Ansätze zur Systematisierung der visuellen Lahmheitsbeurteilung mit dem Zweck, die Bewertung vergleichbar und reproduzierbar zu machen: Es wird anhand der Beobachtung eine graduelle Einteilung oder Gangbenotung (Locomotionscoring) nach einem bestimmten Bewertungsschema vorgenommen. Der Beobachter orientiert sich hierbei an verschiedenen Körperhaltungen oder Verhaltensweisen, die im Zusammenhang mit der Fortbewegungsphysiologie der Tiere stehen. Je nach Schema gibt es unterschiedlich viele, meist zwischen drei bis sechs Stufen. Fünf- oder sechsstufige Bewertungssysteme stellen dabei genauere Abstufungen zwischen undeutlichen, geringgradigen und schweren bis sehr schweren Lahmheiten fest. Locomotionscoring wird im Bereich der Wissenschaft eingesetzt, um andere Systeme (s. 2.3), die Lahmheiten erkennen sollen, überprüfen und vergleichen zu können.

Die drei laut Schlageter-Tello 2014 [94] am häufigsten in wissenschaftlichen Untersuchungen verwendeten Bewertungssysteme sollen hier kurz erläutert werden.

2.2.1 Beurteilung des Lahmheitsgrades anhand von vier Gangmerkmalen und allgemeinem Verhalten

Diese Methode ist sehr zeitaufwendig und erfordert eine sehr genaue Beobachtung des Einzeltiers. Der Locomotionscore von Manson und Leaver 1988 [62] benötigt pro Tier ca. eine halbe bis ganze Minute [14], in der verschiedene Gangmerkmale beobachtet werden, die zusammen dann zu einer neunstufigen Benotung von eins bis fünf (mit 0,5-Schritten) führen. Grad eins steht hier für ein gesundes Tier, Grad 1,5 beginnt bei leichter Abduktion von Gliedmaßen, bei Grad 2,5 kommt das Merkmal „unregelmäßiger Gang“ hinzu. Leichte Lahmheit bei nicht von der Lahmheit beeinflusstem Verhalten entspricht Grad drei. Wenn Schwierigkeiten beim Richtungswechsel auftreten beginnt Grad 3,5. Sobald das Verhaltensmuster beeinflusst ist, entspricht dies Grad vier und ab 4,5 zeigen sich zusätzlich Schwierigkeiten beim Aufstehen.

2.2.2 Beurteilung des Lahmheitsgrades anhand von sechs Gangmerkmalen

Flower und Weary 2006 [33] verwendeten sechs Merkmale zur Vergabe von neun Gangnoten (eins bis fünf mit 0,5-Abstufungen):

- *Rückenlinie*: Gerade bedeutet gesund, je stärker gekrümmt, desto höher der Lahmheitsgrad
- *Kopfbewegung*: Gleichmäßige Bewegung während des Gangs im Vergleich zu ruckartigen Kopfbewegungen ab Grad vier (Kopfnicken)
- *Track up*: Landen die Hinterfüße während des Gehens im Abdruck der Vorderfüße, ist die Kuh gesund, ab Grad zwei bis fünf verringert sich dieses Merkmal bis hin zu offensichtlich verkürzten Schritten
- *Gelenkbeugung*: Eine gesunde Kuh bewegt ihre Gelenke in normalem Umfang, je steifer die Gelenke, desto höher der Beurteilungsgrad
- *Gangsymmetrie*: Symmetrischer Gang steht für ein gesundes Tier, die Asymmetrie steigt mit dem Lahmheitsgrad
- *Gliedmaßenbelastung*: Werden alle Gliedmaßen gleichmäßig belastet, steht das für Grad eins, bei Grad fünf kann das Tier eine oder mehrere Gliedmaße gar nicht mehr belasten

Dieses Bewertungssystem ist aufgrund der vielen unterschiedlichen Anzeichen, die beobachtet werden, relativ aufwendig durchzuführen. Müssen in dem kurzen Moment, in dem ein Tier den Beobachter passiert, zu viele Eigenschaften gleichzeitig erfasst werden, so kann das leicht zu Flüchtigkeitsfehlern und Fehleinschätzung führen.

2.2.3 Beurteilung des Lahmheitsgrades anhand von Rückenkrümmung und Gliedmaßenbelastung

Das bisher mit Abstand am meisten verwendete System ist der Locomotionscore nach Sprecher et al. 1997 [98]. Hier wird vor allem die Rückenkrümmung betrachtet. Hat eine Kuh sowohl im Stand als auch während der Fortbewegung eine gerade Rückenlinie und weist keine Abweichungen vom normalen Gangbild auf, so wird sie mit eins, also „normal“, bewertet. Grad zwei bedeutet eine gekrümmte Rückenlinie während des Laufens, im Stand aber eine gerade mit immer noch unverändertem Gangbild. Ist die Rückenlinie auch im Stand gekrümmt und eine Beeinträchtigung des Gangbildes sowie Verkürzung des Schrittes einer oder mehrerer Gliedmaßen sichtbar, dann entspricht das Grad drei. Bei Grad vier zeigt das Tier zusätzlich zu den Kriterien von Grad drei eine Entlastung einer oder mehrerer Gliedmaßen und macht vorsichtige Schritte. Wenn eine Kuh starken Widerwillen zeigt oder nicht fähig ist, eine oder mehrere Gliedmaßen zu belasten, so wird sie mit Grad fünf bewertet. Die klar definierte Abgrenzung und der dabei geringe zeitliche Aufwand pro Tier stellen die größten Vorteile dieser Bewertungsmethode dar.

Der größte Nachteil subjektiver Locomotionscores liegt laut Flower und Weary 2009 [34] in der in anderen Versuchen [120], [33], [107] festgestellten geringen Beobachterübereinstimmung (Reliabilität). Die Reliabilität eines subjektiven Gangbewertungssystems steigt aber erheblich mit der Erfahrung des Beobachters [11], [63].

Ein Lahmheitsbewertungssystem ist schwer auf seine Zuverlässigkeit zu prüfen, da der Zusammenhang mit dem Auftreten von klinisch sichtbaren Läsionen an der Klaue, die als Vergleichsgröße dienen könnten, nicht eindeutig ist [120]. Einige schmerzhaft Vorgänge, wie Entzündungen der Klauenlederhaut, sind nach außen hin nicht zu erkennen. Außerdem gibt es bei gleicher Art der Läsion teilweise große interindividuelle Unterschiede in der Schmerzsensibilität [87], [45].

2.3 Systeme zur automatischen Lahmheitserfassung

Zur automatischen Analyse und Erkennung von Lahmheiten ist bereits eine Reihe von unterschiedlichen Systemen bekannt. Grundsätzlich ist zwischen Analyse von Abweichungen in der Gliedmaßenbelastung (direkt) und der Analyse von in Folge einer Lahmheit entstehenden Verhaltens- oder Leistungsabweichungen (indirekt) zu unterscheiden. Im Folgenden werden deren Methoden und technischer Aufbau erläutert.

2.3.1 Direkte Verfahren

2.3.1.1 Analyse der Gliedmaßenbelastung im Stand

Es existieren verschiedene Methoden, Unterschiede in der Gliedmaßenbelastung zu messen. Zum einen kann im Stand die reine Gewichtsverteilung auf die vier Füße durch mehrere

Waagen erfasst werden. Milchkühe entlasten als Reaktion auf unangenehmen Untergrund oder Schmerzhaftigkeit beim Auftreten die betroffene Gliedmaße und verteilen ihr Körpergewicht auf die kontralaterale um [69]. Zudem steigert unbequemer Untergrund oder Belastungsschmerz ebenfalls die Variabilität pro Zeiteinheit in der Gewichtsverteilung zwischen zwei kontralateralen Füßen [69], [17], [90]. Diesen Umstand machen sich Systeme zu Nutze, die mithilfe von vierzelligen Wiegeeinheiten, die jeweilige Gewichtsbelastung einer einzelnen Gliedmaße messen und so Lahmheiten detektieren sollen.

Pastell et al. 2007 [77] erreichten mit einem speziell entwickelten Berechnungsmodell auf Basis dieser Erkenntnisse eine Erkennungsrate von 100 % aller lahmen Kühe, bei einer Rate korrekter Einstufungen von 96,8 %. In einem späteren Versuch [78] lag die AUC (Area Under the Curve, Ergebnis der ROC-Kurven-Analyse (s. 4.6.2)) der Einstufungen des Systems aber nur bei 0,88. Hierbei ist zu bemerken, dass es im Gegensatz zu anderen Läsionen keinen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Dermatitis digitalis (DD) und der Gewichtsverteilung gab.

Chapinal und Tucker 2012 [15] entwickelten einen Algorithmus, um aus den Informationen über die Gewichtsverteilung die Anzahl der getätigten Schritte während des Wiegevorgangs zu definieren. Lahme Kühe machten während des Aufenthalts in der Waage durchschnittlich mehr Schritte als gesunde. Mit dieser Herangehensweise wurde jedoch nur eine AUC von 0,67 erreicht.

2.3.1.2 Analyse der Gliedmaßenbelastung in der Fortbewegung

Wenn die Kuh in Bewegung ist, kann nicht nur die Verteilung der Körpermasse, sondern auch die Wirkung und Richtung der entstehenden Kraft auf die vier Gliedmaßen (acht Klauen) bzw. die Oberfläche, auf der die Kuh sich befindet, gemessen werden. Dies geschieht entweder mit Kraftmessplatten [61] oder Drucksensormatten [111].

Die Kraftmessplatten messen Bodenreaktionskräfte, also die extern auf den Fuß wirkenden Kräfte. Läsionen am Fuß führen beim Auftreten zu geringerer Kraft und niedrigerem Impuls an der Klaue [86], [58]. Dieser Zusammenhang tritt bei Lahmheit an mehreren Gliedmaßen und bei genereller Gangabnormität wesentlich schwächer auf und unterliegt großen tierindividuellen Unterschieden [58]. Die Symmetrie der vertikal wirkenden Kräfte an zwei kontralateralen Gliedmaßen kann ebenfalls mithilfe von Kraftmessplatten erfasst werden und dient als Lahmheitsindikator. Lahme Tiere wiesen eher eine Asymmetrie auf als nicht lahme [105], [58].

Die eben genannten Systeme erfassten lahme Tiere mit mittlerer Genauigkeit. Zum Beispiel erreichten Liu et al. 2011 [58] eine Sensitivität von 52 % (d.h. 52 % der tatsächlich lahmen Tiere wurden vom System als lahm erkannt) und eine Spezifität von 88 % (d.h. 88 % der tatsächlich nicht lahmen Tiere wurden vom System als nicht lahm erkannt). Die AUC des Sys-

tems von Rajkondawar et al. 2006 [86] lag bei 0,84. Durch eine Ergänzung der Messmethode um eine weitere Dimension (3D) erreichten Dunthorn et al. 2015 [26] eine Bestimmungsgenauigkeit, Sensitivität und Spezifität von jeweils über 90 %.

Drucksensoren im Boden, die am Ausgang des Melkstands eingebaut wurden, messen während zweier vollständiger aufeinanderfolgender Gangzyklen, d. h. jeder Fuß berührt zweimal den Boden, eine ggf. veränderte Druckverteilung auf die Gliedmaßen [61]. Die Geschwindigkeit und (A)symmetrie beim Aufsetzen der Gliedmaßen lieferte laut den Autoren die besten Erfolge in der Erkennung von Lahmheiten. Diese Methode erzielte für nicht lahme, geringgradig lahme und hochgradig lahme Tiere jeweils eine Sensitivität von 85 %, 76 % und 90 %, bei einer Spezifität von 86 %, 89 % und 100 %. Die Sensitivität und Spezifität bei geringgradigen Lahmheiten konnten in einem Folgeprojekt durch verbesserte Auswertungsmethoden auf jeweils 88 % und 87 % gesteigert werden [111].

2.3.1.3 Analyse von Videoaufnahmen

Die Anwendung von Videotechnik mit computergesteuerter Auswertung ist ein weiteres Verfahren zur Lahmheitserkennung. Hierbei wird im Vorbeigehen der Kuh die Rückenlinie des Tieres von der Seite aus aufgezeichnet und das Bild dann mittels geeigneter Bildverarbeitungssoftware ausgewertet. Anhand der Krümmung der Rückenlinie wird der Lahmheitsgrad bestimmt, wobei ein gerader Rücken für „nicht lahm“ steht. Sowohl Poursaberi et al. 2010 [83] als auch Viazzi et al. 2013 [114] erreichten eine sehr hohe Genauigkeit von bis zu über 90 % korrekter Einstufungen. Pluk et al. 2012 [82] entwickelten eine Kombination von Videoanalyse und Drucksensormatten aus dem oben beschriebenen Versuch von Maertens et al. 2011 [61]. 76 % der lahmen Kühe konnten mit diesem System aufgrund eines verringerten Bewegungsumfanges in den Sprunggelenken oder des Winkels, in dem das Tier die Vorderfüße im Gehen anhebt, erkannt werden. Blackie et al. 2013 [9] verwendeten kinematische Ganganalyse, um lahme von nicht lahmen Tieren zu unterscheiden. Dabei wurden Markierungspunkte an den Drehpunkten wichtiger Gelenke und am Rücken der Kuh befestigt. Die Tiere wurden nun an einer Kamera vorbeigeführt und aufgenommen. Mithilfe eines speziellen Computerprogramms wurden dann nur die Position der markierten Punkte und ihre Position zueinander im zeitlichen Verlauf analysiert. Somit konnten die Schrittcharakteristik, die Gelenkbeugung und die Wirbelsäulenposition ermittelt werden. Lahme Kühe machten kürzere Schritte als nicht lahme. Außerdem zeigten Tiere mit Sohlengeschwüren eine deutliche Verkürzung der Wirbelsäule während der Fortbewegung im Vergleich zum Stand.

Auch die Anwendung von 3D-Kameras zur Lahmheitsdetektion wurde bereits untersucht. Dabei laufen die Tiere nicht seitlich an der Kamera vorbei, sondern unter der Kamera hindurch. Das hat den Vorteil, dass sie sich einfacher und flexibler installieren lässt. Außerdem verringern sich somit Schattenwurf und Bildveränderungen im Hintergrund, die zu falschen Ergebnissen führen können. Van Hertem et al. 2013 [109] stuften mit dieser Methode 82 %

der Fälle richtig als lahm oder nicht lahm ein. Viazzi et al. 2014 [113] verglichen die 2D- mit der 3D-Videoanalyse. Die Treffgenauigkeit lag bei der 2D-Methode bei 91 %, bei der 3D-Methode bei 90 %.

2.3.2 Indirekte Verfahren

2.3.2.1 Infrarot-Thermografie

Franze et al. 2011 [35] untersuchten die Verwendbarkeit von Infrarotkameras zur Erkennung von Klauenerkrankungen. Sie maßen den Temperaturunterschied zwischen der kranken und der gesunden Klaue am selben Fuß. Hierbei ergab sich eine Sensitivität von ca. 30 % bei einer Spezifität von ca. 70 %. Alsaad und Buscher 2012 [2] untersuchten den Temperaturunterschied am Kronsaum zwischen dem erkrankten Fuß und dem kontralateralen direkt vor und nach der Klauenpflege. Es ergab sich eine Sensitivität von 86 % bei einer Spezifität von 56 % bei Messung vor der Klauenpflege und eine Sensitivität von 80 % bei einer Spezifität von 82,9 % danach.

2.3.2.2 Analyse von Leistungsdaten

Die bisher beschriebenen Systeme wiesen teilweise sehr hohe Genauigkeit auf, allerdings benötigen sie den Einbau zusätzlicher Messsysteme, die wiederum hohe Kosten für Anschaffung und Instandhaltung bedeuten. Es ist deshalb sinnvoll, Daten von bereits für andere Zwecke eingebauter Technik zu nutzen. Zum Beispiel können Leistungs- oder Aktivitätsdaten einer Kuh, die durch schon im Betrieb vorhandene Melksysteme, Tierwaagen, Kraftfutterstationen oder Brunsterkennungssysteme etc. erfasst werden, ebenfalls einen Hinweis auf Lahmheit geben.

2.3.2.2.1 Körperkondition

In einigen Forschungsprojekten konnte nur ein schwacher Zusammenhang zwischen dem Verlust von Körpergewicht und dem Auftreten von Lahmheiten nachgewiesen werden. In einigen Fällen von Klauenerkrankungen (23 %) ging ein Gewichtsverlust voraus [1]. Im Durchschnitt wiegen aber nur die hochgradig lahmen Kühe weniger als die nicht lahmen der gleichen Herde [73], [92]. Ein Modell, basierend auf dem Tiergewicht erreichte eine AUC von 0,66 bei der Erkennung von Lahmheiten [49].

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Body Condition Score (BCS) und der Dicke des Ballenfettpolsters [6]. Tiere mit einem dünneren Ballenfettpolster [6] bzw. einem BCS von unter 2,5 [41] entwickeln häufiger Lahmheiten aufgrund von Weiße-Linien-Defekten (WLD) oder Sohlengeschwüren (SG). Bei Lahmheiten aufgrund von Dermatitis digitalis konnte dieser Effekt allerdings nicht nachgewiesen werden.

2.3.2.2.2 Melkparameter

Laut Pavlenko et al. 2011 [80] und Van Hertem et al. 2013 [109] kann verringerte Milchleistung ein Hinweis auf eine bestehende Klauenerkrankung sein. In anderen Untersuchungen [49], [23], [92] zeigte sich kein bedeutender Effekt von Lahmheit auf die Milchleistung. Lahme Tiere in Herden mit automatischem Melksystem (AMS) gehen seltener zum Melken als nicht lahme [66] und in Betrieben mit Melkstand verändert sich die Melkreihenfolge beim Auftreten von Lahmheiten [47], [49].

2.3.2.2.3 Futteraufnahme

Die Futteraufnahme erwies sich in mehreren Versuchen als hinweisender Faktor für Lahmheit. Bach et al. 2007 [3], Gonzalez et al. 2008 [40], Kramer et al. 2009 [52], Miekley et al. 2013 [65], Schindhelm et al. 2015 [92], Thorup et al. 2015 [103] und Norring et al. 2014 [73] konnten eine Verminderung der Futteraufnahmedauer und eine erhöhte Futteraufnahmegewindigkeit mit steigender Lahmheit nachweisen. Nach den eben genannten Forschungsprojekten erweist sich das Futteraufnahmeverhalten im Vergleich zur Futteraufnahmemenge als sensiblerer Faktor in Bezug auf die Detektion von Klauenerkrankungen. Bei nur leichtem Anstieg des Locomotionscores (LMS) blieb die Futteraufnahmemenge zunächst konstant, die Zeit, die ein Tier am Trog verbrachte aber, verminderte sich. D. h. die Futteraufnahmegewindigkeit stieg. Die Anzahl der Mahlzeiten bzw. der Besuche am Futtertisch korreliert ebenfalls mit dem Lahmheitsgrad: Bei Verschlechterung des Locomotionscores geht sie zurück [3], [52], [65], [66], [92], [103].

Das Futteraufnahmeverhalten kann mithilfe von speziellen Wiegetrögen [36] gemessen werden. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten ist deren Verwendung allerdings nicht praxisrelevant. Pedometer (Track a Cow, Animart Inc., Beaver Dam, WI and ENGS, Rosh Pina, Israel), die eigentlich routinemäßig zur Brunstdetektion verwendet werden und lediglich mithilfe einer zusätzlich eingebauten Induktionsschleife am Futtertisch die Aufenthaltsdauer dort messen können, bieten eine Alternative. Die Dauer des Aufenthalts am Futtertisch korreliert sehr hoch mit der Dauer der Futteraufnahme ($r = 0,93$, $p < 0,01$) [10]. Andere Systeme, die mithilfe von Beschleunigungssensoren am Ohr Fressphasen erfassen können, bieten eine andere Möglichkeit, die Futteraufnahme bei Milchkühen automatisch zu überwachen. Spezielle Algorithmen werten die gemessenen dreidimensionalen Beschleunigungsdaten aus und geben verschiedene Verhaltensmuster aus, so auch Fressen und Wiederkauen. Doch sowohl Bikker et al. 2014 [7], als auch Borchert et al. 2015 [10] konnten lediglich eine Korrelation von $r = 0,88$ bzw. $r = 0,87$ zwischen beobachtetem und gemessenem Verhalten feststellen.

Die Dauer der Wiederkautätigkeit weist keine [104] oder nur sehr geringe [109], [66] Korrelation mit dem Auftreten von Lahmheiten auf. Sie scheint ungeeignet für die automatische Lahmheitserkennung zu sein.

2.3.2.3 Analyse von Aktivitätsdaten

In Praxisbetrieben werden inzwischen häufig Aktivitätsdaten mit dem Zweck der Brunsterkennung erfasst. Mithilfe von Beschleunigungssensoren, meist in Form von Pedometern, werden unterschiedliche Parameter der tierindividuellen Bewegung, also der Aktivität gemessen. Diese sollen dann Auskunft über den Fortpflanzungsstatus der Kuh geben. Solche Daten können Informationen über den Gesundheitsstatus, also auch zur Erkennung von Klauenerkrankungen liefern. Die Pedometer sind entweder unterhalb des Karpal- oder des Tarsalgelenks der Kuh befestigt und liefern Informationen über das Bewegungs-, Liege-, und Stehverhalten (**Abbildung 4**).



Abbildung 4: Pedometer am Fuß einer Kuh

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen erfassten die Aktivität von Milchkühen automatisch mit Pedometern.

2.3.2.3.1 Allgemeine Aktivität und Bewegungskarakteristik

Im Experiment von Mazrier et al. 2006 [64] zeigte fast die Hälfte aller lahmen Kühe eine Reduktion der Aktivität sieben bis zehn Tage vor der Feststellung der Lahmheit. Auch Thorup et al. 2015 [103] stellten verminderte Aktivität bei lahmen Tieren fest, die Varianz der Aktivität an einem Tag hingegen war erhöht, genau wie das Trippeln im Stand, wenn die Tiere sich im Lahmheitsstatus verschlechterten.

Pastell et al. 2009 [79] und auch Chapinal et al. 2011 [16] stellten mithilfe von Pedometern Unterschiede in der Gangart (Symmetrievarianz, Gehgeschwindigkeit und Vorwärtsbeschleu-

nigung) zwischen lahmen und nicht lahmen Kühen fest. Die Gehgeschwindigkeit korrelierte am höchsten mit dem Locomotionscore.

2.3.2.3.2 Liegeverhalten

Lahme Kühe liegen laut verschiedenen Autoren längere Zeit pro Tag [8], [47], [118], [13], [103]. Yunta et al. 2012 [122] konnten diesen Zusammenhang nicht feststellen, jedoch zeigten sie, wie andere Untersuchungen [47], [118], dass die Dauer einer einzelnen Liegephase bei lahmen Tieren anstieg. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Liegephasen pro Tag und dem Auftreten von Lahmheit stellt sich als inkonstant heraus. In einem Versuch von Calderon und Cook 2011 [13] wiesen lahme Tiere mehr Liegephasen pro Tag auf als gesunde, Yunta et al. 2012 [122] konnten keinen Zusammenhang zwischen Lahmheit und der Anzahl der Liegephasen nachweisen, Westin et al. 2015 [118] zeigten wiederum eine verminderte Anzahl von Liegephasen bei lahmen Kühen.

In einer Untersuchung von Blackie et al. 2011 [8] stellte sich heraus, dass Kühe mit Klauenproblemen früher am Tag aktiv werden als die Kontrollgruppe, wohingegen die lahmen Tiere im Versuch von Yunta et al. 2012 [122] nach der Futtervorlage im Mittel 13 Minuten später aufstanden und sich zudem nach der Fütterung durchschnittlich 19 Minuten eher wieder hinlegten als die nicht lahmen Tiere.

Das Liegeverhalten und die Aktivität werden erheblich durch innere Faktoren wie Alter, Anzahl der Laktationen, Trächtigkeitsstatus etc. [118] und äußere Faktoren wie Liegeflächenbeschaffenheit, Stalleinbauten, Beschaffenheit des Untergrundes etc. [110], [19], [20] beeinflusst. Ältere Kühe liegen im Durchschnitt länger pro Tag und laufen langsamer, asymmetrischer und mit stärkerer Abduktion der Gliedmaße. In dunklen oder sehr rutschigen Bereichen laufen die Tiere deutlich langsamer und machen kleinere Schritte.

Zur Übersicht sind die Zusammenhänge zwischen Lahmheitsgrad und den eben beschriebenen Aktivitäts- und Leistungsparameter in **Tabelle 3** zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenhang verschiedener Parameter mit dem LMS laut Literatur (Zusammenfassung)

Parameter	Zusammenhang mit steigendem LMS	Quellen
Milchleistung		
Milchmenge	↓ (sinkt)/ → (zunächst unverändert)	[80], [109]/ [92], [49], [23]
Melkreihenfolge	↓ (Tier fällt zurück)	[47], [49]
Anzahl Melkungen	↓ (weniger)	[66]
Körperkondition		
Tiergewicht	↓ (sinkt)/ → zunächst unverändert	[1], [49], [73]/ [92]
BCS	↓ (sinkt)	[6], [41]
Aktivität		
Allgemein	↓ (sinkt)	[64], [80], [103]
Liegedauer	↑ (steigt)	[8], [47], [118], [13], [103]
Liegephasen	↓ (weniger)/ ↑ (mehr)	[47]/ [13]
Dauer Liegephase	↑ (steigt)	[122]
Futtermaufnahme		
Menge	→ (zunächst unverändert)	[92], [104], [66]
Dauer	↓ (sinkt)	[92], [104], [66], [3], [40], [52], [65], [73]
Intensität	↑ (steigt)	[92], [104], [66], [3], [40], [52], [65], [73]
Besuche am Futtertisch	↑ (mehr)	[92], [104], [66], [3], [52], [65]

2.3.3 Kombination von Leistungs- und Aktivitätsdaten

Da einzelne Merkmale bereits z. T. recht gute Ergebnisse hinsichtlich der Lahmheitsdetektion liefern, müsste die Kombination mehrerer automatisch erfasster tierbezogener Variablen zur Verbesserung der Genauigkeit in der Lahmheitsdetektion beitragen. Die Herausforderung liegt hier, neben der Zuverlässigkeit der verwendeten Sensoren und Messtechnik, vor allem in der Auswertung und Verrechnung der großen Datenmengen. Mit der Wahl der richtigen statistischen Methode kann die Performance eines Modells erheblich gesteigert werden.

In **Tabelle 4** sind Versuche, in denen die kombinierte Analyse von Leistungs- und Aktivitätsdaten bei Milchkühen zur automatischen Erkennung von Lahmheiten eingesetzt wurden, zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuche zur kombinierten Analyse von Aktivitäts- und Leistungsdaten zur Lahmheitsdetektion

Quelle	Tierzahl	Dauer	Lahmheitserkennung	Parameter	Bestimmungsgenauigkeit	Statistische Methoden
[49]	2290	20 Monate	durch das Stallpersonal identifiziert	<ul style="list-style-type: none"> • Milchleistung • Allgemeine Aktivität • Tiergewicht 	Sensitivität: 80 % Spezifität: 55 %	<ul style="list-style-type: none"> • ANOVA • Additive logistische Regression und Regressionsbäume • Kreuzvalidierung • ROC-Kurven-Analyse
[38]	88	2 mal 5 Wochen	Wöchentliches Locomotionscoring	<ul style="list-style-type: none"> • Milchleistung • Allgemeine Aktivität 	Sensitivität und Spezifität: ca. 80 %	<ul style="list-style-type: none"> • PLS (Partial Least Squares) Regression • Diskriminanzanalyse • ROC-Kurven-Analyse • Kreuzvalidierung
[109]	118	5 Monate	durch das Stallpersonal identifiziert	<ul style="list-style-type: none"> • Milchleistung • Allgemeine Aktivität • Wiederkauen 	Sensitivität: 89 % Spezifität: 85 %	<ul style="list-style-type: none"> • Kruskal-Wallis-ANOVA • Binärlogistische Regression • Kreuzvalidierung • Kreuztabelle • ROC-Kurven-Analyse

Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuche zur kombinierten Analyse (Fortsetzung)

Quelle	Tierzahl	Dauer	Lahmheitserkennung	Parameter	Bestimmungsgenauigkeit	Statistische Methoden
[23]	170	27 Monate	Monatliches Locomotionscoring	<ul style="list-style-type: none"> • Milchleistung • Allgemeine Aktivität • Liegeverhalten • Kraftfutteraufnahme 	Sensitivität: 86 % Spezifität: 89 %	<ul style="list-style-type: none"> • quadratisches Trendmodell • DLM (Dynamisches Lineares Modell) → Grenzwerte • Kreuztabelle • 6/7 Kalibrierung, 1/7 Validierung
[52]	81	6 Monate	Lahmheitsbestimmung anhand aufgetretener Klauenerkrankungen	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Aktivität • Futteraufnahmeverhalten 	Sensitivität: 73 % Spezifität: 76 %	<ul style="list-style-type: none"> • Fuzzy Logic • 2/3 Kalibrierung, 1/3 Validierung
[65]	315	29 Monate	durch das Stallpersonal identifiziert	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Aktivität • Futteraufnahmeverhalten 	Sensitivität: über 72 % Spezifität: 82 %	<ul style="list-style-type: none"> • MCUSUM (multivariate cumulative sum) Charts
[108]	ca. 250	10 Monate	Wöchentliches Locomotionscoring	<ul style="list-style-type: none"> • Milchleistung • Allgemeine Aktivität • Körperhaltung (mittels 3D-Video-Analyse) 	Sensitivität: 69 % Spezifität: 88 %	<ul style="list-style-type: none"> • ROC-Kurven-Analyse • Binärlogistische Regression • GLMM (Generalized Linear Mixed Model) • Kreuzvalidierung • Kreuztabelle

Die Modelle von Kramer et al. 2009 [52], Mieckley et al. 2013 [65] und Kamphuis et al. 2013 [49] wiesen die schlechteste Performance auf. Die Erfassung des Lahmheitsstatus, wurde hier über den subjektiven Eindruck des Stallpersonals definiert. Es ist möglich, dass dadurch Tiere mit Klauenproblemen erst spät entdeckt wurden und nur schwere Lahmheitsfälle in die Untersuchung einbezogen wurden. Garcia et al. 2014 [38] führten zwar ein regelmäßiges Locomotionsscoring durch, verwendeten allerdings nur zwei verschiedene Parameter aufgrund derer sie die Variablen für ihr Modell berechneten. Die Kombination einer größeren Anzahl von Parametern verspricht genauere Voraussagen: Die übrigen Modelle (Van Hertem et al. 2013 und 2015 [109], [108] und De Mol et al. 2013 [23]) erreichten die höchsten Genauigkeiten bei der Vorhersage von lahmen und nicht lahmen Tieren. Sie analysierten Kombinationen von Milchleistung, allgemeiner Aktivität und dem Futteraufnahmeverhalten. Der wohl aufwendigste und größte Versuch von De Mol 2013 [23] erzielte eine Erkennungsrate bei schweren Lahmheiten von fast einhundert Prozent bei einer Spezifität von fast neunzig Prozent. Die hier verwendete statistische Methode eines dynamischen linearen Modells scheint sehr gut geeignet zu sein, um die untersuchten Daten auszuwerten. Da die Definition von richtigpositiven Ergebnissen sowie die Definition für „lahm“ oder „nicht lahm“ aber zwischen den Autoren, gegeben durch die teilweise sehr unterschiedlichen Analysemethoden, stark variiert, ist ein direkter Vergleich der verschiedenen Untersuchungen hier kritisch zu hinterfragen. Grundsätzlich ist aber zu betonen, dass alle Systeme bis auf das von Van Hertem et al. 2015 [108] leicht in bestehende Praxisbetriebe zu integrieren sind, da sie Daten von Sensoren verwendeten, die in vielen modernen Milchviehställen bereits zu Zwecken der Reproduktion, Leistungs- oder des Gesundheitsmonitorings installiert sind. Insgesamt sind die Ergebnisse einer kombinierten Leistungs- und Aktivitätsanalyse richtungsweisend, aber noch weiter zu untersuchen, um die optimale Kombination der Parameter und die beste statistische Methode zu ermitteln. In vielen Versuchen wurde entweder der Referenzwert für Lahmheit, der LMS, in großen zeitlichen Abständen erhoben, was die Genauigkeit der Kontrolle, (seit) wann eine Kuh tatsächlich lahm ist, stark herabsetzen kann, oder die Dauer der Untersuchung war zu gering, um jahreszeitliche Schwankungen, die das Wetter, das Management und die Individuen selbst betreffen, zu berücksichtigen.

Es ist festzuhalten, dass in der Praxis bisher nur in sehr geringer Zahl Systeme zur automatischen Erkennung von Lahmheiten Anwendung finden. Dies ist sicher einerseits auf die teilweise sehr hohen Anschaffungskosten, andererseits aber auch auf die immer noch zu hohe Falschpositivrate, also zu geringe Spezifität der Modelle zurückzuführen. Soweit bekannt, wurde in keinem der Forschungsprojekte eine multifaktorielle Erhebung mit den Parametern Aktivität inklusive Liegeverhalten, Raufutteraufnahmeverhalten, Milchleistung und Tiergewicht zur gleichen Zeit realisiert. Die Kombination einer größeren Anzahl von Verhaltens- und Leistungsvariablen sowie die dichtere Überwachung des Lahmheitszustandes der untersuchten Tiere bergen Potential für die Verbesserung der Genauigkeit bei der automatischen Lahmheitserkennung.

3 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit war es, bei Milchkühen der Rasse Fleckvieh in einem Versuchsbetrieb der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Grub bereits bekannte Zusammenhänge zwischen Leistungs- und Aktivitätsparametern und auftretender Lahmheit zu überprüfen und eine mögliche Anwendung dieser Erkenntnisse in der automatischen Lahmheitsdetektion weiterzuentwickeln, um somit Schmerzen, Leiden und Schäden, die durch Zeitverzögerung bis zur ersten Diagnose entstehen, zu verringern.

Daraus ergaben sich folgende Teilziele:

1. Automatisierte Erfassung der Aktivitäts- und Leistungsdaten über vorhandene Sensoren und Technik sowie Ablage in einem Datenbanksystem
2. Dokumentation des Lahmheitsstatus, d. h. regelmäßige Durchführung eines Locomotionsscores
3. Behandlung und Dokumentation der Tiere, die Lahmheiten aufweisen
4. Zusammenführung von tierbezogenen und stallbezogenen Daten zu einem Tagesdatensatz
5. Ermitteln der zur Verwendung für die Lahmheitsdetektion geeigneten Parameter und deren Verrechnung
6. Erarbeitung eines Modells zur Lahmheitserkennung basierend auf einer Kombination dieser Parameter mit dem Ziel, die Erkennungsgenauigkeit zu erhöhen

Die verwendeten Methoden und erzielten Ergebnisse sollen abschließend im Vergleich zu bereits vorhandenen Forschungsergebnissen eingeordnet und deren Relevanz in Bezug auf folgende Untersuchungen und eine spätere praktische Anwendung im laufenden Betrieb diskutiert werden.

4 Tiere, Material und Methoden

In der Milchviehherde der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Grub wurden während der Dauer der Versuchsphase (März 2014 bis Mai 2015) sowohl Leistungs- als auch Verhaltens- bzw. Aktivitätsdaten durch verschiedene automatische Sensoren kontinuierlich und tierindividuell aufgezeichnet. Die Rohdaten aus den einzelnen Erfassungssystemen wurden in eine Datenbank übertragen, dort verrechnet und mit weiteren tierbezogenen Informationen wie Laktationsstatus, Anzahl der Geburten, Gesundheitsstatus etc. zu einem Tier-Tagesdatensatz verbunden. Parallel dazu erfolgte die Dokumentation der Klauengesundheit aller Tiere. Anschließend wurden die gesammelten Daten auf Zusammenhänge zwischen den festgestellten Klauenerkrankungen bzw. Lahmheiten und den automatisch erfassten Leistungs- und Aktivitätsparameterwerten mit geeigneten statistischen Verfahren untersucht.

4.1 Tiere

Die Versuchsherde bestand durchgehend aus ca. 75 Kühen der Rasse Fleckvieh und zwei der Rasse Braunvieh. Von diesen Tieren waren zur gleichen Zeit maximal 65 in der Laktation. Die Jahresmilchleistung der Tiere während des Versuchs betrug im Mittel 8.210 kg. Die durchschnittliche Anzahl der Laktationen der Tiere im Versuch lag bei 2,37 (Minimum = 1; Maximum = 9, Standardabweichung = 1,5). Durch das remontierungsbedingte Ausscheiden und Ersetzen einiger Tiere waren insgesamt 100 Kühe Teil des Versuchs.

4.2 Stallanordnung und Herdenmanagement

4.2.1 Haltungssystem

Im Verlauf einer Laktation befand sich eine Kuh nacheinander in drei verschiedenen, räumlich getrennten Stalleinheiten. Dem Stall für die laktierenden Tiere (AMS-Stall), dem Trockensteherstall und dem Abkalbestall. Die Laufgänge des AMS-Stalls (**Abbildung 5**) waren mit Betonspaltenboden im Futtergang und Betonspaltenboden mit Gummiauflagen im Liegebereich ausgestattet. Dieser Stallteil umfasste 65 Liegeboxen unterschiedlicher Liegeflächen und Boxenabtrennungen: Tiefstreuboxen mit Kalk-Stroh-Matratzen, Hochboxen mit Gummimatratzen sowie einer dünnen Schicht Einstreu bestehend aus einem Kalk-Stroh-Mix. Das Tier-Liegeplatz-Verhältnis betrug maximal 1:1. Die Tiere hatten freien Zugang zu einem automatischen Melksystem. Im Trockensteherstall waren die Laufflächen planbefestigt, als Liegeflächen stand mindesten jedem Tier eine Hochbox zur Verfügung. Von diesem Stall aus hatten die Tiere über das ganze Jahr tagsüber Zugang zu einem Auslauf und in den Monaten Mai bis September zusätzlich zu einer Weide. Im Abkalbestall erhielt jedes Tier eine eigene, ca. 10 m² große, tief mit Stroh eingestreute Box.

4.2.2 Herdenmanagement

Während der Laktation befanden sich die Tiere im AMS-Stall. Ca. 60 Tage vor dem errechneten Geburtszeitpunkt wurden die Kühe trocken gestellt und befanden sich währenddessen im Trockensteherstall. Während des Aufenthalts in diesem Stall wurden keine automatisch erfassten Daten über die Tiere erhoben.



Abbildung 5: Innenansicht AMS-Stall (Foto: Wolfgang Seemann, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft)

Färsen traten ca. eine Woche vor dem errechneten Geburtszeitpunkt in die Herde der laktierenden Kühe ein, um sie an die neue Futter-, Stall- und soziale Situation zu gewöhnen. Zur Geburt kamen alle Tiere in den Abkalbestall. Auch hier erfolgte keine automatische Datenerfassung. Herdenmanagementdaten wurden mit der Software Dairyplan (GEA Group Aktiengesellschaft, Peter-Müller-Str. 12, 40468 Düsseldorf, Deutschland) erfasst. Die Betreuung der Tiere erfolgte durch das Stallpersonal, das sich täglich während der Arbeit ca. anderthalb Stunden im Stall aufhielt und währenddessen Kontakt zu den Tieren hatte. Beobachtete das Personal Anzeichen für einen krankhaften Vorgang bei einem Tier, wurde die Kuh über ein Selektionstor am Ausgang des AMS in eine Selektionsbucht geleitet. Dort war die Durchführung einer genauen Begutachtung und ggf. Behandlung des Tieres durch einen Tierarzt leichter möglich. Tiere, die abhängig vom Laktationsstatus und der Milchleistung zu lang nicht

beim Melken waren (ca. ab der 14. Stunde nach der letzten Melkung), wurden durch das Stallpersonal in den AMS getrieben. Die Liegeboxenpflege erfolgte täglich und je nach Verschmutzung wurde ca. zweimal die Woche eingestreut.

4.2.3 Fütterung

Die Fütterung erfolgte in Form einer PMR (Partial Mixed Ration). Sie wurde einmal täglich um ca. 05:30 Uhr in die 36 Wiegetröge vorgelegt. Zusätzlich zu dieser Mischration erhielt jede Kuh abhängig vom Laktationsstadium eine bestimmte Menge Kraftfutter im AMS und den Rest über eine Kraftfutterabrufstation im Stall. Aufgrund eines Anfang Dezember 2014 startenden Fütterungsversuchs (Optikuh) im Versuchsstall mussten in der eigenen Untersuchung zwei Fütterungsphasen unterschieden werden: Phase I von März 2014 bis November 2014 und Phase II von Dezember 2014 bis April 2015. In Phase I erhielten alle Tiere das gleiche Futter, in Phase II wurden die Tiere in zwei Gruppen mit unterschiedlichen Grundfutterniveaus aufgeteilt. Diese Gruppen erhielten wiederum eine unterschiedliche Menge zugefüttertes Kraftfutter in Abhängigkeit von der Milchleistung. Die Futterzusammensetzung während der beiden Phasen ist in **Tabelle 5** zusammengefasst.

Tabelle 5: Futterzusammensetzung in Phase I und in Phase II

Gruppe	Energiegehalt PMR [MJ NEL/kg TM]	Kraftfutter pro kg Milch [g]
Phase I		
Alle Tiere	6,9	200
Phase II		
1	6,1	250
2	6,1	250
3	6,5	150
4	6,5	150

4.3 Erfassung der Klauengesundheit

4.3.1 Locomotionscore

Während der Versuchsphase von Mai 2014 bis April 2015 wurde anfangs alle zwei Wochen und ab Oktober jede Woche, insgesamt 33 Mal, eine Gangbeurteilung (Locomotionscoring) der gesamten Herde gemäß der Methode nach Sprecher et al. 1997 [98] durchgeführt. Die Person, die das Locomotionscoring in der vorliegenden Studie durchführte, hat sehr viel Erfahrung mit der Methode nach Sprecher et al. 1997 [98] (s. 2.2.3). Hinzu kommt die gute praktische Anwendbarkeit im laufenden Milchviehbetrieb (geringer zeitlicher Aufwand, wenige, einfach abzugrenzende Kriterien). Aus diesem Grund wurde im Versuch diese Methode als Standard für die Erfassung der Lahmheit immer von derselben erfahrenen Person angewendet. Es wurde lediglich eine Anpassung der Definition der Scores drei und vier vorgenommen. Zeigte ein Tier Unregelmäßigkeiten im Gang, wurde es Grad vier zugeordnet (Ver-

gleich siehe 2.2.3). Jedes Tier wurde einzeln durch dasselbe Tor langsam und ruhig vom Liegebereich (Laufflächen mit Betonspaltenboden und Gummiauflage) in den Fressbereich (Betonspaltenboden ohne Gummiauflage) getrieben. Der Beobachter, in **Abbildung 6** mit einem blauen Kreuz gekennzeichnet, befand sich im Fressbereich und die Tiere liefen seitlich an ihm vorbei und entfernten sich dann in die eine oder andere Richtung im Stall.

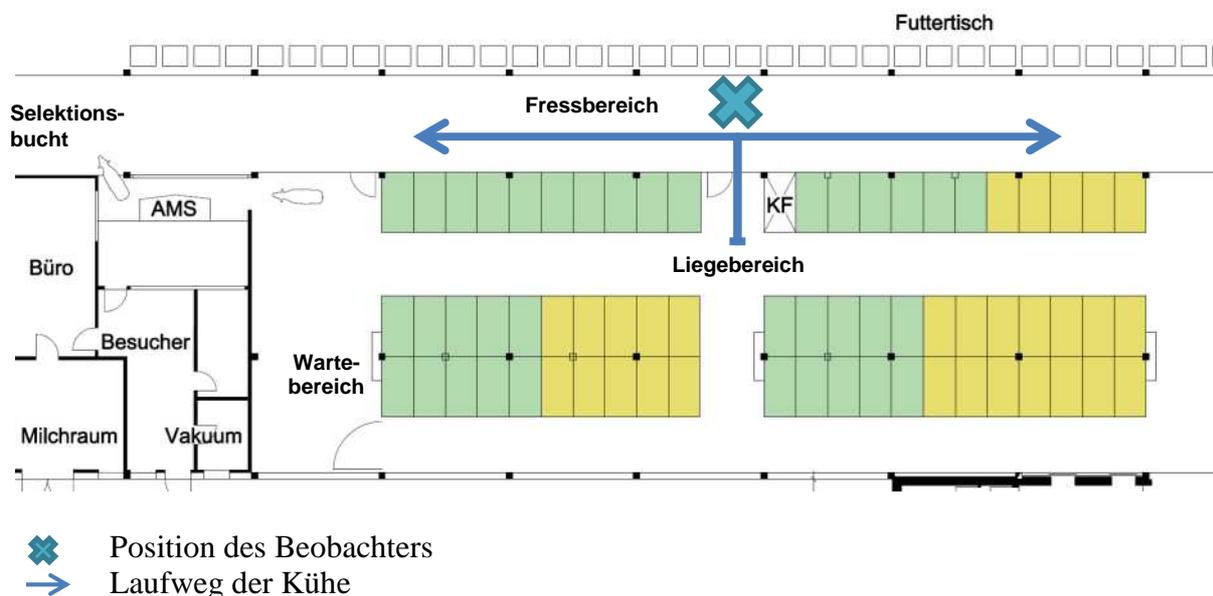


Abbildung 6: Durchführung des Locomotionscorings im Stall

Insgesamt wurden 1888 LMS erhoben. Nach Entfernen der unvollständigen Daten (s. 4.5.2) blieben 1564 (86 %) Locomotionscores von 89 verschiedenen Tieren für die Auswertung erhalten. Die Anzahl Bewertungen der verschiedenen LMS ist in **Tabelle 6** aufgeführt.

Tabelle 6: Bewertungshäufigkeit nach LMS und Tiernummer (Zusammenfassung), vollständige Tabelle s. Anhang

Tiernummer	Anzahl Bewertungen nach LMS					Summe
	1	2	3	4	5	
296	1	1	0	0	0	2
299	1	13	8	2	0	24
370	3	10	5	1	1	20
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
Summe	1003	408	108	42	3	1564
Mittelwert	11,3	4,6	1,2	0,5	0,03	17,6
Minimum	0	0	0	0	0	1
Maximum	28	23	15	7	1	29
Standardabweichung	8,0	5,0	3,0	1,2	0,2	8,1

4.3.1.1 Beurteilerreliabilität

Zur Überprüfung der Beurteilerreliabilität wurden vom Beurteiler zusätzlich zwei Locomotionsscorings in einem Abstand von ca. 20 Minuten durchgeführt und Cohen's Kappa mit dem SAS Enterprise Guide 4.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) berechnet, nachdem die im Versuch verwendete (s. 4.6.2) binäre Zuordnung der fünf Lahmheitsgrade nach lahm und nicht lahm erfolgt war. Cohen's Kappa korrigiert die prozentuale Beobachterübereinstimmung, also den Anteil der richtig bestimmten Zuordnungen an allen durchgeführten Zuordnungen, durch die Übereinstimmung, die rein zufällig auftreten kann.

4.3.2 Behandlung und Diagnosen

Das Stallpersonal war angewiesen, bei Beobachtung einer Lahmheit, umgehend die die Behandlungen durchführende Tierärztin zu informieren. Wurde ein Tier vom Stallpersonal als „lahm“ gemeldet (in 9 von 36 Erkrankungsfällen), oder wurde vorher bereits durch einen LMS von vier oder fünf auffällig (in 27 von 36 Erkrankungsfällen), erfolgte korrektive Klauenpflege und je nach Bedarf die Befestigung eines Entlastungssystems, topische Applikation von Chlor-Tetracyclin-Spray oder einer salicylsäurehaltigen Salbe mit Verband und/oder parenterale Injektion von Antibiotika. Eine wöchentliche Kontrolle der Läsion bis zur vollständigen Abheilung sicherte die lückenlose Dokumentation des Krankheitsverlaufs.

Zusätzlich zu den Behandlungen akut auftretender Klauenprobleme wurde im Mai 2014, Oktober 2014 sowie im März 2015 eine Bestandsklauenpflege der ganzen Herde durch einen staatlich geprüften Klauenpfleger vorgenommen. Bei dem ersten Termin im Mai 2014 erfolgte die Diagnostik und Dokumentation der Erkrankungen durch den Klauenpfleger. Bei den übrigen Terminen geschah dies durch dieselbe Tierärztin, die alle Behandlungen außerhalb der Bestandsklauenpflege durchführte und dokumentierte. Der zeitliche Verlauf der gesamten Dokumentation ist in **Abbildung 7** dargestellt.

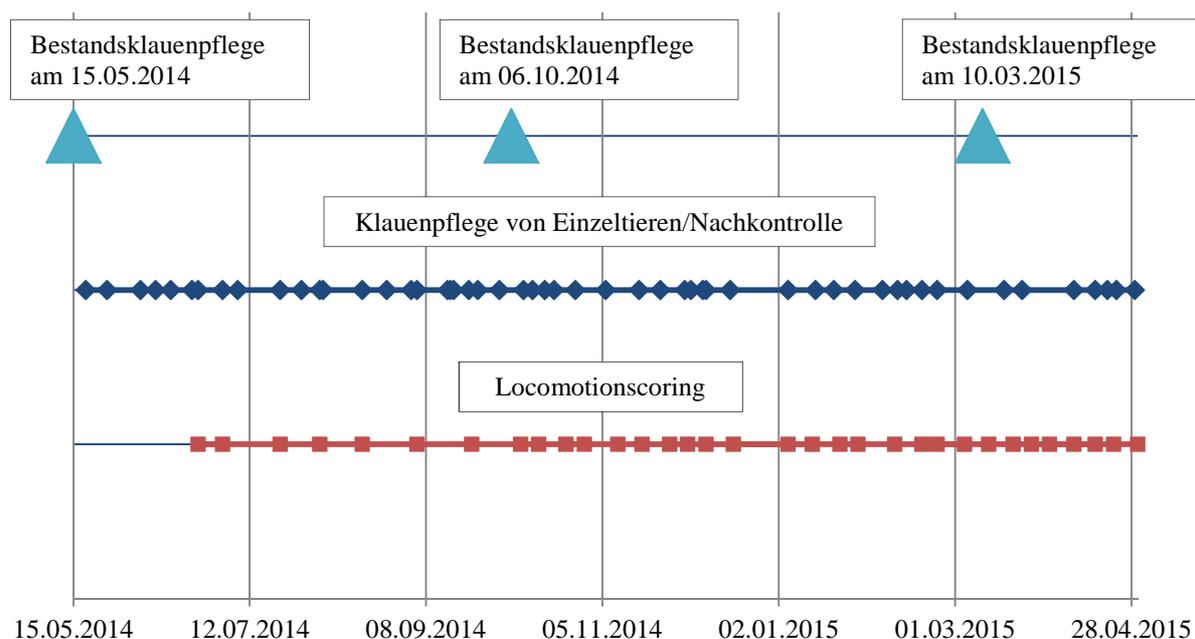


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Diagnosen und Behandlungen

Die Dokumentation der aufgetretenen Klauenerkrankungen aus den Einzelbehandlungen und den Terminen der Bestandsklauenpflege erfolgte anhand einer Modifikation des Diagnoseschlüssels der Unterfüßerkrankungen des DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft)-Ausschusses „Klauengesundheit und Klauenhygiene“ [22] (**Tabelle 7**).

Tabelle 7: Diagnoseschlüssel der Klauenerkrankungen modifiziert nach DLG-Ausschuss "Klauengesundheit und Klauenhygiene" [22]

Abkürzung	Erkrankung	Ausprägungsgrad		
		1	2	3
RE	Klauenrehe (Laminitis)	Krümmung (Konkavität) der Dorsalwand und/oder Verfärbung der Sohlenfläche bis zu 1/3	Krümmung (Konkavität) der Dorsalwand und/oder Verfärbung der Sohlenfläche bis zu 2/3	Krümmung (Konkavität) der Dorsalwand und/oder Verfärbung der Sohlenfläche bis zu 3/3
WLD	Weiß-Linie-Defekte	Zusammenhangstrennung: dunkel gefärbte Risse und/oder Einblutungen, oberflächlich	Zusammenhangstrennung: mit entzündlichem Defekt bis 2,5 cm Durchmesser, beginnende Kanalbildung zum Kronsaum	Zusammenhangstrennung: mit entzündlichem Defekt > 2,5 cm Durchmesser, vermutlich tiefere Strukturen betroffen

Tabelle 7: Diagnoseschlüssel der Klauenerkrankungen (Fortsetzung)

Abkürzung	Erkrankung	Ausprägungsgrad		
		1	2	3
DS	Doppelte Sohle	Ausdehnung: bis 1/3 der Sohlenfläche oder größer, wenn kein entzündlicher Defekt	Ausdehnung: bis 2/3 der Sohlenfläche	Ausdehnung: bis 3/3 der Sohlenfläche
DID	Dermatitis interdigitalis	Beläge ohne Veränderung der Zwischenklauenhaut	Beschädigung der Zwischenklauenhaut, Ausdehnung bis 2 cm Länge	Beschädigung der Zwischenklauenhaut, Ausdehnung: über 2 cm Länge
PH	Phlegmone	Schwellung der Unterhaut	zusätzlich Beschädigung der Haut	zusätzlich nekrotische Veränderungen
RSG	Rusterholzsches Sohlengeschwür	Druckstelle oder Geschwür an typischer Lokalisation bis 1 cm Durchmesser	Geschwür an typischer Lokalisation ab 1 cm bis 2,5 cm Durchmesser, teilweise nekrotische Veränderungen	Geschwür über 2,5 cm Durchmesser, tiefergehende nekrotische Veränderungen
SSG	Sohlenspitzen-geschwür	siehe RSG	siehe RSG	siehe RSG
LI	Limax	ohne Spreizung der Klauen	mit Spreizung der Klauen	entzündet mit/ohne Spreizung der Klauen
HS	Hornspalt	nicht durchlaufend von Kronsaum bis Sohle, nicht durchdringend bis Lederhaut = oberflächlich	durchlaufend nicht durchdringend = oberflächlich	durchdringend bis zur Lederhaut = tief
DD	Dermatitis digitalis	Bonitiert nach dem Bewertungsschema für Dermatitis digitalis von Döpfer et al. 1998 [27]		

4.4 Automatische Datenerfassung

Jedes Tier im Stall hatte einen RFID (radio-frequency identification)-Transponder an der Ohrmarke befestigt und wurde darüber an den einzelnen Sensorsystemen im Stall erfasst. So

konnten die Daten aller im Stall vorhandenen Sensoren dem jeweiligen Tier zugeordnet und dann in einer PostgreSQL-Datenbank weiterverarbeitet werden.

4.4.1 Durchgangstore: Erfassung des Tierverkehrs

Der Stall war in Fressbereich, Liegebereich, Wartebereich und den Bereich des Automatischen Melksystems (AMS) aufgeteilt (**Abbildung 8**). Dazwischen befanden sich aktive, gesteuerte Durchgangstore (**Abbildung 9**). Bei Erkennung des Transponders an der Antenne des Durchgangstores wurde Uhrzeit und Tiernummer registriert. Nach Freigabe durch das System konnte somit immer erfasst werden, wenn ein Tier von einem Bereich in den anderen wechselte. Die blauen Pfeile in **Abbildung 8** stellen die Durchgangsrichtung der Tore dar. Im November 2014 wurde das Umtriebssystem zum AMS von „Feed first“ auf „selektiv gelenkt“ geändert und dafür die Abtrennung zwischen Warte- und Liegebereich entfernt.

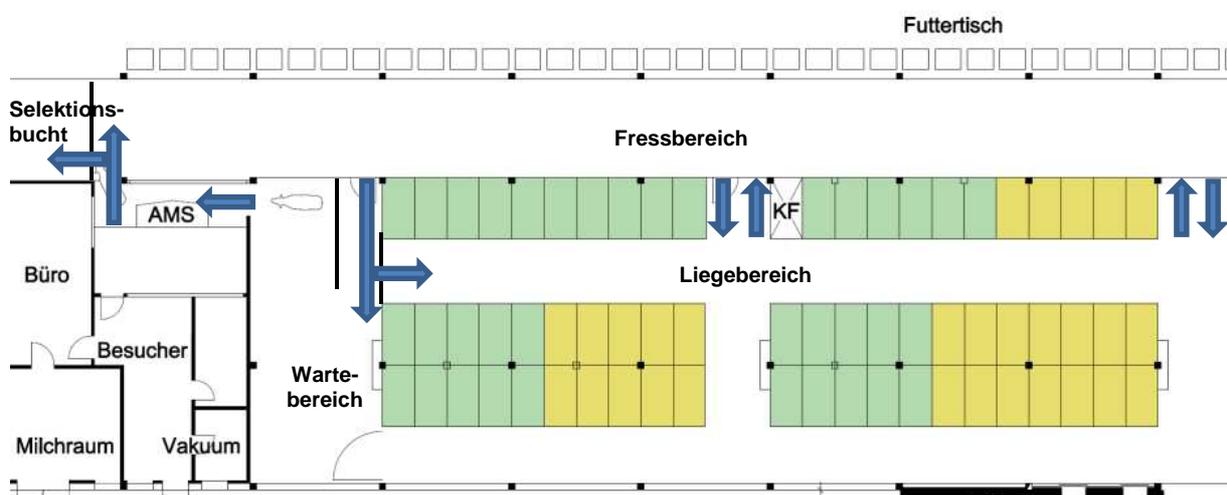


Abbildung 8: Stallgrundriss mit Lage der Durchgangstore und der Funktionsbereiche

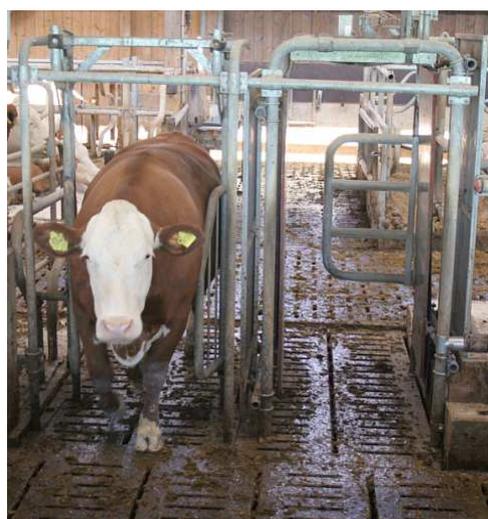


Abbildung 9: Aktiv gesteuerte Durchgangstore zwischen Liege- und Fressbereich (Foto: Dr. Bernhard Haidn, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft)

4.4.2 AMS: Messung der Milchleistung und des Tiergewichts

Das automatische Melksystem im Stall lieferte für jedes Tier Informationen über die Milchmenge, Beginn und Ende jedes Melkvorgangs. Zusätzlich war im AMS eine Tierwaage eingebaut, die bei jedem Melkvorgang das Körpergewicht der Kuh erfasst. Alle Melkdaten wurden in der zum AMS gehörigen Software Delpro© von DeLaval (DeLaval GmbH, Wilhelm-Bergner-Str. 5, 21509 Glinde, Deutschland) zusammengefasst. Die vorläufige Verarbeitung und Speicherung der Tiergewichtsdaten erfolgte in einem Prozessrechner im Stallbüro.

4.4.3 Wiegetröge: Messung der Futteraufnahme

Im Stall befanden sich 36 Wiegetröge für die Mischfuttersvorlage (**Abbildung 10**). An den Zugängen zu den Wiegetrögen befand sich eine Antenne, die den am Ohr befestigten RFID-Transponder erkennt, sobald er sich in weniger als 30 cm Entfernung befindet. Hatte das Tier Zugangsberechtigung für den Trog, entriegelte sich die Zugangsklappe und das Tier konnte das im Trog enthaltene Futter aufnehmen. Tiernummer, die Anfangs- und Endzeit des Besuchs sowie das Anfangs- und Endgewicht des im Trog enthaltenen Futters wurden somit bei jedem Besuch erfasst. Ein Besuch ist definiert als jede neue Registrierung von diesen Daten im Abstand von mehr als zehn Sekunden. Ein Prozessrechner berechnet aus den ermittelten Daten die Gesamtfutteraufnahmemenge sowie die Dauer des Besuchs und speichert diese kurzzeitig.



Abbildung 10: Wiegetröge mit den darüber befestigten Prozessrechnern

4.4.4 Pedometer: Messung der Aktivität

Bei jeder Kuh war an einem der beiden vorderen Karpalgelenke ein Pedometer „Track a Cow“ der Firma ENGS Systems befestigt (**Abbildung 4**). Die Pedometer enthielten einen dreidimensionalen Beschleunigungssensor, der die Lage im Raum registriert. Somit konnte zusätzlich zu einer Aktivitätskennzahl der Zustand „Liegen“ oder „nicht Liegen“ einer Kuh registriert werden. Alle sechs Minuten wurden die Informationen, die über diesen Zeitraum aufgezeichnet wurden, bereits zusammengefasst über eine Antenne im Stall an einen lokalen Rechner gesendet.

Auf dem Rechner im Stallbüro war die mitgelieferte Software der Herstellerfirma installiert. Das Programm berechnete für jede Stunde am Tag den Anteil für „Liegen“, „nicht Liegen“ und die Aktivitätskennzahl. Im März 2015 wurden die Pedometer durch eine neuere Version ersetzt, die im Zwei-Minuten-Takt aufzeichnet. Sie erfassen und berechnen die gleichen Parameter nach dem gleichen System wie bei der älteren Version. Die Daten sind demnach weitgehend vergleichbar.

4.5 Datenverarbeitung

4.5.1 Erstellung der Tagesdatensätze

Alle über die Erfassungstechnik automatisch generierten Rohdaten wurden in eine PostgreSQL-Datenbank importiert (**Abbildung 11**). Dort erfolgte mit diesen die Berechnung von 23 Parametern über die im Folgenden beschriebenen Datenbankabfragen. Alle Parameterwerte bezogen sich jeweils auf die Daten eines Tages von 0:00 bis 24:00 Uhr. Die Berechnungsmethoden aller 23 Parameter sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

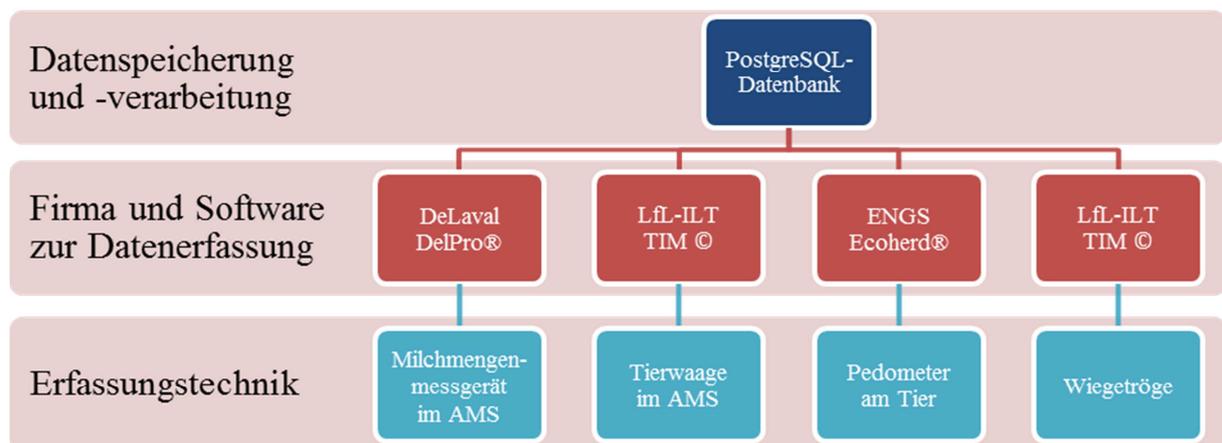


Abbildung 11: Darstellung der Datenerfassung

4.5.1.1 Im AMS erfasste Parameter

Aus den von der Software gelieferten Rohdaten wurde jeweils ein Tageswert für die Milchleistung, die Anzahl der Melkungen, die maximale Zwischenmelkzeit und das Tierge-

wicht errechnet. Die Milchmenge der einzelnen Melkungen wurde anteilig auf den Tag berechnet. War ein Tier z. B. morgens um 04:00 Uhr beim Melken und am Abend vorher um 18:00 Uhr, also mit zehn Stunden Abstand, so wurden vierzig Prozent der Milchmenge dem aktuellen Tag und sechzig Prozent dem vorherigen Tag hinzugerechnet. Die maximale Zwischenmelkzeit war definiert als die maximale Dauer zwischen einer am aktuellen Tag stattgefundenen Melkung und einer darauffolgenden oder vorhergehenden Melkung. Die Informationen über die einzelnen Wiegeungen wurden für jedes Tier zu einem Tagesmedian verrechnet.

4.5.1.2 An den Wiegetrögen erfasste Parameter

Aus den einzelnen Besuchen am Wiegetrog wurden weitere Parameter für jedes Tier und jeden Tag, wie die Gesamtfutteraufnahmezeit, die durchschnittliche Futteraufnahmeintensität sowie die Menge, Dauer und Anzahl der einzelnen Besuche am Trog berechnet.

4.5.1.3 Aktivitätsparameter

Die anteiligen Stundenwerte der einzelnen Aktivitätsparameter aus der Software von ENGS wurden in der Datenbank zu kumulierten Tageswerten addiert.

4.5.1.4 Zusammenführung aller erhobenen Daten

Zu dem entstandenen Datensatz wurden die Ergebnisse des Locomotionscorings, der Klauenbonituren, die Informationen über den Laktationsstatus, also die Anzahl der Tage, die seit der letzten Kalbung vergangen waren (dim = days in milk) und die Anzahl der Laktationen hinzugefügt. Ergebnis ist ein Tagesdatensatz aller Tiere mit den Parameterwerten pro Tier und Tag (**Tabelle 8**).

Tabelle 8: In der Auswertung verwendete Parameter

Parameter	Einheit	Erklärung
Stallnummer des Tieres	-	Die dem Tier im Stall zugeordnete Nummer
Datum	tt:mm:jjjj	Datum des Tages der Datenerfassung
Daten aus dem AMS mit integrierter Tierwaage		
durchschnittliche Milchleistung	kg	Summe der Milchmenge aller Melkungen an diesem Tag Beginnt ein Ereignis vor 24:00 Uhr und dauert bis nach 24:00 Uhr, wird die Milchmenge der Zeit entsprechend anteilig dem jeweiligen Tag zugerechnet
Maximale Zwischenmelkzeit	min	Das längste Intervall zwischen zwei Melkungen des Tages
Median Tiergewicht	kg	Median der Werte aller Wiegungen eines Tieres an diesem Tag
Wiegetrogsdaten		
Futteraufnahmemenge	kg	Summe der Raufutteraufnahmemenge aller Futteraufnahmeereignisse (FAE) an den Wiegetrögen (= Erfassung am Trog mit Beginn und Ende) an diesem Tag Bei Überschreiten der Tagesgrenze während eines FAE wird die Raufutteraufnahmemenge der Zeit entsprechend anteilig dem jeweiligen Tag zugerechnet.
Dauer der Futteraufnahme	min	Summe der Dauer aller Futteraufnahmeereignisse (FAE) an diesem Tag
Futteraufnahme tagsüber*	%	Summe der Dauer aller Futteraufnahmeereignisse (FAE) an diesem Tag, die zwischen 5:00 und 22:00 Uhr stattgefunden haben, anteilig an der Gesamttagesdauer
Futteraufnahmeintensität*	kg/min	Raufutteraufnahmemenge pro Zeiteinheit
Anzahl der Mahlzeiten*	-	1 Mahlzeit = Summe aller aufeinanderfolgenden Besuche am Trog mit einem zeitlichen Abstand von weniger als 20 min
Anzahl der Mahlzeiten tagsüber*	%	Anzahl aller Mahlzeiten an diesem Tag, die zwischen 5:00 und 22:00 Uhr stattgefunden haben, anteilig an der Anzahl des gesamten Tages

Tabelle 8: In der Auswertung verwendete Parameter (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Erklärung
durchschnittliche Dauer einer Mahlzeit*	min	Summe der Dauer aller Mahlzeiten am Tag, geteilt durch die Anzahl aller Mahlzeiten am Tag
Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit*	kg	durchschnittlich pro Mahlzeit aufgenommene Menge Futter
Anzahl der Besuche am Trog*	-	Anzahl der Futteraufnahmeereignisse (FAE)
Anzahl der Trogbesuche tagsüber*	%	Anzahl der Futteraufnahmeereignisse (FAE) an diesem Tag, die zwischen 5:00 und 22:00 Uhr stattgefunden haben, anteilig an der Anzahl des ganzen Tages, gewertet wird die Uhrzeit des Beginns eines FAE
Dauer eines Besuchs*	min	durchschnittliche Dauer eines Futteraufnahmeereignisses (FAE)
Futteraufnahmemenge pro Besuch*	kg	Raufutteraufnahmemenge pro Futteraufnahmeereignis (FAE)
Pedometerdaten		
Liegedauer	min	Summe der Dauer aller Liegeereignisse
Liegedauer tagsüber*	%	Summe der Liegedauer zwischen 5:00 und 22:00 Uhr, anteilig an Gesamtliegedauer
Anzahl Abliegeereignisse	-	Anzahl der Positionswechsel von "nichtliegen" zu "liegen"
Abliegeereignisse tagsüber*	%	Anzahl der Positionswechsel von "nichtliegen" zu "liegen", die zwischen 5:00 und 22:00 Uhr stattgefunden haben, anteilig an der Anzahl ganzen Tag
durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses*	min	Gesamtliegedauer geteilt durch Anzahl der Abliegeereignisse
Aktivitätskennzahl	-	Anzahl der zurückgelegten "Schritte"
Aktivitätskennzahl tagsüber*	%	Anzahl der zurückgelegten "Schritte", die zwischen 5:00 und 22:00 Uhr stattgefunden haben, anteilig an der Anzahl des ganzen Tages

* = aus den von den Systemen automatisch erhobenen Daten berechnete Parameter

4.5.2 **Aufbereitung der Tagesdatensätze**

Zunächst wurden alle Datensätze der Tage entfernt, an denen es fehlerhafte Aufzeichnungen aufgrund technischer Probleme gab. Es handelt sich dabei um den 02.-04.08.2014 und den 11.03.2015. Zusätzlich wurden folgende Datensätze entfernt:

- Für jede Kuh die Tage zwischen Trockenstellung und Kalbung
- Tage, an denen eine Kuh in Selektion gestellt wurde
- Tage, an denen aufgrund der erfassten Werte davon auszugehen war, dass der Pedometer nicht korrekt funktionierte:
 - bei einer Liegedauer unter dreißig Minuten
 - Anzahl von Liegeereignissen gleich null
- Kühe mit weniger als zehn Beobachtungen
- Kühe, bei denen nie ein Locomotionscore erfasst wurde
- Tage, an denen Kühe behandelt wurden inklusive der Tage der Bestandsklauenpflege

Der aufbereitete *Datensatz 1* enthielt noch 26.844 (78,39%) der insgesamt 34.246 Tagesdatensätze.

4.6 **Einzelparameter**

Im Folgenden beschriebene statistische Analysen wurden mit R [84] sowie SAS Enterprise Guide 4.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) berechnet und mit Excel 2010 (Microsoft Corporation, 1 Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399 USA) visualisiert.

4.6.1 **Dunnett-t-Test**

Um mögliche Unterschiede zwischen den Parameterwerten bei unterschiedlichem Lahmheitsstatus zu überprüfen, wurden zunächst die Parameterwerte in je fünf dem Locomotionscore entsprechenden Gruppen eingeteilt (LMS1, LMS2, LMS3, LMS4, LMS5). Die Mittelwerte dieser Gruppen wurden dann mit einem t-Test nach Dunnett mit SAS Enterprise Guide 4.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) untersucht. Dunnett-t-Tests fassen eine Gruppe als Steuerungsgruppe (hier: LMS1) auf und vergleichen alle anderen Gruppen (hier: LMS2 bis LMS5) mit dieser Gruppe.

4.6.2 **ROC-Kurven Analyse**

Die Parameter aus **Tabelle 8** wurden mit einer ROC-Kurven-Analyse daraufhin untersucht, ob sie als Prädiktor bei einem Grenzwert die Klassifikation „lahm“ (positiv) oder „nicht lahm“ (negativ) mit einer bestimmten Genauigkeit ermöglichen. Der Ausgang dieser binären Klassifikation hat vier mögliche Ausprägungen. Sie sind in **Tabelle 9** aufgeführt. Aus dieser Kreuztabelle lassen sich Sensitivität und Spezifität der Vorhersage durch den Prädiktor ableiten.

Tabelle 9: Kreuztabelle zur dichotomen Verteilung „lahm“ und „nicht lahm“

Testergebnis	Tatsächlich	
	lahm	nicht lahm
„lahm“	richtig positiv	falsch positiv
„nicht lahm“	falsch negativ	richtig negativ

Sensitivität = Anzahl der richtig positiven Ergebnisse / Anzahl der tatsächlich lahmen Tiere;
 Spezifität = Anzahl der richtig negativen Ergebnisse / Anzahl der tatsächlich nicht lahmen Tiere

Eine ROC-Kurve ist eine Funktion, die das Verhältnis dieser beiden Werte bei unterschiedlichen Grenzwerten des Prädiktors darstellt. Die Sensitivität (also die Richtigpositivrate) wird auf der Ordinate gegen die Falschpositivrate, also eins minus Spezifität, auf der Abszisse aufgetragen. Der optimale Verlauf einer ROC-Kurve entspricht einem nach rechts unten offenen Bogen, der möglichst nah an der oberen linken Ecke des Koordinatensystems verläuft. In **Abbildung 12** ist eine Beispielkurve mit fast idealem Verlauf abgebildet. Die zugrundeliegenden Daten sind im Anhang (**Tabelle 25**) aufgeführt.

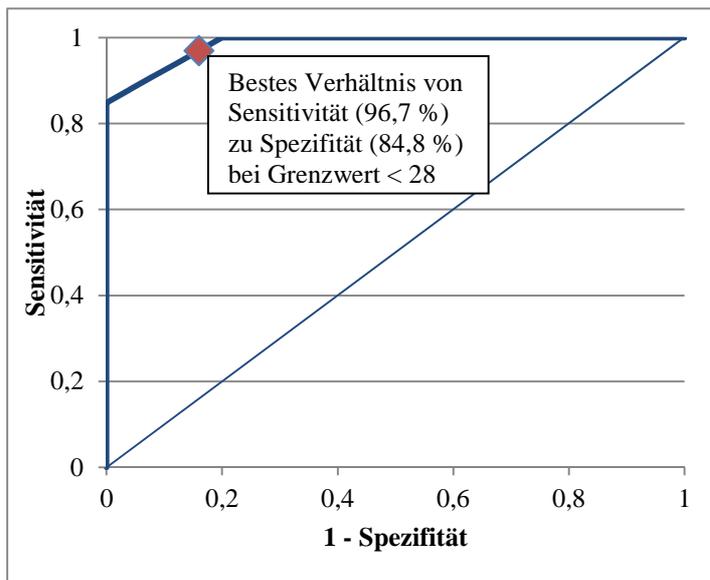


Abbildung 12: Beispiel-ROC-Kurve. AUC = 0,9848; Grenzwert ≤ 28 bei Spezifität = 85 % und Sensitivität = 97 %

Die Fläche unter der Kurve AUC (Area under the Curve) kann als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, dass ein als positiv beobachteter Wert eine höhere Wahrscheinlichkeit hat, als „positiv“ eingeordnet zu werden, als ein als negativ beobachteter. Sie beschreibt die Qualität der Vorhersage durch den Prädiktor: 0,9-1 ist exzellent, 0,8-0,9 gut, 0,7-0,8 ist ausreichend, 0,6-0,7 schwach und Werte zwischen 0,5 und 0,6 sind schlecht. Eine AUC von 0,5 entspricht einer Zufallsverteilung. Bei Werten unter 0,5 kann es notwendig sein, die Interpretation des

Tests zu überdenken, d. h. vertauschen von „positiv“ und „negativ“. Weiterhin kann anhand der Kurve der Grenzwert ermittelt werden, bei dem das optimale Verhältnis zwischen Sensitivität und Spezifität gegeben ist. Auch Grenzwerte bei vorgegebener Spezifität oder Sensitivität sind durch eine ROC-Kurven-Analyse ermittelbar.

Die ROC-Kurven-Analysen der Parameter erfolgten mit dem R Package „pROC“ [88]. Anhand des Locomotionscores wurde ein Tier als lahm ($LMS > 3$) oder nicht lahm ($LMS \leq 3$) definiert. Die ROC-Kurven-Analysen wurden jeweils einzeln für alle Tage vom Tag der Erfassung des LMS (d_0) bis sieben Tage vorher (d_{-1} - d_{-7}) durchgeführt.

Die Anzahl der Locomotions Scorings pro Tier und Score schwankt bei den negativen Fällen mit einer Standardabweichung von bis zu 8,11 stark (s. **Tabelle 6**). Das kann zu verfälschenden Effekten durch einen übermäßigen Einfluss der Daten einzelner Tiere führen. Um dies zu vermeiden, wurde vor der ROC-Kurven-Analyse von allen Tagesdatensätzen mit einem LMS kleiner 4 eine Zufallsauswahl getroffen (Funktion „sample“ in RStudio 0.99 [84]), sodass von jedem Tier von jedem Score von 1 bis 3 jeweils maximal ein Wert in die folgende Analyse einging (s. **Tabelle 10**).

Tabelle 10: Anzahl der Tagesdatensätze mit LMS nach der Zufallsauswahl der negativen Fälle

LMS-Gruppe	Anzahl Gesamt	Anzahl verwendet für die Modellentwicklung	Anteil [%]
1	1003	64	6
2	408	49	12
3	108	21	19
4	42	42	100
5	3	3	100
Summe	1564	179	11

4.6.3 Verlaufswerte der Einzelparameter

Nach den Ergebnissen aus 5.2.2 ist davon auszugehen, dass der bei einem Tier beobachtete LMS mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit bereits einen Tag vorher bestand. Um die Beeinflussung der Verhaltensparameter durch das für die Durchführung des Locomotions Scorings nötige Treiben der Tiere auszuschließen, basieren weitere Analysen jeweils auf den Parameterwerten des Vortags d_{-1} der LMS-Erhebung.

4.6.3.1 Aktuelle Woche (Extremwerte d_{-1} bis $d_{-3/5}$)

Die Ergebnisse aus 5.2.2 legen nahe, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass die Lahmheit tatsächlich schon einige Tage vor der Beobachtung des LMS über Stufe drei bestand. Ausgehend von der Annahme, dass ein besonders niedriger bzw. hoher Parameterwert auf eine Ver-

haltensänderung aufgrund von Lahmheit hinweist, wurde nach 5.2.2 je nach Richtung des Zusammenhangs mit dem Lahmheitsgrad jeweils das Minimum bzw. Maximum der Tage d_{-1} bis d_{-5} bei durch Pedometer erfassten Parametern und der Milchleistung bzw. der Tage d_{-1} bis d_{-3} bei den übrigen Parametern berechnet (**Tabelle 11**). Mit den ermittelten Extremwerten wurden dann erneut ROC-Kurven-Analysen aller Parameter durchgeführt.

Tabelle 11: Berechnung der Minima bzw. Maxima der Parameter

Parameter	Anzahl der Tage	Extremwert
Milchleistung [kg]	5	Minimum
Maximale Zwischenmelkzeit [min]	3	Maximum
Median Tiergewicht [kg]	3	Maximum
Futteraufnahmemenge [kg]	3	Minimum
Dauer der Futteraufnahme [min]	3	Minimum
Futteraufnahme tagsüber [%]	3	Maximum
Futteraufnahmeintensität [kg/min]	3	Maximum
Anzahl der Mahlzeiten	3	Minimum
Anteil der Mahlzeiten tagsüber [%]	3	Maximum
Ø Dauer einer Mahlzeit [min]	3	Minimum
Ø Futteraufnahmemenge pro Besuch [kg]	3	Maximum
Anzahl der Besuche am Trog	3	Minimum
Anzahl der Trogbesuche tagsüber [%]	3	Maximum
Ø Dauer eines Besuchs [min]	3	Maximum
Ø Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit [kg]	3	Maximum
Liegedauer [min]	5	Maximum
Liegedauer tagsüber [%]	5	Maximum
Anzahl Abliegeereignisse	5	Minimum
Abliegeereignisse tagsüber [%]	5	Minimum
Ø Dauer eines Liegeereignisses [min]	5	Maximum
Aktivitätskennzahl	5	Minimum
Aktivitätskennzahl tagsüber [%]	5	Minimum

4.6.3.2 Vorwoche (Verhältnis $d_{-1}/(d_{-8} - d_{-14})$)

Mit dem Ziel, die vorangegangenen Tage in die Analyse einzubeziehen und zusätzlich den Effekt durch interindividuelle Unterschiede zu minimieren, wurde für jeden Parameter der Wert des Vortages (d_{-1}) durch den Mittelwert der Vorwoche (d_{-8} bis d_{-14}) dividiert und erneut eine ROC-Kurven-Analyse mit den Ergebnissen dieser Berechnung durchgeführt.

4.7 Kombination der Parameter

Da Ergebnisse aus der ROC-Kurven-Analyse der Parameterwerte berechnet aus der Vorwoche (Verhältnis $d_{-1}/(d_{-8} - d_{-14})$) geringer waren als die der Parameterwerte berechnet aus der aktuellen Woche (Extremwerte d_{-1} bis $d_{-3/5}$), wurden die folgenden Schritte mit den Werten aus der aktuellen Woche durchgeführt (*Modellentwicklungsdatensatz*). Neben den aus der Literaturrecherche als beeinflussende Faktoren ermittelten Laktationsstatus (dim) und Anzahl der Laktationen wurden die Parameter aus dem *Modellentwicklungsdatensatz* mit den höchsten AUC-Werten in zwei verschiedene Modelle integriert.

4.7.1 Modell 1: Logistische Regression

Die binärlogistische Regression ist eine statistische Auswertungsmethode für Untersuchungen, bei denen das Ergebnis in binärer Form vorliegt. Im Fall dieses Versuches also „lahm“ oder „nicht lahm“. Als Resultat der Regression entsteht eine Formel, mit der die jeweilige Wahrscheinlichkeit errechnet werden kann, dass ein bestimmter Fall positiv, hier: „lahm“, ist:

$$F(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Die Variable z setzt sich aus einer Konstanten a , den Prädiktoren X , hier: die Parameter, und deren Koeffizienten b zusammen:

$$z = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

Im Maximum-Likelihood-Schätzverfahren werden die optimalen Werte für die Koeffizienten b und die Konstante a ermittelt, sodass die Formel mit der höchsten Wahrscheinlichkeit den tatsächlich beobachteten Wert ergibt. Die Schätzung erfolgt iterativ, d. h. mittels „trial and error“ wird schrittweise das Ergebnis des vorangegangenen Schrittes verbessert bis es sich in einem weiteren Schritt nicht mehr verbessert. Die Schätzwerte aus dem letzten Schritt werden dann in die Formel integriert. Die Regressionsanalysen wurden mit IBM SPSS Statistics 23 (International Business Machines Corp. Armonk, NY, USA) durchgeführt.

Für jeden der Tagesdatensätze aus dem *Modellentwicklungsdatensatz* wurde dann anhand der fertigen Formel die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass ein Tier an diesem Tag lahm ist oder nicht. Die Software ermittelt die Koeffizienten und die Konstante mit dem Ziel, den höchsten Anteil korrekt eingestufte Fälle beim Grenzwert 0,5 zu erreichen. Ist die Wahrscheinlichkeit größer oder gleich 0,5 so gilt der Fall als positiv, ist sie kleiner als 0,5, gilt der Fall als negativ. Die vorausgesagten Werte wurden den tatsächlich beobachteten in einer Kreuztabelle gegenübergestellt und einer ROC-Kurven-Analyse unterzogen. Da die Häufigkeit der positiven Fälle im Vergleich zu den negativen im *Modellentwicklungsdatensatz* sehr gering war, musste sich die Priorität auf die korrekte Einstufung der negativen Fälle verschieben und damit die Sensitivität sinken. Nach Anwendung der Formel auf den ursprünglichen *Datensatz 1* wurden die Ergebnisse deshalb in einer ROC-Analyse untersucht, um den optimalen Grenzwert für

die ausgegebene Wahrscheinlichkeit zu ermitteln. In **Abbildung 13** sind die einzelnen Entwicklungsschritte grafisch dargestellt.

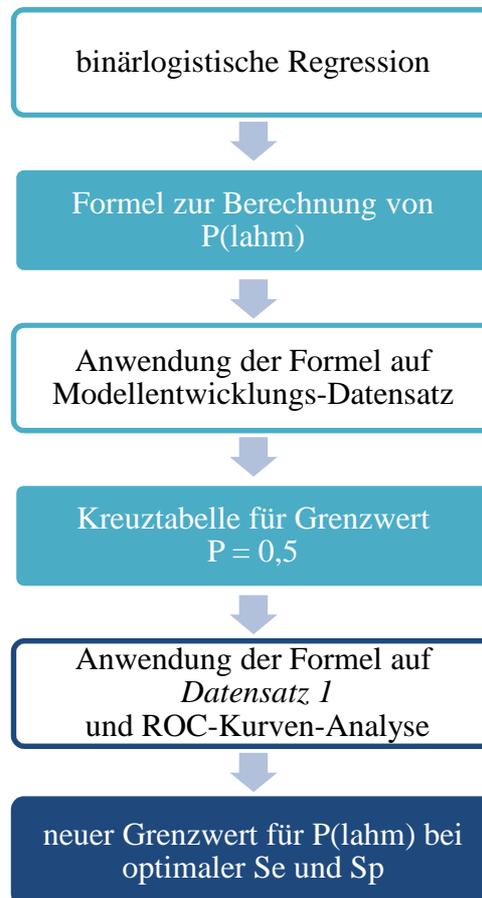


Abbildung 13 Darstellung der Entwicklungsschritte, Modell 1; Se = Sensitivität, Sp = Spezifität. Die hellblauen Kästen beziehen sich auf den *Modellentwicklungsdatensatz*, die dunkelblauen Kästen beziehen sich auf den Ursprungsdatensatz *Datensatz 1*.

4.7.2 Modell 2: Multifaktorielle Parameterwichtung

4.7.2.1 Festlegung der Grenzwerte

Es wurden mittels ROC-Kurven-Analyse Grenzwerte (G_{95} , G_{75} , G_{50} und G_{25}) mit unterschiedlichen Sensitivitäten von jeweils ca. 95 %, 75 %, 50 %, und 25 % für die Parameter ermittelt. Getrennt durch die vier Grenzwerte entstanden pro Parameter also fünf Wertegruppen mit unterschiedlicher Sensitivität. Jeder dieser Wertegruppen wurde ein der Spezifität entsprechender Grad zugeordnet (niedrige Spezifität: Grad 0, Hohe Spezifität: Grad 4). Bei einem positiven Zusammenhang zwischen einem Parameter und dem Lahmheitsgrad, wenn also die Parameterwerte mit zunehmender Lahmheit anstiegen (z. B. Liegedauer), entsprachen Para-

meterwerte kleiner als G_{95} Grad 0 und Parameterwerte größer als G_{25} entsprachen Grad 4. Bei einem negativen Zusammenhang zwischen einem Parameter und dem Lahmheitsgrad, wenn also die Parameterwerte mit zunehmender Lahmheit kleiner wurden (z. B. Anzahl der Besuche am Trog), entsprachen Parameterwerte größer als G_{95} Grad 0 und Parameterwerte kleiner als G_{25} entsprachen Grad 4. In Tabelle **Tabelle 12** ist der Zusammenhang aufgeführt.

Tabelle 12: Gradeinteilung nach Spezifität der Wertegruppen definiert durch Grenzwerte G_x

Grad	Werte bei positivem Zusammenhang ($G_{95} < G_{25}$)	Werte bei negativem Zusammenhang ($G_{95} > G_{25}$)
0	$< G_{95}$	$> G_{95}$
1	$G_{75} - G_{95}$	$G_{75} - G_{95}$
2	$G_{50} - G_{75}$	$G_{50} - G_{75}$
3	$G_{25} - G_{50}$	$G_{25} - G_{50}$
4	$> G_{25}$	$< G_{25}$

4.7.2.2 Wichtung der Parameter (Modell E_1)

Die eben beschriebene Zuordnung wurde auf die Parameterwerte aus dem ursprünglichen *Datensatz 1* angewendet. Je nach zugeordnetem Grad erhielt ein Parameterwert eine bestimmte Punktzahl. Die Punktzahlen für die einzelnen Parameterwerte wurden dann zu einer Summe pro Tier und Tag addiert. Dieser Vorgang erfolgte für verschiedene Punktzahlen und Parameterkombinationen. Die Sensitivität, die Spezifität und der zugehörige Grenzwert für die verschiedenen Summen wurden in ROC-Kurven-Analysen berechnet und verglichen, um die optimale Wichtung der Grade durch die verschiedenen Punktzahlen zu ermitteln (s. **Abbildung 14**).

Unter Berücksichtigung der jeweiligen AUC und der Praxisrelevanz wurden in einem ersten Modell (E_1) zunächst vier Parameter ausgewählt. Dann wurde den Parameterwerten eine dem Grad entsprechende Punktzahl 0 bis 4 zugeordnet (s. **Tabelle 13**).

Tabelle 13: Punktzahlen der Parameter im ersten Schritt der Entwicklung von Modell E₁.

Grad	DFA	TB	LD	DLE	dim	lak
0	0	0	0	0		
1	1	1	1	1		
2	2	2	2	2	-	-
3	3	3	3	3		
4	4	4	4	4		

DFA = Dauer der Futteraufnahme, TB = Anzahl der Besuche am Trog, LD = Liegedauer, DLE = Dauer eines Liegeereignisses, dim = Tage in Milch, lak = Laktationsnummer

Mit dem Ziel der Optimierung des Modells wurden dann die Punktzahlen nach folgenden Kriterien angepasst.

1. *Erhöhung der Spezifität:* Schrittweise Vergrößerung der Abstände zwischen den Punktzahlen.
2. *Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen den Parametern und dem Lahmheitsverlauf:* Die unteren Gruppen der Parameter „Anzahl der Besuche am Trog“ und „Dauer eines Liegeereignisses“ wurden stärker gewichtet, da diese Parameter schon früher in der Entwicklung einer Lahmheit reagieren als die anderen beiden Variablen (s. **Tabelle 14**, **Abbildung 35** und **Abbildung 44**).
3. *Berücksichtigung der Unterschiede in der Liegedauer abhängig vom Alter der Tiere:* Die Grenzwerte der Kühe ab der dritten Laktation wurden beim Parameter „Liegedauer“ um 40 min erhöht, da ältere Kühe im Durchschnitt länger liegen (s. 2.3.2.3.2)

Eine Übersicht über den Entwicklungsprozess ist in **Abbildung 14** dargestellt.

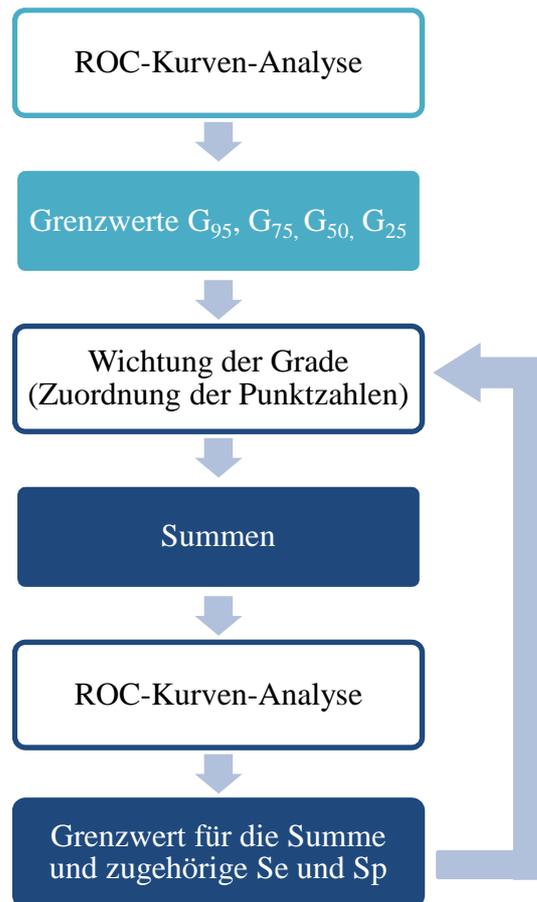


Abbildung 14: Darstellung der Entwicklungsschritte der optimalen Punktzahlen, Modell 2; Se = Sensitivität, Sp = Spezifität. Die hellblauen Kästen beziehen sich auf den *Modellentwicklungsdatensatz*, die dunkelblauen Kästen beziehen sich auf den ursprünglichen *Datensatz 1*.

4.7.2.3 Einbeziehung der Einflussfaktoren Laktationsstatus und Laktationszahl (Modell E₂)

Der Wichtung der Parameter folgte im nächsten Schritt Modell E₂ mit der Einbeziehung des Laktationsstatus (dim) und der Anzahl der Laktationen in die Berechnung der Summe. Es wurden jeweils drei Wertegruppen mit zugeordneten Punktzahlen festgelegt: Tiere unter neunzig, über neunzig und über einhundertachtzig Tage in der Laktation und Tiere in erster, zweiter und ab der dritten Laktation.

4.7.2.4 Integration weiterer Parameter

Vor der Integration der übrigen drei Parameter mit einer AUC größer oder gleich 0,7

- Futtermenge pro Besuch
- Futtermengeintensität
- Aktivitätskennzahl

erfolgte eine Analyse der Zusammenhangsmaße (Cramérs V) mit den bereits im Modell vorhandenen Parametern, um unnötige Redundanz im Modell durch zu hoch korrelierende Parameter zu vermeiden. Cramérs V wird verwendet, um das Zusammenhangsmaß zweier nominalskaliertes Variablen zu ermitteln, bei denen mindestens eine der Variablen mehr als zwei Ausprägungen hat [21]. Der Test basiert auf dem χ^2 -Test. Die Analyse wurde mit SAS Enterprise Guide 4.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt.

4.7.2.5 Einbeziehung der Summen der Vortage

Um die Sensitivität durch Betrachtung des Zeitraums kurz vor der LMS-Erhebung zu erhöhen, wurden die Summen aus den Punktzahlen der drei Vortage (d_{-2} bis d_{-4}) zur Summe des aktuellen Tages addiert. Diese Summen wurden wiederum in einer ROC-Kurven-Analyse untersucht.

5 Ergebnisse

5.1 Klauengesundheit

5.1.1 Locomotionscore

Im Verlauf des Versuchs sank der durchschnittliche Locomotionscore der Herde von 1,9 zu Beginn des Versuches um 32 % auf 1,3 beim letzten Locomotionscoring (**Abbildung 15**). Der Gesamtdurchschnitt lag bei 1,5. Mit einer Ausnahme gab es keine starken Schwankungen von einem zum nächsten Locomotionscoring. Nur bei der ersten Herdenbeurteilung nach der Bestandsklauenpflege im Oktober 2014 stieg der Durchschnitts-LMS erheblich an. Der Anteil der Tiere mit einem LMS über 3 war zu diesem Zeitpunkt besonders hoch. Nach Untersuchung der lahmen Tiere stellte sich als Ursache in allen Fällen ein akuter Reheschub mit folgender teilweiser Beschädigung der Verbindung von Klauenlederhaut und Hornschuh heraus. Nach Behandlung der Tiere mit Entlastung der betroffenen Klauen normalisierte sich der LMS im Herdendurchschnitt wieder.

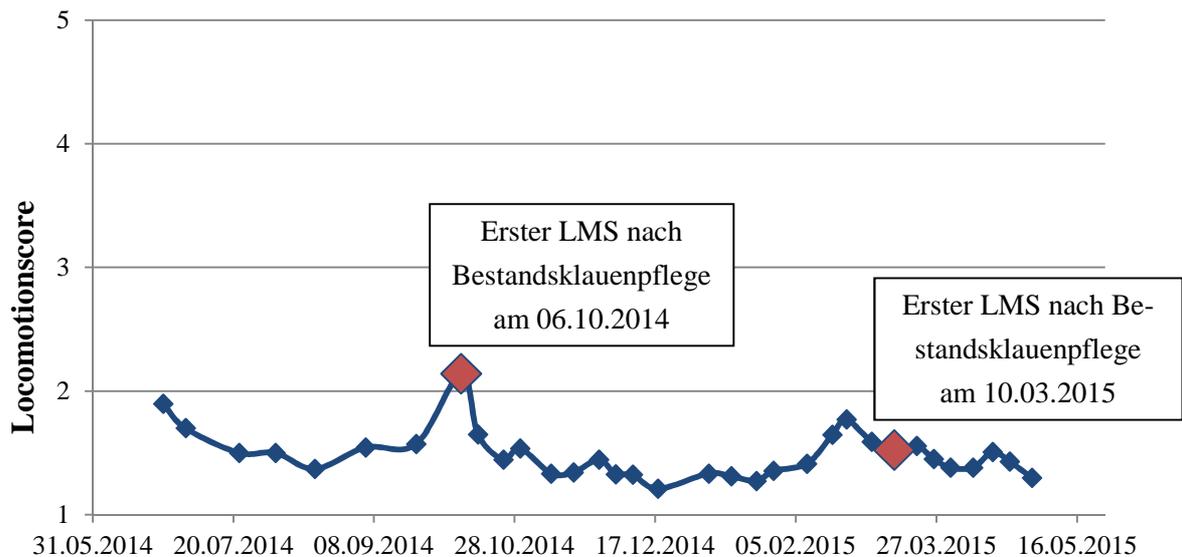


Abbildung 15: Verlauf des durchschnittlichen LMS der Herde während des Versuchs

5.1.1.1 Beurteilerreliabilität

Die Beurteilerreliabilität, ermittelt nach der Methode von Cohen's Kappa [18], bei der einmaligen Überprüfung von zwei kurz hintereinander durchgeführten Locomotionscorings der gesamten Herde betrug 0,7 (95 % Konfidenzintervall = 0,38 bis 1,00) und der Anteil der nicht übereinstimmend beurteilten Tiere lag bei 5 %.

5.1.2 Bestandsklauenpflege

Bei jedem Bestandsklauenpflegetermin wurden jeweils 75 Tiere erfasst. Die Ergebnisse des ersten und die der beiden folgenden Termine sollten nicht miteinander verglichen werden, weil die Dokumentation der Tierärztin, die die zweite und dritte Bewertung durchführte im Gegensatz zu der des Klauenpflegers, der die erste durchführte, bereits geringe Anzeichen einer Krankheit enthält. So wurden zum Beispiel chronische und Verdachtsfälle von Dermatitis digitalis oder milde Anzeichen von Rehe und Sohlengeschwüren durch den Klauenpfleger nicht erfasst. Es fällt jedoch auf, dass der Anteil der Tiere mit Reheanzeichen und deren mögliche Folge, die Weiße-Linie-Defekte, im Bestand generell sehr hoch war (**Abbildung 16**).

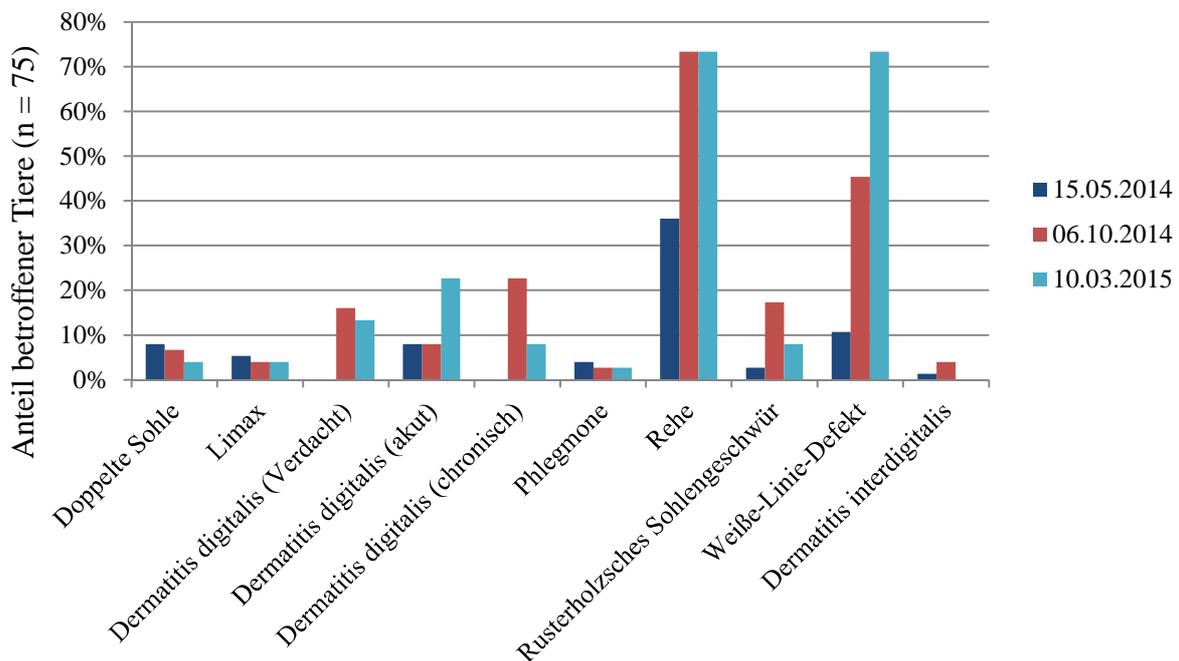


Abbildung 16: Bei der Bestandsklauenpflege erfasste Befunde

5.1.3 Erkrankungen der als lahm definierten Tiere

Insgesamt wurden während der Versuchsphase 45 Lahmheitsfälle behandelt und dokumentiert und in die spätere Modellentwicklung einbezogen. Über die Hälfte (56 %) der verursachenden Läsionen waren die Folge von Lederhautentzündung (Doppelte Sohle und Weiße-Linie-Defekte). 12 % der Lahmheiten ließen sich auf eine Phlegmone zurückführen, 9 % auf ein Rusterholzsches Sohlengeschwür und für 7 % der Lahmheiten waren akute Dermatitis digitalis Läsionen die Ursache. Andere Läsionen wie Dermatitis interdigitalis, deformierte Klauen oder Limax machten insgesamt 16 % der Ursachen für die aufgetretenen Lahmheiten aus (s. **Abbildung 17**).

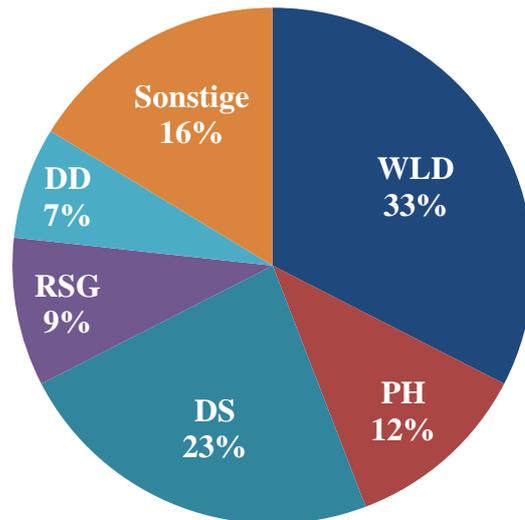


Abbildung 17: Ursachen der in der Modellentwicklung verwendeten Lahmheitsfälle (n = 45)
WLD = Weiße-Linie-Defekt, PH = Phlegmone, DS = Doppelte Sohle, RSG = Rusterholz-
sches Sohlengeschwür, DD = Dermatitis digitalis (akut)

5.2 Einzelparameter

5.2.1 Dunnett-t-Test

Beim Vergleich der Parameterwerte nach Einteilung nach Locomotionscore (LMS) wird deutlich, dass auch bei gleichem LMS teilweise sehr hohe interindividuelle Schwankungen auftreten. In **Tabelle 14** sind Anzahl der Tiere, Mittelwert, Standardabweichung sowie das 5. und das 95. Perzentil der untersuchten Parameter nach LMS-Gruppe über die Gesamtdauer des Versuches aufgeführt. Die Anzahl der Tiere n der Parameter innerhalb einer Gruppe unterscheidet sich aufgrund teilweise fehlender Daten der verschiedenen Sensorsysteme.

Die Leistungsparameter wie Milchleistung, Zwischenmelkzeit, Tiergewicht und die Fut-
teraufnahme blieben bei zunehmender Lahmheit im Mittel fast unverändert. Die
Milchmenge, Futterraufnahmemenge sowie der Tiergewichtsmedian war bei den Tieren mit
mittlerem Lahmheitsgrad höher als bei den gesunden und den schwer lahmen. Auch die ta-
geszeitabhängigen Parameter Futterraufnahme tagsüber, Anteil der Mahlzeiten tagsüber, An-
zahl der Trogbesuche tagsüber, Liegedauer tagsüber und Abliegeereignisse tagsüber ließen
keinen deutlichen Effekt ausgehend vom Anstieg des Locomotionscores erkennen. Wird die
Futterraufnahme auf die Ereignisse Besuch oder Mahlzeit verteilt betrachtet, so zeigte die An-
zahl der Trogbesuche den deutlichsten Zusammenhang mit dem LMS. Hier war ein deutlicher
Abwärtstrend bei zunehmender Lahmheit zu erkennen. Die pro Ereignis aufgenommene
Menge Futter stieg wiederum pro Mahlzeit deutlicher an als bei den Trogbesuchen. Bei der
Dauer der Ereignisse war weder bei der Einteilung nach Trogbesuchen noch nach Mahlzeiten
ein Effekt durch die Veränderung des LMS zu sehen. Unter den Aktivitätsparametern war die
größte Auswirkung der Lahmheit auf Liegedauer und Dauer eines Liegeereignisses zu erken-

nen. Stärker lahrende Tiere scheinen pro Tag und Liegeereignis länger zu liegen. Die Anzahl der Abliegeereignisse und die Aktivitätskennzahl zeigten kaum Veränderung mit ansteigender Lahmheit.

Tabelle 14: Statistische Lagemaße der Parameter aus *Datensatz 1* nach LMS

Parameter	n	\bar{x}	SD	P5	P95
Milchleistung [kg]					
gesamt	1515	23,9	7,7	12,7	37,6
LMS1	971	23,3	7,9	12,5	37,5
LMS2**	395	24,9**	7,3	12,9	38
LMS3**	104	25,8**	8,0	13,3	39
LMS4	42	25,6	6,6	15,9	34,2
LMS5	3	24,5	1,9	23,2	26,6
Maximale Zwischenmelkzeit [min]					
gesamt	1560	718,1	150,2	515,4	986,8
LMS1	1001	717,2	154,7	510,4	989,8
LMS2	407	717,7	144,4	522,6	983,3
LMS3	107	707,6	132,4	531,8	976,3
LMS4	42	762,3	141,7	529,2	970,5
LMS5	3	806,0	58,0	740,1	849,4
Median Tiergewicht [kg]					
gesamt	1559	787,3	96,0	624,4	942,2
LMS1	999	771,6	94,4	614,5	931,0
LMS2***	407	821,6***	93,5	653,4	952,4
LMS3*	108	797,1*	85,2	660,7	942,2
LMS4	42	801,4	96,0	667,2	944,0
LMS5	3	796,5	96,6	685,7	863,4
Futterraufnahmemenge [kg]					
gesamt	1563	40,8	9,2	26,1	56,4
LMS1	1002	39,9	9,3	25,5	55,7
LMS2***	408	42,6***	8,9	27,8	58,8
LMS3*	108	42,3*	8,6	29,8	57,3
LMS4	42	40,4	9,9	24,1	58,2
LMS5	3	37,1	6,5	29,8	42,2

Tabelle 14: Statistische Lagemaße der Parameter (Fortsetzung)

Parameter	n	\bar{x}	SD	P5	P95
Dauer der Futterraufnahme [min]					
gesamt	1563	177,3	61,4	86,4	283,9
LMS1	1002	181,8	61,4	87,6	284,5
LMS2	408	178,1	60,2	98,2	292,6
LMS3 ^{***}	108	155,2 ^{***}	53,2	81,5	254,3
LMS4 ^{***}	42	124,2 ^{***}	55,8	45,4	225,7
LMS5	3	95,3	43,7	45,4	126,9
Futterraufnahme tagsüber [%]					
gesamt	1563	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS1	1002	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS2	408	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS3	108	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS4 ^{**}	42	0,9 ^{**}	0,1	0,7	1,0
LMS5	3	0,8	0,2	0,7	1,0
Futterraufnahmeintensität [kg/min]					
gesamt	1563	0,3	0,1	0,1	0,5
LMS1	1002	0,2	0,1	0,1	0,4
LMS2 ^{**}	408	0,3 ^{**}	0,1	0,1	0,5
LMS3 ^{***}	108	0,3 ^{***}	0,1	0,2	0,6
LMS4 ^{***}	42	0,4 ^{***}	0,1	0,2	0,6
LMS5 [*]	3	0,4 [*]	0,2	0,3	0,7
Anzahl der Mahlzeiten					
gesamt	1563	6,5	1,9	4,0	10,0
LMS1	1002	6,7	1,9	4,0	10,0
LMS2 ^{***}	408	6,2 ^{***}	1,9	3,0	9,0
LMS3 ^{***}	108	5,6 ^{***}	1,5	4,0	9,0
LMS4 ^{***}	42	5,5 ^{***}	1,8	3,0	9,0
LMS5	3	5,3	2,3	4,0	8,0
Anteil der Mahlzeiten tagsüber [%]					
gesamt	1563	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS1	1002	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS2	408	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS3	108	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS4 [*]	42	0,9 [*]	0,1	0,6	1,0
LMS5	3	0,8	0,1	0,8	1,0

Tabelle 14: Statistische Lagemaße der Parameter (Fortsetzung)

Parameter	n	\bar{x}	SD	P5	P95
Ø Dauer einer Mahlzeit [min]					
gesamt	1563	39,5	16,2	19,0	70,5
LMS1	1002	39,5	16,2	19,4	71,1
LMS2	408	41,1	17,1	19,3	73,8
LMS3	108	36,9	13,7	18,8	59,3
LMS4**	42	30,8**	10,2	15,7	45,8
LMS5	3	25,1	11,7	13,3	36,8
Ø Futteraufnahmemenge pro Besuch [kg]					
gesamt	1563	1,1	0,7	0,5	2,3
LMS1	1002	1,0	0,5	0,4	2,0
LMS2***	408	1,2***	0,6	0,5	2,4
LMS3***	108	1,6***	0,9	0,8	3,4
LMS4***	42	2,1***	1,5	0,7	4,4
LMS5	3	1,9	1,3	1,0	3,3
Anzahl der Besuche am Trog					
gesamt	1563	44,7	21,3	18,0	87,0
LMS1	1002	48,3	21,9	21,0	91,0
LMS2***	408	41,4***	19,1	18,0	77,0
LMS3***	108	31,4***	13,8	12,0	57,0
LMS4***	42	26,1***	14,3	8,0	50,0
LMS5	3	27,0	15,7	9,0	38,0
Anzahl der Trogbesuche tagsüber [%]					
gesamt	1563	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS1	1002	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS2	408	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS3	108	0,8	0,1	0,6	1,0
LMS4**	42	0,9**	0,1	0,7	1,0
LMS5	3	0,8	0,2	0,7	1,0
Ø Dauer eines Besuchs [min]					
gesamt	1563	4,6	2,1	1,8	8,5
LMS1	1002	4,4	2,0	1,6	8,1
LMS2***	408	4,9***	2,0	1,9	8,4
LMS3***	108	5,8***	2,9	2,5	12,1
LMS4***	42	5,7***	3,0	2,2	12,6
LMS5	3	3,9	1,0	3,0	5,0

Tabelle 14: Statistische Lagemaße der Parameter (Fortsetzung)

Parameter	n	\bar{x}	SD	P5	P95
Ø Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit [kg]					
gesamt	1563	6,8	2,3	3,8	11,2
LMS1	1002	6,4	2,1	3,6	10,5
LMS2 ^{***}	408	7,5 ^{***}	2,5	4,3	12,2
LMS3 ^{***}	108	7,9 ^{***}	2,1	5,2	11,8
LMS4 ^{***}	42	7,8 ^{***}	2,3	4,9	12,1
LMS5	3	7,6	2,8	4,9	10,6
Liegedauer[min]					
gesamt	1128	715,6	184,0	410,0	992,0
LMS1	678	698,3	175,6	406,0	920,0
LMS2	320	717,6	178,4	412,0	971,5
LMS3 ^{***}	97	781,0 ^{***}	211,4	419,0	1105,0
LMS4 ^{***}	31	856,3 ^{***}	220,3	433,0	1152,0
LMS5	2	923,5	282,1	724,0	1123,0
Liegedauer tagsüber [%]					
gesamt	1128	0,6	0,1	0,4	0,7
LMS1	678	0,6	0,1	0,4	0,7
LMS2	320	0,6	0,1	0,4	0,7
LMS3 ^{***}	97	0,6 ^{***}	0,1	0,5	0,7
LMS4 [*]	31	0,6 [*]	0,1	0,5	0,7
LMS5	2	0,6	0,1	0,5	0,7
Anzahl Abliegeereignisse					
gesamt	1128	8,6	3,8	4,0	15,0
LMS1	678	9,0	4,0	4,0	16,0
LMS2 [*]	320	8,2 [*]	3,5	4,0	15,0
LMS3 [*]	97	7,9 [*]	3,0	3,0	14,0
LMS4 [*]	31	7,0 [*]	3,0	2,0	14,0
LMS5	2	15,5	13,4	6,0	25,0
Abliegeereignisse tagsüber [%]					
gesamt	1113	0,7	0,1	0,4	0,9
LMS1	667	0,7	0,1	0,4	0,9
LMS2	316	0,7	0,1	0,4	0,9
LMS3	97	0,7	0,1	0,5	1,0
LMS4 [*]	31	0,7 [*]	0,2	0,5	1,0
LMS5	2	0,8	0,0	0,8	0,8

Tabelle 14: Statistische Lagemaße der Parameter (Fortsetzung)

Parameter	n	\bar{x}	SD	P5	P95
Ø Dauer eines Liegeereignisses [min]					
gesamt	1113	94,4	47,2	40,0	175,0
LMS1	667	88,0	42,8	38,0	164,0
LMS2*	316	97,0*	42,9	45,0	183,0
LMS3***	97	112,9***	56,5	54,0	231,0
LMS4***	31	148,3***	84,0	54,0	348,0
LMS5	2	82,0	53,7	44,0	120,0
Aktivitätskennzahl					
gesamt	1125	2020,8	814,5	1058,0	3310,0
LMS1	671	2161,0	767,3	1242,0	3438,0
LMS2***	323	1890,9***	852,1	945,0	2965,0
LMS3***	97	1638,9***	826,5	771,0	2608,0
LMS4***	32	1544,0***	562,5	626,0	2537,0
LMS5	2	2139,5	1344,2	1189,0	3090,0
Aktivitätskennzahl tagsüber [%]					
gesamt	1125	0,8	0,1	0,7	1,0
LMS1	671	0,8	0,1	0,7	1,0
LMS2	323	0,8	0,1	0,7	1,0
LMS3	97	0,8	0,1	0,7	0,9
LMS4*	32	0,8*	0,1	0,6	1,0
LMS5	2	0,9	0,2	0,8	1,0

Mittelwerte der Gruppen, die mit *, ** oder *** gekennzeichnet sind, sind laut Dunnett-t-Test signifikant unterschiedlich zu den Mittelwerten der Gruppe mit LMS = 1 bei $p < 0,05$, $p < 0,01$ oder $p < 0,001$; n = Anzahl der Tagesdatensätze, \bar{x} = Mittelwert, SD = Standardabweichung, P5 = 5. Perzentil, P95 = 95. Perzentil

Im Anhang sind die grafischen Darstellungen der Verteilung der einzelnen Werte sortiert nach Locomotionscore aufgeführt (**Abbildung 24** bis **Abbildung 45**). Nur bei wenigen Parametern zeigt sich ein offensichtlicher Zusammenhang mit dem Lahmheitsgrad wie bei der Liegedauer (s. **Abbildung 18**).

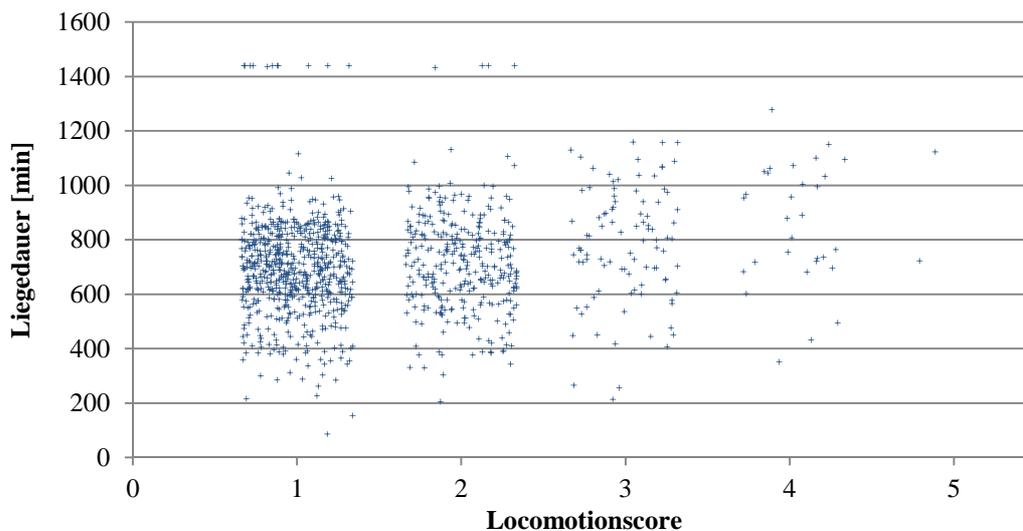


Abbildung 18: Liegedauer nach LMS

5.2.2 ROC-Kurven-Analyse

Um die Qualität der Vorhersage der Parameter über den Lahmheitsstatus zu ermitteln, wurde mit den jeweiligen Parameterwerten zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine ROC-Kurven-Analyse durchgeführt. Nach Durchführung der ROC-Kurven-Analysen der Werte jeweils an allen Tagen d_0 bis d_7 zeigte sich, dass die AUC bei den durch Pedometer erfassten Parametern und der Milchleistung schon fünf Tage vor der Durchführung des Locomotions Scorings auf dem gleichen Niveau war, wie am Tag der Erhebung. Bei den übrigen Parametern war dies bereits drei Tage vor dem Tag der Erhebung der Fall.

Die Ergebnisse der Analysen der einzelnen Werte am Vortag der Erhebung (d_{-1}) und der Verlaufswerte (aktuelle Woche (Extremwerte d_{-1} bis $d_{-3/5}$) und Vorwoche (Verhältnis $d_{-1}/(d_{-8} - d_{-14})$) an diesem Tag sind in **Tabelle 15** dargestellt. Die Analyse der Werte des Vortags enthält mehr auswertbare Fälle als die der Verlaufswerte, da für die Berechnung der Verlaufswerte mehrere zusammenhängende Tage im Datensatz vorhanden sein mussten (3 bzw. 5 bei der aktuellen Woche, 15 bei der Vorwoche).

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der ROC-Kurvenanalyse der Werte des Vortags ($d_{.1}$) sowie der Verlaufswerte (aktuelle Woche (Extremwerte $d_{.1}$ bis $d_{.3/5}$) und Vorwoche (Verhältnis $d_{.1}/(d_{.8} - d_{.14})$)¹.

Parameter	AUC		
	Vortag	Aktuelle Woche	Vorwoche
Milchleistung [kg]	0,57	0,57	0,62
Maximale Zwischenmelkzeit [min]	0,62	0,49	0,62
Median Tiergewicht [kg]	0,47	0,54	0,60
Futteraufnahmemenge [kg]	0,51	0,50	0,58
Dauer der Futteraufnahme [min]	0,74	0,75	0,68
Futteraufnahme tagsüber [%]	0,62	0,66	0,60
Futteraufnahmeintensität [kg/min]	0,74	0,75	0,66
Anzahl der Mahlzeiten	0,60	0,39	0,65
Anzahl der Mahlzeiten tagsüber [%]	0,60	0,62	0,54
Ø Dauer einer Mahlzeit [min]	0,65	0,68	0,51
Ø Futteraufnahmemenge pro Besuch [kg]	0,73	0,73	0,67
Anzahl der Besuche am Trog	0,72	0,72	0,70
Anzahl der Trogbesuche tagsüber [%]	0,62	0,66	0,60
Ø Dauer eines Besuchs [min]	0,54	0,58	0,56
Ø Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit [kg]	0,61	0,59	0,63
Liegedauer [min]	0,73	0,69	0,74
Liegedauer tagsüber [%]	0,66	0,67	0,54
Anzahl Abliegeereignisse	0,62	0,62	0,54
Abliegeereignisse tagsüber [%]	0,61	0,57	0,64
Ø Dauer eines Liegeereignisses [min]	0,74	0,74	0,56
Aktivitätskennzahl	0,67	0,69	0,58
Aktivitätskennzahl tagsüber [%]	0,51	0,57	0,65
Summe	13,88	13,77	13,40
Mittelwert	0,64	0,64	0,61
Minimum	0,47	0,39	0,51
Maximum	0,74	0,75	0,74
Anzahl positiver Fälle	45 34 33 ²	39 42 30 29 ³	32 22 23 ²
Anzahl negativer Fälle	136	134	117

¹Der Mittelwert der AUC eines Datensatzes wurde ohne die Werte kleiner 0,5 gebildet, da hier der Zusammenhang durch die Software in der falschen Richtung bewertet wurde. Werte der AUC $\geq 0,7$ sind fett gedruckt. ² = Leistungs- und Futteraufnahmeparameter | Liegeparameter | allgemeine Aktivitätsparameter; ³ = Milchleistung | Zwischenmelkzeit, Tiergewicht und Futteraufnahmeparameter | Liegeparameter | allgemeine Aktivitätsparameter

Keines der drei verschiedenen Auswahlverfahren (Vortag, aktuelle Woche, Vorwoche) der Werte für die Berechnung der ROC-Kurven resultiert in einer AUC über 0,8. Bei Auswertung der Werte der aktuellen Woche (Extremwerte $d_{.1}$ bis $d_{.3/5}$) haben die fünf Parameter Dauer der

Futteraufnahme, Futteraufnahmeintensität, Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit, Anzahl der Besuche am Trog und Dauer eines Liegeereignisses eine AUC von größer oder gleich 0,7. Bei Auswertung der einzelnen Werte des Vortags (d_{-1}) kommt noch der Parameter Liegedauer hinzu, die Analyse Werte der Vorwoche (Verhältnis $d_{-1}/(d_{-8} - d_{-14})$) enthält hingegen nur zwei: Anzahl der Besuche am Trog und Liegedauer. Die Parameter mit der höchsten AUC sind die Futteraufnahmedauer und -intensität bei Verwendung der Werte der aktuellen Woche. In **Abbildung 19** ist die ROC-Kurve der Futteraufnahmedauer dargestellt (die Richtigkeitsrate, also die Sensitivität, wird auf der Ordinate gegen die Falschpositivrate, also eins minus Spezifität, auf der Abszisse aufgetragen s. 4.6.2). Der Mittelwert aller AUCs ist bei den Werten der Vorwoche mit 0,64 auf gleichem Niveau wie bei den Werten des Vortags und größer als bei den Werten der Vorwoche mit 0,61.

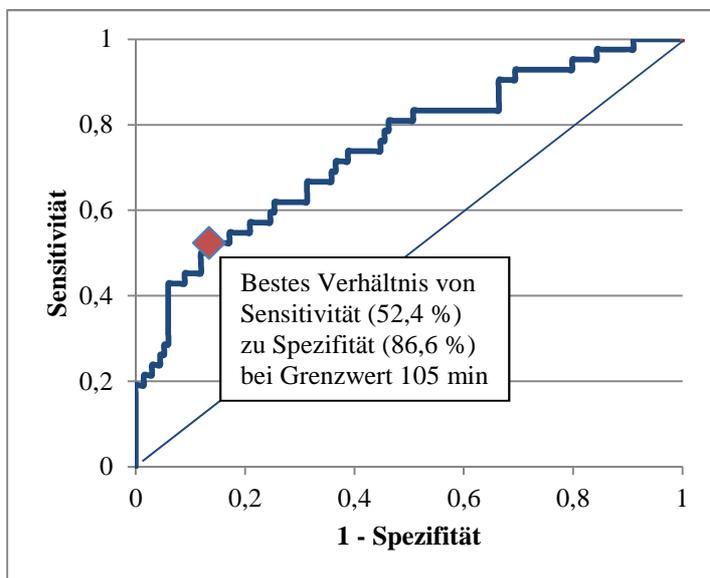


Abbildung 19: ROC-Kurve des Parameters Futteraufnahmedauer

5.3 Kombination der Parameterwerte

5.3.1 Modell 1: Binärlogistische Regression

Insgesamt wurde die binärlogistische Regression aufgrund fehlender Sensordaten mit 164 der 179 Fälle (Tagesdatensätze), davon 30 positive und 134 negative Fälle, durchgeführt. Die Kreuztabellen der Ergebnisse nach Anwendung der jeweiligen Formel auf den *Modellentwicklungsdatensatz* bei einem Grenzwert für die Wahrscheinlichkeiten von 0,5 sind in **Tabelle 17** für die vier besten Modelle aufgeführt. In **Tabelle 16** sind die zugehörigen Kriterien Sensitivität, Spezifität und die AUC der binärlogistischen Modelle dargestellt. Die Spezifität lag zwar bei allen Parameterkombinationen mit 95-99 % sehr hoch, jedoch betrug die Sensitivität und damit die Erkennung „lahmer Tiere“ bei einer maximalen AUC von 0,69 in keinem der vier Modelle mehr als vierzig Prozent.

Tabelle 16: Zusammensetzung der binärlogistischen Modelle und deren statistische Gütekriterien

Modell	Parameterkombination	AUC	Sensitivität	Spezifität
A	Futteraufnahmeintensität Dauer eines Liegeereignisses	0,62	30,0 %	98,5 %
B	Dauer der Futteraufnahme Dauer eines Liegeereignisses Liegedauer dim Laktationsnummer	0,66	36,67 %	94,8 %
C	Futteraufnahmeintensität Dauer eines Liegeereignisses Liegedauer dim Laktationsnummer Futteraufnahmemenge pro Besuch Anzahl der Trogbesuche	0,69	36,7 %	94,8 %
D	Dauer der Futteraufnahme Dauer eines Liegeereignisses dim Laktationsnummer Anzahl der Trogbesuche	0,69	40,0 %	97,0 %

Tabelle 17: Kreuztabellen der vier besten Modelle der binärlogistischen Regression

	beobachtet	vorhergesagt		Korrekt eingestufte Fälle
		„nicht lahm“	„lahm“	
Modell A	nicht lahm	132	2	86,0 %
	lahm	21	9	
Modell B	nicht lahm	127	7	84,1 %
	lahm	19	11	
Modell C	nicht lahm	127	7	84,1 %
	lahm	19	11	
Modell D	nicht lahm	130	4	87,2 %
	lahm	18	12	

Die Formel aus Modell D wurde auf alle Tagesdatensätze aus *Datensatz 1* angewandt und somit für jeden der Tagesdatensätze eine Wahrscheinlichkeit dafür berechnet, dass das jewei-

lige Tier an diesem Tag lahm war. Diese Werte wurden dann in einer ROC-Kurven-Analyse untersucht um einen neuen Grenzwert der Wahrscheinlichkeit zwischen „lahm“ und „nicht lahm“ festzulegen (s. 4.7.1). Ohne Festlegung des Trennwertes bei 0,5, wie ursprünglich durch die binärlogistische Regression vorgegeben, lag der optimale Grenzwert für die Wahrscheinlichkeit bei nur 0,064. Die AUC dieses modifizierten Modells D stieg dadurch auf 0,84, die Sensitivität auf 94,0 %, die Spezifität war mit 61,5 % jedoch deutlich geringer. In **Abbildung 20** ist die ROC-Kurve des Regressionsmodells D angewendet auf den ursprünglichen Datensatz 1 abgebildet.

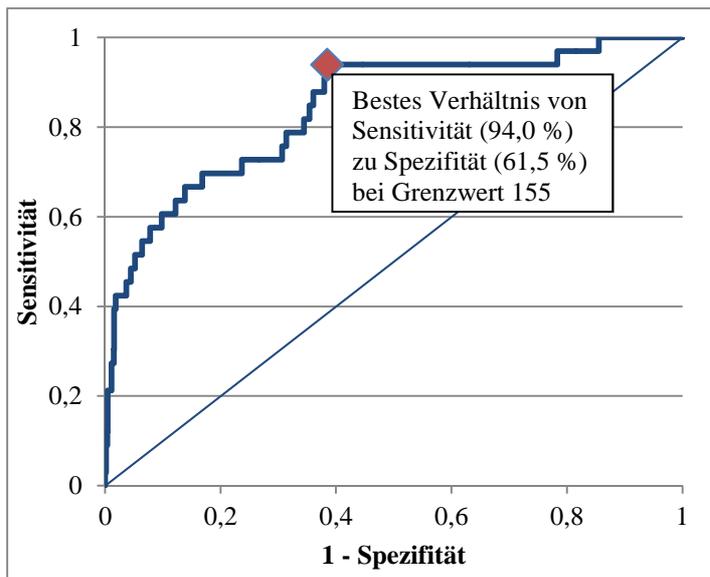


Abbildung 20: ROC-Kurve der Anwendung der Formel aus Modell D

5.3.2 Modell 2: Multifaktorielle Parameterwichtung

5.3.2.1 Festlegung der Grenzwerte

Mit einer ROC-Kurven-Analyse jedes der vier im ersten Schritt verwendeten Parameter wurden jeweils vier Grenzwerte G_{95} , G_{75} , G_{50} und G_{25} ermittelt (s. **Tabelle 18**). Zur Bestimmung der Sensitivität können nur Punkte auf der ROC-Kurve herangezogen werden. Deshalb war es nicht möglich für jeden Parameter die exakt gleiche Sensitivität bei G_x zu verwenden. Zudem war der Verlauf der Kurven sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund waren bei gleichem Abstand zwischen zwei Sensitivitätswerten auf einer Kurve die Abstände zwischen den zwei zugehörigen Grenzwerten je nach Parameter sehr unterschiedlich. Darum wurden die Sensitivitäten teilweise angepasst um nicht allzu große oder kleine Abstände zwischen den einzelnen Grenzwerten innerhalb eines Parameters zu erhalten.

Tabelle 18: Grenzwerte G_x der Parameter. Die Zahlen in Klammern entsprechen der Sensitivität bei Trennung durch den jeweiligen Grenzwert G_x .

Parameter	G_{95}	G_{75}	G_{45}	G_{25}
Futteraufnahmeintensität (FAI) [kg/min]	> 0,18 (90,5 %)	> 0,27 (83,3 %)	> 0,38 (50,0 %)	> 0,51 (24,0 %)
Dauer der Futteraufnahme (DFA) [min]	< 178 (90,0 %)	< 134 (70,0 %)	< 104 (45,0 %)	< 82 (25,0 %)
Ø Futteraufnahmemenge pro Besuch (FATB) [kg]	> 0,83 (95,0 %)	> 1,29 (83,0 %)	> 1,83 (46,7 %)	> 3,21 (26,7 %)
Anzahl der Besuche am Trog (TB)	< 41 (90,0 %)	< 29 (70,0 %)	< 24 (50,0 %)	< 14 (25,0 %)
Liegedauer (LD) [min]	≥ 625 (90,0 %)	≥ 783 (70,0 %)	≥ 943 (50,0 %)	≥ 1060 (25,0 %)
Ø Dauer eines Liegeereignisses (DLE) [min]	≥ 81 (95,0 %)	≥ 119 (75,0 %)	≥ 144 (63,3 %)	≥ 240 (25,0 %)
Aktivitätskennzahl (AK)	< 2213 (96,0 %)	< 1485 (76,0 %)	< 1256 (60,0 %)	< 948 (26,7 %)

5.3.2.2 Wichtung der Parameter (Modell E_1)

Nach schrittweiser Anpassung der Punktzahlen, wie unter 4.7.2.2 beschrieben, erreichte Modell E_1 im letzten Schritt eine Sensitivität von 69,7 % bei einer Spezifität von 84,8 %. Die im letzten Schritt verwendeten Punktzahlen sind in **Tabelle 19** aufgeführt.

Tabelle 19: Im letzten Schritt in Modell E_1 verwendete Punktzahlen

Parameter	Grad				
	0	1	2	3	4
Dauer der Futteraufnahme [min]	0	5	15	60	150
Anzahl der Besuche am Trog	0	20	40	60	150
Liegedauer [min]	0	5	15	60	150
Ø Dauer eines Liegeereignisses [min]	0	20	40	60	150
dim			-		
lak			-		

5.3.2.3 Laktationsstatus und Laktationszahl (Modell E_2)

Im nächsten Schritt wurden der Laktationsstatus und die Laktationszahl als Einflussfaktoren hinzugenommen. Die Spezifität ließ sich durch die Berücksichtigung der Laktationskennzahlen noch einmal leicht steigern. Dieses Modell (E_2) wies bei einer Sensitivität von 69,7 % eine

Spezifität von 92,0 % auf. **Abbildung 21** zeigt die zugehörige ROC-Kurve. In **Tabelle 20** sind die Punktzahlen des Modells dargestellt.

Tabelle 20: In Modell E₂ verwendete Punktzahlen

Parameter	Grad				
	0	1	2	3	4
Dauer der Futteraufnahme [min]	0	5	15	60	150
Anzahl der Besuche am Trog	0	20	40	60	150
Liegedauer [min]	0	5	15	60	150
Ø Dauer eines Liegeereignisses [min]	0	20	40	60	150
dim	10	0	10	-	-
lak	-10	5	-10	-	-
Grenzwert der Summe für „lahm“		> 155			

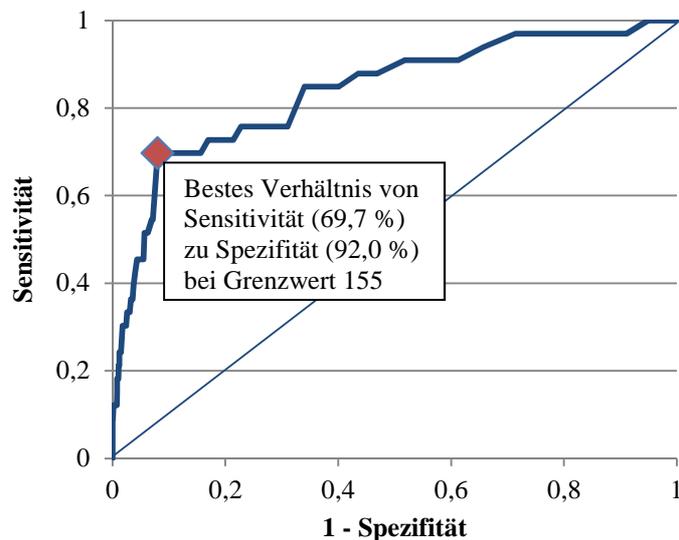


Abbildung 21: ROC-Kurve des Modells E₂

5.3.2.4 Integration weiterer Parameter

Vor der Integration weiterer Parameter wurden diese auf den Zusammenhang mit bereits im Modell enthaltenen Parametern überprüft, um unnötige Redundanz in der Berechnung des Lahmheitsstatus zu vermeiden. **Tabelle 21** enthält die Ergebnisse des Tests auf den Zusammenhang in Form von Cramérs V zwischen den Parametern. Die vier zuerst verwendeten Parameter wiesen untereinander nur einen geringen Zusammenhang auf, doch die Futteraufnahmemenge pro Besuch hatte im Vergleich einen starken Zusammenhang mit der Anzahl der Trogbesuche von 0,58. Der Zusammenhang zwischen Futteraufnahmeintensität und der Dauer der Futteraufnahme lag mit einem Cramérs V von 0,47 ebenso relativ hoch. Auch die Aktivitätskennzahl wies einen höheren Zusammenhang

mit einem der bereits verwendeten Parameter, der Liegedauer, auf. Cramérs V lag im Zusammenhang mit der Liegedauer bei 0,31. Die Integration dieser Parameter erbrachte erwartungsgemäß keine Verbesserung des Modells E₂.

Tabelle 21: Cramérs V der Parameter in Modell E₂¹

	DFA	TB	LD	DLE
DFA	-	0,20	0,13	0,07
TB	0,20	-	0,13	0,08
LD	0,13	0,13	-	0,18
DLE	0,07	0,08	0,18	-
FAI	0,47	0,14	0,11	0,08
FATB	0,15	0,58	0,13	0,10
AK	0,06	0,15	0,31	0,14

¹Werte größer als 0,3 sind fett gedruckt. Alle Werte sind signifikant bei $p < 0,001$; DFA = Dauer der Futteraufnahme, TB = Anzahl der Besuche am Trog, LD = Liegedauer, DLE = Dauer eines Liegeereignisses, FAI = Futteraufnahmeintensität, FATB = Futteraufnahme pro Besuch, AK = Aktivitätskennzahl

5.3.2.5 Einbeziehung der Summen der Vortage (Modell F)

In Modell F wurden auf Basis des Modells E die Summen der Vortage (d₂ bis d₄) zur Summe des Tages d₁ addiert, dann erfolgte eine ROC-Kurve der neuen Werte. Die Sensitivität konnte in Modell F auf 81,8 % gesteigert werden, die Spezifität verringerte sich jedoch auf 80,6 %. **Abbildung 22** zeigt die zugehörige ROC-Kurve. Außerdem dezimierte das Fehlen einzelner Tagesdatensätze in den vier aufeinanderfolgenden Tagen die für die ROC-Kurven-Analyse verfügbare Fallzahl. In **Tabelle 22** sind die Ergebnisse der Modelle ohne (E₂) und mit (F) Einbeziehung der Vortage zusammengefasst.

Tabelle 22: Statistische Gütekriterien der beiden Modelle E₂ und F

Modell	Fälle (+)	Fälle (-)	Sensitivität	Spezifität	AUC	KI (AUC)
E₂	33	1079	69,7 %	92,0 %	0,84	0,76-0,92
F	22	953	81,8 %	80,6 %	0,85	0,77-0,94

KI = 95 % Konfidenzintervall

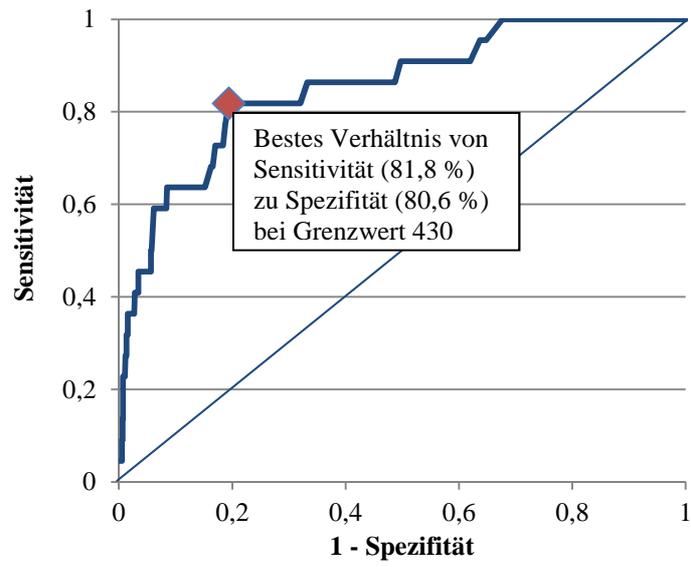


Abbildung 22: ROC-Kurve des Modells F

6 Diskussion

6.1 Klauengesundheit

6.1.1 Beurteilung der Klauengesundheit

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten, die Klauengesundheit eines Tieres zu beurteilen: Entweder anhand der Betrachtung der Klauen und der Einordnung und Bewertung der sichtbaren Läsionen (Klauenbonitur) oder anhand der Erfassung des Lahmheitsstatus als Reaktion des Tieres auf Schmerzen bei der Fortbewegung über ein Locomotionscoringsystem. Die erste Methode hat den Vorteil, dass durch sie nur tatsächlich durch Probleme an der Klaue hervorgerufene Erkrankungen erkannt werden. Der große Nachteil besteht darin, dass einige Klauenerkrankungen erst deutlich nach Beginn des schmerzhaften und krankhaften Prozesses außen an der Klaue sichtbar werden [72]. Im Gegensatz dazu werden diese Erkrankungen bei der Beurteilung des Lahmheitsstatus immer aktuell mit erfasst. Nun werden zwar laut Logue et al. 1993 [59] etwa 90 % aller Lahmheiten durch Klauenerkrankungen verursacht, trotzdem können auch andere Prozesse wie Hautverletzungen, orthopädische Probleme weiter proximal an der Gliedmaße, innere Organschäden sowie Allgemeinerkrankungen zu Schmerzen führen, die das Tier dazu veranlassen, eine oder mehrere Gliedmaßen zu entlasten. Vor allem die Rückenkrümmung, die in vielen Locomotionscoringsystemen aufgrund ihrer hohen Beurteilerübereinstimmung [93] als Indikator genutzt wird, ist auch ein häufiges Anzeichen für parietale Schmerzen, wie etwa bei einer Peritonitis [89]. Da zum einen der Anteil der Tiere mit Lahmheiten aufgrund anderer Ursachen als Klauenprobleme aber nicht sehr hoch ist und zum anderen die Erkennung dieser keinen Nachteil darstellt, ist die Beurteilung der Klauengesundheit anhand auftretender Lahmheit im Vergleich zur Klauenbonitur zu bevorzugen. Hinzu kommt, dass eine Untersuchung der Klauen aller Tiere einen wesentlich größeren Aufwand bedeutet und deshalb die Durchführung nicht so häufig möglich ist, wie beim Locomotionscoring. Im Versuch wurde deshalb nicht die Bonitur sondern das Locomotionscoring als Kontrolle gewählt.

6.1.2 Definition eines Lahmheitsfalls durch das Referenzsystem

6.1.2.1 Reliabilität des Referenzsystems

Die Güte eines Systems kann sich nur auf den Grad der Übereinstimmung mit dem Referenzsystem beziehen, nicht aber mit dem tatsächlichen Lahmheitsstatus, da hierfür keine eindeutige objektivierte Definition existiert. Das Referenzsystem, durch das die Beurteilung der Genauigkeit eines Systems überprüft wird, kann das Ergebnis stark beeinflussen. Werden Tiere aufgrund zu wenig objektiver Kriterien bereits durch das Referenzsystem unzuverlässig eingestuft, so kann dies in der Folge zu falsch niedriger oder hoher Güte des untersuchten Systems führen. Das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Locomotionscoring nach Sprecher et al. 1997 [98] besteht aus fünf Graden. Im Versuch sollte leicht zwischen lahmen

und nicht lahmen Tieren unterschieden werden können. Alle Tiere mit unregelmäßigem Gangbild, also verkürzten Schritten oder Entlastung einer oder mehrerer Gliedmaßen, wurden daher bereits Grad vier zugeordnet (s. 4.3.1), da die Unterschiede zwischen den Definitionen verschiedener Autoren für Grad drei „Beeinträchtigung des Gangbildes und Verkürzung des Schrittes einer oder mehrerer Gliedmaßen“ und „vorsichtige Schritte und Entlastung einer oder mehrerer Gliedmaßen“ für Grad vier schwierig objektiv voneinander zu unterscheiden sind. Die Einteilung zwischen „lahm“ und „nicht lahm“ wurde also aufgrund dieser leicht veränderten Zuordnung zwischen Grad drei und vier vorgenommen, obwohl eine Kuh in anderen Veröffentlichungen bereits ab Grad drei als lahm galt [98], [46]. Diese Einteilung kann kritisch betrachtet werden, da somit Tiere, die bereits Schmerzen bei der Fortbewegung haben, diese aber nicht offensichtlich zeigen, als „nicht lahm“ gelten. Jedoch war bei dieser Vorgehensweise eine eindeutigere Abgrenzung zwischen „lahm“ und „gesund“ gewährleistet, was zu einer höheren Genauigkeit des Testergebnisses beitragen sollte.

Auch umgekehrt kann z. B. ein System, das direkt die Kriterien überprüft, anhand derer die Klassifizierung im Referenzsystem festgelegt wird, dadurch einen höheren Anteil korrekter Einstufungen aufweisen, als eines, das den Status indirekt über andere Methoden ermittelt. Wenn also ein Lahmheitserkennungssystem, wie beispielsweise dasjenige aus dem Versuch von Viazzi et al. 2013 [114], über die Analyse der Rückenkrümmung funktioniert und mit einem Locomotionscoringsystem kontrolliert wird, das ebenfalls auf der Rückenkrümmung basiert, führt dies möglicherweise zu falsch hoher Güte des Systems in Bezug auf die Aussage „lahm“ oder „nicht lahm“.

Die festgestellte Beurteilerreliabilität innerhalb des Beobachters im vorliegenden Versuch war mit einem Cohen's Kappa von 0,7 laut Landis und Koch 1977 [55] außerordentlich gut. Der Unsicherheitsfaktor zu geringer Beobachterübereinstimmung wurde hier dadurch eliminiert, dass alle Locomotionscorings von derselben Person durchgeführt wurden, die bereits viel Erfahrung mit der Methode nach Sprecher et al. 1997 [98] hat. Durch Training des Beobachters steigt die Reliabilität beim Locomotionscoring [11], [63].

6.1.2.2 Validität des Referenzsystems

Zusätzlich zu der mangelnden Objektivität in der Lahmheitsbeurteilung durch Locomotionscoring und der damit verbundenen verringerten Reliabilität kommt die nicht durch wissenschaftliche Untersuchungen bestätigte Validität. Das bei dieser Methode beurteilte Gangbild ist nicht nur durch das Auftreten von Schmerzen in Folge von Klauenläsionen beeinflusst, sondern ebenso durch weitere innere und äußere Faktoren wie zum Beispiel die Euterausdehnung [32] oder die Beschaffenheit der Lauffläche [19] (s. 2.3.1 und 2.3.2). Bei der Detektion von nach außen sichtbaren Klauenläsionen oder von Schmerzen bei der Gliedmaßenbelastung weist das Locomotionscoring folglich Defizite auf [94].

6.1.2.3 **Detektion von an den Klauen erkrankten Tieren im Versuch**

Bei nicht täglichem Locomotionscoring kann der genaue Tag, an dem die Lahmheit zum ersten Mal auftrat, nicht festgestellt werden. Somit können nur kurzzeitig auftretende Unregelmäßigkeiten im Gang überbewertet werden. Je größer der Abstand zwischen mehreren Locomotionscorings ist, desto größer wird die Unsicherheit bezüglich des Anfangszeitpunktes einer Lahmheit. Im vorliegenden Versuch betrug das Intervall ein bis zwei Wochen. Trotzdem wurden 27 der 36 aufgetretenen Erkrankungen zuerst durch das Locomotionscoring entdeckt. In nur einem Viertel der Erkrankungsfälle wurde das Stallpersonal noch vor der Detektion des betroffenen Tieres durch das Locomotionscoring auf die Lahmheit aufmerksam. Diese Unterschätzung bzw. fehlende Erkennung von Lahmheiten in der Herde durch das Stallpersonal bestätigt die Ergebnisse anderer Studien, in denen die Landwirte nur ein Fünftel bis ein Viertel der vorhandenen Lahmheiten im eigenen Stall erkannten [102], [119]. Dieser Sachverhalt unterstreicht die Bedeutung von Systemen, die den Landwirt und das Personal in der Detektion von Lahmheiten unterstützen und damit zu früherem Eingreifen im Verlauf einer Klauenerkrankung beitragen können. Wie schon in der Einführung erwähnt, sind die negativen Auswirkungen auf das Wohl des Tieres und dessen Leistung umso geringer, je früher eine Klauenerkrankung erkannt und behandelt wird [57], [56].

6.1.3 **Binäre Klassifizierung**

Das Hausrind stammt ursprünglich von dem wild lebenden Auerochsen ab. Dieser war permanent durch mögliche Angriffe eines Beutegreifers gefährdet und maskierte deshalb Schmerzen und die damit implizierte Schwäche, um nicht als leichte Beute zu gelten [81]. Diese Tatsache und der tierindividuelle Unterschied zwischen empfundenem Schmerz und der folgenden Reaktion bzw. dem Verändern der Verhaltensweisen [87], [45] führen zu sehr unterschiedlicher Ausprägung des Lahmheitsgrades bei gleicher zugrundeliegender Erkrankung. Dadurch wird die Grenze zwischen Tieren, die durch eine Gangbeurteilung als „lahm“ oder „nicht lahm“ definiert werden, undeutlich. Außerdem werden Tiere, die Schmerzen bei der Fortbewegung und daraus entstehende Verhaltensänderungen aufweisen, aber unter Beobachtung durch den Beurteiler die Schmerzen maskieren beim Locomotionscoring eventuell nicht erfasst. Dieser Sachverhalt ließe in der Folge eigentlich keine eindeutige Unterscheidung zwischen lahm und gesund zu, weder durch das Referenzsystem Locomotionscore noch durch das untersuchte Modell, sodass von einem bestimmten Maß an Unsicherheit bei binärer Zuordnung des Lahmheitsstatus demnach immer auszugehen ist.

6.1.4 **Unterschiedlicher Verlauf verschiedener Klauenerkrankungen**

Ein Problem bei der automatischen Erkennung von Lahmheiten auf der Basis von Verhaltensdaten ist der in 2.1.3 beschriebene unterschiedliche Verlauf bei Klauenerkrankungen. Krankheiten, die sich graduell entwickeln, werden sehr wahrscheinlich auch eine graduelle Verhaltensänderung verursachen. Im Unterschied dazu führen plötzlich auftretende Läsionen wie

Frakturen oder ein sogenannter Nageltritt, eher zu einer schnellen und deutlicheren Verhaltensänderung [30], [12]. Dementsprechend könnte ein Vergleich der Werte des aktuellen Tages mit Werten aus der Vergangenheit desselben Tieres hilfreich sein, um Lahmheit zu detektieren. Wie weit dabei in die Vergangenheit zurückgegangen werden muss, hinge jedoch vom akuten oder progredienten Verlauf ab und wäre damit nicht eindeutig und in jedem Fall gleich. Chronische Klauenprobleme, zum Beispiel als Folge einer subklinischen Lederhautentzündung, können ebenfalls ein anderes Verhaltensbild hervorrufen. Hier wird wahrscheinlich im Vergleich zu den Tagen bis Wochen zuvor kein Unterschied zu erkennen sein, da sich die Schmerzsituation, in der sich das Tier befindet nicht mehr ändert. Ein direkter Vergleich zu anderen, gesunden Tieren wäre eventuell sinnvoller als der Vergleich innerhalb eines Individuums.

6.1.5 Lahmheits- und Erkrankungsprävalenz

Die Verbesserung des Herdendurchschnitts des LMS um 32 % während der Versuchsdauer war mit hoher Wahrscheinlichkeit der frühen Erkennung durch die dichte Überwachung des Lahmheitsstatus und der direkt folgenden Behandlung der erkrankten Tiere zu verdanken. Aufgetretene Klauenerkrankungen waren dadurch von kürzerer Dauer als zuvor und die Prävalenz sank. Unter den Klauenläsionen war der Großteil Folge einer Lederhautentzündung. Der Anteil der durch DD verursachten Lahmheiten war mit 7 % relativ gering. Es ist möglich, dass sich die Parameterwerte bei einer anderen Zusammensetzung der auftretenden Klauenerkrankungen anders verhalten hätten als im vorliegenden Versuch. Aus diesem Grund ist es nötig, die Ergebnisse an anderen Populationen zu überprüfen.

6.2 Einzelparameter

Alle Tiere mit einem LMS ab vier wurden behandelt und erholten sich relativ schnell wieder. Dadurch wies kein Tier länger als zwei Wochen einen LMS von mehr als vier auf. Daraus resultieren die geringe Fallzahl der Tiere mit LMS 5 und die damit verbundene fehlende Signifikanz beim Gruppenvergleich durch den Dunnett-t-Test. Die Eignung der Parameter, Lahmheiten festzustellen, wurde ohne Abstufungen nach „lahm“ oder „nicht lahm“ untersucht. Aus diesem Grund waren Parameter im Modell schließlich untauglich, wenn sie erst bei höchstgradiger Lahmheit, also Grad fünf, reagierten und somit mittel- bis hochgradige Fälle unentdeckt blieben.

6.2.1 Erfassung und Bearbeitung der Daten

6.2.1.1 Verwendete Sensoren

Da die gesamte Berechnungsmethode auf durch verschiedene Sensoren automatisch erfassten Daten basiert, hängt die Qualität des Ergebnisses stark von der Qualität dieser Daten ab. Die Wiegetröge wurden in regelmäßigen Abständen kalibriert. Im Versuch von Borchers et al. 2015 [10] konnte eine sehr hohe Korrelation der durch die Pedometer „Track a Cow“ gemess-

senen Liegedauer mit der beobachteten festgestellt werden ($r = 1,0$ bei $p < 0,01$). Die Pedometer wurden auch im Rahmen einer anderen Untersuchung [39], die im selben Betrieb verlief wie der vorliegende Versuch, auf ihre Genauigkeit in Bezug auf die Erfassung des Liegeverhaltens überprüft. Die Anzahl der Liegeereignisse pro Tag wurde in allen Fällen leicht unterschätzt (12 ± 3 beobachtet vs. 9 ± 1 gemessen) und dadurch die Dauer eines Liegeereignisses überschätzt. Die durchschnittliche Liegedauer pro Tag wich von der beobachteten Dauer im Schnitt 5 % ($688 \text{ min} \pm 151 \text{ min}$ beobachtet vs. $702 \text{ min} \pm 141 \text{ min}$ gemessen) ab. Eine höhere Präzision der Messtechnik könnte möglicherweise zu besseren Ergebnissen bei der Ermittlung der Berechnungsmethode für eine Aussage über den Lahmheitsstatus führen.

6.2.1.2 Tagesdaten

Alle Sensordaten wurden zu Tageswerten eines Tieres zusammengefasst. Eine veränderte ultradiane Rhythmik einzelner Verhaltensweisen wird dadurch nicht berücksichtigt. Fröhner 2011 [37] konnte jedoch nachweisen, dass diese durch Erkrankungen beeinflusst werden. In der Arbeit stellte sich heraus, dass Kälber, die krank wurden, veränderte ultradiane Aktivitätsrhythmen aufwiesen. Garcia et al. 2014 [38] verwendeten unter anderem die Varianz der Aktivität zu einer bestimmten Tageszeit um den Lahmheitsstatus zu bestimmen. Nikkah 2011 [71] zeigte, dass das Futteraufnahmeverhalten ebenfalls erheblich von der Tageszeit beeinflusst ist. Bei der Abendfütterung nahmen die Tiere im Vergleich zur Morgenfütterung signifikant mehr Futter mit höherer Intensität auf. Eine Untersuchung der Daten in kürzeren Intervallen oder eine Untersuchung der Variabilität der Werte über den Tag wäre eine Möglichkeit, die Genauigkeit des Systems zu erhöhen.

6.2.1.3 Verwendung von Verlaufsdaten

Um die Auswirkungen des Verlaufs der Lahmheit auf die verwendeten Parameter erfassen zu können, wurden neben dem Vortag d_{-1} , auch Tage der aktuellen Woche d_{-2} bis $d_{-3/5}$ und der Vorwoche d_{-8} bis d_{-15} in die Auswertung einbezogen.

6.2.1.3.1 Aktuelle Woche (Extremwerte d_{-1} bis $d_{-3/5}$)

Im Vergleich der AUC-Werte berechnet aus Werten des Vortags und dem Minimum bzw. Maximum der aktuellen Woche ist kaum ein Unterschied festzustellen. Nur die Gesamtliegedauer wies im Datensatz der aktuellen Woche eine geringere AUC (0,69) auf als im Datensatz mit den aktuellen Tageswerten (0,73). Die einzelnen Parameter wurden jeweils an den Vortagen d_{-1} bis d_{-7} in einer ROC-Kurven-Analyse untersucht (5.2.2). Dabei stellte sich der AUC-Wert der Liegedauer am Vortag d_{-1} im Vergleich zu denen an den Tagen d_0 und d_{-2} bis d_{-7} als Ausreißer dar. Möglicherweise war zufällig an Tag d_{-1} die Verteilung der Werte der Liegedauer günstiger als an anderen Tagen. Die ansonsten relativ gut übereinstimmenden Ergebnisse sprechen dafür, dass die Extremwerte der letzten Tage im verwendeten Datensatz in der späteren praktischen Anwendung den aktuellen Tageswerten entsprechen würden. So könnte

ein Tier teilweise noch eher als lahm erkannt werden, als hier im Versuch, wenn ein Extremwert schon drei bzw. fünf Tage vor $d_{.1}$ auftrat.

6.2.1.3.2 Verhältnis des aktuellen Werts zu den Werten der Vorwoche

Das Verhältnis des aktuellen Wertes zum Mittelwert der Vorwoche wurde berechnet, um die Entwicklung der Werte eines Parameters über einen bestimmten Zeitraum innerhalb eines Tieres als Grundlage der Modellentwicklung zu verwenden. Es stellte sich jedoch heraus, dass die AUC-Werte der Parameter in dieser die Entwicklung der Werte im Tier betrachtenden Berechnung geringer waren, als beim Vergleich der Werte eines Tieres mit denen der restlichen Herde wie bei der Verwendung der Extremwerte der aktuellen Woche. Interessant ist, dass vor allem die Futteraufnahmeparameter eine deutlich geringere AUC aufwiesen und die Werte der durchschnittlichen Dauer eines Liegeereignisses in Bezug auf den Lahmheitsstatus sogar fast einer Zufallsverteilung gleich kamen. Die Vermutung liegt nahe, dass der Vergleich innerhalb des Tieres weniger starke Ausschläge verursacht als der direkte Vergleich der Werte zwischen den Tieren. Eine Ursache könnte sein, dass die interindividuellen Unterschiede in der Schwankungsbreite der Werte innerhalb eines Tieres insbesondere bei den Futteraufnahmeverhaltensassoziierten Parametern zu groß sind, um einheitliche Grenzwerte festlegen zu können. Das Verhältnis zwischen den Werten bei Zustand „lahm“ und bei Zustand „nicht lahm“ innerhalb eines Tieres wäre demnach je nach Individuum unterschiedlich groß. Ein weiterer Aspekt ist der vorher bereits beschriebene unterschiedliche Krankheitsverlauf. Chronische Lahmheiten oder sich nur langsam entwickelnde Klauenerkrankungen würden bei einem Vergleich der Parameterwerte zur Vorwoche wahrscheinlich keinen Ausschlag geben. Insofern ist diese Methode möglicherweise besser geeignet, akute Veränderungen zu erkennen, nicht aber chronische.

6.2.2 Leistungsparameter

6.2.2.1 Melkparameter

Die Milchleistung zeigte keinen hohen Zusammenhang mit der Lahmheit. Sie blieb im Mittel weitestgehend auf gleichem Niveau und stieg sogar bei Tieren mit mittlerem Lahmheitsgrad im Durchschnitt signifikant an. Einige Forschungsergebnisse [49], [23], [92] werden dadurch bestätigt, anderen hingegen widerspricht diese Aussage [80], [109]. Im Versuch ergab sich kein Zusammenhang zwischen der maximalen Zwischenmelkzeit und dem Lahmheitsstatus obwohl laut Miguel-Pacheco et. al 2014 [66] lahme Tiere seltener zum Melken gehen als nicht lahme.

Die Milchleistung kann als Vorhersageparameter für Lahmheit, zumindest in frühen Stadien, wahrscheinlich nur sehr schwache Performance zeigen, da, wie vorher bereits erwähnt, die leistungsbezogene Priorität der Kuh in der Aufrechterhaltung der Milchproduktion liegt [115]. Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt im Verlauf einer Klauenerkrankung also (zu Beginn oder nach starkem Fortschritt der Erkrankung) die Milchmenge betrachtet wird, kann ein Zusam-

menhang zwischen Rückgang der Milchmenge und Lahmheit beobachtet werden oder nicht. Hinzu kommen die Schwankungen der Milchleistung in Abhängigkeit von Laktationsstadium und Anzahl der Laktationen sowie tierindividuelle Unterschiede, die ebenfalls in die Kalkulation einbezogen werden müssen, um eindeutigere Ergebnisse zu erlangen.

6.2.2.2 Futteraufnahmemenge und Tiergewicht

In der vorliegenden Untersuchung stellte sich kein signifikanter Effekt der Lahmheit auf die Leistungsparameter Futteraufnahmemenge und Tiergewicht heraus. Erst höchstgradige Lahmheit wirkte sich im Mittel auf diese Leistungsparameter aus, allerdings ohne statistische Signifikanz. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich, dass, wie bereits erwähnt, im Versuch keine langanhaltenden schweren Lahmheitsfälle auftraten. Diese Erkenntnis entspricht anderen Forschungsergebnissen [1], [73], [49], [104], [66]. Noch immer ist nicht klar, wo Ursache und Wirkung im Zusammenhang zwischen Verlust von Körpermasse und dem Auftreten von Lahmheiten liegen. Einerseits wird eine Kuh, die Schmerzen bei der Fortbewegung und beim Stehen hat, diese vermeiden. Die Folge sind geringere Steh- und Aktivitätszeiten. Darunter kann die Futteraufnahme leiden, insbesondere da diese in einem gesonderten Funktionsbereich (in Laufställen) und vor allem im Stehen stattfindet. Zudem kann sich ein schlechtes Allgemeinbefinden aufgrund von Schmerzen ebenfalls auf den Appetit auswirken [70]. Andererseits deuten Ergebnisse aus den Arbeiten von Bicalho et al. 2009 [6] und Green et al. 2014 [41], die einen direkten Zusammenhang zwischen dem BCS und der Dicke des Ballenfettpolsters nachwiesen und wiederum eine verminderte Dicke des Ballenfettpolsters mit dem Auftreten von Sohlengeschwüren und WLD in Verbindung brachten, darauf hin, dass ein dünneres Ballenfettpolster aufgrund von geringerer Druckverteilung am Klauenbein zu Sohlengeschwüren und Defekten an der weißen Linie führen kann. Demnach wäre nicht die Lahmheit der Grund für die Gewichtsabnahme sondern eine Gewichtsabnahme der Grund für die Entstehung von Klauenhorndefekten und daraus folgender Lahmheit.

Es ist unbestritten, dass Kühe mit einem LMS des Grads vier Schmerzen erleiden. Insofern widersprechen die vorliegenden Ergebnisse der häufigen Aussage, dass die Schmerzen und Leiden einer Kuh, solange sie noch auf gleichem Niveau frisst und Milch gibt, nicht von erheblichem Ausmaß sein können. Bei beginnender Lahmheit wird die Kuh zunächst auch unter Schmerzen versuchen, ihre Leistung beizubehalten, denn während der Laktation liegt die Priorität der Nährstoffverteilung im Körper auf der Milchproduktion. Die dafür notwendige homöosthetische Verteilung von Nährstoffen zugunsten der Milchdrüse ist genetisch determiniert [115]. Die Tatsache, dass sowohl die Milchleistung als auch die Futteraufnahmemenge im Mittel erst bei Tieren mit höchstgradiger Lahmheit deutlich sank, spricht dafür, dass eine rechtzeitige Intervention im Verlauf einer Klauenerkrankung daraus resultierende wirtschaftliche Folgen verringern kann. Dieser Zusammenhang bestätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen [57], [44].

6.2.2.3 Tag-Nacht-Verhältnisse

Der Vergleich von Tages- und Nachtwerten einzelner Verhaltensparameter hat sich im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung in der von Van Hertem 2013 et al. [109] bereits als geringgradig hinweisend auf Lahmheiten gezeigt. Die Relation zwischen der mit einem Halsband gemessenen Aktivität nachts und tagsüber war bei gesunden Kühen aufgrund höherer Aktivität während des Tages höher als bei lahmen Tieren (Korrelationskoeffizient = 0,38). Das Nachtintervall wurde hier ähnlich gewählt (20:00 Uhr bis 04:00 Uhr) wie im vorliegenden Versuch (22:00 Uhr bis 05:00 Uhr), in dem die Festlegung des Intervalls nach einer Untersuchung im Vorjahr und der dort festgestellten geringen Aktivität der Tiere während dieser Zeit vorgenommen wurde. Es ist möglich, dass die Phase zu kurz gewählt wurde oder sich die Aktivitätsphasen seitdem verändert hatten und die Ergebnisse deshalb negativ beeinflusst wurden.

6.2.3 Futteraufnahmeverhalten

Wie schon erwähnt, wird ein Tier mit Schmerzen im Zehenendorgan die Belastung der Klauen durch das Stehen am Futtertisch so gut es geht vermeiden. Diese Vermutung wird durch die im Versuch festgestellte verringerte Dauer der Futteraufnahme bei Lahmheit bestätigt. Da die Menge des aufgenommenen Futters bei zunehmendem Lahmheitsstatus aber nicht sank bzw. sogar zunahm, ist die logische Schlussfolgerung, dass die Futteraufnahmeintensität steigen musste. Die festgestellte verminderte Futteraufnahmedauer und gesteigerte Futteraufnahmeintensität bei lahmen Kühen im Vergleich zu gesunden bestätigen frühere Untersuchungen [104], [66], [3], [40], [52], [65], [73].

In ähnlichen Versuchen [104], [66], [3], [52], [65] ging die Anzahl der Besuche am Futtertisch mit steigender Lahmheit ebenfalls zurück. Ein Grund hierfür kann die Vermeidung von Rangkämpfen sein, die je nach Tier-Fressplatz-Verhältnis bei jedem neuen Versuch an den Futtertisch zu gelangen, stattfinden. Ebenso kann die grundsätzliche Vermeidung von Wegen von und zum Futtertisch als Ursache zugrunde liegen.

6.2.4 Aktivität

6.2.4.1 Allgemeine Aktivität

Im Versuch stellte sich die allgemeine Aktivität (hier: Aktivitätskennzahl) im Mittelwert-Vergleich als signifikant verringert dar, sobald die Tiere eine geringgradige Lahmheit aufwiesen. In der ROC-Kurven-Analyse zeigte sich dieser Sachverhalt weniger deutlich, möglicherweise aufgrund der binären Trennung, da der Verlauf in der grafischen Darstellung eher graduell erschien. Auch Mazrier et al. 2006 [64] und Thorup et al. 2015 [103] zeigten eine Reduktion der Aktivität im Falle einer Lahmheit.

6.2.4.2 **Liegedauer**

Auch die Steigerung der Liegedauer bei lahmen Tieren kann durch die Vermeidung der durch Klauenerkrankungen verursachten Schmerzen beim Gehen und Stehen erklärt werden, denn im Liegen sind die Klauen entlastet. Eine erhöhte Liegedauer pro Tag im Zusammenhang mit dem Auftreten einer Lahmheit entspricht den Ergebnissen der meisten Untersuchungen zu diesem Sachverhalt [8], [47], [118], [13], [103].

6.2.4.3 **Liegeereignisse**

Die erhöhte durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses bei zunehmender Lahmheit kann ein Hinweis auf Schmerzen beim Aufstehen und Hinlegen sein oder auf den grundsätzlichen Unwillen aufzustehen und somit wieder Belastung auf die Klauen zu bringen. Die Ergebnisse aus der vorliegenden Studie entsprechen der Aussage anderer Veröffentlichungen [122], [47], [118]. Die Untersuchung der Anzahl der Liegeereignisse erbrachte keine eindeutigen Ergebnisse im Zusammenhang mit dem Auftreten einer Lahmheit. Dieser Sachverhalt stimmt mit der Tatsache überein, dass die Aussagen in der Literatur sich diesbezüglich teilweise widersprechen. Calderon und Cook 2011 [13] wiesen mehr Liegephasen pro Tag bei lahmen Tiere nach, Yunta et al. 2012 [122] konnten keinen Zusammenhang zwischen Lahmheit und der Anzahl der Liegephasen feststellen und Westin et al. 2015 [118] zeigten wiederum eine verminderte Anzahl von Liegephasen bei lahmen Kühen.

Es ist zu klären, wie groß der Einfluss fehlerhafter Informationen durch defekte Sensoren auf die doch sehr unterschiedlichen Ergebnisse ist. Auch die im vorliegenden Versuch verwendeten Pedometer wiesen, wie bereits in 6.2.1.1 diskutiert, keine hundertprozentige Erfassungsgenauigkeit auf.

Wie schon in 2.3.2.3 erwähnt, sind das Liegeverhalten und die Aktivität erheblich durch innere und äußere Faktoren beeinflusst. Ein direkter Vergleich der Werte von Kühen unterschiedlicher Laktation und Anzahl der Tage in Milch ist deshalb kritisch zu betrachten. Es kann sinnvoll sein, lahme mit gesunden gleicher Laktationszahl und -status paarweise zu vergleichen. Im Versuch von Yunta et al. 2012 [122] wurde diese Methode angewandt. Sie führte jedoch ebenfalls zu dem Ergebnis, dass es keinen bedeutenden Unterschied in der Anzahl der Abliegeereignisse zwischen lahmen und nicht lahmen Kühen gab.

Zusammenfassend ist zu festzustellen, dass keiner der Parameter einzeln eine ausreichende Genauigkeit bei der Bestimmung des Lahmheitsstatus erzielte. Sogar der Parameter mit der maximalen AUC erreichte nur einen Wert von 0,74. Der Lahmheitsstatus einer Kuh wird, wie bereits mehrfach erläutert, von sehr vielen Faktoren beeinflusst, ebenso die Parameter, die sich in Folge einer Lahmheit verändern. Der Zusammenhang der im Versuch zur Lahmheitserkennung verwendeten Parameter, der beeinflussenden Faktoren und der Lahmheit selbst ist in **Abbildung 23** schematisch dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass aufgrund der

Komplexität der Problematik ein einzelner Parameter nur sehr unwahrscheinlich zu einem ausreichend exakten Ergebnis in der Feststellung einer Lahmheit führen kann. Dies wurde bereits in früheren Untersuchungen bestätigt [23], [49]. Aus diesem Grund wurden mehrere Parameter miteinander kombiniert, um eine Aussage über den Lahmheitsstatus zu erhalten.

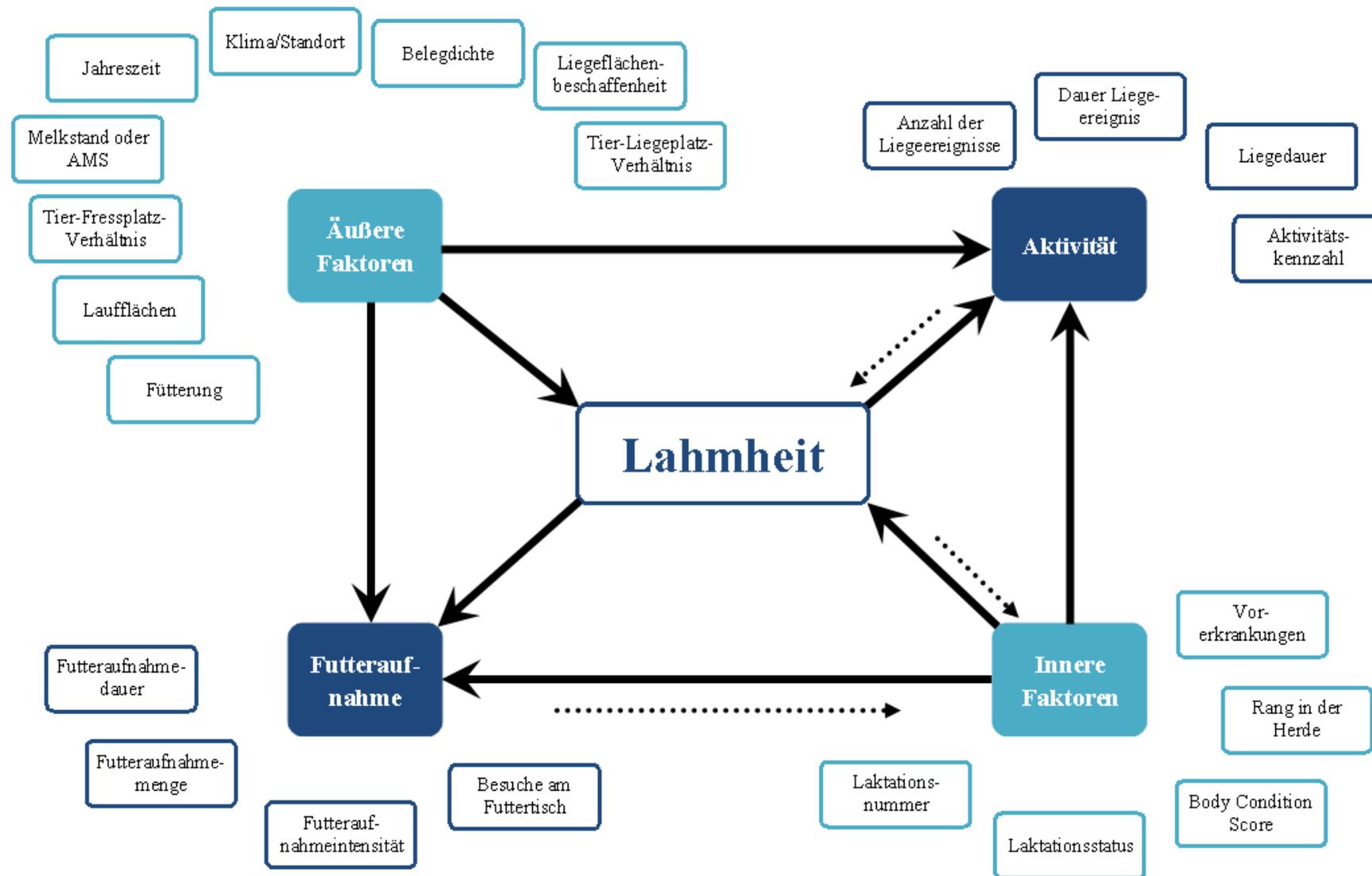


Abbildung 23: Darstellung des Zusammenhangs der im Versuch verwendeten Parameter und den wichtigsten inneren und äußeren Faktoren mit auftretender Lahmheit

6.3 Kombination der Parameter

6.3.1 Auswahl der Parameter

In der Entwicklung der beiden Modelle wurden nicht alle Parameter verwendet. Zum einen wurden Parameter, die laut der Voruntersuchung (Dunnett-t-Test und ROC-Analyse) undeutlich oder gar nicht vom Auftreten einer Lahmheit beeinflusst wurden, von vornherein ausgeschlossen, zum anderen auch diejenigen Parameter nicht verwendet, die einen geringeren Wert für die praktische Anwendung besaßen, wie zum Beispiel die Futteraufnahmeintensität oder die Futteraufnahmemenge pro Besuch. Für eine exakte tierindividuelle Erfassung der aufgenommenen Futtermenge sind Wiegetröge nötig, die jedoch im Praxisbereich aufgrund der hohen Kosten irrelevant sind. Mittels der Pedometer, die im Versuch die Aktivität erfassen, könnte in Zukunft jedoch in Kombination mit einer Induktionsschleife am Futtertisch, der Aufenthalt eines Tiers am Futtertisch registriert werden. Pedometer werden heutzutage bereits genutzt, um die Brunst bei Kühen zu detektieren. Die Nutzung dieser würde also, bis auf die relativ problemlos am Futtertisch zu installierende Induktionsschleife, kein zusätzliches System im Stall mit zusätzlichen Kosten erfordern.

Das Ausschließen der Parameter, die zu anderen, bereits im Modell enthaltenen Parametern, sehr hoch korrelierten, sollte unnötige Redundanz und damit verbundenen größeren Rechenaufwand vermeiden. Auch andere Modelle [23], [49] erzielten mit wenigen Parametern gute Ergebnisse und konnten die Erkennungsgenauigkeit durch das Hinzufügen weiterer Parameter nicht oder nur in sehr geringem Maße steigern.

6.3.2 Verwendete Daten

Im vorliegenden Versuch wurden nur Tage mit unvollständiger Datenerfassung, z. B. aufgrund von Aufhalten im Selektionsbereich, wo die Tiere weder Zugang zu Liegeflächen noch zu Wiegetrögen hatten, eindeutig fehlerhafte Daten oder Tage mit eindeutiger Verhaltensbeeinflussung durch Herdenmaßnahmen wie Bestandsklauenpflege von der Berechnung ausgenommen. Tage mit regelmäßig stattfindenden, nicht vorher bestimmbar verhaltensändernden Ereignissen, wie Brunst, Krankheiten oder die Tage post partum verblieben, im Gegensatz zu einem Großteil ähnlicher Arbeiten [109], [65], [49], [38], zur Modellentwicklung im Datensatz erhalten. Dadurch verringert sich der Unterschied zwischen dem Versuchsaufbau mit retrospektiv erhaltenen Informationen und einer tagesaktuellen, praktischen Anwendung während des laufenden Betriebs.

6.3.3 Vergleich Regression und Multifaktorielle Parameterwichtung

Die binärlogistische Regression ist geeignet für die Auswertung von Fragestellungen mit dichotomem Ausgang wie hier mit „lahm“ oder „nicht lahm“. Aufgrund der iterativen Vorgehensweise bei der Schätzung der optimalen Koeffizienten für die verwendeten Parameter wird diese mit steigender Fallzahl immer genauer [106]. Eine größere Fallzahl könnte die Genau-

igkeit des Systems demnach sicher noch erhöhen. Ein weiterer Nachteil im Fall des vorliegenden Versuchs war die relativ geringe Krankheitsprävalenz in den untersuchten Daten, wodurch die negativen Fälle eine sehr hohe Gewichtung erhielten. Die Spezifität eines Systems bezieht sich auf die negativen Fälle, die Sensitivität auf die positiven. Um das Höchstmaß an korrekten Einstufungen zu erreichen, war die Anzahl der korrekt positiv eingestuftten Fälle also weniger relevant als die der korrekt negativ eingestuftten, was eine Verringerung der Sensitivität und die Steigerung der falsch negativen Zuordnungen zur Folge hatte (s. **Tabelle 23**). Wäre die Krankheitsprävalenz im verwendeten Datensatz höher gewesen, hätte dies sicher zur Steigerung der Genauigkeit der Aussage durch die in der binärlogistischen Regression erhaltene Gleichung beigetragen.

Die Wichtung der einzelnen Parameterwerte nach ihrer Sensitivität in Bezug auf die Aussage über „lahm“ oder „nicht lahm“ über Punktezahlen im Modell E_1 erzielte bessere Ergebnisse als die binärlogistische Regression. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich einerseits in der eben beschriebenen Heterogenität der Daten, andererseits basiert die binärlogistische Regression auf der Grundannahme einer eindeutigen Trennung zwischen den zwei beobachteten Ausprägungen. Wie bereits unter 6.1.3 erläutert, liegt diese Trennung jedoch im Fall der Lahmheit nicht vor. Durch die Wichtung der Parameterwerte nach Stärke der Ausprägung wird besser zwischen eindeutig auf eine vorliegende Lahmheit hinweisenden Werten und nur bei einem Teil der Tiere hinweisenden Werten differenziert. Die Kombination verschiedener Werte erhöht noch weiter den Differenzierungsgrad. Im Modell E_2 konnte bei einem Grenzwert von 155 kein Parameter einzeln bei einem Tier zur Zuordnung zu „lahm“ führen. Dadurch wurde die Auswirkung von starken physiologischen individuellen Schwankungen abgeschwächt und extreme, eindeutige Werte (mit Punktzahl 150) führten trotzdem zu einem Ausschlag, außer, wenn sie im zweiten Laktationsdrittel oder der zweiten Laktation waren und alle anderen Parameterwerte im Bereich der Gruppe 0 (mit Sensitivitäten über 90 %) lagen.

In Modell F wurden die Summen der Vortage in die Bestimmung des Lahmheitsstatus einbezogen. Dies brachte entgegen den Erwartungen eine Erhöhung der Sensitivität. Wahrscheinlich wurden durch die Glättung täglicher Schwankungen auch Tiere mit weniger konstanten Verhaltensänderungen aufgrund krankheitsbedingter Schmerzen detektiert.

Tabelle 23: Kreuztabellen der Modelle

	beobachtet	vorhergesagt		korrekt eingestufte Fälle
		nicht lahm	lahm	
Modell D₁	nicht lahm	664	415	62,4 %
	lahm	3	30	
Modell E₂	nicht lahm	993	86	91,4 %
	lahm	10	23	
Modell F	nicht lahm	768	185	80,6 %
	lahm	4	18	

Je nach Anforderung wird bei der Erkennung von Lahmheiten eine hohe Sensitivität oder Spezifität favorisiert. Beide Werte hängen direkt zusammen. Bei der Veränderung des Grenzwertes innerhalb eines Systems zur Steigerung der Sensitivität, sinkt die Spezifität und umgekehrt. Aus Sicht des Tierschutzes und der Steigerung des Tierwohls ist eine hohe Erkennungsrate der lahmen Tiere und damit die Sensitivität wichtig. Die daraus folgende geringere Spezifität wird aber zu mehr falschpositiven Einstufungen führen, die unnötige Kontrollarbeit seitens des Anwenders bedeutet. Es ist anzunehmen, dass in der Folge seine Compliance und sein Vertrauen in das System abnehmen. Hierzu gibt es jedoch keine verlässlichen Aussagen. Deshalb ist für zukünftige Untersuchungen im Bereich der automatischen Lahmheitsdetektion auch Forschung in Bezug auf diese Fragestellung notwendig. Wird jedoch von der eben beschriebenen Annahme in Bezug auf die Ansprüche des Anwenders ausgegangen, so wäre das Modell E₂ mit der höchsten Spezifität das für die praktische Anwendung am besten geeignete. Hinzu kommt, dass eine geringere Sensitivität wahrscheinlich nur eine spätere Erkennung eines zunächst falsch negativen Tieres bedeutet. Der Grad der Verhaltensänderungen im Vergleich zu gesunden Tieren wurde im vorliegenden Versuch im Mittel mit zunehmendem Lahmheitsgrad bei den im Modell verwendeten Parametern Dauer der Futteraufnahme, Anzahl der Besuche am Trog, Liegedauer und Dauer eines Liegeereignisses im Vergleich zu gesunden Tieren immer größer (s. **Abbildung 35**, **Abbildung 40**, **Abbildung 42** und **Abbildung 44**). Wird ein Tier also zunächst fälschlicherweise als gesund eingestuft, ist es wahrscheinlich, dass es früher oder später im Verlauf der Klauenerkrankung ausreichend starke Verhaltensänderungen zeigt, sodass es letztendlich mit dem entwickelten Modell als lahm eingestuft wird. Jedoch wurden Tiere im vorliegenden Versuch sofort nach aufgetretenem LMS von über drei behandelt und waren deshalb teilweise nur sehr kurzzeitig vom System als lahm zu erkennen.

Des Weiteren muss zwischen den prävalenzunabhängigen Werten, Sensitivität und Spezifität, sowie den prävalenzabhängigen, wie dem positiven Vorhersagewert oder dem Anteil korrekter Einstufungen, differenziert werden. Bei niedriger Prävalenz, wie im vorliegenden Versuch, führt eine hohe Spezifität zu einem höheren Anteil korrekter Einstufungen, so wie bei höherer

Prävalenz eine hohe Sensitivität zu mehr korrekten Einstufungen führen würde. Modell E₂ hatte bei der vorliegenden Prävalenz von 3 % mit 91,4 % einen größeren Anteil korrekter Einstufungen aller untersuchten Tagesdatensätze als Modell F mit 80,6 %. Bei gleichen Zusammenhängen zwischen den Parametern und auftretenden Lahmheiten und einer höheren Prävalenz von z. B. 20 % würde Modell E₂ noch 87,5 % aller Tagesdatensätze richtig einstufen und Modell F 80,8 %. Läge die Prävalenz in den Datensätzen bei 50 % hätte Modell F mit 81,2 % im Vergleich zu Modell E₂ mit 80,9 % sogar einen höheren Anteil korrekter Einstufungen. Ebenso verhält es sich mit dem positiven Vorhersagewert, also dem Anteil richtig positiv bestimmter Fälle an allen als positiv bestimmten Fällen. Bei einer niedrigen Prävalenz, wie hier von 3 % in der untersuchten Population, kann selbst bei extrem hoher Systemgüte mit einer Sensitivität und Spezifität von jeweils 95 % nur ein positiver Vorhersagewert von 37,0 % erreicht werden. Insofern ist es sinnvoll, Sensitivität und Spezifität unter Berücksichtigung der zu untersuchenden Prävalenz zu betrachten.

6.3.4 Einordnung der Ergebnisse

Soweit bekannt, existieren bisher sechs ähnliche Untersuchungen zur Lahmheitsdetektion mittels Analyse der Kombination automatisch erfasster Leistungs- und Aktivitätsparameter. Nähere Angaben zum Versuchsaufbau der hier verglichenen Forschungsprojekte sind in **Tabelle 24** zusammengefasst. Die erreichte Sensitivität und Spezifität der einzelnen Untersuchungen betrug jeweils 89 % und 85 % bei Van Hertem et al. 2013 [109], 72 % und 82 % bei Miekley et al. 2013 [65], 73 % und 76 % bei Kramer et al. 2009 [52], 80 % und 55 % bei Kamphuis et al. 2013 [49], 79 % und 77 % in der ersten Laktation und 79 % und 83 % in der zweiten im Versuch von Garcia et al. 2014 [38], 86 % und 89 % bei De Mol et al. 2013 [23]. Das Ergebnis im vorliegenden Versuch mit einer Sensitivität von 69 % bzw. 82 % bei einer Spezifität von 92 % bzw. 81 % liegt damit im selben Bereich der Bestimmungsgenauigkeit. Keine der genannten Untersuchungen wurde bei der Rasse Fleckvieh durchgeführt, der Großteil der untersuchten Tiere waren reine Milchrassen wie Holstein oder Rotes Dänisches Milchrind. Die Tierzahlen lagen bei den meisten der eben erwähnten Untersuchungen in einem ähnlichen Bereich wie beim vorliegenden Versuch mit 89 Tieren. Nur Miekley et al. 2013 [65] und Kamphuis et al. 2013 [49] hatten wesentlich größere Tierzahlen im Versuch.

Jedoch gibt es Unterschiede in der Methodik zu beachten. Ein großer Unterschied besteht in der Sensitivität der Referenzgröße. Van Hertem et al. 2013 [109], Miekley et al. 2013 [65], Kamphuis et al. 2013 [49] Kramer et al. 2009 [52] verwendeten zur Feststellung des Lahmheitsstatus als Referenz für den entwickelten Algorithmus Daten aus der medizinischen Dokumentation oder den Hinweis durch Stallpersonal bzw. den Landwirt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass nur hochgradige Lahmheiten entdeckt wurden. Nur Garcia et al. 2014 [38] und De Mol et al. 2013 [23] verwendeten, wie im vorliegenden Versuch, ein regelmäßiges Locomotionscoring, um festzustellen, in welchem Status sich die Tiere befinden. Die Trennung zwischen „lahm“ und „nicht lahm“ erfolgte bei Garcia et al. 2014 [38] zwischen zwei

und drei von vier Graden, demnach wurden auch eher hochgradig lahme Tiere als „lahm“ definiert. Nur De Mol et al. 2013 [23] trennten lahme und nicht lahme Tiere zwischen zwei und drei von fünf Graden und definierten somit bereits mittelgradig lahme Tiere als positive Fälle.

Lediglich Kramer et al. 2009 [52] untersuchten die gleiche Grundmenge der Daten wie im vorliegenden Versuch. Wie bereits unter 6.3.2 erläutert, wurden in den Versuchen von Van Hertem et al. 2013 [109], Miekley et al. 2013 [65], Kamphuis et al. 2013 [49] und Garcia et al. 2014 [38] Daten von Tieren in der Brunst, kurz nach der Geburt oder während einer anderen Erkrankung nicht in die Auswertung einbezogen. De Mol et al. 2013 [23] und Garcia et al. 2014 [38] schlossen sogar Daten von Tieren mit mittlerem Locomotionscore aus, um eine deutlichere Trennung zwischen den Gruppen lahm und nicht lahm zu erhalten. Diese Vorgehensweise ist kritisch zu hinterfragen, weil dadurch gerade die schwieriger einzustufenden Grenzfälle aus der Berechnung entfernt wurden und das Ergebnis eine falsch hohe Genauigkeit aufweisen kann.

Die erfassten Parameter wurden wie im vorliegenden Versuch in allen Untersuchungen außer in der von Garcia et al. 2014 [38] als Tageswerte erfasst. Sie lassen sich grob in mit folgenden Merkmalen assoziierte Gruppen einteilen: Tiergewicht, Milchleistung, Futteraufnahme, allgemeine Aktivität und Liegeverhalten. Im vorliegenden Versuch wurden in jeder dieser fünf Gruppen Messwerte erhoben. Für die Bestimmung des Lahmheitsstatus waren letztlich aber nur Futteraufnahme- und Liegeverhaltens-assoziierte Parameter relevant. Nur im Projekt von De Mol et al. 2013 [23] wurde das Liegeverhalten als Aktivitätsparameter ebenfalls erfasst, in allen anderen Versuchen lediglich die allgemeine Aktivität. Das Tiergewicht war abgesehen vom vorliegenden Versuch nur im Projekt von Kamphuis et al. 2013 [49] Teil der Untersuchung, brachte hier aber weder als einzelner Bestimmungsparameter, noch in Kombination mit der hier verwendeten Melkreihenfolge und einer Aktivitätskennzahl für die Anwendung ausreichend genaue Ergebnisse. Diese Ergebnisse stimmen mit dem des vorliegenden Versuchs überein. Die Milchleistung war Teil aller Versuche außer der sehr ähnlichen Arbeiten von Kramer et al. 2009 [52] und Miekley et al. 2013 [65], die lediglich die Raufutteraufnahme und allgemeine Aktivität in ihre Berechnungen einbezogen. Die Raufutteraufnahme war Teil keines der anderen Modelle, bis auf die Einbeziehung des übrig gelassenen Kraftfutters bei De Mol et al. 2013 [23], obwohl sie nach vorliegenden Ergebnissen einen starken Zusammenhang zum Lahmheitsgrad aufzuweisen scheint. Im Gegensatz dazu brachte die Milchleistung keinen relevanten Beitrag zur Steigerung der Bestimmungsgenauigkeit und es ist fraglich, wie hoch der Einfluss auf das Ergebnis im Falle der anderen Untersuchungen war. Kamphuis et al. 2013 [49] z. B. stellten keinen Effekt von Lahmheit auf die Milchleistung fest und schlossen diesen Parameter in der Folge aus den weiteren Berechnung aus.

Tabelle 24: Forschungsprojekte zur Lahmheitsdetektion mittels Analyse der Kombination automatisch erfasster Leistungs- und Aktivitätsparameter

Versuch	Van Hertem [109]	Miekley [65]	Kramer [52]	Kamphuis [49]	Garcia [38]	De Mol [23]	Eigener Ver- such
Parameter							
Anzahl	7	4	4	3	17/28	9	4
Tageswerte	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja
Art	<ul style="list-style-type: none"> • Tagesmilchmenge (d₄) • Steigung der Verlaufskurve der Tagesmilchmenge (d₄) • Nacht-Tag-Relation der Aktivität (d₆) • Relation der Wochenmilchleistung zur Vorwoche (d₄) • Tagesaktivität (d₇) • Nacht-Wiederkau-dauer (d₆) 	<ul style="list-style-type: none"> • allgemeine Aktivität • Futteraufnahme • Dauer der Futteraufnahme • Anzahl der Besuche am Trog 	<ul style="list-style-type: none"> • TM-Aufnahmemenge • Dauer der Futteraufnahme • Anzahl der Besuche am Trog • Allgemeine Aktivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Milchmenge in den ersten zwei min • Milchmenge in den ersten zwei min geteilt durch Milchmenge der Melkung • Tagesmilchmenge • Melkdauer • Melkreihenfolge • Tiergewicht • Allgemeine Aktivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Median des Aktivitätsindex³ • Varianz des Aktivitätsindex⁴ • Performance Index⁴ • Median des Aktivitätsindex⁵ • Varianz des Aktivitätsindex⁶ • Varianz des durchschnittlichen Milchfluss⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> • Tagesmilchmenge • Menge Kraftfutterreste • Liegedauer • Anzahl der Liegeereignisse • Max. Dauer eines Liegeereignisses • Dauer eines Liegeereignisses (ø) • Max. Dauer eines Stehereignisses • Dauer eines Stehereignisses (ø) • Schrittzahl 	<ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Futteraufnahme • Anzahl der Trogbesuche • Liegedauer • Dauer eines Liegeereignisses (ø)

Tabelle 24: Forschungsprojekte zur Lahmheitsdetektion (Fortsetzung)

Versuch	Van Hertem [109]	Miekley [65]	Kramer [52]	Kamphuis [49]	Garcia [38]	De Mol [23]	Eigener Ver- such
Tiere							
Anzahl	118	315	81	2290	88	ca. 170	89
Milchleistung	11.500 kg/Jahr	36,3 kg/Tag	39,6 kg/Tag	nicht angegeben	11 kg/Melkung	9530 kg/Jahr	8210 kg/Jahr
Lahmheit							
Referenz	durch Stallperso- nal identifiziert	Behandlungs- dokumentation	Behandlungs- dokumentation	durch Stallper- sonal identifi- ziert	LMS wöchent- lich	LMS monatlich	LMS wöchent- lich
Ausprägung ¹	hochgradig	hochgradig	hochgradig	mittel-bis hoch- gradig	mittel- bis hoch- gradig	mittelgradig	mittel- bis hoch- gradig
Zeitraum ²	7 Tage	7 Tage	3 Tage	14 Tage	14 Tage	14 Tage	3 bis 5 Tage
Haltung	Tiefstreuall	nicht angegeben	nicht angegeben	Weidehaltung	Offenlaufstall	Offenlaufstall	Offenlaufstall
Melken	Melkstand	Karussell	Melkstand	Karussell	AMS	AMS	AMS
Datenfilter	<ul style="list-style-type: none"> • Tiere ab 40 dim • keine Tiere mit anderen Erkrankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernung der Daten mit Aktivitätssteigerung durch Östrus 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Tiere ab 31 dim • Gesund 14 Tage vor und 7 Tage nach der Lahmheit 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Tiere im Östrus • Trennung nach erster und zweiter Laktation 	-	-
Ergebnis							
Sensitivität	89 %	72 %	73 %	80 %	79 % / 79 %	86 %	69 % / 82 %
Spezifität	85 %	82 %	76 %	55 %	77 % / 83 %	89 %	92 % / 81 %

¹ Grad der detektierten Lahmheit; ² in der Modellentwicklung betrachteter Zeitraum vor der beobachteten Lahmheit; ³ um 22:00 Uhr in der Vorwoche; ⁴ jeweils um 6:00 Uhr in der Vorwoche und um 11 Uhr in der aktuellen Woche; ⁵ um 5:00 Uhr in beiden Wochen; ⁶ um 13:00 Uhr in der Vorwoche und 16:00 Uhr in der aktuellen Woche; ⁷ in der Vorwoche

6.4 Ausblick

Eine Validierung des entwickelten Algorithmus durch Aufteilung der Daten in Kalibrierungs- und Validierungsdaten war in der vorliegenden Untersuchung aufgrund der geringen Anzahl positiver Fälle nicht möglich, deshalb sollte er an einer größeren Anzahl von Tieren überprüft werden. Eine absolut ideale Erkennungsgenauigkeit war nicht das Ziel der Untersuchung, um eine Überanpassung auf die vorliegenden Daten zu vermeiden. Durch die Einbeziehung von mehr Individuen kann somit eventuell die Genauigkeit des Systems noch gesteigert werden. Aufgrund des hohen Einflusses der Haltungsumgebung [118], [47], [48] sollte das System ebenfalls noch in anderen üblichen Haltungssystemen und an unterschiedlichen Herden angewendet und getestet werden. Eine Möglichkeit, den Herden- bzw. Stallfaktor dann als Effekt in die Analyse einzubeziehen, wäre eine Bestimmung der vergebenen Punktzahlen in Relation zu den jeweiligen Herdenmittelwerten.

6.5 Schlussfolgerung

Bisher gab es noch keine ähnliche Untersuchung zum Thema automatische Lahmheitserkennung bei der Rasse Fleckvieh. Zudem ist die hier verwendete Kombination von Liege- und Raufutteraufnahmeverhaltens-assoziierten Parametern ebenfalls in keiner Veröffentlichung zu Lahmheitsdetektion verwendet worden. Die Ergebnisse des vorliegenden Versuchs deuten jedoch darauf hin, dass es möglich ist, bei in Laufställen mit automatischem Melksystem gehaltenen Milchkühen der Rasse Fleckvieh Lahmheiten mittels automatisch erfasster Daten über das Futteraufnahme- und Liegeverhalten zu detektieren.

7 Zusammenfassung

In einem Offenlaufstall mit ca. 65 melkenden Fleckviehkühen wurden während der Zeit von März 2014 bis Mai 2015 neben den gängigen Tierdaten aus dem Herdenmanagementsystem verschiedene Aktivitäts- und Leistungsparameter tierindividuell erfasst. Ein automatisches Melksystem mit integrierter Waage lieferte bei jedem Durchgang Daten über Milchleistung und Körpergewicht jedes einzelnen Tieres. Mithilfe von Wiegetrögen wurden Menge, Dauer und Frequenz der Futteraufnahme jedes Tieres ermittelt. Aktivitätsdaten wie Allgemeine Aktivität, die Liegedauer und die Dauer der Liegeereignisse sowie deren Häufigkeit wurden durch Pedometer registriert. Parallel zur automatischen Datenerfassung wurde zunächst alle zwei Wochen, dann wöchentlich ein Locomotionscore (LMS) der ganzen Herde erhoben und alle auftretenden Klauenerkrankungen behandelt und genau dokumentiert. In den erfassten Daten wurde der Zusammenhang zwischen Lahmheitsstatus und Aktivitäts- und Leistungsparametern untersucht. Gefundene Assoziationen sollten in einen Algorithmus integriert werden, der anhand der Parameter, berechnet als Tageswerte, den Lahmheitsstatus einer Kuh bestimmen kann.

Keiner der untersuchten Parameter erzielte in alleiniger Verwendung eine ausreichend große Genauigkeit bei der Aussage über „lahm“ oder „nicht lahm“. Leistungsparameter wie Milchleistung, Tiergewicht oder Futteraufnahmemenge zeigten nur sehr geringen oder gar keinen Zusammenhang mit dem Lahmheitsgrad. Die besten Ergebnisse erzielten die Dauer der Futteraufnahme, die Futteraufnahmeintensität, die durchschnittliche Futteraufnahmemenge pro Besuch am Wiegetrog, die Anzahl der Besuche am Wiegetrog, die Liegedauer und die durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses. Die besten und praxisrelevanten Parameter Liegedauer, durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses, Anzahl der Besuche am Trog und die Dauer der Futteraufnahme wurden zusammen mit den Einflussfaktoren Laktationszahl und Laktationsstatus in zwei verschiedene Modelle integriert. Das erste Modell bestand aus einer binärlogistischen Regression im zweiten Modell wurden Grenzwerte mit unterschiedlicher Sensitivität bei allen vier der verwendeten Parameter mittels ROC-Kurven-Analyse festgelegt und die Werte danach eingeordnet. Es erfolgte eine Wichtung der Parameterwerte nach Stärke der Ausprägung, um zwischen eindeutig und nur bedingt auf eine vorliegende Lahmheit hinweisenden Parameterwerten zu differenzieren.

Die binärlogistische Regression erzielte eine Sensitivität von 94 % und eine Spezifität 62 %. Das Modell der Parameterwichtung erreichte eine Sensitivität von 70 % bei einer Spezifität von 92 %. Die Ergebnisse ordnen sich zwischen denen ähnlicher Versuche ein, sind jedoch aufgrund der Anwendung unterschiedlicher Referenzsysteme und Bewertungsmethoden für die Lahmheit schwer direkt zu vergleichen.

Im Versuch konnten mithilfe der Verhaltensparameter Liegedauer, durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses, Anzahl der Besuche am Trog und Dauer der Futteraufnahme Lahmheiten detektiert werden. Die mit der Futteraufnahme assoziierten Parameter wurden im Versuchsbetrieb mit kostenintensiven und daher nicht praxisrelevanten Wiegetrögen erfasst. Moderne Pedometer können diese Parameter jedoch durch Tiererkennung über eine am Futtertisch installierte Induktionsschleife ebenfalls erfassen. Die Analyse automatisch erfasster Futteraufnahme- und Liegeverhaltensdaten stellt demnach eine praktikable und relativ einfach und kostengünstig in einen bestehenden Betrieb zu integrierende Möglichkeit zur Lahmheitsdetektion dar. Das hier entwickelte Modell ist jedoch an einer größeren Zahl von Tieren und in unterschiedlichen Haltungssystemen zu validieren.

8 Summary

Automatic Lameness Detection in Dairy Cows through Analysis of Performance and Activity Data

In a herd of 65 lactating Simmental cattle housed in a free stall barn several activity and performance parameters, as well as herd management data, were recorded from March 2014 to May 2015. Milk yield and live weight of every individual were measured by an automated milking system with integrated scales. Electronic feeding bins automatically recorded feed intake, feeding duration and number of every feeding event of every cow. Activity data like lying duration, overall activity, duration and number of lying bouts were measured with pedometers. Concurrently, a Locomotionscoring was made of the whole herd, first fortnightly then every week. All occurring hoof diseases were treated and accurately documented. The collected data were analyzed in order to find a link between lameness status and activity and performance parameters. These associations were to be integrated in an algorithm that can calculate the lameness status of a cow using those parameters' daily values.

None of the analyzed parameters could predict the status of “lame” or “not lame” sufficiently accurately. Performance parameters like milk yield, live weight or feed intake only presented with a very low or completely missing connection to the degree of lameness. Best results were achieved by feeding duration, feeding rate, feed intake per visit to the feeding bin, number of visits to the feeding bin, lying time and duration of lying bout. The best and more application-oriented parameters were lying time, average duration of lying bout, number of visits to the feeding bins and feeding duration. These apart from number of lactation and stage of lactation were fitted into two different models. The first model consisted of a logistic regression. In the second model thresholds for every of the four applied parameters at different sensitivities were determined with an ROC-Analysis to classify the parameter values. After the classification according to the thresholds the parameter values were weighted for degree of distinctness to differentiate between distinct and conditional indication of lameness through the parameter values.

The binary logistic regression model achieved a sensitivity of 94 % and a specificity of 62 %. The model using weighting of the parameter values reached a sensitivity of 70 % with a specificity of 92 %. The results fall between the results of those of similar experiments although they are difficult to compare with each other because of the different approaches in used reference methods and assessment of lameness.

In the trial lameness could be detected using the parameters lying time, average duration of lying bout, number of visits to the feeding bins and feeding duration. The feeding behavior associated parameters used in the final model were recorded by cost-intensive thus not application-oriented electronic feeding bins. Modern pedometers can record these parameters

Summary

through animal identification at the feeding alley by using an inductive loop. Hence, analysis of automatically detected feeding and lying behavior data is practical and relatively easy and economical to install in an already existing farm to detect lameness. The developed model should be validated in a more significant number of animals and different types of housing.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Alawneh, J. I.; Stevenson, M. A.; Williamson, N. B.; Lopez-Villalobos, N.; Otley, T. (2014): The effects of liveweight loss and milk production on the risk of lameness in a seasonally calving, pasture fed dairy herd in New Zealand. In: Preventive Veterinary Medicine 113 Nr. 1, S. 72-79
- [2] Alsaad, M.; Buscher, W. (2012): Detection of hoof lesions using digital infrared thermography in dairy cows. In: Journal of Dairy Science 95 Nr. 2, S. 735-742
- [3] Bach, A.; Dinarés, M.; Devant, M.; Carré, X. (2007): Associations between lameness and production, feeding and milking attendance of Holstein cows milked with an automatic milking system. In: Journal of Dairy Research 74 Nr. 01, S. 40-46
- [4] Barker, Z. E.; Leach, K. A.; Whay, H. R.; Bell, N. J.; Main, D. C. J. (2010): Assessment of lameness prevalence and associated risk factors in dairy herds in England and Wales. In: Journal of Dairy Science 93 Nr. 3, S. 932-941
- [5] Baumgartner, W. (2014): Klinische Propädeutik der Haus- und Heimtiere. 8. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag
- [6] Bicalho, R. C.; Machado, V. S.; Caixeta, L. S. (2009): Lameness in dairy cattle: A debilitating disease or a disease of debilitated cattle? A cross-sectional study of lameness prevalence and thickness of the digital cushion. In: Journal of Dairy Science 92 Nr. 7, S. 3175-3184
- [7] Bikker, J. P.; van Laar, H.; Rump, P.; Doorenbos, J.; van Meurs, K.; Griffioen, G. M.; Dijkstra, J. (2014): Technical note: Evaluation of an ear-attached movement sensor to record cow feeding behavior and activity. In: Journal of Dairy Science 97 Nr. 5, S. 2974 - 2979
- [8] Blackie, N.; Amory, J.; Bleach, E.; Scaife, J. (2011): The effect of lameness on lying behaviour of zero grazed Holstein dairy cattle. In: Applied Animal Behaviour Science 134 Nr. 3 - 4, S. 85 - 91
- [9] Blackie, N.; Bleach, E. C. L.; Amory, J. R.; Scaife, J. R. (2013): Associations between locomotion score and kinematic measures in dairy cows with varying hoof lesion types. In: Journal of Dairy Science 96 Nr. 6, S. 3564-3572
- [10] Borchers, M. R. (2015): An Evaluation of Precision Dairy Farming Technologies Monitoring Rumination, Feeding, and Lying Behaviors. Masterarbeit, University of Kentucky
- [11] Brenninkmeyer, C.; Dippel, S.; March, S.; Brinkmann, J.; Winckler, C.; Knierim, U. (2007): Reliability of a subjective lameness scoring system for dairy cows. In: Animal Welfare 16 Nr. 2, S. 127-129
- [12] Budras, K.; Buda, S. (2006): Atlas der Anatomie des Rindes: Supplement Klinisch-funktionelle Anatomie. 1. Aufl. Hannover: Schlütersche
- [13] Calderon, D. F.; Cook, N. B. (2011): The effect of lameness on the resting behavior and metabolic status of dairy cattle during the transition period in a freestall-housed dairy herd. In: Journal of Dairy Science 94 Nr. 6, S. 2883-2894
- [14] Channon, A. J.; Walker, A. M.; Pfau, T.; Sheldon, I. M.; Wilson, A. M. (2009): Variability of Manson and Leaver locomotion scores assigned to dairy cows by different observers. In: The Veterinary Record 164 Nr. 13, S. 388-392
- [15] Chapinal, N.; Tucker, C. B. (2012): Validation of an automated method to count steps while cows stand on a weighing platform and its application as a measure to detect lameness. In: Journal of Dairy Science 95 Nr. 11, S. 6523-6528

- [16] Chapinal, N.; de Passille, A. M.; Pastell, M.; Hanninen, L.; Munksgaard, L.; Rushen, J. (2011): Measurement of acceleration while walking as an automated method for gait assessment in dairy cattle. In: *Journal of Dairy Science* 94 Nr. 6, S. 2895-2901
- [17] Chapinal, N.; de Passille, A. M.; Rushen, J.; Wagner, S. (2010): Automated methods for detecting lameness and measuring analgesia in dairy cattle. In: *Journal of Dairy Science* 93 Nr. 5, S. 2007-2013
- [18] Cohen, J. (1960): A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. In: *Educational and Psychological Measurement* 20 Nr. 1, S. 37-46
- [19] Cook, N. B.; Bennett, T. B.; Nordlund, K. V. (2004): Effect of free stall surface on daily activity patterns in dairy cows with relevance to lameness prevalence. In: *Journal of Dairy Science* 87 Nr. 9, S. 2912-2922
- [20] Cook, N. B.; Marin, M. J.; Mentink, R. L.; Bennett, T. B.; Schaefer, M. J. (2008): Comfort zone-design free stalls: do they influence the stall use behavior of lame cows? In: *Journal of Dairy Science* 91 Nr. 12, S. 4673-4678
- [21] Cramér, H. (1946): *Mathematical Methods of Statistics*. In: Princeton University Press S. 282
- [22] DLG-Ausschuss "Klauengesundheit und Klauenhygiene" (2006): *Diagnoseschlüssel Klauenerkrankungen*
- [23] De Mol, R. M.; Andre, G.; Bleumer, E. J. B.; der, v.; Werf, J. T. N.; de Haas, Y.; van Reenen, C. G. (2013): Applicability of day-to-day variation in behavior for the automated detection of lameness in dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 6, S. 3703-3712
- [24] Dippel, S.; Dolezal, M.; Brenninkmeyer, C.; Brinkmann, J.; March, S.; Knierim, U.; Winckler, C. (2009): Risk factors for lameness in freestall-housed dairy cows across two breeds, farming systems, and countries. In: *Journal of Dairy Science* 92 Nr. 11, S. 5476-5486
- [25] Distl, O. (1999): Zucht auf ein gesundes Fundament beim Milchrind. In: *Züchtungskunde* 71 S. 446 - 458
- [26] Dunthorn, J.; Dyer, R. M.; Neerchal, N. K.; McHenry, J. S.; Rajkondawar, P. G.; Steingraber, G.; Tasch, U. (2015): Predictive models of lameness in dairy cows achieve high sensitivity and specificity with force measurements in three dimensions. In: *The Journal of Dairy Research* 82 Nr. 4, S. 391-399
- [27] Döpfer D, W. M. (1998): Standardisation of infectious claw diseases (workshop report). In: C. J. Lischer; P. Ossent (Hrsg.) *Proceedings of the 10th International Symposium on Lameness in Ruminants*, Zürich, Schweiz: University of Zurich S. 244-256
- [28] Eilers, T. G. (2008): *Langzeitbeobachtungen zur Klauengesundheit in vier Milchviehbetrieben im nordwestlichen Niedersachsen unter Berücksichtigung ausgewählter Risikoindikatoren auf Einzeltier- und Herdenebene*. Dissertation, FU Berlin
- [29] Espejo, L. A.; Endres, M. I.; Salfer, J. A. (2006): Prevalence of lameness in high-producing holstein cows housed in freestall barns in Minnesota. In: *Journal of Dairy Science* 89 Nr. 8, S. 3052-3058
- [30] Fiedler, A.; Maierl, J.; Nuss, K. (2004): *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes*. 1. Aufl. Stuttgart: Schattauer Verlag
- [31] Fiedler, A.; Maierl, J.; Nüske, S. (2000): *Funktionelle Klauenpflege beim Rind*. 1. Aufl. München: BLV Verlagsgesellschaft mbH
- [32] Flower, F. C.; Sanderson, D. J.; Weary, D. M. (2006): Effects of milking on dairy cow

gait. In: *Journal of Dairy Science* 89 Nr. 6, S. 2084-2089

[33] Flower, F. C.; Weary, D. M. (2006): Effect of hoof pathologies on subjective assessments of dairy cow gait. In: *Journal of Dairy Science* 89 Nr. 1, S. 139-146

[34] Flower, F. C.; Weary, D. M. (2009): Gait assessment in dairy cattle. In: *Animal : an international journal of animal bioscience* 3 Nr. 1, S. 87-95

[35] Franze, U.; Geidel, S.; Heyde, U.; Schroth, A.; Wirthgen, T.; Zipser, S. (2011): Automatische Gesundheitsüberwachung bei Milchkühen mittels Infrarot-Thermographie. In: A. Häußermann (Hrsg.) 10. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) S. 379-386

[36] Fröhlich, G.; Böck, S.; Rödel, G.; Wendling, F.; Wendl, G. (2005): Automatische Fütterungsanlagen für Versuchs- und Prüfbetriebe. In: *Landtechnik* Nr. 60, S. 102-103

[37] Fröhner, A. (2011): Lokomotion, Ruheverhalten und Gesundheitsstatus von Kälbern in den Haltungssystemen Rein-Raus und kontinuierliche Belegung bei Eimer- und Automaten-tränke im neuen Außenklimastall. In: Dissertation, Technische Universität München

[38] Garcia, E.; Klaas, I.; Amigo, J. M.; Bro, R.; Enevoldsen, C. (2014): Lameness detection challenges in automated milking systems addressed with partial least squares discriminant analysis. In: *Journal of Dairy Science* 97 Nr. 12, S. 7476-7486

[39] Geischeder, S.; Haidn, B.; Peis, R.; Harms, J.; Misha, E. (2015): Erprobung des Pedometersystems "Track a Cow" der Firma ENGS zur Bestimmung der Liegezeiten bei Milchkühen. In: U. Bauer, A. Gräff, G. Wendl (Hrsg.) 12. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V (KTBL) S. 194-199

[40] Gonzalez, L. A.; Tolkamp, B. J.; Coffey, M. P.; Ferret, A.; Kyriazakis, I. (2008): Changes in feeding behavior as possible indicators for the automatic monitoring of health disorders in dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 91 Nr. 3, S. 1017-1028

[41] Green, L. E.; Huxley, J. N.; Banks, C.; Green, M. J. (2014): Temporal associations between low body condition, lameness and milk yield in a UK dairy herd. In: *Preventive Veterinary Medicine* 113 Nr. 1, S. 63-71

[42] Green, L. (2009): Lameness in dairy cows; Piecing together the evidence base and looking forward. In: University of Bristol, The Dairy Group and University of Nottingham (Hrsg.) Cattle Lameness Conference, S. 1-7

[43] Greenough, P. R.; Weaver, A. D. (1997): Lameness in Cattle. 3. Aufl. Philadelphia: W.B. Saunders

[44] Hernandez, J.; Garbarino, E.; Shearer, J.; Risco, C.; Thatcher, W. (2005): Comparison of milk yield in dairy cows with different degrees of lameness. In: *Journal of the American Veterinary Medical Association* 227 S. 1292-1296

[45] Higginson Cutler, J.; Cramer, G.; Walter, J. J.; Millman, S. T.; Kelton, D. F. (2013): Randomized clinical trial of tetracycline hydrochloride bandage and paste treatments for resolution of lesions and pain associated with digital dermatitis in dairy cattle. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 12, S. 7550-7557

[46] Hoffman, A. C.; Moore, D. A.; Wenz, J. R.; Vanegas, J. (2013): Comparison of modeled sampling strategies for estimation of dairy herd lameness prevalence and cow-level variables associated with lameness. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 9, S. 5746-5755

- [47] Ito, K.; von Keyserlingk, M. A. G.; Leblanc, S. J.; Weary, D. M. (2010): Lying behavior as an indicator of lameness in dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 93 Nr. 8, S. 3553-3560
- [48] Jacobs, J. A.; Siegford, J. M. (2012): Invited review: The impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. In: *Journal of Dairy Science* 95 Nr. 5, S. 2227-2247
- [49] Kamphuis, C.; Frank, E.; Burke, J. K.; Verkerk, G. A.; Jago, J. G. (2013): Applying additive logistic regression to data derived from sensors monitoring behavioral and physiological characteristics of dairy cows to detect lameness. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 11, S. 7043-7053
- [50] Knappe-Poindecker, M.; Gilhuus, M.; Jensen, T. K.; Klitgaard, K.; Larssen, R. B.; Fjeldaas, T. (2013): Interdigital dermatitis, heel horn erosion, and digital dermatitis in 14 Norwegian dairy herds. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 12, S. 7617-7629
- [51] Knott, L.; Tarlton, J. F.; Craft, H.; Webster, A. J. F. (2007): Effects of housing, parturition and diet change on the biochemistry and biomechanics of the support structures of the hoof of dairy heifers. In: *The Veterinary Journal* 174 Nr. 2, S. 277 - 287
- [52] Kramer, E.; Caverio, D.; Stamer, E.; Krieter, J. (2009): Mastitis and lameness detection in dairy cows by application of fuzzy logic. In: *Livestock Science* 125 Nr. 1, S. 92 - 96
- [53] König, H. E.; Liebich, H. (2012): *Anatomie der Haussäugetiere: Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis*. 5. Aufl. Stuttgart: Schattauer Verlag
- [54] Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e. V. (2015): *Leistungs- und Qualitätsprüfung in der Rinderzucht in Bayern 2014, Ergebnisse und Auswertungen*
- [55] Landis, J. R.; Koch, G. G. (1977): The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. In: *Biometrics* 33 Nr. 1, S. 159
- [56] Laven, R. A.; Lawrence, K. E.; Weston, J. F.; Dowson, K. R.; Stafford, K. J. (2008): Assessment of the duration of the pain response associated with lameness in dairy cows, and the influence of treatment. In: *New Zealand Veterinary Journal* 56 Nr. 5, S. 210-217
- [57] Leach, K. A.; Tisdall, D. A.; Bell, N. J.; Main, D. C. J.; Green, L. E. (2012): The effects of early treatment for hindlimb lameness in dairy cows on four commercial UK farms. In: *The Veterinary Journal* 193 Nr. 3, S. 626-632
- [58] Liu, J.; Dyer, R. M.; Neerchal, N. K.; Tasch, U.; Rajkondawar, P. G. (2011): Diversity in the magnitude of hind limb unloading occurs with similar forms of lameness in dairy cows. In: *Journal of Dairy Research* 78 Nr. 02, S. 168
- [59] Logue, D. N.; Offer, J. E.; Kempson, S. A. (1993): Lameness in Dairy Cattle. In: *Irish Veterinary Journal* Nr. 46, S. 47-58
- [60] Logue, D. N.; Offer, J. E.; McGovern, R. D. (2004): The bovine digital cushion - how crucial is it to contusions on the bearing surface of the claw of the cow? In: *The Veterinary Journal* 167 Nr. 3, S. 220-221
- [61] Maertens, W.; Vangeyte, J.; Baert, J.; Jantuan, A.; Mertens, K. C.; De Campeneere, S.; Pluk, A.; Opsomer, G.; Van Weyenberg, S.; Van Nuffel, A. (2011): Development of a real time cow gait tracking and analysing tool to assess lameness using a pressure sensitive walkway: The GAITWISE system. In: *Biosystems Engineering* 110 Nr. 1, S. 29 - 39
- [62] Manson, F. J.; Leaver, J. D. (1988): The influence of concentrate amount on locomotion and clinical lameness in dairy cattle. In: *Animal Science* 47 Nr. 02, S. 185-190

- [63] March, S.; Brinkmann, J.; Winkler, C. (2007): Effect of training on the inter-observer reliability of lameness scoring in dairy cattle. In: *Animal Welfare* 16 Nr. 2, S. 131-133
- [64] Mazrier, H.; Tal, S.; Aizinbud, E.; Bargai, U. (2006): A field investigation of the use of the pedometer for the early detection of lameness in cattle. In: *The Canadian Veterinary Journal* 47 Nr. 9, S. 883 - 886
- [65] Miekley, B.; Stamer, E.; Traulsen, I.; Krieter, J. (2013): Implementation of multivariate cumulative sum control charts in mastitis and lameness monitoring. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 9, S. 5723 - 5733
- [66] Miguel-Pacheco, G. G.; Kaler, J.; Remnant, J.; Cheyne, L.; Abbott, C.; French, A. P.; Pridmore, T. P.; Huxley, J. N. (2014): Behavioural changes in dairy cows with lameness in an automatic milking system. In: *Applied Animal Behaviour Science* 150 S. 1 - 8
- [67] Mülleder, C.; Waiblinger, S.; Troxler, J. (2004): Analyse der Einflussfaktoren auf Tiergerechtigkeit, Tiergesundheit & Leistung von Milchkühen im Boxenlaufstall. In: *Ländlicher Raum* 6 S. 30-33
- [68] Nandi, S. K.; Roy, S.; Mukherjee, P.; Goswami, A.; Mazumdar, D. (2009): Evaluation of lameness in dairy cows and observations on associated pain perception and production potential. In: *Livestock Research for Rural Development* 21 Nr. 7, S. 104
- [69] Neveux, S.; Weary, D. M.; Rushen, J.; von Keyserlingk, M. A. G.; de Passille, A. M. (2006): Hoof discomfort changes how dairy cattle distribute their body weight. In: *Journal of Dairy Science* 89 Nr. 7, S. 2503-2509
- [70] Newby, N. C.; Pearl, D. L.; Leblanc, S. J.; Leslie, K. E.; von Keyserlingk, M. A. G.; Duffield, T. F. (2013): Effects of meloxicam on milk production, behavior, and feed intake in dairy cows following assisted calving. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 6, S. 3682-3688
- [71] Nikkhah, A. (2011): Bioscience of ruminant intake evolution: feeding time models. In: *Advances in Bioscience and Biotechnology* 2 Nr. 4, S. 1-4
- [72] Nocek, J. E. (1997): Bovine acidosis: implications on laminitis. In: *Journal of Dairy Science* 80 Nr. 5, S. 1005-1028
- [73] Norring, M.; Haggman, J.; Simojoki, H.; Tamminen, P.; Winckler, C.; Pastell, M. (2014): Short communication: Lameness impairs feeding behavior of dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 97 Nr. 7, S. 4317-4321
- [74] Ossent, P.; Lischer, C. J. (1998): Bovine Laminitis: the lesions and their pathogenesis. In: *In Practice* Nr. 20, S. 415-427
- [75] Ossent, P.; Lischer, C. J. (1996): Theories on the pathogenesis of bovine laminitis. In: M. Rachel (Hrsg.) *Proceedings of the 9th International Symposium on Disorders of the Ruminant Digit and The International Conference on Lameness in Cattle*, Jerusalem, Israel: Conference Secretariat, Ortra Limited S. 15
- [76] Ozswari, L.; Barna, R.; Visnyei, L. (2007): Economic Losses Due to Bovine Foot Diseases in Large-Scale Holstein-Friesian Dairy Herds. In: *Magyar Allatorvosok Lapja* 129 Nr. 1, S. 23 - 28
- [77] Pastell, M. E.; Kujala, M. (2007): A probabilistic neural network model for lameness detection. In: *Journal of Dairy Science* 90 Nr. 5, S. 2283-2292
- [78] Pastell, M.; Hanninen, L.; de Passille, A. M.; Rushen, J. (2010): Measures of weight distribution of dairy cows to detect lameness and the presence of hoof lesions. In: *Journal of Dairy Science* 93 Nr. 3, S. 954-960

- [79] Pastell, M.; Tiusanen, J.; Hakojärvi, M.; Hänninen, L. (2009): A wireless accelerometer system with wavelet analysis for assessing lameness in cattle. In: *Biosystems Engineering* 104 Nr. 4, S. 545 - 551
- [80] Pavlenko, A.; Bergsten, C.; Ekesbo, I.; Kaart, T.; Aland, A.; Lidfors, L. (2011): Influence of digital dermatitis and sole ulcer on dairy cow behaviour and milk production. In: *Animal : an international journal of animal bioscience* 5 Nr. 8, S. 1259-1269
- [81] Phillips, C. (2008): *Cattle Behaviour and Welfare*. 2. Aufl. West-Sussex: Wiley
- [82] Pluk, A.; Bahr, C.; Poursaberi, A.; Maertens, W.; van Nuffel, A.; Berckmans, D. (2012): Automatic measurement of touch and release angles of the fetlock joint for lameness detection in dairy cattle using vision techniques. In: *Journal of Dairy Science* 95 Nr. 4, S. 1738-1748
- [83] Poursaberi, A.; Bahr, C.; Pluk, A.; Van Nuffel, A.; Berckmans, D. (2010): Real-time automatic lameness detection based on back posture extraction in dairy cattle: Shape analysis of cow with image processing techniques. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 74 Nr. 1, S. 110 - 119
- [84] R. Core Team (2015): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing
- [85] Rademacher, G.; Friedrich, A.; Eberhardt, T.; Klee, W. (2004): Möglichkeiten zur Verbesserung der Tiergesundheit, des Tierschutzes und der Wirtschaftlichkeit in der Rinderhaltung Teil 1. In: *Tierärztliche Umschau* 59 S. 195 - 202
- [86] Rajkondawar, P. G.; Liu, M.; Dyer, R. M.; Neerchal, N. K.; Tasch, U.; Lefcourt, A. M.; Erez, B.; Varner, M. A. (2006): Comparison of Models to Identify Lamé Cows Based on Gait and Lesion Scores, and Limb Movement Variables. In: *Journal of Dairy Science* 89 Nr. 11, S. 4267 - 4275
- [87] Raundal, P. M.; Andersen, P. H.; Toft, N.; Forkman, B.; Munksgaard, L.; Herskin, M. S. (2014): Handheld mechanical nociceptive threshold testing in dairy cows - intra-individual variation, inter-observer agreement and variation over time. In: *Veterinary Anaesthesia and Analgesia* 41 Nr. 6, S. 660-669
- [88] Robin, X.; Turck, N.; Hainard, A.; Tiberti, N.; Lisacek, F.; Sanchez, J.; Müller, M. (2011): pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. In: *BMC Bioinformatics* 12 S. 77
- [89] Rosenberger, G. (1978): *Krankheiten des Rindes*. 1. Aufl. Berlin und Hamburg: Parey
- [90] Rushen, J.; Pombourcq, E.; De Passillé, A. M. (2015): Validation of two measures of lameness in dairy cows. In: *Applied Animal Behaviour Science* 106 Nr. 1, S. 173 - 177
- [91] Rütz, A.; Fiedler, A. (2014): *Die Sprache der Kuh, Tierkontrolle einfach gemacht*. 1. Aufl. Kempten: AVA-Verlag
- [92] Schindhelm, K.; Haidn, B.; Reese, S. (2015): Früherkennung von Klauenerkrankungen durch automatische Aktivitäts- und Leistungsanalyse bei Milchkühen. In: U. Bauer, A. Gräff, G. Wendl (Hrsg.) 12. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V (KTBL) S. 158-163
- [93] Schlageter-Tello, A.; Bokkers, E. A. M.; Groot Koerkamp, P. W. G.; Van Hertem, T.; Viazzi, S.; Romanini, C. E. B.; Halachmi, I.; Bahr, C.; Berckmans, D.; Lokhorst, K. (2015): Relation between observed locomotion traits and locomotion score in dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 98 Nr. 12, S. 8623-8633

- [94] Schlageter-Tello, A.; Bokkers, E. A. M.; Koerkamp, P. W. G. G.; Van Hertem, T.; Viazi, S.; Romanini, C. E. B.; Halachmi, I.; Bahr, C.; Berckmans, D.; Lokhorst, K. (2014): Manual and automatic locomotion scoring systems in dairy cows: a review. In: Preventive Veterinary Medicine 116 Nr. 1-2, S. 12-25
- [95] Shearer, J. K.; Plummer, P. J.; Schleining, J. A. (2015): Perspectives on the treatment of claw lesions in cattle. In: Veterinary Medicine: Research and Reports Nr. 6, S. 273-292
- [96] Singh, S.; Ward, W.; Murray, R. (1996): Effect of feeding higher proportion of carbohydrates on the histopathology of hooves in cows. In: M. Rachel (Hrsg.) Proceedings of the 9th International Symposium on Disorders of Ruminant Digit and The International Conference on Lameness in Cattle, Jerusalem, Israel: Conference Secretariat, Ortra Limited S. 3
- [97] Souza, R. C.; Ferreira, P. M.; Molina, L. R.; Carvalho, A. V.; Facury-Filho, E. J. (2006): Economic Losses Caused by Sequels of Lameness in Free-Stall Housed Dairy Cows. In: Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnica 58 Nr. 6, S. 982 - 987
- [98] Sprecher, D. J.; Hostetler, D. E.; Kaneene, J. B. (1997): A lameness scoring system that uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance. In: Theriogenology 47 Nr. 6, S. 1179-1187
- [99] Statistisches Bundesamt: Viehbestand Fachserie 3 Reihe 4.1, Stand: 03.05.2015. URL <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ViehbestandTierischeErzeugung/Viehbestand.html>.
- [100] Statistisches Bundesamt: Viehbestand Fachserie 3 Reihe 4.1, Stand: 03.11.2015. URL <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ViehbestandTierischeErzeugung/Viehbestand.html>.
- [101] Sykora, S.; Kofler, J.; Glonegger-Reichert, J.; Dietrich, J.; Auersperg, G.; Brandt, S. (2015): Treponema DNA in bovine "non-healing" versus common sole ulcers and white line disease. In: The Veterinary Journal 205 Nr. 3, S. 417 - 420
- [102] Šárová, R.; Stehulová, I.; Kratinová, P.; Firla, P.; Spinka, M. (2011): Farm managers underestimate lameness prevalence in Czech dairy herds. In: Animal Welfare Nr. 20, S. 201 -204
- [103] Thorup, V. M.; Munksgaard, L.; Robert, P.; Erhard, H. W.; Thomsen, P. T.; Friggens, N. C. (2015): Lameness detection via leg-mounted accelerometers on dairy cows on four commercial farms. In: Animal : an international journal of animal bioscience 9 Nr. 10, S. 1704-1712
- [104] Thorup, V. M.; Nielsen, B. L.; Robert, P.; Konka, J. G. S.; Friggens, N. C. (2015): Lameness in cows affects daily feeding time but not rumination time as characterized from sensors. In: C. H. Knight (Hrsg.) Proceedings of the Third DairyCare Conference, DairyCare COST Action FA1308 S. 19
- [105] Thorup, V. M.; do Nascimento, O. F.; Skjoth, F.; Voigt, M.; Rasmussen, M. D.; Bennedsgaard, T. W.; Ingvarsen, K. L. (2014): Short communication: Changes in gait symmetry in healthy and lame dairy cows based on 3-dimensional ground reaction force curves following claw trimming. In: Journal of Dairy Science 97 Nr. 12, S. 7679-7684
- [106] Urban, D.; Mayerl, J. (2011): Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften
- [107] Van Eerdenburg, F. J.; de Boer, H.; Gomez, F. (2003): Relationship among subclinical lameness and oestrus expression. Proceedings XI International Congress International Society of Animal Hygiene, Mexico City: Autonomus Metropolitan University S. 211-216

- [108] Van Hertem, T.; Bahr, C.; Schlageter Tello, A.; Viazzi, S.; Steensels, M.; Romanini, C. E. B.; Lokhorst, C.; Maltz, E.; Halachmi, I.; Berckmans, D. (2015): Lameness detection in dairy cattle: single predictor v. multivariate analysis of image-based posture processing and behaviour and performance sensing. In: *Animal : an international journal of animal bioscience* S. 1-8 [Epub ahead of print]
- [109] Van Hertem, T.; Maltz, E.; Antler, A.; Romanini, C. E. B.; Viazzi, S.; Bahr, C.; Schlageter-Tello, A.; Lokhorst, C.; Berckmans, D.; Halachmi, I. (2013): Lameness detection based on multivariate continuous sensing of milk yield, rumination, and neck activity. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 7, S. 4286-4298
- [110] Van Nuffel, A.; Van De Gucht, T.; Saeys, W.; Sonck, B.; Opsomer, G.; Vangeyte, J.; Mertens, K. C.; De Ketelaere, B.; Van Weyenberg, S. (2015): Environmental and cow-related factors affect cow locomotion and can cause misclassification in lameness detection systems. In: *Animal : an international journal of animal bioscience* S. 1-9 [Epub ahead of print]
- [111] Van Nuffel, A.; Vangeyte, J.; Mertens, K. C.; Pluym, L.; Campeneere, S. D.; Saeys, W.; Opsomer, G.; Weyenberg, S. V. (2013): Exploration of measurement variation of gait variables for early lameness detection in cattle using the GAITWISE. In: *Livestock Science* 156 Nr. 1-3, S. 88 - 95
- [112] Vermunt, J. J.; Greenough, P. R. (1994): Predisposing factors of laminitis in cattle. In: *The British Veterinary Journal* 150 Nr. 2, S. 151-164
- [113] Viazzi, S.; Bahr, C.; Hertem, T. V.; Schlageter-Tello, A.; Romanini, C. E. B.; Halachmi, I.; Lokhorst, C.; Berckmans, D. (2014): Comparison of a three-dimensional and two-dimensional camera system for automated measurement of back posture in dairy cows. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 100 S. 139 - 147
- [114] Viazzi, S.; Bahr, C.; Schlageter-Tello, A.; Van Hertem, T.; Romanini, C. E. B.; Pluk, A.; Halachmi, I.; Lokhorst, C.; Berckmans, D. (2013): Analysis of individual classification of lameness using automatic measurement of back posture in dairy cattle. In: *Journal of Dairy Science* 96 Nr. 1, S. 257-266
- [115] Von Engelhardt, W. (2010): *Physiologie der Haustiere*. Stuttgart: Enke Verlag
- [116] Von Keyserlingk, M. A. G.; Barrientos, A.; Ito, K.; Galo, E.; Weary, D. M. (2012): Benchmarking cow comfort on North American freestall dairies: lameness, leg injuries, lying time, facility design, and management for high-producing Holstein dairy cows. In: *Journal of Dairy Science* 95 Nr. 12, S. 7399-7408
- [117] Von Keyserlingk, M. A. G.; Rushen, J.; de Passille, A. M.; Weary, D. M. (2009): Invited review: The welfare of dairy cattle - key concepts and the role of science. In: *Journal of Dairy Science* 92 Nr. 9, S. 4101-4111
- [118] Westin, R.; Vaughan, A.; de Passille, A. M.; DeVries, T. J.; Pajor, E. A.; Pellerin, D.; Siegford, J. M.; Vasseur, E.; Rushen, J. (2016): Lying times of lactating cows on dairy farms with automatic milking systems and the relation to lameness, leg lesions, and body condition score. In: *Journal of Dairy Science* 99 Nr. 1, S. 551-561
- [119] Whay, H. R.; Main, D. C. J.; Green L. E.; Webster A. J. F.; Webster A. J. F., (2002): Farmer perception of lameness prevalence. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Lameness in Ruminants* S. 355-358
- [120] Whay, H. R.; Waterman, A. E.; Webster, A. J. (1997): Associations between locomotion, claw lesions and nociceptive threshold in dairy heifers during the peri-partum period. In: *The Veterinary Journal* 154 Nr. 2, S. 155-161

[121] Wilson-Welder, J. H.; Alt, D. P.; Nally, J. E. (2015): Digital Dermatitis in Cattle: Current Bacterial and Immunological Findings. In: *Animals: an open access journal from MDPI* 5 Nr. 4, S. 1114-1135

[122] Yunta, C.; Guasch, I.; Bach, A. (2012): Short communication: lying behavior of lactating dairy cows is influenced by lameness especially around feeding time. In: *Journal of Dairy Science* 95 Nr. 11, S. 6546-6549

10 Bildquellen

[A] Fiedler, A.; Maierl, J.; Nuss, K.: Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. Stuttgart: Schattauer Verlag, 2004. S. 7, 10, 17

11 Anhang

Tabelle 25: Beispieldaten für ROC-Kurve

Zustand	Parameter
0	0
0	1
0	2
0	3
0	4
0	5
0	6
0	7
0	8
0	9
0	10
0	11
0	12
0	13
0	14
0	15
0	16
0	17
0	18
0	19
0	20
0	21
0	22
0	23
0	24
0	25
0	26
0	27
0	28
0	29
0	30
0	31
0	32
1	28
1	29
1	30
1	31
1	32
1	33
1	34
1	35
1	36
1	37
1	38
1	39
1	40
1	41
1	42
1	43
1	44
1	45
1	46
1	47

Tabelle 25: Beispieldaten für ROC-Kurve (Fortsetzung)

Zustand	Parameter
1	48
1	49
1	50
1	51
1	52

Tabelle 26: LMS-Häufigkeit nach Tiernummer

Tiernummer	Anzahl LMS					Summe
	1	2	3	4	5	
296	1	1	0	0	0	2
299	1	13	8	2	0	24
370	3	10	5	1	1	20
373	5	4	0	0	0	9
375	0	8	15	5	0	28
396	0	5	15	7	0	27
398	4	0	0	0	0	4
399	5	10	1	4	0	20
437	9	8	3	0	0	20
452	20	8	0	0	0	28
456	7	4	4	0	0	15
474	19	3	1	0	0	23
491	10	7	4	0	0	21
495	18	6	0	0	0	24
510	8	13	1	0	0	22
515	7	17	0	1	0	25
519	7	8	0	0	0	15
525	14	2	0	0	0	16
553	0	8	11	2	0	21
554	6	18	3	0	0	27
557	2	13	3	2	0	20
564	13	8	2	0	0	23
565	17	3	0	0	0	20
568	9	3	1	0	1	14
570	2	14	11	0	0	27
572	2	0	0	0	0	2
574	0	0	0	1	0	1
576	8	2	0	0	0	10
579	18	0	0	0	0	18
586	11	2	0	0	0	13
588	15	7	0	0	0	22
592	6	7	2	2	0	17
593	18	2	0	0	0	20
594	18	0	0	0	0	18
601	3	7	1	0	0	11
603	2	3	0	0	0	5
605	0	10	1	4	0	15
612	2	2	0	1	0	5
615	4	0	0	0	0	4
623	4	16	3	1	0	24
624	3	16	1	1	0	21
625	8	3	0	2	0	13
626	24	1	0	0	0	25
629	3	0	0	0	0	3

Tabelle 26: LMS-Häufigkeit nach Tiernummer (Fortsetzung)

Tiernummer	Anzahl LMS					Summe
	1	2	3	4	5	
634	8	3	0	0	0	11
637	20	4	2	0	0	26
645	24	0	0	0	0	24
648	1	1	0	0	0	2
651	28	0	0	0	0	28
654	1	0	0	0	0	1
655	10	5	4	1	0	20
658	20	3	0	0	0	23
659	17	5	0	0	0	22
661	14	11	0	0	0	25
664	19	1	0	0	0	20
672	14	9	0	0	0	23
674	12	10	0	1	0	23
675	3	23	0	0	0	26
679	21	1	0	0	0	22
690	19	3	0	0	0	22
692	13	1	0	0	0	14
693	26	1	0	1	0	28
697	16	6	0	0	1	23
698	10	9	0	0	0	19
706	24	5	0	0	0	29
710	27	0	0	0	0	27
711	22	4	0	0	0	26
714	11	8	4	2	0	25
718	28	0	0	0	0	28
720	24	1	0	1	0	26
721	1	0	0	0	0	1
722	21	4	0	0	0	25
724	19	3	0	0	0	22
727	21	2	0	0	0	23
732	21	1	0	0	0	22
733	13	5	0	0	0	18
735	18	0	0	0	0	18
736	3	0	0	0	0	3
741	17	0	0	0	0	17
743	14	2	0	0	0	16
745	16	0	0	0	0	16
748	12	0	0	0	0	12
749	13	0	0	0	0	13
756	7	2	2	0	0	11
758	8	1	0	0	0	9
759	8	1	0	0	0	9
765	3	0	0	0	0	3
766	2	0	0	0	0	2
880	18	1	0	0	0	19
Summe	1003,00	408,00	108,00	42,00	3,00	1564,00
Mittelwert	11,27	4,58	1,21	0,47	0,03	17,57
Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Maximum	28,00	23,00	15,00	7,00	1,00	29,00
Standardabweichung	8,01	4,99	2,95	1,16	0,18	8,11

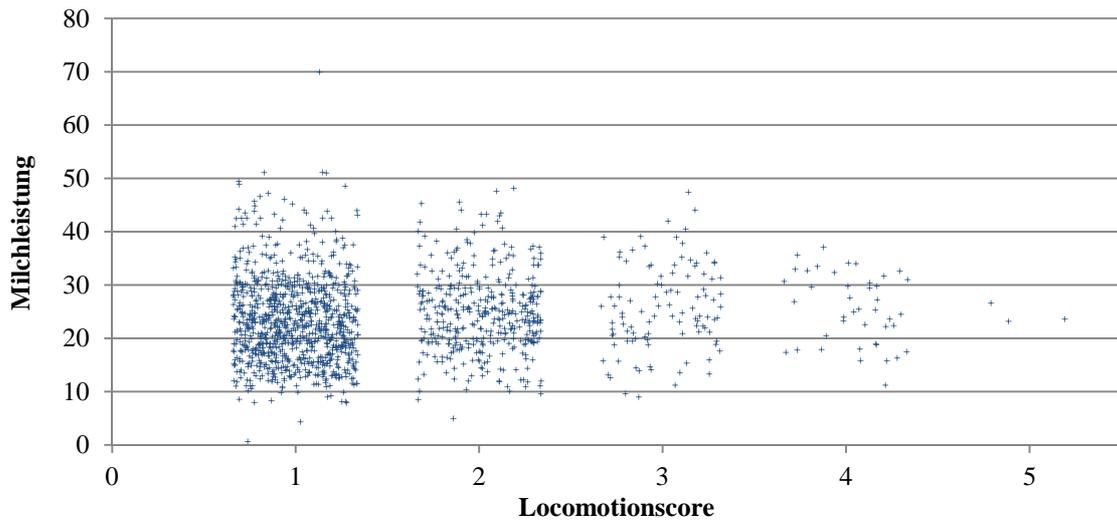


Abbildung 24: Tagesmilchleistung nach LMS

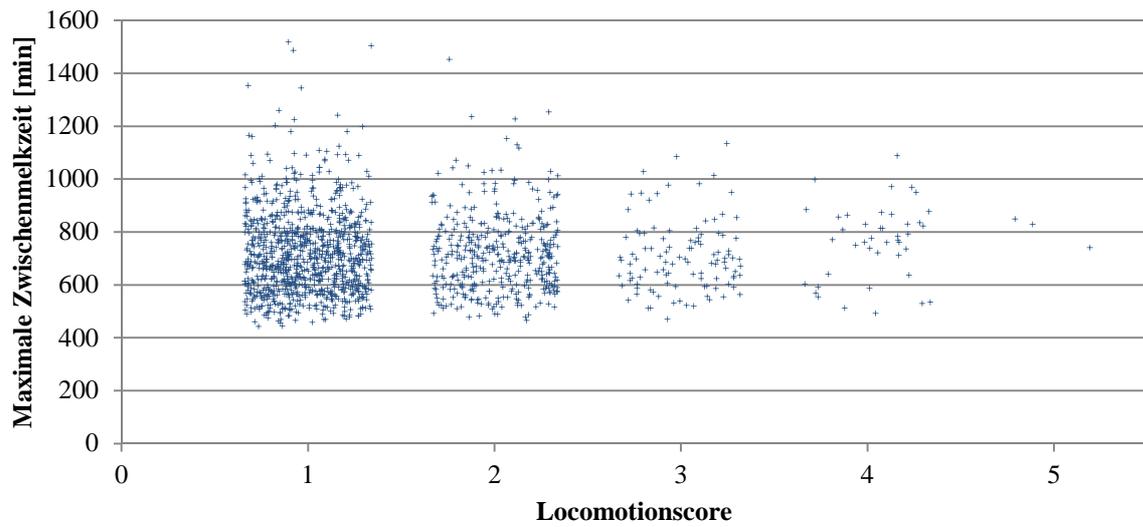


Abbildung 25: Maximalen Zwischenmelkzeit nach LMS

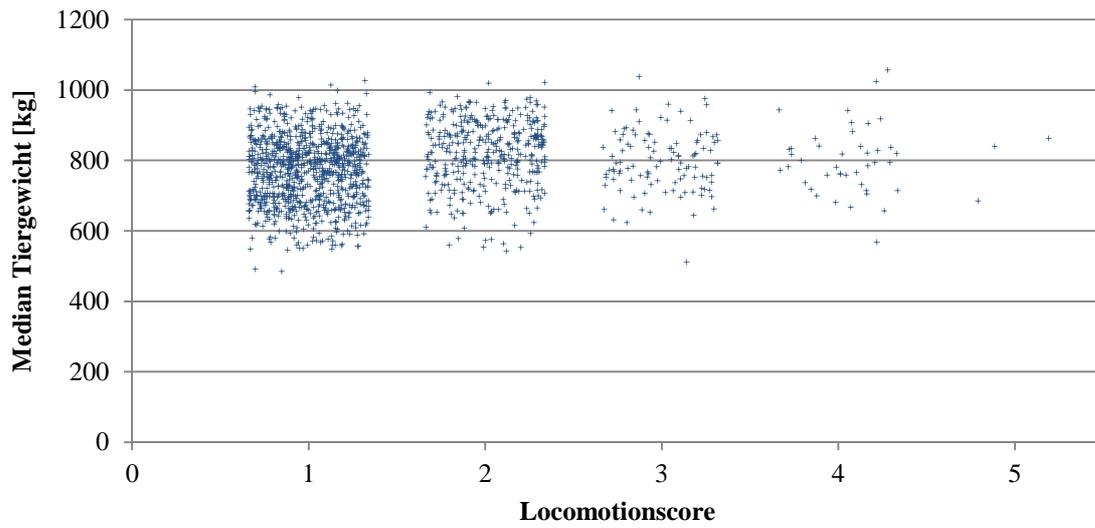


Abbildung 26: Tiergewichtsmedian nach LMS

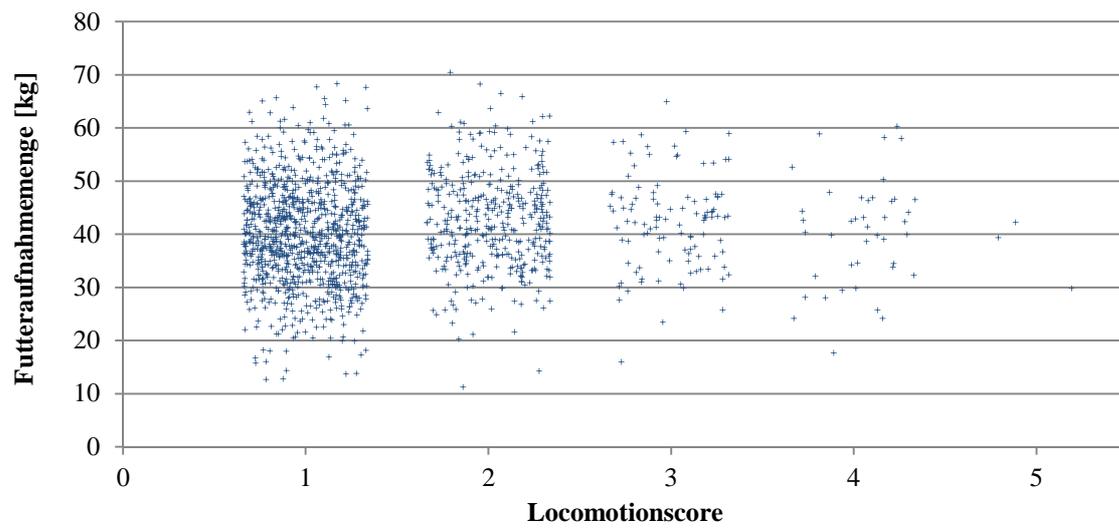


Abbildung 27: Verteilung der Futteraufnahmemenge nach LMS

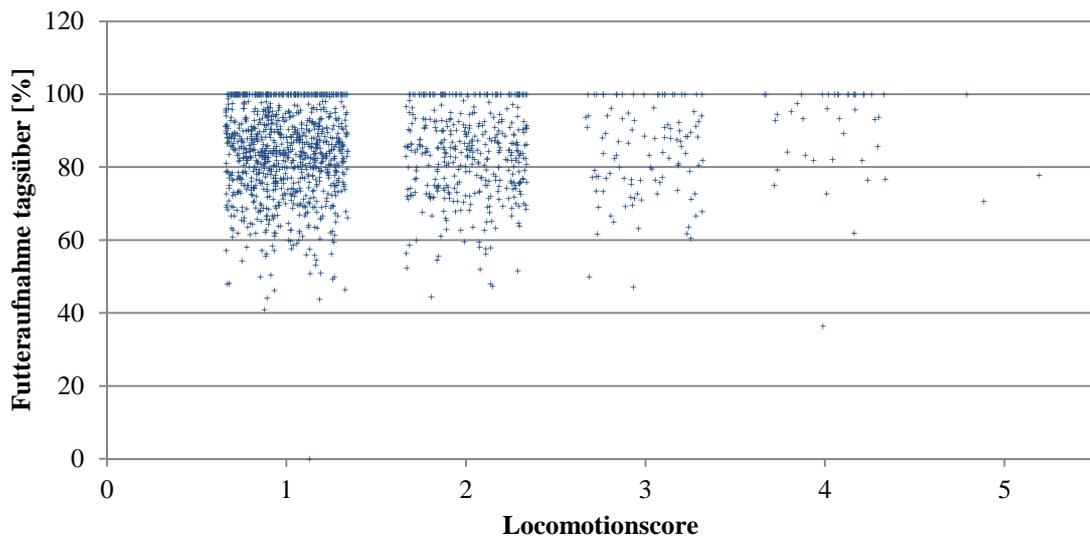


Abbildung 28: Anteil der Dauer der Futteraufnahme tagsüber nach LMS

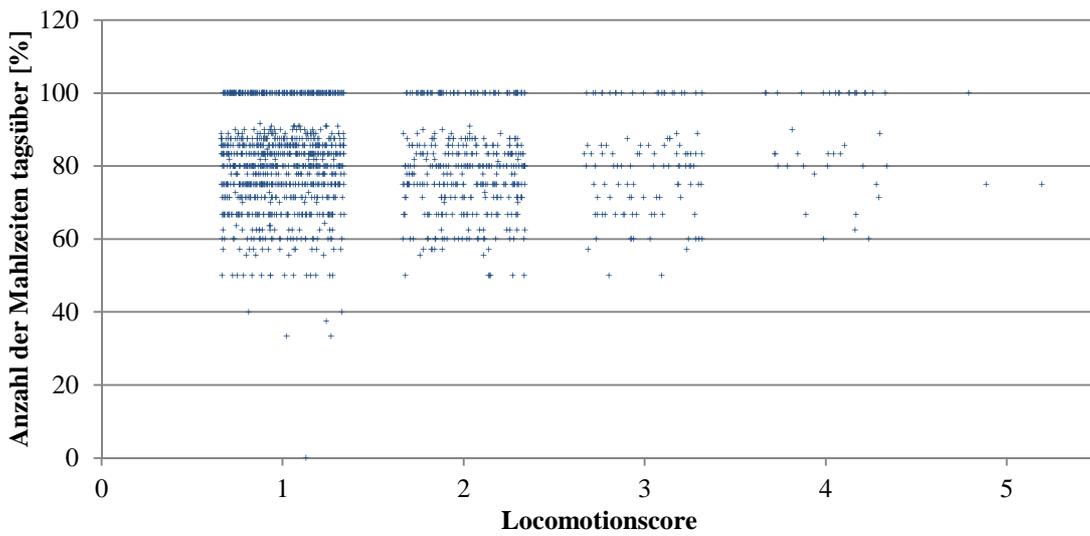


Abbildung 29: Anteil der Anzahl der Mahlzeiten tagsüber nach LMS

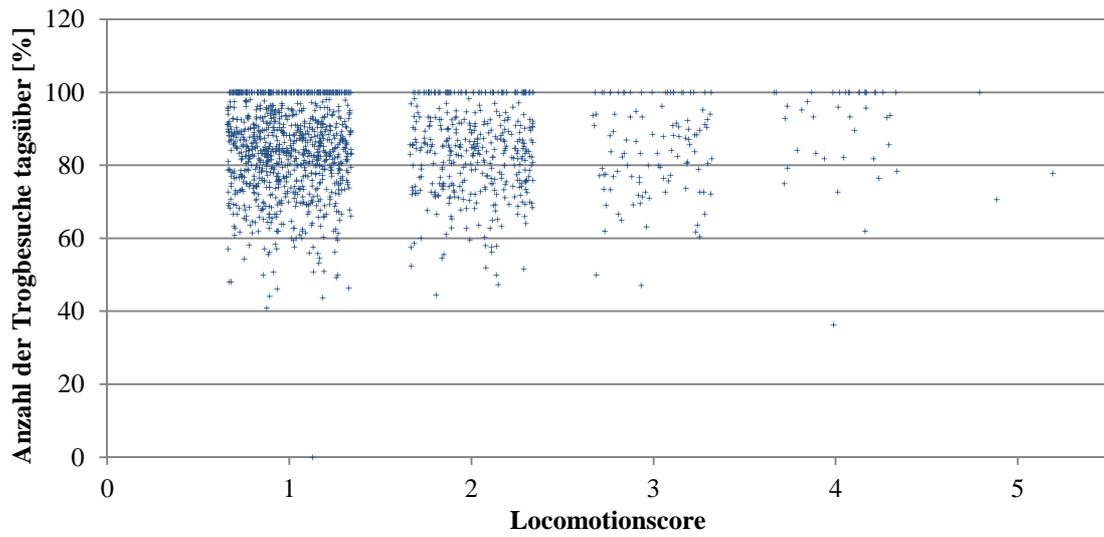


Abbildung 30: Anteil der Anzahl der Trogbesuche tagsüber nach LMS

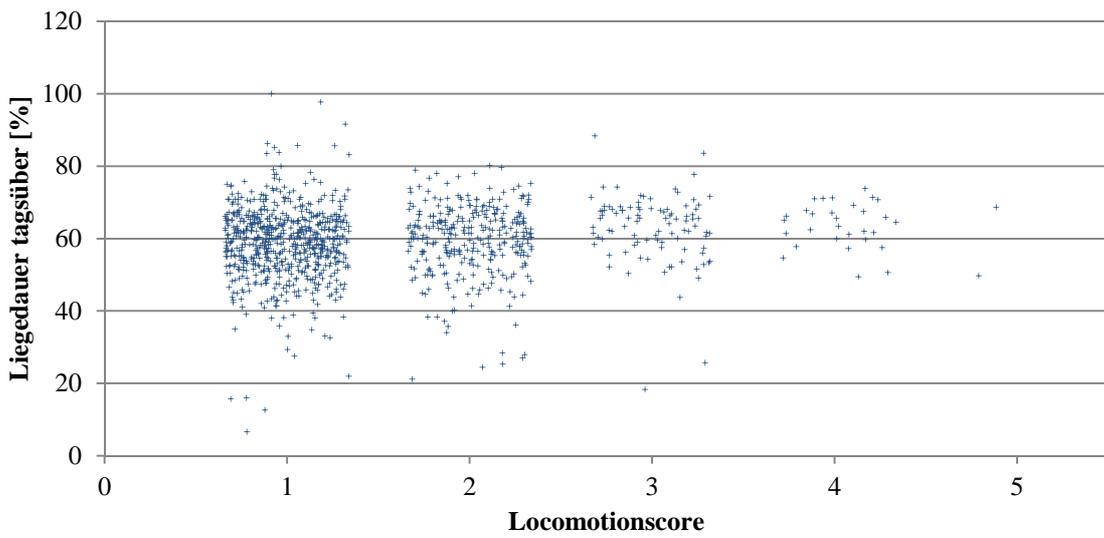


Abbildung 31: Anteil der Liegedauer tagsüber nach LMS

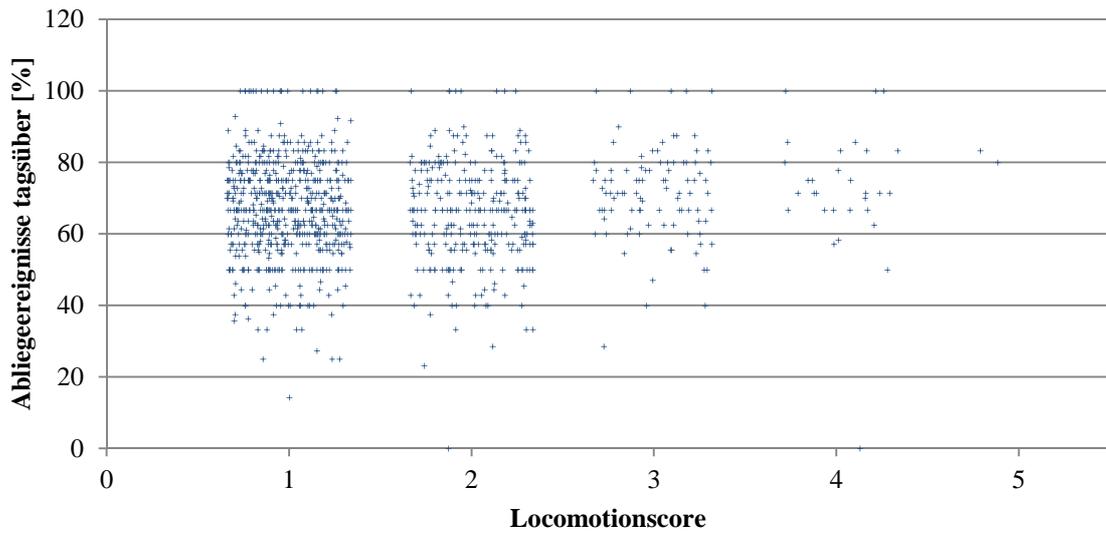


Abbildung 32: Anteil der Abliegeereignisse tagsüber nach LMS

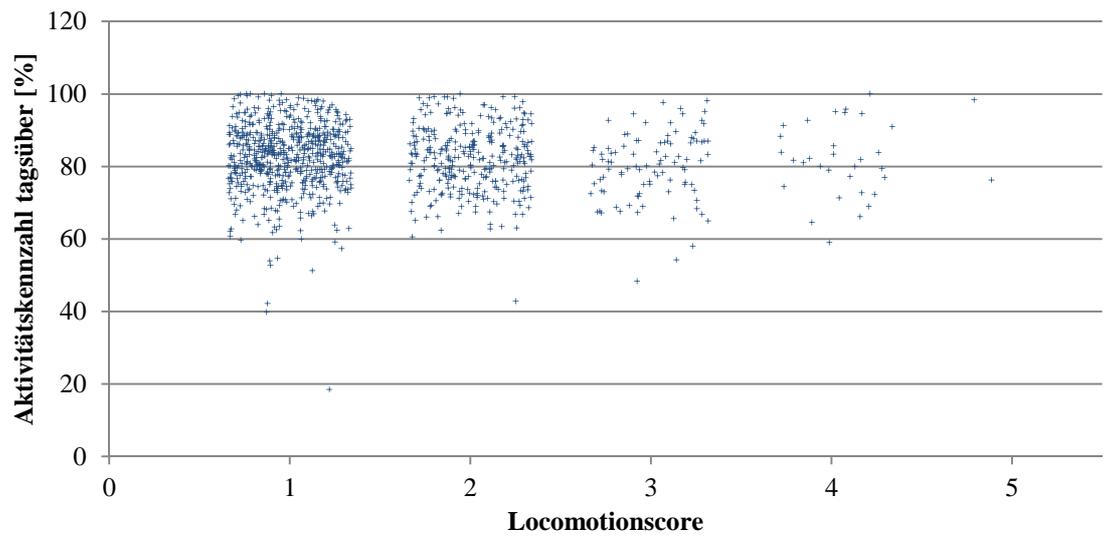


Abbildung 33: Anteil der Aktivitätskennzahl tagsüber nach LMS

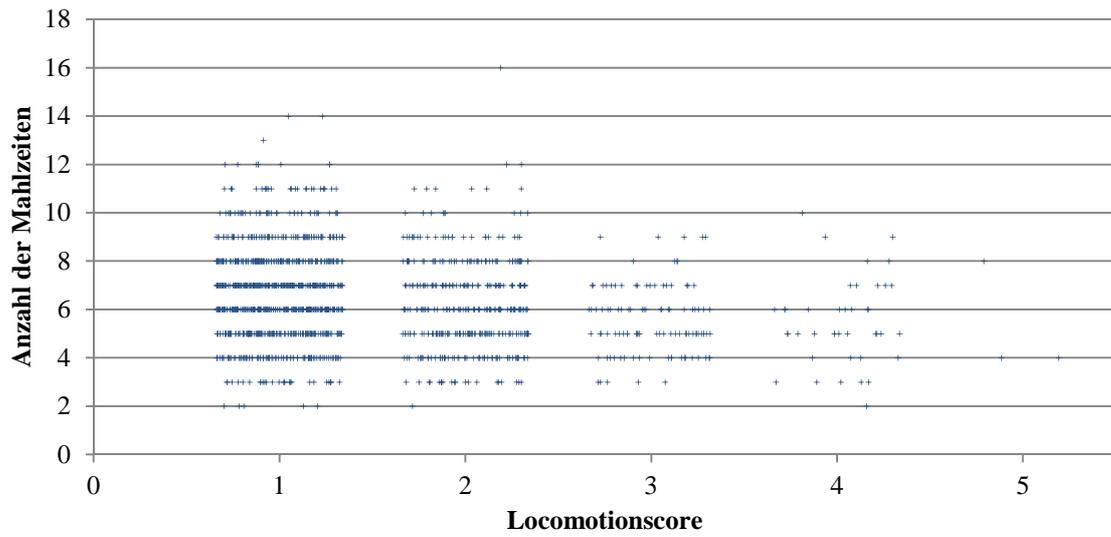


Abbildung 34: Anzahl der Mahlzeiten nach LMS

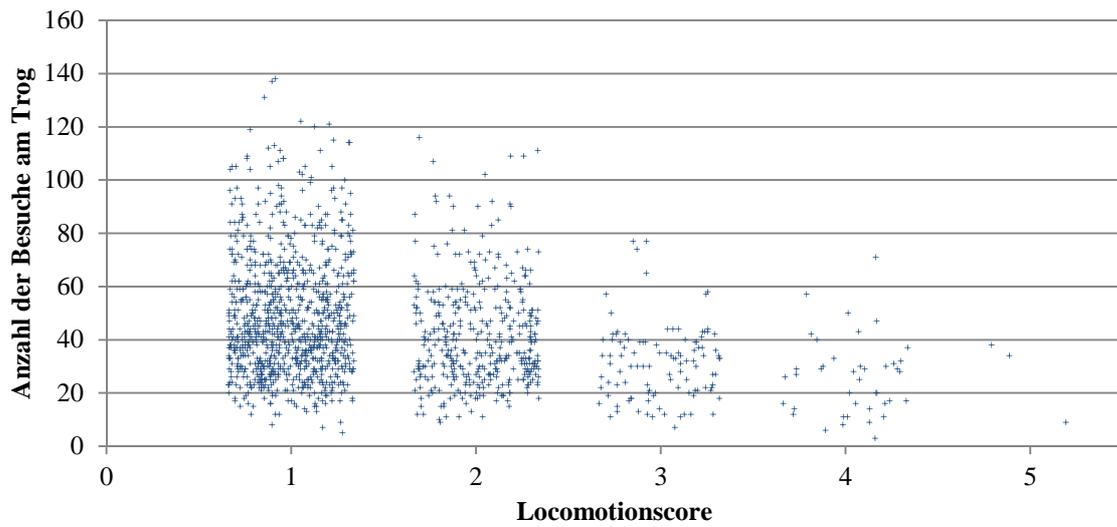


Abbildung 35: Anzahl der Trogbesuche nach LMS

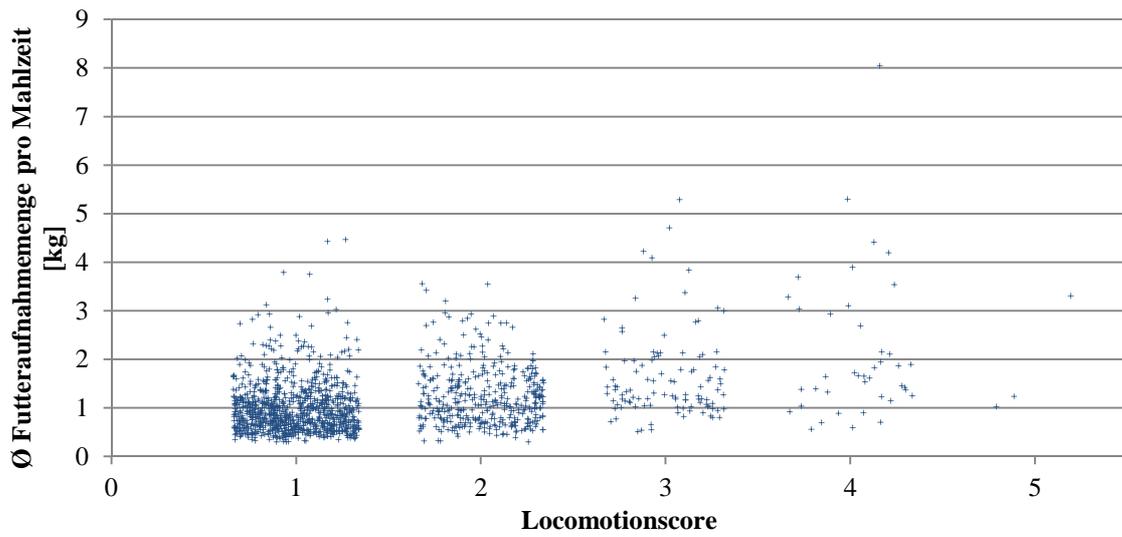


Abbildung 36: Durchschnittliche Futteraufnahmemenge pro Mahlzeit nach LMS

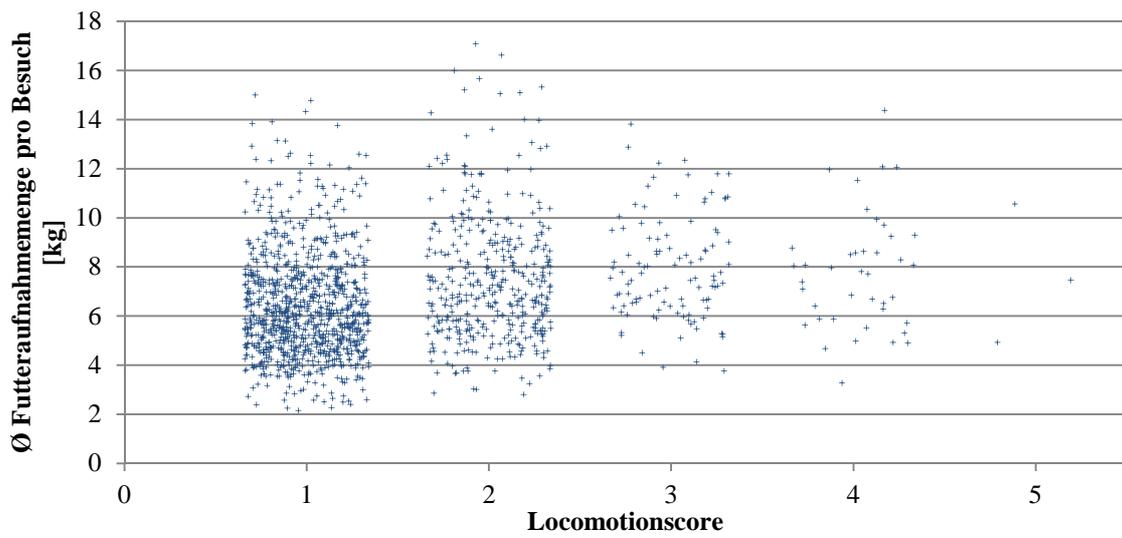


Abbildung 37: Durchschnittliche Futteraufnahmemenge pro Trogbesuch

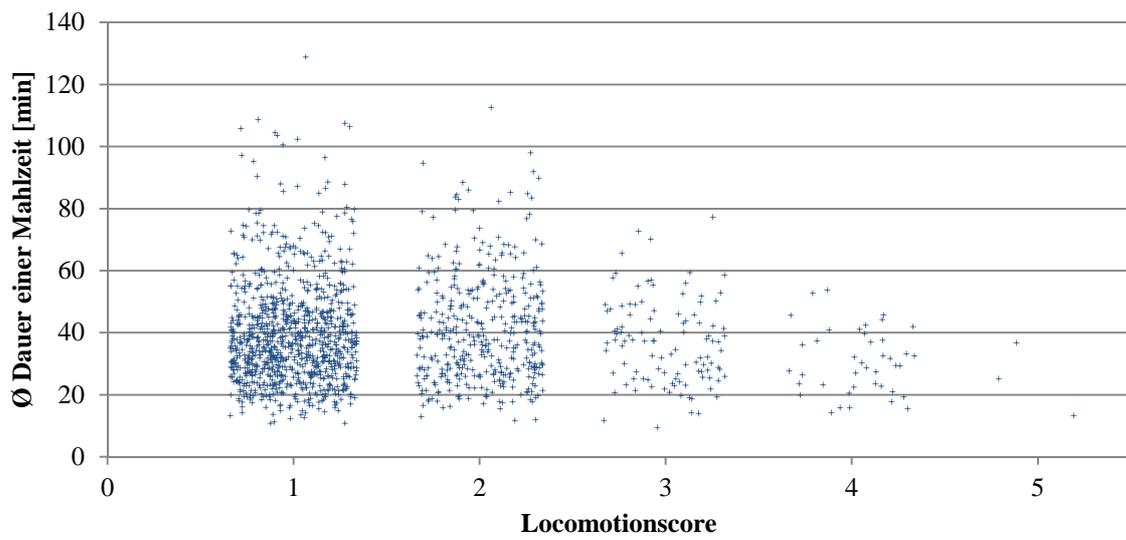


Abbildung 38: Durchschnittliche Dauer einer Mahlzeit nach LMS

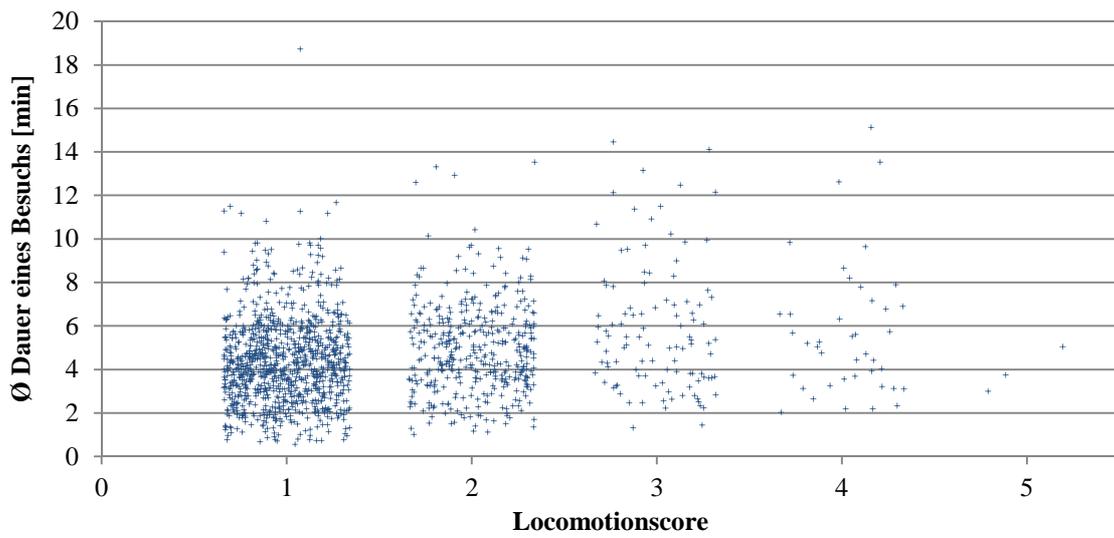


Abbildung 39: Durchschnittliche Dauer eines Besuchs nach LMS

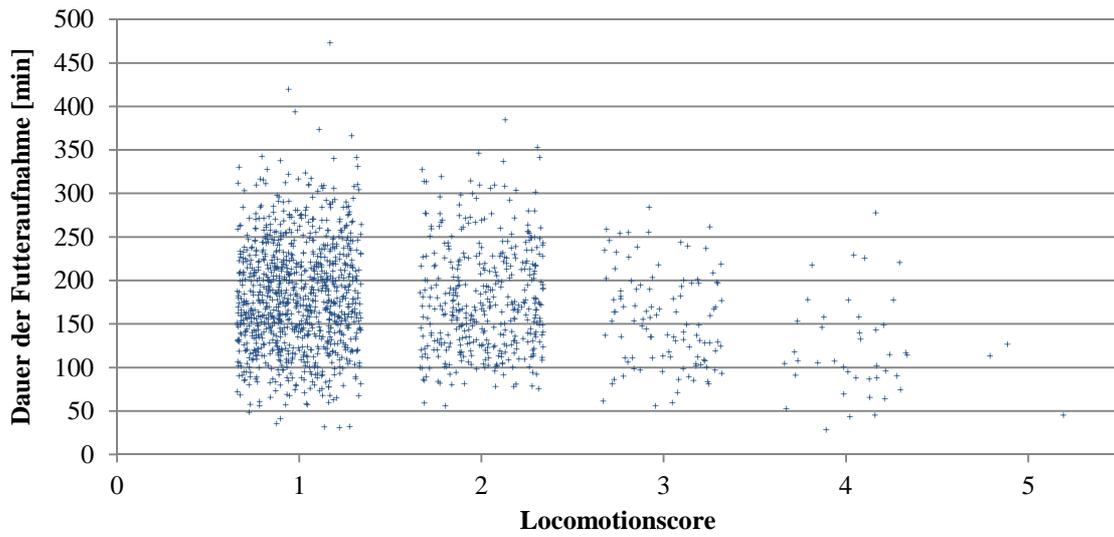


Abbildung 40: Dauer der Futteraufnahme nach LMS

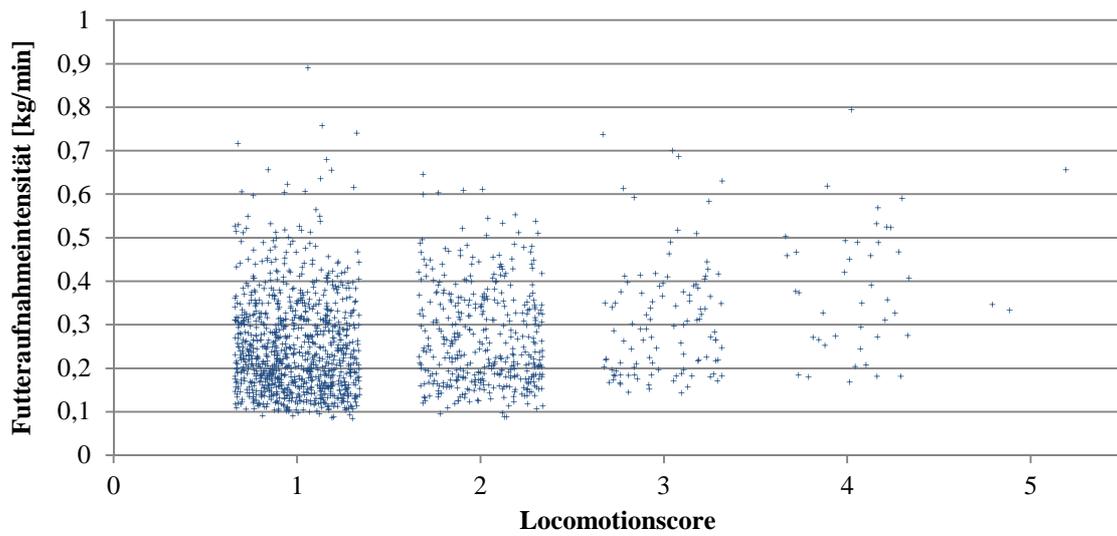


Abbildung 41: Futteraufnahmeintensität nach LMS

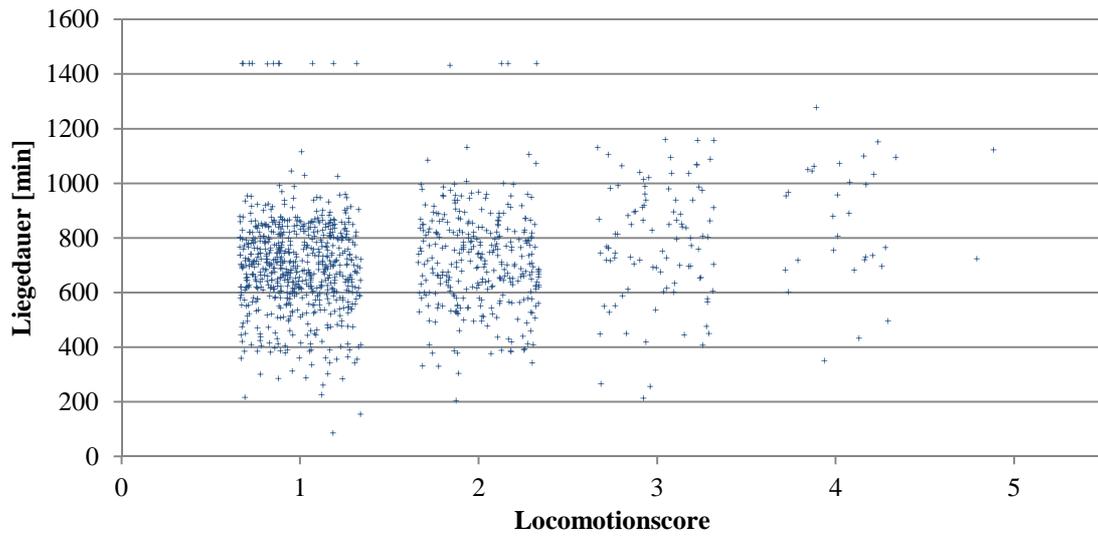


Abbildung 42: Liegedauer nach LMS

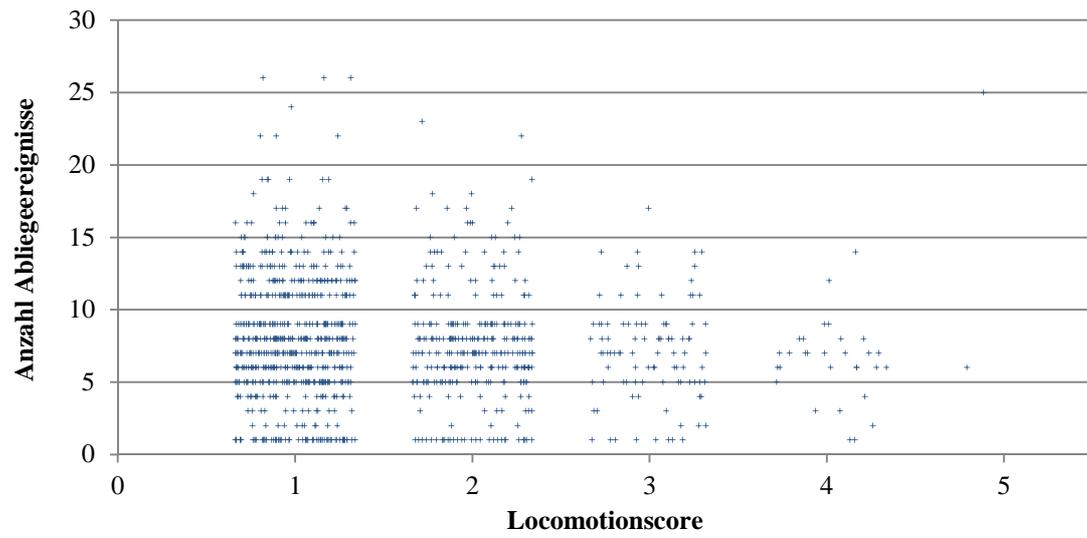


Abbildung 43: Anzahl der Abliegeereignisse nach LMS

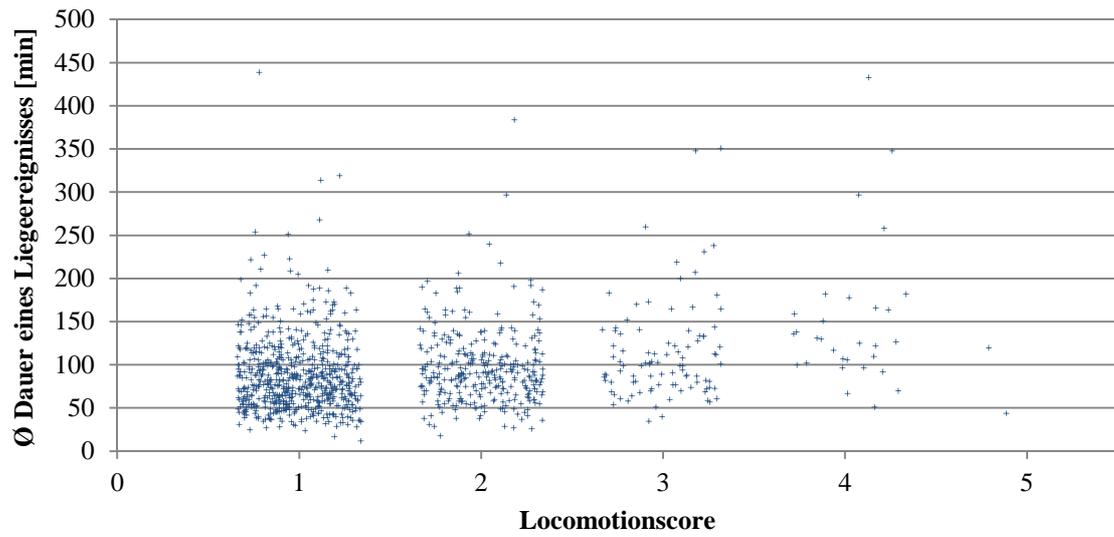


Abbildung 44: Durchschnittliche Dauer eines Liegeereignisses nach LMS

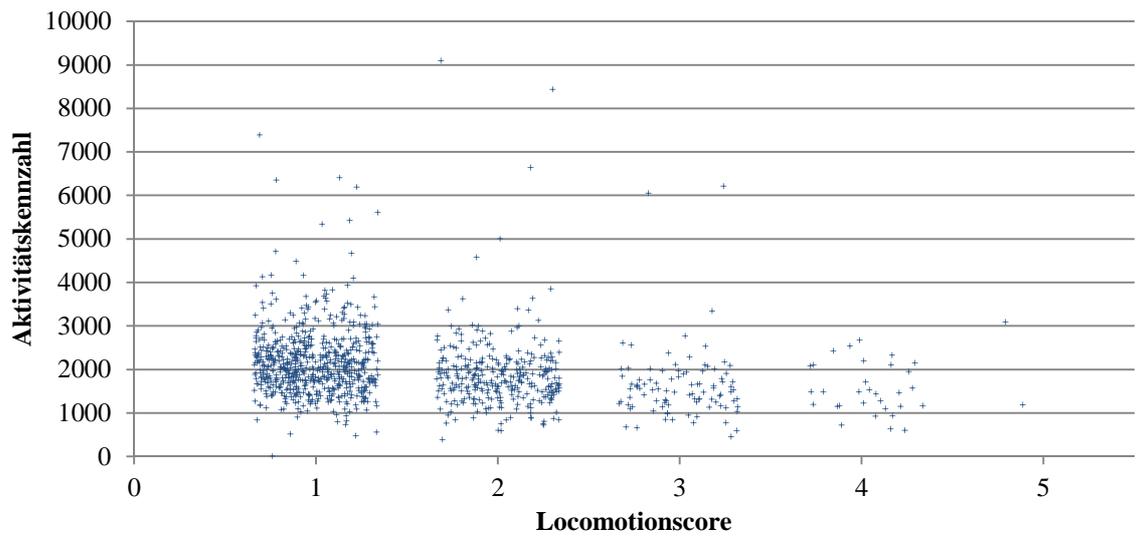


Abbildung 45: Aktivitätskennzahl nach LMS

12 Eidesstattliche Erklärung/Declaration Oath

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

I hereby declare, on oath, that I have written the present dissertation by my own and have not used other than the acknowledged resources and aids.

München, den

Katharina Schindhelm

13 Danksagung

Allem voran möchte ich Herrn Prof. Michael Erhard für die Annahme des Themas und die konstruktiven Korrekturvorschläge danken.

Besonderer Dank gilt meinem Mentor an der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft Herrn Dr. Bernhard Haidn für die zahlreichen wertvollen Anmerkungen und Denkanstöße sowohl zum Versuch selbst als auch beim Verfassen der Arbeit sowie für die Unterstützung bei der Umsetzung meiner Ideen.

Meinen Eltern danke ich für den starken seelisch-moralischen Rückhalt, der mir immer eine große Stütze war, nicht nur während der Doktorarbeit sondern auch auf dem Weg dahin. Meinem Papa danke ich insbesondere auch für das endlose Korrekturlesen, die vielen fachlichen Kommentare und Hilfestellungen.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei Herrn PD Dr. Sven Reese für die außerordentlich gute und zielführende Beratung und Unterstützung im Beantworten statistischer Fragestellungen bedanken. Die intensiven Diskussionen haben die vorliegende Arbeit fachlich weit vorangebracht.

Dr. Andrea Fiedler und Charlotte Kröger waren mir stets eine große Hilfe in Tiermedizinischen Fragen. Andrea möchte ich besonders dafür danken, dass sie vor Jahren mein Interesse an Klauenerkrankungen geweckt und seitdem immer unterstützt und gefördert hat.

Die Datenaufbereitung durch Rudolf Peis und Bekhzod Shamsiev war Basis für das Erkennen der Zusammenhänge der vorliegenden Arbeit. Ihnen möchte ich an dieser Stelle deshalb ebenfalls danken.

Auch Lisa Backenstraß, Pia Palamides, Eva Ehrnböck und Steffanie Senf möchte ich danken, dafür, dass sie mich auf dem Weg durch das Studium und bis hierher begleitet haben – insbesondere Pia, mit der ich stundenlang über Probleme während des Verfassens der Arbeit diskutieren konnte.

Des Weiteren gilt mein Dank dem Personal des Milchviehstalls in Grub, vor allem Etienne Hinz und Stefan Rimili, die mir all meine Fragen zum Stallmanagement beantworteten und mir immer wieder bei der Durchführung des Versuches zur Hand gingen.

Nicht zuletzt danke ich Herrn PD Dr. Johann Maierl für das Zurverfügungstellen der Abbildungen zur Rinderzehe.