

Aus dem Zentrum für Klinische Tiermedizin der Tierärztlichen
Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

Angefertigt unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Holm Zerbe

Etablierung einer neuen Methode zur automatisierten Brunsterkennung beim Rind

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

von
Oliver Dietrich
aus Augsburg

München 2012

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

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Holm Zerbe

Korreferenten: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun
Univ.-Prof. Dr. Dr. Michael Erhard
Priv.-Doz. Dr. Armin Scholz
Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Erwin Märtlbauer

Tag der Promotion: 21. Juli 2012

Für meine Frau

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG	10
II.	LITERATURÜBERSICHT	12
1.	Der Zyklus des Rindes.....	12
1.1.	Östrus	12
1.2.	Postöstrus	14
1.3.	Diöstrus.....	15
1.4.	Proöstrus.....	15
2.	Wirtschaftliche Bedeutung der Brunsterkennung	16
3.	Einflussfaktoren auf das Brunstverhalten	17
4.	Anforderungen an Brunsterkennungsmethoden	19
5.	Methoden zur Brunsterkennung	21
5.1.	Visuelle Brunstbeobachtung	23
5.2.	Chronolactor	24
5.3.	Suchtiere	25
5.4.	Erkennung des Östrus durch speziell trainierte Hunde	25
5.5.	Brunsterkennung durch tierärztliche Untersuchung	26
5.6.	Detektion von Vokalisationsereignissen.....	27
5.7.	Nachweis des Duldungsreflexes	27
5.7.1.	Farbmarkierungen.....	27
5.7.2.	Sensoren.....	28
5.8.	Elektrischer Widerstand des Vaginalschleims.....	29
5.9.	Thermometrie.....	29
5.10.	Milchleistungserfassung.....	31
5.11.	Progesteronbestimmung	31
5.12.	Aktivitätsmessung	32
6.	Maschinelles Sehen	33
III.	MATERIAL, TIERE UND METHODEN.....	36
1.	Material	36
1.1.	Labor.....	36
1.1.1.	Geräte für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch.....	36

1.1.2.	Verbrauchsmaterial für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch	37
1.1.3.	Reagenzien für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch..	37
1.1.4.	Puffer und Lösungen für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch	37
1.2.	Kameras.....	38
1.3.	Marker.....	39
1.4.	Computer-Hardware.....	39
1.5.	Computer-Software	40
2.	Versuchsbetrieb, Tiere	41
3.	Methoden	42
3.1.	Progesteronbestimmung	42
3.2.	Maschinelles Sehen	44
3.2.1	Bildaufzeichnung und -verarbeitung.....	44
3.2.1.1	Realbildaufzeichnung.....	44
3.2.1.2	Marker-Tracking	45
3.2.2	Objekterkennung, Objektverfolgung.....	48
3.2.2.1	SIFT, Scale-Invariant Feature Transform.....	48
3.2.2.2	2D-Matrixcode.....	48
3.2.2.3	Verwendete Markervarianten	49
3.2.3	Beleuchtung und Lichtsteuerung.....	51
3.2.4	Bilderfassung	52
3.2.4.1	Software für die Realbilderfassung	52
3.2.4.2	Tracking-Software	53
3.2.5	Auswertung der Trackingdaten	54
3.2.5.1	Messung der Bewegungsaktivität	55
3.2.5.2	Detektion von Sozialkontakten.....	58
4.	Statistische Auswertung	61
IV.	METHODISCHE ENTWICKLUNGSARBEITEN FÜR DIE AUTOMATISIERTE BRUNSTERKENNUNG - ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	65
1.	Kameratechnik	65
1.1.	IP-Farbkameras	65

1.2.	Digitale Fotoapparate.....	68
1.3.	GigE-Monochrom-Kameras	69
2.	Objekterkennung, Objektverfolgung	72
2.1.	SIFT, Scale-Invariant Feature Transform.....	72
2.2.	Markierung der Kühe.....	73
2.2.1.	Farbmarkierungen.....	74
2.2.2.	Halsband-fixierte Marker	75
2.3.	Beleuchtung und Lichtsteuerung.....	80
V.	ANALYSE VON BEWEGUNGSDATEN ZUR	
	BRUNSTDETEKTION - ERGEBNISSE	82
1.	Quantifizierung der Bewegungsaktivität.....	82
1.2.	Empfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei Tieren mit natürlicher Brunst.....	84
1.3.	Empfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei Tieren mit PGF _{2α} -induzierter Brunst.....	86
1.4.	Empfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei allen brünstigen Tieren	87
2.	Detektion von Sozialkontakten	89
2.1.	Empfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher Brunst.....	91
2.2.	Empfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte für Tiere mit PGF _{2α} -induzierter Brunst.....	93
2.3.	Gemeinsame Betrachtung von natürlicher und PGF _{2α} -induzierter Brunst.....	94
3.	Kombination der Parameter Bewegungsaktivität und Varianz der Sozialkontakte	96
4.	Exemplarische Sonderfälle	97
4.1.	Azyklie durch zystische Ovarfollikel	97
4.2.	Anstieg der Bewegungsaktivität bei diöstrischen und frühtragenden Tieren.....	97
4.3.	Erhöhte Bewegungsaktivitäten bei länger tragenden Tieren.....	98
5.	Visualisierung der Brunst	101
6.	Visuelle Brunstbeobachtung durch das Betriebspersonal	103

VI.	DISKUSSION.....	104
1.	Eignung von maschinellm Sehen zur Brunstdetektion	104
1.1.	Brunsterkennung durch Analyse der Bewegungsaktivität	104
1.2.	Brunsterkennung durch Analyse der Sozialkontakte.....	107
1.3.	Brunsterkennung durch Kombination der Parameter Aktivität und Sozialkontakte.....	108
2.	Unterschiede zwischen natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst	110
3.	Besondere Einflussfaktoren auf die Brunsterkennung	111
4.	Visuelle Brunstbeobachtung durch das Betriebspersonal	115
5.	Schlussbetrachtung und Ausblick	116
VII.	ZUSAMMENFASSUNG.....	119
VIII.	SUMMARY	122
IX.	LITERATURVERZEICHNIS.....	125
X.	DANKSAGUNG	138

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

°C	Grad Celsius
µl	Mikroliter
µm	Mikrometer
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
BCS	Body Condition Score
BSA	Bovines Serumalbumin
BSD	Berkeley Software Distribution
C, C++, C#	Programmiersprachen
CAT	Category
CCD	Charge-coupled Device
CL	Corpus Luteum
cm	Zentimeter
C-Mount	Genormter Gewindeanschluss für Kameraobjektive
EIA	Enzym Immuno Assay
FSH	Follikelstimulierendes Hormon
g	Gramm
GigE	Gigabit-Ethernet
GnRH	Gonadotropin Releasing Hormon
GF	Graaf'scher Follikel
GUI	Graphical User Interface
HDD	Hard Disc Drive
HRP	Horseradish Peroxidase
Ig	Immunglobulin
IP	Internet Protocol
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LCD	Liquid Crystal Display

LH	Luteinisierendes Hormon
LS	Locomotion Score
lx	Lux
m	Meter
Mbit	Megabit
min	Minute(n)
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MP	Megapixel
N	Newton
ng	Nanogramm
p. p.	post partum
P4	Progesteron
PC	Personal Computer
PGF _{2α}	Prostaglandin F _{2α}
PIB	Period of Intensified Behaviour
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
RAM	Random Access Memory
RGB	Rot Grün Blau
RFID	Radio Frequency Identification
ROC	Receiver Operating Characteristic
s	Sekunde
S/W	Schwarz/Weiß
SDK	Software Development Kit
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SQL	Structured Query Language
z. B.	zum Beispiel

I. EINLEITUNG

Die Qualität der Brunsterkennung hat einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Milchviehbetrieben. Unzulänglichkeiten auf diesem Gebiet führen zwangsläufig zu schlechteren Fruchtbarkeitskennzahlen und wirken sich somit negativ auf das wirtschaftliche Gesamtergebnis aus (BECKER et al., 2005). Dabei wird es für die Milchviehhalter immer schwieriger, eine Brunst zu erkennen und für eine erfolgreiche Besamung zu nutzen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Einerseits zeigen die Kühe aufgrund der heutigen Haltungsbedingungen zunehmend weniger und kürzer Brunstsymptome (HOLMAN et al., 2011). Andererseits können die Landwirte durch die stark veränderten Arbeitsbedingungen oftmals zu wenig Zeit für eine visuelle Brunstbeobachtung aufwenden (ROELOFS et al., 2010). Aus diesen Gründen ist die Nutzung neuer und vor allem praktikabler Brunsterkennungsmethoden dringend geboten. Trotz umfangreicher Forschung in der Vergangenheit auf diesem Gebiet gibt es bis dato kein zuverlässiges und gleichzeitig wirtschaftlich sinnvolles Verfahren.

Ziel dieser Dissertation ist es deshalb, die Grundlagen für eine neue Methode zur automatisierten Brunsterkennung zu erarbeiten und den Prototyp auf seine Funktionalität zu prüfen. Das neue Verfahren soll auf dem sogenannten „Tracking“ beruhen, also der kontinuierlichen Detektion der Bewegungen von Kühen in einem Laufstall mit Hilfe von sogenanntem „maschinellern Sehen“. Die so gewonnenen digitalisierten Informationen über die jeweils aktuellen Positionen der beobachteten Tiere sowie deren Ortsveränderungen innerhalb des Stalles ermöglichen eine differenzierte Analyse der Bewegungsmuster. Hierzu gehören vor allem die Auswertung der Aktivitätszeiten und -intensitäten sowie die Erfassung der sozialen Interaktionen zwischen den Herdenmitgliedern. Die Bewegungsdaten werden zusätzlich mit Videoaufzeichnungen verknüpft und ermöglichen so über die Visualisierung der Interaktionen die zuverlässige Interpretation der detektierten Bewegungsmuster. Als Goldstandard für die Validierung der Methode soll ein Enzymimmuntest auf Mikrotitrationsplatten zur Progesteronanalyse in Magermilchproben zum Einsatz kommen.

Der methodische Fokus dieser Arbeit richtet sich auf die Entwicklung eines Systems aus Kameratechnik und Objektmarkierung sowie der für die Datenauswertung notwendigen Hard- und Software. Dabei soll die Methode nicht nur eine Alternative zu den bisher üblichen Pedometern darstellen. Mit Hilfe des neu einzuführenden Parameters „Sozialkontakte“ soll das vorgestellte Verfahren zu einer Optimierung der Brunsterkennung und damit zur Verbesserung der Fruchtbarkeitskennzahlen beitragen. Ein weiteres Ziel der Studie ist es, die Grundlagen für eine Erweiterung des Systems im Hinblick auf die Erfassung von weiteren, für Milchviehbetriebe wichtigen Parametern (Fress- und Liegezeiten, besonders frequentierte Stallabteilungen, gemiedene Bereiche etc.) zu schaffen und so insgesamt einen Beitrag zur Optimierung des Betriebsmanagements zu leisten.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Der Zyklus des Rindes

Die domestizierten europäischen Rinderrassen sind asaisonal polyöstrisch (TUCKER, 1982). Nach dem Erreichen der Pubertät laufen regelmäßig das ganze Jahr über Sexualzyklen ab. Ein Zyklus umfasst dabei die Zeitspanne, in der sich die am Tier feststellbaren hormonellen Veränderungen und die Veränderungen des Verhaltens (Paarungsbereitschaft vs. Ablehnung des Sexualpartners) wiederholen. Der gesamte Sexualzyklus dauert bei Kühen im Regelfall 21 Tage (18 – 24 Tage) (GRUNERT, 1999), wobei 60 % aller weiblichen Rinder zwischen dem 18. und 25. Tag in die Brunst kommen (PHILLIPS, 2002). DRANSFIELD et al. (1998) ermittelten für 54 % der untersuchten Tiere eine Zykluslänge von 20 bis 23 Tagen. Mehr als 25 Tage lange Zyklen wiesen 17 % der Tiere auf (n = 1616 mit 2661 Besamungen). Untersuchungen von SHELDON et al. (2006) haben gezeigt, dass in hochleistenden Herden inzwischen 50 % der Tiere eine abnormale Zyklusdauer aufweisen und die Konzeptionsraten pro Jahr um 1 % abnehmen.

Basierend auf dem Vorhandensein verschiedener Funktionskörper am Ovar kann der Sexualzyklus in zwei Phasen unterteilt werden: In die Lutealphase (Entwicklung und Erhaltung des Corpus luteum) und die Follikularphase (Luteolyse bis Ovulation des dominanten Follikels). In der Regel wird der Sexualzyklus anhand der hormonellen Veränderungen in vier Phasen unterteilt: Östrus, Postöstrus, Diöstrus, Proöstrus (RATHBONE et al., 2001).

1.1. Östrus

Als Östrus wird der Zeitraum bezeichnet, in dem das weibliche Tier durch bestimmte, intensiviertere Verhaltensweisen seine Paarungsbereitschaft anzeigt. ESSLEMONT (1980) prägte hierfür den Begriff „PIB“ (period of intensified behaviour). Das Hauptbrunstsymptom ist die Duldung des Aufsprungs anderer Herdenmitglieder. Die Dauer der auch als Hochbrunst bezeichneten Duldungsphase wird von GRUNERT (1999) beim

Niederungsrind mit durchschnittlich 18 Stunden (2 – 30 Stunden) angegeben.

Neuere Untersuchungen berichten über deutlich kürzere Östrusphasen zwischen durchschnittlich 11 (ROELOFS et al., 2005b) und 7 Stunden (SVEBERG et al., 2011). Weitere äußere Brunstsymptome sind Unruhe, Kontaktsuche, Beschnüffeln der Anogenitalregion sowie Ablegen des Kopfes auf dem Rücken von Herdenmitgliedern und Abgang eines klaren, fadenziehenden Brunstschleims aus der Vulva. Auslöser hierfür ist die hohe Konzentration von Östrogenen im Blut (STEVENSON et al., 1998). Wenn ein Graaf'scher Follikel (GF) unter der Stimulation von gonadotropen Hormonen aus der Hypophyse während der letzten drei oder vier Tage eines Zyklus heranreift, produziert und sezerniert er eine zunehmende Menge an 17β -Östradiol (HUNTER, 2003). Zu gegebener Zeit erreicht die im Blut zirkulierende Menge einen Schwellenwert, der, durch ein positives Feedback auf bestimmte Bereiche des Gehirns, zwei eng miteinander verbundene Vorgänge in Gang setzt: Zum Einen werden die für den Östrus typischen Verhaltensänderungen ausgelöst. Zum Anderen initiiert 17β -Östradiol eine massive Freisetzung des Follikel stimulierenden Hormons (FSH) und insbesondere des Luteinisierenden Hormons (LH) aus der Hypophyse (ROELOFS et al., 2010). Der Östrus läuft nun als Alles-oder-Nichts-Phänomen ab, so dass die Intensität der Brunst letztlich unabhängig von der Konzentration an 17β -Östradiol im Blut ist (DISKIN & SREENAN, 2000).

Bedingt durch die weiter steigende Ausschüttung von Gonadotropin Releasing Hormon (GnRH) erreichen die vom Hypophysenvorderlappen produzierten und sezernierten Hormone FSH und LH ihre Maximalwerte, wobei FSH das weitere Wachstum des dominanten Follikels antreibt. Das LH führt dann etwa 10 - 12 Stunden nach Brunstende zur Ovulation des GF (RATHBONE et al., 2001). Im Gegensatz dazu erreichen die Konzentrationen von Progesteron (P4) im Blut und in der Milch Basalwerte. In Magermilch fällt die Konzentration unter 0,4 ng/ml (MEYER et al., 1986). In der Duldungsphase suchen die Kühe bevorzugt die Gesellschaft anderer brünstiger Kühe, wodurch die Brunstsymptome verstärkt auftreten (SVEBERG et al., 2011). Zu den palpierbaren inneren

Brunstsymptomen gehören die starke Kontraktilität des Uterus, das Vorhandensein eines großen (ca. 12 – 16 mm) sprungreifen und deutlich fluktuierenden Brunstfollikels (GF), eine strohhalm- bis bleistiftdicke Öffnung der Portio vaginalis, die Hyperämie der Scheidenschleimhaut sowie eine durch den klaren Brunstschleim hervorgerufene starke Feuchtigkeit der Vagina, teilweise mit Sekretansammlung auf dem Scheidenboden (GRUNERT, 1996).

Die Dauer der Brunst wird in der Literatur sehr unterschiedlich angegeben. Retrospektiv zeigt sich jedoch ein Trend hin zu einer immer kürzeren Dauer des Östrus (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Dauer der Duldungsphase beim weiblichen Rind

Autor	Dauer in Stunden arithmetischer Mittelwert oder Standardabweichung
Trimberger (1948)	17,8
Schams et al. (1977)	16,9 +/- 4,9
Walker et al. (1996)	9,5 +/- 6,9
Dransfield et al. (1998)	7,1 +/- 5,4
Roelofs et al. (2005a)	11 +/- 4,2
Dobson et al. (2007)	8,5 (6 – 11)
Sveberg et al. (2011)	7,1 +/- 1,44

1.2. Postöstrus

Der Postöstrus (auch als Metöstrus bezeichnet) ist wie der Proöstrus keine exakt abgrenzbare Periode. Die sogenannte Nachbrunst beginnt mit dem Ende der Begattungsbereitschaft und endet mit dem Verschwinden der äußeren und inneren Brunstsymptome. Sie dauert etwa ein bis vier Tage. Zu Beginn des Postöstrus sinken die Spiegel von LH, FSH und der Östrogene rasch ab (RATHBONE et al., 2001). Noch am ersten Tag des Postöstrus kommt es zur Ovulation des reifen Follikels (GF). In der zurückbleibenden Follikelhöhle beginnt, noch unter LH-Einfluss, die Luteinisierung und damit die Anbildung des Corpus luteum (CL). Während der Nachbrunst kann dem Schleim, der aus der Vagina austritt, Blut beigemischt sein. Das Blut stammt aus der östrogenbedingt

hyperämisierten Gebärmutterschleimhaut und gelangt durch kapilläre Blutungen in das Uteruslumen (OHTANI et al., 1993; DISKIN & SREENAN, 2000). Der als Abbluten bezeichnete Vorgang ist ein Hinweis auf die bereits erfolgte Ovulation, lässt jedoch keine Aussage über eine erfolgte oder ausgebliebene Konzeption zu (GRUNERT, 1999).

1.3. Diöstrus

Etwa zwischen dem 3. und dem 5. Tag des Zyklus beginnt der Diöstrus. Dieser auch Interöstrus genannte Abschnitt ist mit einer Dauer von ca. 15 Tagen die längste Phase des Sexualzyklus. Der bis zum nächsten Proöstrus dauernde Abschnitt der sexuellen Ruhe wird vom P4 produzierenden CL dominiert. Er zeichnet sich durch das Fehlen jeglicher Symptome aus, die als Ausdruck einer Annäherungsbereitschaft an den Sexualpartner gewertet werden könnten (GRUNERT, 1999). Innerhalb des Diöstrus finden am Ovar zwei bis drei Follikelreifungswellen statt (SARTORI et al., 2004). Aus jeder dieser Wellen entwickelt sich ein dominanter Follikel, der unter P4-Dominanz aber wieder atresiert. Erst der dominante Follikel der letzten Reifungswelle wird nach der Auflösung des CL durch Prostaglandin $F_{2\alpha}$ ($PGF_{2\alpha}$) zum ovulatorischen Follikel (GINTHER et al., 2000). Verantwortlich für die Follikelreifungswellen ist das FSH, das über den gesamten Diöstrus hinweg auf niedrigem Niveau ausgeschüttet wird (LOPEZ et al., 2005). Eine Ausschüttung des LH findet hingegen kaum statt. Dies liegt am negativen Feedback des P4, das die Ausschüttung des GnRH im Hypothalamus unterdrückt. Gegen Ende des Diöstrus sezerniert das CL vermehrt Oxytocin, was zu einer vermehrten Produktion von $PGF_{2\alpha}$ im Endometrium führt und letztlich die Luteolyse am Ovar bewirkt (RATHBONE et al., 2001).

1.4. Proöstrus

Der Proöstrus (auch Präöstrus genannt) ist die Zeitspanne vom Einsetzen der ersten östrustypischen Verhaltensänderungen bis zur Duldungsbereitschaft. Diese auch Vorbrunst genannte Phase dauert in der Regel zwei bis drei Tage (GRUNERT, 1999). Mit der Luteolyse des CL beginnt im dominanten Follikel die vermehrte Bildung von Östrogenen. Durch das Absinken des P4-Spiegels wird im Hypothalamus wieder vermehrt GnRH

freigesetzt (MILVAE et al., 1996). Dies führt zu einer verstärkten FSH-Ausschüttung, wodurch das Wachstum des dominanten Follikels stimuliert wird. Auch LH wird vermehrt ausgeschüttet (RATHBONE et al., 2001). Äußerliche Kennzeichen der Vorbrunst sind eine leichte Schwellung der Vulva, eine hyperämische und stark feuchte Scheidenschleimhaut sowie eine Ansammlung von Schleim in der Vulva. Im Laufe des Proöstrus verändert sich der Schleim von mäßig viskös zu klar, transparent und fadenziehend. Bei der rektalen Untersuchung ist eine leichte Erschlaffung der Zervix feststellbar, der Uterus reagiert vermehrt kontraktile. An den Ovarien kann bereits ein GF palpirt werden, der sich jedoch noch in der Anbildungsphase befindet. Zusätzlich ist ein in Rückbildung befindliches CL palpierbar (GRUNERT, 1999). Durch die hormonellen Veränderungen beginnen sich die Brunstsymptome, insbesondere die Unruhe, die Kontaktsuche und das Bespringen anderer Kühe zum Östrus hin immer stärker auszubilden.

2. Wirtschaftliche Bedeutung der Brunsterkennung

Eine effektive Brunsterkennung ist die Grundlage für eine hohe Brunstnutzung. Effektiv ist die Brunsterkennung dann, wenn möglichst viele tatsächlich brünstige Kühe als solche erkannt werden. Für eine hohe Brunstnutzung ist es wichtig, dass die Tiere in der Hochbrunst und damit zum richtigen Zeitpunkt besamt werden (BECKER et al., 2005).

Bereits 1994 ermittelte SENGER (1994) für nicht erkannte oder falsch diagnostizierte Brunsten einen jährlichen Schaden von 300 Millionen US-Dollar alleine für die USA. Grundsätzlich sind Fruchtbarkeitsstörungen in der Rinderhaltung ein häufiger Grund für Abgänge und damit für wirtschaftliche Verluste. In Deutschland sind rund ein Fünftel der jährlichen Abgänge auf das Vorliegen von Unfruchtbarkeit zurückzuführen (2010: 20,4 %) (ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER RINDERZÜCHTER E. V., 2011). Ein unbekannter Anteil dieser Fruchtbarkeitsstörungen beruht dabei auf nichterkannten Brunsten. Die enorme wirtschaftliche Bedeutung einer effektiven Brunsterkennung zeigt auch ein Blick auf die Kosten unnötig verlängerter Günstzeiten: Jeder zusätzliche Tag kostet den Landwirt zwischen 2 und 4 €. Eine übersehene

Brunst verursacht so pro Tier direkte Kosten zwischen 40 und 84 € (JUNG, 2009). Hinzu kommen die Einnahmeverluste durch die Abnahme der von einer Kuh im Laufe ihres Lebens produzierten Milchmenge (BORSBERRY, 2011). Die ökonomischen Verluste betragen in Deutschland (alte Bundesländer) ca. 1 Milliarde € jährlich (STRIEZEL, 2005). Eine effektive Erkennung der Brunst ist somit der Grundpfeiler für das Überleben eines jeden Milchviehbetriebs (BORSBERRY, 2011) und eine der wichtigsten Aufgaben im Management von Milchviehbetrieben.

3. Einflussfaktoren auf das Brunstverhalten

Ein physiologischer Zyklus und offenkundige Brunstanzeichen sind essentiell für eine zeitgerechte Besamung (WALSH et al., 2011). Die Ausprägung und die Dauer der Brunst werden jedoch durch eine Reihe von technologischen und biologischen Faktoren beeinflusst.

Zu den technologischen Faktoren gehören unter anderem Haltungsform, Größe des Laufstalls, Bodenbeschaffenheit und Belegungsdichte (BECKER et al., 2005). Eine besondere Rolle scheint die Herdengröße zu spielen. Je mehr Tiere sich in einer Herde befinden, desto größer ist die Chance, dass sich sexuell aktive Gruppen bilden (ROELOFS et al., 2010). Die Stärke der Brunstsymptome und damit die Möglichkeit eine Brunst zu erkennen, steigt umso stärker an, je mehr Kühe zur gleichen Zeit brünstig sind (DISKIN & SREENAN, 2000; ROELOFS et al., 2005a; CUTULLIC et al., 2009; SVEBERG et al., 2011).

Bei den biologischen Faktoren haben klimatische Einflüsse, Laktationsstadium, Erkrankungen der Gliedmaßen, hohe Milchleistungen, Hormonbehandlungen und die Ernährung großen Einfluss auf das Brunstverhalten. TUCKER (1982) gibt die Länge des Sexualzyklus mit 21 (17 – 25) Tagen an. Allerdings trifft das nur unter der Voraussetzung zu, dass die Umgebungstemperaturen zwischen -5 und +25 °C liegen (TUCKER, 1982). Bei Temperaturen über 30 °C und hoher Luftfeuchte verringert sich die Brunstaktivität signifikant (GWAZDAUSKAS et al., 1983). Lahmheiten sind bei Milchkühen klassischerweise mit einer Verringerung der Brunstintensität verbunden, da lahme Tiere mehr liegen und weniger stehen oder umherlaufen (ROELOFS et al., 2010). In

modernen, hochleistenden Milchviehbetrieben treten Lahmheiten mit einer Häufigkeit von bis zu 52 % (Durchschnitt 20 – 25 %) auf (MÜLLING, 2006). Durch die Lahmheit haben die betroffenen Kühe weniger Kontakt zu den anderen sexuell aktiven Tieren ihrer Gruppe (WALKER et al., 2010). Insbesondere beim Einsatz von Pedometern sind deshalb die Chancen, eine echte Brunst zu erkennen, bei lahmen Kühen signifikant schlechter, als bei nicht-lahmen Tieren (HOLMAN et al., 2011). DOBSON et al. (2008) vermuten, dass der durch die Lahmheit verursachte Stress die für die Östrogenproduktion im dominanten Follikel notwendige LH-Ausschüttung vermindert. Häufig diskutiert wird der Einfluss der Milchmenge auf Brunstintensität und Brunstdauer. Ursache hierfür könnte der verstärkte metabolische Abbau von Steroidhormonen in der Leber sein. Keine Korrelation zwischen Milchmenge und Brunstintensität fand VAN EERDENBURG (2008a). Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse einer Feldstudie, bei der 5.883 Brunsten analysiert wurden. Diese Studie hat gezeigt, dass eine um 1 kg geringere Milchmenge eine um 1,66 % größere Bewegungsintensität während des Östrus bewirkt (LOPEZ-GATIUS et al., 2005). Auswirkungen scheint die Milchmenge aber auf jeden Fall auf die Brunstdauer zu haben: Für Tiere mit einer Milchleistung von ≥ 55 kg pro Tag (Mittelwert über 10 Tage vor der Brunst) ermittelten WILTBANK et al. (2006) eine Brunstdauer von unter 3 Stunden, wohingegen Kühe mit einer niedrigeren Leistung (25 – 40 kg pro Tag) über rund 11 Stunden in Brunst waren. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch SHELDON et al. (2006). Deren Untersuchungen zeigten, dass insbesondere bei hochleistenden Herden die Brunstsymptome in den letzten 25 Jahren schwächer geworden sind. Zusätzlich weisen die Hälfte der Kühe mit hoher Milchleistung abnormale Zykluslängen auf und die Konzeptionsraten nehmen pro Jahr um 1 % ab.

Die hormonelle Behandlung von Kühen kann sich auf die Ausprägung spezifischer Brunstsymptome auswirken. So kann eine Progesterongabe im Zusammenhang mit Programmen zur Brunstsynchronisation die Symptome verstärken (STEVENSON et al., 1989). Einen positiven Einfluss sowohl auf die Konzeptionsrate als auch auf die Brunsterkennung konnten auch LOKHANDE et al. (1983) für den Einsatz von Gestagenen

nachweisen. Für $\text{PGF}_{2\alpha}$ zeigen Untersuchungen von ROELOFS et al. (2005a) eine Verschlechterung der Brunsterkennung sowie eine Verkürzung der Brunstsymptome. Keinen Einfluss von $\text{PGF}_{2\alpha}$ haben hingegen WALKER et al. (1996) festgestellt.

Mangelhafte Ernährung, verbunden mit einem durch die negative Energiebilanz verursachten Verlust an Körpermasse kann negative Auswirkungen auf die Brunstintensität haben (WALSH et al., 2011). Bei einem Vergleich verschiedener Brunsterkennungsmethoden haben HOLMAN et al. (2011) einen Body Condition Score (BCS) von < 2 als problematisch erkannt. Die für die Brunsterkennung eingesetzten Aktivitätsmessgeräte konnten bei den betreffenden Kühen keine einzige von insgesamt 9 Brunsten detektieren. Interessanterweise hatten bei einer Studie von VAN EERDENBURG (2008a) die während der Trockenstehphase hochkalorisch gefütterten Kühe bei der zweiten Brunst post partum (p. p.) deutlichere Brunstsymptome gezeigt, als die mit einer Standardration gefütterte Vergleichsgruppe. Die Untersucher hatten eigentlich erwartet, dass die, durch die hochkalorische Fütterung entstandene stärkere negative Energiebilanz zu schwächeren Brunstsymptomen führen würde. Bei der dritten Brunst p. p. nahmen die Brunstsymptome dann aber im Vergleich zur zweiten Brunst ab. Insofern decken sich die Ergebnisse mit den Klagen von Landwirten über schwache Brunstsymptome am Ende der Gützeit. Allerdings war auch bei dieser Untersuchung die Fallzahl mit 32 (16 + 16) Kühen sehr gering. Dennoch müssen alle genannten Faktoren bei einem Vergleich verschiedener Brunsterkennungsmethoden bedacht werden.

4. Anforderungen an Brunsterkennungsmethoden

Wie bereits mehrfach erwähnt, stellen nichterkannte Brunsten ein enormes Problem für die Milchviehhaltung dar. Brunsterkennungsmethoden, die eine hohe Anzahl an falsch-positiven Ergebnissen produzieren, können allerdings ebenfalls einen sehr schädlichen Effekt auf die Fruchtbarkeitskennzahlen und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes haben, da eine künstliche Besamung zur falschen Zeit natürlich nicht zu einer Trächtigkeit führt (BORSBERRY, 2011), gleichwohl aber Kosten

verursacht.

Um den optimalen Besamungs- oder Anpaarungszeitpunkt zu identifizieren, muss eine geeignete Brunsterkennungsmethode deshalb idealerweise 24 Stunden am Tag die zuverlässige Detektion des Brunstverhaltens jedes einzelnen Tieres gewährleisten. Die kontinuierliche Überwachung ist deswegen so wichtig, weil der Anteil der Kühe, die während ihrer Brunst einen Duldungsreflex zeigen, im Laufe der letzten 50 Jahre von 80 % auf 50 % gesunken ist. Gleichzeitig hat die Duldungsdauer von 15 auf 5 Stunden abgenommen. Beide Faktoren zusammen haben den Anteil erfolgreicher Erstbesamungen von 70 % auf 40 % gesenkt (DOBSON et al., 2008). Andere Autoren geben die durchschnittliche Brunstdauer bei Rindern mit durchschnittlich 7 bis 11 Stunden an (ROELOFS et al., 2005a; DOBSON et al., 2007; SVEBERG et al., 2011). Hinzu kommt, dass in der Zeit zwischen 07:00 und 19:00 Uhr nur 34 bis 45 % der Kühe rindern, im Zeitraum zwischen 19:00 und 07:00 Uhr jedoch 55 bis 66 % (ROSSOW, 2005). Gerade in den Abend- und Nachtstunden entgehen dem Landwirt somit leicht die Brunstsymptome. Für britische Herden ermittelte ESSLEMONT (1992) eine durchschnittliche Brunsterkennungsrate von 51,9 %. Ein ähnliches Bild haben auch die Untersuchungen von HEUWIESER und MANSFELD (1995) ergeben. Diese zeigten für Deutschland Brunsterkennungsrate von rund 50 %. In Betrieben mit gutem Fruchtbarkeitsmanagement kann die Brunsterkennungsrate jedoch bei über 70 % liegen (ESSLEMONT, 1992). In milcherzeugenden Betrieben sollte die Brunsterkennungsrate idealerweise 60 bis 80 % betragen (BECKER et al., 2005).

Angesichts der multifaktoriellen, nicht immer einfach steuerbaren Einflüsse auf das Brunstgeschehen sollten Landwirte alle Möglichkeiten ausschöpfen, um die Effektivität der Brunsterkennung zu verbessern. Dazu gehört heute neben der umfassenden visuellen Brunstbeobachtung auch der Einsatz einer oder mehrerer zusätzlicher Brunsterkennungsmethoden (ROELOFS et al., 2010). Die optimale Methode soll idealerweise eine permanente Überwachung und eine sichere Identifikation brünstiger Tiere ermöglichen, wenig Arbeitsaufwand verursachen, kostengünstig sein und eine hohe Sensitivität gewährleisten

(DISKIN & SREENAN, 2000). NEBEL et al. (2000) fordern zur Verbesserung der Brunsterkennung zusätzlich die Bestimmung von mindestens zwei verschiedenen Parametern. Angesichts der kontinuierlich schlechter werdenden Fruchtbarkeitskennzahlen postulierte BORSBERRY (2011) deshalb, dass künftig jede Anstrengung unternommen werden muss, um die Treffsicherheit der Brunsterkennung zu verbessern, Zwischenkalbezeiten zu optimieren und Abgänge wegen schlechter Konzeptionsraten zu reduzieren.

5. Methoden zur Brunsterkennung

Gegenwärtig sind eine ganze Reihe von Verfahren bekannt und teilweise auch im praktischen Einsatz, die allesamt auf eine Verbesserung der Brunsterkennung abzielen, sich jedoch im jeweiligen methodischen Ansatz und den verwendeten Messgrößen deutlich vom in der vorliegenden Dissertation konzipierten Verfahren unterscheiden. Hierzu gehören unter anderem die visuelle Beobachtung, der Brunstkalender (Chronolaktor), Heat Mount Detektoren, Heat Watch Systeme, die Messung des elektrischen Widerstandes des Vaginalschleims, die Thermometrie, die Milchleistungserfassung, die Detektion von Vokalisationsereignissen, die Messung des P4-Gehalts in Milch und Blut, die Detektion von brunstspezifischen Duftstoffen sowie die Pedometrie in unterschiedlichen Varianten. Je größer die Herde ist und je höher dadurch die Personalkosten steigen, desto größer ist die Bereitschaft, auch technische Hilfsmittel für die Brunsterkennung einzusetzen (DISKIN & SREENAN, 2000).

Keine praxisrelevante Methode zur Brunsterkennung bei Rindern liefert Erkennungsraten von 100 % (siehe Tabelle 2). Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Erkennungsraten ist die Kombination verschiedener Methoden. In der Regel sind die Ergebnisse umso besser, je mehr Brunsterkennungshilfen angewandt werden. PERALTA et al. (2005) erreichten durch eine Kombination aus visueller Brunstbeobachtung, einem Heat Mount-Detektor und einem Transponder zur Aktivitätsmessung eine Brunsterkennungsrate von 80 %.

Tabelle 2: Methoden zur Brunsterkennung und deren Erkennungsraten, modifiziert nach Zieger (2004), Becker (2005) und Holman (2011)

Methode	Anteil richtig erkannter Brunsten (%)
Permanente Beobachtung	89 - 100
2 x täglich visuelle Brunstbeobachtung (früh/spät) je 20 Minuten	60 - 80
3 x täglich visuelle Brunstbeobachtung je 20 Minuten	74 - 85
5 x täglich visuelle Brunstbeobachtung je 20 Minuten	86
Heat Mount Detector (KaMaR®)	61 – 87
Heat Watch®	90 – 98
DEC™-System (n = 1616)	90
Messung der Bewegungsaktivität (Pedometer (SAE Afikim) oder Neck Collar (SCR Engineers))	55 – 95
Impedanz Vaginalschleim	70 – 85
Thermometrie	42
Milchleistung	33
Progesteronmessung	99
Geruchserkennung	80
Suchtiere	75 - 85
Neck Collar (SCR Engineers) + KaMaR®	76
Pedometer (SAE Afikim) + KaMaR®	76
Neck Collar (SCR Engineers) + visuelle Brunstbeobachtung	75
Pedometer (SAE Afikim) + visuelle Brunstbeobachtung	74

Als besonders effektiv hat sich bei einer neueren Untersuchung die Kombination aus visueller Brunstbeobachtung und dem Einsatz von Halsbändern (Neck Collar, SCR Engineers) zur Aktivitätsmessung erwiesen (HOLMAN et al., 2011). Insgesamt fünf Mitarbeiter eines Milchviehbetriebes (Laufstall) in Großbritannien beobachteten die Kühe (Holstein-Friesian, n = 67) fünfmal täglich für jeweils zehn Minuten. Dabei liefen die Mitarbeiter zwischen den Kühen umher und achteten auf Brunstanzeichen wie das gegenseitige Beschnüffeln der Vulva, das Ablegen des Kopfes auf dem Rücken der Herdenmitglieder, den Abgang von mukösem oder blutigem Vaginalschleim sowie Aufsprünge und Duldungen. Die so gewonnenen Daten wurden mit den Aktivitätsdaten des Neck Collar kombiniert. Interessant war hierbei der mit 92 % relativ hohe

positiv prädiktive Wert bei der Kombination aus visueller Brunstbeobachtung und Neck Collar. Zum Vergleich: Bei den anderen, in Tabelle 2 aufgeführten Kombinationen, lag der positiv prädiktive Wert zwischen 60 und 68 % (HOLMAN et al., 2011).

In der nachfolgenden Beschreibung verschiedener Methoden zur Brunsterkennung wurde versucht, die Reihenfolge am technischen Aufwand zu orientieren. Die Auflistung beginnt mit den einfacheren Verfahren und führt zu den technikbasierten Methoden.

5.1. Visuelle Brunstbeobachtung

Die visuelle Beobachtung des Tierverhaltens durch die Landwirte im Stall ist in den meisten Betrieben noch immer das einzige und global gesehen weiterhin das wichtigste Instrument zur Brunsterkennung. Als „Alleinmethode“ liefert sie jedoch sehr häufig keine verlässlichen Ergebnisse (Gründe: Brunst oft nachts, kurze Duldungsphasen etc.). Die Qualität der Brunsterkennung wird dabei durch die Faktoren „Erfahrung des Landwirts“, „Beobachtungsdauer“, „Anzahl der Beobachtungsphasen pro Tag“ und „Herdengröße“ bedingt. Für die Landwirte ist es in diesem Zusammenhang wichtig, verschiedenste Brunstsymptome erkennen und auch bewerten zu können (ROELOFS et al., 2005a). Für richtig positive Ergebnisse > 80 % sind 3 – 4 Beobachtungsphasen von jeweils 20 Minuten Dauer notwendig. Dieser Zeitaufwand kann heute, bedingt durch stetig wachsende Herdengrößen und Personalknappheit, in vielen Fällen nur mehr schwer geleistet werden.

Wichtigstes Kriterium bei der visuellen Brunstbeobachtung ist die Duldungsbereitschaft. Dabei ist das Tier, das besprungen wird und „steht“ (engl. standing heat), mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 – 95% in Brunst (HEUWIESER, 1997). Die Duldung gilt noch immer als das Kardinalzeichen für eine Brunst und liefert nur wenige falsch-positive Ergebnisse (BORSBERRY, 2011). Problematisch dabei ist jedoch, dass der Anteil der Kühe, die während ihrer Brunst einen Duldungsreflex zeigen, im Laufe der letzten 50 Jahre von 80 % auf 50 % gesunken ist (DOBSON et al., 2008) und über die Hälfte der Tiere den Duldungsreflex

nur noch in einem Zeitraum von weniger als 8 Stunden, etwa 30 % sogar weniger als 4 Stunden, zeigen (JUNG, 2009). Aus diesen Gründen wird klar, dass für eine gute visuelle Brunstbeobachtung neben der Duldung auch andere Brunstanzeichen beachtet werden müssen (ROELOFS et al., 2010). Hierzu gehören das gegenseitige Beschnüffeln der Vulva, das Ablegen des Kopfes auf dem Rücken der Herdenmitglieder, Unruhe, gegenseitiges Bespringen (ohne Duldung), Brunstschleim etc. Mit Hilfe eines Punktesystems kann jedes Symptom einzeln bewertet werden und so eine Brunst auch ohne Duldung erkannt werden (VAN EERDENBURG et al., 1996).

GORDON (2011) empfiehlt ein spezielles Training des Betriebspersonals durch Tierärzte, um die Brunstsymptome besser erkennen zu können. Mit Hilfe einer standardisierten Prozedur für die Brunstbeobachtung und des gezielten Einsatzes von Hilfsmitteln (Heat Mount-Detektoren, Aktivitätsmessung etc.) ist eine Steigerung der durchschnittlichen Erkennungsraten von 50 % auf über 70 % möglich.

5.2. Chronolactor

Gut strukturierte Aufzeichnungen über den Reproduktionsstatus jedes einzelne Tieres sind ein unerlässliches Hilfsmittel in der Milchviehhaltung (ROELOFS et al., 2010). Mit einem sogenannten Chronolactor können die wichtigsten Daten auf sehr einfache Weise direkt im Stall verfügbar gemacht werden. Beim Chronolactor handelte es sich ursprünglich um einen relativ simplen Wandkalender, auf dem der jeweilige Reproduktionsstatus und Managementaktionen wie z.B. Abkalbetermin, letzte Brunst, Besamungsdatum und Trächtigkeitsstatus der einzelnen Kühe einer Herde im Jahresverlauf dargestellt werden.

Da der genaue Zeitpunkt des Auftretens der Brunst aber unter dem Einfluss verschiedener Parameter (Alter des Tieres, Anzahl vorangegangener Trächtigkeiten usw.) gewissen Schwankungen unterliegt (BECKER et al., 2005), liefert ein Chronolactor nur einen mehr oder weniger ungenauen Anhaltspunkt für das Auftreten der nächsten Brunst. Inzwischen sind auch verschiedenste einfache PC-Programme erhältlich, die aber oft nur das Prinzip des Chronolactors digital abbilden und somit

ebenfalls keine genaueren Reproduktionsdaten liefern können. Bessere Ergebnisse erreichen Herdenmanagementprogramme (z. B. ALPRO™-Herdenmanagement, DeLaval) mit integriertem Chronolactor. Als Einzelmethode für die Brunsterkennung spielt der Brunstkalender heute keine Rolle mehr.

5.3. Suchtiere

Ein weiteres Verfahren zur Brunsterkennung beruht auf dem Einsatz von befruchtungs- oder deckunfähigen Suchbullen sowie von virilisierten Kühen. Diese sind in der Lage die Paarungsbereitschaft olfaktorisch durch beriechen der Vulva und des Urins zu erkennen (PHILLIPS, 2002). Die speziell in Nordamerika übliche Verwendung von Suchbullen ist in Deutschland aus verschiedenen Gründen unüblich. So widersprechen die Eingriffe zur Unterbindung der Befruchtungs- und Deckfähigkeit von Bullen und zur Virilisierung von Kühen eindeutig der Zielsetzung des deutschen Tierschutzgesetzes (BECKER et al., 2005).

Ein weiterer Grund ist, dass bei sterilisierten Bullen die Gefahr der Übertragung von Deckseuchen besteht. Dies gilt im Übrigen auch für die in zahlreichen Betrieben wieder zur Bedeckung von „Problemkühen“ eingesetzten fertilen Bullen. Zu beachten ist dabei weiterhin, dass ohne künstliche Besamung kein adäquater züchterischer Fortschritt möglich ist (VISHWANATH, 2003; OSTLER et al., 2005). Schließlich ist der Einsatz von Such- und Deckbullen auch im Hinblick auf den Arbeitsschutz bedenklich.

5.4. Erkennung des Östrus durch speziell trainierte Hunde

Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass Hunde darauf trainiert werden können, spezifische Gerüche zu detektieren. So werden Hunde vielfach dafür eingesetzt, um Sprengstoffe, Drogen oder auch bestimmte Krebserkrankungen beim Menschen zu riechen. Dies funktioniert auch für die Erkennung östrus-spezifischer Gerüche in Vaginalsekret, Milch oder Urin von Milchkühen. FISCHER-TENHAGEN et al. (2011) haben gezeigt, dass Hunde in der Lage sind, ganz generell den östrus-spezifischen Geruch von Kühen wahrzunehmen und durch das Training nicht auf den Duft einer einzelnen Kuh limitiert sind.

Die Studie hat zudem ergeben, dass es möglich ist, die Hunde durch die Präsentation von Vaginalsekret in Wattestäbchen auf die Östrus-Erkennung bei Kühen zu trainieren und damit gute Erkennungsraten zu generieren. In der Studie von FISCHER-TENHAGEN et al. (2011), erkannten die trainierten Hunde bis zu 80 % der Proben von östrischen Kühen richtig als positiv.

5.5. Brunsterkennung durch tierärztliche Untersuchung

Die rektale tierärztliche Untersuchung liefert gute Hinweise auf den Zyklusstand der Kühe: Im Östrus ist der Uterus unter Östrogeneinfluss ödematisiert und zeigt eine starke Kontraktionsbereitschaft. Das rückgebildete CL des vorherigen Zyklus ist derb und kleiner als 10 Millimeter. Leicht tastbar ist zudem der deutlich fluktuierende sprungbereite GF (GRUNERT, 1996).

Insbesondere bei Kühen mit schwacher äußerer Brunst oder bei Stillbrünstigkeit ist die rektale Palpation von Uterus und Ovarien ein wichtiges diagnostisches Mittel. Eine Studie von BICALHO et al. (2008) hat gezeigt, dass Tierärzte ein funktionelles CL palpatorisch mit einer Sensitivität von bis zu 68 % und mit einer Spezifität von bis zu 93 % feststellen konnten. Allerdings sind die Ergebnisse stark von der Erfahrung des Untersuchers abhängig, wodurch die Angaben in der Literatur zur Effektivität der Brunsterkennung durch tierärztliche Untersuchungen stark variieren. Unabhängig davon zeigten PHATAK et al. (1991), dass durch eine konsequente und regelmäßige tierärztliche Untersuchung die Fruchtbarkeitskennzahlen deutlich verbessert werden können. So stieg der Erstbesamungserfolg innerhalb einer Herde mit 700 Kühen von 42 % auf 59 % während sich die Günstzeit von 120 auf 98 Tage verkürzte. Die dadurch generierten zusätzlichen Einnahmen in Höhe von 46.000 \$ entsprachen einem return on investment von 4 zu 1, bezogen auf die Kosten für die tierärztlichen Leistungen.

Ordnungsgemäß durchgeführte tierärztliche Untersuchungen sind zudem die Grundvoraussetzung sowohl für die Einzeltierbehandlung als auch für strategische Fruchtbarkeitsprogramme wie etwa die Brunstsynchronisation mit PGF_{2α} (TENHAGEN & HEUWIESER, 1999).

5.6. Detektion von Vokalisationsereignissen

Mit Hilfe von „Vokalisationsereignissen“ soll ein anderes System die Brunst von Rindern detektieren (SCHON et al., 2007). Dazu werden die Lautäußerungen der Tiere mit einem Mikrophon aufgenommen und analysiert. Die Erfinder des Systems gehen davon aus, dass das periodische Wiederkehren der Brunst bei einem weiblichen Rind mit einer quantitativen Zunahme der Vokalisationsereignisse des Tieres einhergeht und folglich das Verfolgen dieser Vokalisationsereignisse über einen definierten Zeitraum Aussagen über den optimalen Anpaarungszeitraum erlaubt. Der durchaus interessante Ansatz hat sich bislang in der Praxis jedoch nicht durchgesetzt. Gründe dürften unter anderem die schwierige Zuordnung der Lautäußerungen zu den einzelnen Tieren sowie die überaus komplexe Ausfilterung von Störgeräuschen sein.

5.7. Nachweis des Duldungsreflexes

5.7.1. Farbmarkierungen

Trotz der unter 5.1 erwähnten Einschränkungen, gilt der Duldungsreflex als das sicherste visuell erfassbare Anzeichen für eine Brunst und somit als Hinweis auf eine Belegungsmöglichkeit (BECKER et al., 2005). Sichtbar gemacht werden können die Duldungen beispielsweise mit Hilfe von Heat Mount-Detektoren. Hierbei handelt es sich um Farbpatronen, die bei den kurz vor der Brunst stehenden Tieren im Bereich des Kreuzbeins angebracht werden. Springt nun ein anderes Tier der Herde bei dem brünstigen Tier auf, so hinterlässt diese Aktion eine Farbmarkierung auf dem Rücken des besprungenen Tieres.

Kommerziell sind die unterschiedlichsten Markierungssysteme erhältlich: zum Beispiel das Chin-Ball Mating Device® (Paviour Ltd., Neuseeland) und der KaMaR Heat Mount Detector® (Kamar Inc., USA). Eine Besonderheit weist das Bovine Beacon-System® (OmniGlow LLC, USA) auf: Der hier verwendete fluoreszierende Farbstoff ist auch bei schlechten Lichtverhältnissen gut sichtbar. Sehr einfache Varianten von Farbmarkierungen sind Farb- oder Kreidestriche (Tail painting) oder selbstklebende Pflaster (Estrus-Alert®, USA). Der Abrieb der Farben soll hier die Brunst anzeigen, wobei die Sensitivität gegenüber den

Farbpatronen schlechter ist (BECKER et al., 2005).

Alle Heat Mount-Systeme zeichnen sich durch ihre einfache Handhabung und die verhältnismäßig geringen Kosten aus. Allerdings sind die Fehlerquoten z.B. durch selbständiges Färben an Kuhbürsten etc. (falsch positiv) und durch undeutliche Färbungen oder abgefallene Detektoren (falsch negativ) sehr hoch. Zudem liefert ein erkannter Aufsprung noch keinen Hinweis auf eine tatsächliche Duldung. Dies kann beispielsweise bei nichtbrünstigen, aber lahmen Kühen passieren, die sich einem Aufsprung nicht schnell genug entziehen können (BECKER et al., 2005). Je nach Studie wird die Anzahl richtig erkannter Brunsten zwischen 60 und 90 % angegeben (ROELOFS et al., 2010). Folglich eignen sich Heat Mount-Detektoren als „stand alone-System“ nur sehr eingeschränkt.

5.7.2. Sensoren

Elektronische Systeme zur Detektion der Duldung setzen anstatt der Farbmarkierungen wiederverwendbare Drucksensoren ein. Beim französischen DEC™-System (Détection électronique de chevauchement) wird eine erfolgte Duldung in Form von Blinksignalen angezeigt. Die Frequenz der Blinksignale steigt dabei mit der Anzahl der Aufsprünge. Eine Alternative hierzu ist das Heat Watch®-System (USA). Heat Watch registriert sowohl die Aufsprungintensität als auch die Aufsprungdauer und leitet die Daten mittels einer eingebauten Sendeeinheit an einen Empfänger (PC) weiter.

In Untersuchungen von AT-TARAS und SPAHR (2001) zeigte diese Technologie mit der visuellen Brunstbeobachtung vergleichbare Brunsterkennungsraten von über 80 %. Problematisch ist aber bei beiden Systemen die sichere Befestigung des Sensors im Bereich des Kreuzbeins der Tiere. Hingewiesen sei an dieser Stelle auch noch einmal auf mögliche Probleme durch Kuhbürsten, Umweltfaktoren oder Lahmheiten, die eine effiziente Brunsterkennung beeinträchtigen können (ROELOFS et al., 2010). Zudem verursachen die Systeme hohe Investitions- und Wartungskosten. Alleine die Investitionskosten für die elektronischen Drucksensoren belaufen sich pro Kuh auf jeweils ca. 80 € (BECKER et al., 2005).

5.8. Elektrischer Widerstand des Vaginalschleims

Ein typisches äußeres Brunstsymptom ist der bei Tieren im Östrus zu beobachtende klare, fadenziehende Schleim, der sich in der Vagina ansammelt, aus der Vulva abfließt und an verschiedenen angrenzenden Körperregionen anhaften kann. Für das Betriebspersonal stellt der Brunstschleim ein wichtiges und offensichtliches Brunstbeobachtungskriterium dar, jedoch kein sicheres.

Technisch gesehen zeichnet sich dieser Schleim durch einen niedrigen elektrischen Widerstand (Tiefpunkt 25 h vor der Ovulation) aus. Hinweise auf eine Brunst liefert somit auch die Messung des elektrischen Widerstandes im Vaginalschleim der Tiere (ERADUS et al., 1992). Allerdings wird diese Eigenschaft durch sehr viele Faktoren beeinflusst (Harnabsatz, Entzündungen etc.), so dass die Ergebnisse nur sehr bedingt Auskunft über den Zyklusstand und vor allem eine aktuell vorliegende Brunst geben können (SENGER, 1994). Als manuelles Verfahren verursacht die Messung zudem enorme Arbeitskosten. Telemetrische Verfahren zur Widerstandsmessung sind sehr teuer (300 - 1.500 € pro Kuh) und unzuverlässig (BECKER et al., 2005).

5.9. Thermometrie

Bereits seit den 1980er Jahren wurde immer wieder versucht, die Körperinnentemperatur der Tiere (direkt) und die Milchtemperatur (indirekt) als Parameter zur Brunsterkennung heranzuziehen (SCHLUNSEN et al., 1987). Es ist bekannt, dass die Körperinnentemperatur zum Östrus hin absinkt und etwa zwei Tage vor der Brunst, also im Proöstrus, ein Minimum erreicht, das etwa 0,3 °C tiefer als im Diöstrus (Tag 10) liegt. Während der Brunst steigt die Temperatur dann wieder um 0,1 – 0,5 °C (LEWIS & NEWMAN, 1984; ERADUS et al., 1992). Eine rektale Messung der Temperatur ist damit ausgeschlossen, da die Ergebnisse, abhängig von der messenden Person, der Eindringtiefe des Thermometers und des verwendeten Thermometermodells, um bis zu 0,5 °C abweichen können (BURFEIND et al., 2010). Die manuelle Messung der Körpertemperatur in der Vagina (im Bereich der Portio vaginalis) liefert verlässlichere Messergebnisse, ist aber zeitintensiv und in der Praxis kaum durchführbar. LEWIS und NEWMAN (1984) verwendeten

bei ihren Untersuchungen eine spezielle digitale Sonde, die eigentlich für Temperaturmessungen im Rektum und im Oesophagus konstruiert wurde und die mit Hilfe eines Besamungskatheters in Position gebracht wurde.

Mit Hilfe von Implantaten kann die Körpertemperatur auch automatisiert gemessen werden. Von MORAIS et al. (2006) wurde beispielsweise ein Radio frequency-Transmitter vorgeschlagen, der aus einem on-chip-Temperatursensor, einer Batterie und einer Antenne aufgebaut ist und gleichzeitig Leitfähigkeitsdaten liefert. Das Mikrosystem besteht aus einem gewebeverträglichen Material und kann dadurch in die Muskulatur der Vulva implantiert werden. Die Aussagekraft hängt hier aber stark von der genauen Position des Implantats und dem Ladezustand der kontinuierlich schwächer werdenden Batterie ab. Zusätzlich können schwankende Umgebungstemperaturen, Einflüsse von Tages- und Jahreszeiten, fiebrige Erkrankungen etc. die Ergebnisse von Temperaturmessungen beeinflussen (BREHME, 1997).

Ein weiterer möglicher Messpunkt ist der Pansen. Um Pansenazidosen, die durch falsche Fütterung ausgelöst werden, zu vermeiden, wurden von GASTEINER et al. (2009) drahtlose Sensoren vorgeschlagen, die direkt im Pansen den pH-Wert bestimmen und gleichzeitig die Temperatur messen. Der Sensor ermittelt und speichert die Daten in frei wählbaren Intervallen und übermittelt sie dann beim Melken an ein Empfangsgerät. Problematisch ist auch hier die limitierte Lebensdauer der Sensor-Batterien, die - abhängig vom eingestellten Messintervall - von wenigen Tagen bis einigen Wochen reicht.

Alternativ zur Körper- kann auch die Milchtemperatur gemessen werden. Die Temperaturmessung erfolgt hier kontinuierlich in der Milch (Sammelstück). Umwelteinflüsse und Messfehler wirken sich hier besonders negativ auf die Effektivität des Systems aus. So konnten SCHLÜNSEN et al. (1987) in einem Zeitraum von zwei Jahren lediglich 42 % der Brunsten über die Milchtemperatur detektieren. Insgesamt haben die genannten Probleme bisher den Praxiseinsatz dieser Methoden verhindert.

5.10. Milchleistungserfassung

Auch über die Erfassung der Milchleistung wurde gelegentlich versucht, Hinweise auf ein Brunstgeschehen zu erhalten (KING, 1977; LEWIS & NEWMAN, 1984; SCHLUNSEN et al., 1987). Bei Milchkühen sinkt die Milchleistung während der Brunst um etwa 2 – 6 % (KING, 1977). Allerdings haben beispielsweise SCHOFIELD et al. (1991) festgestellt, dass der Rückgang bei der Milchleistung nur bei 33 % der Tiere erkennbar ist. Insofern ist diese Methode für eine verlässliche und zielführende Brunstbeobachtung nicht geeignet.

5.11. Progesteronbestimmung

Der Nachweis des Gelbkörperhormons P4 liefert für die buiatrische Gynäkologie diagnostisch wertvolle Hinweise auf den Zyklusstand. Die P4-Menge kann sowohl in Blutplasma und Blutserum als auch in Milch bestimmt werden (MEYER et al., 1986; FIRK et al., 2002). Der Nachweis im Blut spielt allerdings aus praktischen Gründen eine untergeordnete Rolle. In den letzten Jahren wurde vor allem an der Optimierung von Verfahren gearbeitet, bei denen über eine Messung des P4-Gehalts in der Milch Rückschlüsse auf den Zyklusstand möglich sein sollen. Das Steroidhormon wird unter physiologischen Bedingungen im Diöstrus und während der Trächtigkeit im CL produziert. So ist ein rasches Absinken der P4-Konzentration von > 10 auf < 3 ng/ml Vollmilch ein Hinweis auf den beginnenden Proöstrus (DÖCKE, 1994). Für Magermilch gilt nach MEYER et al. (1986) ein Wert von $< 0,4$ ng/ml als hinweisend. Somit kann die P4-Bestimmung bei „In-line“-Messsystemen (bei jeder Melkzeit erhoben) über den dynamischen Verlauf einen Hinweis auf einen brunstnahen Zeitraum geben. Nicht zuletzt deshalb wird die P4-Bestimmung in Magermilch immer wieder als Referenzmethode für die Validierung anderer Brunsterkennungsmethoden verwendet (SCHOFIELD et al., 1991; STEVENSON & PHATAK, 1999).

Allerdings kann eine niedrige P4-Konzentration auch andere Ursachen haben. Hingegen schließt eine hohe Konzentration lediglich eine Brunst aus. Ein weiteres Problem sind der hohe Messaufwand und die häufig notwendigen Wiederholungsmessungen (ERADUS et al., 1992). Hinzu kommt, dass die Methode für die Beurteilung von nichtlaktierenden

Rindern, also vor allem von Färsen, nicht geeignet ist.

Die inzwischen verfügbaren semiquantitativen Schnelltests (z. B. Hormonost®, Biolab GmbH, Unterschleißheim, TARGET Bovine CL Chek®, BioMetallics Inc., Princeton, USA oder eProCheck®, Minitüb, Tiefenbach, Deutschland) eignen sich lediglich für den Einsatz bei Einzeltieren.

5.12. Aktivitätsmessung

Gute Ergebnisse mit Brunsterkennungsrate von bis zu 90 % werden mit der Aktivitätsmessung erzielt (FIRK et al., 2002), die es derzeit in zwei Varianten gibt. Bei der Pedometrie werden Schrittzähler an den Tieren befestigt (in der Regel am Fesselgelenk). Das zweite System (z. B. Heatime®, Fa. Semex) arbeitet mit Sensoren (sogenannten Repaktoren), die an den Halsbändern (Neck Collar) angebracht sind. Die Messgeräte erfassen die Bewegungsaktivitäten der Kühe automatisch und kontinuierlich. Bei den Sensoren handelt es sich entweder um einen Quecksilberschalter oder um eine magnetische Metallkugel, die sich in einer Mulde zwischen zwei Kupferspulen befindet. Bewegungen verursachen eine elektrische Spannung. Die entstehenden Impulse werden gezählt, gespeichert und über Lesegeräte (zum Beispiel am Melkstand) zu einem Computer übertragen (WANGLER et al., 2005).

Die Pedometrie nutzt die Tatsache, dass die Bewegungsaktivität während der Brunst deutlich ansteigt (siehe Abbildung 1). Im Durchschnitt ist die Bewegungsaktivität der Tiere in der Brunstperiode im Vergleich zu nicht-brünstigen Tieren etwa viermal so hoch (KIDDY, 1977; SCHLUNSEN et al., 1987; SCHOFIELD et al., 1991). Auf der anderen Seite können beispielsweise Klauenerkrankungen oder ein Body Condition Score < 2,0 für falsch negative Ergebnisse sorgen (HOLMAN et al., 2011), da Kühe mit diesen Merkmalen schwächere Brunstsymptome zeigen. Als Konsequenz wird die Sensitivität der Pedometrie negativ beeinflusst (WALKER et al., 2010). Die Brunsterkennungsrate ist bei den meisten Untersuchungen sehr hoch und liegt zwischen 80 und 90 %. Allerdings weisen Fehlerraten zwischen 17 und 55 % auf eine große Anzahl falsch-positiver Brunstwarnungen hin (FIRK et al., 2002). Untersuchungen von

HOLMAN et al. (2011) zeigten für die Aktivitätsmessungen (Neck Collar und Pedometer) allerdings nur Erkennungsraten von 59 bzw. 63 % sowie falsch-positive Brunstwarnungen von 42 % bei den Pedometern. Die große Herausforderung für die Weiterentwicklung der automatischen Brunsterkennung ist es also, einen Weg zur Reduzierung der falsch-positiven Alarme zu finden (FIRK et al., 2002; WANGLER et al., 2005; HOLMAN et al., 2011).

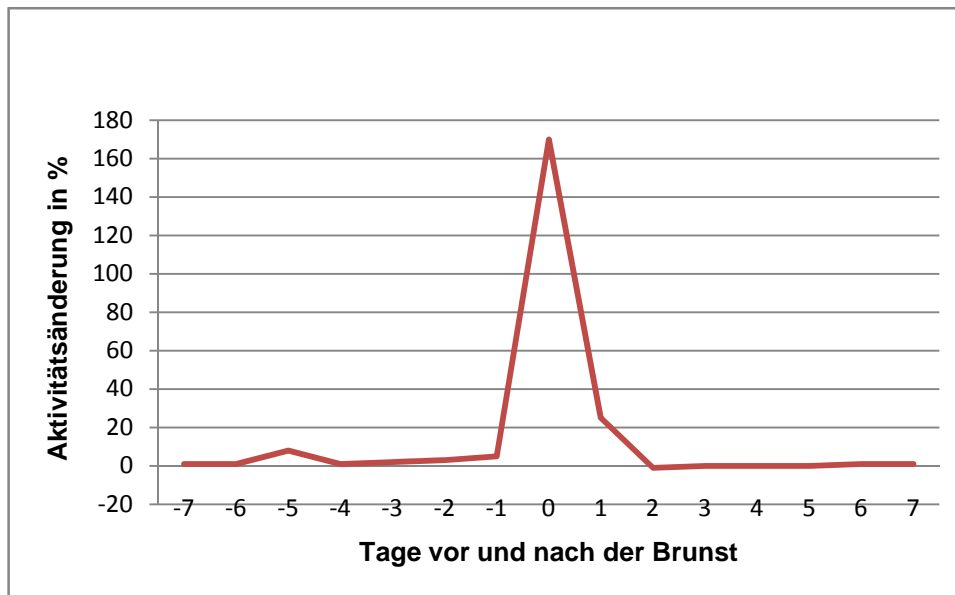


Abbildung 1: **Prinzip der Aktivitätsmessung zur Brunsterkennung nach Wangler (2005)**. Anstieg der Bewegungsaktivität während der Brunst im Vergleich zu den Tagen vor der Brunst (im Beispiel um ca. 170 %). Der prozentuale Anstieg bezieht sich dabei auf den gleitenden Mittelwert der Aktivitäten der vorangegangenen 10 Tage.

6. Maschinelles Sehen

Mit dem Begriff „Maschinelles Sehen“ wird im Allgemeinen die elektronische Verarbeitung von Bildinhalten bezeichnet. Im Gegensatz zu einer am visuellen System des Menschen orientierten Bildbetrachtung geht es bei der Bildverarbeitung aber darum, bestimmte Objekte innerhalb der Bilder zu detektieren, ihre Eigenschaften zu erkennen und auf Basis dieser Ergebnisse Prozesse zu analysieren und/oder zu steuern. Der rasante Fortschritt in der Bildsensorik und der Computertechnologie haben das maschinelle Sehen inzwischen zu einem Standardwerkzeug für Wissenschaftler und Ingenieure gemacht (JÄHNE, 2005). Zum Einsatz

kommen entsprechende Bildverarbeitungssysteme in den unterschiedlichsten Bereichen. Hierzu gehören heute noch vor allem die Industrieautomatisierung und Robotik. Aber auch im nicht-industriellen Umfeld wie etwa in der Verkehrstechnik, der Sportanalyse oder der Medizin spielen Bildverarbeitungssysteme eine zunehmend größere Rolle. Die teilweise hochkomplexen Ausführungsarten bestehen aus vielen einzelnen Komponenten wie Optiken, Beleuchtungen, Kameras und Software (STEMMER, 2010).

Um ein Objekt im Rahmen des maschinellen Sehens erkennen und von anderen Objekten unterscheiden zu können, muss es zunächst mathematisch beschrieben werden. Eine besondere Form dieser Objektbeschreibung und -erkennung ist die Skalierungsunabhängige Transformation von Bildmerkmalen (Scale-Invariant Feature Transform, kurz: SIFT), die LOWE (1999) veröffentlicht hat. Dieses Objekterkennungsverfahren benutzt spezielle lokale Bildmerkmale, die unempfindlich sind gegenüber Koordinatentransformationen wie Translation, Rotation oder Skalierung, die durch die Änderung des Standpunktes eines Objektes innerhalb eines Raumes entstehen. Auch bei einer wechselnden Beleuchtung, bei Bildrauschen und bei einer geringen geometrischen Deformation sind die extrahierten Merkmale unveränderlich. Für die Objekterkennung werden schließlich die definierten unveränderlichen Merkmale von gespeicherten Beispielbildern eines jeden Objektes in Echtzeit mit den jeweils aktuellen Bildinhalten verglichen.

Mit der von LOWE (2004) vorgeschlagenen Erweiterung der Methode zur Extraktion von hochmarkanten unveränderlichen Merkmalen ist es möglich, einzelne Merkmale mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer großen Datenbank, bestehend aus Merkmalen bekannter Bilder, abzugleichen. Zum Einsatz kommt hier ein nearest-neighbor-Algorithmus, gefolgt von einer Hough-Transformation mit der die zu einem einzelnen Objekt eines Bildes gehörenden Cluster identifiziert werden. Am Ende des Prozesses erfolgt eine Überprüfung des Ergebnisses durch die Methode der kleinsten Quadrate wodurch sich letztlich nachvollziehbare Modellparameter ergeben. Mit diesem Verfahren ist es möglich, selbst ineinander

verschachtelte und teilweise verdeckte Objekte innerhalb eines Bildes mit hoher Genauigkeit und in Echtzeit zu identifizieren.

III. MATERIAL, TIERE UND METHODEN

1. Material

1.1. Labor

1.1.1. Geräte für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch

Gefrierschrank (-20 °C)	(Einzelhandel)
Kühlschrank (+6 °C)	(Einzelhandel)
Kühlzentrifuge „Rotina 420 R“	(Hettich, Tuttlingen)
Laborgläser, 100 ml	(Schott AG, Mainz)
Laborwaage „SBC22“	(Scaltec Instruments, Heiligenstadt)
pH-Meter „inoLab®“	(Wissenschaftlich Technische Werkstätten, Weilheim)
Photometer „Spectra Classic“	(Tecan, Crailsheim)
Pipetten, einstellbar (1-10 µl, 10-100 µl, 20-200 µl, 100-1.000 µl, 1-5 ml)	(Biohit, Köln)
Pipetten, einstellbar, „Transferpette®“, 0,5-10 µl, 2-20 µl	(Brand, Wertheim)
Plattenwascher “Tecan Columbus Plate washer”	(Tecan, Crailsheim)
Reinstwassersystem „GenPure“	(TKA, Niederelbert)
Rüttler für Mikrotiterplatten „MTS 4“	(IKA, Staufen)
Schüttler „Vortex Genius 3“	(IKA, Staufen)
Wasserbad, Temperatur regulierbar	(Daglef Platz, Wankendorf)

1.1.2. Verbrauchsmaterial für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch

Mikrotiterplatten „NUNC-Immuno Maxi Sorp F 96“	(Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA)
Pipettenspitzen	(Biohit, Köln)
Probenröhrchen, 14 ml, Polypropylen (PP)	(Sarstedt, Nümbrecht)
Tubes (U-bottom Bulk), 1,4 ml	(Micronic B.V, Lelystad, Niederlande)

1.1.3. Reagenzien für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch

Antigen: Progesteron-7 α -BSA	(SIGMA-ALDRICH, Steinheim)
Antikörper: 2H4-Anti-Progesteron (Schaf-Anti-Ratte IgG)	(SIGMA-ALDRICH, Steinheim)
Chromogen: Tetramethylbenzidin	(Merck, Darmstadt)
Enzym: Prog 3-HRP-CMO	(SIGMA-ALDRICH, Steinheim)

1.1.4. Puffer und Lösungen für die Bestimmung von Progesteron in Magermilch

Assay-Puffer:

7,12 g Na₂HPO₄ x 2 H₂O
8,50 g NaCl
1 g Albumin (BSA)
in 1 l Aqua dest.
mit 5N HCl auf pH 7,2 eingestellt

Coating-Puffer:

4,29 g Na₂CO₃ x 10 H₂O
2,93 g NaHCO₃
in 1 l Aqua dest.
mit 1N HCl auf pH 9,6 eingestellt

Substratlösung A für Peroxidase:

1,0 g Wasserstoffperoxid-Harnstoff
18,0 g $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$
10,3 g Zitronensäure $\times \text{H}_2\text{O}$
100 μl Kathon
auf 1 l Aqua dest.

Substratlösung B für Peroxidase:

Lösung 1

400 mg 3,3',5,5'-Tetramethylbenzidin
in 40 ml Aqua dest. lösen

Lösung 2

960 ml Aqua dest.
10,3 g Zitronensäure $\times \text{H}_2\text{O}$

Waschlösung:

2 ml Tween80-Konzentrat / l Aqua dest.
(entspricht 0,5 g Tween80 / l Aqua dest.)

Stopreagenz:

4N H_2SO_4
(hergestellt aus 100 ml H_2SO_4 konz. + 800 ml Aqua dest.)

1.2. Kameras

GigE-Monochrom-Kameras „GC1391M“	(Smartek, Cokovec, Kroatien)
Internet Protocol-Farbkameras „AXIS 223M“	(Axis Communications, Lund, Schweden)

1.3. Marker

Polystyrolplatten, 2 mm stark	(Lindstädt, Augsburg)
PVC-beschichtetes Gewebe, „hytex® cargo H5551“	(Julius Heywinkel GmbH, Bramsche)
PVC-Folie, 500g/m ² , bedruckt, Rückseite selbstklebend beschichtet	(Lindstädt, Augsburg)
Tiermarkierungsfarben (blau, grün, gelb, weiß, schwarz), Spray und Stift	(Wahl, Dietmannsried)

1.4. Computer-Hardware

LCD-Monitor, 19“	(HannStar, Taipei, Taiwan)
Standard-PC, „Cooler Master™“ (Core i7-Prozessor, 2 x 1,5 Terabyte HDD, 3 GB RAM, GigE-Netzwerkkarte, 100 Mbit-Standardnetzwerkkarte)	(WTMO Deutschland GmbH, Augsburg)

1.5. Computer-Software

API "GigE-Vision SDK, Version 2.5.2.0"	(Smartek, Cokovec, Kroatien)
Betriebssystem „Windows® Vista“	(Microsoft Inc., Redmond, USA)
Bildverarbeitung „OpenCV“ (Open Source)	(opencv.willowgarage.com)
Camera Calibration Toolbox for Matlab® (Open Source)	(California Institute of Technology, Pasadena, USA)
Datenbank, „SQL Express 2005“	(Microsoft Inc., Redmond, USA)
Datenbankzugang „SQLAPI++“ (Shareware)	(SQLAPI.com)
GUI, graphische Benutzeroberfläche	(Larsen, Augsburg)
Markererkennung „ARToolkitPlus“ (Open Source)	(Studierstube, Technische Universität Graz, Österreich)
Realbildaufzeichnung „Netcam Watcher® Professional“	(Beausoft Ltd., Pukekohe, Neuseeland)
Scale-Invariant Feature Transform „SIFT-Algorithmus“	(University of British Columbia, Vancouver, Kanada)

2. Versuchsbetrieb, Tiere

Der Versuchsbetrieb (Kochelseemilchhof GbR) im oberbayerischen Schlehdorf besaß im Zeitraum der Datenerhebung ca. 140 laktierende Tiere. Die durchschnittliche Milchleistung betrug 7.800 kg pro Jahr. Die Zwischenkalbezeit lag bei durchschnittlich 370 Tagen, der Body Condition Score zwischen 2,0 und 3,75. Gehalten werden die Tiere in einem Laufstall. Der Kaltstall ist planbefestigt und verfügt über Tiefliegeboxen. Zur Herde gehören Kühe verschiedener Rassen (Fleckvieh, Holstein Friesian, Braunvieh, Hybride). Die Herde wird von der Klinik für Wiederkäuer mit Ambulanz und Bestandsbetreuung der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München seit dem Jahr 2009 regelmäßig betreut. Bei den alle zwei bis drei Wochen stattfindenden Bestandsbesuchen werden Puerperalkontrollen, Trächtigkeitsuntersuchungen, Sterilitätsuntersuchungen und Sterilitätsbehandlungen sowie eine Fütterungsüberwachung und -beratung durchgeführt.

Etwa eine Woche p. p. kommen die Kühe in eine Hochleistungsgruppe mit maximal 72 Tieren, in der sie 2 bis 3 Monate bleiben. Der für diese Gruppe reservierte Stallbereich hat eine Grundfläche von 32 x 12 m. Von insgesamt 77 Tieren, die sich während des Erhebungszeitraums zwischen dem 28.02.2011 und dem 03.06.2011 in dieser Gruppe befanden, wurden die Bewegungsdaten analysiert. Parallel dazu wurde der Zyklusverlauf mittels wiederholter P4-Messungen dokumentiert und dann mit den Brunstdetektionsdaten verglichen. Zum Vergleich dienten Tiere im Diöstrus sowie azyklische und tragende Tiere.

3. Methoden

3.1. Progesteronbestimmung

Um den Zyklusstand der einzelnen Versuchstiere zuverlässig bestimmen zu können, kam als „Goldstandard“ die Analyse der P4-Werte zum Einsatz. Mit den in Magermilch gemessenen Werten wurden Hormonprofile erstellt und der Abfall der Konzentration zur Brunst hin erkannt. Die Verwendung von Magermilch war notwendig, weil P4 aufgrund seiner lipophilen Eigenschaften vornehmlich im Milchfett gelöst ist und ein schwankender Milchfettgehalt somit direkten Einfluss auf die Menge des zu bestimmenden P4 hat. Nur ein geringerer Teil des P4 ist an Proteine gebunden, wobei die Löslichkeit im Fett 50-100mal höher ist als in der wässrigen Eiweißphase (MEYER et al., 1986).

Ausgewertet wurden die Proben über die photometrische Erfassung der Farbreaktion eines kompetitiven, heterologen Enzym-Immuno-Assays (EIA), der im Labor der Klinik für Wiederkäuer der LMU München etabliert ist (Antikörper: monoklonaler IgG1 aus der Ratte; Antigen: Progesteron-7 α -BSA; Enzym: Progesteron-3-CMO-HRP; Chromogen: Tetramethylbenzidin; Nachweisgrenze: 0,2 ng/ml; Probe: 5 μ l Magermilch).

Dreimal pro Woche wurden beim Abendmelken Vollmilchproben aller Versuchstiere gesammelt und zunächst bei -20 $^{\circ}$ C tiefgefroren. Tabelle 3 zeigt die Herstellung der für den EIA benötigten Magermilch.

Tabelle 3: Aufbereitung der Milchproben

Arbeitsschritte	Geräte, Material
Milchproben auftauen, Fett emulgieren	Wasserbad mit 37 $^{\circ}$ C
Milchproben über Kopf zentrifugieren (Milchfett sammelt sich am Boden der Röhren)	Zentrifuge (4 $^{\circ}$ C, 17 min, 3.309 g)
Dekantieren der überstehenden Magermilch in Probengefäße	Tubes (U-Bottom-Bulk), 1,4 ml
Überführen der Magermilch auf Mikrotiterplatten	Mikrotiterplatten

Die Analyse des P4-Gehalts in der Magermilch ist in Tabelle 4 beschrieben.

Tabelle 4: Nachweis von P4 in Magermilch

Arbeitsschritte	Aufwand
Mikrotiterplatten auftauen, 2 x waschen	2 x 400 µl Tween80/well
Pipettieren: Standard, Kontrollen, Proben, Marker, Antikörper	je 5 µl/well je 50 µl/well
Ablauf der Immunreaktion	über Nacht im Kühlschrank auf Schüttler inkubieren
Platten abkippen und 5 x waschen	5 x 400 µl Tween 80/well
Farbreaktion starten (Substrat A und B 1:1 mischen)	150 µl Substratmischung/well 30 min bei Raumtemperatur im Dunkeln auf Schüttler inkubieren
Farbreaktion stoppen	50 µl 4N H ₂ SO ₄ /well
Messen	photometrisch bei 450 nm

Die Gesamtdauer für die Analyse eines Probensatzes beträgt inklusive notwendiger Inkubationszeiten etwa 36 Stunden. Nach MEYER et al. (1986) können die so gewonnenen P4-Daten in drei Kategorien gruppiert werden: < 0,4 ng/ml Magermilch keine Lutealphase („Brunst“); 0,4 – 1,0 ng/ml Beginn oder Ende der Lutealphase („Übergangsphase“); > 1,0 ng/ml Lutealphase (Diöstrus oder Trächtigkeit).

3.2. Maschinelles Sehen

Für die Erfassung und Analyse der Bewegungsmuster der Kühe im Laufstall haben wir in unserem Projekt das sogenannte „maschinelle Sehen“ eingesetzt. Dabei werden bestimmte Objekte innerhalb der Bilder detektiert und ihre Eigenschaften erkannt. Auf Basis dieser Ergebnisse konnten die mit den Objekten verbundenen Parameter (hier: Orts-/Zeitmarken) für die Analyse unterschiedlichster Fragestellungen (Aktivität, bevorzugte Aufenthaltsorte etc.) verwendet werden. Das System bestand aus speziellen Kameras, Tiermarkierungen (Marker), einer gesteuerten Beleuchtung sowie der notwendigen Hard- und Software.

3.2.1 Bildaufzeichnung und -verarbeitung

3.2.1.1 Realbildaufzeichnung

Für die Realbildaufzeichnung kamen zwei Internet Protocol-Kameras (IP-Kameras) des Typs AXIS 223M (siehe Abbildung 2) zum Einsatz. Das Modell 223M verfügt über einen 1/2.7“ RGB-CCD Bildsensor mit progressiver Abtastung und liefert bei einer Motion JPEG-Videokomprimierung eine maximale Auflösung von 1.600 x 1.200 Pixeln (= 2 Megapixel, MP) (AXIS, 2008). Die in ca. 6 m Höhe an der Stalldecke befestigten, in Staubschutzgehäusen eingebauten und mit Weitwinkelobjektiven ausgestatteten Kameras wurden über CAT-5-Netzwerkkabel an einen PC angeschlossen. Mit jeder der beiden Kameras konnte etwas mehr als die Hälfte des zu beobachtenden Stallabteils eingesehen werden.



Abbildung 2: **AXIS 223M (ohne Staubschutzgehäuse)**, zur Realbildaufzeichnung (Bild: Mit freundlicher Genehmigung der Fa. AXIS Communications)

Die Aufzeichnungssoftware war so eingestellt, dass pro Kamera alle zwei Sekunden ein Bild gespeichert wurde. Auf diese Weise war es möglich, die per Bewegungsanalyse detektierten Brunsten auch zu visualisieren, das heißt eine eventuell vorhandene Duldung brünstiger Rinder in einem Zeitrafferfilm darzustellen.

3.2.1.2 Marker-Tracking

Für die Erfassung der Ortsveränderungen der mit Markern gekennzeichneten Kühe („Tracking“) wurden insgesamt acht Gigasetix GigE Vision Kameras der Modellreihe GC1391M, mit 1/2" Sony CCD-Bildsensor, S/W und einer Auflösung von 1.392 x 1.040 Pixeln (= 1,45 MP) (siehe Abbildung 3) sowie einem dazu passenden Space Objektiv, 1/2", 3,5 mm Brennweite und C-Mount verbaut. Jede dieser 1,45 MP-Kameras war für die Erfassung einer Fläche von ca. 6 mal 8 m zuständig. Auf diese Weise ergab sich horizontal und vertikal eine rechnerische Auflösung von etwa 1,7 Pixeln pro Zentimeter (siehe hierzu auch 3.2.2). Die Übertragung der sich aus der hohen Auflösung ergebenden großen Datenmengen geschah über GigE Vision. Hierbei handelt es sich um einen von der

Automated Imaging Association initiierten Interface-Standard für die industrielle Bildverarbeitung. GigE Vision erlaubt den Einsatz von Standard-Hardware und -netzwerkkabeln und ermöglicht dennoch Datenraten bis 1.000 MBit/s sowie Kabellängen bis 100 m (AIA, 2011).



Abbildung 3: **Smartek GC1391M (ohne Objektiv)**, zur Bewegungserfassung (Bild: Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Smartek d.o.o.)

Bei den eingesetzten Weitwinkelobjektiven war eine spezielle Anpassung auf die räumliche Situation im Versuchsbetrieb erforderlich. Objektive bestehen prinzipiell aus mehreren einzelnen Linsen, durch die die Abbildung eines Weltpunktes auf einen Bildpunkt verzerrt wird. Weitwinkelobjektive weisen nun, insbesondere in den Randbereichen der Bilder, besonders starke Deformationen in Form von gekrümmten Linien auf. Da nun aber schon relativ kleine Verzerrungen zu einer großen Beeinflussung der Messdaten führen können, mussten die Objektive zunächst vermessen und deren Parameter bestimmt werden. Zum Erfassen dieser Parameter haben wir die Camera Calibration Toolbox für Matlab® verwendet, welche häufig in der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt wird (BOUGUET, 2010).

Zum Einmessen eines Objektivs auf eine Kamera wurden flächige Schachbrettmuster aus verschiedenen Winkeln und Richtungen aufgenommen. Auf den Bildern wurden manuell die Eckpunkte des

Schachbrettes im Bild markiert. Anhand der Verläufe der Linien des Musters konnte dann der Algorithmus der Toolbox die Verzerrungen berechnen. Zu den berechneten Parametern gehören der tatsächliche Bildmittelpunkt (in Pixeln), die Brennweite (in Pixeln) sowie die radiale und die tangentielle Verzerrung.

Installiert wurden die Kameras an einer dafür selbst konstruierten Aufhängevorrichtung aus Aluprofilen, an der auch die Lichttechnik angebracht war (siehe Abbildung 4). Der Focus-Objekt-Abstand betrug etwa 4 m. Der Anschluss der Kameras an den für die Datenspeicherung eingesetzten PC erfolgte mittels zweier GigE-Switches, die in der Lage waren, die von den Kameras gelieferten Jumbo-Frames zu verarbeiten. Jeweils 4 Kameras waren per CAT6-Netzwerkkabel an einen Switch angebunden. Vom rechnerfernen wurde ein Netzwerkkabel zum rechnernahen Switch und von dort ein weiteres Netzwerkkabel zum PC geführt.



Abbildung 4: **Kameraaufhängung**, Übersicht Versuchsbereich

3.2.2 Objekterkennung, Objektverfolgung

Um die Ortsveränderungen von Objekten in einem definierten Raum zuverlässig verfolgen zu können, müssen diese zunächst eindeutig und jederzeit erkannt werden. Dazu müssen entweder die Objekte selbst größere Unterschiede in Form und Farbe aufweisen oder aber individuell markiert werden.

3.2.2.1 SIFT, Scale-Invariant Feature Transform

Bei SIFT wird das gesamte zu „trackende“ Objekt als Marker betrachtet. Fellzeichnungen und markante Strukturen (z. B. Behornung) an den Tieren dienen in unserem Projekt zur Identifizierung. Mit Hilfe des SIFT-Algorithmus wurden dann die definierten unveränderlichen Merkmale von gespeicherten Beispielbildern eines jeden Objektes in Echtzeit mit den jeweils aktuellen Bildinhalten verglichen und die Testtiere erkannt.

3.2.2.2 2D-Matrixcode

Für die Objektmarkierung stehen inzwischen zahlreiche Toolkits zur Verfügung, die in der Regel ein oder mehrere Mustererkennungs-Werkzeuge beinhalten. Bei unserem Versuchsaufbau haben wir mit einer Software-Bibliothek aus dem Bereich Augmented Reality (AR, „Erweiterte Realität“) gearbeitet. Zum Einsatz kam das sogenannte ARToolkitPlus, das eigentlich dafür entwickelt wurde, um virtuelle Bilder oder Objekte in reale Bilder einzubinden. Das ARToolkitPlus arbeitet mit verschiedenen 2D-Barcodes und einer dazugehörenden Software, die diese Barcodes in Bildern erkennt und identifiziert. Diese zweidimensionalen Matrixcodes bestehen aus schwarzen Quadraten (= Dots, „Punkte“), die je nach ihrer Anordnung auf einer weißen Fläche für eine bestimmte Zahl kodieren (siehe Abbildung 5).

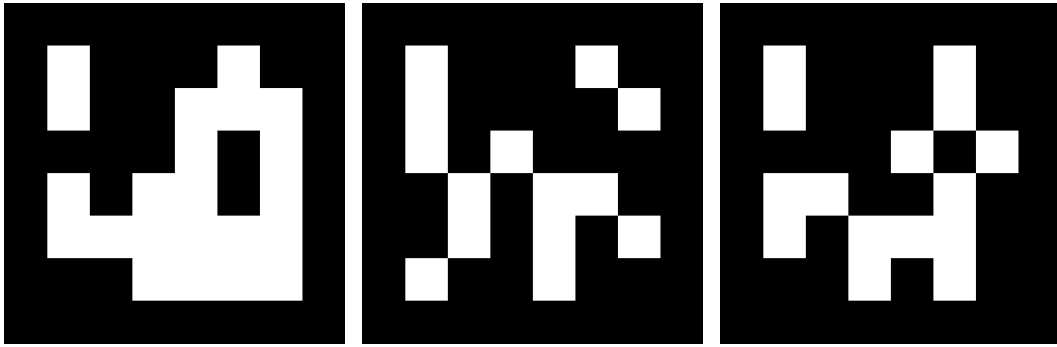


Abbildung 5: **Marker mit 2D-Matrixcode**, Beispiele mit 6 x 6 Dots. Der umlaufende schwarze Rand ist bei allen Markern gleich und zählt deshalb nicht zu den Dots.

In unserem Fall haben wir eine Matrix von sechs mal sechs Quadraten verwendet. Hieraus ergab sich eine theoretische mögliche Zahl von 4.096 unterschiedlichen Markern. Für die Erkennung eines Matrixcodes mit Hilfe einer Kamera sind mindestens 3 x 3 Pixel pro Dot notwendig. In unserem Fall lieferten die Monochrom-Kameras horizontal und vertikal eine Auflösung von jeweils 1,7 Pixeln/cm. Daraus ergab sich eine Mindestgröße pro Dot von rund 1,8 x 1,8 cm und eine Markergröße von insgesamt 14,4 x 14,4 cm. Aus Sicherheitsgründen haben wir die Markergröße schließlich auf 17 x 17 cm festgelegt, wodurch sich eine DOT-Größe von 2,125 x 2,125 cm und eine rechnerische Größe von 3,6 x 3,6 Pixeln pro DOT ergab.

3.2.2.3 Verwendete Markervarianten

Derzeit sind keine kommerziell hergestellten optischen Marker, die für ein Tracking von Kühen geeignet wären, verfügbar. Teil des Forschungsvorhabens war es deshalb auch, zuverlässige, stabile und gleichzeitig preisgünstige Marker zu entwickeln. Folgende Varianten wurden deshalb getestet:

Farbmarkierungen

Tiermarkierungsfarben sind in Form von Farbstiften, aber auch als Sprayfarben im Agrarfachhandel erhältlich. Damit wurde versucht, digital codierte und somit maschinenlesbare Ziffern auf dem Rücken der Kühe anzubringen. Die 2D-Matrixcodes wurden dabei mit Hilfe von speziell angefertigten Schablonen übertragen (siehe Abbildung 19).

Marker mit Schaumstoffkern

Zum Einsatz kamen hier gewebeverstärkte PVC-Folien mit einem Flächengewicht von 500 g/m². Die Rückseiten der 17 x 17 cm großen Folien waren selbstklebend beschichtet. Jeweils zwei dieser Folien sowie ein etwas kleineres, 2 mm starkes, quadratisches Schaumstoffstück wurden zu einem Marker zusammengesetzt, wobei eine der beiden Folien mit einer digitalisierten Ziffer (Matrixcode) bedruckt war. Für die Befestigung am Halsband der Kühe wurde zusätzlich ein etwa 40 cm langes und 14 mm breites Stück Rolladengurt eingeklebt (siehe Abbildung 20). Die Verbindung zu den Halsbändern wurde mittels Kabelbindern hergestellt.

Marker auf Polystyrolplatten

Diese Marker bestanden wiederum aus den bereits beschriebenen, bedruckten PVC-Folien. Diese wurden jedoch auf 2 mm starke und 18 x 18 cm große Polystyrolplatten aufgeklebt. Die Ecken der Platten waren zur Vermeidung von Verletzungen mit einem Radius von 4 mm abgerundet. Von diesem System wurden von uns zwei verschiedene Versionen getestet. In der ersten Variante befanden sich in der Mitte der Polystyrolplatten zwei ausgelaserte Schlitze, durch die ein 23 mm breiter Rolladengurt geführt wurde. Die Gurte selbst waren mit Heißkleber an den Platten befestigt und somit gegen ein Verrutschen gesichert. Auch in diesem Fall kamen Kabelbinder für die Verbindung der Marker zu den Halsbändern zum Einsatz (siehe Abbildung 21). Die zweite Version der Plattenmarker hatte per Laser gesetzte Löcher an zwei gegenüberliegenden Kanten. Über diese Löcher konnten die Platten mit Hilfe von Kabelbindern direkt an den Halsbändern angebracht werden, wobei die Versuchstiere hierfür jeweils zwei Halsbänder erhielten (siehe Abbildungen 22 und 23).

Marker auf beschichtetem Gewebe

Als Markerbasis kam ein PVC-beschichtetes Gewebe zum Einsatz. Das Material mit einem Flächengewicht von 900 g/m² weist eine hohe Reißfestigkeit (4.000 N/5 cm) sowie eine hohe Temperaturbeständigkeit über einen breiten Bereich (-30 bis +70 °C) auf. Zusätzlich lässt sich das Gewebe mit Hilfe von ca. 600 °C heißer Luft verschweißen. Um nun die

für uns notwendige Mischung aus Flexibilität, Stabilität und Haltbarkeit zu erzielen, wurden entsprechende Folienzuschnitte an den Kanten auf etwa 2 cm überschlagen und so zu achteckigen Markergrundlagen verschweißt. Dadurch entstand eine äußerst formtreue, aber gleichzeitig flexible Basis für die 17 x 17 cm großen 2d-Matrixcodes auf selbstklebenden Folien. Zur Befestigung an den Halsbändern der Kühe dienten wiederum 23 mm breite Rolladengurte, die über eingestanzte Ausbrüche an den Rändern geführt und mit Hilfe von Kabelbindern fixiert wurden (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: **Kuh mit Marker auf PVC-beschichtetem Gewebe**

3.2.3 Beleuchtung und Lichtsteuerung

Um die Ortsveränderungen der Kühe auch nachts verfolgen zu können, wurde eine zeitgesteuerte Beleuchtung mit Neonlampen installiert (siehe Abbildungen 4 und 6). Insgesamt kamen 8 Lampen mit einer Anschlussleistung von jeweils 58 Watt zum Einsatz. Die Lampen waren oberhalb der Kameras an den Aluprofilen befestigt und sorgten so für eine weitgehend gleichmäßige Ausleuchtung der Versuchsfläche. Die Beleuchtungsstärke in Markerhöhe lag zwischen 30 und 60 lx. Damit sich die Kühe an das nächtliche Dämmerlicht gewöhnen konnten, wurde die Beleuchtung bereits 6 Wochen vor Beginn der Datensammlung aktiviert.



Abbildung 6: **Kameraaufhängung mit eingeschalteter Beleuchtung**

3.2.4 Bilderfassung

3.2.4.1 Software für die Realbilderfassung

Um die Videobilder der beiden AXIS-Kameras aufzuzeichnen, verwendeten wir die Software Netcam Watcher Professional. Diese Software ermöglicht es, die Signale mehrerer Netzwerkkameras simultan aufzunehmen. Die Bilder werden dabei mit einer frei zu definierenden Frequenz im Motion-JPEG-Format aufgezeichnet. In unserem Fall wurde pro Kamera alle zwei Sekunden ein Bild gespeichert, wobei für jede Stunde eines Tages ein eigenes Verzeichnis für die Bilder angelegt wurde. Ein in die Software integrierter Motion-JPEG-Player zeigt die aufgenommenen Bilder mit zugehöriger Zeit als Film. Bei der verwendeten Aufnahmefrequenz von 30 Bildern pro Minute dauert das Abspielen der Bilder einer Stunde lediglich 72 Sekunden. Auf diese Weise ist es sehr einfach möglich, bestimmte Zeiträume innerhalb kürzester Zeit zu scannen und so die visuelle Bestätigung für die über das Brunsterkennungssystem detektierten Brunsten zu erhalten.

3.2.4.2 Tracking-Software

Für die reine Erkennung der Marker im Videobild wurde die Bibliothek ARToolkitPlus ("Augmented Reality Toolkit Plus") verwendet. Die im Rahmen der "Studierstube" entwickelte Bibliothek basiert auf dem Application Programming Interface (API) C++ und kann von der Homepage der Technischen Universität Graz heruntergeladen werden (STUDIERSTUBE, 2008). Bei ARToolkitPlus handelt es sich um eine Bibliothek, die Markerpositionen und -orientierungen in Echtzeit berechnen kann. ARToolkitPlus ist eine Open Source Software und erfüllt damit eine der wesentlichen Voraussetzungen für den problemlosen Einsatz in einem Forschungsprojekt. Dank der Kompatibilität zur Kamera-Kalibrierungstoolbox von Matlab® liefert ARToolkitPlus zuverlässige Tracking-ergebnisse.

Die Videodaten der GigE-Kameras wurden durch das vom Kamerahersteller mitgelieferte API (Smartek, GigEVision SDK, Version 2.5.2.0), welches ebenfalls auf C++ basiert, erfasst und aufgezeichnet. Das API ermöglichte es, einen Callback auf die Kameras zu registrieren und die Einzelbilder der Kameras direkt, das bedeutet ohne Komprimierung, zu verarbeiten.

Für die Darstellung der Videobilder und zur Visualisierung der aktuellen Trackingergebnisse kam die Bibliothek OpenCV zum Einsatz. Das CV im Namen steht für den englischen Begriff Computer Vision. OpenCV ist eine sehr weit verbreitete Programmierbibliothek mit Algorithmen für maschinelles Sehen und Bildverarbeitung, die für C und C++ geschrieben wurde. Sie steht als freie Software unter der BSD-Lizenz zur Verfügung und kann somit problemlos verwendet werden.

Gespeichert wurden die Trackingergebnisse mit Hilfe der SQL-Datenbank "SQL Express 2005" von Microsoft. Die SQL Server Express Edition ist eine kostenlos erhältliche Datenbankplattform und basiert auf dem Microsoft SQL-Server. Der SQL-Server ist ein relationales Datenbankmanagementsystem, das sich am Standard der aktuellen SQL-Version orientiert. Für den Zugriff auf die Datenbank per C++ wurde die Bibliothek SQLAPI++ verwendet (SQLAPI.COM, 2011).

Die Datentabelle enthielt folgende Spalten: Markernummer, Confidence (Vertrauenswürdigkeit), x-Koordinate des Markers, y-Koordinate des Markers, Zeitstempel, Mac-Adresse der aktuellen Kamera, IP-Adresse der aktuellen Kamera (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Grundlegender Programmablauf beim Markertracking

Schritt Nr.	Vorgang	Geräte / Tools
1	Aufzeichnen des Videostreams	Kameras, Switches, PC, Camera Calibration Toolbox für Matlab, Smartek API
2	Durchsuchen jedes einzelne Bildes nach quadratischen Flächen / Markern, Erkennung der Markernummer	PC, ARToolKitPlus
3	Wird ein Quadrat im Videobild gefunden, so berechnet das Programm aus dessen Lage, Größe, Perspektive und Muster die Positionen und Orientierung der Kamera im realen Raum in Relation zu diesem Quadrat	PC, ARToolKitPlus
4	Speicherung der Daten „Markernummer“, „Confidence“, „x-Koordinate des Markers“, „y-Koordinate des Markers“, „Zeitstempel“, „Mac-Adresse der aktuellen Kamera“ und „IP-Adresse der aktuellen Kamera“ in der SQL Datenbank gespeichert	PC, SQL Express 2005
5	Datenauswertung, -sortierung, -darstellung	PC, selbst entwickeltes GUI

3.2.5 Auswertung der Trackingdaten

Zur Auswertung der gespeicherten Daten wurde unter C-Sharp (C#) eine eigene graphische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt, die es ermöglicht, Trackingdaten nach bestimmten Markernummern und Zeiträumen zu filtern, aus der Datenbank zu laden und dann textuell oder visuell auszugeben. Auf diese Weise konnten über die Orts-/Zeit-Parameter sowohl die Bewegungsmuster der Kühe als auch ihre Beziehungen untereinander ermittelt werden.

3.2.5.1 Messung der Bewegungsaktivität

Jede der acht eingesetzten Giganetix GigE Vision Kameras war für die Erfassung einer Fläche von ca. 6 mal 8 m zuständig. Der gesamte Versuchsbereich des Laufstalls wurde so in acht etwa gleich große Teile aufgeteilt (siehe Abbildung 7) und automatisch auf Marker abgescannt.

7D	80	7E	7B
7A	81	7F	7C

Abbildung 7: **Einteilung des Stalles in 8 Abschnitte.** Die Zahlen/Buchstaben stehen für die letzten beiden Stellen der MAC-Adressen der Kameras.

Jedes Mal wenn die Software den Marker einer Kuh mit einer Confidence von mindestens 75 % erkannt hatte, wurde die dazugehörige Nummer, der Zeitraum sowie die Nummer des Stallbereichs in der Datenbank gespeichert (siehe Abbildung 8). Für die Bewegungsanalyse wurden die Ortsveränderungen der Tiere aufgezeichnet. Der Wechsel von einem Kamerasegment in ein benachbartes erhielt dabei den Wert „1“. Ein Trackingwert von beispielsweise „100“ bedeutet somit, dass das betreffende Tier in der betrachteten Zeiteinheit 100 mal von einem der acht virtuellen Bereiche des Stalles in einen benachbarten gewechselt ist.

Die so für jede einzelne Kuh ermittelten Trackingwerte wurden in Excel-Tabellen übertragen, wobei sich große tierindividuelle Aktivitätsunterschiede zeigten. Da jedoch nicht die absolute Aktivität des Einzeltieres entscheidend ist, sondern die Aktivitätssteigerung während des Östrus, wurde für jede Kuh und für jeden Betrachtungstag ein individueller Basiswert berechnet. Wie auch von WANGLER et al. (2005)

beschrieben, verwendeten wir als Basiswert einen gleitenden Mittelwert der jeweils letzten 10 Tage (siehe Abbildung 9).

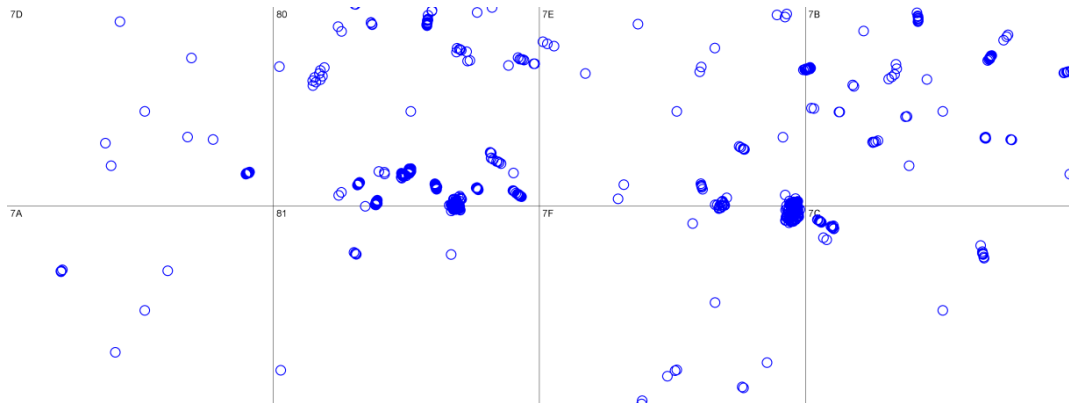


Abbildung 8: **Graphische Darstellung der Aufenthaltsorte einer Kuh.** Anhand der Dichte der Punktwolken sind auch bevorzugte Aufenthaltsorte zu erkennen.

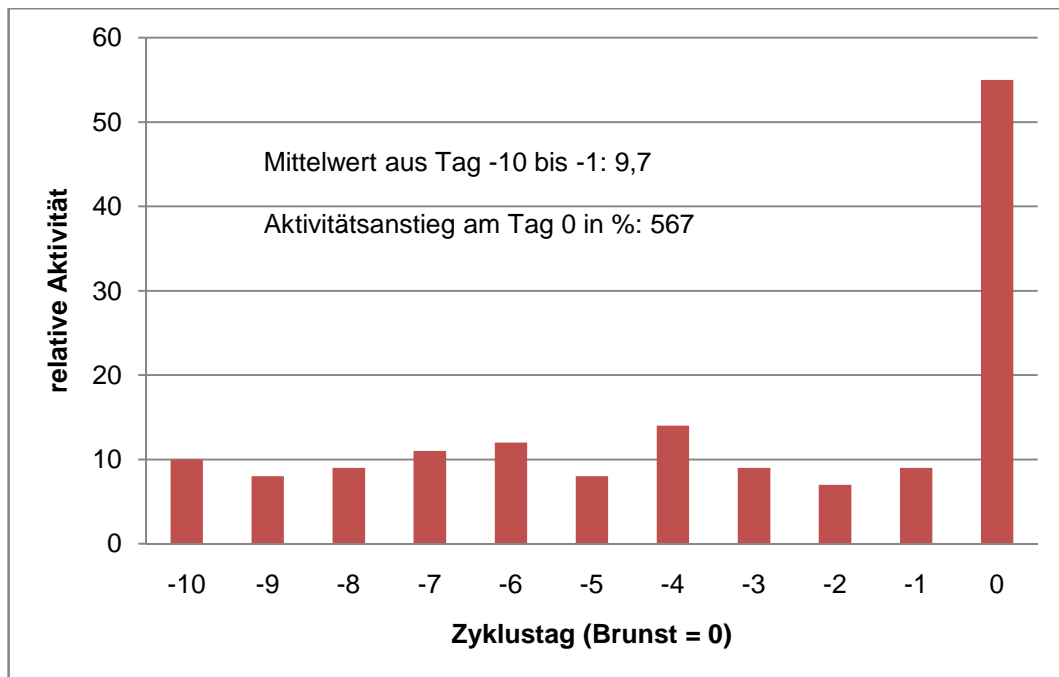


Abbildung 9: **Gleitender Mittelwert der Aktivitätswerte.** Die Abbildung illustriert am Beispiel einer in den Hauptversuch einbezogenen Versuchskuh den typischen Aktivitätsanstieg am Tag 0 des Zyklus. Der prozentuale Anstieg am Brunsttag bezieht sich auf einen Mittelwert aus den 10 Tage zuvor registrierten Aktivitäten.

Überstieg nun die Differenz des aktuell betrachteten Tages den Mittelwert um einen (für das System ermittelten) festgesetzten Grenzwert (z. B. +300 %), galt diese Aktivitätssteigerung als Hinweis auf eine Brunst. Zur Verifizierung der Bewegungsdaten wurden die über die Milchproben ermittelten Progesteronwerte mit den Bewegungsdaten abgeglichen (siehe Abbildung 10).

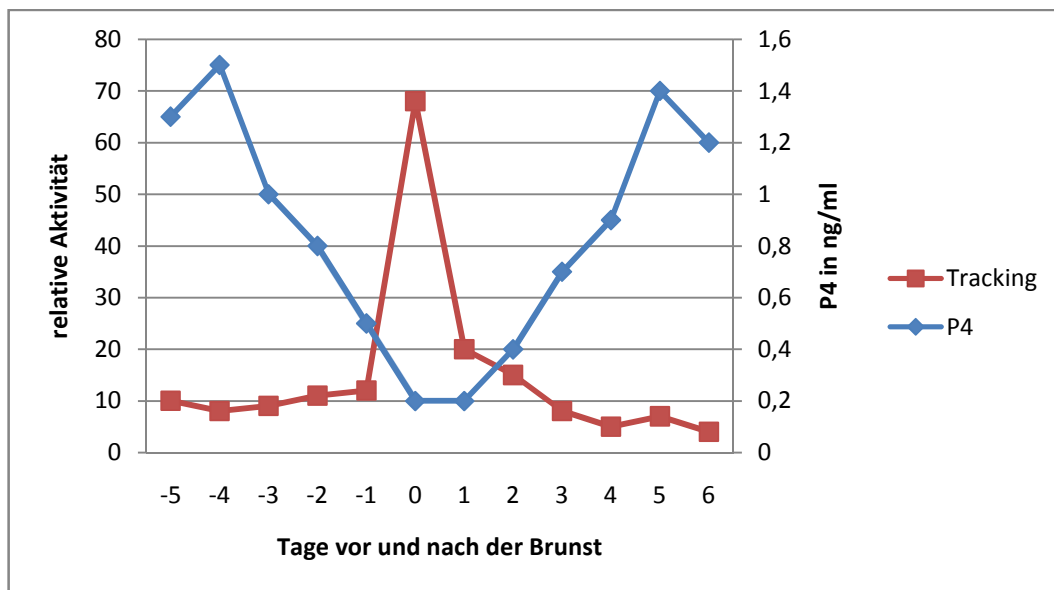


Abbildung 10: **Zusammenhang zwischen Bewegungsaktivität und P4-Konzentration.** Die Abbildung illustriert am Beispiel einer in den Hauptversuch einbezogenen Versuchskuh das typische Absinken des P4-Gehalts in Magermilch auf Werte unter 0,4 ng/ml während der Brunst sowie den gleichzeitig zu beobachtenden Anstieg der Bewegungsaktivität.

Zusätzlich wurden bei den Kühen die immer wieder zu beobachtenden geringeren Aktivitätsanstiege während des Diöstrus und während der Trächtigkeit untersucht und mit den Östrus-Werten in Beziehung gesetzt.

3.2.5.2 Detektion von Sozialkontakten

Um die Sensitivität und die Spezifität der Aktivitätsmessung zu optimieren, wurde von uns ein völlig neuer Parameter eingeführt. Es handelt sich dabei um die Detektion und Beurteilung von Sozialkontakten. Bei den bereits über die Aktivitätsmessung als brünstig erkannten Kühen wurden die Aufenthaltsorte und -zeiten am Zyklustag 0 festgestellt und dann mit den Daten aller anderen Herdenmitglieder abgeglichen. Erfasst werden mit dem, von uns als Varianz der Sozialkontakte bezeichneten Parameter die Zeiten, die andere Herdenmitglieder mit einer brunstverdächtigen Kuh verbracht haben. Das aus den Minutenwerten berechnete Streuungsmaß, die Varianz, zeigt, ob es einzelne Tiere gibt, die überdurchschnittlich viel Zeit mit der brünstigen Kuh verbracht haben (siehe Abbildung 11).

Ziel war es herauszufinden, ob sich andere Kühe gehäuft im selben Kamera-Segment und zur selben Zeit wie die brünstige Kuh aufhielten und sich damit eine sexuell aktive Gruppe nachweisen lies. Der gehäufte Kontakt zu einzelnen anderen (peri-)östrischen Herdenmitgliedern („Begleitkühe“) wurde als zusätzlicher Hinweis auf die Brunst der betrachteten Kuh gewertet (siehe Abbildung 12). Als Vergleichswerte dienten die Sozialkontakte der jeweiligen Kühe während des Diöstrus und während der Trächtigkeit.

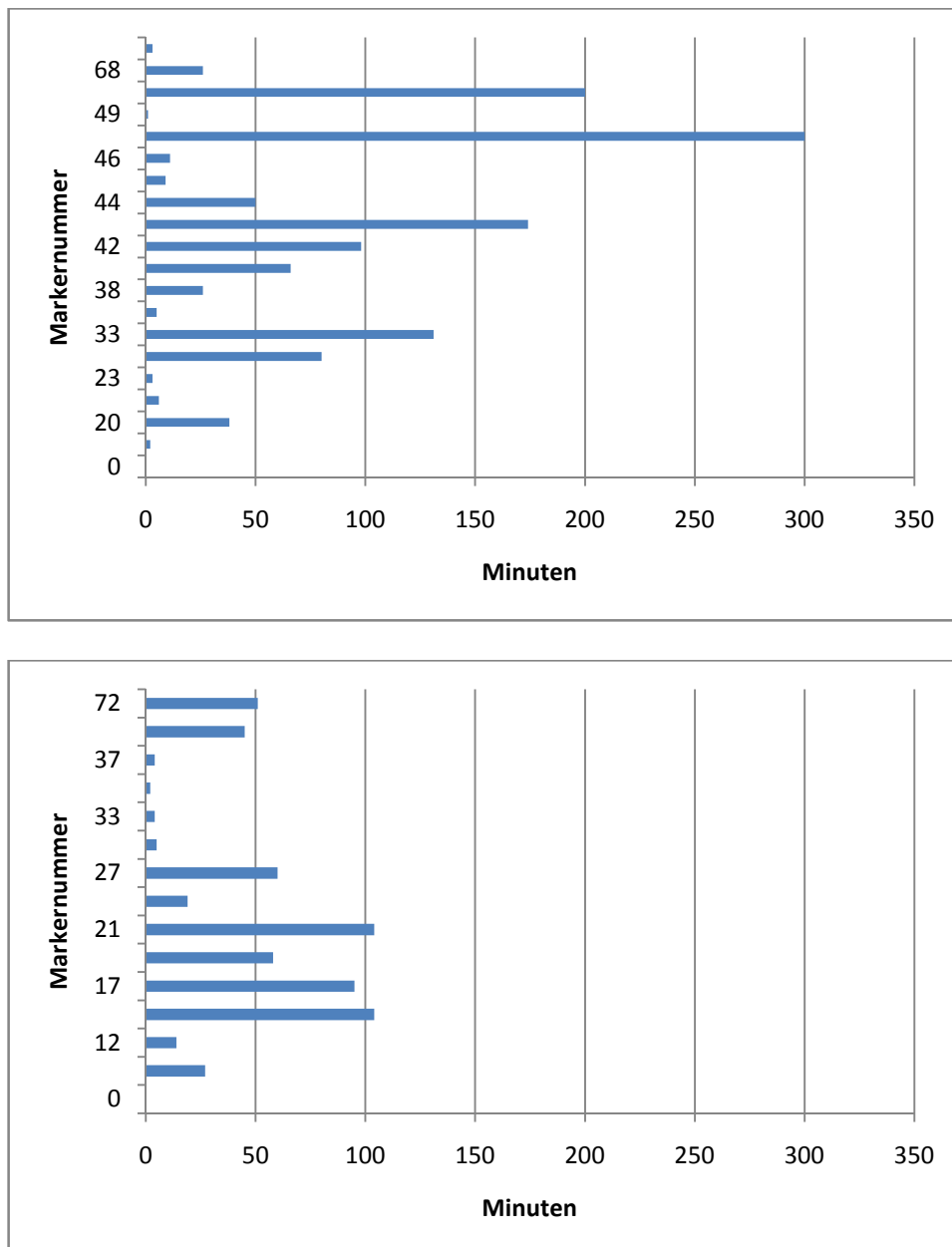


Abbildung 11: **Graphische Darstellung der von anderen Herdenmitgliedern mit einer betrachteten Kuh gemeinsam verbrachten Minuten. Oben:** Zu erkennen ist, dass die Anzahl der Minuten bei zwei ebenfalls brünstigen Tieren (Markernummern 48 und 64) überdurchschnittlich hoch ist. Hieraus ergibt sich eine hohe Streuung der Minutenwerte und damit eine hohe Varianz (im Beispiel 1,64). **Unten:** Zu erkennen ist, dass es hier keine Kühe mit einer überdurchschnittlich hohen Anzahl an gemeinsam verbrachten Minuten gibt. Die Streuung der Minutenwerte ist deshalb gering, die Varianz somit niedrig (im Beispiel 0,79).

Für die Erfassung der Sozialkontakte wurde ein eigener Algorithmus entwickelt, der die entsprechenden Sozialkontakte entdeckt. Der Ablauf ist in Tabelle 5 dargestellt.

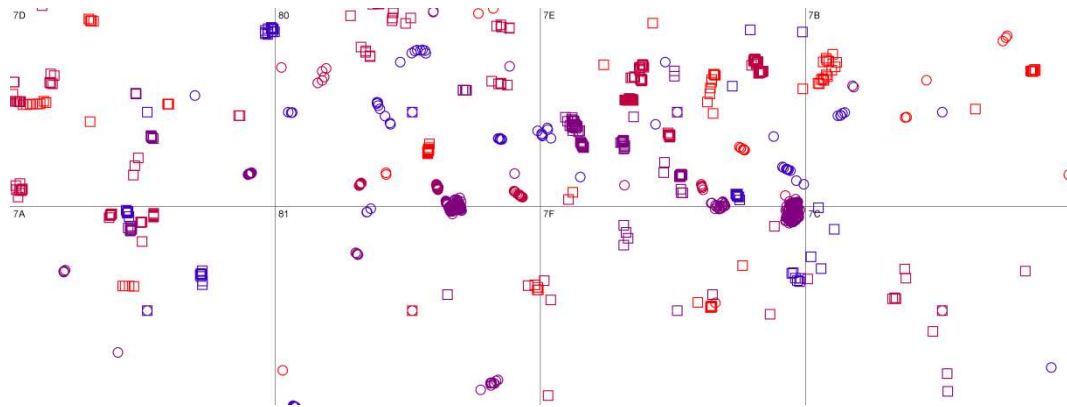


Abbildung 12: **Graphische Darstellung der Sozialkontakte.** Gemeinsamer Aufenthalt einer brünstigen Kuh (Kreis) und einer Begleitkuh (Quadrat) in den einzelnen Kamerafeldern. Die Zeit ist als Farbverlauf dargestellt, der von Rot in Blau übergeht. Gleiche Farben sind dementsprechend gleichbedeutend mit dem zeitgleichen Aufenthalt in einem bestimmten Segment.

Tabelle 5: Ablauf des Algorithmus zur Erfassung der Sozialkontakte

Arbeitsschritte	Ablauf Algorithmus
Zeitraum definieren (Brunsttag der zu analysierenden Kuh)	Eingabe in GUI
Scannen des definierten Zeitraums (Erfassen der Daten der zu analysierenden Kuh)	Der Algorithmus durchsucht alle Trackingdaten innerhalb des gewünschten Zeitraumes. Jedes Mal, wenn sich die aktuell zu untersuchende Kuh länger als zwei Minuten in einem bestimmten Bereich aufgehalten hat, wird dies gespeichert.
Scannen nach „Begleitkühen“ Abgleich mit der zu analysierenden Kuh	Die Aufenthaltsdaten aller anderen Kühe werden mit den gespeicherten Aufenthaltsräumen der zu untersuchenden Kuh verglichen. Die von den Begleitkühen gemeinsam mit der zu untersuchenden Kuh verbrachten Minuten werden gespeichert.
Summenbildung	Alle gespeicherten Aufenthaltszeiten werden für die jeweiligen Kühe summiert. Das Ergebnis sind die Minutenwerte, die die „Begleitkühe“ mit der zu untersuchenden Kuh gemeinsam verbracht haben.
Berechnung der Varianz	Überprüfung auf intensivierete Kontakte zu einzelnen anderen (ebenfalls sexuell aktiven) Herdenmitgliedern

4. Statistische Auswertung

Die Beobachtungsdaten wurden in einer SQL-Datenbank (SQL Express 2005, Microsoft Inc., USA) gespeichert und mittels Microsoft Excel (Version 2010, Microsoft Inc., USA) und SPSS (Version 19, IBM, USA) ausgewertet.

Zur graphischen Darstellung von Häufigkeitsverteilungen wurden Boxplots (Box-/Whiskerdiagramme) verwendet (siehe Abbildung 13).

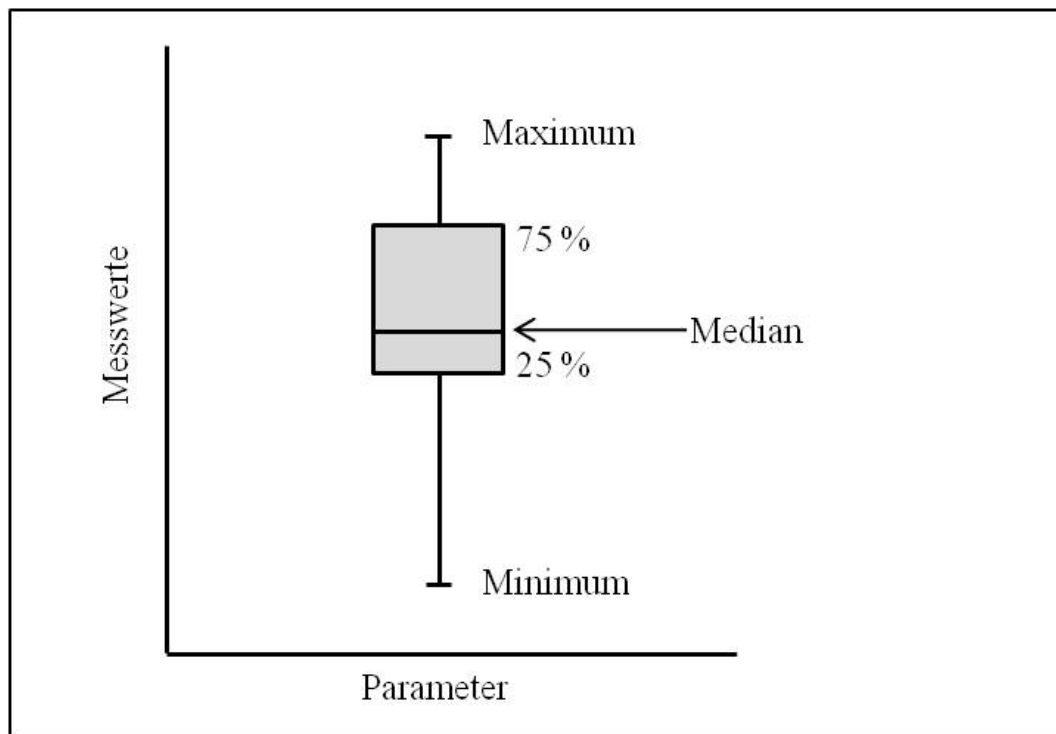


Abbildung 13: **Exemplarischer Aufbau eines Boxplots.** Der Median ist durch eine horizontale Linie gekennzeichnet. Sie teilt die Daten in zwei gleich große Hälften, in denen jeweils 50 % der Daten liegen.

Diese Diagramme sind gut dazu geeignet, um die Verteilungen der Werte unterschiedlicher Gruppen miteinander zu vergleichen. Die Box repräsentiert die zentralen 50 % der Werte (zwei Quartile) inklusive des Medians, wobei die Länge der Box dem Interquartilbereich entspricht. Die angrenzenden, T-förmigen „Whiskers“ (engl. für Schnurrhaare) stellen die Extremwerte außerhalb des 1. und 3. Quartils dar. Sie vermitteln dadurch einen Eindruck, wie weit die restlichen 50 % der Werte streuen (HARMS, 1998). Extremwerte außerhalb dieses Bereichs werden als milde Ausreißer in Form eines ° dargestellt. Werte außerhalb des dreifachen

Interquartilabstandes werden als extreme Ausreißer bezeichnet und mit * abgebildet.

Für die statistische Auswertung wurden die prozentualen Erhöhungen der Bewegungsaktivitäten und die Varianzen der Sozialkontakte mittels Kruskal-Wallis-Test zwischen den Gruppen (natürliche Brunst, PGF_{2α}-induzierte Brunst, nicht-brünstige Kühe) verglichen. Dabei wurden die Brunsten als unabhängige Ereignisse betrachtet. Bei signifikanten Ergebnissen im Kruskal-Wallis-Test wurden anschließend paarweise Vergleiche mit dem Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt.

Desweiteren wurden die Werte aller Kühe, bei denen Daten sowohl für den Östrus als auch für den Diöstrus und/oder die Trächtigkeit vorlagen, mit einem gepaarten Wilcoxon-Test verglichen.

Die Aktivitätserhöhungen und die Varianzen der Sozialkontakte wurden zusätzlich noch in einem gemischten Modell (Proc MIXED in SAS, Version 9.2, SAS Institute Inc., USA) auf Unterschiede zwischen den Tieren mit Brunst (natürlich und PGF_{2α}-induziert) und Tieren ohne Brunst untersucht. Dabei wurden die Werte logarithmiert, um normalverteilte Daten zu erhalten. In einem gemischten Modell wird für wiederholte Messungen innerhalb eines Tieres korrigiert, wobei der Tier-Effekt als zufällig angesehen und der Gruppen-Effekt (natürliche, PGF_{2α}-induzierte und keine Brunst) als fester Effekt angesehen wird.

Als statistisch signifikant wurden p-Werte von $\leq 0,05$ gewertet.

Mit Hilfe der Receiver Operating Characteristic-Analyse (ROC-Analyse) wurden die Cut-Offs für ein optimales Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität ermittelt (siehe Abbildung 14).

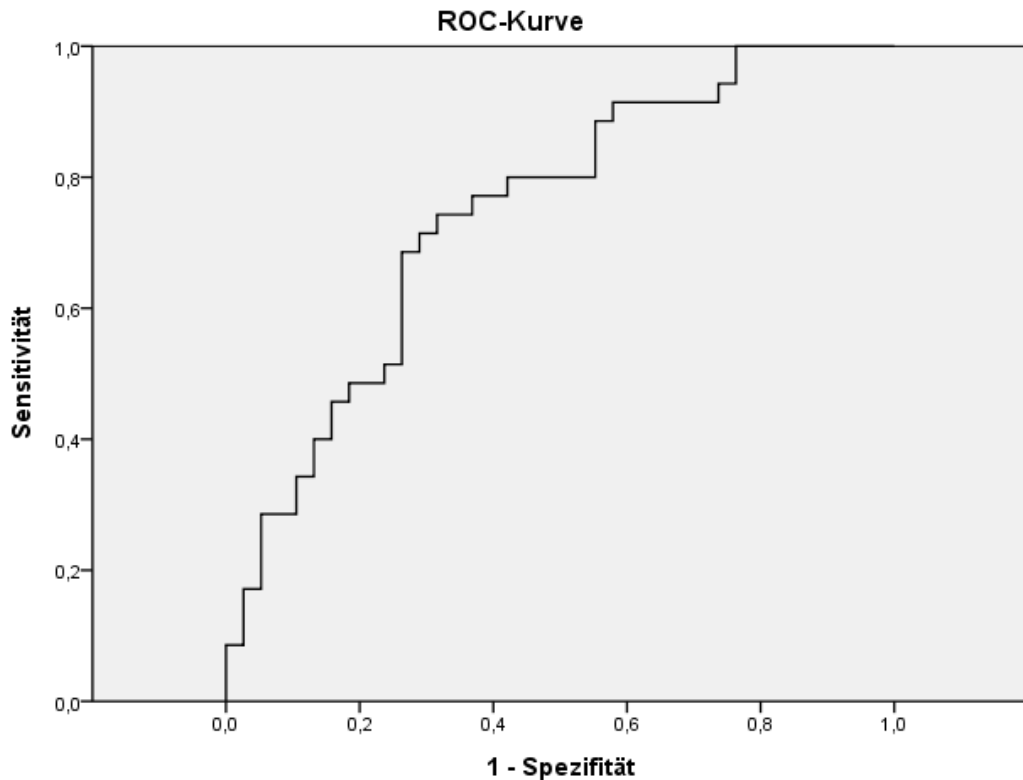


Abbildung 14: **Exemplarische Darstellung einer ROC-Kurve.** Die ROC-Kurve stellt visuell die Wertepaare von Sensitivität und 1-Spezifität eines diagnostischen Tests dar und veranschaulicht die Verringerung der Sensitivität zugunsten der Spezifität. Eine wichtige Kennzahl ist die Fläche unter der Kurve. Je größer diese Fläche ist (maximal 1,0), desto besser ist das Testergebnis.

Um die Häufung bestimmter Sozialkontakte von brünstigen Kühen zu zeigen, wurde für die Kühe, die sich am Brunsttag jeweils zur selben Zeit im selben Kamerafeld aufgehalten haben, die Anzahl der gemeinsam verbrachten Minuten ermittelt. Aus den Minutenwerten der Begleitkühe wurde jeweils die Varianz der Sozialkontakte berechnet. Zum Vergleich dienten die Minutenwerte der Begleitkühe, die während der Phasen sexueller Ruhe der betrachteten Kühe (Diöstrus oder Trächtigkeit) zu verzeichnen waren. Auch hierfür wurde die daraus resultierende Varianz bestimmt. Über eine ROC-Analyse wurde wiederum der beste Cut-Off-Wert für das ideale Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität festgelegt.

Schließlich wurden die Daten der Aktivitätsmessungen mit denen der Sozialkontakte kombiniert. Mittels binärer logistischer Regression wurde die Abhängigkeit des Brunststatus (ja/nein) von der Aktivitätserhöhung

und der Varianz der Sozialkontakte in Kombination untersucht. Dabei ergab sich aus den Regressionskoeffizienten eine Formel, die anhand der beobachteten Werte dieser zwei Parameter die Wahrscheinlichkeit schätzt, mit der das Tier brünstig ist. Dabei wurde ein Cut-Off für die Wahrscheinlichkeit von 0,5 gewählt.

IV. METHODISCHE ENTWICKLUNGSARBEITEN FÜR DIE AUTOMATISIERTE BRUNSTERKENNUNG - ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Grundlage unseres Versuchsaufbaus zur Etablierung einer neuen Methode zur automatisierten Brunsterkennung bei Rindern waren umfangreiche technische Vorarbeiten. Dies betraf insbesondere die Auswahl der geeigneten Kameratechnik sowie die Entwicklung einer praxistauglichen Objektmarkierung und -erkennung.

1. Kameratechnik

Die Umweltbedingungen innerhalb eines Laufstalles stellen für elektronische Geräte eine erhebliche Belastung dar. Dies gilt insbesondere für Kameras. Aus diesem Grund stellte sich bei der Projektierung des Versuchsaufbaus zunächst die Frage, welche Kameras bei den zu erwartenden Temperaturschwankungen (Winter / Sommer sowie Tag / Nacht), den schwierigen Lichtverhältnissen, dem hohen Staubanteil in der Luft und der teilweise erheblichen Luftfeuchtigkeit zuverlässig arbeiten würden.

1.1. IP-Farbkameras

Die Wahl fiel zunächst auf Kameras der Firma Axis, einem Hersteller von netzwerkfähigen Überwachungskameras. Mit zwei IP-Kameras des Typs AXIS 223M wurden zunächst Vorversuche im Betrieb in Schlehdorf durchgeführt.

Besonders interessant erschien bei diesem Modell die automatische Tag/Nacht-Funktionalität mit wegschwenkbarem Infrarot-Filter, die theoretisch eine höhere Empfindlichkeit bei ungünstigen Lichtverhältnissen bedingt.

Wie sich bei den Vorversuchen jedoch sehr schnell gezeigt hat, genügten diese Kameras nicht, um das von uns geplante „Tracking“ der einzelnen Tiere zu ermöglichen. Ursache hierfür war in erster Linie die mit 2 MP insgesamt zu geringe Auflösung der Farbkameras (siehe Abbildungen 15

und 16). Da in diesen Kameras ein einzelner CCD-Chip verbaut ist, liegt zur Erfassung der Farbinformationen über jedem Pixel ein Farbfilter. Diese Filter sind üblicherweise rot, grün sowie blau und in einem speziellen Muster, dem so genannten Bayer Filter Array, angeordnet. Die Zahl der grünen Pixel ist dabei doppelt so groß wie die der blauen und roten. Dadurch wird die höhere Empfindlichkeit des menschlichen Auges gegenüber grünem Licht nachempfunden. Ein verwendbares Vollfarbbild entsteht bei den Ein-Chip-Kameras somit erst durch die Interpolation der Farbwerte benachbarter Pixel. Dies hat zur Folge, dass die Ortsauflösung des Sensors auf $\frac{1}{4}$ der gesamten Pixelanzahl fällt und somit die theoretisch mögliche und für ein zuverlässiges Tracking notwendige Maximalauflösung nicht erreicht wird (STEMMER, 2010).



Abbildung 15: **Übersichtsaufnahme mit einer AXIS 223M.** Das Bild wirkt durch die geringe Auflösung verwaschen und unscharf. Selbst die großen Markierungen auf dem Rücken von drei Tieren sind kaum zu erkennen.



Abbildung 16: **Ausschnittsvergrößerung der Abbildung 15.** Die zu Testzwecken auf dem Rücken der Kuh platzierte Markierung ist elektronisch nicht erfassbar.

Hinzu kommt, dass die für Überwachungszwecke konzipierten Kameras die Rohdaten der Bilder mehr oder weniger stark komprimieren. Die Vorverarbeitung der Bilddaten ist beim normalen Einsatz der Kameras durchaus sinnvoll, da diese in der Regel nur für die Integration in 100 Mbit/s-Netze ausgelegt sind. Beim Tracking behindert die Kompression die Bildverarbeitung jedoch erheblich (siehe Abbildung 17).

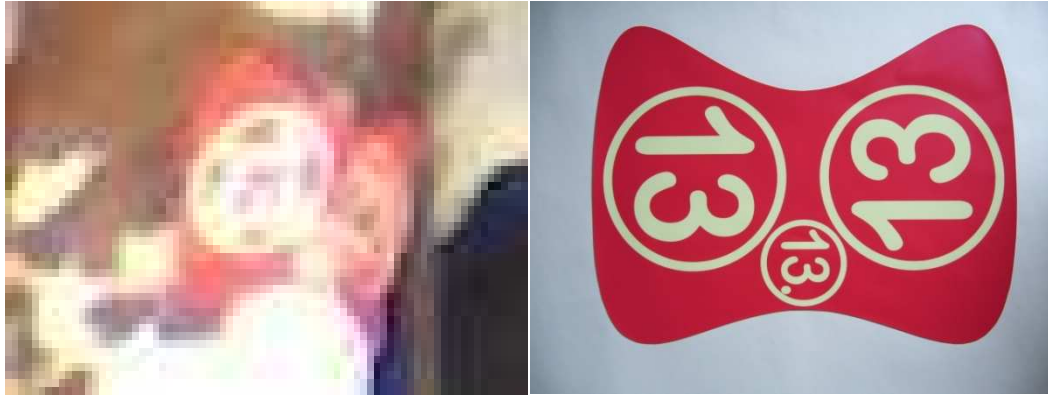


Abbildung 17: **Vergleichende Darstellung der Testmarkierung.** Linkes Bild: Durch die geringe Auflösung der IP-Kamera und die Komprimierung sind die Feinstrukturen der Markierung nicht mehr erkennbar. Rechtes Bild: Die zum Vergleich mit einem Fotoapparat (Lumix DMC-FX8, Panasonic) aufgenommene, ca. 50 x 35 cm große Testmarkierung.

Ein weiteres Manko ist, dass Überwachungskameras nicht primär für die Bildverarbeitung gedacht sind und dadurch in der Regel auch keine qualitativ hochwertigen Objektive verfügbar sind. Dies verhindert einen sinnvollen Einsatz, da Kamera und Objektiv prinzipiell als funktionelle Einheit zu betrachten sind.

Obwohl IP-basierte Überwachungskameras wegen ihrer Robustheit und Pflegeleichtigkeit zunächst als Ideallösung erschienen, zeigten unsere Untersuchungen, dass diese aufgrund ihres aktuellen Standes der Technik für ein zuverlässiges Objekt-Tracking ungeeignet sind. In unserem Projekt kamen Sie dennoch, jedoch für eine andere Anwendung, zum Einsatz. Im letzten Drittel des Versuchszeitraums dienten sie dazu, Videosequenzen für die Visualisierung von Brunsten aufzuzeichnen.

1.2. Digitale Fotoapparate

Als Alternative zu Videokameras wurde auch der Einsatz von digitalen Fotoapparaten geprüft (siehe Tabelle 7). Auf den ersten Blick erfüllen moderne digitale Fotoapparate perfekt alle Anforderungen an ein praxistaugliches System zur Bilderfassung/Bildverarbeitung: hohe Auflösung, hochwertige Objektive, relativ günstiger Preis.

Leider haben die weiteren Recherchen jedoch ergeben, dass derartige Fotoapparate sich für ein engmaschiges Tracking nicht eignen. Als

problematisch erwies sich der in allen diesen Apparaten fest eingebaute Infrarot-Filter. Um auch in der Nacht, bei IR-Licht, Bilder aufnehmen zu können, müssten die Kameras zunächst aufwendig umgebaut und dabei der IR-Filter entfernt werden. Ein weiteres Problem ist die meist nicht vorhandene Fernsteuerbarkeit mittels eines PC's.

Digitale Fotoapparate sind zudem nicht für den bei unserem Versuchsaufbau notwendigen Dauerbetrieb gebaut. So sind Spiegel und Verschluss der Kameras normalerweise für max. 400.000 Aufnahmen ausgelegt. Spätestens dann muss eine solche Kamera generalüberholt werden. Bei einer Frequenz von lediglich einem Bild pro Sekunde ergeben sich in einem Zeitraum von 24 Stunden bereits 86.400 Aufnahmen. Auch so genannte Systemkameras (kein Spiegel, mit Wechselobjektiv) kommen nicht in Frage. Diese besitzen zwar keinen mechanischen Spiegel, ein Verschluss ist aber natürlich auch hier vorhanden. Bei einer Untersuchung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zum Auslaufverhalten von Legehennen haben Peis und Haidn (2007) die Bilddaten zwar mittels vier hochauflösender digitaler Spiegelreflexkameras (6 Megapixel) erfasst. Das festgelegte Intervall zwischen den einzelnen Aufnahmen betrug allerdings eine Minute, eine Frequenz, die für unsere Anforderungen viel zu gering ist. Nach entsprechenden Vorversuchen mit unterschiedlichen Frequenzen (5 Bilder/s, 2 Bilder/s, 1 Bild/s, 1 Bild/2s, 1 Bild/5s) haben wir eine Frequenz von 1 Bild/s für die Bildanalyse festgelegt. Das gewählte Intervall ermöglichte es, die Laufwege der Tiere nachvollziehbar zu verfolgen und gleichzeitig das Datenvolumen zu begrenzen. Aufgrund der benötigten Frequenz und der angeführten technischen Einschränkungen wurden die digitalen Fotoapparate im Hauptversuch nicht eingesetzt.

1.3. GigE-Monochrom-Kameras

Im Zuge der umfangreichen Recherchen, Expertengespräche und Vorversuche hatte sich gezeigt, dass für die Anwendung des maschinellen Sehens in einem Rinderlaufstall höchste Ansprüche an die Bildqualität der eingesetzten Kameras gestellt werden müssen. Eine entscheidende Rolle spielt dabei eine hohe und vor allem auch tatsächlich verfügbare Auflösung. Diese resultiert aus verschiedenen Parametern. Hierzu

gehören neben der Pixelzahl der Sensor-Chips auch die Sensorgröße und die daraus resultierende Größe der einzelnen Pixel. Wie Tabelle 6 verdeutlicht, ist eine höhere Pixelzahl nicht immer vorteilhaft. Eine kleinere Sensor-Größe bedingt bei gleicher Sensor-Auflösung zwangsweise eine kleinere Pixelgröße, was vor allem bei schwierigen Lichtverhältnissen die Bildanalyse erschwert. Leider steigt der Preis für die Sensoren nicht linear mit deren Größe an. Wir haben uns deshalb letztlich für eine Kamera mit einem 1/2"-Sensor, einer Auflösung von 1.394 x 1.040 Pixeln und einer daraus resultierenden Pixelgröße von 4,7 x 4,7 µm entschieden. Die in Tabelle 6 angegebenen Werte sind Näherungswerte und differieren je nach Chiphersteller.

Tabelle 6: Pixelgröße in Abhängigkeit von Pixelzahl und Sensorgröße

	Sensor-Auflösung		
Sensorgröße	640 x 480 Pixel	1.394 x 1.040 Pixel	1.628 x 1.236 Pixel
1/4"	5,7 x 5,7 µm	2,8 x 2,8 µm	2,2 x 2,2 µm
1/2"	10 x 10 µm	4,7 x 4,7 µm	3,9 x 3,9 µm
2/3"	13,8 x 13,8 µm	7 x 7 µm	5,4 x 5,4 µm
1"	19,9 x 19,9 µm	10,2 x 10,2 µm	7,8 x 7,8 µm

Wie bereits unter Punkt 1.1. beschrieben, wirkt sich ein Bayer-Filter negativ auf die Auflösung aus. Für die Erkennung schwarz-weißer 2D-Matrixcodes sind Monochrom-Kameras deshalb besser geeignet als Farb-Kameras. Zudem weisen Monochromkameras einen größeren Dynamikbereich (Verhältnis zwischen der kleinsten und der größten Lichtmenge, die von einem Sensor gemessen werden kann) auf. Zwingend notwendig ist unserer Erfahrung nach der sogenannte Progressive Scan, bei dem - im Gegensatz zum dem bei der Fernsehübertragung verwendeten Interlacing (Zeilensprungverfahren mit Aufspaltung der Full-Frame-Daten in gerade und ungerade Zeilen) - alle

Bildzeilen gleichzeitig ausgelesen werden. Darüber hinaus darf keine On-Board-Komprimierung der Bilddaten stattfinden. Eine entsprechende Schnittstelle muss die Übertragung sogenannter Jumbo-Frames ermöglichen. Als ideal geeignet erwiesen sich GigE-Kameras, bei denen die Bilddaten unkomprimiert vorliegen. Sie eignen sich deshalb wesentlich besser für das maschinelle Sehen als IP-Kameras. Zum Einsatz kam schließlich eine Giganetix GC1391M von Smartek (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Eignung der Kameras für die Markererkennung und die Bewegungsdetektion im Rinderlaufstall (0 = ungeeignet, 1 = bedingt geeignet, 2 = gut geeignet)

Parameter	AXIS 223M	Digitale Fotoapparate	Giganetix GC1391M
Robustheit	2	0	1
Tag/Nacht-Funktionalität	1	0	2
Objektivqualität	0	2	2
Auflösung	1	2	2
Pixelgröße	1	2	2
Komprimierung der Bilddaten	0	2	2
Progressive Scan	2	/	2
Fernsteuerbarkeit	2	0	2
Dynamik	1	2	2
Summe	10	10	17

2. Objekterkennung, Objektverfolgung

Um die Ortsveränderungen von Objekten in einem definierten Raum zuverlässig verfolgen zu können, müssen diese jederzeit und eindeutig erkannt werden. Dazu müssen entweder die Objekte selbst größere Unterschiede in Form und Farbe aufweisen oder aber individuell markiert werden. In unserem Fall ging es darum, mit Hilfe der Kameratechnik bestimmte Kühe in einem abgegrenzten Bereich eines Laufstalles zu erkennen, ihre Laufwege zu verfolgen und aus den gewonnenen Orts-Zeit-Werten zyklusbedingte Veränderungen ihrer Bewegungsaktivitäten und ihres Sozialverhaltens abzuleiten. Die eindeutige Erkennung der Kühe erwies sich jedoch als äußerst schwierig. Erste Vorversuche mit aufklebbaren Ziffern scheiterten vor allem daran, dass die Haltbarkeit der Aufkleber auf dem Rücken der Kühe absolut ungenügend war. Bedingt durch den im Fell unvermeidbar vorhandenen Staub sowie die natürliche Absonderung von Feuchtigkeit und Fett über die Haut kam keine nachhaltig stabile Verbindung zwischen Kleber und Tier zustande. Aus diesem Grund wurde zunächst am Prinzip der Objekterkennung, das bedeutet an der Erkennung der gesamten Kuh ohne separate Markierung, gearbeitet.

2.1. SIFT, Scale-Invariant Feature Transform

Für die Erkennung und Beschreibung kompletter Objekte (hier: Kühe) wurde von uns in den Vorversuchen die Skalierungsunabhängige Transformation von Bildmerkmalen (Scale-Invariant Feature Transform, kurz: SIFT) eingesetzt. Dieses von LOWE (1999) veröffentlichte und erweiterte (LOWE, 2004) Objekterkennungsverfahren benutzt spezielle lokale Bildmerkmale, die auch bei Lageänderungen und Verzerrungen des Objektes sowie bei sich ändernden Lichtverhältnissen eine Objekterkennung anhand der extrahierten unveränderlichen Merkmale ermöglichen (siehe Abbildung 18).

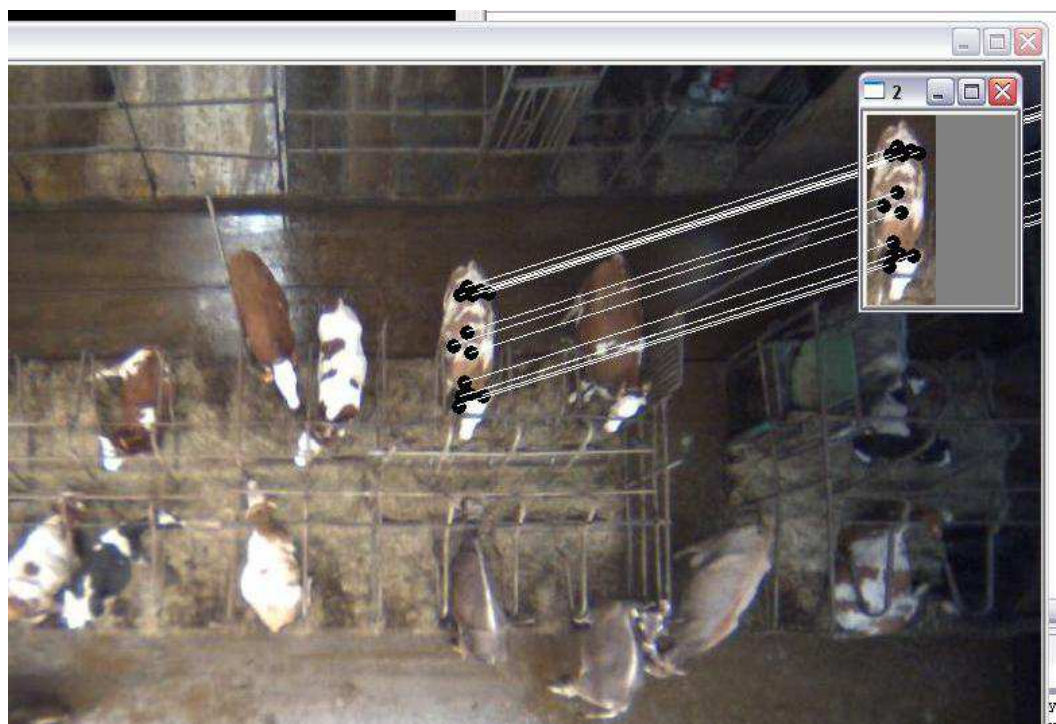


Abbildung 18: **Erkennung einer Kuh mit SIFT**. Die Software vergleicht dabei ein einmal hinterlegtes Musterbild in Echtzeit mit den Fellzeichnungen aller im Kamerablickfeld vorhandenen Tiere. Im Beispiel wurde Kuh Nr. 2 eindeutig erkannt.

Bei unserem Projekt konnten wir in den Vorversuchen gute Tracking-Ergebnisse bei den Fleckvieh- und den Holstein Friesian-Kühen erzielen. Mit Hilfe des SIFT-Algorithmus konnten für diese, in der Regel mehr oder weniger stark gefleckte Tiere, jeweils genügend unempfindliche Merkmale zur eindeutigen Identifizierung definiert werden. Da sich in der Herde aber auch Braunvieh- und Hybrid-Kühe mit geringer Fellzeichnung oder Einfarbigkeit befinden, erwies sich die Anwendung dieses Objekterkennungsverfahrens hier als nicht praxistauglich und wurde deshalb auch nicht weiter verfolgt.

2.2. Markierung der Kühe

Die eindeutige und individuelle Markierung von Tieren, insbesondere von Kühen unter Laufstallbedingungen, stellt große Anforderungen an die Stabilität des Materials der Marker sowie an deren dauerhafte Befestigung an den Tieren.

Folgende Anforderungen an die Marker wurden von uns im Laufe der Vorversuche als essentiell identifiziert:

- 1.) Gute bis sehr gute Erkennbarkeit der digitalisierten Ziffern
- 2.) Einfache aber gleichzeitig lagestabile Befestigung
- 3.) Haltbarkeit über mindestens einen Monat
- 4.) Leichte Pflegbarkeit

2.2.1. Farbmarkierungen

Zu Beginn wurde zunächst versucht, die zur Tiererkennung benötigten 2D-Matrixcodes mit handelsüblichen Tiermarkierungsfarben auf den Kühen anzubringen. Die Verwendung von Tiermarkierungsfarben erwies sich jedoch als wenig praxistauglich (siehe Abbildung 19). Getestet wurden von uns die Farben schwarz, blau, grün, gelb und weiß. Mit keiner der verfügbaren Farben konnte jedoch eine für die Kamera gut erkennbare und gleichzeitig haltbare Markierung erzeugt werden. Mit Ausnahme der Farbe Weiß reichte die Deckkraft der Farben nicht aus, um einen ausreichenden Kontrast zwischen dem Tierfell und der Markierung herzustellen. Ein weiteres Problem war die unvermeidbare Unschärfe am Übergang zwischen der Farbe und dem Fell der Tiere als Untergrund. Diese Unschärfe konnte auch durch den Einsatz von entsprechenden Schablonen nicht genügend reduziert werden. Die so entstehenden fransigen Kanten behinderten die zuverlässige Erkennung der aufgesprühten bzw. aufgezeichneten Marker. Auch die Haltbarkeit der Farben über einen längeren Zeitraum war nicht gegeben. Für unser Versuchsdesign wäre aus Gründen der Praktikabilität eine Haltbarkeit der Farbe von zumindest vier Wochen notwendig gewesen. Wie sich gezeigt hat, waren die Farben aber bereits nach einem (blau, grün, gelb) bzw. nach drei (weiß, schwarz) Tagen so stark abgerieben, dass eine Erkennung der Markierung nicht mehr möglich war.



Abbildung 19: **Mit Hilfe einer Schablone aufgesprühter 2D-Matrixcode.** Gut erkennbar sind hier die unscharfen Kanten sowie die schlechte Haltbarkeit der Tiermarkierungsfarbe.

2.2.2. Halsband-fixierte Marker

Die Marker wurden über kurze, aus Rolladengurten hergestellte Verbindungsstücke an den Halsbändern der Kühe befestigt. Um permanent eine horizontale Ausrichtung der Marker zur Kameraebene zu gewährleisten, wurden die Halsbänder am tiefsten Punkt mit 2,5 Kilogramm schweren Gegengewichten beschwert. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass sich die Marker nach einer eventuellen Auslenkung immer wieder selbständig im Nacken der Kühe stabilisierten. Dadurch war eine optimale Erkennbarkeit über die Kameras gegeben.

Marker mit Schaumstoffkern

Bei der Konstruktion der ersten Markergeneration lag das Hauptaugenmerk auf einer möglichst großen Flexibilität. Ein zwischen zwei PVC-Schichten integriertes Schaumstoffpolster sollte dafür sorgen, dass der Marker nach einer Biegebeanspruchung wieder selbständig in seinen Ursprungszustand zurückfedert (siehe Abbildung 20). Wie sich

gezeigt hat, hielt diese Konstruktion den Belastungen im Laufstall nicht stand. Schwachpunkte waren vor allem die Ecken der Marker, in denen sich konstruktionsbedingt kein Schaumstoff befand und die sich deshalb im Laufe weniger Tage mehr oder weniger stark einrollten. Aus diesem Grund kamen die Marker in dieser Form im Hauptversuch nicht zum Einsatz.

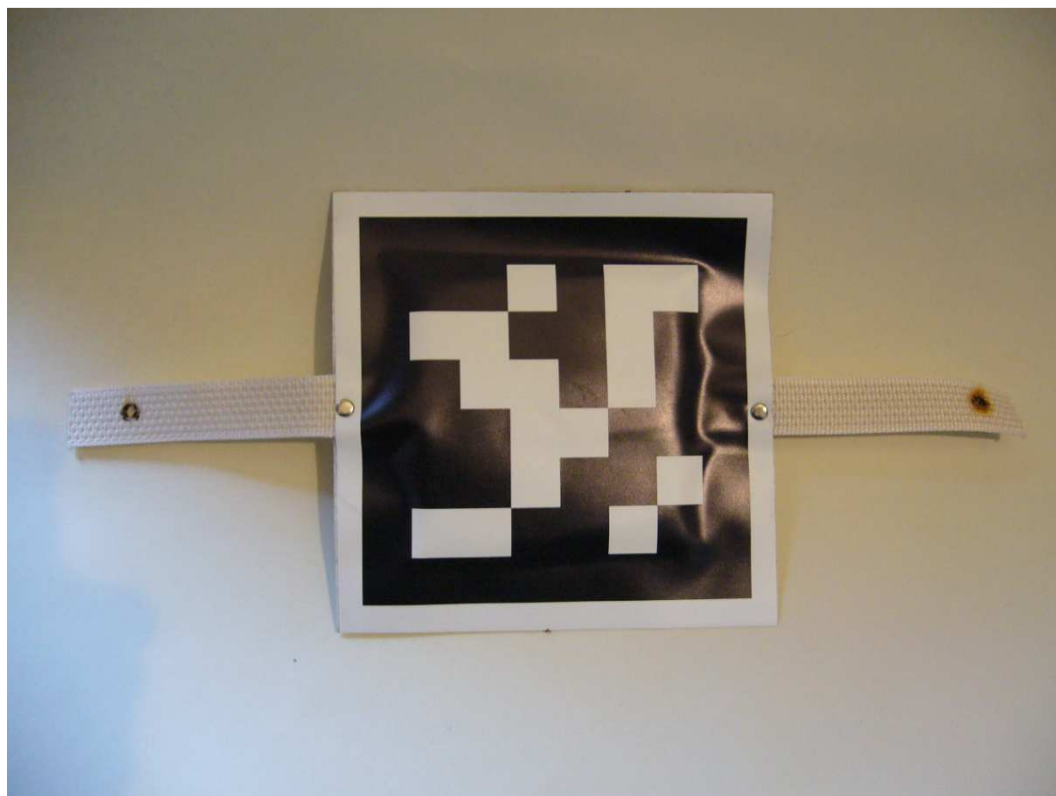


Abbildung 20: **Marker mit Schaumstoffkern.** Der Marker besteht aus zwei, am umlaufenden Rand aufeinander geklebten Folien. In den Klebereichen befindet sich bauartbedingt kein stabilisierender Schaumstoff.

Marker auf Polystyrolplatten

Während die Marker mit dem Schaumstoffkern zu weich waren, erwies sich die zweite Markergeneration auf Polystyrolplatten als viel zu unflexibel. Die relativ steifen Platten boten durch ihre plane Oberfläche zwar eine optimale Lesbarkeit der Marker, brachen dafür allerdings sehr schnell. Durch die baulichen Gegebenheiten im Versuchsbetrieb unterlagen sie einer erheblichen mechanischen Beanspruchung. Als besonders problematisch erwiesen sich die an den Tiefliegeboxen angebrachten Nackenbänder. Die Folge waren zahlreiche abgefallene oder unlesbare Marker (siehe Abbildung 23). Die durchschnittliche Haltbarkeit der in zwei Varianten (siehe Abbildungen 21 und 22) hergestellten Marker betrug hier nur etwa eine Woche, so dass sie häufig ersetzt und somit als nicht praxistauglich eingestuft werden mussten.

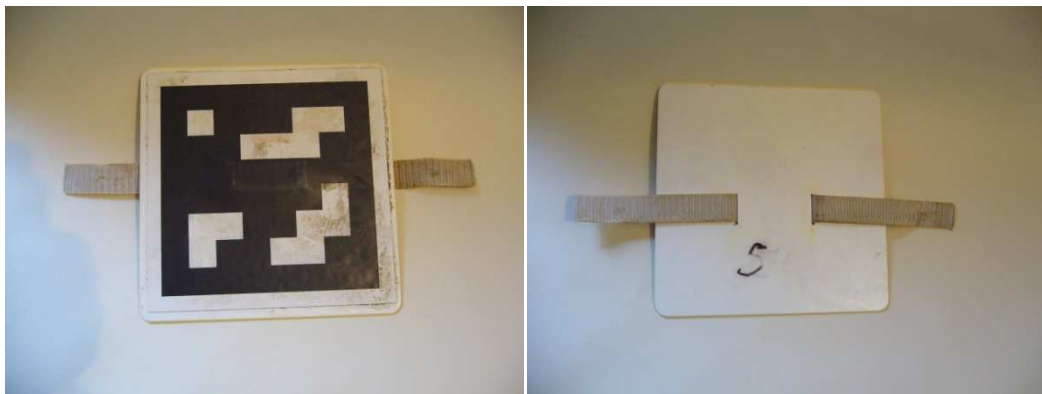


Abbildung 21: **Marker auf Polystyrolplatte, Variante 1, Vorder- und Rückseite.** Der zur Befestigung verwendete Rolladengurt wird über zwei gelaserte Schlitze in der Mitte der Platte geführt.



Abbildung 22: **Marker auf Polystyrolplatte, Variante 2.** Die mit Bohrungen versehene Platte ist über Kabelbinder an zwei getrennten Halsbändern befestigt. Rechts oben ist ein ausgerissenes Bohrloch zu erkennen.



Abbildung 23: **Marker auf Polystyrolplatte, Variante 2.** Die Bilder zeigen einen verrutschten und einen abgefallenen Marker. Ursache hierfür waren die durch hohe mechanische Beanspruchung ausgerissenen Bohrlöcher.

Wichtigstes Ziel war es deshalb, für den Hauptversuch einen Marker zu entwickeln, der einerseits steif genug ist, um eine möglichst horizontale Ausrichtung der 2D-Matrixcodes sicherzustellen und andererseits flexibel genug ist, um bei einem Kontakt des Markes mit dem Nackenband nicht beschädigt zu werden.

Marker auf beschichtetem Gewebe

Die Erfahrungen mit den beiden ersten Markergenerationen hatten gezeigt, dass ein für unsere Zwecke geeigneter Marker prinzipiell aus einer Mischung der bisher verwendeten Materialien bzw. einer Kombination ihrer Eigenschaften bestehen muss. Das Ergebnis dieser Überlegungen war die Verwendung eines normalerweise für LKW-Planen eingesetzten, PVC-beschichteten Gewebes (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: **Marker auf PVC-beschichtetem Gewebe.** Die Marker zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität bei gleichzeitiger Formstabilität aus. Zu erkennen ist hier die bauartbedingte leichte Wölbung des Markers.

Diese Markervariante erwies sich insgesamt als äußerst robust. Einziger Nachteil war, dass sich die Marker beim Befestigen an den Halsbändern bauartbedingt geringfügig wölbten. Dadurch entstand eine minimale optische Verzerrung der digitalisierten Ziffern, was für das Gesamtsystem eine im Vergleich zu den eben aufliegenden Folien bei den Polystyrolplatten (siehe Abbildung 21) eine unbedeutend geringere Erkennbarkeit der Marker zur Folge hatte.

Wie sich im Versuchszeitraum auch gezeigt hat, unterlagen die Marker trotz ihrer eigentlich wenig exponierten Position im Nackenbereich einer erheblichen Verschmutzung. Ein wichtiger Aspekt bei der Gestaltung der Marker war deshalb auch deren Unempfindlichkeit gegenüber wiederholten Reinigungsmaßnahmen. Auch im Hinblick darauf erwies sich der leicht abwaschbare Marker auf beschichtetem Gewebe als optimale Lösung.

2.3. Beleuchtung und Lichtsteuerung

Um das Tracking auch während der Nachtstunden zu gewährleisten, war zunächst der Einsatz von Infrarot-Scheinwerfern vorgesehen. Tests mit entsprechenden (bezahlbaren) Scheinwerfern haben jedoch zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis geführt. Alle von uns getesteten IR-Strahler zeigten eine insgesamt zu geringe Leistung sowie eine ungenügende Verteilung des IR-Lichts über die bestrahlte Fläche.

Dadurch entstanden in den Kamerabildern sowohl deutlich überstrahlte als auch unterversorgte Bereiche, die eine Markererkennung in diesen Segmenten unmöglich machten.

Durch den Einsatz der lichtempfindlichen GigE-Monochrom-Kameras und der reflektierenden Markerfolien wurde es jedoch auch möglich, mit einer geringen Menge Lichts im sichtbaren Spektrum auszukommen. Die eingesetzten insgesamt 8 Neonlampen mit einer Anschlussleistung von jeweils 58 Watt erwiesen sich als ideale Lösung (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: **Beleuchtung der Versuchsfäche.** Das Bild zeigt zwei Kameratürme mit vier eingeschalteten Neonlampen. Durch die seitlich an den Türmen angebrachten Lampen wurde eine gleichmäßige Ausleuchtung ohne punktförmige Überstrahlungen erzielt.

Die Lampen wurden über Zeitschaltuhren gesteuert, wodurch die Beleuchtungszeiten an die, sich im Laufe des Versuchszeitraumes verändernden, Tageslängen angepasst werden konnten.

V. ANALYSE VON BEWEGUNGSDATEN ZUR BRUNSTDETEKTION - ERGEBNISSE

Bei der Auswertung der gespeicherten Daten mit Hilfe der selbstentwickelten graphischen Benutzeroberfläche zeigte sich der große Unterschied zur Aktivitätsmessung durch die Pedometrie. Während dort über das Zählen von Schritten auf die Aktivität rückgeschlossen wird, ist es bei diesem neuen Verfahren möglich, echte Ortsveränderungen innerhalb des Laufstalles zu bewerten. Neben dem Aktivitätsanstieg während der Brunst können so auch Daten über Liegezeiten, zurückgelegte Wegstrecken, Fresszeit und -dauer, besonders frequentierte Stallbereiche, gemiedene Stallbereiche und Sozialkontakte unter den Herdenmitgliedern (insbesondere während des Östrus) erfasst und bewertet werden. Im Folgenden wird speziell auf die Aktivitätsmessung sowie die Analyse von Sozialkontakten näher eingegangen.

1. Quantifizierung der Bewegungsaktivität

Bei unseren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich mit der neuen Methode die für den Östrus typische Aktivitätserhöhung von Kühen korrekt abbilden lässt. In einem Test für unabhängige Stichproben wurde ein signifikanter Unterschied in der mittleren prozentualen Erhöhung der Bewegungsaktivität zwischen Tieren im Östrus (natürliche und PGF_{2α}-induzierte Brunst) und nicht-östrischen Tieren (Diöstrus oder Trächtigkeit) gefunden (natürliche Brunst vs. nicht-östrisch: $p < 0,001$; PGF_{2α}-induzierte Brunst vs. nicht-östrisch: $p < 0,001$). Kein signifikanter Unterschied in der prozentualen Erhöhung der Bewegungsaktivität besteht zwischen den Tieren mit natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst ($p = 0,290$).

Der Median bei Tieren mit natürlicher Brunst lag bei 430 % (1. Quartil: 286; 3. Quartil: 680), bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst bei 338 % (1. Quartil: 236; 3. Quartil: 626), bei der gemeinsamen Betrachtung von natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst bei 397 % (1. Quartil: 259;

3. Quartil: 680) und bei nicht-östrischen Tieren bei 153 % (1. Quartil: 105; 3. Quartil: 213) (siehe Abbildung 26).

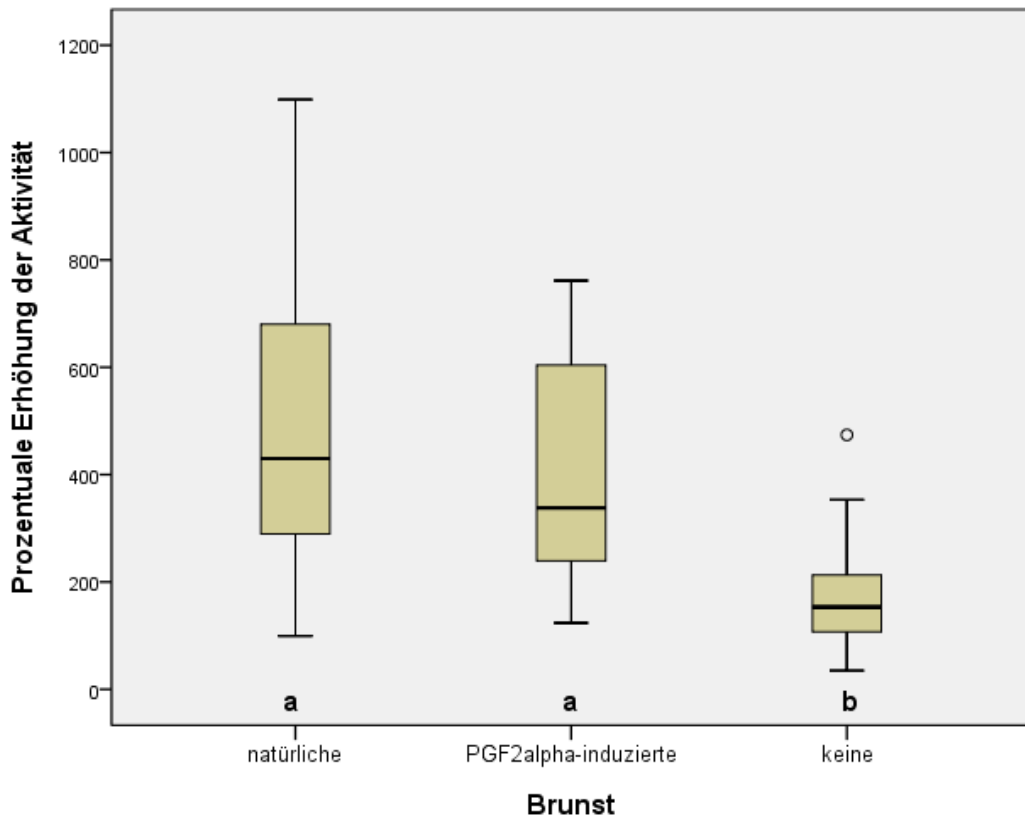


Abbildung 26: **Vergleich der prozentualen Erhöhungen der Bewegungsaktivität bei Tieren mit natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst sowie bei Tieren während des Diöstrus oder der Trächtigkeit.** Dargestellt sind die Erhöhungen der Aktivität in den jeweiligen Gruppen. Die Erhöhungen pro Einzeltier berechnen sich aus den gleitenden Mittelwerten der vorangegangenen 10 Tage. Nicht abgebildet ist ein einzelner Extremwert (+2.180 %) bei der natürlichen Brunst. Natürliche Brunst: n = 20, PGF_{2α}-induzierte Brunst: n = 14, keine Brunst (Diöstrus oder Trächtigkeit): n = 40. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (p < 0,001).

Auch in gepaarten Wilcoxon-Tests, bei denen die prozentualen Erhöhungen der Bewegungsaktivität der Tiere mit natürlicher oder PGF_{2α}-induzierter Brunst mit den Werten der entsprechenden Tiere im Diöstrus oder während der Trächtigkeit verglichen wurden, waren die Unterschiede signifikant. Hier ergaben sich folgende Werte:

Natürliche Brunst vs. nicht-östrische Tiere: p = 0,001

PGF_{2α}-induzierte Brunst vs. nicht-östrische Tiere: p = 0,009

Die Auswertung mittels eines gemischten Modells wurde als zusätzliche Bestätigung herangezogen. Im ersten Teil der Auswertung (nicht-parametrische Auswertungen für unabhängige Stichproben) wurden die Brunsten als einzeln und unabhängig betrachtet, auch wenn die Werte zum Teil von ein und demselben Tier stammten. Ein gemischtes Modell korrigiert für diese Tatsache, dass mehrere Brunsten von einem Tier beobachtet wurden. Die Ergebnisse bestätigten die zuvor in der Auswertung als unabhängige Stichproben gefundenen Ergebnisse, was darauf hindeutet, dass die Brunsten in vorliegender Studie als unabhängige Ereignisse gesehen werden können. Es besteht auch bei dieser statistischen Analyse ein signifikanter Unterschied zwischen den Tieren mit natürlicher Brunst und den nicht-östrischen Tieren ($p < 0,001$) sowie zwischen den Tieren mit PGF_{2 α} -induzierter Brunst und den nicht-östrischen Tieren ($p < 0,001$). Kein statistisch signifikanter Unterschied bezüglich der Bewegungsaktivität besteht zwischen natürlicher und PGF_{2 α} -induzierter Brunst ($p = 0,995$). Die Ergebnisse wurden somit durch das gemischte Modell bestätigt.

1.2. Empfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei Tieren mit natürlicher Brunst

Bei der ROC-Analyse der Veränderungen der Bewegungsaktivität für Tiere mit natürlicher Brunst ergab sich für das Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ein optimaler Wert (Cut-Off) von 250. Das bedeutet, dass alle Tiere mit einer Erhöhung der Bewegungsaktivität von mindestens 250 % über den gleitenden Mittelwert der 10 Vortage als brünstig gelten, alle Tiere mit Werten unterhalb dieses Cut-Offs als nicht-brünstig. Das Verhältnis aus Sensitivität und 1-Spezifität zeigt Abbildung 27.

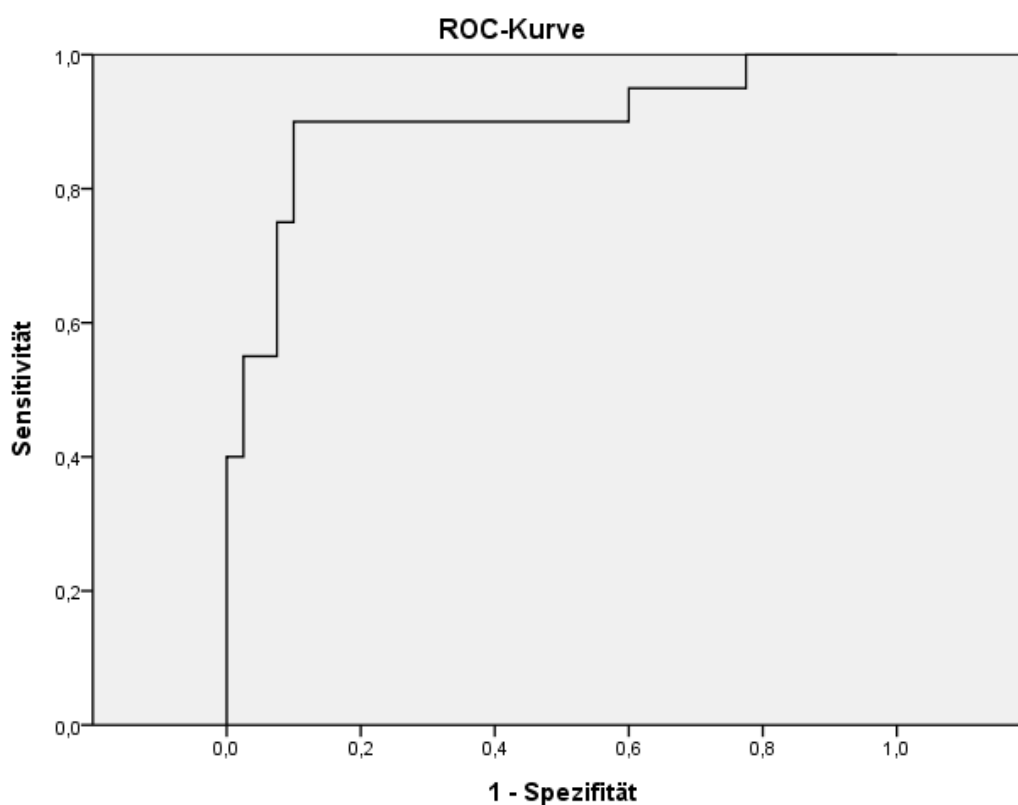


Abbildung 27: **ROC-Kurve für die natürliche Brunst.** Dargestellt ist das Verhältnis zwischen Sensitivität und 1-Spezifität, bezogen auf die prozentuale Erhöhung der Bewegungsaktivität gegenüber dem gleitenden Mittelwert der 10 Vortage bei Tieren mit natürlicher Brunst im Vergleich zu nicht-östrischen Tieren. Fläche unter Kurve: 0,898.

Mit dem auf 250 % festgelegten Cut-Off ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte.

Tabelle 8: Testempfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei Tieren mit natürlicher Brunst

Cut-Off 250%		95% Konfidenzintervall	
		unteres	oberes
Sensitivität:	90,00	69,90	97,21
Spezifität	90,00	76,95	96,04
positiv prädiktiver Wert	81,82	61,48	92,69
negativ prädiktiver Wert	94,74	82,71	98,54

1.3. Empfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst

Bei der ROC-Analyse der Veränderungen der Bewegungsaktivität für Tiere mit PGF_{2α}-induzierter Brunst ergab sich für das Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ein optimaler Wert (Cut-Off) von 235. Das bedeutet, dass alle Tiere mit einer Erhöhung der Bewegungsaktivität von mindestens 235 % über den gleitenden Mittelwert der 10 Vortage als brünstig gelten, alle Tiere mit Werten unterhalb dieses Cut-Offs als nicht-brünstig. Das Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität zeigt Abbildung 28.

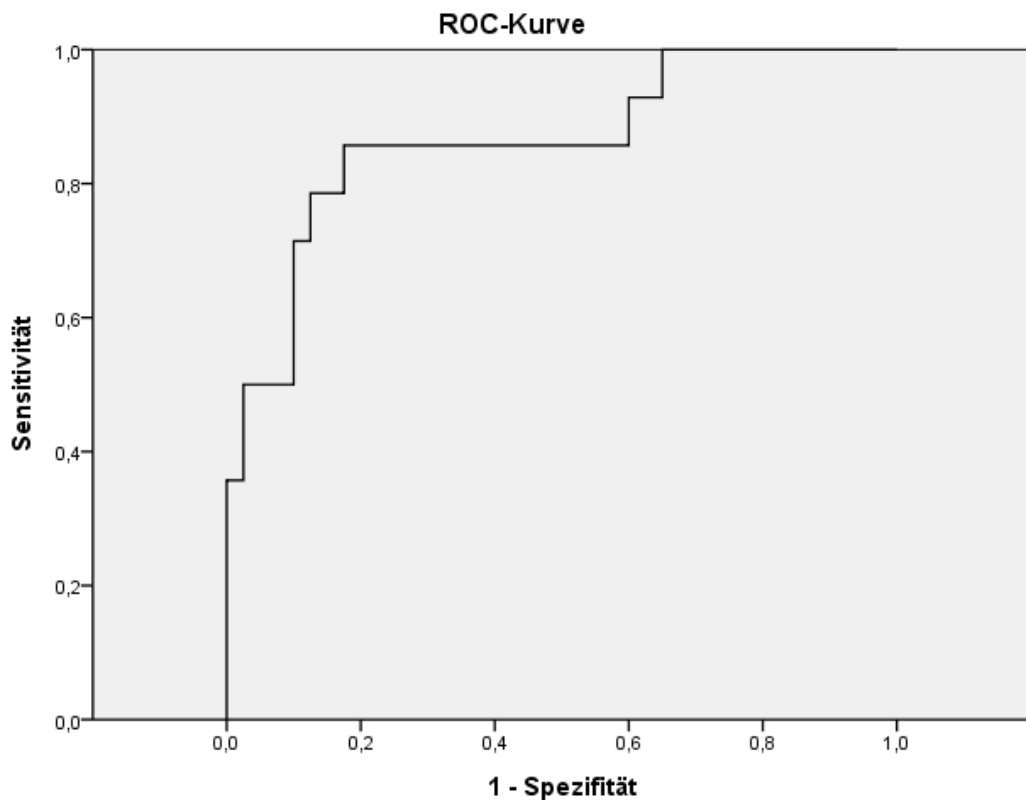


Abbildung 28: **ROC-Kurve für die PGF_{2α}-induzierte Brunst.** Dargestellt ist das Verhältnis zwischen Sensitivität und 1-Spezifität, bezogen auf die prozentuale Erhöhung der Bewegungsaktivität gegenüber dem gleitenden Mittelwert der 10 Vortage bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst im Vergleich zu nicht-östrischen Tieren. Fläche unter Kurve: 0,864.

Mit dem auf 235 % festgelegten Cut-Off ergaben sich die in Tabelle 9 aufgeführten Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte.

Tabelle 9: Testempfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst

Cut-Off 235 %		95% Konfidenzintervall	
		unteres	oberes
Sensitivität:	85,71	60,06	95,99
Spezifität	82,50	68,05	91,25
positiv prädiktiver Wert	63,16	41,04	80,85
negativ prädiktiver Wert	94,29	81,39	98,42

1.4. Empfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei allen brünstigen Tieren

Bei der ROC-Analyse der Veränderungen der Bewegungsaktivität für alle Brunsten (natürlich und PGF_{2α}-induziert) ergab sich für das Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ein optimaler Wert (Cut-Off) von 225. Das bedeutet, dass alle Tiere mit einer Erhöhung der Bewegungsaktivität von mindestens 225 % über den gleitenden Mittelwert der 10 Vortage als brünstig gelten, alle Tiere mit Werten unterhalb dieses Cut-Offs als nicht-brünstig. Das Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität zeigt Abbildung 29.

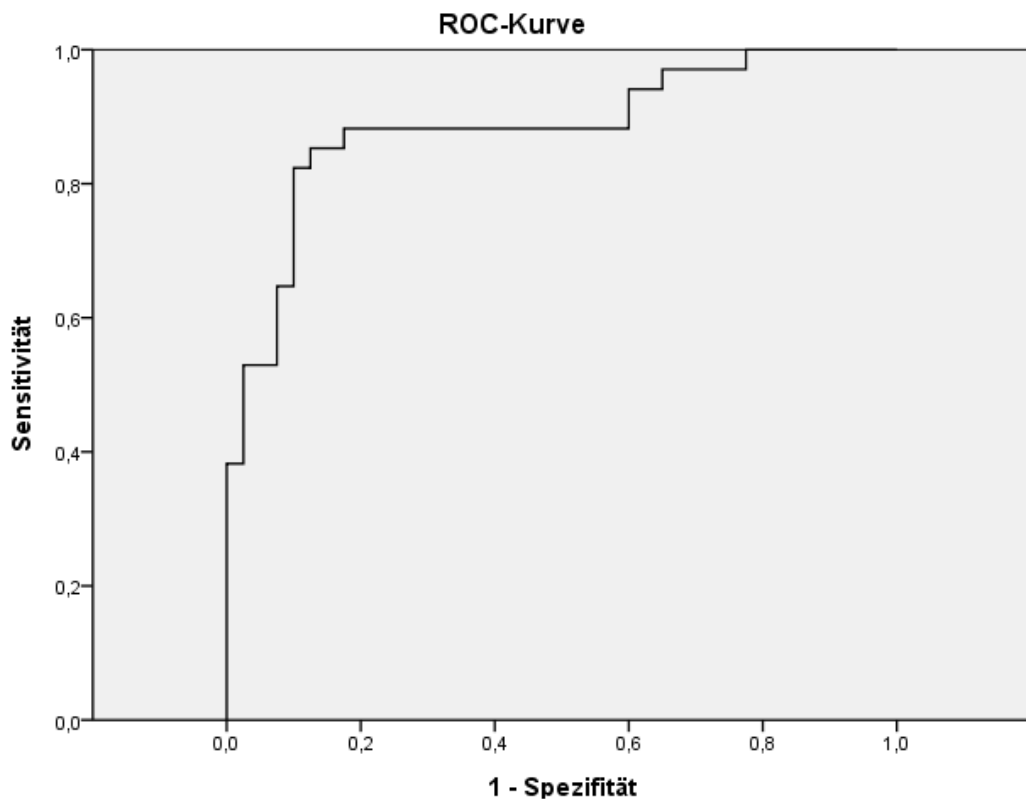


Abbildung 29: **ROC-Kurve für alle Brunsten.** Dargestellt ist das Verhältnis zwischen Sensitivität und 1-Spezifität, bezogen auf die prozentuale Erhöhung der Bewegungsaktivität gegenüber dem gleitenden Mittelwert der 10 Vortage bei allen brünstigen Tieren (gemeinsame Auswertung von natürlichen und PGF_{2α}-induzierten Brunsten) im Vergleich zu nicht-östrischen Tieren (Diöstrus und Trächtigkeit). Fläche unter Kurve: 0,884.

Mit dem auf 225 % festgelegten Cut-Off ergeben sich die in Tabelle 10 aufgeführten Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte.

Tabelle 10: Testempfindlichkeit der Aktivitätsmessung bei allen Tieren mit Brunst (natürlich und PGF_{2α}-induziert)

Cut-Off 225 %		95% Konfidenzintervall	
		unteres	oberes
Sensitivität:	85,29	69,87	93,55
Spezifität	82,50	68,05	91,25
positiv prädiktiver Wert	80,56	64,97	90,25
negativ prädiktiver Wert	86,84	72,67	94,25

2. Detektion von Sozialkontakten

Im Rahmen des Dissertationsprojektes wurde für die automatisierte Brunsterkennung ein völlig neuer Parameter eingeführt: Es handelt sich dabei um die Detektion und Beurteilung von Sozialkontakten, die bisher nur durch eine visuelle Brunstkontrolle bewertbar waren. Erfasst werden mit dem, von uns als „Varianz der Sozialkontakte“ bezeichneten Parameter, die Zeiten, die andere Herdenmitglieder mit einer brunstverdächtigen Kuh verbracht haben (siehe 3.2.5.2, Material, Tiere und Methoden). Die Varianz, ein aus den Minutenwerten berechnetes Streuungsmaß, zeigt an, ob es einzelne Tiere gibt, die überdurchschnittlich viel Zeit mit der betrachteten Kuh verbracht haben. Eine hohe Streuung der Werte ist dabei das Abbild einer verstärkten Kontaktaufnahme eines Teils der ebenfalls brünstigen oder brunstnahen Herdenmitglieder mit dem brunstverdächtigen Tier. Im Gegensatz dazu zeigt eine geringe Streuung der Minutenwerte, dass sich die Kontakte von Herdenmitgliedern mit einer nicht-brünstigen Kuh auf einem ähnlich niedrigen Niveau bewegen. Über die Bewertung dieses Streuungsmaßes wurde es möglich, die Bildung sexuell aktiver Gruppen zu erkennen und dies für die Brunsterkennung zu verwenden.

In einem Test für unabhängige Stichproben wurde ein signifikanter Unterschied der Varianzen der Sozialkontakte zwischen Tieren im Östrus (natürliche und induzierte Brunst) und nicht-östrischen Tieren (Diöstrus oder Trächtigkeit) gefunden (natürliche Brunst vs. nicht-östrisch: $p = 0,002$; PGF_{2 α} -induzierte Brunst vs. nicht-östrisch: $p = 0,006$). Kein statistisch signifikanter Unterschied in der Varianz der Sozialkontakte besteht zwischen den Tieren mit natürlicher und PGF_{2 α} -induzierter Brunst ($p = 0,881$).

Der Median der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher Brunst lag bei 1,598 (1. Quartil: 1,144; 3. Quartil: 2,161), bei Tieren mit PGF_{2 α} -induzierter Brunst bei 1,478 (1. Quartil: 1,237; 3. Quartil: 2,23), der gemeinsamen Betrachtung von natürlicher und PGF_{2 α} -induzierter Brunst bei 1,52 (1. Quartil: 1,16; 3. Quartil: 2,13) und bei nicht-östrischen Tieren bei 1,10 (1. Quartil: 0,787; 3. Quartil: 1,52) (siehe Abbildung 30).

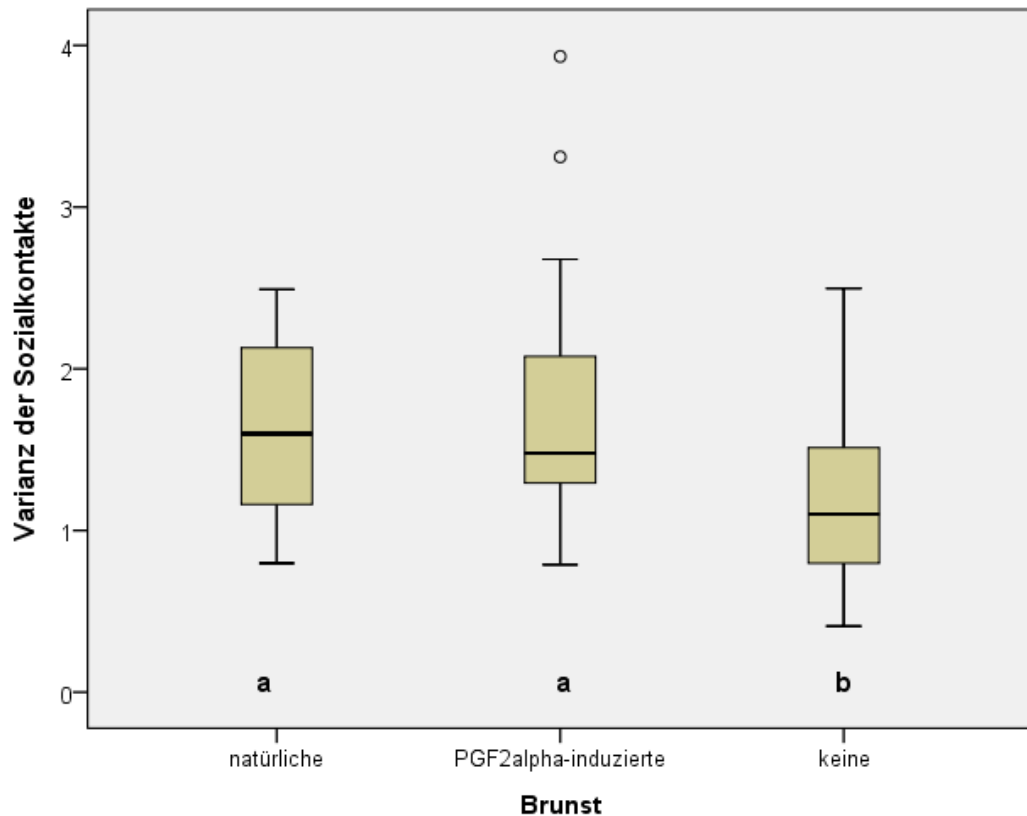


Abbildung 30: **Vergleich der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher und $\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierter Brunst sowie bei nicht-östrischen Tieren.** Dargestellt sind die Varianzen der Sozialkontakte in den jeweiligen Gruppen. Die Varianzen pro Einzeltier berechnen sich aus den Minutenwerten der sie am jeweiligen Betrachtungstag begleitenden Tiere. Natürliche Brunst: $n = 21$, $\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierte Brunst: $n = 14$, nicht-östrische Tiere (Diöstrus oder Trächtigkeit): $n = 38$. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($p = 0,002$).

Auch in gepaarten Wilcoxon-Tests, bei denen die Varianzen der Sozialkontakte der Tiere mit natürlicher oder $\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierter Brunst mit den Werten der entsprechenden Tiere im Diöstrus oder während der Trächtigkeit verglichen wurden, waren die Unterschiede signifikant. Hier ergaben sich folgenden Werte:

Natürliche Brunst vs. nicht-östrische Tiere: $p = 0,002$

$\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierte Brunst vs. nicht-östrische Tiere: $p = 0,022$

Die Auswertung mittels eines gemischten Modells wurde als zusätzliche Bestätigung herangezogen. Im ersten Teil der Auswertung (nicht-parametrische Auswertungen für unabhängige Stichproben) wurden die Brunsten als einzeln und unabhängig betrachtet, auch wenn die Werte zum Teil von ein und demselben Tier stammten. Ein gemischtes Modell korrigiert für diese Tatsache, dass mehrere Brunsten von einem Tier beobachtet wurden. Die Ergebnisse bestätigten die zuvor in der Auswertung als unabhängige Stichproben gefundenen Ergebnisse, was darauf hindeutet, dass die Brunsten in vorliegender Studie als unabhängige Ereignisse gesehen werden können.

Es besteht auch bei dieser statistischen Analyse ein signifikanter Unterschied zwischen den Tieren mit natürlicher Brunst und den nicht-östrischen Tieren ($p = 0,003$) sowie zwischen den Tieren mit $\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierter Brunst und den nicht-östrischen Tieren ($p = 0,003$). Kein statistisch signifikanter Unterschied bezüglich der Varianz der Sozialkontakte besteht zwischen natürlicher und $\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierter Brunst ($p = 1,00$). Die Ergebnisse wurden somit durch das gemischte Modell bestätigt.

2.1. Empfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher Brunst

Bei der ROC-Analyse der Varianz der Sozialkontakte für Tiere mit natürlicher Brunst ergab sich für das Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ein optimaler Wert (Cut-Off) von 1,25. Das bedeutet, dass alle Tiere mit einer Varianz der Sozialkontakte über 1,25 als brünstig gelten, alle Tiere mit Werten unterhalb dieses Cut-Offs als nicht-brünstig. Das Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität zeigt Abbildung 31.

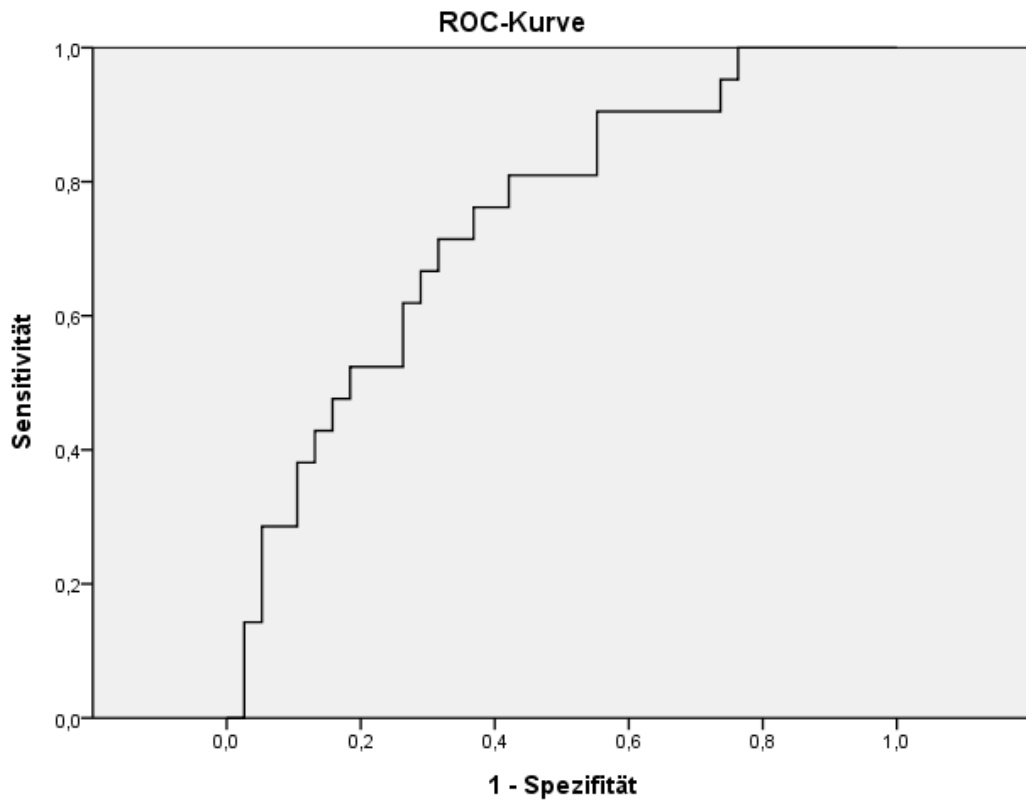


Abbildung 31: **ROC-Kurve für die natürliche Brunst.** Dargestellt ist das Verhältnis zwischen Sensitivität und 1-Spezifität, bezogen auf die Varianzen der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher Brunst im Vergleich zu nicht-östrischen Tieren. Fläche unter Kurve: 0,741.

Mit dem auf 1,25 festgelegten Cut-Off ergeben sich die in Tabelle 11 aufgeführten Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte.

Tabelle 11: Testempfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher Brunst

Cut-Off 1,25		95% Konfidenzintervall	
		unteres	oberes
Sensitivität:	71,43	50,04	86,19
Spezifität	68,42	52,54	80,92
positiv prädiktiver Wert	55,56	37,31	72,41
negativ prädiktiver Wert	81,25	64,69	91,11

2.2. Empfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte für Tiere mit $\text{PGF}_{2\alpha}$ - induzierter Brunst

Bei der ROC-Analyse der Varianz der Sozialkontakte für Tiere mit $\text{PGF}_{2\alpha}$ - induzierter Brunst ergab sich für das Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ein optimaler Wert (Cut-Off) von 1,29. Das bedeutet, dass alle Tiere mit einer Varianz der Sozialkontakte über 1,29 als brünstig gelten, alle Tiere mit Werten unterhalb dieses Cut-Offs als nicht-brünstig. Das Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität zeigt Abbildung 32.

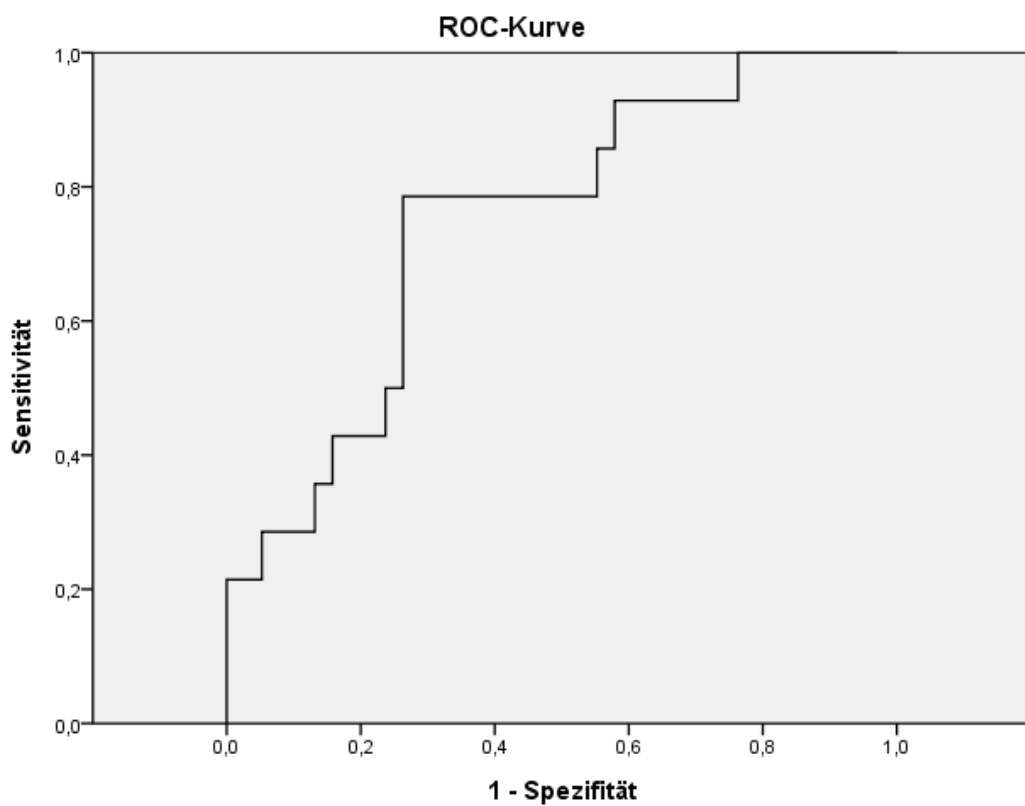


Abbildung 32: **ROC-Kurve für die $\text{PGF}_{2\alpha}$ -induzierte Brunst.** Dargestellt ist das Verhältnis zwischen Sensitivität und 1-Spezifität, bezogen auf die Varianzen der Sozialkontakte bei Tieren mit induzierter Brunst im Vergleich zu nicht-östrischen Tieren. Fläche unter Kurve: 0,748.

Mit dem auf 1,29 festgelegten Cut-Off ergeben sich die in Tabelle 12 aufgeführten Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte.

Tabelle 12: Testempfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst

Cut-Off 1,29		95% Konfidenzintervall	
		unteres	Oberes
Sensitivität:	68,57	52,02	81,45
Spezifität	73,68	57,99	85,03
positiv prädiktiver Wert	70,59	53,83	83,17
negativ prädiktiver Wert	71,79	56,22	83,46

2.3. Gemeinsame Betrachtung von natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst

Bei der ROC-Analyse der Varianz der Sozialkontakte für alle Brunsten (natürlich und PGF_{2α}-induziert) ergab sich für das Verhältnis von Sensitivität und Spezifität ein optimaler Wert (Cut-Off) von 1,25. Das bedeutet, dass alle Tiere mit einer Varianz der Sozialkontakte über 1,25 als brünstig gelten, alle Tiere mit Werten unterhalb dieses Cut-Offs als nicht-brünstig. Das Verhältnis aus Sensitivität und Spezifität zeigt Abbildung 33.

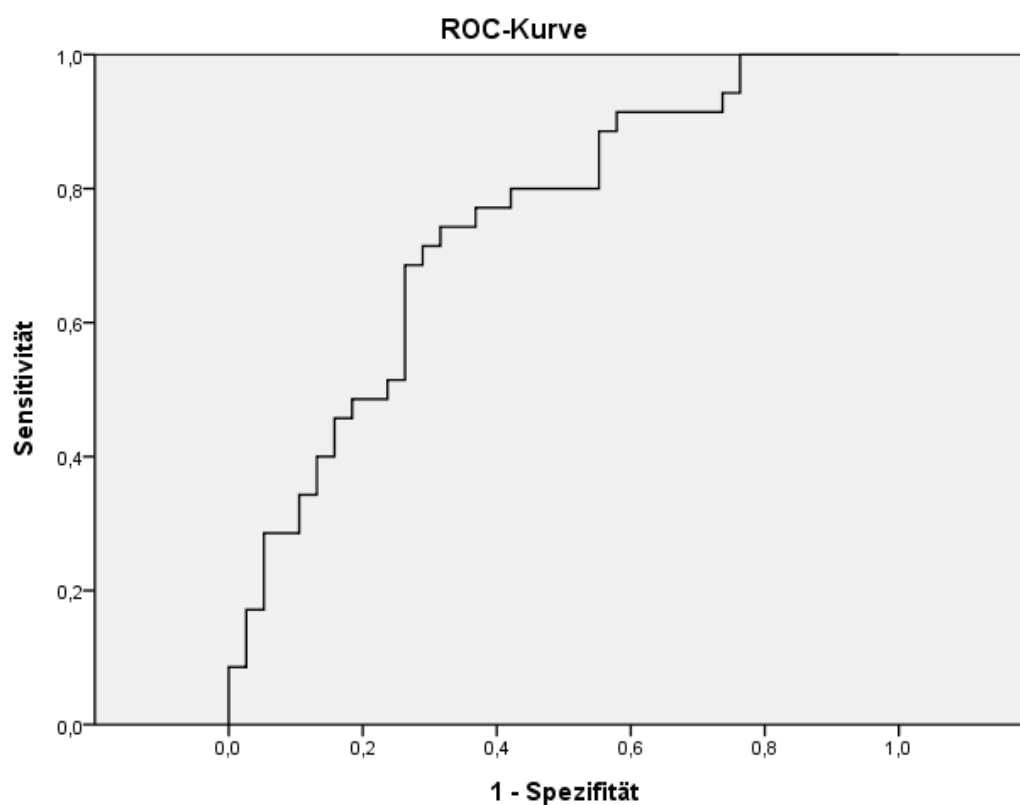


Abbildung 33: **ROC-Kurve für natürliche und PGF_{2α}-induzierte Brunst.** Dargestellt ist das Verhältnis zwischen Sensitivität und 1-Spezifität, bezogen auf die Varianzen der Sozialkontakte aller brünstigen Tiere im Vergleich zu nicht-östrischen Tieren. Fläche unter Kurve: 0,744.

Mit dem auf 1,25 festgelegten Cut-Off ergeben sich die in Tabelle 13 aufgeführten Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte.

Tabelle 13: Testempfindlichkeit der Varianz der Sozialkontakte bei allen Tieren mit Brunst (natürlich und PGF_{2α}-induziert)

Cut-Off 1,25		95% Konfidenzintervall	
		unteres	oberes
Sensitivität:	74,29	57,93	85,84
Spezifität	68,42	52,54	80,92
positiv prädiktiver Wert	68,42	52,54	80,92
negativ prädiktiver Wert	74,29	57,93	85,84

3. Kombination der Parameter Bewegungsaktivität und Varianz der Sozialkontakte

Mathematisch lässt sich die Kombination der beiden Parameter Bewegungsaktivität und Varianz der Sozialkontakte über eine Regressionsanalyse darstellen. Mittels binärer logistischer Regression wurde eine Formel gefunden, anhand welcher die Wahrscheinlichkeit mit der ein bestimmtes Tier als brünstig erkannt wird, abgeschätzt werden kann.

Eine Wahrscheinlichkeit lässt sich über folgende Formel berechnen:

$$\pi = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x}}$$

Die Wahrscheinlichkeit für den konkreten Fall ergibt sich aus folgender Darstellung:

$$\text{Wahrscheinlichkeit} = \frac{e^{(-7,036 + 0,017 \cdot \text{Proz. Erhö.} + 1,958 \cdot \text{Varianz})}}{1 + e^{(-7,036 + 0,017 \cdot \text{Proz. Erhö.} + 1,958 \cdot \text{Varianz})}}$$

Wahrscheinlichkeitswerte über 0,5 bedeuten, dass die jeweilige Kuh als brünstig eingestuft wird. Die sich hieraus ergebenden Werte für Sensitivität, Spezifität und die prädiktiven Werte zeigt Tabelle 14.

Tabelle 14: Testempfindlichkeit bei Kombination der Parameter Aktivität und Varianz

		95% Konfidenzintervall	
		unteres	oberes
Sensitivität:	82,35	66,49	91,65
Spezifität	86,84	72,67	94,25
positiv prädiktiver Wert	84,85	69,08	93,35
negativ prädiktiver Wert	84,62	70,27	92,75

4. Exemplarische Sonderfälle

4.1. Azyklie durch zystische Ovarfollikel

Tiere mit zystischen Ovarfollikeln (auch: Ovarialzysten) stellen für die Aktivitätsmessung ein nicht unerhebliches Problem dar. Die Tiere fallen durch eine, zum Teil über mehrere Tage bis Wochen andauernde und deutlich über dem individuellen sowie über dem Herdendurchschnitt liegende Bewegungsaktivität auf. Dadurch verursachen sie immer wieder falsch positive Brunstwarnungen. Zudem beeinflussen diese daueraktiven Tiere auch die Analyse der Sozialkontakte, da sie nicht nur brünstige Herdenmitglieder begleiten, sondern auch in der Nähe von trächtigen Tieren zu finden sind.

Typisch für diese Tiere ist die durchgehend hohe Bewegungsaktivität und die dabei alle zwei bis vier Tage feststellbaren Aktivitätspeaks, wie sie in Abbildung 34 zu sehen sind. Bei der hier vorgestellten Kuh wurden am 11.04.2011 bei der rektalen Untersuchung Ovarialzysten und am 02.05.2011 ein persistierendes CL diagnostiziert. Nach Behandlung mit GnRH (11.04.2011) und PGF_{2α} (16.05.2011) zeigte das Tier am 18.05.2011 wieder eine Brunst. Diese wurde am 18.05.2011 über die Auswertung der Trackingdaten und am 20.05.2011 auch über die visuelle Brunstbeobachtung durch das Stallpersonal erkannt.

Wie sich bei sechs Tieren gezeigt hat, ist die Analyse der Bewegungsaktivität gut dazu geeignet, Tiere mit Ovarfollikeln frühzeitig anhand ihres typischen Aktivitätsmusters zu erkennen.

4.2. Anstieg der Bewegungsaktivität bei diöstrischen und frühtragenden Tieren

Der in der Literatur beschriebene Anstieg der Bewegungsaktivität etwa in der Mitte des Diöstrus und insbesondere 10 Tage post conceptionem konnte auch in unserer Versuchsanordnung bei 5 Tieren dargestellt werden. Abbildung 35 zeigt eine Kuh mit einem deutlichen Aktivitätsanstieg am Tag 10 post conceptionem.

4.3. Erhöhte Bewegungsaktivitäten bei länger tragenden Tieren

Peaks bei den Aktivitäten sind nicht nur an den Brunsttagen zu finden. Auch bereits länger tragende Tiere zeigen zum Teil regelmäßige, aber geringere Aktivitätserhöhungen. Abbildung 36 zeigt eine am 11.04.2011 erfolgreich besamte Kuh mit zwei Anstiegen der Bewegungsaktivität während der Trächtigkeit.

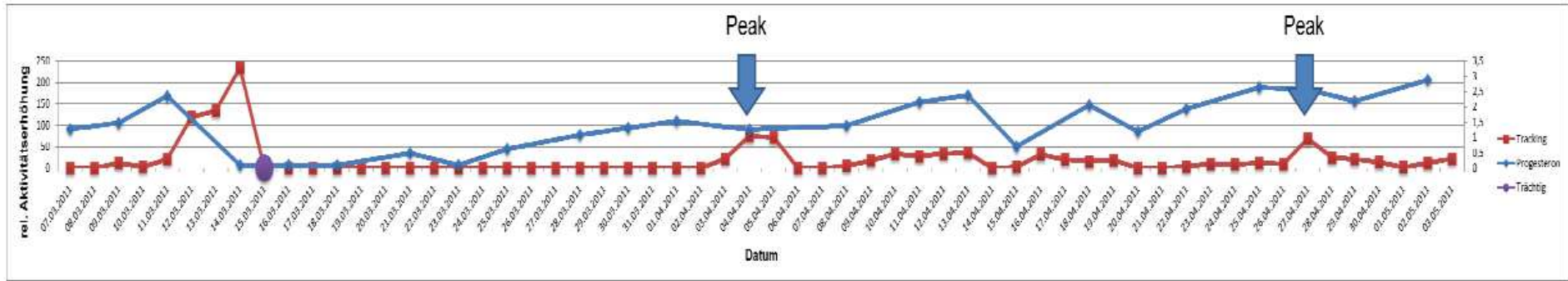


Abbildung 36: **Anstieg der Bewegungsaktivität bei einem tragenden Tier.** Zu sehen sind hier die Erhöhungen der Bewegungsaktivität (blaue Pfeile) bei einem am 15.03.2011 erfolgreich besamten und länger tragenden Tier am Tag 20 und 21 post conceptionem und noch einmal 23 Tage später.

5. Visualisierung der Brunst

Ein Nachteil bei herkömmlichen Pedometern ist, dass es bei der Detektion einer erhöhten Bewegungsaktivität nicht möglich ist, nachzuvollziehen, warum sich ein Tier verstärkt bewegt hat. Neben einer eventuellen Brunst kommen als Ursache zystische Ovarfollikel, aber auch Rangkämpfe oder Störungen durch den allgemeinen Betriebsablauf in Frage. Ein großer Vorteil der hier vorgestellten Methodik ist die Visualisierbarkeit der Bewegungsaktivität und der Sozialkontakte. Wenn die Software bei einer Kuh eine erhöhte Bewegungsaktivität und/oder die Zugehörigkeit zu einer sexuell aktiven Gruppe detektiert hat, kann sich der Landwirt den entsprechenden Zeitraum als Video ansehen. Durch die vorgewählte Einstellung von einem Bild pro 2 Sekunden lässt sich eine ganze Stunde so innerhalb von nur 72 Sekunden überprüfen. Abbildung 36 zeigt eine Gruppe von drei sexuell aktiven Tieren in der Stunde zwischen 19:00 Uhr und 20:00 Uhr am 18.05.2011.



Abbildung 36: **Visualisierung der Brunst.** Zu sehen ist eine Gruppe aus drei sexuell aktiven Kühen (A, B, C). Die Kuh A ist in Brunst und duldet mehrfach den Aufsprung ihrer Begleikühe B und C. Die Tiere sind während der gesamten Zeitraums von etwa einer Stunde eng zusammen.

6. Visuelle Brunstbeobachtung durch das Betriebspersonal

Während des Projektzeitraumes wurde die visuelle Brunstbeobachtung vom Betriebspersonal in gewohnter Weise durchgeführt. Um eine gegenseitige Beeinflussung der Ergebnisse zu vermeiden, wurden sowohl die visuell als auch die mittels „Tracking“ und P4-Bestimmung gewonnenen Daten erst nach Abschluss des Projektes miteinander abgeglichen. Insgesamt haben die Landwirte bei den Versuchskühen 45 Brunsten im Betriebstagebuch vermerkt. 33 dieser Brunsten waren richtig-positiv, 12 falsch-positiv. Insgesamt 9 Brunsten wurden nicht erkannt. Hieraus ergaben sich für die visuelle Brunstbeobachtung durch die Landwirte in Bezug auf die P4-bestätigten Brunsten eine Sensitivität von 78,6 % und ein positiv prädiktiver Wert von 73,3 %.

Unter den 45 notierten Brunsten befanden sich auch 18 PGF_{2 α} -induzierte Brunsten, bei denen in der Regel auch ohne visuelle Brunstbeobachtung besamt wurde. Von den tatsächlich rein visuell erkannten Brunsten waren somit lediglich 15 richtig-positiv. Korrigiert um diesen Faktor ergaben sich für die visuelle Brunstbeobachtung durch die Landwirte eine Sensitivität von 62,5 % und ein positiv-prädiktiver Wert von lediglich 55,6 %.

VI. DISKUSSION

Die Brunsterkennung gehört zu den wichtigsten Aufgaben in Milchviehbetrieben. Sie stellt die wesentliche Grundlage für gute Fruchtbarkeitskennzahlen und damit den wirtschaftlichen Erfolg eines Betriebes dar. Aufgrund der heutigen Arbeits- und Haltungsbedingungen wird es für die Milchviehhalter jedoch immer schwieriger, eine Brunst zu erkennen und für eine erfolgreiche Besamung zu nutzen. Die Erarbeitung neuer und vor allem praktikabler Brunsterkennungsmethoden ist deshalb dringend geboten. Im Folgenden werden die Etablierung einer neuen Methode zur automatisierten Brunsterkennung sowie weitere Potentiale des Verfahrens diskutiert.

1. Eignung von maschinellem Sehen zur Brunstdetektion

Der Einsatz von maschinellem Sehen stellt einen völlig neuen Weg zur Brunsterkennung bei Rindern dar. Die hier vorgestellte Methodik liefert gleichzeitig zwei verschiedene Parameter, die Rückschlüsse auf den Zyklusstand der Milchkühe ermöglichen: die Bewegungsaktivität und die Sozialkontakte. Darüber hinaus erfasst das Verfahren weitere Daten. So ist es auch möglich, Liegezeiten, zurückgelegte Wegstrecken, Geschwindigkeiten, Fresszeiten und -dauer, besonders frequentierte Stallabteilungen und gemiedene Bereiche zu erfassen und zu bewerten. Ziel dieser Arbeit war es jedoch in erster Linie, die Eignung der Methode für die Brunstdetektion zu überprüfen.

1.1. Brunsterkennung durch Analyse der Bewegungsaktivität

Die Aktivitätsmessung als Hilfsmittel zur Brunsterkennung bei Rindern ist in den vergangenen Jahren vielfach untersucht worden. Im Focus der Betrachtungen stand dabei vor allem die Pedometrie (NEBEL et al., 2000; AT-TARAS & SPAHR, 2001; FIRK et al., 2002; BECKER et al., 2005; LOPEZ-GATIUS et al., 2005; PERALTA et al., 2005; ROELOFS et al., 2005b; WANGLER et al., 2005; VAN EERDENBURG, 2008b; HOLMAN et al., 2011). Ziel der vorliegenden Arbeit war es, dieses gut beschriebene Prinzip durch die Anwendung einer völlig neuen Technologie zu

optimieren. Anstatt, wie bei der Pedometrie üblich, die Aktivitätsveränderungen lediglich indirekt über „Schrittzähler“ zu ermitteln, wurden mit der neuen Methode die tatsächlichen Aufenthaltsorte und die Ortsveränderungen der Tiere detektiert und bewertet.

Während des Hauptversuchs wurden für alle mit Markern ausgestatteten Tiere die Bewegungsdaten kontinuierlich erfasst. Dabei hat sich gezeigt, dass die Bewegungsaktivität der zyklischen Kühe während des Diöstrus relativ konstant ist. An Brunsttagen stieg die Mobilität der Kühe dann sprunghaft an (siehe auch Abbildungen 9 und 10). Dieser Anstieg wurde durch den kontinuierlichen Vergleich der Tagesaktivität mit dem gleitenden Mittelwert der vorhergehenden 10 Tage sichtbar gemacht (siehe 3.2.5.1). Die Bandbreite der relativen Aktivitätssteigerung bei anhand ihres Progesteronprofils als brünstig validierten Tieren lag zwischen +99 % und +2.180 %. Dies deckt sich auch mit den Größenordnungen, die WANGLER et al. (2005) bei ihren Untersuchungen mittels Pedometrie gefunden haben. Das Maximum betrug dort +1536 %, das Minimum -68 %. Die großen Abstände zwischen den Werten verdeutlichen, dass es bei der brunstbedingten Aktivitätssteigerung erhebliche individuelle Unterschiede gibt. Für die Bewertung der Bewegungsaktivität ist dies letztlich aber nebensächlich, da die Steigerung für jedes Tier einzeln und immer auf Basis des jeweiligen gleitenden Mittelwerts ermittelt wird.

Die Mediane der Aktivitätserhöhung lagen in unserem Projekt bei +430 % für Tiere mit natürlicher Brunst und bei +338 % für jene mit PGF_{2α}-induzierter Brunst. Diese Werte entsprechen den Berichten verschiedener Autoren, die einen durchschnittlichen Anstieg der Bewegungsaktivität während der Brunst um den Faktor 4 beschrieben haben (KIDDY, 1977; SCHLUNSEN et al., 1987; SCHOFIELD et al., 1991). WANGLER et al. (2005) haben festgestellt, dass sich die Bewegungsaktivität mit dem Abklingen der Brunst normalisiert und sofort auf das Niveau des Basiswertes vor der Vorbrunst und Brunst zurückfällt. Auch in der vorliegenden Untersuchung zeigten alle normalzyklischen Tiere diesen Verlauf.

Für die automatisierte Brunsterkennung spielt die Definition des Grenzwertes, ab dem eine Brunstwarnung generiert werden soll, eine entscheidende Rolle. Wird der Grenzwert für die Aktivitätssteigerung zu hoch angesetzt, werden die brünstigen Tiere (richtig-positiv) zwar mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt, allerdings fallen dabei auch zahlreiche Tiere mit geringeren Erhöhungen als falsch-negativ durch das Raster. Bei einem zu niedrig angesetzten Grenzwert besteht hingegen die Gefahr, dass viele Tiere zu Unrecht als brünstig eingestuft werden, da sie aus anderen Gründen eine erhöhte Bewegungsaktivität aufweisen (falsch-positiv). Als wichtiger Grund hierfür sind vor allem Follikelwellen-bedingte Phasen mit relativ hohen Östrogenwerten im Diöstrus oder während der Trächtigkeit anzusehen. Nach Ansicht verschiedener Autoren besteht die Hauptaufgabe für Entwicklungsarbeiten im Bereich der automatisierten Brunsterkennung darin, einen Weg zur Reduzierung der falsch-positiven Alarme zu finden (NEBEL et al., 2000; FIRK et al., 2002; WANGLER et al., 2005; HOLMAN et al., 2011). Dennoch plädieren WANGLER et al. (2005) für einen Grenzwert von +100 %. Nach ihrer Ansicht ist es vorteilhafter alle brünstigen Tiere zu erkennen und dafür einen höheren Anteil an falsch-positiven Ergebnissen zu akzeptieren.

In unserer Untersuchung haben wir über eine ROC-Analyse das Optimum zwischen Sensitivität und Spezifität der Bewegungsmessung ermittelt und so den Grenzwert festgelegt. Bei der gemeinsamen Betrachtung aller detektierten Brunsten (natürlich und PGF_{2α}-induziert) ergab sich ein optimaler Grenzwert von +225 %. Daraus resultierten eine Sensitivität von 85 % und eine Spezifität von 83 %. Diese Werte erreichen die in der Literatur beschriebenen Größenordnungen oder übertreffen sie, insbesondere im Hinblick auf die Spezifität, sogar deutlich. Die Brunsterkennungsrate liegt bei den meisten Untersuchungen zwischen 80 und 90 %. Allerdings weisen Fehlerraten zwischen 17 und 55 % auf eine große Anzahl falsch-positiver Brunstwarnungen hin (FIRK et al., 2002). Untersuchungen von HOLMAN et al. (2011) zeigten für die Aktivitätsmessungen (Neck Collar und Pedometer) sogar nur Erkennungsraten von 59 bzw. 63 % sowie falsch-positive Brunstwarnungen von 42 % bei den Pedometern. Dies verdeutlicht, dass

die neue Methode zur Brunsterkennung schon in dieser frühen Phase der Etablierung gute bis sehr gute Ergebnisse liefert und sich somit auch für den praktischen Einsatz eignet.

1.2. Brunsterkennung durch Analyse der Sozialkontakte

Um die Sensitivität und die Spezifität der Methode des maschinellen Sehens zur Brunsterkennung zu optimieren und über die bisherigen Methoden der Aktivitätsmessungen zu stellen, wurde von uns ein völlig neuer Parameter eingeführt. Es handelt sich dabei um die Detektion und die Beurteilung von Sozialkontakten. So suchen brunstnahe Kühe andere sexuell aktive Tiere bevorzugt auf. Diese Sozialkontakte wurden bisher nur bei der visuellen Brunstbeobachtung durch das Stallpersonal registriert und auch für das Heraussuchen brünstiger Kühe für die künstliche Besamung genutzt. Eine Quantifizierung erfolgte dabei freilich nicht.

Es ist zudem bekannt, dass die Brunstanzeichen umso stärker auftreten, je mehr Kühe sich gleichzeitig in einem östrusnahen Stadium befinden (ROELOFS et al., 2005a). Eine Voraussetzung hierfür sind ausreichend große Herden, in denen sich sexuell aktive Gruppen bilden können. Ist dies der Fall, zeigen die einzelnen Tiere ihre Brunst intensiver und die Chance, die Brunsten zu nutzen steigt deutlich an (VAN EERDENBURG, 2008a; CUTULLIC et al., 2009).

Auch bei unseren Untersuchungen haben sich sexuell aktive Gruppen gebildet. Dies zeigte sich durch die Häufung von detektierten Brunsten in bestimmten Zeitfenstern und durch die daraus resultierenden intensivierten Sozialkontakte unter östrischen und periöstrischen Tieren. Brünstige Kühe waren signifikant länger in Kontakt mit anderen östrischen oder periöstrischen Tieren, als mit nicht-östrischen Kühen. Der Median der Varianz der Sozialkontakte bei Tieren mit natürlicher Brunst lag dadurch bei 1,598, bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst bei 1,478 und bei nicht-östrischen Tieren bei 1,10. Über eine ROC-Analyse der Varianzen der Sozialkontakte konnten wir für alle brünstigen Tiere (natürlich und PGF_{2α}-induziert) eine Brunsterkennungsrate von 74 % ermitteln. Die Spezifität lag bei 68 %. Im Vergleich zur Aktivitätserhöhung ist die Sensitivität damit

relativ gering und die Fehlerrate mit 32 % relativ hoch. Dennoch erscheint die Bewertung der Sozialkontakte als wertvolles ergänzendes Diagnoseinstrument bei der Brunsterkennung, da es mit Hilfe dieses Parameters erstmalig möglich wird, die Sozialkontakte brünstiger Tiere mathematisch zu fassen und zu bewerten. Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber anderen Brunsterkennungsmethoden ergibt sich, wenn die beiden vorgenannten Parameter kombiniert werden.

1.3. Brunsterkennung durch Kombination der Parameter Aktivität und Sozialkontakte

Zur Verbesserung der Brunsterkennung fordern NEBEL et al. (2000) den Einsatz von mindestens zwei verschiedenen Parametern. Unter aktuellen Praxisbedingungen wird in einer Reihe von Betrieben deshalb die Pedometrie mit der visuellen Brunstbeobachtung kombiniert. Unsere hier vorgestellte Methodik erfüllt diese Forderung in sich, da es mit ihr möglich ist, gleichzeitig verschiedene Parameter zu erfassen und zu bewerten. Das Verfahren schließt zudem die visuelle Brunstbeobachtung durch den Landwirt als weiteren (dritten) Parameter nicht aus. Unser Ziel war es, die Brunsterkennung durch die Verbindung der Parameter Bewegungsaktivität und Varianz der Sozialkontakte zu optimieren. Bei der Auswertung unserer Daten hat sich gezeigt, dass unter den Versuchsbedingungen die Kombination keine entscheidende Verbesserung der Methode insgesamt erbracht hat. Mittels Regressionsanalyse konnte für die Kombination der beiden Parameter Bewegungsaktivität und Varianz der Sozialkontakte die Spezifität zwar auf 87 % erhöht werden, die Sensitivität sank jedoch um 3 Prozentpunkte auf 82 %. Kritisch anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die Kombination im Sinne einer einfachen „und“-Bedingung eine hohe Zahl an falsch-positiven ($n = 12$) und falsch-negativen ($n = 9$) Tieren erbracht hätte. Nach BORSBERRY (2011) können Brunsterkennungsmethoden, die eine hohe Anzahl an falsch-positiven Ergebnissen produzieren, einen schädlichen Effekt auf die Fruchtbarkeitskennzahlen und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes haben, da eine künstliche Besamung zur falschen Zeit natürlich nicht zu einer Trächtigkeit führt, aber Kosten verursacht. Diese Gefahr ist durch die „und“-Kombination gegeben. Positiv ist aber festzuhalten, dass insgesamt

vier, der zunächst als nicht-brünstig deklarierten Tiere (Aktivität < 235), doch noch als brünstig erkannt wurden. Zudem konnten Brunsten, die bereits über die Aktivitätssteigerung erkannt worden waren, als richtig positiv bestätigt werden (n = 21). Das nicht vollständig befriedigende Ergebnis wurde vermutlich durch einzelne Extremwerte verursacht. Sowohl bei den Messungen der Bewegungsaktivität als auch speziell bei den Varianzen der Sozialkontakte waren Werte zu verzeichnen, die sich deutlich vom Durchschnitt unterschieden und mit großer Wahrscheinlichkeit auf Messfehler zurückzuführen sind. Hierbei ist vor allem zu erwähnen, dass es aus technischen und organisatorischen Gründen nicht möglich war, die Tiere permanent in dem von uns beobachteten Stallabteil zu halten. Gerade während der Melkzeiten wechselten immer wieder einzelne Kühe in andere Bereiche, so dass sie für eine gewisse Zeit aus der Datenerfassung herausfielen. Möglicherweise waren dies in der Tendenz vor allem Bewegungs- und Sexual-aktive, also periöstrische Tiere, die sich damit der Brunstdetektion entzogen. Hinzu kommt die relativ geringe Fallzahl, die sich ebenfalls negativ auf das Gesamtergebnis ausgewirkt hat. Insbesondere bei der Regressionsanalyse wäre bei höheren Fallzahlen ein besseres Ergebnis zu erwarten gewesen. Unabhängig davon gilt es zu überlegen, auf welche Weise die Sozialkontakte in künftigen Untersuchungen noch besser gefasst und bewertet werden können. So wurden im vorliegenden Versuch alle Bereiche des Laufstalls in die Beobachtung und Auswertung einbezogen – auch Warte-, Liege- und Fressbereiche, wo sich die Tiere rein zufällig begegnen. Bei einer technisch möglichen gesonderten Betrachtung oder einem Ausschluss dieser Bereiche könnte der Parameter Varianz der Sozialkontakte noch wertvoller werden. So könnten die Anzahl der falsch-positiven Kandidaten möglicherweise reduziert werden, da der Basiswert bei den sexuell nichtaktiven Tieren deutlich abgesenkt werden würde. Auf Basis der vorliegenden Untersuchung erscheint die Optimierung dieses Parameters jedenfalls als durchaus lohnendes Ziel.

2. Unterschiede zwischen natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst

Ein physiologischer Zyklus und offenkundige Brunstanzeichen sind essentiell für eine zeitgerechte Besamung (WALSH et al., 2011). In jedem Milchviehbetrieb gibt es jedoch einen bestimmten Prozentsatz an Tieren mit Zyklusstörungen. Die hormonelle Behandlung dieser sogenannten „Problemkühe“ kann sich auf die Äußerung spezifischer Brunstsymptome auswirken. Für die Brunsten nach Einsatz von PGF_{2α} zeigten Untersuchungen von ROELOFS et al. (2005a) eine Verschlechterung der Brunsterkennung sowie eine Verkürzung der Brunstsymptome. Keinen Einfluss von PGF_{2α} haben hingegen WALKER et al. (1996) festgestellt. In unserem Projekt konnten wir bei der Auswertung sowohl der Bewegungsaktivitäten als auch der Varianz der Sozialkontakte einen geringen, allerdings statistisch nicht signifikanten Unterschied zwischen den Tieren mit natürlicher und denen mit PGF_{2α}-induzierter Brunst feststellen. Die Werte beider Parameter waren bei den Kühen mit induzierter Brunst schwächer ausgeprägt.

Bei der Analyse der Erhöhung der Bewegungsaktivität ergab sich für die Kühe mit natürlicher Brunst ein Median von +430 %, wohingegen der Median bei den Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst nur bei +338 % lag. Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p = 0,290$). Auch bei der Auswertung mittels eines gemischten Modells zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen natürlicher und induzierter Brunst ($p = 0,995$).

Bei den Sozialkontakten lag der Median der Varianz der natürlichen Brunst bei 1,598, bei der PGF_{2α}-induzierten Brunst ermittelten wir einen Wert von 1,478. Auch hier gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Tieren mit natürlicher und induzierter Brunst ($p = 0,881$). Das Ergebnis wurde wiederum mittels eines gemischten Modells bestätigt ($p = 1,00$).

Obwohl der Unterschied zwischen natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst statistisch nicht signifikant ist, konnten wir dennoch zeigen, dass sich die Verschlechterung der Parameter negativ auf die Brunsterkennung

auswirkt. Während bei der Aktivitätserhöhung der natürlichen Brunst sowohl die Sensitivität als auch die Spezifität bei jeweils 90 % lagen, konnten wir bei der PGF_{2α}-induzierten Brunst für die Sensitivität lediglich 86 % und bei der Spezifität sogar nur 83 % ermitteln. Der positiv prädiktive Wert lag bei der PGF_{2α}-induzierten Brunst sogar um 19 Prozentpunkte unter dem der natürlichen Brunst (63 % vs. 82 %), wobei der negativ prädiktive Wert bei beiden 94 % betrug.

Ein uneinheitliches Bild zeigt die Betrachtung der Sozialkontakte. Hier ermittelten wir für die Kühe mit PGF_{2α}-induzierter Brunst verglichen mit natürlich brünstigen Kühen zwar eine um 3 Prozentpunkte schlechtere Sensitivität (68 % vs. 71 %). Die Spezifität war bei der PGF_{2α}-induzierten Brunst jedoch mit rund 74 % um 6 Prozentpunkte höher (68 % vs. 74 %). Umgekehrt zeigt sich das Verhältnis bei den prädiktiven Werten. Bei der natürlichen Brunst ermittelten wir einen positiv prädiktiven Wert von lediglich 56 %, wohingegen er bei der PGF_{2α}-induzierten Brunst bei 71 % und damit um 15 Prozentpunkte höher lag. Beim negativ prädiktiven Wert war das Verhältnis umgekehrt. Hier ergab sich bei der natürlichen Brunst ein Wert von 81 % im Gegensatz zu 71 % bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst. Die Ursache für dieses uneinheitliche Bild ist auch in diesem Fall bei einigen Extremwerten zu suchen, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf Messfehlern unterschiedlichster Art (verschmutzte oder beschädigte Marker, Softwareprobleme, Stromausfälle) beruhen. Höhere Fallzahlen würden vermutlich auch für die Varianz der Sozialkontakte zeigen, dass die Brunstsymptome bei den induzierten Brunsten im Durchschnitt schwächer ausfallen, als bei Tieren mit natürlicher Brunst.

3. Besondere Einflussfaktoren auf die Brunsterkennung

Um den optimalen Besamungs- oder Anpaarungszeitpunkt zu identifizieren, muss eine geeignete Brunsterkennungsmethode idealerweise 24 Stunden am Tag die zuverlässige Detektion des Brunstverhaltens jedes einzelnen Tieres gewährleisten. Die kontinuierliche Überwachung ist deswegen so wichtig, weil sich eine ganze Reihe von Faktoren negativ auf die Brunsterkennung auswirken können. Im

Folgenden werden einige Erkenntnisse dieser Untersuchung diskutiert, die von uns jedoch nicht im Detail ausgewertet wurden.

Es ist bekannt, dass die durchschnittliche Brunstdauer bei Rindern in den letzten Jahren stark zurück gegangen ist und nur noch durchschnittlich 7 bis 11 Stunden beträgt (ROELOFS et al., 2005a; DOBSON et al., 2007; SVEBERG et al., 2011). Als Ursachen werden hierfür vor allem die heutigen Haltungsbedingungen sowie die stark veränderten Arbeitsbedingungen angeführt, bei denen den Landwirten oftmals zu wenig Zeit für eine visuelle Brunstbeobachtung bleibt. Hinzu kommt, dass in der Zeit zwischen 07:00 und 19:00 Uhr nur 34 bis 45 % der Kühe rindern, im Zeitraum zwischen 19:00 und 07:00 Uhr jedoch 55 bis 66 % (ROSSOW, 2005). Auch bei unseren Untersuchungen fiel auf, dass 67 % der brünstigen Tiere in den Nachtstunden, genauer gesagt zwischen 21:00 Uhr und 06:00 Uhr, ihre Aktivitätspeaks gezeigt haben (Daten nicht gezeigt).

Vielfach diskutiert wird die Auswirkung einer hohen Milchleistung auf die Brunstdauer. Für Tiere mit einer Milchleistung von ≥ 55 kg pro Tag (Mittelwert über 10 Tage vor der Brunst) ermittelten WILTBANK et al. (2006) eine Brunstdauer von unter 3 Stunden, wohingegen Kühe mit einer niedrigeren Leistung (25 – 40 kg pro Tag) über rund 11 Stunden in Brunst waren. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch SHELDON et al. (2006). Deren Untersuchungen zeigten, dass insbesondere bei hochleistenden Herden die Brunstsymptome in den letzten 25 Jahren schwächer geworden sind. Zusätzlich weisen die Hälfte der Kühe mit hohen Milchleistungen abnormale Zykluslängen auf und die Konzeptionsraten nehmen pro Jahr um 1 % ab. In unserem Versuchsbetrieb werden Spitzenleistungen mit ≥ 55 kg pro Tag nicht erreicht. Die durchschnittliche Milchleistung beträgt dort 7.800 kg pro Jahr, so dass der Faktor Milchleistung vermutlich keinen Einfluss auf unsere Untersuchungen hatte (Daten nicht gezeigt).

Auch Klauenerkrankungen oder ein Body Condition Score (BCS) $< 2,0$ können für falsch negative Ergebnisse sorgen (HOLMAN et al., 2011), da Kühe mit diesen Merkmalen schwächere Brunstsymptome zeigen. Als Konsequenz wird die Sensitivität der Pedometrie negativ beeinflusst

(WALKER et al., 2010). Mangelhafte Ernährung, verbunden mit einem durch die negative Energiebilanz verursachten Verlust an Körpermasse kann negative Auswirkungen auf die Brunstintensität haben (WALSH et al., 2011). Bei einem Vergleich verschiedener Brunsterkennungsmethoden haben HOLMAN et al. (2011) einen BCS von < 2 als problematisch erkannt. Dieser Parameter scheint für die vorgestellten Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung zu sein, da sich die Probandinnen mit regelmäßig erfassten BCS-Werten zwischen 2,0 und 3,5 allesamt in einer guten Kondition befanden (Daten nicht gezeigt).

Lahmheiten sind bei Milchkühen klassischerweise mit einer Verringerung der Brunstintensität verbunden, da lahme Tiere mehr liegen und weniger stehen oder umherlaufen (ROELOFS et al., 2010). In modernen, hochleistenden Milchviehbetrieben treten Lahmheiten mit einer Häufigkeit von bis zu 52 % (Durchschnitt 20 – 25 %) auf (MÜLLING, 2006). Durch die Lahmheit haben die betroffenen Kühe weniger Kontakt zu den anderen sexuell aktiven Tieren ihrer Gruppe (WALKER et al., 2010). Insbesondere beim Einsatz von Pedometern sind deshalb die Chancen eine echte Brunst zu erkennen bei lahmen Kühen signifikant schlechter, als bei nicht-lahmen Tieren (HOLMAN et al., 2011). Leider werden Klauenerkrankungen in unserem Versuchsbetrieb derzeit noch nicht dokumentiert, so dass hierzu keine tierbezogene Aussage möglich ist. Nach Einschätzung des betreuenden Tierarztes aus der Klinik für Wiederkäuer mit Ambulanz und Bestandsbetreuung der LMU München spielen dort Klauenerkrankungen mit einer Häufigkeit zwischen 10 und 30 % aber eine durchaus beachtenswerte Rolle (MARTIN, 2012). Die Verteilung des Locomotion Score (LS) dürfte sich nach seiner Meinung wie folgt darstellen: LS 1: 50%, LS 2: 30%, LS 3: 15% und LS 4: 5% (Daten nicht gezeigt).

Die Faktoren Lahmheit und BCS und ihre Auswirkungen auf die Brunsterkennung mit Hilfe des hier vorgestellten Verfahrens könnten im Focus weiterer Untersuchungen stehen. Dies wäre insbesondere deshalb sehr interessant, weil die neue Methode die gleichzeitige Erfassung und Bewertung der unterschiedlichsten Parameter erlaubt. Gerade im Hinblick auf Lahmheiten können Daten über zurückgelegte Wegstrecken,

Geschwindigkeiten, Liegezeiten, schleichende Aktivitätsveränderungen usw. sehr schnell und detailliert Informationen über das Einzeltier und auch den Herdenstatus liefern. Mit den üblichen Pedometern ist dies so nicht möglich, da diese im günstigsten Fall lediglich einen plötzlichen Abfall der Aktivität aufzeigen können.

Bei Folgeprojekten sollten auch die in unserem Projekt aufgetretenen Phänomene untersucht werden, dass trächtige Tiere sowohl durch einen kurzen Aktivitätsanstieg etwa 10 Tage post conceptionem sowie durch eine periodisch wiederkehrende Steigerung der Bewegungsintensität auffallen. Speziell bei der Analyse der Sozialkontakte zeigte sich, dass sich auch trächtige Tiere in einer sexuell aktiven Gruppe aufhielten. Bei den meisten der bisher zur Pedometrie veröffentlichten Untersuchungen wurde nur die Erkennung der Brunst in den Focus gestellt. Einmal als brünstig erkannte Tiere fallen bei diesen Betrachtungen normalerweise aus der Erfassung der Pedometriedaten heraus. Anhand der in unserem Projekt erfassten Daten liegt jedoch der Verdacht nahe, dass die, auch bei tragenden und diöstrischen Tieren ablaufenden Follikelwellen zu detektierbaren Aktivitätserhöhungen führen. Nebenfragestellung entsprechender Untersuchungen sollte es sein, ob mit der Methodik auch Resorptionen und Aborte der Embryonen bzw. Feten frühzeitig erkannt werden können.

Ein weiterer Punkt, der Anlass für detailliertere Folgeuntersuchungen mit höheren Fallzahlen sein sollte, ist die mit diesem System eventuell mögliche Erkennung von azyklischen Tieren. Retrospektiv lässt sich anhand der auftretenden Aktivitätspeaks zwar sehr schön zeigen, dass es sich bei der betrachteten Kuh um ein azyklisches Tier handelt. Viel interessanter wäre es aber natürlich, bereits frühzeitig einen Hinweis auf eine eventuell vorliegende Erkrankung zu erhalten. Denkbar wäre hier die Integration von typischen Aktivitätsmuster-Vorlagen in die Software, wodurch automatisierte Warnhinweise erzeugt werden könnten. So kann eine Kuh mit Follikel-Thekazysten durch eine verlängerte Aktivitätsphase mit wiederkehrenden Peaks auffallen. Tiere mit persistierendem Corpus luteum oder nach Embryonentod könnten vermutlich durch verlängerte Phasen mit niedriger Bewegungs- und Sozialaktivität identifiziert werden.

4. Visuelle Brunstbeobachtung durch das Betriebspersonal

Bei der Analyse der, von den Landwirten im Betriebstagebuch vermerkten Brunsten hat sich gezeigt, dass mit der visuellen Brunstbeobachtung alleine ein deutlich schlechteres Ergebnis erreicht werden konnte als mit dem „Tracking“. So hatten die Landwirte bei den Versuchskühen 45 Brunsten notiert. Durch einen Abgleich mit den P4-Verläufen der einzelnen Tiere hatte sich gezeigt, dass insgesamt 12 vermeintliche Brunsten nicht zum Hormonprofil passten (= falsch-positiv). Auch die Abstände zwischen diesen „Brunsten“ entsprachen nicht immer einem normalen Zyklus von 21 Tagen, sondern waren meist deutlich kürzer. Somit hat es sich bei diesen Abweichungen im Verhalten vermutlich um „Zwischenbrunsten“, also Diöstrusphasen mit großen dominanten Follikeln, gehandelt. Weitere 18 Brunsten waren PGF_{2α}-induziert, bei denen in der Regel auch ohne visuelle Brunstbeobachtung besamt wurde. Realistisch betrachtet sind diese deshalb auch nicht als visuelle Brunstbeobachtung zu werten. Insgesamt ergab sich so für die visuelle Brunstbeobachtung durch die Landwirte eine Sensitivität 62,5 % und ein positiv-prädiktiver Wert von 55,6 %. Diese Zahlen entsprechen den von verschiedenen Autoren ermittelten durchschnittlichen Brunsterkennungsraten bei visueller Brunstbeobachtung. Diese bewegen sich zwischen 50 und 70 % (ESSLEMONT, 1992; HEUWIESER, 1995). Angesichts der auf die Kernarbeitszeit beschränkten visuellen Brunstbeobachtung überrascht der niedrige positiv-prädiktive Wert nicht. Da nur noch 34 bis 45 % der Tiere in der Zeit zwischen 07:00 und 19:00 Uhr rindern (ROSSOW, 2005), entgehen den Landwirten sehr viele Brunsten. Wie unsere Untersuchungen erbracht haben, zeigten 67 % der Versuchstiere ihre größte Bewegungsaktivität zwischen 21:00 und 06:00 Uhr. Hinzu kommt, dass für eine effektive visuelle Brunstbeobachtung (richtig positive Ergebnisse > 80 %) drei bis vier Beobachtungsphasen von jeweils 20 Minuten Dauer notwendig sind. Dieser Zeitaufwand kann in dem von zwei Familien bewirtschafteten Versuchsbetrieb nur schwer geleistet werden. Speziell dort könnte die Brunstdetektion mittels Tracking also zu einer deutlich verbesserten Herdenfruchtbarkeit beitragen.

5. Schlussbetrachtung und Ausblick

Angesichts der multifaktoriellen, nicht immer einfach steuerbaren Einflüsse auf das Brunstgeschehen sollten Landwirte alle Möglichkeiten ausschöpfen, um die Effektivität der Brunsterkennung zu verbessern. Dazu gehört heute neben der traditionellen visuellen Brunstbeobachtung auch der Einsatz einer oder mehrerer zusätzlicher Brunsterkennungsmethoden (ROELOFS et al., 2010). Die optimale Methode soll idealerweise eine permanente Überwachung und eine sichere Identifikation der brünstigen Tiere ermöglichen, wenig Arbeitsaufwand verursachen, kostengünstig sein und eine hohe Sensitivität gewährleisten (DISKIN & SREENAN, 2000). Das hier vorgestellte Verfahren erfüllt alle diese Anforderungen. In diesem Zusammenhang muss auch erwähnt werden, dass wir in unserer Untersuchung nur einen Teil des gesamten Potentials des Systems ausgeschöpft haben. Obwohl auch die Bewegungen innerhalb eines Kamerafeldes verfügbar gewesen wären, haben wir zur Vermeidung übergroßer Datenmengen lediglich Ortsveränderungen von einem Kamerasegment in ein benachbartes bewertet. Insbesondere bei sexuell aktiven Gruppen sind aber auch die Aktivitäten innerhalb eines Kamerasegmentes hoch interessant (siehe Abbildung 36, Kreislaufen), weil damit der direkte Tier-Tier-Kontakt (ein Kardinalsymptom der Brünstigkeit) mathematisch noch besser erfasst werden könnte. Wie die aktuelle technische Entwicklung zeigt, wird das, was heute als große Datenmenge bezeichnet wird, in Kürze leicht zu bewältigen sein.

Darüber hinaus kann die Methode für die Erfassung und Analyse weiterer, für Milchviehbetriebe wichtiger, Parameter verwendet werden. Hierzu gehören unter anderem Liege- und Fresszeiten sowie bevorzugte Aufenthaltsorte. Aus diesen Daten lassen sich Hinweise auf den Gesundheitszustand jedes Einzeltieres und der Herde ableiten. Bestes Beispiel ist hier die Lahmheit, die je nach Schwere mit einer von der Brunst unabhängigen Verringerung der Bewegungsaktivität verbunden ist. Nicht zu vergessen sind Informationen, die stallbauliche Aspekte betreffen. So können kurze Liegezeiten ein erstes frühes Indiz auf Probleme im Liegebereich sein.

Hingewiesen sei auch noch einmal ausdrücklich auf die Möglichkeit zur Visualisierung der erhöhten Bewegungsaktivität sowie der Sozialkontakte. Die Trackingdaten sind mit den parallel aufgezeichneten Videobildern des Stalles per Time-Code verknüpft. Auf diese Weise können die elektronisch detektierten Brunstaktivitäten sichtbar gemacht und gleichzeitig sehr einfach von anderen, eine erhöhte Aktivität auslösenden Ursachen, unterschieden werden. Für einen Teil der Landwirte ist es dabei sicherlich überzeugender, die „technisch“ ermittelte Brunst zusätzlich als Video auf dem Bildschirm sehen zu können. Hinzu kommt, dass nächtliche Brunsten, die den Landwirten sonst verborgen geblieben wären, ebenfalls sichtbar werden.

Bis zu einer Marktreife des „Kuh-Trackings“ muss das Verfahren allerdings noch verfeinert werden. Dies betrifft insbesondere die Ausgestaltung und Größe der Marker. Je kleiner diese sind, desto besser wird ihre Haltbarkeit sein und desto leichter können auch mehrere redundante Marker an den Tieren angebracht werden und so für eine optimale Erkennung sorgen. Auch bei der Frage nach dem Material für die Marker sollten weitere Überlegungen angestellt werden. In unserem Projekt mussten wir die 2D-Matrixcodes aus produktionstechnischen Gründen auf die Markerbasis (PVC-Gewebe) aufkleben. Dadurch war es immer wieder nötig, Marker, bei denen sich die Folie abgelöst hatte, zu ersetzen. Besser wäre es, die Markerbasis selbst zu bedrucken, oder aber die Matrixcodes direkt über verschiedenfarbige Folien herzustellen.

Je kleiner die Marker sein sollen, desto größer muss die Auflösung der verwendeten Kameras sein. Bei einem Laborversuch mit einer Zelos-655M GV GigE-Kamera der Firma Kappa (Auflösung 2448 x 2050 Pixel) konnte die Markergröße bei gleicher Performance auf 8 x 8 cm reduziert werden (siehe Abbildung 37). In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass höhere Auflösungen mit höheren Kosten einhergehen. Bei der Planung unseres Projektes Ende 2010 wiesen die eingesetzten Kameras (Giganetix, GC1391M) das optimale Preis-/Leistungsverhältnis auf. Erfreulicherweise sinken die Preise für Kameras ähnlich wie die Preise für Personalcomputer, wenn auch nicht ganz so schnell. So werden bereits in naher Zukunft wesentlich höher auflösende Kameras zu einem

absolut praxistauglichen Preis verfügbar sein.

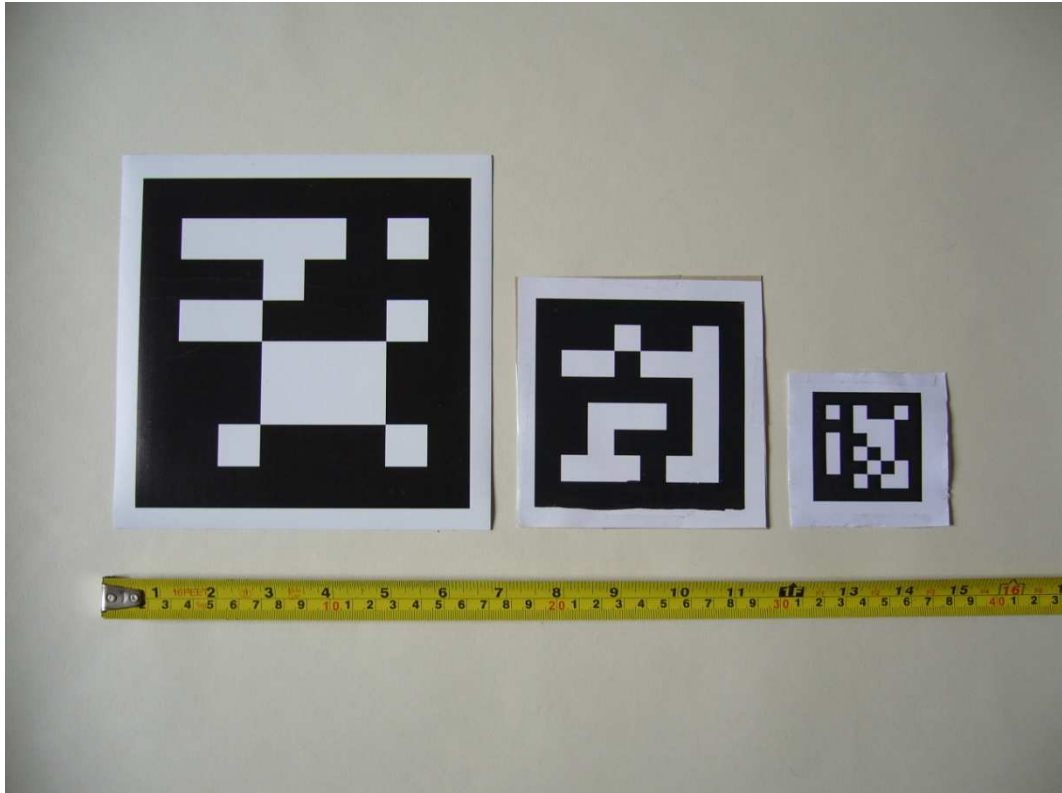


Abbildung 37: **Unterschiedliche Markergrößen.** Links ist die bei unserem Projekt eingesetzte Größe zu sehen, rechts die theoretisch mögliche Größe beim Einsatz der höher auflösenden Kamera

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Methode künftig ein wertvolles Hilfsmittel sowohl für die Brunsterkennung als auch für das Herdenmanagement insgesamt sein kann. Aufgrund der von der Tieranzahl zunächst unabhängigen Kosten eignet sich das Verfahren aber nach Einschätzung des Autors erst ab einer Bestandsgröße von 100 laktierenden Tieren. Mit den sich hieraus ergebenden Investitionskosten von etwa 100,00 € pro zu beobachtender Kuh hat das vorgestellte Verfahren dennoch gute Chancen, sich am Markt zu etablieren.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Oliver Dietrich (2012): **Etablierung einer neuen Methode zur automatisierten Brunsterkennung beim Rind**

Die Brunsterkennung ist ein Schlüsselfaktor für die Wirtschaftlichkeit von Milchviehbetrieben. Dabei wird es für die Milchviehhalter immer schwieriger, eine Brunst zu erkennen und für eine erfolgreiche Besamung zu nutzen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Während die Kühe aufgrund der heutigen Haltungsbedingungen zunehmend weniger und kürzer Brunstsymptome zeigen, bleibt den Landwirten in den durch wirtschaftliche Zwänge immer größer werdenden Betrieben oftmals zu wenig Zeit für eine adäquate visuelle Brunstbeobachtung. Die Folge sind erhebliche ökonomische Verluste. Aus diesen Gründen ist die Neuentwicklung und Nutzung zuverlässiger und vor allem praktikabler Brunsterkennungsmethoden dringend geboten.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde deshalb eine neue Methode zur Brunsterkennung etabliert, die es den Landwirten ermöglichen soll, ihre Tiere automatisiert 24 Stunden pro Tag zu überwachen. Das vorgestellte System beruht auf dem „Tracking“, also der kontinuierlichen Detektion der Bewegungen von Kühen in einem Laufstall mit Hilfe von sogenanntem „maschinellern Sehen“. Die so gewonnenen digitalisierten Informationen über die jeweils aktuellen Positionen der beobachteten Tiere sowie deren Ortsveränderungen innerhalb des Stalles ermöglichten eine differenzierte Betrachtung der Bewegungsmuster. Analysiert wurden die Aktivitätszeiten und -intensitäten sowie die sozialen Interaktionen brünstiger Kühe mit anderen Herdenmitgliedern. Als Goldstandard für die Validierung der Methode kam ein Enzymimmuntest auf Mikrotitrationsplatten zur Progesteronanalyse in Magermilchproben zum Einsatz.

Grundlage des Projektes waren umfangreiche technische Vorarbeiten. Dies betraf insbesondere die Auswahl der geeigneten Kameratechnik sowie die Entwicklung einer praxistauglichen Objektmarkierung und -erkennung inklusive einer speziellen Software. Zum Einsatz für das Tracking kamen schließlich hochauflösende GigE-Kameras sowie selbst

hergestellte PVC-Marker mit aufgedrucktem 2D-Matrixcode.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit der neuen Methode die für den Östrus typische Erhöhung der Bewegungsaktivität von Kühen sehr gut abbilden lässt. Der Median der Aktivitätserhöhung bezogen auf den gleitenden Mittelwert der vorangegangenen 10 Tage lag bei Tieren mit natürlicher Brunst bei +430 %, bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst bei +338 % und bei der gemeinsamen Betrachtung von natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst bei +397 %. Es bestand ein statistisch signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) zwischen den Aktivitätserhöhungen von brünstigen und nicht-brünstigen Tieren (Median: +153 %). Kein signifikanter Unterschied in der prozentualen Erhöhung der Bewegungsaktivität besteht zwischen den Tieren mit natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst ($p = 0,290$). In unserer Untersuchung haben wir über eine ROC-Analyse das Optimum zwischen Sensitivität und Spezifität der Analysemethode ermittelt. Hier ergab sich für die Steigerung der Bewegungsaktivität ein optimaler Grenzwert von +225 %. Daraus resultierten eine Sensitivität von 85 % und eine Spezifität von 83 %.

Um die Effektivität der automatisierten Brunsterkennung durch maschinelles Sehen weiter zu verbessern, wurde von uns ein völlig neuer Parameter eingeführt. Es handelt sich dabei um die Detektion und die Beurteilung von Sozialkontakten zwischen östrischen Kühen und (peri-)östrischen Begleittieren. Das von uns als „Varianz der Sozialkontakte“ bezeichnete Streuungsmaß macht häufige Sozialkontakte von betrachteten Einzeltieren mit ebenfalls sexuell aktiven Herdenmitgliedern sichtbar. Der Median der Varianz der Sozialkontakte lag bei Tieren mit natürlicher Brunst bei 1,598, bei Tieren mit PGF_{2α}-induzierter Brunst bei 1,478 und bei der gemeinsamen Betrachtung von natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst bei 1,52. Bei nicht-östrischen Tieren (diöstrisch oder tragend) betrug das Streuungsmaß der Sozialkontakte im Mittel 1,10. Auch hier gab es einen signifikanten Unterschied zwischen brünstigen und nicht-brünstigen Tieren ($p = 0,003$). Kein statistisch signifikanter Unterschied in der Varianz der Sozialkontakte besteht zwischen den Tieren mit natürlicher und PGF_{2α}-induzierter Brunst ($p = 0,881$). Über eine ROC-Analyse der Varianzen konnten wir eine Brunsterkennungsrate von

74 % ermitteln. Die Spezifität lag bei 68 %.

Die Kombination der beiden Parameter Bewegungsaktivität und Varianz der Sozialkontakte mit Hilfe einer Regressionsanalyse ergab eine Sensitivität von 82 % und eine Spezifität von 87 %.

Die Brunsterkennung bei Milchrindern mit Hilfe von maschinellem Sehen ist damit nicht nur eine funktionierende Alternative zu den bisher üblichen Pedometern. Durch den neu eingeführten und automatisch miterfassten Parameter „Varianz der Sozialkontakte“, bietet das vorgestellte Verfahren einen echten Zusatznutzen für die Landwirte und kann somit zu einer Optimierung der Herdenfruchtbarkeit beitragen. Darüber hinaus liefert die Methode weitere wichtige Daten (Fresszeiten, Liegezeiten, Durchschnittsgeschwindigkeiten etc.), die das Potential haben, eventuell drohende Krankheiten (z. B. Lahmheiten, beginnende Ketosen usw.) aber auch Probleme bei den Haltungsbedingungen frühzeitig zu erkennen und somit insgesamt einen Beitrag zum tierorientierten Betriebsmanagement zu leisten.

VIII. SUMMARY

Oliver Dietrich (2012): **Establishment of a new method for automated heat detection in cattle**

Heat detection is a key factor for the economic viability of dairy herds. However, it is becoming more difficult for farmers to detect and use the heat for a successful artificial insemination. There are various reasons for this development. On the one hand, cows are showing progressively fewer behavioral signs of oestrus and, on the other hand, due to economic necessity leading to growing herds, the herd managers do not have enough time for adequate oestrus detection. The result is a considerable loss of profit. For these reasons, the development and use of new and above all workable oestrus detection methods are imperative.

The objective of this study was to establish a new heat detection method which allows the farmer to automatically observe his herd on a 24/7-basis. The recommended system is based on the continuous detection of the moving cows in a freestall barn, which involves machine vision. The information received about the positions as well as the locomotion within the freestall barn enables a precise view of the moving patterns. With this system, we analyzed the duration and the intensity of activity as well as the social interactions of cows in oestrus with other members of the herd. As gold standard for the validation of the method, we used an enzyme immuno assay test to measure the amount of progesterone in skimmed milk. As part of the extensive preparation, we selected appropriate video cameras, designed suitable markers and implemented special software. Finally, we used high-resolution GigE-cameras and markers we made ourselves out of fabric-reinforced PVC with printed 2D matrix codes.

Our study demonstrated that the new method is able to correctly show the increased activity which is typical of cows in oestrus. The median of the increase in motion activity with regard to a moving average of the 10 days before the oestrus was +430 % for cows in natural oestrus and +338 % for cows in PGF_{2α}-induced oestrus. Overall, the median was +397 %. We found a statistically significant difference ($p < 0.001$) in increased motion

activity between cows in oestrus and cows not in oestrus (median: +153 %). There was no statistically significant difference in increased motion activity between cows in natural oestrus and cows in PGF_{2α}-induced oestrus ($p = 0.290$). In our study we used ROC analysis to find the optimum between sensitivity and specificity of the method. We identified an ideal threshold value of +225 %. The outcome was a sensitivity of 85 % and a specificity of 83 %.

To enhance the efficiency of the machine vision method, we established a completely new parameter. This parameter is used for the detection and evaluation of social interactions between cows in heat and peri-oestrus herd members. We named the new parameter “variance of social interactions”. This measure of scale makes sexual contacts of observed cows (in heat) with other likewise sexually active herd members apparent. The median of the variance of social interactions was 1.598 for cows in natural heat, 1.478 for cows in PGF_{2α}-induced oestrus and 1.52 overall. For cows not in oestrus (in dioestrus or gestating), we found a measure of scale of 1.10. We found a statistically significant difference ($p = 0.003$) between the cows in oestrus and the cows not in oestrus. There was no statistically significant difference in the variance of social interactions between cows in heat naturally and cows in PGF_{2α}-induced oestrus ($p = 0.881$). With ROC analysis, we determined a heat detection rate (sensitivity) of 74 %. The specificity was 83 %.

By means of a regression analysis, we combined the two parameters of increased motion activity and variance of social interactions. This resulted in a sensitivity of 82 % and a specificity of 87 %.

Heat detection in dairy herds with the use of machine vision is not only a functional alternative to the pedometers that have been commonly used so far. With the newly introduced and automatically included parameter “variance of social interactions”, the recommended system offers real additional value for the farmer and can thus help to optimize fertility rates in dairy herds. Moreover, the method provides supplemental data such as length of food intake, lying times, average speed, etc.). This data has the potential to help farmers prevent impending diseases such as lameness or ketosis as well as to indicate problems with animal husbandry at an early

stage and therefore provide a contribution to animal-oriented management of dairy herds.

IX. LITERATURVERZEICHNIS

AIA. GigE Vision. Automated Imaging Association 2011:

<http://www.machinevisiononline.org/vision-standards-details.cfm?type=5>.

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Rinderzüchter e. V. Rinderproduktion in Deutschland 2010. ADR Jahresbericht 2011: 55.

At-Taras EE, Spahr SL. Detection and characterization of estrus in dairy cattle with an electronic heatmount detector and an electronic activity tag. Journal of Dairy Science 2001; 84: 792-8.

AXIS (2008) AXIS 223M Netzwerk-Kamera. AXIS Communications.
Datenblatt AXIS 223M Netzwerk-Kamera

Becker F, Kanitz W, Heuwieser W. Vor- und Nachteile einzelner Methoden zur Brunsterkennung beim Rind. Zuchtungskunde 2005; 77: 140-50.

Bicalho RC, Galvao KN, Guard CL, Santos JE. Optimizing the accuracy of detecting a functional corpus luteum in dairy cows. Theriogenology 2008; 70: 199-207.

Borsberry S. Detecting oestrus in dairy cows. Veterinary Record 2011; 169: 45-6.

Bouguet J-Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab. 2010:
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

Brehme U. Untersuchungen mit Thermoimplantaten und Pedometern bei Mutterkühen. Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 1997; Beiträge zur 3. internationalen Tagung in Kiel: 281-9.

Burfeind O, von Keyserlingk MAG, Weary DM, Veira DM, Heuwieser W. Short communication: Repeatability of measures of rectal temperature in dairy cows. Journal of Dairy Science 2010; 93: 624-7.

Cutullic E, Delaby L, Causeur D, Michel G, Disenhaus C. Hierarchy of factors affecting behavioural signs used for oestrus detection of Holstein and Normande dairy cows in a seasonal calving system. Animal Reproduction Science 2009; 113: 22-37.

Diskin MG, Sreenan JM. Expression and detection of oestrus in cattle. Reproduction Nutrition Development 2000; 40: 481-91.

Dobson H, Smith R, Royal M, Knight C, Sheldon I. The high-producing dairy cow and its reproductive performance. Reproduction in Domestic Animals 2007; 42 Suppl 2: 17-23.

Dobson H, Walker SL, Morris MJ, Routly JE, Smith RF. Why is it getting more difficult to successfully artificially inseminate dairy cows? *Animal* 2008; 2: 1104-11.

Döcke F (1994) *Veterinärmedizinische Endokrinologie*. Gustav Fischer-Verlag, Jena. 399-498

Dransfield MB, Nebel RL, Pearson RE, Warnick LD. Timing of insemination for dairy cows identified in estrus by a radiotelemetric estrus detection system. *Journal of Dairy Science* 1998; 81: 1874-82.

Erasmus WJ, Rossing W, Hogewerf PH, Benders E. Signal-Processing of Activity Data for Estrus Detection in Dairy-Cattle. Prospects for Automatic Milking 1992; 65: 360-9.

Esslemont RJ, Glencross RG, Bryant MJ, Pope GS. Quantitative Study of Pre-Ovulatory Behavior in Cattle (British Friesian Heifers). *Applied Animal Ethology* 1980; 6: 1-17.

Esslemont RJ. Measuring dairy herd fertility. *Veterinary Record* 1992; 131: 209-12.

Firk R, Stamer E, Junge W, Krieter J. Automation of oestrus detection in dairy cows: a review. *Livestock Production Science* 2002; 75: 219-32.

Fischer-Tenhagen C, Wetterholm L, Tenhagen BA, Heuwieser W. Training dogs on a scent platform for oestrus detection in cows. *Applied Animal Behaviour Science* 2011; 131: 63-70.

Gasteiner J, Fallast M, Rosenkranz S, Hausler J, Schneider K, Guggenberger T. Measuring rumen pH and temperature by an indwelling and wireless data transmitting unit and application under different feeding conditions. *Wiener Tierärztliche Monatsschrift* 2009; 96: 188-94.

Ginther OJ, Bergfelt DR, Kulick LJ, Kot K. Selection of the dominant follicle in cattle: role of estradiol. *Biology of Reproduction* 2000; 63: 383-9.

Gordon P. Oestrus detection in dairy cattle. *In Practice* 2011; 33: 542-6.

Grunert E (1996) *Buiatrik*, Band 1, 5. Auflage. Verlag M. & H. Schaper, Hannover. 232

Grunert E, Berchtold, M. (1999) *Fertilitätsstörungen beim weiblichen Rind*. Berchtold, M., Parey-Verlag, Berlin. 3 - 11

Gwazdauskas FC, Lineweaver JA, McGilliard ML. Environmental and management factors affecting estrous activity in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 1983; 66: 1510-4.

Harms V (1998) Biomathematik, Statistik und Dokumentation: eine leichtverständliche Einführung. Harms Verlag, Kiel-Mönkeberg

Heuwieser W. Strategic use of prostaglandin F₂ alpha-goals of prostaglandin programs. *Praktische Tierarzt* 1997; 78: 141-&.

Heuwieser W, Mansfeld, R. Brunstbeobachtung beim Rind. *Milchpraxis* 1995; 33: 75-9.

Holman A, Thompson J, Routly JE, Cameron J, Jones DN, Grove-White D, Smith RF, Dobson H. Comparison of oestrus detection methods in dairy cattle. *Veterinary Record* 2011; 169: 47.

Hunter RH. *Physiology of the Graafian follicle and ovulation*. Cambridge University Press 2003;

Jähne B (2005) *Digitale Bildverarbeitung*, 6. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 3-8

Jung M. Brunstbeobachtung: Welche Möglichkeiten bieten Technische Hilfsmittel? *Milchrindtage Brandenburg* 01/2009 2009;

Kiddy CA. Variation in Physical-Activity as an Indication of Estrus in Dairy-Cows. *Journal of Dairy Science* 1977; 60: 235-43.

King JOL. Effect of Estrus on Milk-Production in Cows. Veterinary Record 1977; 101: 107-8.

Lewis GS, Newman SK. Changes Throughout Estrous Cycles of Variables That Might Indicate Estrus in Dairy-Cows. Journal of Dairy Science 1984; 67: 146-52.

Lokhande SM, Patil VH, Mahajan DC, Phadnis YP, Humblot P, Thibier M. Fertility on synchronized estrus in crossbred (Bos taurus x Bos indicus) heifers. Theriogenology 1983; 20: 397-406.

Lopez-Gatius F, Santolaria P, Mundet I, Yaniz JL. Walking activity at estrus and subsequent fertility in dairy cows. Theriogenology 2005; 63: 1419-29.

Lopez H, Sartori R, Wiltbank MC. Reproductive hormones and follicular growth during development of one or multiple dominant follicles in cattle. Biology of Reproduction 2005; 72: 788-95.

Lowe DG (1999) Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. International Conference on Computer Vision. Corfu

Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision 2004; 60: 91-110.

Martin R (2012) persönliche Mitteilung. Ed Dietrich O

Meyer HHD, Guven B, Karg H. Enzyme-Immunoassay (Eia) on Microtitration Plates for Progesterone Determination in Skim Milk. Wiener Tierärztliche Monatsschrift 1986; 73: 86-&.

Milvae RA, Hinckley ST, Carlson JC. Luteotropic and luteolytic mechanisms in the bovine corpus luteum. Theriogenology 1996; 45: 1327-49.

Morais R, Valente A, Almeida JC, Silva AM, Soares S, Reis MJCS, Valentim R, Azevedo J. Concept study of an implantable microsystem for electrical resistance and temperature measurements in dairy cows, suitable for estrus detection. Sensors and Actuators a-Physical 2006; 132: 354-61.

Mülling C (2006) Applied Physiopathology of the Foot. In: World Buiatrics Congress 2006. Institute of Veterinary Anatomy, FU Berlin, Nice, France. 103 - 17

Nebel RL, Dransfield MG, Jobst SM, Bame JH. Automated electronic systems for the detection of oestrus and timing of AI in cattle. Animal Reproduction Science 2000; 60-61: 713-23.

Ohtani S, Okuda K, Nishimura K, Mohri S. Histological changes in bovine endometrium during the estrous cycle. *Theriogenology* 1993; 39: 1033-42.

Ostler S, Fries R, Emmerling R, Gotz KU, Aumann J, Thaller G. Investigation of determinants for the genetic progress in the Bavarian Fleckvieh. *Zuchtungskunde* 2005; 77: 341-54.

Peis R (2007) Common Vision Blox Manto - Eine Methode zur automatischen Auswertung des Auslaufverhaltens von Legehennen. In: eZAI (2)

Peralta OA, Pearson RE, Nebel RL. Comparison of three estrus detection systems during summer in a large commercial dairy herd. *Animal Reproduction Science* 2005; 87: 59-72.

Phatak AP, Whitmore HL. Greater participation by veterinarians in the reproductive management of dairy cattle. *J Am Vet Med Assoc* 1991; 199: 74-6.

Phillips C (2002) *Cattle Behaviour & Welfare*. Blackwell Science Ltd., Oxford. 159 - 71

Rathbone MJ, Kinder JE, Fike K, Kojima F, Clopton D, Ogle CR, Bunt CR. Recent advances in bovine reproductive endocrinology and physiology

and their impact on drug delivery system design for the control of the estrous cycle in cattle. *Advanced Drug Delivery Reviews* 2001; 50: 277-320.

Roelofs J, Lopez-Gatius F, Hunter RH, van Eerdenburg FJ, Hanzen C. When is a cow in estrus? Clinical and practical aspects. *Theriogenology* 2010; 74: 327-44.

Roelofs JB, van Eerdenburg FJ, Soede NM, Kemp B. Various behavioral signs of estrous and their relationship with time of ovulation in dairy cattle. *Theriogenology* 2005a; 63: 1366-77.

Roelofs JB, van Eerdenburg FJ, Soede NM, Kemp B. Pedometer readings for estrous detection and as predictor for time of ovulation in dairy cattle. *Theriogenology* 2005b; 64: 1690-703.

Rossow N. Fruchtbarkeitsmanagement in Milchviehbeständen. 2005: www.portal-rind.de.

Sartori R, Haughian JM, Shaver RD, Rosa GJ, Wiltbank MC. Comparison of ovarian function and circulating steroids in estrous cycles of Holstein heifers and lactating cows. *Journal of Dairy Science* 2004; 87: 905-20.

Schams D, Schallenberger E, Hoffmann B, Karg H. The oestrous cycle of

the cow: hormonal parameters and time relationships concerning oestrus, ovulation, and electrical resistance of the vaginal mucus. *Acta Endocrinol (Copenh)* 1977; 86: 180-92.

Schlunsen D, Roth H, Schon H, Paul W, Speckmann H. Automatic Health and Estrus Control in Dairy Husbandry through Computer-Aided Systems. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1987; 38: 263-79.

Schofield SA, Phillips CJC, Owens AR. Variation in the Milk-Production, Activity Rate and Electrical-Impedance of Cervical-Mucus over the Estrous Period of Dairy-Cows. *Animal Reproduction Science* 1991; 24: 231-48.

Schon PC, Hamel K, Puppe B, Tuchscherer A, Kanitz W, Manteuffel G. Altered vocalization rate during the estrous cycle in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 2007; 90: 202-6.

Senger PL. The estrus detection problem: new concepts, technologies, and possibilities. *Journal of Dairy Science* 1994; 77: 2745-53.

Sheldon IM, Wathes DC, Dobson H. The management of bovine reproduction in elite herds. *Veterinary Journal* 2006; 171: 70-8.

sqlapi.com. SQLAPI++ Library. 2011: <http://www.sqlapi.com/>.

Stemmer (2010) Handbuch der Bildverarbeitung. Stemmer Imaging GmbH. 135-61

Stevenson JS, Mee MO, Stewart RE. Conception rates and calving intervals after prostaglandin F2 alpha or prebreeding progesterone in dairy cows. Journal of Dairy Science 1989; 72: 208-18.

Stevenson JS, Lamb GC, Kobayashi Y, Hoffman DP. Luteolysis during two stages of the estrous cycle: subsequent endocrine profiles associated with radiotelemetrically detected estrus in heifers. Journal of Dairy Science 1998; 81: 2897-903.

Stevenson JS, Phatak AP. Effective use of heat detection devices. Large Animal Practice 1999; 20: 28-+.

Striezel A (2005) Leitfaden der Nutztiergesundheit. In: Leitfaden der Nutztiergesundheit. 98

Studierstube. ARToolKitPlus. 2008:
<http://studierstube.icg.tugraz.at/availability>.

Sveberg G, Refsdal AO, Erhard HW, Kommisrud E, Aldrin M, Tvette IF, Buckley F, Waldmann A, Ropstad E. Behavior of lactating Holstein-Friesian cows during spontaneous cycles of estrus. Journal of Dairy

Science 2011; 94: 1289-301.

Tenhagen BA, Heuwieser W. Comparison of a conventional reproductive management programme based on rectal palpation and uterine treatment of endometritis with a strategic prostaglandin F2 alpha programme. Zentralbl Veterinarmed A 1999; 46: 167-76.

Trimberger GW. Breeding efficiency in dairy cattle from artificial insemination at various intervals before and after ovulation. Research Bulletin, University of Nebraska, Agricultural Experiment Station 1948; 153

Tucker HA. Seasonality in Cattle. Theriogenology 1982; 17: 53-9.

Van Eerdenburg FJ, Loeffler HS, van Vliet JH. Detection of oestrus in dairy cows: a new approach to an old problem. Vet Q 1996; 18: 52-4.

van Eerdenburg FJCM. Possible causes for the diminished expression of oestrous behaviour. Veterinary Quarterly 2008a; 30: 79-100.

van Eerdenburg FJCM. The pedometer, an automated aid in the detection of oestrous. Veterinary Quarterly 2008b; 30: 49-57.

Vishwanath R. Artificial insemination: the state of the art. Theriogenology 2003; 59: 571-84.

Walker SL, Smith RF, Jones DN, Routly JE, Morris MJ, Dobson H. The effect of a chronic stressor, lameness, on detailed sexual behaviour and hormonal profiles in milk and plasma of dairy cattle. *Reproduction in Domestic Animals* 2010; 45: 109-17.

Walker WL, Nebel RL, McGilliard ML. Time of ovulation relative to mounting activity in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 1996; 79: 1555-61.

Walsh SW, Williams EJ, Evans AC. A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. *Animal Reproduction Science* 2011; 123: 127-38.

Wangler A, Meyer A, Rehbock F, Sanftleben P. Pedometry - an aid in estrus detection? *Zuchtungskunde* 2005; 77: 110-27.

Wiltbank M, Lopez H, Sartori R, Sangsritavong S, Gumen A. Changes in reproductive physiology of lactating dairy cows due to elevated steroid metabolism. *Theriogenology* 2006; 65: 17-29.

Zieger P. Brunsterkennung optimieren. *Milchrind* 2004: 48-50.

X. DANKSAGUNG

Zu allererst möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Holm Zerbe für das in mich gesetzte Vertrauen bedanken. Vielen Dank für seinen Mut dieses anfangs vielleicht exotisch wirkende Thema anzugehen. Vielen Dank für die großartige Betreuung sowie die zahlreichen Ideen und Impulse, die die Arbeit entscheidend vorangebracht und geprägt haben.

Ein ganz besonderer Dank geht an die Familien Jocher und Wohlfart, auf deren Milchviehbetrieb wir unsere praktischen Untersuchungen durchführen durften. In besonderem Maße gilt dieser Dank Herrn Josef Jocher, der mich in unzähligen Stunden beim Aufbau der Kameratechnik und bei der Befestigung der Marker unterstützt hat. Bei Herrn Anton Wohlfart und Frau Ingrid Jocher möchte ich mich sehr herzlich für die Entnahme der vielen Tausend Milchproben bedanken.

Ein ganz spezielles Dankeschön geht an Herrn M. Sc. Lars Larsen für seine Unterstützung bei der Datenerfassung und -auswertung sowie bei der Installation der Hard- und Software. Sein Fachwissen und seine Begeisterungsfähigkeit haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn Dr. Rainer Martin möchte ich mich für die Vermittlung des Kontaktes zu den Familien Jocher und Wohlfart sowie für die Unterstützung bei der Auswertung der Herdendaten bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeiterinnen im Labor der Klinik für Wiederkäuer - insbesondere bei Frau Christina Beyer - für ihre Unterstützung bei der Progesteronanalyse. In diesem Zusammenhang geht auch ein herzliches Dankeschön an Herr Dr. Frank Weber für seine wertvollen Tipps bei der Auswertung der Progesterondaten.

Ein ganz herzliches Dankeschön geht an Fr. Dr. Carola Sauter-Louis für die statistische Auswertung der Daten und die Unterstützung bei der Formatierung.

Der Schaumann-Stiftung danke ich für die unbürokratische finanzielle Unterstützung des Projektes.

Recht herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Frau Rita Radloff für ihre organisatorische Unterstützung und das nicht immer einfache Terminmanagement.

Ein außerordentlicher Dank geht an meinen Studienkollegen Christoph Klinger für seine zupackende Hilfe beim Auf- und Abbau der Kamera- und Lichttechnik im „tiefgekühlten“ Laufstall des Versuchsbetriebes in Schlehdorf.

Ganz besonders herzlich möchte ich mich schließlich bei meiner Frau Marion Zech bedanken. Ohne ihre großartige Unterstützung und ihren Glauben an mich wäre diese Arbeit niemals zustande gekommen.