

Institut für Landtechnik

**Untersuchungen zur digitalen Erfassung der
Tieraktivität und der Haltungsumwelt im Kontext der
Tierwohlbewertung von Mastschweinen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktorin der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Naemi von Jasmund

aus

Darmstadt

Bonn 2022

Referent: Prof. Dr. Wolfgang Büscher
Korreferent: em. Prof. Dr. Karl Schellander
Tag der mündlichen Prüfung: 04. November 2022

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Meiner Familie

Kurzfassung

Die Gesundheit der Nutztiere, deren Lebensbedingungen und ihr Wohlergehen während der Aufzucht und Haltung gewinnen politisch wie auch gesellschaftlich immer mehr an Bedeutung und werden zwingende Qualitätsmerkmale tierischer Produkte für die Verbraucher/-innen. Das Tierwohl, die Tiergesundheit und ihre Haltungsbedingungen zu überprüfen und zu dokumentieren, erfordert jedoch bei steigenden Tierzahlen pro Betrieb bzw. pro Tierhalter/-in technische Hilfsmittel zur Umsetzung.

Ziel dieser Dissertation war es, zwei solcher technischen Hilfsmittel vorzustellen und zu validieren. Diese dienen zum einen der digitalen Erfassung der Tieraktivität und zum anderen der Messung der Ammoniakkonzentration in der Haltungsumwelt von Mastschweinen. Sie sind Teil der Tierwohlbewertung im Projekt und im daraus entstandenen Prototypen des Beratungstools *PigsAndMore*.

Studie 1 erläutert den Aufbau einer Gasmischanlage zur präzisen Dosierung von Gasen bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten auf Laborebene. Mit dieser Anlage erfolgte die Validierung zweier Gerätetypen zur Messung von Ammoniak. So konnte auf Laborebene kein signifikanter Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Messgenauigkeit der untersuchten Messgeräte nachgewiesen werden. Aus diesen und weiteren Ergebnissen ließen sich Schlussfolgerungen für den praktischen Einsatz der Messgeräte im Stall formulieren.

Studie 2 befasst sich mit den Einsatzmöglichkeiten passiver Infrarotdetektoren zur Erfassung der Aktivität einer Gruppe von Mastschweinen innerhalb einer Bucht sowie in bestimmten Fokusbereichen wie dem Trog- oder dem Beschäftigungsbereich. Im Vergleich zu einer visuellen Bewertung der Tieraktivität als Referenzmethode zu den Daten der Detektoren konnten signifikante Korrelationen mit Werten von bis zu 0,87 nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Studie sowie Ergebnisse der Vorversuche, die im Konferenzbeitrag beschrieben werden, legten die Basis für die Nutzung der passiven Infrarotdetektoren im Rahmen einer sogenannten Screeningphase in *PigsAndMore*.

Diese Dissertation liefert wichtige Erkenntnisse zur Validierung von Ammoniaksensoren und passiven Infrarotdetektoren zur Messung der Tieraktivität für den Einsatz in Schweineställen. Auf Basis der gewonnenen Informationen werden Lösungsansätze für ermittelte Probleme vorgestellt und weitere Anwendungsmöglichkeiten im praktischen Einsatz diskutiert. Darüber hinaus werden Möglichkeiten der Nutzung und Weiterentwicklung dieser wie auch anderer technischer Hilfsmittel im Rahmen einer vielschichtigen, digital unterstützten Tierwohlbewertung analysiert.

Abstract

The health of farm animals, their living conditions and their welfare during rearing and husbandry are becoming increasingly important, both politically and socially. They develop into indispensable quality characteristics of animal products for the consumer.

However, the monitoring and documentation of animal welfare, health and their housing conditions requires technical tools for implementation as the number of animals per farm or per livestock owner increases.

The aim of this dissertation was to present and validate two such technical tools. These are used for the digital recording of animal activity and for the measurement of ammonia concentration in the housing environment of fattening pigs. They are part of the animal welfare assessment in the project and the resulting prototype of the consulting tool *PigsAndMore*.

Study 1 explains the development of a gas calibration unit for the precise dosing of gases at different humidities at the laboratory level. With this unit, the validation of two types of devices for measuring ammonia took place. Thus, at the laboratory level no significant differences in measuring accuracy as a function of relative humidity could be detected for the tested devices. From these and other results subsequent conclusions could be formulated for the practical use of the measuring devices in the barn.

Study 2 deals with the possible applications of passive infrared detectors for recording the activity of a group of fattening pigs within a pen as well as in certain focus areas such as the trough or the exploration area. In comparison to a visual assessment of animal activity as a reference method to the detectors' data, significant correlations of up to 0.87 could be found. The results of the study, as well as results of preliminary experiments described in the conference paper, laid the foundation for the use of passive infrared detectors in a so-called screening phase in *PigsAndMore*.

This dissertation provides important insights into the validation of ammonia sensors and passive infrared detectors for measuring animal activity for use in pig barns. Based on the information gained, approaches to solving identified problems are presented and further application possibilities in practical use are discussed. Furthermore, possibilities for the use and further development of these as well as other technical tools in the context of a multi-layered, digitally supported animal welfare assessment will be analyzed.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund und Problemstellung.....	2
1.2 Das Projekt „PigsAndMore“.....	4
1.3 Tierschutz, Tiergerechtheit und Tierwohl – Definitionen und Bedeutung.....	7
1.4 Klassische Bewertungsmethoden und Indikatoren.....	12
1.5 Weiterentwicklung der Erhebungs- und Bewertungsmethoden – Technische Hilfsmittel und Anwendungsmöglichkeiten.....	15
1.6 Ammoniakmessgeräte.....	19
1.7 Passive Infrarotdetektoren.....	21
1.8 Literaturverzeichnis.....	23
2 Studie 1.....	31
Assessment of ammonia sensors and photoacoustic measurement systems using a gas calibration unit.....	31
Abstract.....	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Materials and methods.....	34
2.2.1 Measurement equipment and gas calibration unit.....	34
2.2.2 Gas analysers and sensors and the underlying measurement methods.....	38
2.2.3 Investigations on the gas calibration unit itself – reference gas measurement and validation.....	43
2.2.4 Investigations on the NH ₃ measuring devices.....	43
2.2.5 Processing of data and statistical methods.....	45
2.3 Results.....	46
2.3.1 Validation of the dosing accuracy of the gas calibration unit.....	46
2.3.2 Ammonia measuring devices – responsiveness to rapid concentration changes.....	48

2.3.3	Ammonia measuring devices – accuracy at increasing concentrations.....	50
2.4	Discussion.....	53
2.4.1	Validation of the dosing accuracy of the gas calibration unit.....	54
2.4.2	Ammonia measuring devices – responsiveness to rapid concentration changes	55
2.4.3	Ammonia measuring devices – accuracy at increasing concentrations	56
2.5	Conclusion/Outlook.....	56
2.6	References.....	60
3	Konferenzbeitrag.....	64
	Kurzzeit-Screening der Tieraktivität und des Stallklimas als Teilaspekt der Tierwohlbeurteilung im Projekt PigsAndMore.....	64
	Zusammenfassung.....	65
	Summary.....	65
3.1	Einleitung und Zielsetzung	66
3.2	Material und Methoden	66
3.3	Ergebnisse und Diskussion.....	68
3.4	Literatur.....	72
4	Studie 2	73
	Using Passive Infrared Detectors to Record Group Activity and Activity in Certain Focus Areas in Fattening Pigs	73
	Simple Summary.....	74
	Abstract.....	74
4.1	Introduction	75
4.2	Materials and Methods.....	78
4.2.1	Animals and Housing	78
4.2.2	Passive Infrared Detector and Functional Areas within the Pen	80
4.2.3	Visual Assessment as Reference Method	81
4.2.4	Climate Measurements	83

4.2.5	Processing of Data and Statistical Analysis	83
4.3	Results	84
4.3.1	Comparison between PID and Visual Assessment	84
4.3.2	PID Combined with Behavioral Analysis	86
4.3.3	PID Combined with Climate Analysis	88
4.4	Discussion.....	91
4.4.1	Comparison between PID and Visual Assessment	91
4.4.2	PID Combined with Behavioral Analysis	93
4.4.3	PID Combined with Climate Analysis	96
4.4.4	Outlook for Future Application Possibilities in Practice	97
4.5	Conclusions	99
4.6	References.....	101
5	Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblicke.....	106
5.1	Qualitätssicherung und Tauglichkeitsprüfung von Ammoniakmessgeräten an der Gasmischanlage.....	106
5.2	Eignung und Anwendungsmöglichkeiten für PIDs	108
5.3	Multidimensionale, multifaktorielle und kontinuierliche Bewertung des Tierwohls.....	113
5.4	Literaturverzeichnis	122
	Danksagung.....	127

Tabellenverzeichnis

Table 2. 1	INNOVA 1412. Applied optical filters and their specifications (Calibration Data and Gas Detection Limits (LumaSense Technologies, 2018)).....	40
Table 2. 2	Technical data for Polytron 8100 and Polytron C300 with four electrode NH ₃ sensor (Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2010; Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2016; Melse et al., 2016)	42
Table 2. 3	Measurement programme to test the responsiveness to rapid changes in gas concentration.....	44
Table 2. 4	Measurement programme to test the measurement accuracy at increasing concentrations.....	45
Table 2. 5	Comparison of the measured mean values of NH ₃ between the test gas cylinder (TGC) and the gas calibration unit (GCU).....	47
Table 2. 6	Analysis of different target gas concentrations using various ammonia analysers and sensors.....	53
Table 4. 1	Allocation and definition of the observed behavior.	82
Table 4. 2	Statistical analysis for group activity as well as activity in the focus areas calculated by visual assessment and measured by passive infrared detectors (PIDs). One-hundred and forty-four data pairs were available for evaluation on each of the ten focus days.....	84
Tabelle 5.1	Geschätzte Beratungskosten für die Schwachstellenanalyse und Bewertung des Tierwohls mit <i>PigsAndMore</i> in einem fiktiven Betrieb mit einer Ø Betriebsgröße von 800 Mastschweinen. Unter folgenden Annahmen werden bonitiert: 1 Stallgebäude, 4 Abteile, 10 Buchten und insgesamt 150 Tiere im Rahmen der Einzeltierbonitur. Es werden darüber hinaus keine Supportkosten für die Software bzw. Bereitstellungskosten für die Screeningtechnik in Ansatz gebracht.....	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Struktureller Aufbau der Dissertation..... 1

Abbildung 1.2 Strukturierung und Komponenten des Decision-Support-Systems *PigsAndMore* 5

Figure 2.1 Schematic of the gas calibration unit (a) with four certified test gases and the dilution and humidification lines controlled by mass flow meters and controllers (MFC) and an image of the laboratory system setup (b) for the validation of different ammonia measuring devices. Scheme and image show an exemplary arrangement with overall six sensors: Two INNOVA 1412 (1), two Polytron C300 (2) and two Polytron 8100 (3). The MFCs (4), data logger (5) and cryocooler-condenser-combination (6) can also be observed..... 35

Figure 2.2 Scheme for the different calculation steps of the mass flows. 37

Figure 2.3 The implementation of photoacoustic spectroscopy in the INNOVA 1412. The optical filter carousel was equipped with filters for the measurement of carbon dioxide, nitrous oxide, methane, ammonia and water vapour. One of the six filters available was not in use. (Own representation modified according to LumaSense Technologies (LumaSense Technologies, 2017, 2018))..... 39

Figure 2.4 Schematic illustration of an electrochemical gas sensor implemented in the Polytron 8100 and Polytron C300..... 41

Figure 2.5 NH₃ concentrations while switching between test gas cylinder (TGC) and the gas calibration unit (GCU). The values for at last 10 min of each test phase are shown. 46

Figure 2.6 Exemplary measurement process over a 30-minute interval. After 15 minutes a constant value was achieved. The mean final value was calculated using the last 15 data points. In this fictitious case, the T₉₀ value was reached at minute 11..... 48

Figure 2.7	Average response time, T_{90} , for the LumaSense Multi-Gas Measurement Systems and Dräger sensors at different relative target air humidities (%) and target concentrations (ppm). * Target concentration after starting at 2.5 ppm, see also measurement programme Table 2.3.	49
Figure 2.8	Comparison of NH_3 target concentration with the actual measured values with the photoacoustic gas analysers (a) and electrochemical gas sensors (b).	51
Abbildung 3.1	Positionierung der eingesetzten Aktivitätssensoren (A) und Einteilung der Bucht in fünf verschiedene Fokusbereiche sowie Messung der Gesamtaktivität der Tiergruppe im rot umrahmten Bereich (B) (© von Jasmund) Positioning of the used activity sensors (A) and division of the pen into five different focus areas as well as measurement of the total activity of the group of animals in the red framed area (B) (© von Jasmund)	67
Abbildung 3.2	Verlauf der Aktivität sowie der Ammoniakkonzentration in der Fokusbucht im Tagesverlauf (© von Jasmund) Course of activity and ammonia concentration in the focus pen during the day (© von Jasmund)	69
Abbildung 3.3	Verlauf der Aktivität im Trog- sowie Spielbereich über 24 Stunden (© von Jasmund) Course of activity in trough and play area over 24 hours (© von Jasmund)	70
Figure 4.1	Image of the focus pen with indicated functional areas (a) for lying, drinking, eating, exploration and elimination, nipple drinker (ND) separate and included in the wet feeder and enrichment material (EM) as well as schematic floor plan (b) and positioning of the passive infrared detectors (PIDs) used for the corresponding functional areas as well as for measuring total activity of the animal group in the red framed area.....	79

Figure 4.2	Passive infrared detectors with open (A), largely covered (B), and sector-wise covered (C) lens and signal light for functional testing.....	81
Figure 4.3	Group activity quantified on fattening day 47 using PID (continuous line) and visual assessment (dashed line) as well as exemplary division in calmer (blue background) and more active (orange background) phases.....	85
Figure 4.4	PID data on changes in group activity level dependent on daytime and fattening phase (continuous line = until fattening day 19, dotted line = fattening day 20–70 and dashed line = from fattening day 71).....	86
Figure 4.5	PID data on course of use and attractiveness of enrichment material after offering: well-known cotton rope (continuous line) versus unknown wooden toy (dashed line) at the end of the fattening.....	87
Figure 4.6	General course of exploration measured by exploratory PID during the day with two activity peaks as well as comparison between well-known cotton rope (continuous line) versus unknown wooden toy (dashed line) with one-week interim.....	88
Figure 4.7	Statistical relationship between fattening days and daily average NH ₃ concentration (<i>n</i> = 93) measured above the focus pen. Significant increase (<i>r</i> = 0.77; trend line see dotted line) in NH ₃ concentration over the whole fattening period.	89
Figure 4.8	Comparison with reference to daily average values of the group activity measured by PID (continuous line) with the calculated THI _{NOAA} (bar chart) in consideration of a threshold ≥72 (dotted line). Only an extract of the fattening period with corresponding thresholds is presented.	89
Figure 4.9	Graphical representation of the different relation between group activity measured by PID (grey line) and NH ₃ concentration (black line) on fattening day 42 (<i>r</i> = -0.01, <i>p</i> = 0.71, <i>n</i> = 1440) and 43 (<i>r</i> = 0.58, <i>p</i> = 0.00, <i>n</i> = 1440).....	91

Abbildung 5.1 Übersicht möglicher Umstände, die das Wohlbefinden von Schweinen negativ beeinflussen können, sowie mögliche, durch PIDs detektierbare, indikative Verhaltensänderungen..... 111

Abkürzungsverzeichnis

ASP	Afrikanische Schweinepest
atm	Physikalische Atmosphäre
BCS	Body Condition Score
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (Federal Office for Agriculture and Food)
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (German Federal Ministry of Food and Agriculture)
CH ₄	Methan (methane)
CLK	CLK GmbH
CO ₂	Kohlenstoffdioxid (carbon dioxide)
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
EIP-AGRI	Europäische Innovations-Partnerschaften für Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit
EFSA	European Food Safety Authority
EM	Enrichment material
EU	Europäische Union
FAWC	Farm Animal Welfare Committee
FD	Fattening day
FKZ	Förderkennzeichen
GCU	Gas calibration unit (Gasmischanlage)
h	Stunde
H ₂ O	Wasser (water)
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point
hPa	Hektopascal

Abkürzungsverzeichnis

KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
MFC	Mass flow meters and controllers
MGMS	Multi-Gas Measurement Systems
N ₂	Stickstoff (nitrogen)
N ₂ O	Distickstoffmonoxid / Lachgas (nitrous oxide)
NaTiMon	Projektkonsortium Nationales Tierwohl-Monitoring
ND	Nipple drinker
NH ₃	Ammoniak (ammonia)
O ₂	Sauerstoff (oxygen)
OIE	World Organisation for Animal Health
PFA	Perfluoralkoxy
PID	Passive Infrarotdetektoren (passive infrared detectors)
ppm	Parts per million
QS	Qualität und Sicherheit GmbH
r	Korrelationskoeffizient
R ²	Bestimmtheitsmaß
RFID	Radio Frequency Identification
SchwIP	Schwanzbeiß-Interventions-Programm
SD	Standardabweichung (standard deviation)
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
THI	Temperature Humidity Index
TierSchG	Tierschutzgesetz
TierSchIV	Tierschutz-Schlachtverordnung
TierSchNutzV	Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung
TierSchTrV	Tierschutztransportverordnung

Abkürzungsverzeichnis

TierSchVersV	Tierschutz-Versuchstierverordnung
TGC	Test gas cylinder
TGI	Tiergerechtheitsindex
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
VERA	Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production
WP	Wasserdampf (water vapour)

1 Einleitung

Die vorliegende Ausarbeitung soll in die Thematik der klassischen Tierwohlbewertung einführen und fokussiert sich dabei vor allem auf die Tierwohlbeurteilung und das Monitoring von Mastschweinen. Vorgestellt werden unter anderem bereits entwickelte und in Anwendung befindliche Welfare Assessment Protokolle und deren Indikatoren. Darüber hinaus wird die Weiterentwicklung der Tierwohleinschätzung durch die digitale Erfassung und Beurteilung von Indikatoren beschrieben, beispielsweise durch das Screening des Stallklimas und der Tieraktivität. Die sich daraus ergebenden Chancen der Nutzung werden vorgestellt. Die der Dissertation zu Grunde liegenden, veröffentlichten Studien bzw. Themenbereiche befassen sich zum einen mit der Überprüfung von Ammoniakmessgeräten, die der Bewertung der Stallklimaqualität dienen; zum anderen wird auf die Nutzung sogenannter Passiver Infrarotdetektoren (PID) eingegangen, die die Messung der Tieraktivität beispielsweise im Tagesverlauf oder auch in bestimmten Fokusbereichen wie dem Trog ermöglichen. Eine knapp skizzierte Gliederung der Dissertation zur besseren Übersicht stellt Abbildung 1.1 dar.

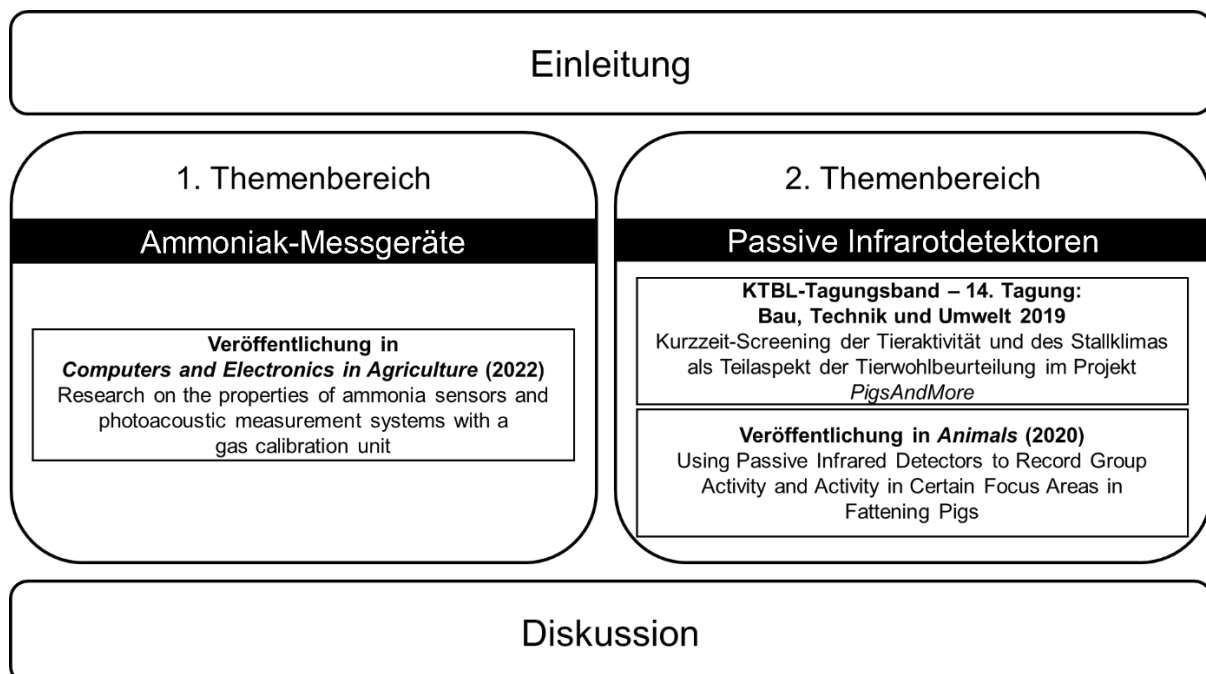


Abbildung 1.1 Struktureller Aufbau der Dissertation

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Der Druck auf den landwirtschaftlichen Sektor und auf die nutztierhaltenden Betriebe in Deutschland wächst seit vielen Jahren stetig an. Politisch wie auch gesellschaftlich werden die Vorstellungen von Tierwohl und sich daran orientierende, umweltgerechte und zukunftsfähige Haltungsbedingungen intensiv diskutiert. Bisherige Produktions- bzw. Haltungsbedingungen werden kritisiert, Veränderungen von Zuchtzielen oder auch Bestandsgrößen werden gefordert und die zunehmend sensibilisierten Verbraucher/-innen fordern mehr Tierschutz für Nutztiere (Sturm et al., 2020).

In den letzten Jahrzehnten erlebte die Tierhaltung in Deutschland einen extremen Strukturwandel (Sturm et al., 2020). Die Landwirtschaftszählung 2020 zeigt, dass in den letzten 10 Jahren die Zahl landwirtschaftlicher Betriebe mit Viehhaltung um 22 % gesunken ist (Statistisches Bundesamt, 2022). Am stärksten zeigt sich der Rückgang bei den schweinehaltenden Betrieben. Viele Krisen der letzten Jahre und ganz aktuelle Entwicklungen haben ihren Beitrag zu diesem Rückgang geleistet und die Schweinebranche erheblich belastet. Kontinuierlich niedrige bzw. sinkende Erlöse für Ferkel und Schlachtschweine stehen im extremen Kontrast zu steigenden Produktionskosten beispielsweise für Futter oder Energie. Auch staatliche Vorgaben nehmen Einfluss auf die Kostenstruktur. Verschiedene Gesetzesnovellierungen und Anpassungen von Verordnungen, die noch ausstehen oder bereits in Kraft getreten sind (mit teils mehrjährigen Übergangsfristen), verteuern die Produktion von Schweinefleisch in Deutschland (Leuer, 2021). So muss zukünftig beispielsweise mit Mehrkosten für die jederzeitige Bereitstellung von organischem Beschäftigungsmaterial für alle Tiere durch die Anpassung der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzTV) gerechnet werden (Leuer, 2021). Es werden aber nicht nur direkte Mehrkosten im Stall erwartet, sondern auch erhöhte Kosten durch die Novellierung der Düngeverordnung oder der Neufassung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), die sich indirekt auf die Produktion auswirken werden (Leuer, 2021).

Die Krise in der Schweinebranche wird verstärkt durch die sinkende Nachfrage nach Schweinefleisch. Diese lässt sich durch den generell rückläufigen Fleischkonsum in Deutschland erklären, der sich über die letzten Jahre bzw. Jahrzehnte abzeichnet (Statistisches Bundesamt, 2021). Zwar macht Schweinefleisch insgesamt den größten Anteil an konsumierten Fleischsorten aus, es erfährt in den letzten Jahren aber auch

die deutlichste Verringerung mit einer Reduzierung des Gesamtverbrauchs von Schweinefleisch um etwa 7 kg pro Kopf seit dem Jahr 1991 (Statistisches Bundesamt, 2021). Hinzu kommt seit 2020 die reduzierte Nachfrage der Gastronomie bzw. Veranstaltungsbranche nach (Schweine-)Fleischprodukten durch die COVID-19-Pandemie. Diese wirkt sich natürlich nicht nur auf den Fleischkonsum der Endverbraucher/-innen aus, sondern beeinträchtigt die gesamte Fleischproduktionskette, da beispielsweise durch gehäuftes Auftreten von Krankheitsfällen und/oder Quarantänebeschränkungen Schlachthöfe weniger Schlachtungen durchführen können (Schnippe, 2021; Greshake, 2022).

Was sich auf den Markt für Schweinefleisch ebenfalls sehr deutlich auswirkt und neben weiteren Aspekten unter anderem zu einem Überangebot in Deutschland bzw. der EU geführt hat, ist der Exportstopp von Schweinefleisch in Drittländer, vor allem aber nach China durch den Ausbruch der Afrikanischen Schweinepest (ASP) im Jahr 2020 bzw. 2021 (Schnippe, 2021; Greshake, 2022).

All dies und weitere Faktoren führten zu einer Reduktion der schweinehaltenden Betriebe in Deutschland um 47 % in den letzten 10 Jahren (Statistisches Bundesamt, 2022). Aber nicht nur die Zahl der schweinehaltenden Betriebe insgesamt, sondern auch ihre Struktur bzw. ihre Größe und der damit verbundene Arbeits- und Managementaufwand haben sich deutlich verändert. Wurden 2010 im Durchschnitt 459 Tiere pro Betrieb gehalten, so stieg die Zahl bis 2020 um rund 80 % auf 826 Tiere pro Betrieb (Statistisches Bundesamt, 2022). Kleinere Betriebe werden verdrängt und immer mehr Tiere werden in großen Betrieben gehalten. Steigt die Anzahl gehaltener Schweine pro Betrieb, verändert sich auch deutlich der Arbeitsaufwand für die Tierkontrolle bzw. die Machbarkeit aufgrund der steigenden Verantwortung und Anforderung sowie die Belastung für das betreuende Personal durch die erhöhte Tierzahl. Zum Arbeitsaufwand für die routinemäßigen Tierkontrollen ist noch die Zeit für die Umsetzung der vom Gesetzgeber geforderten Erhebung und Bewertung im Rahmen der betrieblichen Eigenkontrolle mittels geeigneter Indikatoren hinzuzurechnen.

Für die Umsetzung der vom Gesetzgeber geforderten betrieblichen Eigenkontrolle unter Verwendung „geeignete[r] tierbezogene[r] Merkmale (Tierschutzindikatoren)“ (§ 11 TierSchG) werden im Gesetzestext keine konkreten Indikatoren benannt bzw. vorgegeben. Es haben sich jedoch in den letzten Jahren verschiedene

Bonitursystematiken und Tierwohlindikatoren etabliert, auf die zurückgegriffen werden kann. Ein Bewertungssystem wie das Welfare Quality® Protokoll für Schweine (Welfare Quality®, 2009) setzt dabei in erster Linie auf tierbezogene Indikatoren, also solche Merkmale, die direkt am Tier selbst erhoben werden. In anderen, wie dem Leitfaden für die Praxis – Schwein des KTBL (KTBL, 2020), findet neben den tierbezogenen Indikatoren auch eine stärkere Einbeziehung haltungs- und managementbezogener Indikatoren statt, durch die indirekt auf das Tierwohl geschlossen werden soll. Alle gängigen Systeme vereint jedoch die generelle Art der Erhebung und der Ermittlung der Ist-Situation im Stall: Die Situation auf dem Betrieb, im Stall und in der Tiergruppe wird *just-in-time* erhoben und bewertet. Eine kontinuierliche Erhebung und Bewertung auf Basis tierbezogener Indikatoren (beispielsweise für die Eigenkontrolle oder eine umfassendere Ermittlung der Ist-Situation unter Einbeziehung tier-, haltungs- und managementbezogener Indikatoren über mehrere Stunden oder Tage hinweg) findet zurzeit noch nicht statt.

Solch eine Kompaktlösung, die sowohl die Haltungsumwelt wie auch das Tierverhalten kontinuierlich oder zumindest über eine gewisse Zeitspanne in die Bewertung des Tierwohls integriert, ist nur unter Einbeziehung verschiedener Sensoren oder anderer technischer Hilfsmittel möglich. Inwieweit eine Bewertung des Tierwohls durch externe Berater/-innen auf Basis solch einer breit aufgestellten Erhebung von Indikatoren auf landwirtschaftlichen Betrieben umsetzbar ist, wurde im Projekt *PigsAndMore* untersucht und entsprechende Sensoren sowie Bewertungskriterien ausgewählt und validiert.

1.2 Das Projekt „PigsAndMore“

Begleitet wurde die Arbeit an der vorliegenden Dissertation durch die Betreuung des Forschungsprojektes *PigsAndMore*. An diesem Verbundprojekt arbeiteten die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen sowie das Institut für Landtechnik der Universität Bonn von Oktober 2016 bis einschließlich Juni 2020 zusammen. Die Förderung des Vorhabens erfolgte dankenswerterweise aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Projektträgerschaft: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung; FKZ: 2817902615.

Übergeordnetes Ziel der Projektpartner war es, ein On-Farm Beratungstool bzw. ein digitales Decision-Support-System zu entwickeln, welches eine objektive und systematische Beurteilung der Tierwohl-Situation in der Schweinehaltung ermöglicht. Die einzelnen Produktionsrichtungen Ferkelerzeugung, Ferkelaufzucht und Mast unterscheiden sich jedoch sehr stark voneinander. Es gelten beispielsweise unterschiedliche Grenzwerte für die Fläche pro Tier (TierSchNutzTV, 2006) oder verschiedene tierbezogene Indikatoren sind für die Tierwohlbewertung relevant. Für die Entwicklung des Tools wurde daher zunächst der Bereich *Mast* ausgewählt und die Entwicklung der Bewertung darauf konzentriert.

Berater/-innen von Mastschweinebetrieben sollen mit diesem Assistenzsystem in der Lage sein, anhand geeigneter haltungs-, management- und vor allem tierbezogener Indikatoren eine ganzheitliche Schwachstellenanalyse durchzuführen, um Tierhalter/-innen dadurch konkrete, betriebs- bzw. stallspezifische Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Tierwohlsituation geben zu können.

Die Analyse setzt sich insgesamt aus vier Komponenten zusammen (siehe Abbildung 1.2), für deren Durchführung ein zweimaliger Betriebsbesuch notwendig ist.

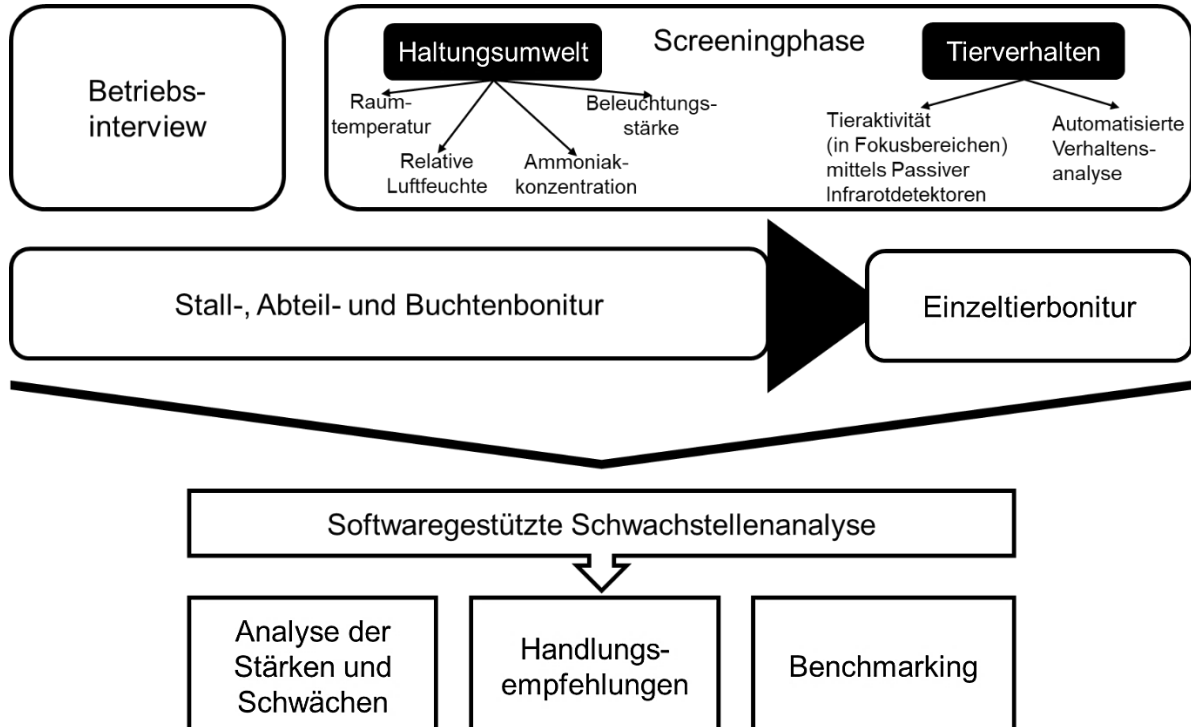


Abbildung 1.2 Strukturierung und Komponenten des Decision-Support-Systems *PigsAndMore*

Während des ersten Besuchstermins werden die Messgeräte für das Screening in einem für den Betrieb typischen Abteil über einer sogenannten Fokusbucht angebracht. Im Rahmen dieser vorgeschalteten, sensor- und videogestützten Screeningphase über mindestens drei zusammenhängende 24 h Tagesverläufe hinweg werden Daten bezüglich der Haltungsumwelt und des Tierverhaltens bzw. der Tieraktivität aufgezeichnet. Zudem dient dieser Termin der Durchführung eines Betriebsinterviews. Damit werden Betriebsstammdaten aufgenommen sowie bauliche und verfahrenstechnische Informationen bzw. haltungs- und managementbezogene Indikatoren erfasst. Darunter fallen beispielsweise Angaben zu Haltungs-, Fütterungs- oder auch Lüftungssystemen, die im Betrieb eingesetzt werden.

Der zweite Betriebsbesuch dient nicht nur dem Abbau der Messgeräte und der Implementierung der gewonnenen Daten, sondern auch der Durchführung der Stall-, Abteil- und Buchten- bis hin zur Einzeltierbonitur von jeweils 15 Tieren in insgesamt 10 Buchten über alle Gewichtsklassen hinweg. Die Auswahl der zu bonitierenden Bereiche und Tiere erfolgt dabei zufällig und stichprobenartig. Erhoben werden beispielsweise Daten zur Futtertrog- und Tränkehygiene, dem Flächenangebot oder der Qualität und Quantität angebotener Beschäftigungsmaterialien. Zudem spielt die Erfassung von gruppen- als auch einzeltierbezogenen Gesundheitsparametern wie dem Auftreten von Husten oder Verletzungen an verschiedenen Körperteilen eine wichtige Rolle.

Final werden alle Informationen – die Angaben der Betriebsleiter/-innen, die digital erfassten Daten sowie die erhobenen Parameter und Indikatoren – in der Schwachstellenanalyse zusammengefasst, mit hinterlegten Ziel- und Grenzwerten verglichen und Ursache-Wirkungs-Beziehungen ermittelt. Im anschließenden Beratungsgespräch werden den Betriebsleiter/-innen die identifizierten Stärken und Schwächen dargestellt. Abschließend schlagen die Berater/-innen konkrete Handlungsempfehlungen vor allem zur Verbesserung der Tierwohlsituation, aber auch hinsichtlich auffallender Schwächen (beispielsweise bei Hygiene und Management) vor. Darüber hinaus soll auch ein überbetriebliches Benchmarking möglich sein, die den Betriebsleiter/-innen aufzeigt, wie sich der Betrieb hinsichtlich des Managements, des Tierwohls oder ähnlichem mit anderen Mastbetrieben vergleichend einordnen lässt.

1.3 Tierschutz, Tiergerechtheit und Tierwohl – Definitionen und Bedeutung

Der Schutz und das Wohlergehen der Tiere stehen zurzeit im Fokus politischer und gesellschaftlicher Diskussionen. Vor allem über das Wohlergehen von Nutztieren wird heftig debattiert, die der Lebensmittelgewinnung dienen. Viele Verbraucher/-innen haben vermutlich immer noch ein veraltetes, idealisiertes Bild der Landwirtschaft im Sinn, welches die extremen entwicklungstechnischen Schritte der letzten Jahrzehnte missachtet. Konfrontiert mit der modernen und technisierten Nutztierhaltung und angefeuert durch teils sehr diffamierende Bilder und Berichte in den Sozialen Medien, äußern viele Verbraucher/-innen heftige Kritik an der Haltung von Tieren bzw. der Landwirtschaft an sich. Auf diese reagiert die Politik mit Gesetzesnovellierungen und Änderungen von Verordnungen und Vorschriften hin zu mehr Tierschutz und Tierwohl und nimmt auch auf die Kennzeichnungen von Lebensmitteln Einfluss. Doch wie hat sich der Blick auf den Tierschutz bzw. auf Rechte für Tiere und das Wohl der (Nutz-)Tiere gesellschaftlich überhaupt entwickelt und wie werden diese definiert und beispielsweise im Gesetzestext beachtet?

Im Rahmen der regen Diskussionen – gesellschaftlich wie auch politisch – sind viele verschiedene Begriffe wie Tierschutz, Tiergerechtheit oder Tierwohl in aller Munde, meinen aber nicht dasselbe bzw. beleuchten die generelle Thematik aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Im Folgenden soll auf diese unterschiedlichen Begriffe näher eingegangen werden, um die Begrifflichkeiten genauer einordnen zu können und den gesamtheitlichen Blick zu schärfen.

Der Begriff *Tierschutz* ist vor allem dem Kontext gesetzlicher Bestimmungen und Verordnungen zuzuordnen. Erste Tierschutznormen wurden im Jahr 1838 in das Kriminalgesetzbuch des Landes Sachsen aufgenommen (Kraemer, 2011; Deutscher Tierschutzbund e.V., 2011). Die anderen deutschen Länder folgten diesem Beispiel in den darauffolgenden Jahren. Ab Mai 1871 galt dann für das ganze Deutsche Reich das Verbot der Tierquälerei durch § 360 Nr. 13 StGB des Reichsstrafgesetzes (Kraemer, 2011). Im Mittelpunkt dieser ersten gesetzlichen Tierschutznormen stand jedoch nicht der Schutz des Tieres selbst und dessen Rechte, sondern der Mensch und die Wirkung und negativen Folgen von Tierquälerei auf diesen und sein zukünftiges (moralisches) Denken und Handeln gegenüber anderen Menschen. So beschreibt Immanuel Kant (1724-1804) in seinem Werk *Metaphysik der Sitten* aus dem Jahre 1797 das Unterlassen von Grausamkeiten an Tieren als Pflicht des

Menschen gegen sich selbst, da ansonsten „das Mitgefühl an ihrem Leiden im Menschen abgestumpft und dadurch eine der Moralität im Verhältnisse zu anderen Menschen sehr diensame natürliche Anlage geschwächt und nach und nach ausgetilgt wird [...]“ (Kant, Reclam Ausgabe von 1990). In den folgenden Jahren ändert sich diese Sicht aber grundlegend. Die Entwicklung weg vom anthropozentrischen hin zum pathozentrischen Tierschutz wird durch Vordenker wie Jeremy Bentham (1748-1832) geprägt, der den Tieren als leidensfähigen Wesen eigene Rechte zuspricht und in seinem Werk *An introduction to the Principles of Morals and Legislation* schreibt: „[...] the question is not, Can they reason? nor, Can they talk? but, Can they suffer? [sic]“ (Bentham, 1789). Diese veränderte Sichtweise wirkt sich auch auf die Formulierung und die Strafbarkeit von Gesetzen aus und manifestiert sich in der Aufnahme und Formulierung des Tierschutzes (§ 145b) in das Reichsstrafgesetzbuch im Jahr 1933 (Kraemer, 2011). Noch im selben Jahr wurde der Schutz der Tiere nochmals erweitert, indem der entsprechende Paragraph aus dem Strafgesetzbuch entfernt wurde, um den Schutz der Tiere in einem eigenen Reichstierschutzgesetz zu regeln (Kraemer, 2011). Das TierSchG, welches in seinen Grundzügen bis auf verschiedene Änderungen bis heute gilt, trat 1972 in Kraft und fordert, „aus der Verantwortung des Menschen für das Tier als Mitgeschöpf dessen Leben und Wohlbefinden zu schützen“ (§ 1 TierSchG). Es verbietet, „einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden“ (§ 1 TierSchG) zuzufügen. Auf Basis neuer wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Entwicklungen sowie einem wachsenden Tierschutzbewusstsein kamen in den letzten 15 Jahren weitere Verordnungen wie die Tierschutztransportverordnung (TierSchTrV), die Tierschutz-Schlachtverordnung (TierSchIV) oder auch die Tierschutz-Versuchstierverordnung (TierSchVersV) zum Schutz von Tieren hinzu. Zur Haltung von Tieren finden sich im TierSchG nur allgemeine Anforderungen, die laut § 2 Folgendes festlegen:

„Wer ein Tier hält, betreut oder zu betreuen hat,

- 1. muss das Tier seiner Art und seinen Bedürfnissen entsprechend angemessen ernähren, pflegen und verhaltensgerecht unterbringen,*
- 2. darf die Möglichkeit des Tieres zu artgemäßer Bewegung nicht so einschränken, dass ihm Schmerzen oder vermeidbare Leiden oder Schäden zugefügt werden,*

3. *muss über die für eine angemessene Ernährung, Pflege und verhaltensgerechte Unterbringung des Tieres erforderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten verfügen.*“

Konkretere Vorgaben für die Haltung landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere gibt die Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzTV) vor, die im Jahr 2006 erlassen und zuletzt 2021 geändert wurde. Dass der Schutz der Tiere in Deutschland auch auf gesetzlicher Ebene eine wichtige Bedeutung hat, wird nicht zuletzt durch die Einführung des Tierschutzes als Staatszielbestimmung (§ 20a Grundgesetz) im Jahr 2002 deutlich. Dadurch wurde der Schutz der Tiere in den Verfassungsrang erhoben und muss anderen Grundrechten wie beispielsweise der Forschungs- und Religionsfreiheit nicht mehr vorbehaltlos weichen (Kraemer, 2011).

Um den Schutz der Tiere auch fortführend zu verbessern und die Entwicklung des Tierschutzes zu protokollieren, ist die Bundesregierung laut § 16e des TierSchG verpflichtet, dem Deutschen Bundestag alle vier Jahre einen Bericht vorzulegen. In diesem sogenannten Tierschutzbericht wird dokumentiert, welche Maßnahmen zur Verbesserung der Situation von Nutz-, Heim- sowie Versuchstieren geplant bzw. umgesetzt werden (BMEL, 2019).

Im Fokus vieler Untersuchungen und Entwicklungen, die auch Gegenstand des Tierschutzberichtes 2019 waren, stand in den letzten Jahren die Bewertung und Verbesserung der Haltungsbedingungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Dabei steht immer wieder die Frage im Raum: Wann können Haltungsbedingungen als tiergerecht bezeichnet bzw. eingestuft werden und welche Bedingungen müssen gelten, damit sich ein Tier (in seiner Haltungsumwelt) wohlfühlt?

Die eine allgemein geltende, alle Aspekte umfassende Definition von *Tierwohl* gibt es nicht. Das Verständnis darüber ist in ständigem Wandel, wird beeinflusst von neuen Forschungsergebnissen und nicht zuletzt – und nicht zu vergessen und zu unterschätzen – von der Gesellschaft selbst, die diese für sich definiert. Die Begriffe *Tierwohl* und *Tiergerechtheit* und deren Bedeutung hängen stark voneinander ab und beeinflussen sich gegenseitig, dienen als Bindeglied zwischen den Bereichen Tiergesundheit und Ethologie (Sturm et al., 2020) und sollten nicht als Synonyme verwendet werden. Tierwohl ist aus der Perspektive des Tieres auf seine (Haltungs-) Umwelt zu verstehen, Tiergerechtheit ein Begriff, der sich eher auf das Management

und die Haltungsbedingungen mit Auswirkungen auf das Tier und sein Wohlergehen bezieht.

Als tiergerecht können Haltungsbedingungen bezeichnet werden, wenn sie laut von Borell (2013) „den spezifischen Eigenschaften der in ihnen lebenden Tieren Rechnung tragen, in denen die körperlichen Funktionen nicht beeinträchtigt werden, die Anpassungsfähigkeit der Tiere nicht überfordert und essentielle Verhaltensmuster der Tiere nicht so eingeschränkt und verändert werden, dass dadurch Schmerzen, Leiden oder Schäden am Tier selbst oder durch ein so gehaltenes Tier an einem anderen entstehen“. Aktiver hinsichtlich der Rolle des Tieres und bezugnehmend auf das Bedarfsdeckungs- und Schadensvermeidungskonzept des Ethologen Beat Tschanz gelten laut einer anderen Definition Haltungssysteme als tiergerecht, „wenn das Tier erhält, was es zum Gelingen von Selbstaufbau und Selbsterhaltung benötigt, und ihm die Bedarfsdeckung und die Vermeidung von Schaden durch die Möglichkeit adäquaten Verhaltens gelingt“ (Deutscher Bundestag, 1985).

Tierwohl oder das Wohlbefinden lässt sich definieren als Zustand eines Individuums bezüglich seiner Bemühungen, mit seiner Umwelt zurechtzukommen (Broom, 1986), oder – sich nicht nur auf einen funktionalen Ansatz beschränkend – der „Zustand physischer und psychischer Harmonie des Tieres in sich und seiner Umwelt“ (Lorz, 1992). Duncan ist der Meinung, dass das Wohlbefinden von Tieren in erster Linie mit den Gefühlen zu tun hat, die ein Tier erfährt und deshalb diese subjektiven Empfindungen zur Bewertung des Tierwohls herangezogen werden müssen, indem indirekte Methoden angewendet werden, um Tiere zu befragen wie beispielsweise bei Präferenztests (Duncan, 2005). Generell hat sich in den letzten Jahren die Tierwohldefinition und -bewertung dahingehend verändert, dass Tierwohl nicht nur die Abwesenheit von Leiden bedeutet (Duncan, 2005), sondern positive Emotionen wie Freude untersucht, gefördert und in die Bewertung einbezogen werden müssen. Elemente des Wohlbefindens beinhalten demnach nicht nur das Ausbleiben negativer Emotionen und Erfahrungen, welches sich durch das Freisein von beispielsweise körperlichen Schäden äußert, sondern auch das Vorhandensein positiver Reize, Emotionen und Erfahrungen (Bessei, 2006; Boissy et al., 2007). Als Schlussfolgerung daraus kann das Fehlen von Freude oder anderer Anzeichen positiver Emotionen selbst als Hinweis auf einen Zustand des Unwohlseins gesehen werden (Boissy et al., 2007). Darüber hinaus lässt sich Tierwohl auch als ein an sich

dynamischer, nach Ausgleich strebender Prozess beschreiben, ein Gleichgewicht etwa zwischen dem positiven und negativen Erleben von Erfahrungen oder affektiven Zuständen (Spruijt et al., 2001).

Allgemein anerkannt und Basis vieler Definitionen und Bewertungen des Tierwohls sind die *Five Freedoms*, die das Farm Animal Welfare Council (FAWC) und 2019 umbenannt in Farm Animal Welfare Committee) auf Basis des sogenannten Brambell Reports (Brambell, 1965) entwickelt hat und fortwährend anpasst. Danach sollen Tiere

- 1.) **frei sein von Hunger und Durst** durch den freien Zugang zu Wasser und basierend auf einer Ernährung, die die Gesundheit und die Vitalität erhält;
- 2.) **frei sein von Unbehagen** durch die Bereitstellung einer angemessenen Umgebung;
- 3.) **frei sein von Schmerz, von Verletzung und Krankheit** durch Vorbeugung oder schnelle Diagnose und Behandlung;
- 4.) **darin frei sein, normales Verhalten auszuleben**, durch die Bereitstellung von angemessenem Platz, geeigneten Einrichtungen sowie entsprechende Gesellschaft durch Artgenossen;
- 5.) **frei sein von Angst und Leiden**, indem Bedingungen und Behandlungen gewährleistet werden, die psychisches Leiden vermeiden (FAWC, 2009).

Die Beschreibung von Grundbedürfnissen wie im Falle der fünf Freiheitsgrade und die Definition des Tierwohls selbst verändert sich und wird stetig weiterentwickelt. Das liegt zum einen an dem Zugewinn von Erkenntnissen auf Basis neuerer Untersuchungen. Zum anderen liegt es auch daran, dass Wissenschaftler wie auch alle anderen Menschen unterschiedliche Werte haben, die zu unterschiedlichen wissenschaftlichen Ansätzen und Kriterien des Tierwohls (Fraser, 2008) und somit auch zu unterschiedlichen Forschungsfragen und Versuchsdurchführungen führen. Tierwohl lässt sich daher nicht einfach definieren und ist nicht ein bestimmter Zustand, der erreicht werden kann. Vielmehr ist es ein Konzept bestehend aus verschiedenen Komponenten, welches zwar wissenschaftlich erforscht, aber dennoch wertorientiert ist (Fraser, 2008) und aus vielen unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden kann und muss. Laut Fraser (2008) gibt es drei grundlegende Kriterien bzw. Konzepte (*Basic health and functioning*, *Natural living* sowie *Affective states*), die aus unterschiedlichen Blickwinkeln eine Bewertung und Verbesserung des Tierwohls durchführen, die jedoch als Ganzes und in Beziehung zueinander betrachtet werden

müssen. Die World Organisation for Animal Health (OIE) fasst Animal Welfare, welches an sich als physischer und psychischer Zustand eines Tieres in Bezug auf die Bedingungen, unter denen es lebt und stirbt, definiert wird (OIE, 2021a), als komplexes und vielschichtiges Thema zusammen, mit wissenschaftlicher, ethischer, wirtschaftlicher, kultureller, sozialer, religiöser und politischer Dimension (OIE, 2021b).

Aber nicht nur das Verständnis und die Definition von Tierwohl ist sehr komplex, sondern das Tierwohl an sich als Zustand eines Tieres ist multidimensional (Blokhuis et al., 2003) und wird durch viele, ganz unterschiedliche Faktoren bestimmt (Carenzi & Verga, 2009). Da man das Tierwohl an sich nicht direkt messen kann, werden der Einfluss und die Auswirkungen dieser Faktoren auf das Wohl eines Tieres mit Hilfe von Indikatoren erfasst bzw. wissenschaftlich bewertet, die valide und reliabel sein müssen (Carenzi & Verga, 2009; EFSA, 2012). Solche Indikatoren, seien es Beobachtungen, Aufzeichnungen oder Messungen, dienen dazu, Informationen über das Tierwohl zu erhalten (Keeling, 2019) und dieses bewerten zu können. Mit Hilfe von haltungs-, ressourcen- oder managementbezogenen Indikatoren lassen sich Aspekte und tierwohlbestimmende Faktoren indirekt messen. Über die Erhebung tierbezogener Indikatoren hingegen können Signale für negatives Wohlbefinden wie Verletzungen oder für positives Wohlbefinden wie das Auftreten von Spielverhalten direkt am Tier oder vom Tier ausgehend erfasst und in Beziehung zum Tierwohl gestellt werden.

1.4 Klassische Bewertungsmethoden und Indikatoren

Einige Welfare Assessment Protokolle bzw. allgemeine Konzepte, die in den letzten Jahren entwickelt wurden und zur Bewertung der Tierwohlsituation in schweinehaltenden Betrieben eingesetzt werden können, basieren vor allem auf haltungs- und managementbezogenen Indikatoren. Mit deren Hilfe möchte man indirekt ohne Bonitur des Tieres selbst auf dessen Wohlbefinden schließen. Natürlich ermöglichen diese auch eine Bewertung des generellen Status des Betriebes und der Managementqualifikation des Betriebsleiters bzw. der Betriebsleiterin. Solche hauptsächlich auf indirekten Indikatoren basierende Bewertungsschemata sind beispielsweise der Tiergerechtheitsindex (TGI) 200 (Sundrum et al., 1994) oder der TGI 35 (Bartussek, 1995 & 1999), das HACCP-Programm in der Schweinehaltung mit Fokussierung auf die Tiergesundheit (Hoy et al., 2004), der Nationale Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren (KTBL, 2022a) oder die

Eigenkontrollcheckliste zur Verfügung gestellt durch das QS-Prüfsystem für Lebensmittel (QS, 2022). Indirekte Indikatoren ermöglichen unter anderem eine Einschätzung, inwieweit verschiedene Ressourcen in ausreichendem Maße vorhanden und von guter Qualität sind (Boissy et al., 2007). Rückschlüsse auf Tiergesundheit und Tierwohl lassen sich unter anderem durch die Bewertung managementbezogener Indikatoren ziehen. Hierzu zählen beispielsweise Schlachtbefunddaten, der Umfang des Antibiotikaeinsatzes im Bestand oder Kennzahlen wie Tierverluste oder tägliche Zunahmen. Ressourcenbezogene, indirekte, von der Begutachtung der Tiere selbst unabhängige Kriterien können zum Beispiel das Platzangebot, die Buchtenstrukturierung, das Tier-Fressplatz-Verhältnis sowie die Bewertung der Futterqualität, die Durchflussrate der Tränken, die Wasserqualität oder auch die Begutachtung von Beschäftigungsmaterialien sein.

Für viele der genannten Kriterien gibt es konkrete gesetzliche Vorgaben in der TierSchNutzTV oder es finden sich Empfehlungswerte unter anderem in DLG-Merkblättern wie beispielsweise für die Durchflussmenge und die Qualitätsparameter des Tränkewassers (Büscher et al., 2008).

Im Gegensatz zu den indirekten Indikatoren bedarf es bei der Erhebung direkter, tierbezogener Indikatoren der Inaugenscheinnahme der Tiere selbst. Bonitiert wird beispielsweise der Body Condition Score (BCS), der Grad der Verschmutzung, Veränderungen und Verletzungen am Tierkörper, vor allem an Schwanz und Ohren, das Gangbild oder das Liegeverhalten.

Bewertungsschemata, die vorrangig auf tierbezogenen Indikatoren basieren, sind unter anderem das Welfare Quality® Protokoll für Schweine (Welfare Quality®, 2009), das AssureWel Protokoll für Mastschweine (AssureWel, 2022) sowie der Praktikerleitfaden für Tierschutzindikatoren beim Schwein (KTBL, 2020). Als Beispiele für spezielle Boniturschemata, die das Gangbild von Schweinen bewerten, sind das Zinpro Feet First® Swine Locomotion Scoring System (Zinpro, 2022) oder die Bewertungsskala von Nalon et al. (2014) zu nennen. Tools oder Boniturschemata, die sich auf die Bewertung und Verbesserung im Falle von Schwanzbeißen im Tierbestand fokussieren, sind beispielsweise das SchwIP als Abkürzung für Schwanzbeißen-Interventions-Programm (vom Brocke et al., 2015) oder der Deutsche Schweine-Boniturschlüssel (Bönisch et al., 2017), der ausschließlich eine Bewertung von Schwanz- und Ohrenverletzungen ermöglicht. Zudem liegen erste Studien und

Schemata vor, die versuchen mit Hilfe der Bewertung des Gesichtsausdrucks über sogenannte *Grimace Scales* das Schmerzempfinden von Ferkeln (Di Giminiani et al., 2016; Viscardi et al., 2017) und heranwachsenden Schweinen (Vullo et al., 2020) zu bewerten. Für die Erhebung tierbezogener Indikatoren muss tendenziell mehr Zeit aufgewendet und eingeplant werden als für andere Indikatoren.

Nur eine gewisse Stichprobengröße lässt Rückschlüsse auf die Tierwohlsituation des gesamten Bestandes zu. Im Falle der Erhebung bei *PigsAndMore* müssen beispielsweise 150 Tiere direkt bonitiert werden. Um Veränderungen an Ohren und/oder Schwanz zu erkennen, ist der Gang in die Bucht und der direkte Kontakt zu den Fokustieren zwingend notwendig, aber auch zeitaufwendig, da die Tiere dem direkten Kontakt mit einer fremden Person meist ausweichen. Zudem werden bei *PigsAndMore* auf Gruppenebene in 10 Buchten mit bis zu 60 Tieren verschiedene Gesundheitsparameter erhoben und beispielsweise Störungen im Bewegungsablauf notiert, wofür aber ein Auftreiben und Begutachten aller Tiere nötig ist.

Trotz des erhöhten zeitlichen Aufwands findet bei den bisher genannten, tierbezogenen Indikatoren eher eine möglichst schnelle Erhebung des Status quo statt, die sich je Indikator nur für wenige Sekunden auf ein Tier oder eine Tiergruppe (zum Beispiel im Falle des Liegeverhaltens) fokussiert. Andere direkte Indikatoren, die das Beobachten des Verhaltens der Tiere über mehrere Minuten erfordert, kommen in den zuvor erwähnten Bewertungsschemata nicht vor (Bönisch et al., 2017; KTBL, 2020) oder nur in sehr geringem Umfang durch die Erhebung der Nutzung von Beschäftigungsmaterial (AssureWel, 2022). Ausschließlich das genannte Welfare Quality® Protokoll für Schweine (Welfare Quality®, 2009) bezieht gezielt solche verhaltensbezogenen Indikatoren in die Bewertung der Gesamtsituation mit ein. Erhoben und bewertet werden hier zur Ermittlung eines „angemessenen Verhaltens“ (*appropriate behaviour* siehe Welfare Quality®, 2009) die Möglichkeit bzw. das Auftreten sozialen Verhaltens und anderer Formen von Verhalten wie dem Erkundungsverhalten, die Mensch-Tier-Beziehung sowie das Auftreten negativer aber auch und ganz explizit positiver emotionaler Zustände in Form eines *Qualitative Behaviour Assessment*.

Einen Überblick über die große Bandbreite an Indikatoren, die zur Bewertung des Tierwohls zur Verfügung stehen, bietet das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) als Web-Anwendung „Literaturdatenbank

Tierwohlintikatoren“ an (KTBL, 2022b). Die fachlichen Inhalte dieser Anwendung wurden im Rahmen des Projektes „Nationales Tierwohlmonitoring“ (NaTiMon) zusammengestellt (NaTiMon, 2021).

Alle bisher genannten Indikatoren – sowohl indirekte als auch direkte – können abgesehen von Laser-Entfernungsmesser und Stoppuhr ohne technische Hilfsmittel erhoben werden. Die genannten Boniturschemata sind ausschließlich als Momentaufnahme zur Ermittlung des Status quo konzipiert und dienen der regelmäßigen Bewertung der Bestandssituation in Form eines durch Externe durchgeführten Audits oder im Rahmen der gesetzlich geforderten Eigenkontrolle.

Im folgenden Kapitel werden digitale Hilfsmittel und Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt, die bereits genutzt werden oder sich noch in ihrer Entwicklung befinden. Diese können die Erhebung aktueller Boniturschemata unterstützen sowie erweitern, ermöglichen aber auch die Weiterentwicklung neuer Bewertungsansätze und Methoden.

1.5 Weiterentwicklung der Erhebungs- und Bewertungsmethoden – Technische Hilfsmittel und Anwendungsmöglichkeiten

Die folgenden Beispiele für Studien oder bereits in der Praxis genutzter technischer Hilfsmittel und Anwendungsmöglichkeiten zur Einschätzung und Bewertung haltungs- und tierbezogener Indikatoren sind hier nur auszugsweise aufgelistet und fokussieren sich auf den Schweinebereich. Als technische Hilfsmittel werden Sensoren, Messgeräte oder andere technische Einrichtungen verstanden sowie deren Einbindung in Formen der elektronischen Datenverarbeitung und -auswertung. Generell eignen sich sowohl optische als auch nicht-optische Sensoren bzw. Systeme für die Erfassung und Bewertung normalen wie auch abnormalen Verhaltens (Sturm et al., 2020). Sie liefern teils als Monitoringsysteme somit wichtige, objektiv ermittelte Beurteilungskriterien für das Tierwohl, ohne die Tiere zu stören, ihr Verhalten aktiv zu beeinflussen oder zusätzlichem Stress auszusetzen.

Für die Erhebung von Indikatoren und die Einschätzung des Tierwohls bei Schweinen stehen ganz unterschiedliche Ausführungsformen von Sensoren bzw. Messgeräten zur Verfügung. Welcher Sensor- oder Gerätetyp eingesetzt wird, hängt maßgeblich davon ab, welcher Indikator (das bedeutet, welches Verhalten, welcher

physiologische Zustand oder welche Bedingungen) gemessen und beurteilt werden soll. Im Einsatz sind unter anderem Kameras sowie Wärmebildkameras, photoelektrische Sensoren, PIDs, Accelerometer, RFID-Transponder (Radio Frequency Identification), Mikrofone, Kraftaufnehmer oder auch Infrarotthermometer (Gomez et al., 2021). Zudem werden Sensoren für die Messung von Temperatur, relativer Luftfeuchte, Luftdruck, Beleuchtungsstärke und Gasen wie Ammoniak (NH₃) oder Messgeräte zur Ermittlung der Durchflussmenge von Wasser genutzt.

Schon auf Erhebungsebene kann die Bonitur durch technische Hilfsmittel vereinfacht werden. Das KTBL bietet eine Excel-basierte Anwendung an, die der Erhebung und Verrechnung von Tierschutzindikatoren (auf Basis des entsprechenden Leitfadens) im Sinne der betrieblichen Eigenkontrolle dient (KTBL, 2022c). Eine vereinfachte, digitale und umfassende Erhebung und Bewertung von haltungs-, management- und tierbezogenen Indikatoren als App-Anwendung war auch Ziel des Projektes *PigsAndMore* und wurde bereits im Prototyp umgesetzt. Zudem bietet die App *FitForPigs* (2022), entwickelt durch das im Rahmen des Europäischen Innovationspartnerschaftsprojektes „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“ (EIP-AGRI) geförderten Kooperationsprojektes „Coachingsystem Schweinesignale erkennen, verstehen & handeln (pig handling)“, eine multimediale Plattform, die Tierhalter/-innen bei der Einschätzung des Tierwohls unterstützen soll. Die App *Husten Index Kalkulator* (2020) des Unternehmens Boehringer Ingelheim bietet eine einfache Methode, um Hustenereignisse im Bestand aufzunehmen und zu bewerten, die oft im Zusammenhang mit Atemwegserkrankungen stehen.

Auch bereits zur Verfügung stehende Informationen aus der Lieferkette, wie die Schlachtbefunddaten, können im Rahmen einer Sekundärnutzung für die Bewertung des Tierwohls und des Gesundheitsmonitorings von Mastschweinen genutzt werden (Grosse-Kleimann et al., 2021) und lassen zudem Rückschlüsse auf die Tiergesundheit der (noch) lebenden Tiere im Bestand zu (Holt et al., 2011). Beispiele für die Weiterentwicklung im Sinne einer automatisierten und objektiven Schlachtkörperbeurteilung lassen sich hier vor allem im Geflügelbereich finden. So zeigen sich bei Louton et al. (2022) vielversprechende Ergebnisse für die kamerabasierte, softwaregestützte und automatisierte Beurteilung von Fußballendermatitis bei Masthähnchen am Schlachtband (CLK, 2022; Louton et al., 2022). In einem ähnlichen Pilotprojekt konnte bereits für Mastschweine

ein automatisiertes Erfassungs- und Bewertungssystem entwickelt werden, welches Ohr- und Schwanzspitzennekrosen als Tierwohlindikatoren am Schlachtband zuverlässig erkennen kann (Blömke & Kemper 2016; Blömke et al., 2020). Verletzungen an Ohren und Schwänzen lassen sich unter anderem auf gegenseitiges Schwanzbeißen der Tiere zurückführen. Dieses Verhalten dient als multifaktoriell (Scipioni et al., 2009; Veit et al., 2016) bedingter Indikator für unerfülltes Wohlbefinden, da die Bedürfnisse der Schweine nicht zufriedenstellend erfüllt werden (Scipioni et al., 2009).

Als Hilfsmittel, die im Rahmen einer Echtzeit-Erhebung bzw. Bonitur kurzzeitig dabei unterstützen können, das Tierwohl zu bewerten und Indikatoren zu erfassen, lassen sich technische Anwendungen aufführen, die der mobilen Gewichtserfassung der Tiere dienen. Dies kann beispielsweise im Zusammenhang mit dem BCS erhoben werden sowie zur besseren Einteilung der Tiergruppen in gewichtsbezogene Kategorien für die spätere Auswertung dienen. Als Beispiel für solch eine mobile Schweinewaage, die ursprünglich zur genaueren Sortierung in (Leistungs-)Gruppen und Selektion der Tiere konzipiert wurde, ist das Messgerät *optiSCAN* der Firma Hölscher + Leuschner GmbH & Co. KG zu nennen (Hölscher + Leuschner, 2022). Innovativ, jedoch laut Hersteller noch nicht valide genug, um die Marktreife erreicht zu haben, ist die Anwendung *PiggyCheck* der Firma Meier-Brakenberg GmbH & Co. KG, die über Tablet oder Smartphone mit Hilfe einer 3-D-Kamera und spezieller Software zukünftig berührungslos die Gewichts- und Körperkonditionsbestimmung ermöglichen soll (Deter, 2016).

Verschiedenste Studien (siehe Zhang et al., 2019) beschäftigen sich mit der kurz- oder langfristigen, teilweise kontaktlosen Bestimmung der Körpertemperatur von Schweinen als wichtigem Indikator für die Tiergesundheit (Petry et al., 2017) mit Hilfe verschiedenster Sensorsysteme. Als für die Anwender/-innen zeitsparende und für die Tiere stressfreie Alternative zur üblichen, rektalen Temperaturermittlung bei Schweinen wird unter anderem die Messung mittels Infrarot-Thermografie bzw. Wärmebildkameras untersucht und validiert (Petry et al., 2017; Stukelj et al., 2022).

Kurzfristig lassen sich mit Sensoren auch wichtige haltungsbezogene Indikatoren wie die NH_3 -Konzentration im Tierbereich messen. Auf die Bedeutung der NH_3 -Konzentration und die Validierung von Messgeräten geht das Kapitel 1.6 *Ammoniakmessgeräte* gezielt ein.

Weitere, wichtige Stallklimaparameter, die der Tierwohlbeurteilung dienen können, sind die Stalllufttemperatur, die relative Luftfeuchte oder auch die Messung der Luftqualität bezogen auf weitere relevante Schadgaskonzentrationen im Schweinestall wie die Konzentration von Kohlenstoffdioxid oder Schwefelwasserstoff. Eine Bewertung und Einschätzung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte im Tierbereich beispielsweise auf Abteilebene ist meist über die Kontrolle der hinterlegten Soll- sowie der ermittelten Istwerte im Lüftungscomputer möglich und bedarf meist keiner zusätzlichen, technischen Hilfsmittel. Dennoch müssen auch bereits bestehende Sensoren auf ihre Funktionsfähigkeit sowie deren richtiger Einbau und Verwendung im Stall regelmäßig kontrolliert werden.

Für die Ermittlung von Lautäußerungen, Bewegungen sowie der Aktivität bei Schweinen werden unterschiedliche, technische Anwendungen und Sensoren eingesetzt. Die Lautäußerungen der Tiere, das Bewegungsverhalten, die Aktivität oder andere Verhaltensweisen wie das Liegeverhalten können als Indikatoren verschiedenste Aussagen zum Tierwohl und der Tiergesundheit ermöglichen. So kann eine Abweichung des für Schweine typischen biphasischen Aktivitätsverlaufs über den Tag (Hoy, 2009) auf Probleme wie Stress im Allgemeinen, auf Hitzestress, Unruhe oder ein Krankheitsgeschehen in der Tiergruppe hindeuten. Als technische Hilfsmittel bieten sich unter anderem Kameras, Mikrofone oder PIDs an. Im Folgenden werden Anwendungsmöglichkeiten für die Nutzung von Kameras und Mikrofonen im Rahmen der Verhaltensaufzeichnung und Tierwohlbewertung vorgestellt. Kapitel *1.7 Passive Infrarotdetektoren* wird darüber hinaus speziell auf die Nutzung von PIDs im Rahmen eigener Untersuchungen eingehen.

Es finden sich zahlreiche Beispiele für die Verwendung von Kameras zur visuellen Erfassung von Informationen in Kombination mit Bildbearbeitungs- und Berechnungsprogrammen sowie Lernalgorithmen (auch im Sinne des Machine bzw. Deep Learnings). Sie werden genutzt für die Bestimmung des Liegeverhaltens von Schweinen als Indikator für deren Temperaturbedürfnis (Shao & Xin, 2008; Costa et al., 2013; Nasirahmadi et al., 2017, 2019a & 2019b), für die Quantifizierung von Trinkereignissen als Indikator für eine adäquate Wasserversorgung oder den Ausbruch von Krankheiten (Kashiha et al., 2013; Chen et al., 2020a) sowie für die Erfassung spezieller Verhaltensweisen wie aggressives Verhalten (Viazzi et al., 2014; Chen et al., 2020b). Zudem lässt sich die Erkennung tierindividueller, physischer

Merkmale zur gezielten Identifizierung realisieren (Marsot et al., 2020) und könnte als Alternative zur RFID Technologie eingesetzt werden.

Auch Mikrofone eignen sich als technische Hilfsmittel zur Tierwohlbewertung. Mit ihnen lassen sich beispielsweise Stressschreie von Tieren aufzeichnen und bewerten (Schön et al., 2004; Vandermeulen et al., 2015) oder Hustenereignisse als Indikator für Atemwegserkrankungen in Echtzeit erkennen (Exadaktylos et al., 2008). Mit Hilfe eines Husten-Diagnosesystems wie SoundTalks® (SoundTalks, 2022) kann so frühzeitig auf ein sich entwickelndes Krankheitsgeschehen reagiert und präventive Maßnahmen ergriffen werden.

Verschiedenste aktuell veröffentlichte Reviews wie das von Larsen et al. (2021) und anderen (Wathes et al., 2008; Jukan et al., 2018; Halachmi et al., 2019; Arulmozhi et al., 2021; Gómez et al., 2021) fassen den aktuellen Forschungsstand unterschiedlichster Technologien oder bereits kommerziell verfügbarer digitaler Systeme (Stachowicz & Umstätter, 2020) zusammen. Mit deren Hilfe können zum Beispiel das Verhalten sowie Verhaltensänderungen von Einzeltieren oder einer Gruppe von Schweinen wie auch physiologische Indikatoren gemessen werden, die der Tierwohlbewertung dienen sollen.

Solch technische Anwendungen und teils auf Künstlicher Intelligenz basierende Auswertungsmethoden könnten als dauerhaft genutzte Tools im Stall zum Einsatz kommen und eine kontinuierliche Bewertung der Tierwohlsituation und die komplexe Analyse von Schwachstellen ermöglichen.

1.6 Ammoniakmessgeräte

NH₃ entsteht im Schweinestall vor allem durch den Abbau von Harnstoff, der über den Harn der Tiere ausgeschiedenen wird. Diese Stickstoffverbindung wird durch das Enzym Urease, welches von Mikroorganismen produziert wird, zu NH₃ umgewandelt (Umweltbundesamt, 2021) und hat negative Auswirkungen auf Mensch, Tier und die Umwelt. NH₃ wirkt sich aufgrund von Eutrophierung und Versauerung negativ auf die Wasser- und Bodenqualität aus, beeinträchtigt die Qualität der Luft und dient als Quelle für das klimarelevante Gas Distickstoffmonoxid (N₂O) auch bekannt als Lachgas (U.S. EPA, 2004; Gerber et al., 2013; von Jasmund et al., 2022). Hohe NH₃-Konzentrationen im Schweinestall wirken sich in erheblichem Maße negativ auf die Luftqualität aus. Sie beeinflussen so nicht nur das Wohlbefinden der Tiere und der im

Stall arbeitenden Menschen, sondern verschlechtern auch deren Gesundheit (Drummond et al., 1980; Preller, 1995; Aarnink, 1997). Laut TierSchNutzV darf die NH_3 -Konzentration im Aufenthaltsbereich der Schweine maximal 20 ppm betragen. Aufgrund der hohen Relevanz für Gesundheit und Wohlbefinden sowie des gesetzlich vorgegebenen Grenzwertes sollte die Messung von NH_3 unbedingt Teil der Tierwohlbewertung und Indikatorerhebung im Stall sein. Im besten Fall sollte jedoch die Einbeziehung der NH_3 -Konzentration Teil des generellen Klimamanagements sein. Um kontinuierlich das Lüftungsmanagement in geschlossenen, zwangsbelüfteten Ställen dahingehend zu regulieren und zu optimieren, eignet sich laut Hersteller der Polytron Transmitter C300 der Firma Dräger (Lübeck, Deutschland), der mit dem Klimacomputer verbunden und somit die Stallluftqualität sowie den Gesundheitsstatus der Tiere positiv beeinflussen kann (Hennig-Pauka et al., 2019). Für die Messung von NH_3 – sei es kurzfristig oder kontinuierlich – stehen verschiedenste Sensoren zur Verfügung (Ni & Heber, 2008), die sich beispielweise hinsichtlich ihrer anwendungsrelevanten Spezifikationen, ihrer Messgenauigkeit, ihrer erwarteten Nutzungsdauer oder ihrer Langzeitstabilität voneinander unterscheiden. Um je nach Anwendungsart und Ziel der Messung den optimalen Sensor bzw. das optimale Messgerät und dessen Einstellungen auszuwählen, sollten zunächst Voruntersuchungen auf Laborebene stattfinden, die die Handhabung vor dem Praxiseinsatz testen sowie die Überprüfung der Herstellerangaben ermöglichen. Solch eine differenzierte Untersuchung zweier Gerätetypen zur Messung von NH_3 wurde im Institut für Landtechnik der Universität Bonn durchgeführt und im Journalbeitrag ***Assessment of ammonia sensors and photoacoustic measurement systems using a gas calibration unit*** (von Jasmund et al., 2022) vorgestellt.

Studie 1 (von Jasmund et al., 2022)

Ziel dieser ersten Studie der vorliegenden Dissertation war die Validierung zweier Gerätetypen, die sich hinsichtlich ihrer analytischen Messmethode von NH_3 unterscheiden. Gemessen wurde in einem Konzentrationsbereich von 2,5 – 80 ppm bei vier verschiedenen relativen Luftfeuchten (20 %, 40 %, 60 % sowie 80 %).

Um solch eine Messung auf Laborebene zu ermöglichen, geht dem genannten Ziel der vergleichenden Untersuchung zunächst die Entwicklung einer sogenannten Gasmischanlage zur präzisen Dosierung von Gasen und relativer Luftfeuchtigkeit voraus. Mit dieser ließ sich die Prüfung der Geräte- bzw. Sensortypen erst realisieren.

1.7 Passive Infrarotdetektoren

Für die andauernde und objektive Aufnahme der Aktivität im Sinne einer kontinuierlichen Langzeitmessung eignen sich als technische Hilfsmittel sogenannte PIDs. Mit ihnen kann unabhängig von den vorherrschenden Lichtverhältnissen die Aktivität von Tieren auf Basis thermischer Unterschiede zwischen Tier und Umgebung aufgezeichnet werden (Pedersen & Pedersen, 1995; Ni et al., 2017; Besteiro et al., 2018a). So lassen sich allgemeine Aktivitätsprofile im Tagesverlauf beispielsweise einer Schweinegruppe auf Abteil- oder Buchtenebene erstellen (Ni et al., 2017; Besteiro et al., 2018a, 2018b & 2021). Ziel eigener Untersuchungen im Institut für Landtechnik der Universität Bonn war die Überprüfung der generellen Anwendbarkeit und Nutzung der PIDs für die Erfassung der Aktivität von Mastschweinen im Sinne eines kurzzeitigen Screenings der Ist-Situation über mehrere Tage, wie es im Projekt *PigsAndMore* umgesetzt wurde. Zudem wurde die Eignung der PIDs für die Ermittlung der Aktivität in bestimmten Fokusbereichen wie dem Trog-, dem Ruhe- oder dem Beschäftigungsbereich untersucht und die Ergebnisse im Journalbeitrag ***Using Passive Infrared Detectors to Record Group Activity and Activity in Certain Focus Areas in Fattening Pigs*** vorgestellt (von Jasmund et al., 2020).

Konferenzbeitrag (von Jasmund et al., 2019)

sowie

Studie 2 (von Jasmund et al., 2020)

Ziel der zweiten Studie der vorliegenden Dissertation war die Überprüfung der generellen Eignung von PIDs zur Erfassung der Aktivität einer Mastschweinegruppe auf Buchtenebene sowie der Aktivität in bestimmten Fokusbereichen wie dem Trog- oder dem Beschäftigungsbereich innerhalb der Bucht.

Die Ergebnisse der Studie sowie erste Vorversuche (siehe Konferenzbeitrag) legten die Grundlage für die Nutzung der geplanten Anwendung der PIDs im Rahmen einer Screeningphase im Projekt *PigsAndMore*. Diese diente der Erfassung und Bewertung der Tierwohlsituation, wie es auch im genannten Konferenzbeitrag projektbezogen erläutert wird.

In den folgenden Kapiteln werden die bereits im Text erwähnten und veröffentlichten Journalbeiträge und der Konferenzbeitrag aufgeführt. Diese erläutern die Validierung von NH₃-Messgeräten und die Entwicklung und Testung einer Gasmischanlage im Institut für Landtechnik der Universität Bonn (Abschnitt 2) sowie die Validierung von PIDs zur Erfassung der Aktivität von Mastschweinen (Abschnitt 3 und 4). Abschließend werden in Abschnitt 5 (Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblicke) bezugnehmend auf die einleitenden Kapitel und die publizierten Beiträge die Themen „Qualitätssicherung und Tauglichkeitsprüfung von Ammoniakmessgeräten an der Gasmischanlage“, „Eignung und Anwendungsmöglichkeiten für PIDs“ und die Bedeutung einer „Multidimensionale[n], multifaktorielle[n] und kontinuierliche[n] Bewertung des Tierwohls“ diskutiert.

1.8 Literaturverzeichnis

- Aarnink, A. J. A. (1997). Ammonia emissions from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour. Ph.D. Thesis, University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.
- Arulmozhi, E., Bhujel, A., Moon, B.-E. & Kim, H.-T. (2021). The Application of Cameras in Precision Pig Farming: An Overview for Swine-Keeping Professionals. *Animals*, 11(8), 2343. <https://doi.org/10.3390/ani11082343>.
- AssureWel (2022). Pigs: Finishing pigs. Assessment Protocol. <http://assurewel.org/Portals/2/Documents/Pigs/Finishing%20illustrated%20protocol.pdf> [28.02.2022]
- Bartussek, H. (1995). Tiergerechtheitsindex für Mastschweine. TGI 35 L/1995-Mastschweine, Stand Dezember 1995, Veröffentlichungen der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft (BAL) Gumpenstein, A-8952 Irdning, Austria.
- Bartussek, H. (1999). A review of the animal needs index (ANI) for the assessment of animals' well-being in the housing systems for Austrian proprietary products and legislation. *Livestock Production Science*, 61(2-3), 179–192. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00067-6).
- Bentham, J. (1789). An introduction to the Principles of Morals and Legislation. London. In: Burns, J. H. & Hart, H. L. A. (1970): Collected Works of Jeremy Bentham. The Athlone Press: University of London.
- Bessei, W. (2006): Quantifizierung von Wohlbefinden bei Tieren. In: Fortschritte in Tierzüchtung und Tierhaltung. 21. Hülsenberger Gespräche. Lübeck.
- Besteiro, R., Rodríguez, M. R., Fernández, M. D., Ortega, J. A. & Velo, R. (2018a). Agreement between passive infrared detector measurements and human observations of animal activity. *Livestock Science*, 214, 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.06.008>.
- Besteiro, R., Arango, T., Rodríguez, M. R., Fernández, M. D. & Velo, R. (2018b). Estimation of patterns in weaned piglets' activity using spectral analysis. *Biosystems Engineering*, 173, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.014>.
- Besteiro, R., Arango, T., Ortega, J., Fernández, M. D. & Rodríguez, M. R. (2021). Long-Term Measurement of Piglet Activity Using Passive Infrared Detectors. *Animals*, 11(6), 1607. <https://doi.org/10.3390/ani11061607>.
- Blokhuis, H. J., Jones, R. B., Geers, R., Miele, M. & Veissier, I. (2003). Measuring and monitoring animal welfare: Transparency in the food product quality chain. *Animal Welfare*, 12, 445–455.
- Blömke L. & Kemper N. (2016). Pilotprojekt standardisiert die Auswertung. Automatisierte Erfassung von Tierschutzindikatoren beim Schwein am Schlachthof. *FleischWirtschaft* 96, 7/2016, 30-32.

- Blömke, L., Volkmann, N. & Kemper, N. (2020). Evaluation of an automated assessment system for ear and tail lesions as animal welfare indicators in pigs at slaughter. *Meat Science*, 159, 107934. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107934>.
- BMEL (2019). Tierschutzbericht der Bundesregierung 2019. Bericht über den Stand der Entwicklung des Tierschutzes. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Tierschutzbericht-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [27.02.2022]
- Boissy, A., Manteuffel, G., Jensen, M. B., Moe, R. O., Spruijt, B., Keeling, L. J., Winckler, C., Forkman, B., Dimitrov, I., Langbein, J., Bakken, M., Veissier, I. & Aubert, A. (2007). Assessment of positive emotions in animals to improve their welfare. *Physiology & Behavior*, 92(3), 375–397. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.02.003>.
- Bönisch, K., vom Brocke, A., Dippel, S., Grümpel, A., Hagemann, L., Jais, C., Lösel, D., Müller, A., Müller, S., Naya, A., Schrade, H., Späth, C., Veit, C., Wild, A. & Lechner, M. (2017). Deutscher Schweine-Boniturschlüssel (DSBS). https://www.fli.de/fileadmin/FLI/ITT/Deutscher_Schweine_Boniturschluesel_2017-06-30_de.pdf [28.02.2022]
- Brambell, F. W. R. (1965). Report of the Technical Committee to enquire into the welfare of animals kept under intensive livestock husbandry systems. London: Her Majesty's Stationary Office, UK.
- Broom, D. M. (1986). Indicators of poor welfare. *British Veterinary Journal*, 142(6), 524–526. [https://doi.org/10.1016/0007-1935\(86\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0007-1935(86)90109-0).
- Büscher, W., Rudovsky, A., Marks, M., Häuser, S. & Hesse, D. (2008). DLG-Merkblatt 351. Tränketeknik für Schweine. DLG e.V., Frankfurt am Main. https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_351.pdf [28.02.2022].
- Carenzi, C. & Verga, M. (2009). Animal welfare: review of the scientific concept and definition. *Italian Journal of Animal Science*, 8:sup1, 21–30. <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s1.21>.
- Chen, C., Zhu, W., Steibel, J., Siegford, J., Han, J. & Norton, T. (2020a). Classification of drinking and drinker-playing in pigs by a video-based deep learning method. *Biosystems Engineering*, 196, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.010>.
- Chen, C., Zhu, W., Steibel, J., Siegford, J., Wurtz, K., Han, J. & Norton, T. (2020b). Recognition of aggressive episodes of pigs based on convolutional neural network and long short-term memory. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105166. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105166>.
- CLK (2022). ChickenCheck. <https://www.clkgmbh.de/de/chicken-check-system/> [08.03.2022]
- Costa, A., Ismayilova, G., Borgonovo, F., Viazzi, S., Berckmans, D. & Guarino, M. (2013). Image-processing technique to measure pig activity in response to climatic variation in a pig barn. *Animal Production Science*, 54(8), 1075-1083. <https://doi.org/10.1071/AN13031>.

- Deter, A. (2016). EuroTier: PiggyCheck von Meier-Brakenberg. In: topagrar online. <https://www.topagrar.com/schwein/news/eurotier-piggycheck-von-meier-brakenberg-9557892.html> [16.03.2022]
- Deutscher Bundestag (1985). Amtliche Begründung des Entwurfs eines Ersten Gesetzes zur Änderung des TierSchG vom 10.4.1985, Bundestags-Drucksache 10/3158, 18.
- Deutscher Tierschutzbund e.V. (2011). Das Tierschutz Handbuch. 3. Auflage. Bonn: Dt. Tierschutzbund.
- Di Giminiani, P., Brierley, V. L. M. H., Scollo, A., Gottardo, F., Malcolm, E. M., Edwards, S. A. & Leach, M. C. (2016). The Assessment of Facial Expressions in Piglets Undergoing Tail Docking and Castration: Toward the Development of the Piglet Grimace Scale. *Frontiers in Veterinary Science*, 3:100. <https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00100>.
- Drummond, J. G., Curtis, S. E., Simon, J. & Norton, H. W. (1980). Effects of aerial ammonia on growth and health of young pigs. *Journal of Animal Science*, 50(6), 1085–1091. <https://doi.org/10.2527/jas1980.5061085x>.
- Duncan, I. J. H. (2005). Science-based assessment of animal welfare: farm animals. *Revue scientifique et technique-Office international des Epizooties*, 24(2), 483-492.
- EFSA (2012). Scientific Opinion on the use of animal-based measures to assess welfare of broilers. EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW). *EFSA Journal*, 10(7):2774.
- Exadaktylos, V., Silva, M., Aerts, J.-M., Taylor, C. J. & Berckmans, D. (2008). Real-time recognition of sick pig cough sounds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.02.010>.
- FAWC (2009). Farm Animal Welfare in Great Britain: Past, Present and Future. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/319292/Farm_Animal_Welfare_in_Great_Britain_-_Past__Present_and_Future.pdf [17.03.2022]
- FitForPigs (2022). FitForPigs von Land24 GmbH (Version 1.4.1) [Mobile App]. App Store. <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.land24.fitforpigs&gl=US>.
- Fraser, D. (2008). Understanding animal welfare. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 50(Suppl 1):SI. doi:10.1186/1751-0147-50-SI-SI.
- Gerber, P.J., Henderson, B., Makkar, H.P.S. (Eds.) (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO₂ emissions. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Gómez, Y., Stygar, A. H., Boumans, I. J. M. M., Bokkers, E. A. M., Pedersen, L. J., Niemi, J. K., Pastell, M., Manteca, X. & Llonch, P. (2021). A Systematic Review on Validated Precision Livestock Farming Technologies for Pig Production and Its Potential to Assess Animal Welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 8:660565. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.660565>.
- Greshake, F. (2022). Preiskrise: Wie reagieren? SUS, (1), 11.

- Grosse-Kleimann, J., Plate, H., Meyer, H., Gerhardy, H., Heucke, C. E. & Kreienbrock, L. (2021). Health monitoring of finishing pigs by secondary data use - a longitudinal analysis. *Porcine Health Management*, 7:20. <https://doi.org/10.1186/s40813-021-00197-z>.
- Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J. & Pastell, M. (2019). Smart Animal Agriculture: Application of Real-Time Sensors to Improve Animal Well-Being and Production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403–425. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020518-114851>.
- Hennig-Pauka, I., Menzel, A., Boehme, T. R., Schierbaum, H., Ganter, M. & Schulz, J. (2019). Haptoglobin and C-Reactive Protein-Non-specific Markers for Nursery Conditions in Swine. *Frontiers in Veterinary Science*, 6:92. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00092>.
- Holt, H. R., Alarcon, P., Velasova, M., Pfeiffer, D. U. & Wieland, B. (2011). BPEX Pig Health Scheme: a useful monitoring system for respiratory disease control in pig farms? *BMC Veterinary Research*, 7:82. <https://doi.org/10.1186/1746-6148-7-82>.
- Hoy, S. (2009). Nutztierethologie; Eugen Ulmer KG: Stuttgart, Germany; S. 105–139.
- Hoy, S., von Borell, E., Richter, T. & Sundrum, A. (2004). Das HACCP-Programm in der Schweinehaltung – Kritische Kontrollpunkte (CCP) aus der Sicht der Tiergesundheit. *Züchtungskunde*, 76(5), 367–380.
- Hölscher + Leuschner (2022). optiScan. Die Schweinewaage in einer Hand. <https://hl-agrar.de/wp-content/uploads/2020/11/optiscan-flyer.pdf> [10.03.2022]
- Husten Index Kalkulator (2020). Husten Index Kalkulator von Boehringer Ingelheim Animal Health GmbH (Version 2.0.8) [Mobile App]. App Store. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.coughindex&gl=US>.
- Jukan, A., Masip-Bruin, X. & Amla, N. (2018). Smart Computing and Sensing Technologies for Animal Welfare: A Systematic Review. *ACM Computing Surveys*, 50(1), 10, 1–27. <https://doi.org/10.1145/3041960>.
- Kant, I. (1990). Die Metaphysik der Sitten. Mit einer Einleitung herausgegeben von Hans Ebeling. Stuttgart: Reclam.
- Kashiha, M., Bahr, C., Haredasht, S. A., Ott, S., Moons, C. P. H., Niewold, T. A., Ödberg, F. O. & Berckmans, D. (2013). The automatic monitoring of pigs water use by cameras. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.015>.
- Keeling, L. J. (2019). Indicators of Good Welfare. In: Encyclopedia of Animal Behavior. Second Edition. Volume 1. Elsevier Ltd. S. 134-140.
- Kraemer, A. (2011). Tierschutz und Strafrecht: Luxus oder Notwendigkeit? Berlin: Logos-Verlag.
- KTBL (2020): Tierschutzindikatoren: Leitfaden für die Praxis – Schwein (2. Aktualisierte Auflage), Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- KTBL (2022a). Nationaler Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren. <https://daten.ktbl.de/nbr/navigation.html?destination=home> [28.02.2022]

- KTBL (2022b). Literaturdatenbank Tierwohlindikatoren.
<https://daten.ktbl.de/literaturdatenbank-tierwohlindikatoren/main> [05.05.2022]
- KTBL (2022c). Tierschutzindikatoren – Erhebung.
<https://www.ktbl.de/webanwendungen/tierschutzindikatoren-erhebung/> [08.03.2022]
- Larsen, M. L. V., Wang, M. & Norton, T. (2021). Information Technologies for Welfare Monitoring in Pigs and Their Relation to Welfare Quality®. *Sustainability*, 13(2), 692.
<https://doi.org/10.3390/su13020692>.
- Leuer, S. (2021). Gesetze treiben Kosten. *SUS*, (5), 28-31.
- Lorz, A. (1992): Kommentar zum Tierschutzgesetz. München: Beck'sche Verlagsbuchhandlung.
- Louton, H., Bergmann, S., Piller, A., Erhard, M., Stracke, J., Spindler, B., Schmidt, P., Schulte-Landwehr, J. & Schwarzer, A. (2022). Automatic Scoring System for Monitoring Foot Pad Dermatitis in Broilers. *Agriculture*, 12(2), 221.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12020221>.
- Marsot, M., Mei, J., Shan, X., Ye, L., Feng, P., Yan, X., Li, C. & Zhao, Y. (2020). An adaptive pig face recognition approach using Convolutional Neural Networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105386. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105386>.
- Nalon, E., Maes, D., van Dongen, S., van Riet, M. M. J., Janssens, G. P. J., Millet, S. & Tuytens, F. A. M. (2014). Comparison of the inter- and intra-observer repeatability of three gait-scoring scales for sows. *Animal*, 8(4), 650–659.
<https://doi.org/10.1017/S1751731113002462>.
- Nasirahmadi, A., Hensel, O., Edwards, S. A. & Sturm, B. (2017). A new approach for categorizing pig lying behaviour based on a Delaunay triangulation method. *Animal*, 11(1), 131–139. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001208>.
- Nasirahmadi, A., Sturm, B., Edwards, S., Jeppsson, K.-H., Olsson, A.-C., Müller, S. & Hensel, O. (2019a). Deep Learning and Machine Vision Approaches for Posture Detection of Individual Pigs. *Sensors*, 19(17), 3738. <https://doi.org/10.3390/s19173738>.
- Nasirahmadi, A., Sturm, B., Olsson, A.-C., Jeppsson, K.-H., Müller, S., Edwards, S. & Hensel, O. (2019b). Automatic scoring of lateral and sternal lying posture in grouped pigs using image processing and Support Vector Machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 475–481. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.009>.
- NaTiMon (2021). Literaturdatenbank Tierwohlindikatoren [online]. Darmstadt, Deutschland: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), zu finden in www.ktbl.de/webanwendungen/literaturdatenbank-tierwohlindikatoren [05.05.2022]
- Ni, J.-Q. & Heber, A. J. (2008). Sampling and Measurement of Ammonia at Animal Facilities. In *Advances in Agronomy* (Bd. 98, S. 201–269). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00204-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00204-6).

- Ni, J.-Q., Liu, S., Radcliffe, J. S. & Vonderohe, C. (2017). Evaluation and characterisation of Passive Infrared Detectors to monitor pig activities in an environmental research building. *Biosystems Engineering*, 158, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.014>.
- OIE (2021a). Terrestrial Animal Health Code. Section 7. Animal Welfare. Chapter 7.1. Introduction to the recommendations for animal welfare. https://www.oie.int/en/what-we-do/standards/codes-and-manuals/terrestrial-code-online-access/?id=169&L=1&htmlfile=chapitre_aw_introduction.htm [19.03.2022]
- OIE (2021b). Animal Welfare. What is animal welfare? <https://www.oie.int/en/what-we-do/animal-health-and-welfare/animal-welfare/> [19.03.2022].
- Pedersen, S. & Pedersen, C. B. (1995). Animal Activity Measured by Infrared Detectors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(4), 239–246. <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1051>.
- Petry, A., McGilvray, W., Rakhshandeh, A. R. & Rakhshandeh, A. (2017). Technical note: Assessment of an alternative technique for measuring body temperature in pigs. *Journal of Animal Science*, 95(7), 3270–3274. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1566>.
- Preller, L. (1995). Respiratory health effects of pig farmers. Assessment of exposure and epidemiological studies of risk factors. Ph.D. Thesis, University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.
- QS (2022). Eigenkontrollcheckliste für die Schweinehaltung zum Leitfaden Landwirtschaft Schweinehaltung. QS Qualität und Sicherheit GmbH. <https://www.q-s.de/futter-tiere-fleisch/landwirtschaft-schweinehalter.html#checklisten> [28.02.2022]
- Schnippe, F. (2021). Schweine im Krisenmodus. *SUS*, (5), 10-12.
- Schön, P.C., Puppe, B. & Manteuffel, G. (2004). Automated recording of stress vocalisations as a tool to document impaired welfare in pigs. *Animal Welfare*, 13, 105–110.
- Scipioni, R., Martelli, G. & Volpelli, L. A. (2009). Assessment of welfare in pigs. *Italian Journal of Animal Science*, 8:sup1, 117–137. <https://doi.org/10.4081/ijas.2009.s1.117>.
- Shao, B. & Xin, H. (2008). A real-time computer vision assessment and control of thermal comfort for group-housed pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(1), 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.09.006>.
- SoundTalks (2022). SoundTalks®. Sound Analytics. For pig farms and based on Artificial Intelligence to detect respiratory disease. <https://www.soundtalks.com/soundtalks/> [16.03.2022]
- Spruijt, B. M., van den Bos, R. & Pijlman, F. T. A. (2001). A concept of welfare based on reward evaluating mechanisms in the brain: anticipatory behaviour as an indicator for the state of reward systems. *Applied Animal Behaviour Science*, 72(2), 145–171. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00204-5).
- Stachowicz, J. & Umstätter, C. (2020). Übersicht über kommerziell verfügbare digitale Systeme in der Nutztierhaltung. *Agroscope Transfer*, 294, 1-28. <https://doi.org/10.34776/at294g>.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021). Fleischkonsum in Deutschland pro Kopf bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36573/umfrage/pro-kopf-verbrauch-von-fleisch-in-deutschland-seit-2000/> [16.02.2022]
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022). Pressemitteilung Nr. N 043 vom 2. Juli 2021. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_N043_41.html [07.01.2022]
- Stukelj, M., Hajdinjak, M. & Pusnik, I. (2022). Stress-free measurement of body temperature of pigs by using thermal imaging – Useful fact or wishful thinking. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106656. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106656>.
- Sturm, B., Nasirahmadi, A., Müller, S. & Kulig, B. (2020). Smart Livestock Farming - Eine Bestandsaufnahme. *Züchtungskunde*, 92(6), 433–450.
- Sundrum, A., Andersson, R. & Postler, G. (1994). Tiergerechtheitsindex-200. TGI 200. Ein Leitfaden zur Beurteilung von Haltungssystemen, Kollen Verlag, Bonn.
- TierSchG (2021). Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 105 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist. <https://www.gesetze-im-internet.de/tierschg/BJNR012770972.html> [26.02.2022]
- TierSchNutztV (2006). Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung - TierSchNutztV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die zuletzt durch Artikel 1a der Verordnung vom 29. Januar 2021 (BGBl. I S. 146) geändert worden ist.
- Umweltbundesamt (2021). Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft mindern. Gute Fachliche Praxis. Hrsg.: Umweltbundesamt. Mithg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.
- U.S. EPA (2004). National Emission Inventory—Ammonia Emissions from Animal Husbandry Operations. Draft Report. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Vandermeulen, J., Bahr, C., Tullo, E., Fontana, I., Ott, S., Kashiha, M., Guarino, M., Moons, C. P. H., Tuytens, F. A. M., Niewold, T. A. & Berckmans, D. (2015). Discerning Pig Screams in Production Environments. *PLoS ONE*, 10(4): e0123111. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123111>.
- Veit, C., Traulsen, I., Hasler, M., Tölle, K.-H., Burfeind, O., grosse Beilage, E. & Krieter, J. (2016). Influence of raw material on the occurrence of tail-biting in undocked pigs. *Livestock Science*, 191, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.07.009>.
- Viazzi, S., Ismayilova, G., Oczak, M., Sonoda, L. T., Fels, M., Guarino, M., Vranken, E., Hartung, J., Bahr, C. & Berckmans, D. (2014). Image feature extraction for classification of aggressive interactions among pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 104, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.03.010>.

- Viscardi, A. V., Hunniford, M., Lawlis, P., Leach, M. & Turner, P. V. (2017). Development of a Piglet Grimace Scale to Evaluate Piglet Pain Using Facial Expressions Following Castration and Tail Docking: A Pilot Study. *Frontiers in Veterinary Science*, 4:51. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00051>.
- vom Brocke, A. L., Madey, D. P., Gauly, M., Schrader, L. & Dippel, S. (2015). Training veterinarians and agricultural advisers on a novel tool for tail biting prevention. *Veterinary Record Open*, 2:e000083. <https://doi.org/10.1136/vetreco-2014-000083>.
- von Borell, E. (2013): Indikatoren für Tierwohl bei Nutztieren. In: Kompetenznetzwerk Nutztierforschung (Hrsg.): Expertenworkshop Tierwohl in der Landwirtschaft. Haus Düsse, Bad Sassendorf.
- von Jasmund, N., Dahlhoff, K., van Asten, A., Scholz, T., Cielejewski, H., Austermann, F. & Büscher, W. (2019, September 24-26). Kurzzeit-Screening der Tieraktivität und des Stallklimas als Teilaspekt der Tierwohlbeurteilung im Projekt PigsAndMore [Conference session]. 14. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Bonn.
- von Jasmund, N., Wellnitz, A., Krommweh, M. S. & Büscher, W. (2020). Using Passive Infrared Detectors to Record Group Activity and Activity in Certain Focus Areas in Fattening Pigs. *Animals* 10(5), 792. <https://doi.org/10.3390/ani10050792>.
- von Jasmund, N., Schmithausen, A. J., Krommweh, M. S., Trimborn, M., Boeker, P. & Büscher, W. (2022). Assessment of ammonia sensors and photoacoustic measurement systems using a gas calibration unit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194, 106744. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106744>.
- Vullo, C., Barbieri, S., Catone, G., Graic, J.-M., Magaletti, M., Di Rosa, A., Motta, A., Tremolada, C., Canali, E. & Dalla Costa, E. (2020). Is the Piglet Grimace Scale (PGS) a Useful Welfare Indicator to Assess Pain after Cryptorchidectomy in Growing Pigs? *Animals*, 10(3), 412. <https://doi.org/10.3390/ani10030412>.
- Wathes, C. M., Kristensen, H. H., Aerts, J.-M. & Berckmans, D. (2008). Is precision livestock farming an engineer's daydream or nightmare, an animal's friend or foe, and a farmer's panacea or pitfall? *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.005>.
- Welfare Quality® (2009). Welfare Quality® Assessment Protocol for Pigs (2009). Welfare Quality® Consortium, Lelystad, Netherlands.
- Zhang, Z., Zhang, H. & Liu, T. (2019). Study on body temperature detection of pig based on infrared technology: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 1, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.02.002>.
- Zinpro (2022). Swine Lameness Prevention. Feet First® Swine Locomotion Scoring System. <https://www.zinpro.com/performance-solutions/production-optimization-tools/feet-first/> [16.03.2022]

2 Studie 1

Assessment of ammonia sensors and photoacoustic measurement systems using a gas calibration unit

**Naemi von Jasmund ^{a,*}, Alexander J. Schmithausen ^{a,b}, Manuel S. Krommweh ^{a,e},
Manfred Trimborn ^a, Peter Boeker ^{c,d}, Wolfgang Büscher ^a**

^a Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Nussallee 5, 53115 Bonn, Germany

^b Corteva Agriscience Germany GmbH, 81677 Munich, Germany

^c HyperChrom Deutschland GmbH, Eendenicher Allee 11-13, 53115 Bonn, Germany

^d IEL-Food Chemistry, University of Bonn, Friedrich-Hirzebruch-Allee 7, 53115 Bonn, Germany

^e Federal Office for Agriculture and Food, Deichmanns Aue 29, 53179 Bonn, Germany

* Corresponding author: jasmund@uni-bonn.de

Received 19 October 2021; Received in revised form 14 January 2022; Accepted 21 January 2022

Published in

Computers and Electronics in Agriculture 194 (2022) 106744

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106744>

Abstract

The accurate measurement of environmentally-relevant gases such as ammonia (NH_3) is increasingly important, especially in agricultural science. Accurate and continuous measurement of gases is essential for evaluating NH_3 and other gases as resource-based indicators of air quality in forced ventilation barns and for determining emission rates. To better assess measuring devices under different barn conditions (e.g. relative humidity or concentration range) self-conducted tests should be implemented at the laboratory scale before, during and after (experimental) measurements in the barn, independent of the manufacturer's specifications. Therefore, in this study, a gas calibration unit was set up for measurements at the laboratory scale. Moreover, measurement protocols were developed to investigate the accuracy at different gas concentrations and relative humidity levels and the responsiveness to rapid gas concentration changes. Measurements were performed with photoacoustic gas analysers (INNOVA 1412) and transmitters with electrochemical gas sensors (Polytron 8100 and C300). In addition to the presentation of results of the devices used in this case, this study should above all offer suggestions for quality monitoring to test sensors more intensively at the laboratory scale in order to be able to use them in a more targeted manner according to their optimal suitability.

Keywords: accuracy; response time; calibration; drift; electrochemical sensor; measurement technique

2.1 Introduction

Many agricultural sector studies focus on emissions. In recent years, the measurement and quantification of various trace gases, especially gases emitted by animals, have been studied (Gerrits et al., 2018). An important reason for this is certainly the fact that livestock production as part of agriculture plays a decisive role as a source of gaseous pollutants (Rzeźnik and Mielcarek, 2016). The emission of gases like carbon dioxide (CO_2), nitrous oxide (N_2O), methane (CH_4) and ammonia (NH_3) is often the focus of investigations. Especially NH_3 from forced ventilation (fattening) pig and poultry barns significantly impacts the environment. NH_3 directly affects water and soil through

eutrophication or acidification, impairs air quality and indirectly acts as a source of the climaterrelevant gas N_2O (Gerber et al., 2013; U.S. EPA, 2004b). Furthermore, NH_3 plays an important role in the formation of particulate matter through its interaction with atmospheric nitric and sulfuric acids with negative effects on human health (Hristov, 2011; U.S. EPA, 2004a). It's release in animal barns, the influence on animal welfare or the effects of feeding on NH_3 emissions has been investigated (Lengling et al., 2020; Liu et al., 2017; Li et al., 2015). In this context, the effectiveness of air scrubbers and biofilters (Van der Heyden et al., 2015) and the spread of such emissions under different conditions have also been examined.

A wide variety of possible measurement techniques and sensors are available. The evaluation of different emission reduction strategies requires very sensitive sensor systems with longterm stability to fulfil the testing rules of the VERA protocol (Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production, 2018a, 2018b).

But in the scientific community, there is a desire to measure and provide data on gas emissions in livestock buildings and housing systems in a uniform or more comparable way than in the past (Rzeźnik and Mielcarek, 2016) and sensors should be tested at the laboratory level before or directly after experiments to make studies and their used measurement technique comparable (Gerrits et al., 2018).

To fulfil these requirements, a gas calibration unit as testing station in the laboratory scale independent of calibration by manufacturer has been created. This allows the accuracy, response time, long-term stability, drift behaviour and cross sensitivities of different devices to be tested regularly.

The photoacoustic gas analyser INNOVA 1412 and the Polytron 8100 and C300 transmitters equipped with electrochemical gas sensors for measuring NH_3 were used for investigations on the gas calibration unit.

The Polytron 8100 and C300 transmitters have been used to measure NH_3 concentrations in barns or compartments for piglets (Hennig-Pauka et al., 2019), growing pigs (Sturm et al., 2021), fattening pigs (von Jasmund et al., 2020) as well as for measuring NH_3 concentration of pig manure (Parodi et al., 2021) and in laying hen houses (Maffia et al., 2021) so far. The INNOVA 1412 has been available for barn measurements longer than the Polytron transmitters. The photoacoustic gas analyser has been used to measure NH_3 and other gases in various animal species such as the measurement of the NH_3 concentration in broiler housing (Adler et al., 2021), laying

hen facilities (Rosa et al., 2021; Alberdi et al., 2016), fattening pig barns (Krommweh et al., 2021; Lengling et al., 2020; Hansen et al., 2014), mating and gestating sows (Kriz et al., 2021) and cattle (Place et al., 2011). A comparative study (at the laboratory level) of the two measuring devices is not yet known.

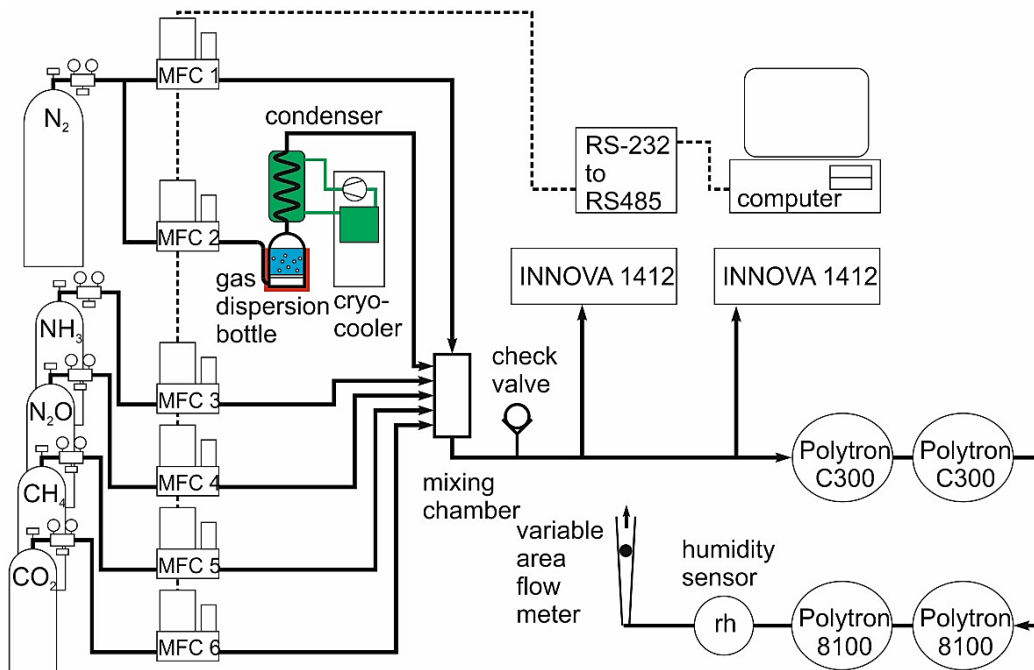
Hence the aims of this study were to

- design a gas calibration unit for precise dosage of gases and humidity to test and calibrate different gas analysers or sensors;
- validate two types of devices which use different analytical methods to measure NH_3 (photoacoustic and electrochemical) at a concentration range of 2.5–80 ppm NH_3 with four different relative humidities (20%, 40%, 60% and 80%) respectively and confirm the suitability of the devices for further experiments in a barn for finishing pigs.

2.2 Materials and methods

2.2.1 Measurement equipment and gas calibration unit

Fig. 2.1 shows the schematic structure (a) and an image (b) of the constructed gas calibration unit. The experimental setup of the measuring instruments was optimised and validated in preliminary examinations.



(a)



(b)

Figure 2.1 Schematic of the gas calibration unit (a) with four certified test gases and the dilution and humidification lines controlled by mass flow meters and controllers (MFC) and an image of the laboratory system setup (b) for the validation of different ammonia measuring devices. Scheme and image show an exemplary arrangement with overall six sensors: Two INNOVA 1412 (1), two Polytron C300 (2) and two Polytron 8100 (3). The MFCs (4), data logger (5) and cryocooler-condenser-combination (6) can also be observed.

Mass flow meters and controllers (MFC) (Brooks Instrument GmbH, Dresden, Germany) were regulated via a converter (VS Vision Systems GmbH, Norderstedt, Germany) with the help of a controlling software from the MFC manufacturer. Each of the six MFCs controls the flow of a specific gas and adjusts the concentration of the test gases in a flexible manner. In the following experimental setup, the concentrations of NH_3 , CO_2 , N_2O , CH_4 and nitrogen (N_2) as a carrier gas were controlled. The maximum possible flow rate for the NH_3 , N_2O and CH_4 MFCs was 30 ml min^{-1} , for the CO_2 MFC 300 ml min^{-1} and for N_2 3000 ml min^{-1} . For N_2 , two MFCs were connected to the N_2 cylinder. Because the humidity of the resulting test gas mixture should also be freely adjustable, not only one single dry dilution gas was used, but also a second dilution gas with a pre-defined humidity. So one MFC regulated the inflow of dry N_2

directly into the mixing chamber and a second MFC regulated the inflow of humidified N₂ via a gas dispersion bottle into the mixing chamber. The amount of humidity in the N₂ was controlled by cooling to a fixed dew point with a cryocooler-condenser-combination (LAUDA DR. R. WOBSE GMBH & Co. KG, Lauda-Königshofen, Germany) attached to the gas dispersion bottle. The temperature of the condenser was adjusted with a cooling system via liquid circulation. The ratio of the dry and humidified dilution gas was adjusted to regulate the overall humidity level of the gas mixture. The gas dispersion bottle could also be heated by a laboratory power supply (Votcraft®, Conrad Electronic AG, Wollerau, Switzerland) to increase the moisture saturation of the gas. The mixing chamber was stainless steel (70 mm length × 30 mm width × 30 mm height; material number 1.4301) and had eight inlets. Only six inlets for the gases and one outlet for the gas mixture were needed for the experiment, and the eighth inlet was closed with a sealing plug. The volume of the mixing chamber was approximately 180 cm³. A relief valve protected the connected sensors against overpressure if a controller failed and the pressure from the gas cylinder would pass through the system in an uncontrolled manner.

Up to two INNOVA 1412 were connected to the dosing line from the mixing chamber via T-fittings. Up to four transmitters with electrochemical sensors (Polytron 8100 and Polytron C300) were more or less directly placed in the gas flow using a Viton® adapter (Dräger, Lübeck, Germany). This arrangement of the devices within the gas mixture line was adapted to the sampling method. The measurement devices have fundamentally different sampling methods. The INNOVA devices actively aspirate sample air into the measuring chamber, whereas the Polytron transmitters must be purged with the gas flow for the target gas to diffuse into the measuring cell. At the end of the gas calibration unit, the gas mixture passed a humidity, temperature and atmospheric pressure measuring device (FHAD 46-C2, ALMEMO®, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany) and a variable area flowmeter (Cole-Parmer GmbH, Wertheim, Germany) to check the targeted humidity and the targeted total gas flow. All individual components were connected via Perfluoralkoxy (PFA) tubes.

A flow calculating programme was used to quantify all the required flows. In this programme, the user sets the total flow of the calibration gas mixture, the target relative humidity as a percentage and the gas concentrations in ppm_v.

The calculation programme must make a reverse calculation from the target concentrations of the individual gases and the adjusted degree of humidity of the mixture to the flow control values of the MFCs. Particularly important is the consideration of additional water content in the mixture on the concentration values of the individual gases.

The calculation is based on the thermodynamic properties of humid air. The basic equation (Eq. (1)) used is an empirical equation for the saturation pressure of water:

$$p_{sat} = 0.001 \times 10^{\left[8.3246 - \frac{1799.73}{T+238.734}\right]} \quad (1)$$

with saturation pressure of water p_{sat} in bar and air temperature T in °C.

The other relevant properties of humid air, such as moisture content x, dry air and humid air density can be derived from basic equations (Baehr, 1996).

The flow set points of the MFCs were calculated using a straightforward calculation scheme (Fig. 2.2).

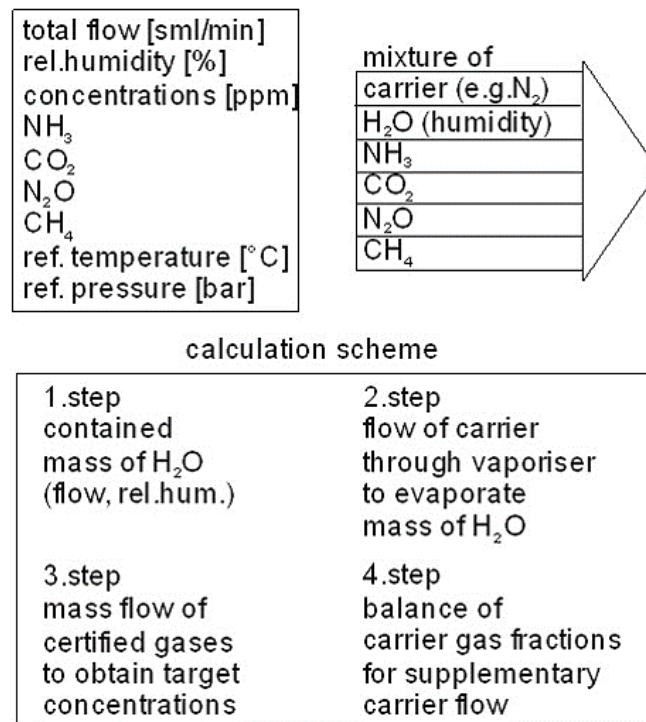


Figure 2.2 Scheme for the different calculation steps of the mass flows.

The user can select the total flow, humidity level of the mixture and target concentrations of the different gases. Careful consideration of the reference values is recommended. MFCs often use 0 °C as a reference. For the humidity level, the actual

laboratory or the reference temperature of 20 °C or 25 °C may be more useful (Hinshaw, 2013). If a humidity sensor is utilised in the measurement setup, the reference temperature of the sensor can be taken from the specifications.

The maximum flow is dependent on the N₂ MFCs, which have a maximum of 3000 ml min⁻¹ each. Thus, a maximum flow of 3000 ml min⁻¹ is possible at a targeted relative humidity of 0% or 100%; at a targeted humidity of 50%, a maximum flow of 6000 ml min⁻¹ is possible. Theoretically, with the current MFC setup, with total flows between 300 and 6000 ml min⁻¹, concentrations of 1.1–1000 ppm, 50–49700 ppm, 1–98 ppm and 1.1–1000 ppm for NH₃, CO₂, N₂O and CH₄, respectively, can be realised.

2.2.2 Gas analysers and sensors and the underlying measurement methods

2.2.2.1 INNOVA 1412

The INNOVA 1412 (LumaSense Technologies A/S, Ballerup, Denmark) is a photoacoustic gas analyser with a measurement technique based on photoacoustic spectroscopy. The pressure modulation by the absorption of light at wavelengths characteristic for the respective gas is outputted as an acoustic signal (Li et al., 2015; von Bobrutzki et al., 2010; Sigrist, 1994). As seen in Fig. 2.3, infrared light focused by an ellipsoidal mirror passes through an optical filter carousel and through a window into the closed measurement chamber, which serves as a photoacoustic measurement cell filled with the air or rather gas sample.

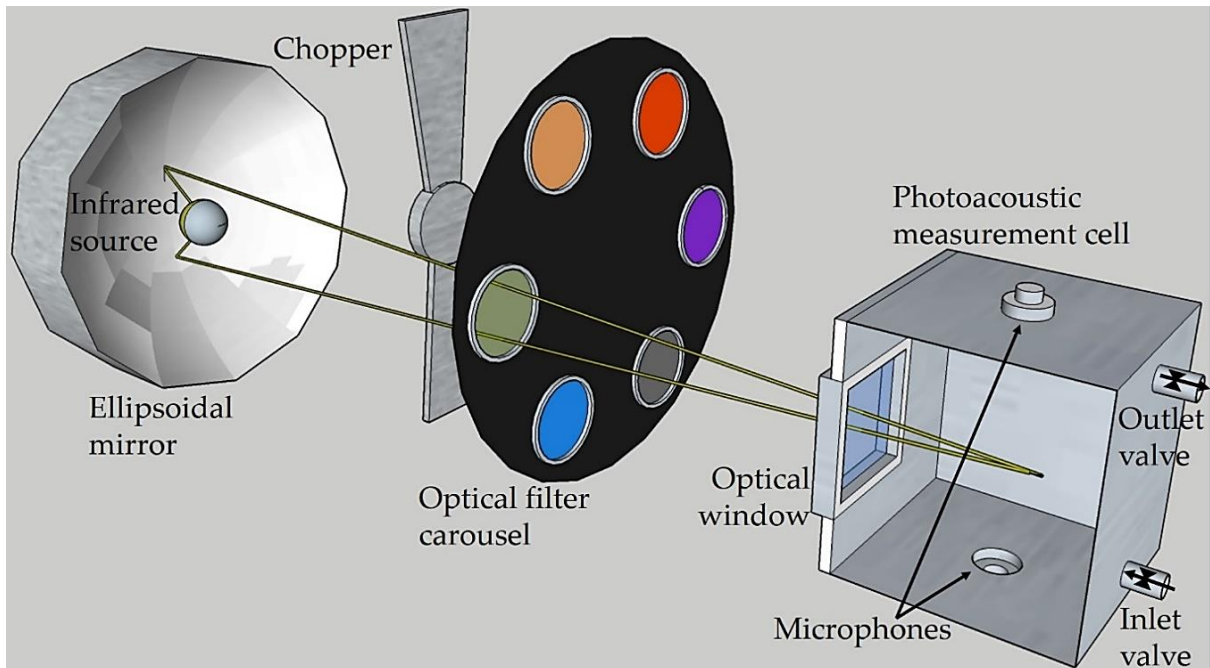


Figure 2.3 The implementation of photoacoustic spectroscopy in the INNOVA 1412. The optical filter carousel was equipped with filters for the measurement of carbon dioxide, nitrous oxide, methane, ammonia and water vapour. One of the six filters available was not in use. (Own representation modified according to LumaSense Technologies (LumaSense Technologies, 2017, 2018)).

The optical filters only transmit light with the wavelength that stimulates the respective target gas molecules to absorb light and change to a higher energy state (Campbell and Reece, 2009). Due to the energy absorption, the respective gas in the sample air or gas mixture heats up and expands and the pressure in the measurement chamber increases. By removing light, the target gas molecules fall back to a lower energy level and the pressure in the chamber decreases. The acoustic signals resulting from the alternating increase and decrease in pressure are recorded by microphones and transmitted as electrical output signals. Switching the light on and off, which leads to the desired periodic energy or rather temperature and pressure change, is realized by a chopper. With photoacoustic spectroscopy, the absorption itself is specifically measured and independent to its relation to the background. The absorption is proportional to the concentration, which means that the intensity of the measured acoustic signal is proportional to the concentration of the gas in the mixture (Harren et al., 2000). In the present study each of the two INNOVA 1412 Photoacoustic Gas Monitors (Height/Width/Depth: 175 mm/ 395 mm/ 300 mm; Weight: 9 kg) were

equipped with five optical filters for measuring NH₃, CO₂, N₂O, CH₄ and water vapour (WP) in the air sample (Table 2.1).

Table 2.1 INNOVA 1412. Applied optical filters and their specifications (Calibration Data and Gas Detection Limits (LumaSense Technologies, 2018)).

Filter for	Interference caused by CO ₂ and/or WP ^a	Centre Wavenumber	Operating Temperature	Relative Humidity	Detection limit ^b
NH ₃	-	1101 cm ⁻¹			0.2 ppm
CO ₂	sensitive to CO ₂	2270 cm ⁻¹	-20°C	0%	5.1 ppm
CH ₄	sensitive to WP	1254 cm ⁻¹	to	to	0.4 ppm
N ₂ O	sensitive to CO ₂	2215 cm ⁻¹	+70°C	95%	0.03 ppm
WP ¹	-	1985 ⁻¹			50 ppm

^aWater vapour; ^b at 20°C and 1 atm of pressure

The device actively draws in approximately 600 cm³ of the sample air for flushing the sampling tube and the measurement chamber and refills the measurement chamber for the subsequent sampling.

2.2.2.2 Dräger Polytron 8100 and Dräger Polytron C300

Four transmitters manufactured by Dräger were used in the present experiment including two Polytron 8100 and two Polytron C300 transmitters (Dräger, Lübeck, Germany). These devices use electrochemical gas sensors for measuring NH₃. The Polytron 8100 (Length/ Width/Height: 180 mm/ 150 mm/ 130 mm; Weight: depending on design approx. 2.2–4.0 kg) is equipped with a data logger, which was not used during the tests. The Polytron C300 (Width/Height/Depth: 75 mm/ 155 mm/ 75 mm; Weight: approx. 0.5 kg) has no integrated data storage medium as it is intended to be directly connected to a controller or climate computer, for example, in the barn.

In principle, electrochemical gas sensors consist of at least one working electrode (or indicator electrode) and one reference electrode that are in contact with an electrolyte in liquid or solid form in an electrochemical cell (Opekar and Stulík, ~ 2009). The amount of gas entering the sensor drives the intensity of the chemical reaction in the electrochemical cell, resulting in an electrical signal. The signal can be translated into an output value indicating the gas concentration. In 2016, Dräger introduced a new

sensor type containing four electrodes, claiming to differentiate by its long-term stability at constant exposure to NH_3 . Fig. 2.4 shows the main functional components of this electrochemical gas sensor.

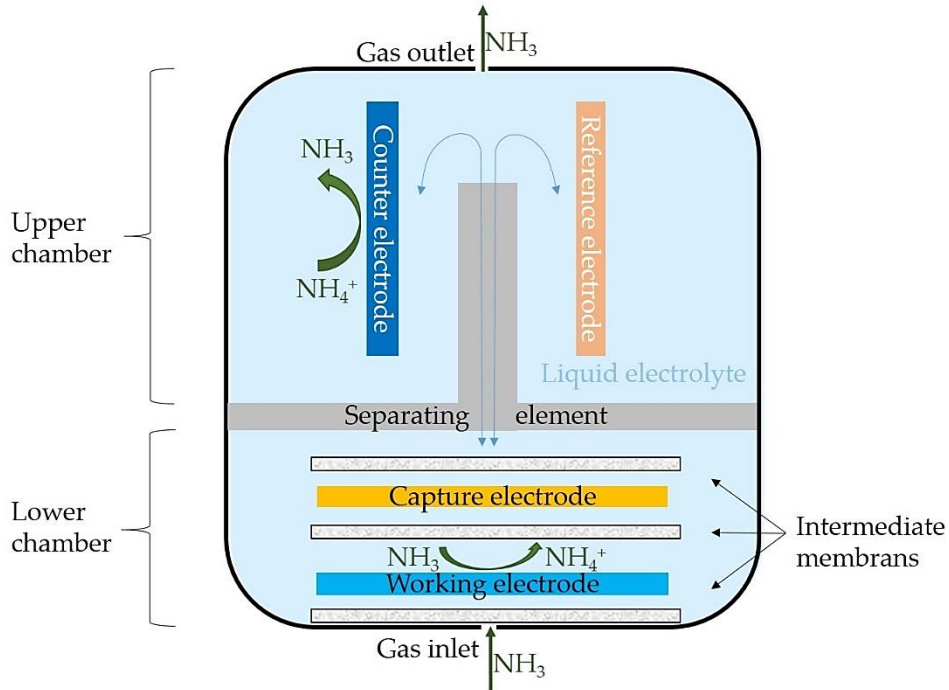


Figure 2.4 Schematic illustration of an electrochemical gas sensor implemented in the Polytron 8100 and Polytron C300.

The basic structure, which is typical for electrochemical sensors, consists of electrodes, a liquid electrolyte and a separating element. The separator divides the measuring cell into upper and lower chambers. Through the separating element, the electrolyte passes from the upper region, the electrolyte reservoir, into the lower region containing the working electrode. Thus, there is a fluid connection between the upper and lower chambers. The electrolyte is composed of a solvent, a conducting salt, an organic mediator and a buffer, which stabilises the pH of the electrolyte. At the gas inlet opening, ambient air diffuses through a membrane into the measurement cell. Additional intermediate membranes (see Fig. 2.4), all of them manufactured from fibreglass, are placed between the respective electrodes in the lower chamber and between the electrode and the separating element to protect the electrodes from damage and ensure the correct positioning in the sensor.

A potentiostat measures the voltage between the working and reference electrodes called the electrode potential. Depending on this measurement, the variable cell current is adjusted so that the electrode potential is always kept at a constant level. NH_3 concentrations can be determined based on changes in the cell current.

The oxidation that takes place when incoming NH_3 comes in contact with the working electrode, releases free electrons or rather ammonium ions. These migrate through the liquid electrolyte to the counter electrode in order to react there by reduction to NH_3 .

In case of this specific Dräger sensor type, an additional fourth electrode, the capture electrode, is designed to absorb excess NH_3 before it uncontrollably diffuses into the upper section of the sensor by the counter electrode. The NH_3 produced by the reduction at the counter electrode can be released through the gas outlet opening and the sensor can be protected from overpressure. The sensor is described in more detail in the patent (Nauber et al., 2017).

The Dräger four-electrode NH_3 sensor can be operated in the two above mentioned transmitters (among transmitters). The technical output and performance parameters slightly vary depending on the transmitter features. Table 2.2 summarises the most important differences in the measuring output of the same sensor type being operated in the Polytron 8100 or the Polytron C300.

Table 2.2 Technical data for Polytron 8100 and Polytron C300 with four electrode NH_3 sensor (Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2010; Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2016; Melse et al., 2016)

Division	Polytron 8100 (with DrägerSensor© NH_3 FL – 68 13 260)	Polytron C300 (with DrägerSensor© NH_3 AL – 68 13 735)
Detection range	0 to 100 (max – 300) ppm NH_3	0 to 100 ppm NH_3
Accuracy	$\leq \pm 1.5$ ppm or $\leq \pm 5\%$ of the measured value	1.5 ppm or $\pm 10\%$ of the measured value
Response time T50	25 s	≤ 30 s
Long-term drift	$< 10\%$ per year	$< \pm 10\%$ of the measured value/year
Temperature range	-40°C to $+65^\circ\text{C}$	0°C to $+50^\circ\text{C}$
Humidity	15% to 95% relative humidity, non-condensing	
Air pressure	Ambient (1 bar) $\pm 1\%$	700 hPa to 1300 hPa

2.2.3 Investigations on the gas calibration unit itself – reference gas measurement and validation

While the air pressure and flow, the air temperature and humidity of the sample air (see humidity measuring device Fig. 2.1 (a)) could be continuously recorded and controlled, none of the measuring devices used in the trials could be used as the gold standard and an absolute measuring accuracy could not be assumed. Therefore the NH₃ dosing accuracy of the unit was validated using a test gas cylinder with 99.8 ± 2 ppm NH₃ at a relative humidity of 0%. In alternation, for at least 20 min the devices (one INNOVA 1412, one Polytron 8100 and two Polytron C300) measured the concentration in the sample air once directly from the test gas cylinder and once from the gas calibration unit at the same target concentration or humidity settings (100 ppm at 0% relative humidity) with a desired gas flow rate of 2.0 L per minute. In addition, the concentration mentioned was also measured by the devices with 50% humidity coming from the gas calibration unit. In this paper evaluation and tests were restricted to NH₃ as the sensors in the Polytrons were designed solely for measuring this gas.

2.2.4 Investigations on the NH₃ measuring devices

In the present study, the gas calibration unit was used to test the available analysers and sensors with regard to their measuring accuracy in a range of 2.5–80 ppm NH₃ with four different relative humidities respectively. The target concentrations were chosen because they lie within the possible measuring ranges of both analyser types, without entering the borderline areas. A measurement programme was developed to test the responsiveness to rapid gas concentration changes (Table 2.3).

Table 2. 3 Measurement programme to test the responsiveness to rapid changes in gas concentration.

Trial day 1		Trial day 2	
Targeted relative humidity & corresponding dew point	Target concentration of ammonia	Targeted relative humidity & corresponding dew point	Target concentration of ammonia
<i>Ambient air for at least 60 minutes (not connected to the gas calibration unit)</i>		<i>Ambient air for at least 60 minutes (not connected to the gas calibration unit)</i>	
20% -3.6 °C	2.5 ppm	60% 12.0 °C	2.5 ppm
	80 ppm		80 ppm
	2.5 ppm		2.5 ppm
	50 ppm		50 ppm
	80 ppm		80 ppm
	50 ppm		50 ppm
40% 6.0 °C	2.5 ppm	80% 16.4 °C	2.5 ppm
	80 ppm		80 ppm
	2.5 ppm		2.5 ppm
	50 ppm		50 ppm
	80 ppm		80 ppm
	50 ppm		50 ppm
	2.5 ppm		2.5 ppm

For the evaluation, the results of three repeated measurement programmes were used. A warm-up period of 60 min was set at the beginning of each measurement interval, as the devices take different times to be ready for measurements after switching on. Each relative humidity/concentration combination was tested for 30 min.

A second measurement programme was developed to test the measurement accuracy of the devices more accurately, as shown in Table 2.4. Each relative humidity/concentration combination was tested for 30 min before the gas concentration was changed. For both test procedures, the desired total gas flow rate was 3.5 L per minute.

Table 2. 4 Measurement programme to test the measurement accuracy at increasing concentrations.

Trial day 1		Trial day 2	
Targeted relative humidity & corresponding dew point	Target concentration of ammonia	Targeted relative humidity & corresponding dew point	Target concentration of ammonia
<i>Ambient air for at least 60 minutes (not connected to the gas calibration unit)</i>		<i>Ambient air for at least 60 minutes (not connected to the gas calibration unit)</i>	
20% -3.6 °C	2.5 ppm	60% 12.0 °C	2.5 ppm
	5 ppm		5 ppm
	10 ppm		10 ppm
	20 ppm		20 ppm
	30 ppm		30 ppm
	50 ppm		50 ppm
40% 6.0 °C	80 ppm	80% 16.4 °C	80 ppm
	2.5 ppm		2.5 ppm
	5 ppm		5 ppm
	10 ppm		10 ppm
	20 ppm		20 ppm
	30 ppm		30 ppm
	50 ppm		50 ppm
	80 ppm		80 ppm

2.2.5 Processing of data and statistical methods

The INNOVA 1412 measured continuously, and the display readings were updated approximately every minute. The analysers were connected to a computer and the data were stored using the LumaSense software.

The Polytron 8100 and C300 were connected to the ALMEMO® (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany), which acted as a data logger. The readings were stored every 10 s and could be exported to the computer. The 10-s values were averaged to obtain the values per minute for calculations and comparisons of the transmitters, as was the case with INNOVA.

SPSS Statistics 25 (IBM, New York, USA, 2017) was used to compare the data. Since the data were not normally distributed (checked by Kolmogorow-Smirnov test), nonparametric tests (Mann-Whithney-U and Kruskal-Wallis test) were used to check for significant differences ($p < 0.05$).

2.3 Results

2.3.1 Validation of the dosing accuracy of the gas calibration unit

Fig. 2.5 shows the data for each series in which four of six devices were alternately supplied with gas from the NH₃ test gas cylinder and from the gas calibration unit to validate the dosing accuracy of the unit (Section 2.2.3).

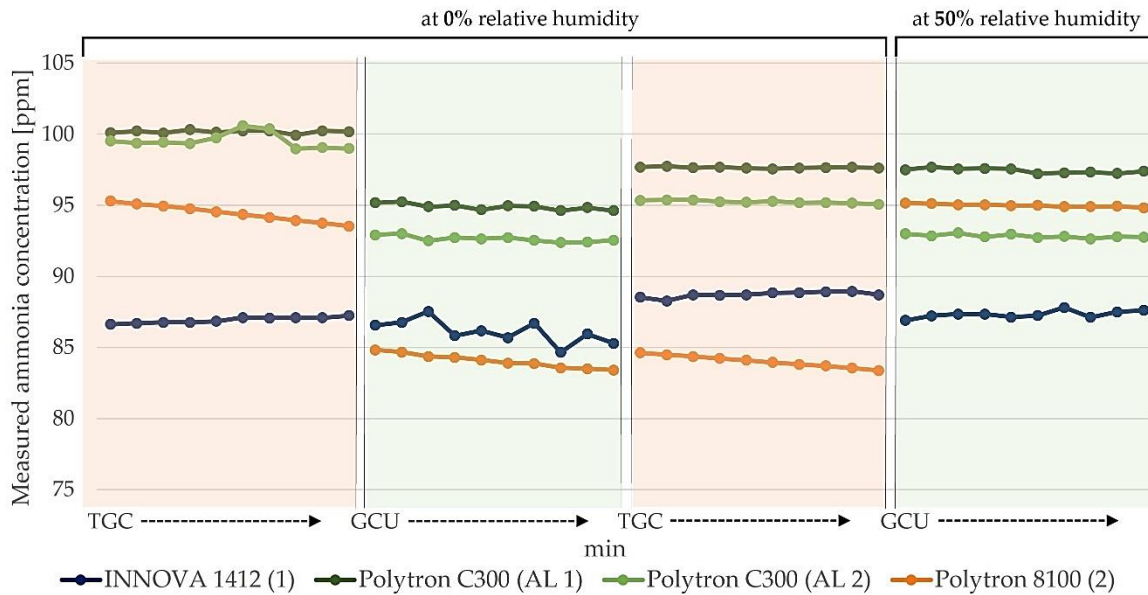


Figure 2.5 NH₃ concentrations while switching between test gas cylinder (TGC) and the gas calibration unit (GCU). The values for at last 10 min of each test phase are shown.

Only the last 10 min of each test phase were analysed. This ensured that the data while switching from one source to another did not enter the rating and distort the results. The aim of this study subsection was not to assess the measuring accuracy of the analysers and sensors but to evaluate the measured values, irrespective of their accuracy, relative to the target concentration or between the gas cylinder and the unit. Basically, a method was developed to compare the test gas and the unit with sensors regardless of their accuracy and without the need for a gold standard sensor. The measured relative humidity was $1.1\% \pm 0.1\%$ for the test gas cylinder and $1.0\% \pm 0.0\%$ for dry air and $51.1\% \pm 0.0\%$ for humid air for the gas calibration unit, which corresponded with the target values.

To assess the dosing accuracy of the unit via the obtained data, the respective range of possible amounts of NH₃ actually delivered needed to be calculated. On one hand

this range depended on the measurement uncertainty of the gas cylinders; on the other hand, in case of the gas calibration unit, the accuracy of the MFCs had to be calculated.

The measurement uncertainty of the NH₃ test gas cylinder was specified as 99.8 ± 2 Mol-ppm. Consequently, the range for the actual delivered amount was between 97.8 and 101.8 ppm.

The measurement uncertainty of the NH₃ gas cylinder in the gas calibration unit was specified as 10,090 ± 200 Mol-ppm. Thus, the range for the actual delivered gas was between 9890 and 10,290 ppm, which influenced the mixing ratio with N₂ (99.999% with maximum residual amounts of H₂O < 2.0 Mol-ppm, O₂ < 2.0 Mol-ppm and hydrocarbons < 0.2 Mol-ppm). The accuracy of the MFCs was specified as ± 0.2% of the full scale (30 ml min⁻¹ for the NH₃-MFC and 3000 ml min⁻¹ for each N₂- MFC) and ± 0.7% of the adjusted rate. If 100 ppm target concentration at 0% relative humidity was targeted, the accuracy of the NH₃-MFC and one N₂-MFC was considered. If 100 ppm was dosed with 50% humidity, the accuracy of the second N₂-MFC was also taken into account. The calculated range for both concentration/humidity combinations was between 95.7 and 104.3 ppm. These limits relative to the respective measured values of the sensors indicate the extent that the analysers and sensors deviate from the actual amount of gas emitted. These deviations, shown in Table 2.5, should not differ much between the test gas cylinder (TGC) and the gas calibration unit (GCU).

Table 2.5 Comparison of the measured mean values of NH₃ between the test gas cylinder (TGC) and the gas calibration unit (GCU).

Sensor	Source (TGC) (GCU)	Targeted relative humidity [%]	Potential range (Min–Max) for emitting ammonia [ppm]	Mean value measured by sensors ± SD [ppm]	Deviation mean value from Min [%]	Deviation mean value from Max [%]
INNOVA 1412 (1)	TGC	0	97.8–101.8	87.8 ± 0.9	10.2	13.7
	GCU	0	95.7–104.3	86.1 ± 0.8	10.0	17.4
		50		87.3 ± 0.3	8.8	16.3
Polytron C300 (AL1)	TGC	0	97.8–101.8	98.9 ± 1.3	-1.1*	2.8
	GCU	0	95.7–104.3	94.9 ± 0.2	0.8	9.0
		50		97.4 ± 0.2	-1.8*	6.6
Polytron C300 (AL2)	TGC	0	97.8–101.8	97.4 ± 2.2	0.4	4.3
	GCU	0	95.7–104.3	92.6 ± 0.2	3.2	11.2
		50		92.8 ± 0.1	3.0	11.0
Polytron 8100 (2)	TGC	0	97.8 – 101.8	89.2 ± 5.4	8.8	12.4
	GCU	0	95.7 – 104.3	84.1 ± 0.5	12.2	19.4
		50		95.0 ± 0.1	0.7	8.9

* Target value was overestimated

2.3.2 Ammonia measuring devices – responsiveness to rapid concentration changes

The data from all six devices were used to evaluate responsiveness. After 15 min a constant value was achieved for all analysers and sensors. Therefore, for every 30-min interval, the last 15 min (last 15 data points) were summed up to a mean final value. The T_{90} values, indicating the response time for the sensor to reach 90% of the concentration change, were determined based on this calculated mean final value (see Fig. 2.6). The time was counted from the minute the measurement reached 90% and at least two subsequent measurements stayed or rather exceeded (increase in concentration) or undershot (decrease in concentration) that value.

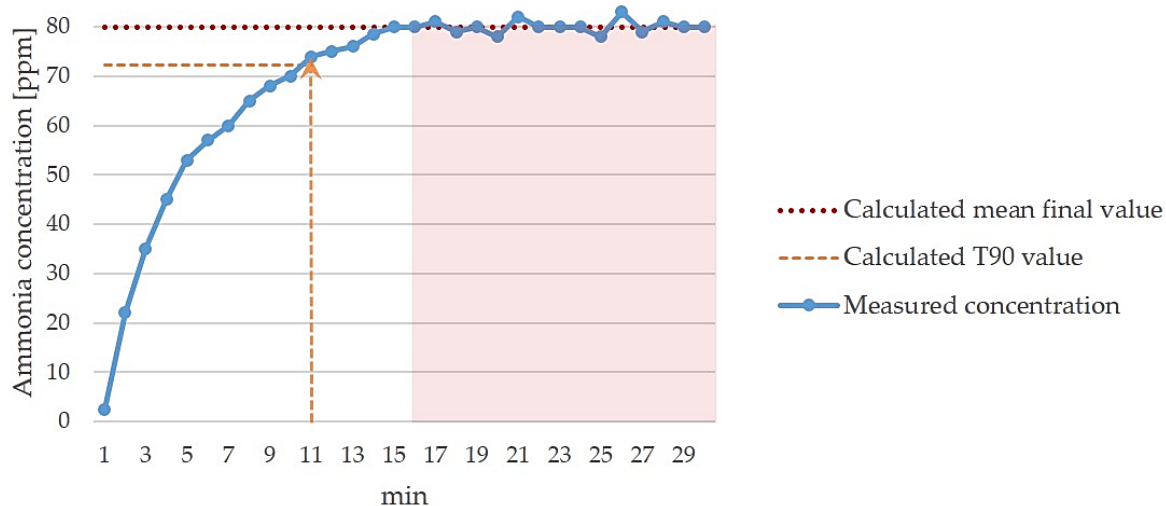


Figure 2.6 Exemplary measurement process over a 30-minute interval. After 15 minutes a constant value was achieved. The mean final value was calculated using the last 15 data points. In this fictitious case, the T_{90} value was reached at minute 11.

T_{90} values were significantly different between the LumaSense ($n = 2$) and Dräger ($n = 4$) sensors ($p < 0.05$). The Dräger sensors reacted on average with $1.5 \text{ min} \pm 0.8$ twice as fast as the LumaSense Multi-Gas Measurement Systems (MGMS) with $3.0 \text{ min} \pm 1.1$ to concentration changes. No significant differences between the individual INNOVA 1412 were detected. However, significant differences between the Dräger sensors were detected. The Polytron 8100 (1) responded significantly ($p < 0.05$) slower than the other Polytron transmitters.

Fig. 2.7 shows that the response time was obviously longer for extreme target concentration changes (2.5 ppm → 80 ppm; 2.5 ppm → 50 ppm) compared with response time for smaller changes. In addition, the LumaSense MGMS tended to respond slower to extreme changes from low to high target concentrations (2.5 ppm → 80 ppm or 2.5 ppm → 50 ppm) than from high to low concentrations (80 ppm → 2.5 ppm or 50 ppm → 2.5 ppm).

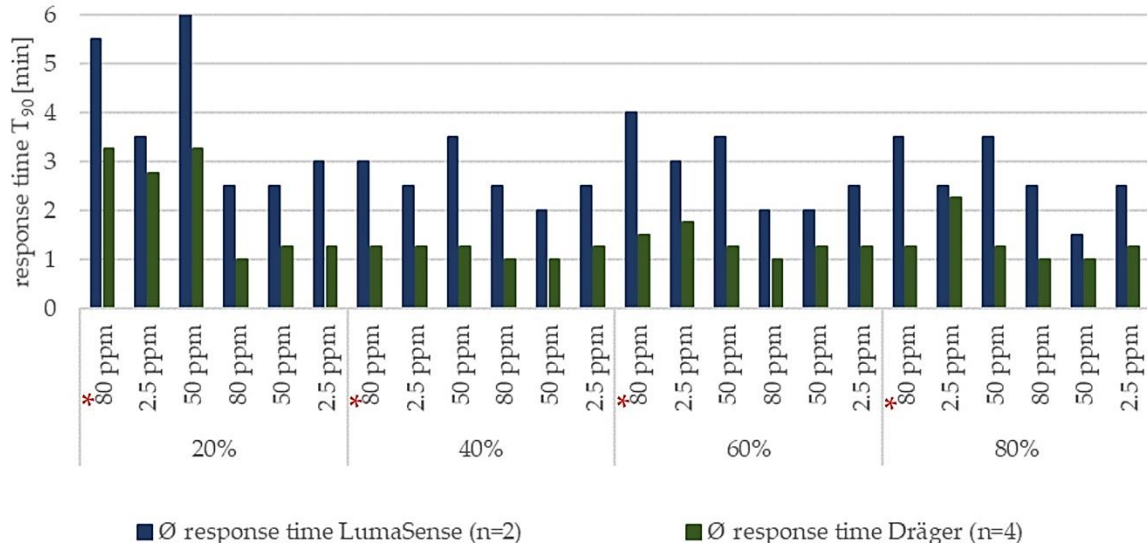


Figure 2.7 Average response time, T_{90} , for the LumaSense Multi-Gas Measurement Systems and Dräger sensors at different relative target air humidities (%) and target concentrations (ppm). * Target concentration after starting at 2.5 ppm, see also measurement programme Table 2.3.

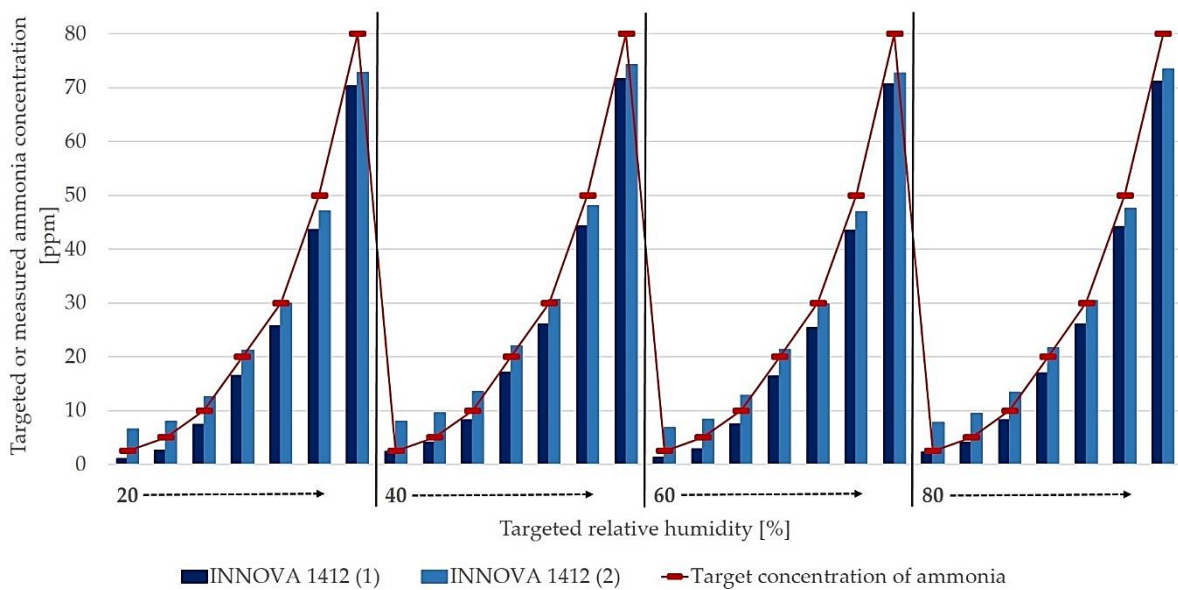
As seen in Fig. 2.7, the response time of the LumaSense MGMS tended to change depending on the relative humidity and that in dry air (20%) it took longer to reach the final value in concentration; however, differences in reaction time depending on the relative humidity were not significant.

For the Dräger sensors, a significant difference in the reaction time could be detected between dry air (20%) and other target humidities. However, only one measurement run of the measurement program was available for the evaluation of the response time. Therefore, the results could not be examined more extensively.

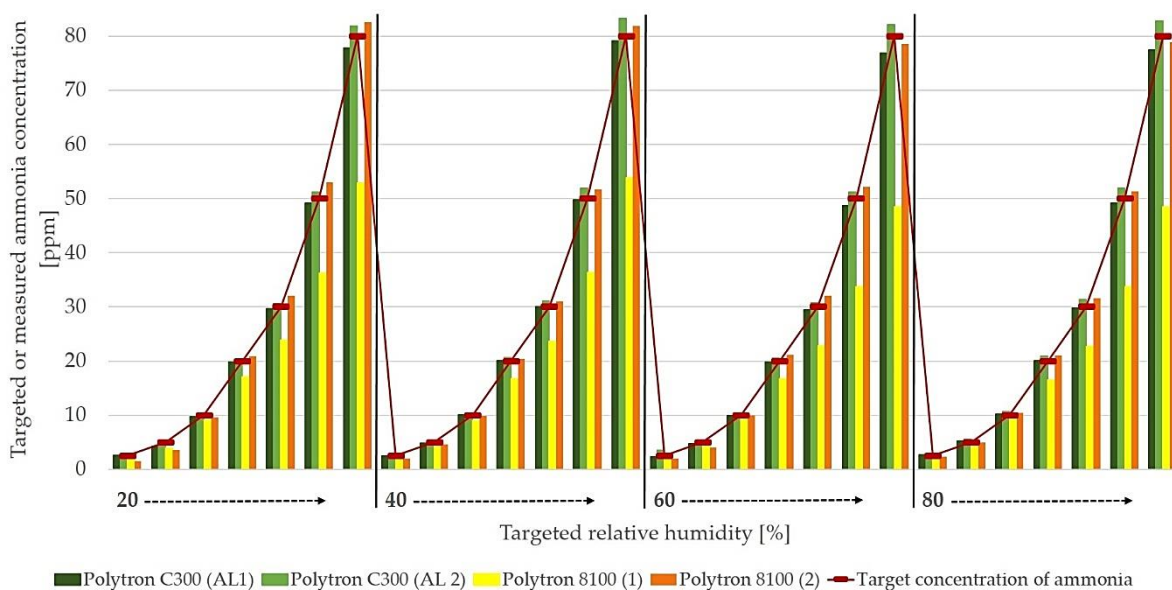
2.3.3 Ammonia measuring devices – accuracy at increasing concentrations

The following results refer exclusively to the measurements using the underlying measurement programme (see Table 2.4) to test the individual measurement accuracy of the six devices as a function of relative humidity. For every 30-min interval, the last 15 min were summed up to a mean final value (see Fig. 2.6).

For all six devices no significant differences in measuring accuracy as a function of the relative humidity were detected. However, deviations as a function of the measuring range and the set relative humidity tended to differ, as shown in Fig. 2.8.



(a)



(b)

Figure 2.8 Comparison of NH₃ target concentration with the actual measured values with the photoacoustic gas analysers (a) and electrochemical gas sensors (b).

Deviation from the respective target concentrations for the INNOVA 1412 devices (the INNOVA 1412 (1) was recently calibrated while the other INNOVA 1412 device (2) had not been calibrated for more than 1 year at the time of measurement) were not comparable. The INNOVA 1412 (1) continuously underestimated the target concentrations, whereas the INNOVA 1412 (2) overestimated the target concentrations up to about 30 ppm and underestimated the target concentrations between 50 ppm and 80 ppm. Both devices did not comply with the manufacturer's close range drift of $\pm 2.5\%$ of the measured value per 3 months.

The target concentrations of 2.5, 5 and 10 ppm were underestimated by the INNOVA 1412 (1) at 20% and 60% relative humidity ($39.6\% \pm 12.3$) to a greater extent than the target concentration estimations at 40% and 80% ($14.1\% \pm 5.9$). The remaining target concentrations of 20, 30, 50 and 80 ppm were underestimated by an average of $13.3\% \pm 1.1$, regardless of the humidity setting. In contrast the INNOVA 1412 (2) overestimated the target concentrations of 2.5, 5, 10 and 20 ppm partly very clear ($194.0\% \pm 28.0$, $77.7\% \pm 15.1$, $31.2\% \pm 4.7$ and $8.1\% \pm 1.9$, respectively). The INNOVA 1412 (2) measured the target concentration of 30 ppm relatively accurately ($0.8\% \pm 1.3$) but underestimated the target concentrations

of 50 and 80 ppm ($5.2\% \pm 1.0$ and $8.3\% \pm 0.9$, respectively). Although no significant differences in measurement accuracy depending on the relative humidity were detected with this analyser either, the tendency could be seen that – as opposed to the INNOVA 1412 (1) – at a humidity of 40% and 80% the deviations from the target concentrations of 2.5, 5, 10 and 20 ppm are higher than at a target humidity of 20% or 60%. In addition, the measurement deviations were higher or lower than what could be explained by the measurement uncertainty of the gas cylinders and MFCs alone.

The Polytron transmitters showed slight deviations at low target concentrations and slighter deviations at high target concentrations, compared to the INNOVA 1412 devices (Fig. 2.8). Similar to the INNOVA devices, the measurement deviations could not be directly explained by the measurement uncertainty of the gas cylinder and MFCs, since the target values were partly underestimated or overestimated in the same measurement series by the sensors.

The measurement behaviour of Polytron 8100 (1) was striking. The deviations were larger than the deviation of the other Polytron transmitters. The Polytron 8100 (1) underestimated the target concentrations on average by $18.8\% \pm 11.9$. Unlike the other Dräger sensors, the deviations were outside the accuracy stated by the manufacturer (see Table 2.2). As shown in Fig. 2.8 (b), the Polytron 8100 (1) initially deviated from the target concentration of 2.5–10 ppm by only 8.8% on average. However, extreme deviations of up to 36.4% were observed at target concentrations of 20 ppm or higher. In addition, the Polytron 8100 (1) tended to underestimate target concentrations between measurement repetitions by an ever greater extent. However, no significant differences between the repeated measurements were detected.

The Polytron C300 (AL1) only deviated slightly from the target concentrations and underestimated concentrations on average by $1.5\% \pm 3.5$. The Polytron C300 (AL2) overestimated the target concentrations by an average of $5.6\% \pm 8.7$. With a deviation of 20.2%, however, the latter overestimated the target concentration in the low range of 2.5 ppm substantially more than in the case of all other target concentrations with only 3.2% on average. The fourth Dräger sensor, the Polytron 8100 (2), underestimated the target concentrations by an average of $3.0\% \pm 11.7$. The high standard deviation (SD) could be explained by the initial underestimation of target concentrations of 2.5 and 5 ppm and overestimation of target concentrations ≥ 20 ppm (average deviation from target concentrations were 17.4% and 3.6%, respectively).

The sensor measured the target concentration of 10 ppm very accurately with a low deviation of only 0.4%.

No significant differences between the repeated measurements and the different relative humidities for both INNOVA and all four Polytrons were detected. So the measured values per concentration are summarised in Table 2.6.

Table 2.6 Analysis of different target gas concentrations using various ammonia analysers and sensors.

Target concentration of ammonia	INNOVA 1412 (1)	INNOVA 1412 (2)	Polytron C300 (AL 1)	Polytron C300 (AL 2)	Polytron 8100 (1)	Polytron 8100 (2)
	Mean value [ppm] ± SD					
2.5 ppm	1.8 ± 0.6	7.4 ± 0.7	2.5 ± 0.8	3.0 ± 0.6	2.3 ± 0.5	2.0 ± 0.5
5 ppm	3.4 ± 0.8	8.9 ± 0.8	4.8 ± 0.5	5.1 ± 0.6	4.5 ± 0.6	4.3 ± 0.8
10 ppm	7.9 ± 0.5	13.1 ± 0.5	10.0 ± 0.3	10.4 ± 0.4	9.2 ± 0.7	10.0 ± 0.4
20 ppm	16.8 ± 0.4	21.6 ± 0.5	19.9 ± 0.4	20.6 ± 0.4	16.8 ± 2.1	20.9 ± 0.4
30 ppm	25.9 ± 0.5	30.2 ± 0.6	29.8 ± 0.8	31.0 ± 0.5	23.3 ± 3.5	31.6 ± 0.7
50 ppm	44.0 ± 0.6	47.4 ± 0.7	49.2 ± 1.7	51.6 ± 0.9	35.0 ± 6.4	52.0 ± 1.3
80 ppm	71.0 ± 0.9	73.3 ± 1.2	77.8 ± 3.5	82.5 ± 1.6	50.9 ± 10.5	80.5 ± 3.2

2.4 Discussion

As far as the authors are aware, no comparative study between the INNOVA 1412 and the Polytron 8100 or C300 transmitters has been conducted. However, comparative investigations between the INNOVA 1412 and a single-gas photoacoustic analyser Chillgard RT (Li et al., 2015), gas chromatography (Schmithausen et al., 2016; Nicoloso et al., 2013), the Thermo Scientific Model 55C CH₄ analyser (Liu and Powers, 2014) and infrared spectroscopic analysis and mathematical simulation (Zhao et al., 2012) have been conducted. Based on these comparative studies, at the laboratory level and through investigations in practice, important characteristics and problematic properties were identified for the INNOVA 1412. For example, non-target gases can lead to an overestimation of target gas concentrations due to non-compensated interferences (Hassouna et al., 2013) or rather the internal cross compensation cannot offset the interferences between non-targeted and targeted gases (Zhao et al., 2012). If, on the other hand, the crosscompensation or correction

of interferences is based on an overestimated concentration, the so called cascade effect may lead to an underestimation (Hassouna et al., 2013).

The following actions contribute to the correct measurement of target gases when using the INNOVA 1412: 1) knowledge of the composition of the gas mixture to be sampled, i.e. the targeted and nontargeted gases; 2) the correct choice of optical filters for the corresponding targeted gas and 3) coordination of the optical filters for the targeted gases with each other (Zhao et al., 2012; Hassouna et al., 2013). A gas calibration unit, as described in the present study, can be used to investigate such actions before starting an investigation without the need of a reference measurement device.

The comparative results in the context of the present study between the different measurement types and between the individual measurement devices are discussed below.

2.4.1 Validation of the dosing accuracy of the gas calibration unit

As shown in Fig. 2.5, the measured values varied between the devices and also between the gas sources (TGC or GCU). However, the measured concentrations in the first phase with TGC did not exactly match those of the second TGC phase. When comparing the GCU phases with and without relative humidity, the concentration values measured by the Polytron C300 (AL1) differed slightly, those of the Polytron 8100 (2) differed substantially from each other. Permanent gassing with dry air might be responsible for the shift in measurement results for the Polytron 8100 (2).

Comparing the deviations between TGC- and GCU-phases at 0% relative humidity for each device including the respective SDs (Table 2.5) revealed very little differences. This result confirms the reliability of the gas calibration unit in the exact dosage of the targeted NH_3 concentration in the gas mixture for 100 ppm. It is therefore assumed that the dosing of other concentrations of NH_3 in the sample mixture should also correspond to the respective envisaged target concentration. A review of this assumption in the framework of further investigations with test gas cylinders with different NH_3 concentrations was disregarded, as the linearity of the GCU was also verified for the gases CH_4 and CO_2 with different test gases and gas chromatographic measurements (not shown) and therefore omitted for NH_3 . Precise statements about the influence of relative humidity on the measuring accuracy of the analysers and

sensors cannot be made at this point due to the limited data. In addition, a relative humidity of 0% is outside the specified measuring range of the Dräger sensors (Table 2.2). In general, the method can verify the dosing accuracy of the gas calibration unit using a test gas cylinder and the results of various sensors (without considering the exact measuring accuracy), if no sensor is available as a gold standard.

2.4.2 Ammonia measuring devices – responsiveness to rapid concentration changes

During the tests at the gas calibration unit, several individual properties of the devices were determined. A study by Li et al. (2015) showed a similar response time of 180 s for the INNOVA 1412 to reach > 95% of the expected value when changing the concentration of NH₃. In addition, a significant, positive influence of the water vapour level leading to a decrease of the response time could be detected (Li et al., 2015), which was only detected as a tendency in the present study.

The results of the measurement of responsiveness to rapid gas concentration changes (Fig. 2.7) are an important basis for correctly using the devices according to their response behaviour. The results of this measurement can be used to verify the general suitability of a sensor for the desired measurement, correctly use a device according to the measurement method, and determine the appropriate measuring intervals. For example, if various gas concentrations need to be measured using an INNOVA 1412 Photoacoustic Gas Monitor and a Multipoint Sampler is used for different measuring points, the Multipoint Sampler should not be set in a way that for each measurement point the gas concentration is measured continuously or rather every minute. Instead, the same measuring point should be sampled for several consecutive minutes (depending on the previously determined response behaviour and expected concentration differences) before changing to the next measuring point. Conclusions about the correct handling of data can also be drawn based on the present results. Data selected for further analysis should be selected only when the value is constant. This point in time has to be identified to select reliable data for further analysis.

2.4.3 Ammonia measuring devices – accuracy at increasing concentrations

Initial conclusions about device accuracy, but not long-term stability, can be made based on the results of this study. The results (Fig. 2.8 and Table 2.6) clearly show that both the measuring methods (photoacoustic or electrochemical) and individual devices using the same measuring technique can differ. Although no significant differences in the influence of relative humidity on measurement accuracy were detected, tendencies were identified, which differ between the analysers and sensors. However, significant influences of humidity on the accuracy of the INNOVA 1412 on CO₂ (Nicoloso et al., 2013), CH₄ (Liu and Powers, 2014; Nicoloso et al., 2013) and N₂O (Nicoloso et al., 2013) concentrations were found in other studies. Since all sensors are checked by default before delivery, the extreme measurement deviation of the Polytron 8100 (1) can probably be explained by damage during transport. As the deviations of the Polytron 8100 (1) were small at concentrations of 10 ppm or lower, the defect was only obvious through measurements at higher concentrations at the gas calibration unit and the sensor was excluded from further experiments in the barn as a consequence.

2.5 Conclusion/Outlook

Overall, several conclusions can be drawn from the results of this comparative investigation of the new electrochemical NH₃ sensor from Dräger and the photoacoustic devices from LumaSense. In general, both types of measuring devices are suitable for the measurement of NH₃ in animal houses due to their sensitivity, response time and handling. General advantages which are attributed to electrochemical sensors (Xiong and Compton, 2014) are the following: A good cost-benefit ratio in terms of sensitivity, a compact and, therefore, easily transportable size and low energy consumption to operate the sensor. INNOVA 1412 is less easy to transport and cost-intensive; however, up to five different gases and humidity can be simultaneously detected. Moreover, when combined with a multiplexer, several measuring points can be simultaneously sampled with one analyser. Unlike the INNOVA 1412, the Polytron transmitters, especially the Polytron C300, can be easily installed in an animal barn due to its compact design and low weight. In addition, the Polytron transmitters can be connected to a climate computer to control the barn

climate and ventilation management while accounting for NH₃ concentrations, according to the manufacturer. Thus, the Polytron transmitters can influence the health status of the animals (Hennig-Pauka et al., 2019). The INNOVA 1412, on the other hand, is not technically designed to connect to a climate computer or the corresponding software. Further information on selectivity, drift behaviour, long-term stability and sensor lifespan should be available after a measurement period of several months in the barn and subsequent laboratory measurements using the gas calibration unit.

The analysers and sensors should be checked regularly before and after each measurement. If the experimental set-up and execution allow, the devices should be tested at least once between or during continuous measurements that run over several months. How often measuring devices should be tested within a measurement in an animal barn, for example, cannot be determined exactly. The testing frequency depends on various factors. On the one hand, specific information from the manufacturer on drift behaviour must be taken into account. On the other hand, one's own measuring experience at laboratory level is decisive with regard to the drift behaviour and/or the reaction speed, since every device drifts differently. In addition, regular measurements at the laboratory level must be integrated into the actual test design.

The data obtained by the gas calibration unit should allow several conclusions. Sensors measuring incorrectly or inaccurately calibrated can be replaced even before they are used for measurements. Differences in measurement accuracy, cross sensitivities, responsiveness to rapid changes in concentrations or the exclusive suitability for specific concentration ranges, as the case may be, can be accurately recorded and the appropriate sensors can be selected for the requested experiment. Furthermore, the long-term stability of sensors can be determined and the experiments or corresponding calibration intervals can be adjusted accordingly. These steps should be part of quality assurance for future measurements. As already requested (Gerrits et al., 2018), the data obtained before and after a measurement period could be published in the materials and methods section of manuscripts to improve the data transparency and comparability with other studies.

The following potential improvements can be made in the gas calibration unit and general measurement programme to check the accuracy of measuring devices:

- Construct a mobile unit to test and calibrate devices in the barn during long-term measurements.
- Adjust the maximum flow range of the MFC to the desired test concentrations of individual gases. In some cases, only a low volume flow or rather a small valve opening on the MFC was necessary to achieve low test concentrations with high dilutions of the test gases from the test cylinders with N₂. In the future, these dosage limits (both the minimum or maximum ranges) should not be exhausted as far as possible.
- Different gas mixtures can already be produced and tested for cross sensitivities in the measuring accuracy of the sensors. However, an evaporator for the inclusion of alcohols or various organic substances would be advantageous.
- Changes from one relative humidity level to the next should not start directly with the next (lowest) target concentration, but at 0 ppm to avoid carryovers and prevent negative effects on the measurement accuracy of the sensors.

The general objectives of this study were to build a gas calibration unit for precise gas dosages and humidity, to test and calibrate different gas analysers and sensors, and determine criteria and benchmarks for calibrating and performance testing of gas analysers and sensors. These objectives were achieved. In addition, two different types of devices that use different NH₃ detection methods were assessed under laboratory conditions to confirm their suitability for further experiments in a barn for finishing pigs. The results of the present study demonstrate the outstanding importance of testing measuring devices with the GCU compared to simple tests with test gases. The latter are often anhydrous and can lead to problems because they often do not comply with the device specifications, cross-sensitivities cannot be measured, and testing over a wide range of concentrations is not feasible.

Funding

The study as part of a project was financially supported by the German Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) based on a decision of the Parliament of the Federal Republic of Germany, granted by the Federal Office for Agriculture and Food (BLE; grant number: 2817902615). The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

CRedit authorship contribution statement

Naemi von Jasmund: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing – original draft, Visualization. **Alexander J. Schmithausen:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing. **Manuel S. Krommweh:** Writing – review & editing. **Manfred Trimborn:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Visualization, Writing – review & editing. **Peter Boeker:** Conceptualization, Software, Formal analysis, Investigation, Resources, Visualization, Writing – review & editing, Writing – original draft. **Wolfgang Büscher:** Resources, Writing – review & editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors acknowledge and like to thank the staff of the scientific workshop of the Institute of Agricultural Engineering (Agricultural Faculty of the Rheinische Friedrich-Wilhelms-University Bonn) for their great technical support.

2.6 References

- Adler, C., Schmithausen, A.J., Trimborn, M., Heitmann, S., Spindler, B., Tiemann, I., Kemper, N., Büscher, W., 2021. Effects of a Partially Perforated Flooring System on Ammonia Emissions in Broiler Housing-Conflict of Objectives between Animal Welfare and Environment? *Animals* 11, 707. <https://doi.org/10.3390/ani11030707>.
- Alberdi, O., Arriaga, H., Calvet, S., Estellés, F., Merino, P., 2016. Ammonia and greenhouse gas emissions from an enriched cage laying hen facility. *Biosyst. Eng.* 144, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.009>.
- Baehr, H.D., 1996. *Thermodynamik: Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen (Neunte Auflage.)*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- von Bobrutski, K., Braban, C.F., Famulari, D., Jones, S.K., Blackall, T., Smith, T.E.L., Blom, M., Coe, H., Gallagher, M., Ghalaieny, M., McGillen, M.R., Percival, C.J., Whitehead, J.D., Ellis, R., Murphy, J., Mohacsi, A., Pogany, A., Junninen, H., Rantanen, S., Sutton, M.A., Nemitz, E., 2010. Field inter-comparison of eleven atmospheric ammonia measurement techniques. *Atmos. Meas. Tech.* 3, 91–112. <https://doi.org/10.5194/amt-3-91-2010>.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., 2009. *Biologie (8., aktualisierte Aufl.)*. München [u.a.]: Pearson Studium.
- Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2010. At the heart of gas detection systems. https://www.draeger.com/Products/Content/at_the_heart_of_gds_br_9046500_en.pdf. Accessed 12 December 2018.
- Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2016. Dräger Polytron C300: Ammoniaküberwachung und Klimakontrolle. https://www.draeger.com/de_de/Applications/Products/Stationary-Gas-Detection-Systems/Detection-of-Toxic-Gases-and-Oxygen/PolytronC300#literature. Accessed 12 December 2018.
- Gerber, P.J., Henderson, B., Makkar, H.P.S. (Eds.), 2013. Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO₂ emissions. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Gerrits, W.J.J., Labussière, E., Reynolds, C.K., Metges, C.C., Kuhla, B., Lund, P., Weisbjerg, M.R., Dijkstra, J., 2018. Letter to the Editor: Recovery test results as a prerequisite for publication of gaseous exchange measurements. *J. Dairy Sci.* 101 (6), 4703–4704. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13705>.
- Hansen, M.J., Nørgaard, J.V., Adamsen, A.P.S., Poulsen, H.D., 2014. Effect of reduced crude protein on ammonia, methane, and chemical odorants emitted from pig houses. *Livest. Sci.* 169, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.08.017>.
- Harren, F.J.M., Cotti, G., Oomens, J., te Lintel Hekkert, S., 2000. Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring. In: Meyers, R.A. (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 2203–2226.
- Hassouna, M., Robin, P., Charpiot, A., Edouard, N., M'eda, B., 2013. Infrared photoacoustic spectroscopy in animal houses: Effect of non-compensated interferences on ammonia, nitrous oxide and methane air concentrations. *Biosyst. Eng.* 114 (3), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.011>.

- Hennig-Pauka, I., Menzel, A., Boehme, T.R., Schierbaum, H., Ganter, M., Schulz, J., 2019. Haptoglobin and C-Reactive Protein—Non-specific Markers for Nursery Conditions in Swine. *Front. Vet. Sci.* 6, 92. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00092>.
- Hinshaw, J.V., 2013. Measuring Gas Flow for Gas Chromatography. *LCGC North America* 31, 210–217.
- Hristov, A.N., 2011. Technical note: Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) in the United States. *J. Dairy Sci.* 94, 3130–3136. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3681>.
- von Jasmund, N., Wellnitz, A., Krommweh, M.S., Büscher, W., 2020. Using Passive Infrared Detectors to Record Group Activity and Activity in Certain Focus Areas in Fattening Pigs. *Animals* 10, 792. <https://doi.org/10.3390/ani10050792>.
- Kriz, P., Kunes, R., Smutny, L., Cerny, P., Havelka, Z., Olsan, P., Xiao, M., Stehlik, R., Dolan, A., Bartos, P., 2021. Methodology for Measurement of Ammonia Emissions from Intensive Pig Farming. *Agriculture* 11, 1073. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111073>.
- Krommweh, M.S., Deeken, H.F., Licharz, H., Büscher, W., 2021. Heating Performance and Ammonia Removal of a Single-Stage Bioscrubber Pilot Plant with Integrated Heat Exchanger under Field Conditions. *Energies* 14, 6484. <https://doi.org/10.3390/en14206484>.
- Lengling, A., Reckels, B., Schwennen, C., Hölscher, R., Waldmann, K.-H., Visscher, C., Büscher, W., 2020. Validation of a New Resource-Efficient Feeding System for Fattening Pigs Using Increased Crude Fiber Concentrations in Diets: Feed Intake and Ammonia Emissions. *Animals* 10, 497. <https://doi.org/10.3390/ani10030497>.
- Li, H., Zhang, C., Xin, H., 2015. Performance of an Infrared Photoacoustic Single Gas Analyzer in Measuring Ammonia from Poultry Houses. *Appl. Eng. Agric.* 31, 471–477. <https://doi.org/10.13031/aea.31.10826>.
- Liu, Z., Powers, W., 2014. Greenhouse Gases Emissions from Multi-Species Animal Operations and Potential Diet Effects. *Trans. ASABE* 57, 219–227. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10246>.
- Liu, S., Ni, J.-Q., Radcliffe, J.S., Vonderohe, C.E., 2017. Mitigation of ammonia emissions from pig production using reduced dietary crude protein with amino acid supplementation. *Bioresource Technol.* 233, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.082>.
- LumaSense Technologies, 2017. Gas Sensing Solutions Overview. https://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Gas_Sensing/pdf_gas_sensing/DE-Gas-SensorLoesungen_Broschuere.pdf. Accessed 2 August 2018.
- LumaSense Technologies, 2018. Gas Detection Limits. https://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Technology_Overview/Technical_Literature_pdf/EN-Lumasensegas-detection-limits_Wall-Chart.pdf. Accessed 19 July 2018.
- Maffia, J., Aarnink, A.J.A., Ploegaert, J.P.M., Dinuccio, E., Balsari, P., Ellen, H.H., 2021. Assessing particulate matter (PM₁₀) emissions from outdoor runs in laying hen houses by integrating wind tunnel and lab-scale measurements. *Biosyst. Eng.* 210, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.017>.

- Melse, R.W., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M., 2016. Laboratory tests of Draeger Polytron 8000 with FL-6813260 sensor for NH₃ measurement. Wageningen UR (University & Research centre). Livestock Research, Livestock Research Report 972. 10.18174/388326.
- Nauber, A., Sick, M., Steiner, G., Mattern-Frühwald, M.-I., Mett, F., Chrzan, R., Sommer, S., 2017. ELEKTROCHEMISCHER GASENSOR, FLÜSSIGER ELEKTROLYT UND VERWENDUNG EINES FLÜSSIGEN ELEKTROLYTEN; ELECTROCHEMICAL GAS SENSOR, LIQUID ELECTROLYTE AND USE OF A LIQUID ELECTROLYTE (EP 3 044 576 B1). Europäisches Patentamt.
- Nicoloso, R.d.S., Bayer, C., Denega, G.L., Oliveira, P.A.V.d., Higarashi, M.M., Corrêa, J. C., Lopes, L.D.S., 2013. Gas chromatography and photoacoustic spectroscopy for the assessment of soil greenhouse gases emissions. *Cienc. Rural* 43 (2), 262–269.
- Opekar, F., Stulík, K., 2009. Electrochemical Gas Sensors. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9780470027318.a9074.
- Parodi, A., Gerrits, W.J.J., Van Loon, J.J.A., De Boer, I.J.M., Aarnink, A.J.A., Van Zanten, H.H.E., 2021. Black soldier fly reared on pig manure: Bioconversion efficiencies, nutrients in the residual material, greenhouse gas and ammonia emissions. *Waste Manage.* 126, 674–683. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.001>.
- Place, S.E., Pan, Y., Zhao, Y., Mitloehner, F.M., 2011. Construction and Operation of a Ventilated Hood System for Measuring Greenhouse Gas and Volatile Organic Compound Emissions from Cattle. *Animals* 1, 433–446. <https://doi.org/10.3390/ani1040433>.
- Rosa, E., Mosquera, J., Arriaga, H., Montalvo, G., Merino, P., 2021. Ammonia emission modelling and reduced sampling strategies in cage-based laying hen facilities. *Biosyst. Eng.* 204, 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.002>.
- Rzeźnik, W., Mielcarek, P., 2016. Greenhouse Gases and Ammonia Emission Factors from Livestock Buildings for Pigs and Dairy Cows. *Pol. J. Environ. Stud.* 25 (5), 1813–1821.
- Schmithausen, A.J., Trimborn, M., Büscher, W., 2016. Methodological Comparison between a Novel Automatic Sampling System for Gas Chromatography versus Photoacoustic Spectroscopy for Measuring Greenhouse Gas Emissions under Field Conditions. *Sensors* 16, 1638. <https://doi.org/10.3390/s16101638>.
- Sigrist, M.W., 1994. Laser photoacoustic spectrometry for trace gas monitoring. *Analyst* 119, 525–531. <https://doi.org/10.1039/AN9941900525>.
- Sturm, B., Müller, S., Quiniou, N., Raut, S., Graef, H., Lange, A., Hensel, O., Marcon, M., Brossard, L., Nasirahmadi, A., 2021. Impact of environmental conditions on activity patterns in growing pigs. CIGR 5th International Conference. Virtually from Québec City, Canada.
- U.S. EPA, 2004a. Air Quality Criteria for Particulate Matter: Volume I of II. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- U.S. EPA, 2004b. National Emission Inventory—Ammonia Emissions from Animal Husbandry Operations. Draft Report. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Van der Heyden, C., Demeyer, P., Volcke, E.I.P., 2015. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives. *Biosyst. Eng.* 134, 74–93. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.002>.

Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production, 2018a. VERA TEST PROTOCOL for Air Cleaning Technologies.

Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production, 2018b. VERA TEST PROTOCOL for Livestock Housing and Management Systems.

Xiong, L., Compton, R.G., 2014. Amperometric Gas detection: A Review. *Int. J. Electrochem. Sci.* 9, 7152–7181.

Zhao, Y., Pan, Y., Rutherford, J., Mitloehner, F.M., 2012. Estimation of the Interference in Multi-Gas Measurements Using Infrared Photoacoustic Analyzers. *Atmosphere* 3, 246–265. <https://doi.org/10.3390/atmos3020246>.



© 2022. This manuscript version (pages 31-63) is made available under the CC-BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

3 Konferenzbeitrag

Kurzzeit-Screening der Tieraktivität und des Stallklimas als Teilaspekt der Tierwohlbeurteilung im Projekt PigsAndMore

**Short-term screening of animal activity and controlled house environment
as a sub-aspect of animal welfare assessment in the project PigsAndMore**

NAEMI VON JASMUND¹, KATHARINA DAHLHOFF², ASTRID VAN ASTEN²,
TOBIAS SCHOLZ², HORST CIELEJEWSKI², FELIX AUSTERMANN², WOLFGANG BÜSCHER¹

¹ Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Landtechnik, Nußallee 5, 53115 Bonn;
jasmund@uni-bonn.de

² Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Haus Düsse 2, 59505 Bad Sassendorf

Dieses Kapitel wurde als Vortrag auf der *14. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der
landwirtschaftlichen Nutztierhaltung* vom 24. bis 26. September 2019 in Bonn vorgestellt und im
Konferenzband der Vortragsveranstaltung veröffentlicht.

ISBN 978-3-945088-69-2

Zusammenfassung

Ziel des Projektes PigsAndMore ist es, ein On-Farm Beratungstool für die Schweinehaltung zu entwickeln. Mit diesem soll es möglich sein, eine Schwachstellenanalyse durchführen zu können, um daraus konkrete Verbesserungsvorschläge im Sinne des Tierwohls abzuleiten. Ein Kurzzeit-Screening soll als ein wichtiger Aspekt dieses Tools unter anderem Aufschluss über das Tierverhalten geben. Um die Aktivität einer Tiergruppe in der Bucht sowie in speziellen Funktionsbereichen objektiv aufnehmen und Rückschlüsse auf mögliche Ruhe- und Stressphasen ziehen zu können, werden Infrarotsensoren eingesetzt. Die in Versuchen gewonnenen Sensordaten wurden einer manuellen Auswertung von Videosequenzen gegenübergestellt. Der Einsatz der Aktivitätssensoren erscheint auf Basis dieser Untersuchungen als einfache und kostengünstige Möglichkeit, um die Aktivität allgemein oder in bestimmten Fokusbereichen innerhalb der Mastschweinebucht aufnehmen und mit anderen erhobenen Parametern verknüpfen zu können.

Summary

The aim of the project PigsAndMore is the development of an on-farm consulting tool for pig housing. By this an analysis of weak points will be carried out and give concrete suggestions for improvements in terms of animal welfare. An important aspect of this tool is the short-term screening, which should provide insight into among other things the animal behaviour. Infrared sensors will be used to objectively record the activity of a group of animals in the pen and in special functional areas. Thus conclusions should be drawn about phases of resting and stress. Activity data generated by the sensors in experiments were compared to a manual evaluation of video sequences. On the basis of these investigations, the use of the sensors appears as simple and cost-effective possibility to record the activity in general or in certain focus areas within fattening pig pens which could be linked to other collected parameters.

3.1 Einleitung und Zielsetzung

Übergeordnetes Ziel der Projektpartner – dem Institut für Landtechnik und der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen – ist es, ein On-Farm Beratungstool zu entwickeln. Mit diesem ist es zukünftig möglich, anhand geeigneter haltungs- und managementbezogener sowie tierbezogener Indikatoren das Tierwohl bei Mastschweinen objektiv zu bewerten, um im Sinne einer Schwachstellenanalyse konkrete, stallspezifische Verbesserungsvorschläge für mehr Tierwohl geben zu können. Sowohl die Erfassung der Ist-Situation als auch die Auswertung und somit die Verknüpfung der ermittelten Parameter sollen sensor- und softwaregestützt erfolgen. Ein wichtiger Teil dieser Schwachstellenanalyse ist dabei eine kurzzeitige Screeningphase des Stallklimas sowie der Tieraktivität in einem zufällig ausgewählten Fokusabteil bzw. Fokusbucht. Möglichst objektiv und vom Menschen unabhängig wird dadurch die Tieraktivität über mindestens 24 Stunden aufgezeichnet. Zusätzlich werden Daten hinsichtlich des Stallklimas im Tagesverlauf gewonnen.

Die Schwachstellenanalyse für mehr Tierwohl setzt sich somit aus der Verknüpfung gewonnener Daten, erhobener Parameter und Angaben des Betriebsleiters zu verschiedensten Bereichen wie Stallklima, Fütterung und Management zusammen.

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

3.2 Material und Methoden

Bei den jeweiligen Betriebsbesuchen zur Tierwohlbeurteilung werden im Rahmen eines Interviews mit dem Betriebsleiter zunächst vor allem haltungs- und managementbezogene Indikatoren erhoben. Darunter fallen beispielsweise Fragen zur Fütterung oder auch dem Haltungssystem. Weitere Parameter bezüglich Hygienemanagement, Futtertrog- und Tränkehygiene und dem Lüftungssystem werden darüber hinaus bei einem Rundgang um und in den Schweinemastställen sowie bei einer Reihe von zufällig ausgewählten Abteilen und Buchten erhoben. Auch eine Einzeltierbonitur wird bei einem Teil der Mastschweine des Bestandes

durchgeführt, um Anzeichen für beispielsweise Ohr- oder Schwanzbeißen aufzunehmen.

Um Aussagen zum Stallklima treffen zu können, werden im Rahmen der vorgeschalteten Screeningphase der Ammoniakgehalt, der Verlauf von Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie die Beleuchtungsstärke in einem Fokusabteil erfasst.

Mit in einer Fokusbucht angebrachten passiven Infrarotsensoren (renkforce, Conrad Electronic SE, Hirschau, Deutschland), wie sie in Abbildung 3.1 A zu sehen sind, soll ein Aktivitätsprofil gewonnen werden, welches Rückschlüsse auf das Vorhandensein eines für Schweine typischen biphasischen Futteraufnahmehythmus sowie auf Ruhe- und Stressphasen zulässt.

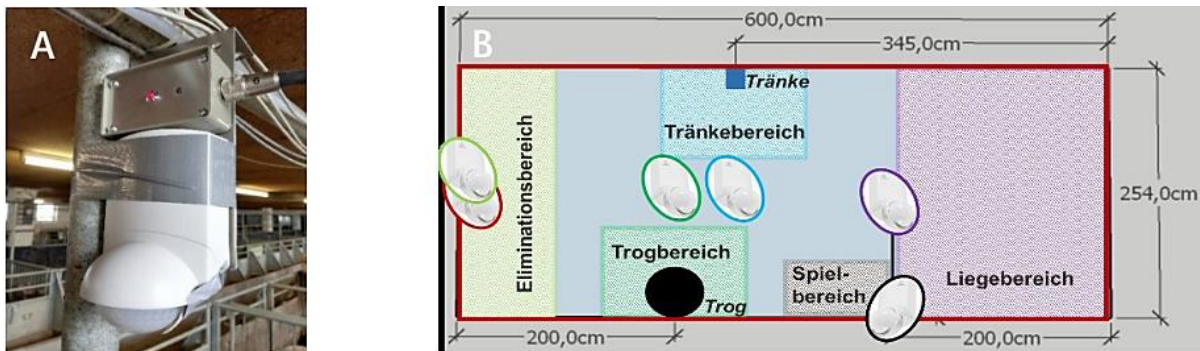


Abbildung 3.1 Positionierung der eingesetzten Aktivitätssensoren (A) und Einteilung der Bucht in fünf verschiedene Fokusbereiche sowie Messung der Gesamtaktivität der Tiergruppe im rot umrahmten Bereich (B) (© von Jasmund)

Positioning of the used activity sensors (A) and division of the pen into five different focus areas as well as measurement of the total activity of the group of animals in the red framed area (B) (© von Jasmund)

Dazu wurde in Vorversuchen getestet, ob es möglich ist, mit diesen Aktivitätssensoren neben der Gesamtaktivität einer Tiergruppe auch jeweils die Aktivität in einzelnen Funktionsbereichen in den Buchten zu messen, um Rückschlüsse über die Nutzung von Beschäftigungsmaterial oder ähnlichem ziehen zu können. Dazu wurden insgesamt sechs Bewegungssensoren in einer Fokusbucht auf der Lehr- und Forschungsstation Frankenforst der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn angebracht (Abb. 3.1 B). Das Signal der Sensoren, welches die Tieraktivität in Prozent angibt, wurde über Datenlogger (ALMEMO®, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Deutschland) jede Minute aufgezeichnet. Einer der Sensoren

misst die Gesamtaktivität der Gruppe und wurde so angebracht, dass dieser die gesamte Buchtenfläche abdecken konnte. Die fünf weiteren Sensoren wurden so installiert und die Linse der Sensoren entsprechend teils insoweit abgedeckt, dass diese jeweils einen bestimmten Funktionsbereich abdecken und die Aktivität in diesem möglichst genau aufzeichnen konnten. Folgende Funktionsbereiche wurden dafür ausgewählt: Trog- und Tränkebereich, Spielbereich mit Beschäftigungsmaterial, Liegebereich sowie Eliminationsbereich.

Die Gesamtaktivitätsfläche abzüglich des Trogbereiches betrug insgesamt 15 m². Von den zu Beginn elf eingestellten Mastschweinen mit einem Einstallgewicht von durchschnittlich 22,5 kg mussten zwei Tiere noch vor Beginn der Versuche aufgrund von Krankheit sowie Unverträglichkeit aus der Gruppe genommen werden. Somit standen jedem Tier während der Versuchsphase in etwa 1,67 m² zur Verfügung. Die Tiere wurden ad libitum mittels Breifutterautomaten versorgt. Für die Wasseraufnahme bzw. das Anmischen des Futters standen den Tieren eine Zapfetränke sowie zwei Trogsprüher am Breifutterautomat zur Verfügung. Liege- und Spielbereich wurden durch ein Gitter voneinander separiert. Als Referenz zur Bewertung der Tieraktivität insgesamt sowie der Aktivität in den Fokusbereichen stand das Videomaterial von zwei in der Bucht angebrachten Kameras zur Verfügung. Mithilfe der Videosequenzen fand eine Beurteilung der Tieraktivität alle zehn Minuten statt. Aufgezeichnet wurde die Anzahl liegender, stehender, sitzender, sich bewogender, trinkender, fressender, kotender und am Beschäftigungsmaterial spielender Tiere. Zusätzlich zur Aufnahme der Aktivität der Mastschweine wurde die Ammoniakkonzentration mit dem photoakustischen Gasmessgerät INNOVA 1412 (LumaSense Technologies A/S, Ballerup, Dänemark) in der Bucht aufgezeichnet.

3.3 Ergebnisse und Diskussion

Um zum einen das Verhaltensmuster von Tieren im Rahmen einer Tierwohlbeurteilung aufnehmen oder auch andere Messungen wie die Staubentwicklung (Calvet et al. 2009) oder den Verlauf der Ammoniakkonzentration (Blanes-Vidal et al. 2008) im Stall in Relation zu Bewegung und Tagesverlauf setzen und besser interpretieren zu können, ist es sinnvoll, die Tieraktivität aufzunehmen. Alternativ zu einer zeitaufwendigen Auswertung von Videosequenzen per Hand, liegen Untersuchungen vor, die eine automatisierte Verhaltensanalyse beispielsweise des Liegeverhaltens

(Costa et al. 2014, Nasirahmadi et al. 2017) oder eine automatisierte Detektion der Wasseraufnahme von Schweinen (Kashiha et al. 2013) mittels Kameras und hinterlegten Algorithmen anstreben. Diese Form der Aktivitätsaufnahme ist zum Teil jedoch mit hohen Kosten für die Kameratechnik, mit zeitaufwendiger Ausrichtung und/oder Abstimmung mehrerer Kameras aufeinander sowie genauen Angaben und Programmierung der Buchtenstrukturierung oder Tierformen verbunden. Als weitere Alternative können auch kostengünstige und leicht anzubringende passive Infrarotsensoren eingesetzt werden. Die Aktivitätsmessung von Tieren mithilfe von Infrarotsensoren sowohl im Freiland (Langbein et al. 1996) als auch in Open-Field-Versuchen (Puppe et al. 1999) oder im Stall (Pedersen und Pedersen 1995, Ni et al. 2017; Besteiro et al. 2018) wurde bereits durchgeführt. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen in der Fokusbucht zeigen, dass die Infrarotsensoren geeignet sind, die Gesamtaktivität der Tiergruppe in der Bucht aufzunehmen und somit eine Bewertung des arttypischen Verhaltens im Tagesverlauf möglich ist. Dadurch können Rückschlüsse auf Ruhe- sowie Stressphasen im Sinne einer Tierwohlbeurteilung gezogen werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 3.2 ausgewählte Daten der vergleichenden Auswertung der Tieraktivität von Aktivitätssensor und Videoauswertung über einen Tagesverlauf sowie die gemessene Ammoniakkonzentration in der Bucht im entsprechenden Zeitraum.

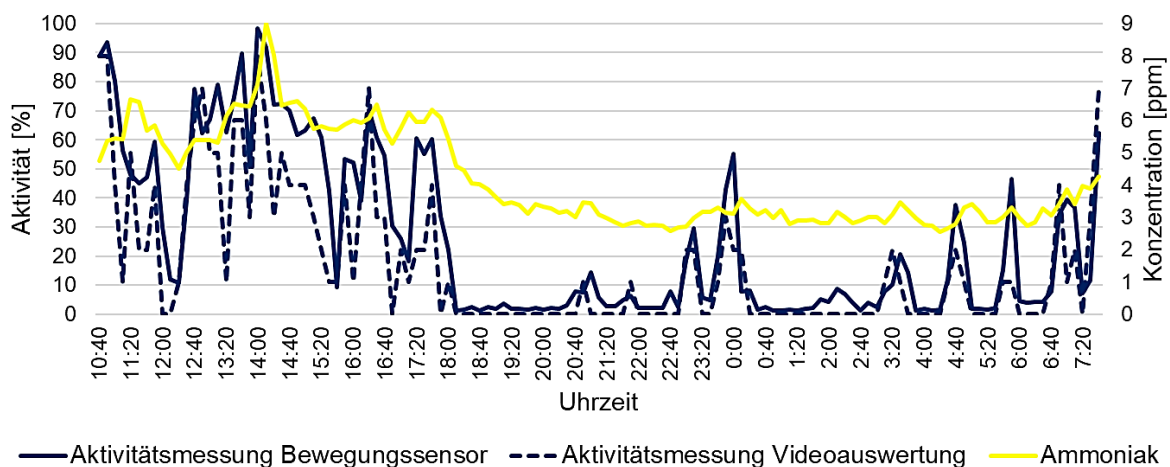


Abbildung 3.2 Verlauf der Aktivität sowie der Ammoniakkonzentration in der Fokusbucht im Tagesverlauf (© von Jasmund)
 Course of activity and ammonia concentration in the focus pen during the day (© von Jasmund)

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Bewegungssensoren als einfache und kostengünstige Möglichkeit zur generellen Aufzeichnung der Tieraktivität einer Gruppe eignen und Rückschlüsse hinsichtlich Ruhe- und Stressphasen zur Bewertung des Tierwohls gezogen werden können. Es konnte eine gute Korrelation ($R^2 = 0,785$) zwischen Bewegungssensordaten und der sehr zeitaufwendigen händischen Auswertung der Videosequenzen erreicht werden. Zudem ist in Abbildung 3.2 erkennbar, dass die Ammoniakkonzentration bei sinkender Aktivität ebenfalls zurückgeht. Dieser Zusammenhang könnte z.B. von Relevanz sein für die Bewertung der Ammoniakkonzentration und der sich daraus ableitenden Empfehlungen hinsichtlich des Managements der Lüftungssteuerung im Tagesverlauf.

Darüber hinaus weisen die Ergebnisse zwischen Bewegungssensordaten und Videoauswertung darauf hin, dass die Sensordaten auch eine Bewertung der Aktivität in den jeweiligen Fokusbereichen zulassen. Vor allem für den Trogbereich sowie den Spielbereich, in dem das Beschäftigungsmaterial angeboten wird, lassen sich die Verlaufskurven zwischen Bewegungssensordaten und Videoauswertung gut miteinander vergleichen (Abb. 3.3).

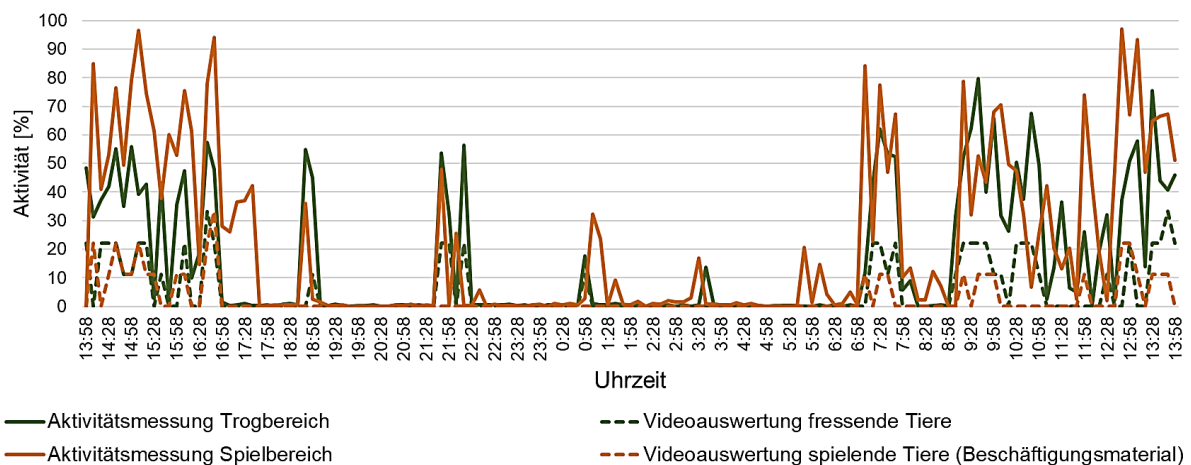


Abbildung 3.3 Verlauf der Aktivität im Trog- sowie Spielbereich über 24 Stunden (© von Jasmund)
 Course of activity in trough and play area over 24 hours (© von Jasmund)

Bei allen Messungen ist jedoch erkennbar, dass die Sensoren generell die Aktivität überschätzen, was möglicherweise zu einer Fehlbewertung der Nutzung bestimmter Bereiche führen kann und zukünftig einer Korrektur bedarf. In einem nächsten Schritt könnte auf Basis dieser Daten auch eine Art stark vereinfachtes Ethogramm erstellt werden, welches Aufschluss über die Tieraktivität in den einzelnen Bereichen (Trog-, Tränke-, Spiel-, Eliminations- und Liegebereich) geben könnte.

Das gesamte Beratungstool mit allen Komponenten wie Einzeltierbonitur und Screeningphase wird nun auf zehn verschiedenen Mastschweinebetrieben getestet werden. Darauf folgend kann eine Bewertung stattfinden, inwieweit Zusammenhänge zwischen den erhobenen Merkmalen bestehen und welche Aussagekraft die einzelnen Parameter für die Bewertung der Ist-Situation und die anschließende Schwachstellenanalyse haben.

Bezüglich der Screeningphase wird erwartet, dass sich die objektive Bewertung der Tieraktivität und des Stallklimas über einen längeren Zeitraum in einem Fokusabteil kombiniert mit anderen Parametern als nützliche Vorabinformation für die Tierwohlsituation in einem Betrieb erweist.

Konkret erwarten wir, dass durch das Beratungstool und die kombinierte Aus- und Bewertung der erhobenen Parameter eine gute Analyse der Ist-Situation der einzelnen Betriebe erreicht werden kann und mit einer stallspezifisch zugeschnittenen Schwachstellenanalyse eine Verbesserung des Tierwohls erzielt wird.

3.4 Literatur

- Besteiro, R.; Rodríguez, M. R.; Fernández, M. D.; Ortega, J. A.; Velo, R. (2018): Agreement between passive infrared detector measurements and human observations of animal activity. *Livestock Science* 214, pp. 219–224
- Blanes-Vidal, V.; Hansen, M. N.; Pedersen, S.; Rom, H. B. (2008): Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 124, pp. 237–244
- Calvet, S.; Van den Weghe, H.; Kosch, R.; Estellés, F. (2009): The influence of the lighting program on broiler activity and dust production. *Poultry Science* 88, pp. 2504–2511
- Costa, A.; Ismayilova, G.; Borgonovo, F.; Viazzi, S.; Berckmans, D.; Guarino, M. (2014): Image-processing technique to measure pig activity in response to climatic variation in a pig barn. *Animal Production Science* 54, pp. 1075–1083
- Kashiha, M.; Bahr, C.; Haredasht, S. A.; Ott, S.; Moons, C. P. H.; Niewold, T. A.; Ödberg, F. O.; Berckmans, D. (2013): The automatic monitoring of pigs water use by cameras. *Computers and Electronics in Agriculture* 90, pp. 164–169
- Langbein, J.; Scheibe, K. M.; Eichhorn, K.; Lindner, U.; Streich, W. J. (1996): An activitydata-logger for monitoring free-ranging animals. *Applied Animal Behaviour Science* 48, pp. 115–124
- Nasirahmadi, A.; Hensel, O.; Edwards, S. A.; Sturm, B. (2017): A new approach for categorizing pig lying behaviour based on a Delaunay triangulation method. *Animal* 11, pp. 131–139
- Ni, J.-Q.; Liu, S.; Radcliffe, J.; Vonderohe, C. (2017): Evaluation and characterisation of Passive Infrared Detectors to monitor pig activities in an environmental research building. *Biosystems Engineering* 158, pp. 86–94
- Pedersen, S.; Pedersen, C. B. (1995): Animal Activity Measured by Infrared Detectors. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61, pp. 239–246
- Puppe, B.; Schön, P. C.; Wendland, K. (1999): Monitoring of piglets` open field activity and choice behaviour during the replay of maternal vocalization: a comparison between Observer and PID technique. *Laboratory Animals* 33, pp. 215–220

4 Studie 2

Using Passive Infrared Detectors to Record Group Activity and Activity in Certain Focus Areas in Fattening Pigs

Naemi von Jasmund ^{*†}, Anna Wellnitz [†], Manuel Stephan Krommweh and Wolfgang Büscher

Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, 53115 Bonn, Germany;
anna.wellnitz@t-online.de (A.W.); krommweh@uni-bonn.de (M.S.K.); buescher@uni-bonn.de (W.B.)

* Correspondence: jasmund@uni-bonn.de; Tel.: +49-228-73-68707

† These authors contributed equally to this work.

Received: 16 April 2020; Accepted: 1 May 2020; Published: 3 May 2020

Published in
Animals 2020, 10(5), 792
<https://doi.org/10.3390/ani10050792>

Simple Summary

Pigs are important livestock for meat production. Because of rising demand for animal products from housing systems that enable high standards of animal welfare, solutions must be found to record and assess welfare parameters. Pigs have a wide behavioral repertoire and fixed daily routines, which offers an opportunity to detect deviations from normal behavior as a measure of welfare. In this study, we evaluated the use of passive infrared detectors (PID) for measuring group activity and activity in certain focus areas in a pen of fattening pigs. PIDs can be used to measure activity by detecting thermal changes between moving bodies and the infrared radiation they emit compared to the background. For evaluation, the data of the detectors were compared to human observation to see if the technique is able to represent the behavioral patterns of the animals correctly. The results indicate that PIDs are suitable for recording the activity of a group of pigs in a pen as well as in clearly definable areas, such as the trough. Such activity profiles obtained initial conclusions to be drawn about resting, stress, and activity phases, which can be used combined with other factors like the air temperature to assess animal welfare.

Abstract

Animal behavior is an important aspect in the assessment of animal welfare. Passive infrared detectors (PID), detecting thermal changes to measure activity, have already been used to record data on the behavior of groups of animals. Within this study, the suitability of these detectors for the collection of activity profiles for focused areas is further investigated. The aim was to record the activity of a group of eleven fattening pigs in a pen, as well as the activity in the five functional areas for resting, feeding, drinking, exploration, and elimination. In order to evaluate the data obtained, the behavior was video recorded for visual assessment. In addition, relevant indoor environment parameters were recorded (ammonia, air temperature, and relative humidity). For the measurement of activity by PID, strong correlations from up to $r = 0.87$ ($p < 0.01$) could be found compared to visual assessment. The results indicate that activity changes during the day and activity in defined functional areas can be recorded using PIDs. These data combined with data of climate-related sensors could

serve the farmer as a monitoring tool for early detection of behavioral changes or serve as partial aspect within a Weak Point Analysis within external on-farm consulting.

Keywords: activity profile; PID; animal-based indicator; animal welfare indicator; on-farm consulting; early warning system; assessment protocol; visual assessment; ammonia

4.1 Introduction

Consumers are increasingly interested in the well-being of farm animals [1,2], and food quality is also defined by animal welfare and not exclusively by the quality of the end product itself [2,3].

Overall, demands of society for more species-appropriate housing conditions and for more appropriate animal welfare are increasing. In the future, this will require a continuous assessment of each housing environment and the animals living in it according to animal-welfare-relevant indicators and a precise documentation of results. Already established criteria for assessing animal welfare are often resource and management-based. They can be used to evaluate animal welfare indirectly and by determining whether the quantity and quality of available resources are sufficient [1]. Sensors for monitoring the barn environment are, for example, air temperature and air humidity sensors or sensors for measuring gaseous pollutants such as ammonia (NH₃). However, indicators directly related to animals such as Body Condition Score (BCS) or behavioral changes, i.e., so-called animal-based indicators, are gaining importance. They are now considered by researchers to be fundamental for evaluating welfare in its multidimensionality [2] as comprehensively as possible [1,2]. These direct indicators are already an essential part of assessment protocols such as the Welfare Quality® protocol for pigs [4]. Because they are very time-consuming, they are typically used as a snapshot and as part of regular checks of the herd every few weeks or months, although continuous observation and evaluation of animal health status and behavior is considered more effective for the assessment of animal welfare.

Innovative animal-based sensor systems which try to enable the continuous and objective monitoring and evaluation of the behavior of groups of animals like pigs could use, for example, visually acquired information using appropriate sensors in

combination with learning algorithms or similar applications. Thus, pixel changes between images can be used to identify animal activity in general [5] or aggressive behavior as well [6,7]. Image processing techniques based on measuring pixel intensity value between images [8] or Delaunay triangulation [9,10] can also provide information about lying behavior and potential deficiencies in temperature management. Moreover, the use of optical flow combined with modified angular histograms may indicate anomalies regarding locomotion of pigs at the slaughterhouse [11]. Image processing techniques in combination with the definition of the body contour profile of pigs allow for automatically drawing conclusions on drink nipple visits and water use [12]. One study also showed good accuracy for the automated monitoring of various behaviors such as lying, standing, feeding, drinking, and the transitioning between different behaviors, which could be classified simultaneously using depth image processing and analysis algorithms for lactating sows in farrowing crates [13].

Another approach to record behavior or rather animal activity is the use of passive infrared detectors (PID). By detecting thermal changes between moving animals and the infrared radiation emitted by them against the background, activity or movement can be measured regardless of lighting conditions [14–16]. The general suitability of these detectors has been tested in various studies and different setups so far. PID has already been used to measure the activity of free-ranging mouflons [17] or of piglets in open field experiments [18]. Additionally, data collection and analysis was conducted in stables for different types of animals, such as group-housed broiler chickens [19,20], laying hens [21], and particularly (weaner) pigs [3,14–16,22].

Behavioral data obtained in this way are of course rather rudimentary compared to those of the image-based innovations mentioned above. If, however, PID data can be interpreted sufficiently to make continuous, valid observations of animal behavior and deviations in animal welfare, the advantages of PIDs—low cost in terms of material and time due to easy handling, low process consumption, and good running performance [3,15] could come into effect. Therefore, PIDs could be used as a simple but meaningful basic real time tool in the future for behavioral monitoring and assessment.

However, in the aforementioned PID studies, the activity data mostly referred to relatively large groups of animals or were undifferentiated for all animals in a

compartment and less focused on smaller groups of pigs in a pen or in special (functional) areas within the pen. However, results of other studies that investigate specific behaviors indicate that behavioral observation can also provide important information in certain focus areas. For example, a change in the drinking behavior can indicate disease [23–25] or the adaptation to rising room temperatures [26] or increased activity on the enrichment material could indicate the outbreak of tail biting [27–29]. Thus, PIDs could possibly also be focused on specific areas of the pen to monitor behavioral changes. Furthermore, results of other studies already indicate how important and useful it is to relate measured barn climate parameters or indoor air quality such as airborne dust levels, heat, moisture, carbon dioxide or NH₃ emissions to animal activity [16,21,30,31].

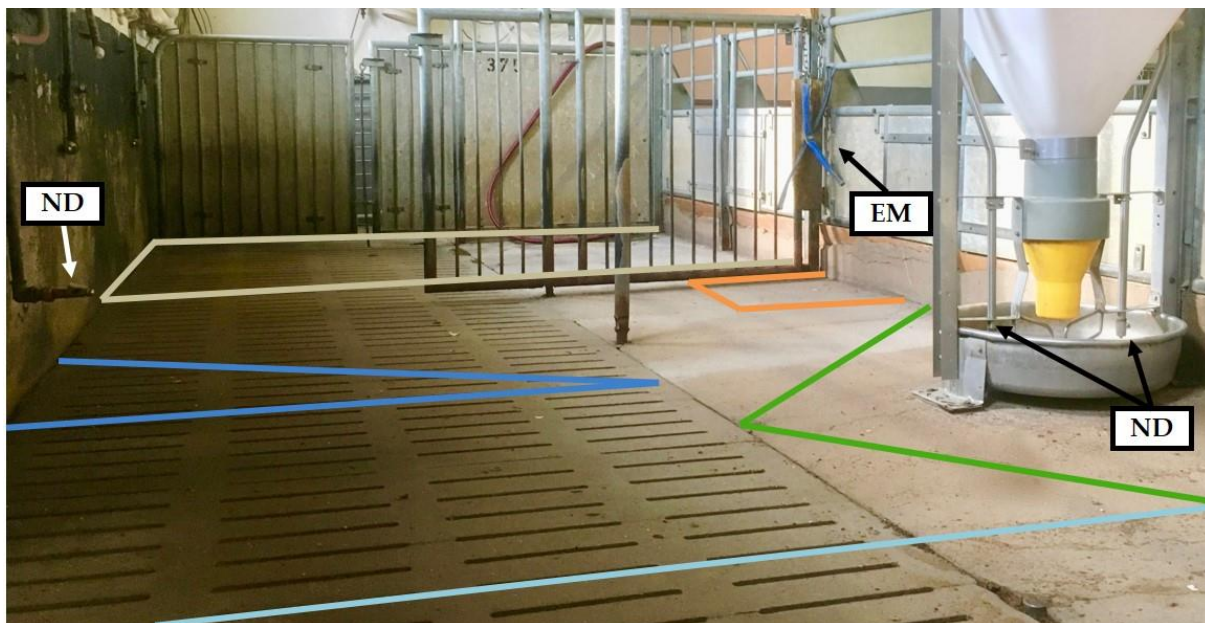
Therefore, this study focused on the following three aims:

- Further verification of PIDs for their suitability to record the activity of a group of fattening pigs within the pen in order to obtain information on behavioral changes during the day;
- Determining whether it is possible to obtain information on behavioral changes not only at group level in general but also in specific functional areas of the pen by focusing PIDs;
- Verification of the relationship between indoor environment parameters and the activity pattern of the focused animal group.

4.2 Materials and Methods

4.2.1 Animals and Housing

The trial was carried out on the educational and research center Frankenforst (Königswinter-Vinzel, Germany) of the Agricultural Faculty of the Rheinische Friedrich-Wilhelms-University Bonn. The experimental period covered one fattening cycle of 105 days and extended from March to July 2019 in a forced ventilated fattening stable. The measurements were focused on 11 weaned and docked pigs housed in a 6.00 × 2.54 m pen (see Figure 4.1) with partly slatted concrete floor and a metal lattice as the partition wall for additional structuring. The focus pen does not border on any side directly on another pen. It is located at the beginning of the compartment and on the other side, a delimited area of 2.00 m width, in which the data loggers were accommodated, separates it from the neighboring pen.



(a)

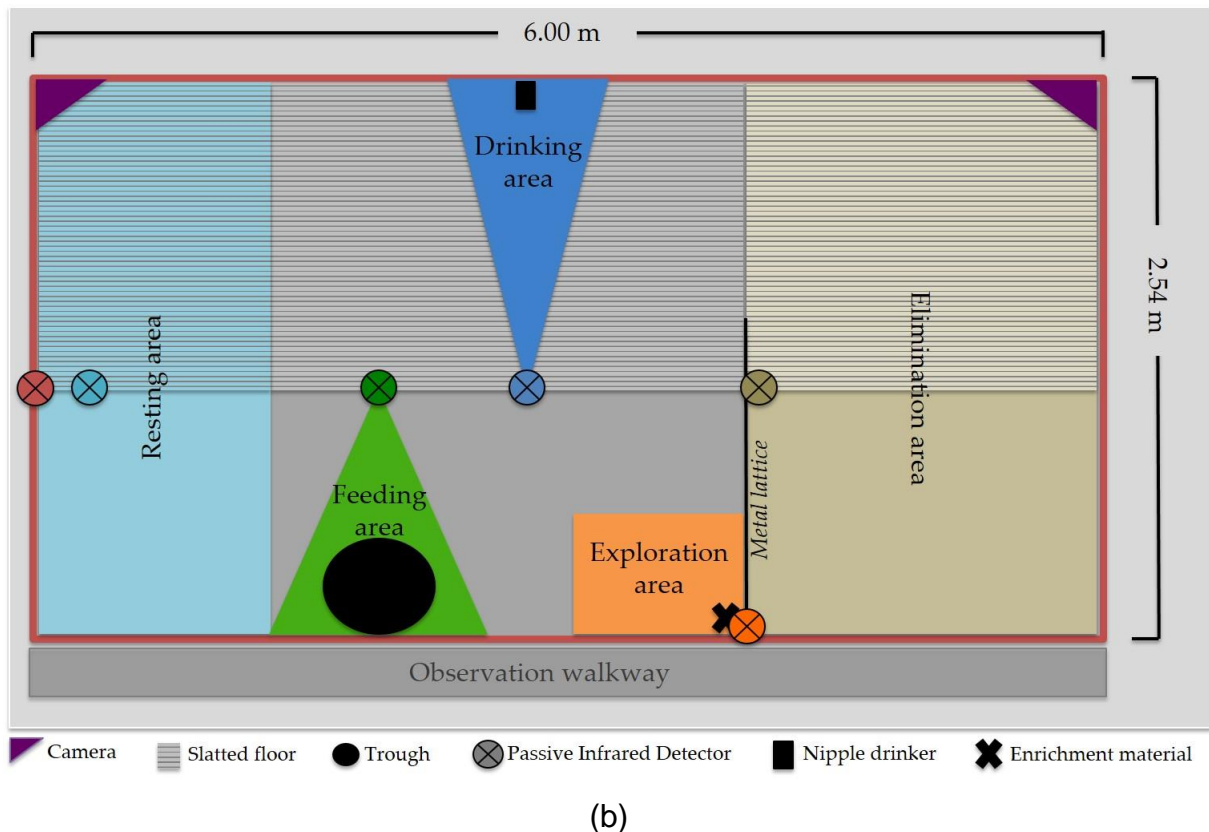


Figure 4.1 Image of the focus pen with indicated functional areas (a) for lying, drinking, eating, exploration and elimination, nipple drinker (ND) separate and included in the wet feeder and enrichment material (EM) as well as schematic floor plan (b) and positioning of the passive infrared detectors (PIDs) used for the corresponding functional areas as well as for measuring total activity of the animal group in the red framed area.

The pigs entered the pen with an average live weight of 23.0 kg and were slaughtered with an average carcass weight of 85.2 kg. Ten days before the end of fattening, one pig was excluded from the trial due to illness. The pigs were fed ad libitum on a wet feeder including two nipple drinkers (Figure 4.1a). In addition, water was supplied with a nipple drinker placed across the feeder. A cotton rope was offered as enrichment material and was exchanged once a week. In order to test the usefulness of PIR to assess behavioral interactions with a novel object in the form of an unknown enrichment material, at the end of the fattening on day 89, the rope was exchanged for an unknown object. This consisted of a combination of wood, metal chains, and plastic tubes.

4.2.2 Passive Infrared Detector and Functional Areas within the Pen

In total six PIDs were installed at a height of 1.36 to 1.76 m to measure the activity in five different functional areas plus the overall activity of the animal group itself. The observed focus areas were divided into their functions: the feeding area, the drinking area, the exploration area with enrichment material, the resting, and the elimination area (Figure 4.1). The PID (item no. 1362922, renkforce, Conrad Electronic SE, Hirschau, Germany) selected for this study provides an analogous signal. Due to modification of the detector signal, the activity is not displayed and stored in volts, but directly converted into a percentage. A voltage around 1 V corresponds to the resting state of the PIDs and an activity level of 0%, while a voltage of 10 V corresponds to an activity level of 100%. The basic voltage, which also differs between identically constructed sensors, was taken into account in order to compare the sensors independently. Beyond that, the PIDs have been equipped with a signal light for quick and easy testing of the functional readiness or to adjust the focus to specific areas. The measuring data were stored every minute by a data logger (ALMEMO®, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany).

In accordance with the manufacturer's specification, the PID has a detection angle of 360°. When mounted in a height of 2.50 m, it is able to detect movements in a distance up to 16.00 m. The range could be also affected by the mounting height, the temperature difference between the body and the background, the distance and size of the moving body, and by the intensity of movement.

In order to exclude certain areas from the detection or rather to focus the detector accurately, the lens can be partly covered as shown in Figure 4.2.

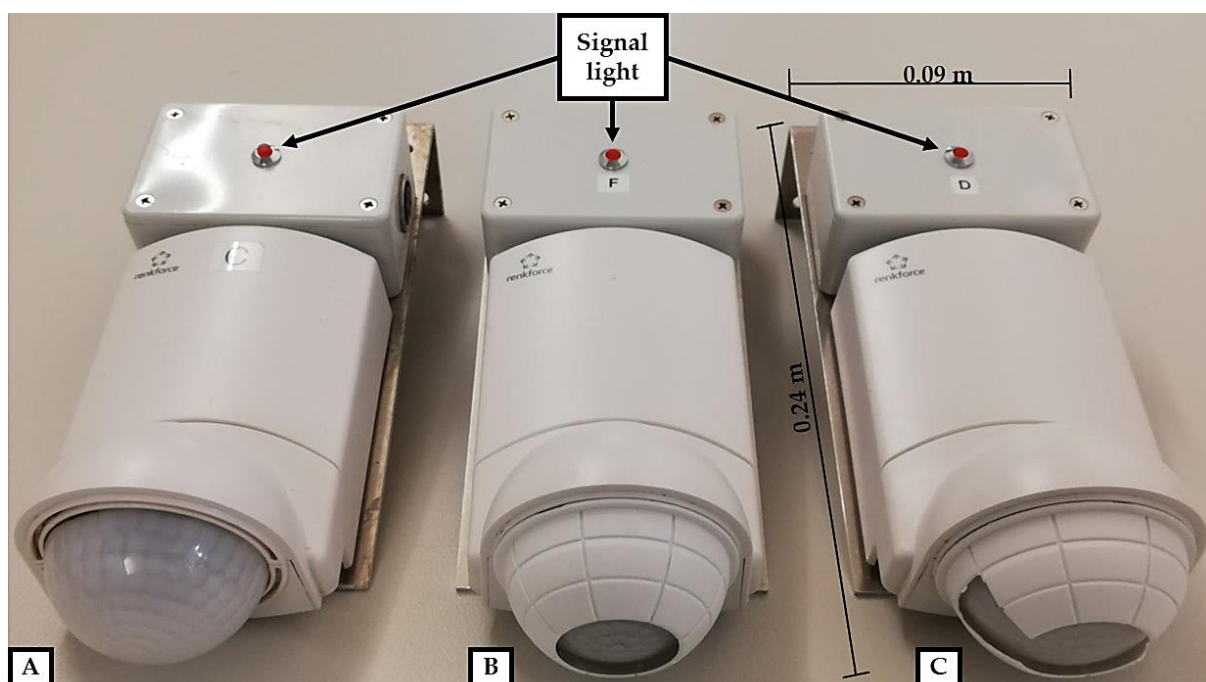


Figure 4.2 Passive infrared detectors with open (A), largely covered (B), and sector-wise covered (C) lens and signal light for functional testing.

4.2.3 Visual Assessment as Reference Method

In order to evaluate activity data from the PID, the behavior of animals was recorded by video cameras for visual assessment. Two dome cameras were mounted on the compartment ceiling on both sides of the pen (see Figure 4.1b). Infrared radiators were installed underneath the cameras to be able to evaluate the behavior also at twilight or in darkness.

In contrast to the continuous recording of activity by the PID, the recording of behavior by cameras was done for certain focus days. To get a good overview of the entire fattening cycle, two control days were chosen at the beginning (fattening day 12 and 35), four in the middle (fattening day 40, 47, 61, and 68) and four days at the end (fattening day 75, 82, 89, and 96). The video material obtained was analyzed by assessing still frames in 10-min intervals over 24 h using a scan sampling method. Thus, 144 frames were analyzed per day. In order to be able to judge whether animals are moving, the still frames were also viewed one second before and one second after the frame. The behavior of the animals was generally divided into “inactive” or “active”. The inactive behavior was exclusively assigned to lying; active behavior, however, was

further subdivided into standing, sitting, locomotion, drinking, eating, excretion, and exploration of enrichment material (Table 4.1).

Table 4. 1 Allocation and definition of the observed behavior.

General Division In	Subtype	Description	Place-Bound Behavior Assessment?
Inactive	Lying	Pig lying in prone or lateral position without performing any activity	No
	Standing	Pig stays longer than 1 sec on the spot, the floor is only touched with the feet and possibly the snout	No
	Sitting	Forefeet and hindquarters of the pig have ground contact at the same time	No
	Locomotion	Movement at any speed and in any direction	No
	Excretion	Pig urinates and/or defecates	No
Active	Drinking	Pig is in a standing or sitting position and has the nipple drinker in its mouth	Yes, nipple drinker/drinking area
	Eating	Pig is in standing or sitting position at the feeder and keeps its muzzle in the trough	Yes, wet feeder/feeding area
	Exploration of enrichment material	Pig chews, bites, licks, drags or works with its snout on the enrichment material (regardless of body position)	Yes, enrichment material/exploration area

Drinking, eating, and exploration behavior was only classified as such if it was recorded in certain areas. For example, drinking was only classified as such at the separate nipple drinker and not at the ones in the trough. The level of activity was determined in percentage as the number of pigs per behavior in relation to the total number of animals. The overall activity arose from the sum of all single behavior patterns besides lying.

The visual assessment was performed by a single observer who was trained on the basis of the exact description of the defined behavioral subtypes (see Table 4.1) and video material independent of the experiment to avoid interpretation errors.

4.2.4 Climate Measurements

In addition to activity, important indoor environment parameters were recorded. To measure NH₃ concentration in the stable air, one Polytron C300 (Dräger, Lübeck, Germany) equipped with an electrochemical gas sensor (DrägerSensor© NH₃ AL; accuracy according to manufacturer: 1.5 ppm or ± 10% of the measured value) was installed in the middle of the pen at a height of 1.47 m. The data were stored every minute on a second data logger (ALMEMO®, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Germany). Air temperature and relative humidity were measured with a Tinytag (Gemini Data Loggers Ltd., West Sussex, United Kingdom), which was also installed in the middle of the pen at a height of 1.86 m. The sensor stored the data in 10-min intervals.

In order to identify days with potential heat stress for fattening pigs, the Temperature Humidity Index (THI), or rather the THI_{NOAA} according to the definition of Vitt et al. [32] as a quantification parameter, was calculated with the subsequent equation:

$$THI_{NOAA} = 0.81 T_{DB} + 46.3 + R / 100 (T_{DB} - 14.3) \quad (1)$$

where dry bulb temperature T_{DB} (= air temperature T), relative humidity R (%).

Following Vitt et al. [32] and St-Pierre et al. [33], a value of ≥ 72 was chosen as threshold with economic impact on fattening pigs.

4.2.5 Processing of Data and Statistical Analysis

Due to technical problems, no sensor data could be generated for fattening days 49 to 59.

The available data were checked and corrected or invalidated when necessary due to signal interference of the detectors or other reasons. SPSS Statistics 25 (IBM, New York, NY, USA, 2017) was used to analyze the data. The distribution of data was tested with the Kolmogorov–Smirnov test. The quality of the linear relationship between the PID data and the visual assessment was verified using Spearman–Rho for not normally distributed data. The assessment of the strength of the effect—the effect size—of the determined correlations was carried out using the classification by Cohen [34]. The PID data were analyzed descriptively. For better representation and smoothing in graphics, the PID data recorded every minute were processed by calculating moving average values. In addition, the valid sensor data were averaged every 60 min and

summarized for specific phases or time periods according to the respective question. The quality of the linear relationship between the corresponding variables of these “average days” thus obtained for each phase was verified using Spearman–Rho for not normally distributed data as well.

4.3 Results

4.3.1 Comparison between PID and Visual Assessment

The comparison of the visually recorded and calculated activity during fattening as well as the PID data recorded at the corresponding times are listed in Table 4.2.

Table 4. 2 Statistical analysis for group activity as well as activity in the focus areas calculated by visual assessment and measured by passive infrared detectors (PIDs). One-hundred and forty-four data pairs were available for evaluation on each of the ten focus days.

(Focus) Areas and for this Area Expected or Rather Defined Behavior Measured with Corresponding PID vs. Visual Assessment	Fattening Day (with Visual Assessment)									
	12	35	40	47	61	68	75	82	89	96
Group PID + active behavior	0.87**	0.83**	0.85**	0.86**	0.84**	0.79**	0.78**	0.71**	0.80**	0.60**
Wet feeder PID + Eating	0.73**	0.70**	0.80**	0.80**	0.69**	0.71**	0.61**	0.76**	0.74**	0.62**
Nipple drinker PID + Drinking	0.30**	0.35**	0.17*	0.20*	0.26**	0.16	0.21*	0.15	0.24**	0.24**
Exploratory PID + Exploration	0.43**	0.59**	0.54**	0.24**	0.75**	0.36**	0.60**	0.57**	0.88**	0.47**
Resting PID + Lying	-0.80**	-0.79**	-0.83**	-0.79**	-0.76**	-0.70**	-0.73**	-0.65**	-0.70**	-0.47**
Elimination PID + Excretion	0.28**	-	0.19*	0.24**	0.24**	0.08	0.31**	0.14	0.12	0.12

* $p < 0.05$ and ** $p < 0.01$.

For the measurement of activity by PID for the group activity, the activity at the trough, in the exploration area as well as in the resting area, strong correlations could be found compared to the visual assessment. In addition, the correlation between PID data for

group activity and corresponding visual assessment seems to decrease over the course of fattening from $r = 0.87$ to 0.60 . For the measurement of activity using PID at the nipple drinker and in the elimination area, often only significant correlations with low or medium effect strength could be detected.

Furthermore, the focus days were divided into calmer and more active phases depending on the measured average activity values of group PID and visual assessment (Figure 4.3).

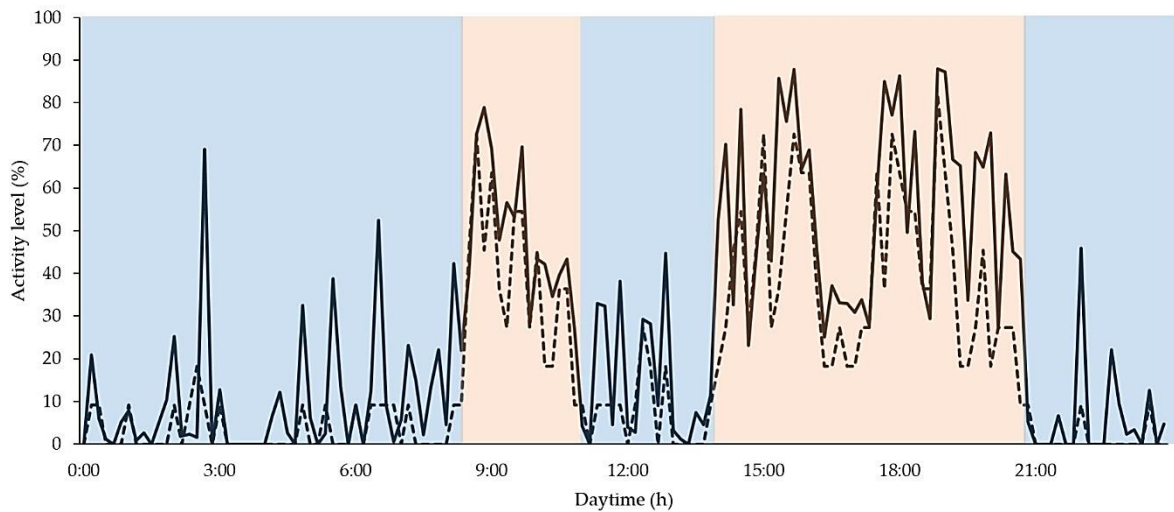


Figure 4.3 Group activity quantified on fattening day 47 using PID (continuous line) and visual assessment (dashed line) as well as exemplary division in calmer (blue background) and more active (orange background) phases.

In the statistical evaluation, no major difference in the strength of the effect for the correlation between PID and visual assessment could be found in dependence of the considered two phases, calm and more active, over all focus days ($r = 0.54$, $p = 0.00$, $n = 848$ and $r = 0.56$, $p = 0.00$, $n = 592$, respectively).

All focus days considered, the analysis shows that the PIDs generally overestimate activity (as derived from passive infrared activation), as compared to visual assessment of activity (as can be seen in Figure 4.3).

4.3.2 PID Combined with Behavioral Analysis

4.3.2.1 Development of Group Activity over the Course of Fattening

Recording the animals' activity over the entire fattening cycle provided the opportunity to illustrate the development of activity. As shown in Figure 4.4, the daily rhythm and the intensity of the animals' activity change over the course of the fattening period.

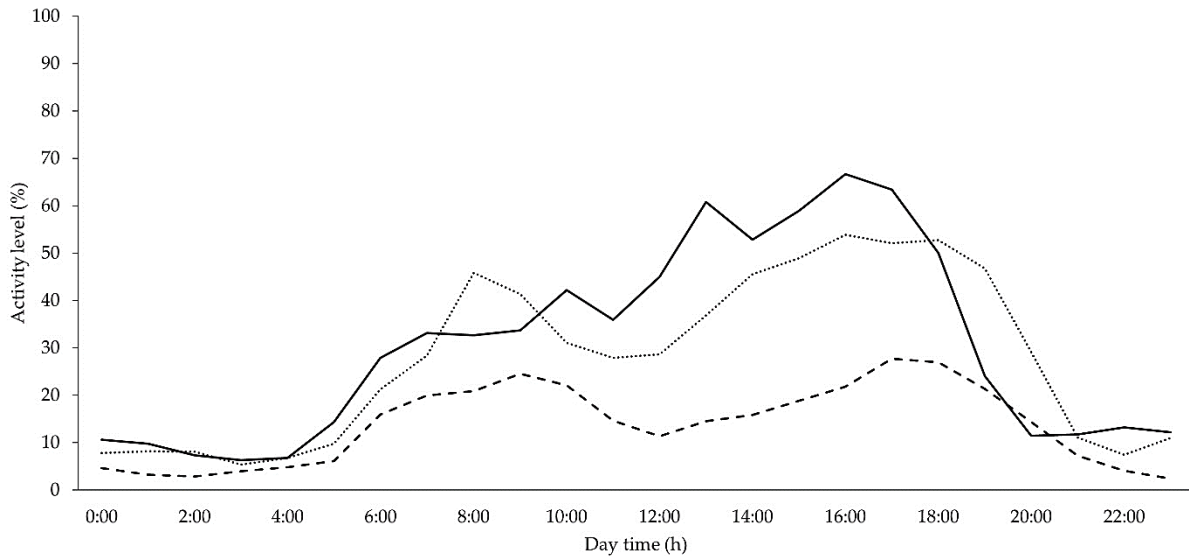


Figure 4.4 PID data on changes in group activity level dependent on daytime and fattening phase (continuous line = until fattening day 19, dotted line = fattening day 20–70 and dashed line = from fattening day 71).

In the case of the very young fattening pigs until fattening day 19, the overall activity level was high for the whole day with a number of peaks, the highest in the afternoon. Over time and starting approximately from the 20th fattening day, an activity profile evolves with one main peak in the morning and another, longer one in the afternoon, as well as resting periods at night and between daytime peaks. A biphasic course has adjusted. The type of activity or (defined) behavior shown by the animals does not differ between morning and afternoon peak. In the intermediate phase of the fattening period, the total activity level remained high. There was generally much less activity at night than during the day. During the course of fattening, the activity level decreased with increasing age and weight of animals. Toward the end of fattening, the biphasic pattern was yet visible, but the level of activity was noticeably reduced. Video analysis gives the impression that the younger fattening pigs generally move more, as well as

faster and more erratically, although the data were not statistically analyzed to validate this observation. In addition, there was more free space available to them in relation to their body size.

4.3.2.2 Use of Different Enrichment Material

Using PID in the exploration area, the utilization and attractiveness of enrichment material could be recorded and assessed. In general, activity in the exploration area decreased significantly over the course of fattening ($r = -0.79$, $p = 0.00$, $n = 93$). Toward the end of the fattening period, if the pigs were offered a fresh cotton rope, interest increased at first in contrast to the older one but decreased relatively quickly after offering as shown in Figure 4.5. However, the same figure illustrates that the interest in a new and unknown object is higher from the beginning and lasts longer.

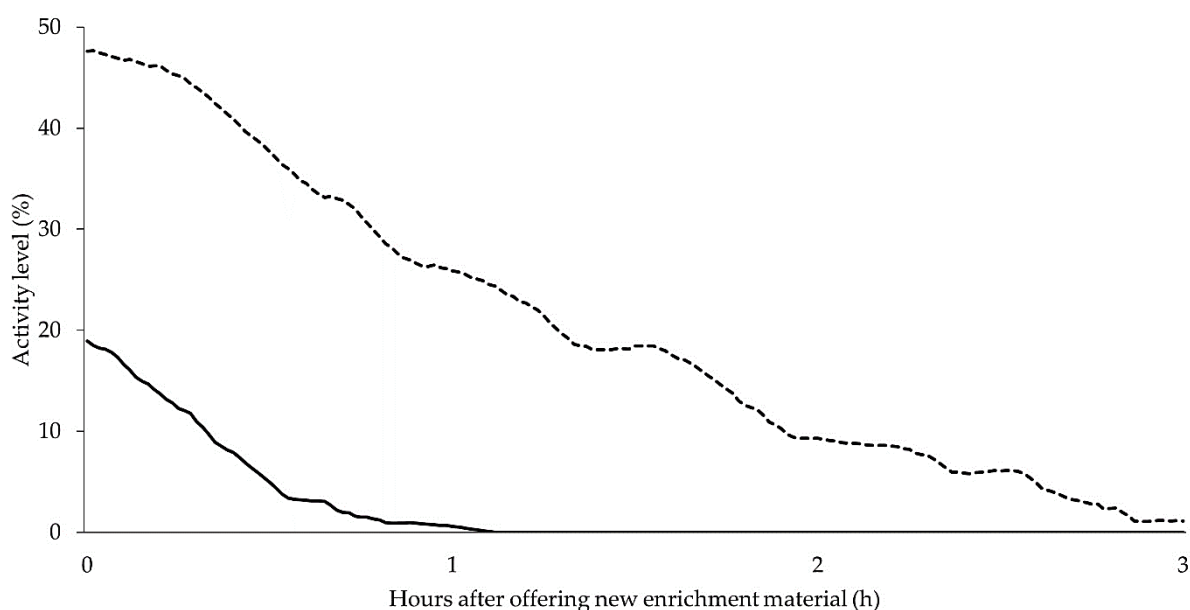


Figure 4.5 PID data on course of use and attractiveness of enrichment material after offering: well-known cotton rope (continuous line) versus unknown wooden toy (dashed line) at the end of the fattening.

Comparing the activity course of two whole days with different enrichment materials, the result was as follows: although the animals generally become more inactive with increasing age and weight, the supply of an unknown wooden toy at the end of the fattening period can considerably increase use (Figure 4.6).

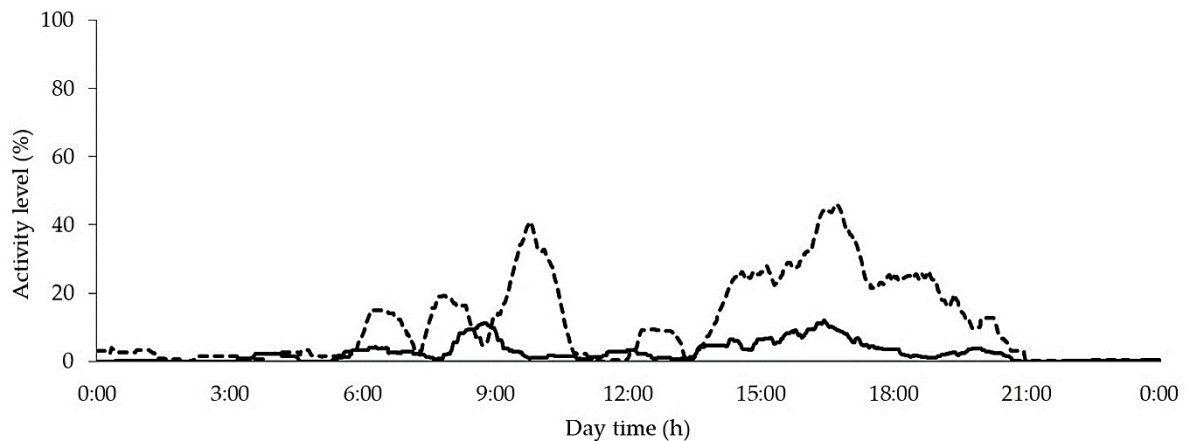


Figure 4.6 General course of exploration measured by exploratory PID during the day with two activity peaks as well as comparison between well-known cotton rope (continuous line) versus unknown wooden toy (dashed line) with one-week interim.

The agreement of the exploratory PID data with visual assessment showed that the measured activity was indeed employment behavior. The significant correlations for the day with the cotton rope and the wooden toy was $r = 0.57$ ($p = 0.00$, $n = 144$) and $r = 0.88$ ($p = 0.00$, $n = 144$), respectively. The activity level measured by the detector for the wooden toy was on average about 14% higher than for the cotton rope.

As well as in the assessment of group activity, the use of enrichment material had its peaks in the morning and afternoon, while the activity in the afternoon was more pronounced.

4.3.3 PID Combined with Climate Analysis

4.3.3.1 Indoor Climate

Over the whole test period, the average temperature and relative humidity measured above the focus pen was $21.47\text{ °C} \pm 3.29$ and $50.99\% \pm 8.24$. NH_3 concentration was on average $12.05\text{ ppm} \pm 6.94$.

As shown in Figure 4.7, NH_3 concentration increased significantly throughout the fattening period ($r = 0.77$, $p = 0.00$, $n = 93$).

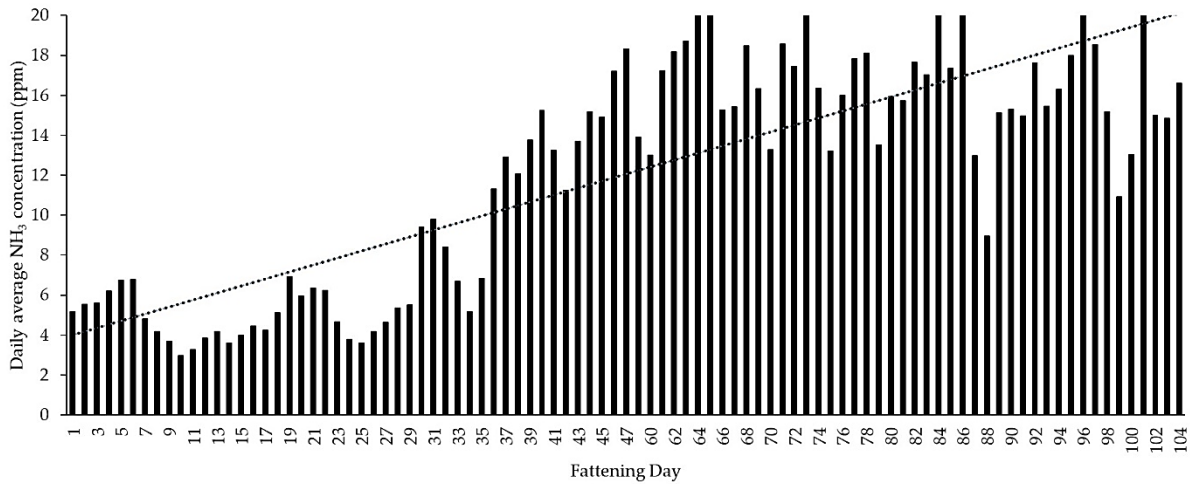


Figure 4.7 Statistical relationship between fattening days and daily average NH₃ concentration ($n = 93$) measured above the focus pen. Significant increase ($r = 0.77$; trend line see dotted line) in NH₃ concentration over the whole fattening period.

4.3.3.2 Activity as a Function of THI

The results indicate that when pigs suffered from heat stress, they changed their behavioral pattern toward a reduction of activity (Figure 4.8).

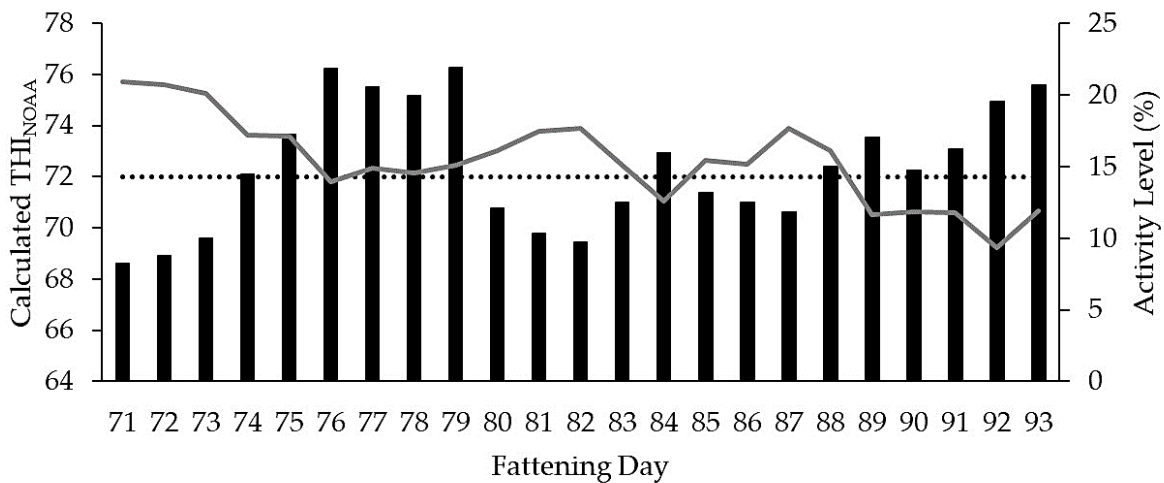


Figure 4.8 Comparison with reference to daily average values of the group activity measured by PID (continuous line) with the calculated THI_{NOAA} (bar chart) in consideration of a threshold ≥ 72 (dotted line). Only an extract of the fattening period with corresponding thresholds is presented.

For the total of 82 fattening days, during which all relevant data were available, a significant correlation between group PID as well as trough PID and THI_{NOAA} could be determined ($r = -0.80$ ($p = 0.00$, $n = 82$) and $r = -0.83$ ($p = 0.00$, $n = 82$), respectively). The available results indicate that the animals reduced not only their activity per se, but also the activity at the trough and thus the feed intake with increasing THI.

4.3.3.3 NH_3 Concentration Profile as a Function of Activity

For the sum of the evaluable data ($n = 128,561$), no relevant correlation between group activity and NH_3 concentration could be determined. If the available data are summarized in hourly averages and the entire measurement period is divided into two phases as they result from Figure 4.7—phase with low NH_3 concentrations ($\text{FD} < 35$) and phase with higher NH_3 concentrations ($\text{FD} \geq 35$)—no consistent correlation between group activity and NH_3 concentration can be found here either. However, there are considerable differences between the individual fattening days with regard to the context under examination. For example, there is no relevant correlation between the two parameters on fattening day 42 ($r = -0.01$, $p = 0.71$, $n = 1440$). For the following fattening day 43, however, a significant correlation of $r = 0.58$ ($p = 0.00$, $n = 1440$) can be demonstrated (see also Figure 4.9).

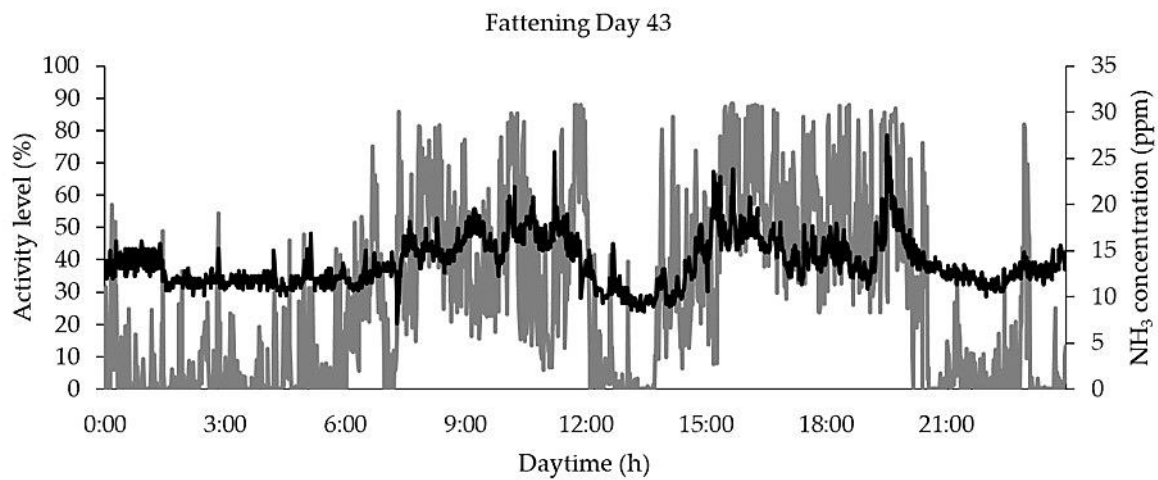
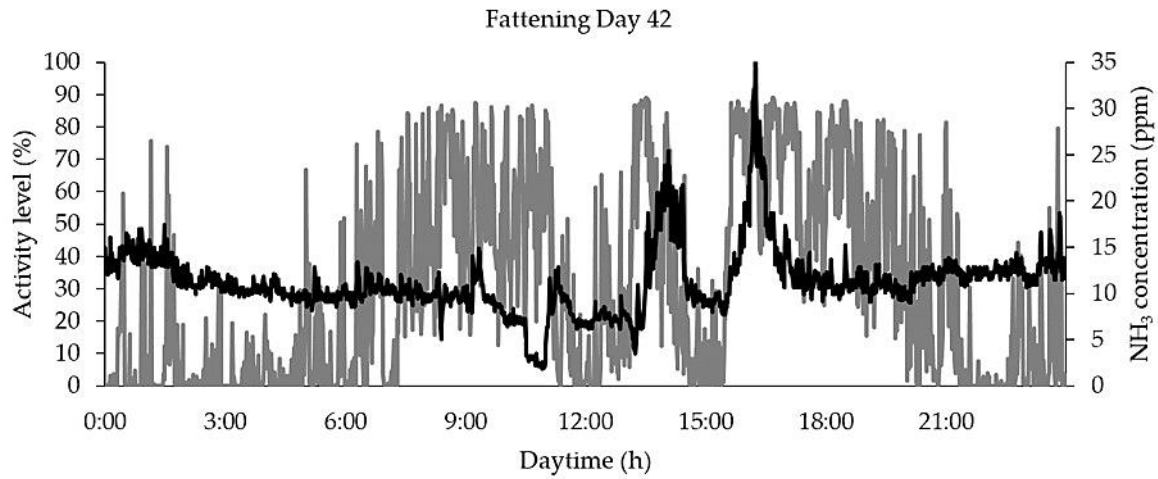


Figure 4.9 Graphical representation of the different relation between group activity measured by PID (grey line) and NH₃ concentration (black line) on fattening day 42 ($r = -0.01$, $p = 0.71$, $n = 1440$) and 43 ($r = 0.58$, $p = 0.00$, $n = 1440$).

4.4 Discussion

4.4.1 Comparison between PID and Visual Assessment

The correlation between PID data and visual assessment with regard to the measurement of group activity was very strong with correlations from up to 0.87 (Table 4.2) and comparable to that of other studies despite differences in definition and assessment/scoring of behavior and activity [14,17,18].

For comparison, in Besteiro et al. [14], the correlation determined for the dataset was 0.86. This is comparable to the correlation of 0.92 determined by Ott et al. [5],

who compared automated video analysis of pixel changes with human observation of activity in pigs. Thus, the estimation of the group activity level is possible with both PID and automated video analysis [14]. Compared to the activity measurement by automated video analysis, however, the data evaluation and processing has so far been considerably simpler, and the activity measurement of PIDs is independent of the time of day or the available light, which can sometimes restrict video-based behavior evaluation.

Furthermore, in Puppe et al. [18], significant strong correlations between behavioral observation by an observer and the PID technique were found. In addition, it was shown that PID measures data more reliably in terms of objectivity, especially in situations where the observer's assessment is influenced more by expectations of certain events than by the actual events or behavior of the animals themselves [18]. In addition to the objectivity of PID, this technique also allows a largely undisturbed recording of behavior compared to direct observation, the costs of which are also higher for manpower and technical investment [17].

Comparing the correlations of the present study between group PID data and visual assessment over the 10 focus days, a decreasing comparability with proceeding fattening could be determined, as was also found by Besteiro et al. [14]. They justified this correlation with higher and more homogeneous temperatures with increasing live weight of the animal, which presumably influences PID measurement based on temperature differences [14]. However, in comparison to the results of Besteiro et al. [14], no significant differences in the strength of the correlation between calm and more active phases could be found in the present study. The differences may be due to the fact that the day itself was not strictly divided into night and daytime in the present study, but the phases were divided into rest and activity phases depending on the measured activity. Thus, for example, resting phases during day and night were combined for the correlation analysis; on the other hand, (total) activity was not classified exclusively via feeding and playing behavior as in Besteiro et al. [14]. Other behaviors, such as undirected sitting or standing, which also influence the PID signal strength, may have been less frequent at night than during the day and thus led to stronger correlations between visual assessment and PID in Besteiro et al. [14].

Comparable to the results of Besteiro et al. [14], the present experiment also showed that PIDs generally overestimate activity (as derived from passive infrared

activation), as compared to the visual assessment of activity. A possible reason might be that the detector measured the intensity of activity, while the human observer determined activity by the number of animals that pursued a behavior except lying. Because the single behaviors of an animal did not always trigger the same level of activity, the detector received impulses of varying intensity. Therefore, the PID method was more sensitive than human observation and visualized the actual level of activity more precisely.

4.4.2 PID Combined with Behavioral Analysis

In general, activity data of the group PID show a circadian rhythm, which is considered as typical for pigs and which has already been described in other studies, partly also by PIDs [3,14,15,35–37]. In the course of fattening, an activity profile emerged with two activity peaks, one in the morning and a more pronounced one in the afternoon. Between these two activity peaks during the day and in the evening and night hours, resting phases can be observed, which are only partially interrupted by individual animals rising to drink or to change their position. Other studies have also described that a certain circadian rhythm is formed or consolidated over time, which is then maintained until the end of the observation period [3,15,35]. As in other studies, at the end of the experimental phase, a biphasic rhythm with two peaks per day was observed [3,15,38,39], which in Hillmann et al. [35] was also found in the context of salivary cortisol measurement—a parameter for stress and non-stress-related physiological action with effects on animal welfare [40]. As with Saha et al. [38] or Ni et al. [15], in the present experiment, the second daily peak in the afternoon proved to be more intensive and/or longer-lasting than the morning peak.

Based on the knowledge about the activity profile typical for pigs in general and about the individual profile of the pen or the compartment depending on feeding management or similar, in future, the PID data could be used as a basis for early warning systems in case of deviations. Changes in resting and activity phases—be they related to course, frequency or intensity—could provide important information on animal welfare. For example, changes in the typical daily rhythm and a reduction in activity in general could appear in the case of disease [41] as well as triggered by heat stress [42]. The latter is also indicated by our own results of reduced activity in general and at the trough with increasing THI values (see Figure 4.8). In addition, changes in

the typical daily rhythm in the sense of an increase in activity could provide early warning of the outbreak of tail biting [28,29,43,44]. Furthermore, the activity data of a group of animals could be used for control purposes in order to observe the development of fights for establishing a social hierarchy [45] at the beginning of housing in or moving pigs. This could be used to monitor whether the frequency of fights decreases after usually a few days [46] and, when intensive phases of fighting occur during the day, which could be mitigated by the administration of additional enrichment material to reduce possible injuries to the animals. However, not only group-based activity data but also data related to specific focus areas such as trough or drinker can provide important information for the assessment of animal welfare. Therefore, the suitability of the PIDs for activity detection in certain functional areas was also investigated in the present experiment.

Due to strong correlations, the data of the PIDs in the resting, feeding, and exploration area of the pen in focus proved to be meaningful for the expected behavior corresponding to the specific functional area. The partly very weak correlations for the PIDs in the drinking and elimination area are probably mainly due to deficiencies in the position of the functional areas themselves and the dual use. Although an increased amount of space per animal compared to practice has already been implemented in order to allow the animals an improved division of the pen into separate functional areas, not all circumstances could be optimized for later evaluation. For example, the nipple drinker PID did not primarily record drinking animals or animals at the drinker, but frequently animals on their way from the elimination area to another functional area such as the trough area. Furthermore, the focused drinker was not the only source of water for the animals in this pen. As fattening progressed, an increase in the use of the drinker at the wet feeder was observed. Presumably, the animals use the possibility of increased water intake per unit of time at the feeder compared to the focused nipple drinker [25] in order to meet their increasing total water consumption rate during fattening [24]. This is because the nipple drinkers included in the wet feeder not only allow the animals to take in water directly, but also to fill the trough with it and thus take in water from an open surface, regardless of the current water flow rate.

Due to the good correlations between PID and visual assessment compared to drinking and elimination area, the activity data for the trough, exploration, and resting area in the focus pen could in future be directly included in the assessment of animal welfare.

The assessment of activity at the trough requires the following knowledge: Pigs are synchronous eaters [47], who also show a biphasic feed intake rhythm with two peaks when fed ad libitum [48]. Similar to the results of de Haer and Merks [48], the wet feeder PID data in the focus pen show a peak in the morning and a higher or rather longer-lasting peak in the afternoon. A changed feed intake behavior can have different influencing factors. On the one hand, temperature not only has an influence on water intake [26] but can also lead to a reduction in feed intake [42]. In the present experiment, a reduced activity at the trough was observed with increasing THI. Collin et al. [26] and Quiniou et al. [49] also describe a decrease in feed intake associated with a shorter daily consumption and ingestion time. A general shift in feed intake times during the course of the day [26] or a change in the daily number of meals [26,49] due to high ambient temperatures could not be observed. Another factor may be diseases that adversely influence activity at the trough and the appetite of animals [41]. As a third factor, the animal/feeding place ratio and therefore the competition for feed can also influence activity and the circadian pattern and thus indicate too much stress at feeding times. Thus, Nielsen et al. [50] showed differences in feeder occupation during the day depending on group size. As in the experiment, the feed intake was distributed over two peak periods, one in the morning and a second in the evening [50]. In contrast to the unchanged morning peak, in the afternoon, the feed intake was distributed over a longer period of time and partly extended into the evening hours when group sizes were increased [50]. Hyun and Ellis [51] also showed an increase in the proportion of time the feeder was occupied with increasing group size.

A decrease in activity on the enrichment material can also indicate deficiencies in husbandry or rather management. Play behavior in general is considered to be an important indicator of positive emotions and indicates welfare [1,52,53], as it is only expressed when all other needs are met and environmental conditions are ideal for the animal [1,54]. In the experiment itself, however, only the play with enrichment material was recorded and evaluated, not play behavior between conspecifics or other furnishings. A decreased activity in the exploration area was observed during the

course of fattening. In the experiment, the activity could be increased for a short time when changing the cotton rope as a generally already known material. However, if the pigs were offered a completely unknown item at the end of the fattening period, an increased duration of activity shortly after the addition and an increased activity during the course of the day in general was observed. The added value of the information the PID could provide by activity measurement in the exploration area is that the farmer is able to change the current material as soon as it loses its long-term attractiveness and it therefore no longer fully serves its purpose. Such a habituation to the offered material and thus a loss of attractiveness can occur very quickly within a few days [55].

Moreover, increase in activity on the enrichment material without having previously exchanged it could also indicate the outbreak of tail biting [27–29].

Overall, the results of the PIDs focused on specific areas confirm the statement of Besteiro et al. [14] that affixing and focusing of the PIDs is decisive for meaningful results [14]. Weak correlations for certain functional areas and corresponding behavior have already been determined by optimized pen design or space available per animal. Thus, testing the PIDs in functional areas under practical conditions should be the next important step to further investigations on the suitability of PIDs.

4.4.3 PID Combined with Climate Analysis

With regard to climate parameters, the focus of this study was primarily to investigate the relationship between NH_3 concentration and overall activity of the animal group. Taking into account the entire fattening period, the results show a clear correlation between NH_3 and the fattening day (Figure 4.7), as already shown by Aarnink et al. [30] or Jeppsson [56]. As the fattening progresses, the measured NH_3 concentration increases. The fluctuations or partly abrupt reductions as seen in Figure 4.7, for example, on fattening days 42, 88 or 99, are probably attributable to the ventilation or cleaning management, which was not recorded in this experiment. However, it turned out that the functional areas were used differently by the pigs depending on the air temperature inside the barn and the growing size of the pigs. With rising inside air temperatures, the animals increasingly lay down on the slatted floor. In addition, the elimination area was extended to the concrete floor area of the pen and thus to other functional areas (exploration and feeding area). The extension of the elimination area resulted in the animals also depositing feces and urine in the floor

area below the NH₃ sensor. To avoid heat stress and further pollution of pen and pigs by wallowing, in addition to increasing the ventilation rate, the solid areas were regularly cleaned with water. Especially the cleaning of the pen and thus the removal of feces probably led to this partly noticeable reduction of NH₃ concentration, which only lasted for a short time. A similar cause–effect relationship between cleaning and the reduction of NH₃ emissions was shown by Aarnink et al. [30].

A consistent correlation between NH₃ concentration during the course of a day and the animal activity on the basis of each individual fattening day of the fattening period [30,56] could not be proven in this study. Figure 4.9 shows how strongly the correlation between NH₃ and activity differs between two individual fattening days. While on fattening day 43, for example, the diurnal character of NH₃ concentration is clearly recognizable depending on the animal activity, a comparable correlation is not seen the day before. On the one hand, the proven higher correlation found by Jeppsson [56] could be attributable to the investigated deep litter system. On the other hand, NH₃ concentrations in the barn air are significantly influenced by a number of other factors (e.g., ventilation rate, outside air temperature, liquid manure management, cleaning management, and barn hygiene) [57–60], which unfortunately could not be measured and evaluated in this study.

The effects of increasing THI levels and thus of temperature and relative humidity on activity have already been described in the context of group and trough activity measurements. Nevertheless, the following should be pointed out in connection with the temperature: Air temperature above 28 °C should be avoided because it leads to heat stress for the animals [32]. Heat stress degrades animal welfare as pigs are not able to sweat to the appropriate extent and suffer from high temperatures [42]. To prevent these negative effects of temperature, the use of PIDs could help to recognize behavioral changes early and take countermeasures such as evaporative cooling with cooling pads [32] to improve animal welfare.

4.4.4 Outlook for Future Application Possibilities in Practice

Overall, it can be summarized that PIDs and the activity data they generate in combination with other information would meet the demand not only to determine the current welfare status as a monitoring system, but also to be able to indicate potential risks at an early stage [2]. PIDs can be used to monitor general behavioral changes

that may be related to factors or circumstances such as heat stress, disease or tail biting that may have a negative impact on animal welfare. However, further development of the output and analysis of PID data is needed to improve the usability and gain of information for the farmer. A meaningful processing and presentation with the help of, for example, algorithmic processing or supported by artificial intelligence is to be aimed at for practical use as well as the increased fusion of data from various sensors [61].

In future, low-cost and easy to handle PIDs could be used in two very different ways to complement and improve the assessment of animal welfare: for self-monitoring and as an on-farm consulting tool.

On the one hand, PIDs could be used for internal monitoring of livestock (even with large numbers of animals) to supplement continuous assessment with regard to animal-welfare-relevant indicators and precise documentation of so far mainly resource- and management-based indicators such as temperature, relative humidity or NH₃ concentration. In this way, appropriate animal welfare on farm can be more comprehensively evaluated and monitored by the animal owner themselves. As a decision support system, it can thus indicate changes in animal behavior at an early stage, to which the farmer can then react according to the situation, even before there is any actual impairment of animal welfare, e.g., through the outbreak of tail biting or heat stress. However, PIDs cannot and should not replace the daily visual inspection of animals by the farmer.

On the other hand, a profile of the group activity or the activity in certain focus areas obtained by the PIDs can also be used as a supplement to (already existing) animal welfare assessment protocols for evaluation or consultation in the context of a Weak Point Analysis. In addition to the usual resource- and management-based indicators, more attention is already being given to assessment using animal-based indicators. In addition to the assessment of health (using slaughter data) and the status quo assessment of phenotype (via BCS, manure on the body or the like) or behavior by novel object test, assessment of exploration behavior, etc., the behavior of animals could thus be incorporated even more meaningfully and above all much more objectively into the assessment of animal welfare by means of PIDs as a basic real time tool.

4.5 Conclusions

The experiment showed that PIDs are suitable for recording the activity of a group of fattening pigs in a pen. The activity profile obtained over the day, over a specific phase or over the whole fattening period allows initial conclusions to be drawn about resting, stress, and activity phases, which can be used combined with other factors to assess animal welfare. In addition, it was shown that activity profiles could be obtained in certain clearly definable areas of the pen such as the trough, the resting or the exploration area with the help of PIDs. The results of the present investigation based just on one pen indicate the following: These profiles in combination with each other and with further information on group activity as well as data on, for example, the temperature in the compartment can improve the assessment of the situation in the pen or barn and enable the farmer to react to behavioral changes at an early stage.

In future, low-cost and easily manageable PIDs should not only be used in the context of scientific questions but should also be used for operational self-monitoring of animal welfare or as part of an on-farm consulting tool. They can be used for an entire compartment, a pen or for specific, definable functional areas within the pen. Since in the present study, only one pen serves as the basis for the results of focusing PIDs, further investigations must show the extent to which stables or compartments and corresponding focus areas must be equipped with PIDs in order to be useful for the purpose of obtaining information and to be profitable at the same time.

Author Contributions

Conceptualization, N.v.J. and W.B.; Data curation, N.v.J. and A.W.; Formal analysis, N.v.J. and A.W.; Funding acquisition, W.B.; Investigation, N.v.J. and A.W.; Methodology, N.v.J., A.W., and W.B.; Project administration, W.B.; Resources, W.B.; Software, N.v.J.; Supervision, W.B.; Validation, N.v.J., A.W., and W.B.; Visualization, N.v.J., A.W., and M.S.K.; Writing—original draft, N.v.J. and A.W.; Writing—review and editing, M.S.K. and W.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

The study as a part of a project is supported by funds of the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) based on a decision of the Parliament of the Federal Republic of Germany via the Federal Office for Agriculture and Food (BLE) under the innovation support program (FKZ 2817902615).

Acknowledgments

The authors acknowledge and like to thank the educational and research center Frankenforst of the Agricultural Faculty of the Rheinische Friedrich-Wilhelms-University Bonn and its employees for their energetic support and care for the animals as well as the scientific workshop of the Institute of Agricultural Engineering for their great technical support.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

4.6 References

1. Boissy, A.; Manteuffel, G.; Jensen, M.B.; Moe, R.O.; Spruijt, B.; Keeling, L.J.; Winckler, C.; Forkman, B.; Dimitrov, I.; Langbein, J.; et al. Assessment of positive emotions in animals to improve their welfare. *Physiol. Behav.* **2007**, *92*, 375–397.
2. Blokhuis, H.J.; Jones, R.B.; Geers, R.; Miele, M.; Veissier, I. Measuring and monitoring animal welfare: Transparency in the food product quality chain. *Anim. Welf.* **2003**, *12*, 445–455.
3. Besteiro, R.; Arango, T.; Rodríguez, M.R.; Fernández, M.D.; Velo, R. Estimation of patterns in weaned piglets' activity using spectral analysis. *Biosyst. Eng.* **2018**, *173*, 85–92.
4. *Welfare Quality® Assessment Protocol for Pigs*; Welfare Quality Consortium: Lelystad, The Netherlands, **2009**.
5. Ott, S.; Moons, C.P.H.; Kashiha, M.A.; Bahr, C.; Tuytens, F.A.M.; Berckmans, D.; Niewold, T.A. Automated video analysis of pig activity at pen level highly correlates to human observations of behavioural activities. *Livest. Sci.* **2014**, *160*, 132–137.
6. Viazzi, S.; Ismayilova, G.; Oczak, M.; Sonoda, L.T.; Fels, M.; Guarino, M.; Vranken, E.; Hartung, J.; Bahr, C.; Berckmans, D. Image feature extraction for classification of aggressive interactions among pigs. *Comput. Electron. Agric.* **2014**, *104*, 57–62.
7. Oczak, M.; Viazzi, S.; Ismayilova, G.; Sonoda, L.T.; Roulston, N.; Fels, M.; Bahr, C.; Hartung, J.; Guarino, M.; Berckmans, D.; et al. Classification of aggressive behaviour in pigs by activity index and multilayer feed forward neural network. *Biosyst. Eng.* **2014**, *119*, 89–97.
8. Costa, A.; Ismayilova, G.; Borgonovo, F.; Viazzi, S.; Berckmans, D.; Guarino, M. Image-processing technique to measure pig activity in response to climatic variation in a pig barn. *Anim. Prod. Sci.* **2014**, *54*, 1075–1083.
9. Nasirahmadi, A.; Hensel, O.; Edwards, S.A.; Sturm, B. A new approach for categorizing pig lying behaviour based on a Delaunay triangulation method. *Animal* **2017**, *11*, 131–139.
10. Nasirahmadi, A.; Richter, U.; Hensel, O.; Edwards, S.; Sturm, B. Using machine vision for investigation of changes in pig group lying patterns. *Comput. Electron. Agric.* **2015**, *119*, 184–190.
11. Gronskyte, R.; Clemmensen, L.H.; Hviid, M.S.; Kulahci, M. Monitoring pig movement at the slaughterhouse using optical flow and modified angular histograms. *Biosyst. Eng.* **2016**, *141*, 19–30.
12. Kashiha, M.; Bahr, C.; Haredasht, S.A.; Ott, S.; Moons, C.P.H.; Niewold, T.A.; Ödberg, F.O.; Berckmans, D. The automatic monitoring of pigs water use by cameras. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *90*, 164–169.
13. Lao, F.; Brown-Brandl, T.; Stinn, J.P.; Liu, K.; Teng, G.; Xin, H. Automatic recognition of lactating sow behaviors through depth image processing. *Comput. Electron. Agric.* **2016**, *125*, 56–62.

14. Besteiro, R.; Rodríguez, M.R.; Fernández, M.D.; Ortega, J.A.; Velo, R. Agreement between passive infrared detector measurements and human observations of animal activity. *Livest. Sci.* **2018**, *214*, 219–224.
15. Ni, J.-Q.; Liu, S.; Radcliffe, J.S.; Vonderohe, C. Evaluation and characterization of Passive Infrared Detectors to monitor pig activities in an environmental research building. *Biosyst. Eng.* **2017**, *158*, 86–94.
16. Pedersen, S.; Pedersen, C.B. Animal Activity Measured by Infrared Detectors. *J. Agric. Eng. Res.* **1995**, *61*, 239–246.
17. Langbein, J.; Scheibe, K.M.; Eichhorn, K.; Lindner, U.; Streich, W.J. An activity-data-logger for monitoring free-ranging animals. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **1996**, *48*, 115–124.
18. Puppe, B.; Schön, P.C.; Wendland, K. Monitoring of piglets' open field activity and choice behaviour during the replay of maternal vocalization: A comparison between Observer and PID technique. *Lab. Anim.* **1999**, *33*, 215–220.
19. Nielsen, B.L.; Kjaer, J.B.; Friggens, N.C. Temporal changes in activity measured by passive infrared detection (PID) of broiler strains growing at different rates. *Arch. Geflügelk.* **2004**, *68*, 106–110.
20. Nielsen, B.L. Use of passive infrared detectors (PIDs) to monitor bursts of activity in groups of broilers. *Arch. Geflügelk.* **2003**, *67*, 42–44.
21. Von Wachenfelt, E.; Pedersen, S.; Gustafsson, G. Release of heat, moisture and carbon dioxide in an aviary system for laying hens. *Br. Poult. Sci.* **2001**, *42*, 171–179.
22. Blanes, V.; Pedersen, S. Ventilation Flow in Pig Houses measured and calculated by Carbon Dioxide, Moisture and Heat Balance Equations. *Biosyst. Eng.* **2005**, *92*, 483–493.
23. Pijpers, A.; Schoevers, E.J.; Van Gogh, H.; Van Leengoed, L.A.; Visser, I.J.; Van Miert, A.S.; Verheijden, J.H. The influence of disease on feed and water consumption and on pharmacokinetics of orally administered oxytetracycline in pigs. *J. Anim. Sci.* **1991**, *69*, 2947–2954.
24. Madsen, T.N.; Kristensen, A.R. A model for Monitoring the Condition of Young Pigs by their Drinking Behaviour. *Comput. Electron. Agric.* **2005**, *48*, 138–154.
25. Andersen, H.M.-L.; Dybkjær, L.; Herskin, M.S. Growing pigs' drinking behaviour: Number of visits, duration, water intake and diurnal variation. *Animal* **2014**, *8*, 1881–1888.
26. Collin, A.; Van Milgen, J.; Dubois, S.; Noblet, J. Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs. *Br. J. Nutr.* **2001**, *86*, 63–70.
27. Zonderland, J.J.; Schepers, F.; Bracke, M.B.M.; Den Hartog, L.A.; Kemp, B.; Spoolder, H.A.M. Characteristics of biter and victim piglets apparent before a tail-biting outbreak. *Animal* **2011**, *5*, 767–775.
28. Larsen, M.L.V.; Andersen, H.M.-L.; Pedersen, L.J. Can tail damage outbreaks in the pig be predicted by behavioural change? *Vet. J.* **2016**, *209*, 50–56.
29. Ursinus, W.W.; Van Reenen, C.G.; Kemp, B.; Bolhuis, J.E. Tail biting behaviour and tail damage in pigs and the relationship with general behaviour: Predicting the inevitable? *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2014**, *156*, 22–36.

30. Aarnink, A.J.A.; Keen, A.; Metz, J.H.M.; Speelman, L.; Verstegen, M.W.A. Ammonia Emission Patterns during the Growing Periods of Pigs Housed on Partially Slatted Floors. *J. Agric. Eng. Res.* **1995**, *62*, 105–116.
31. McGinn, S.M.; Flesch, T.K.; Chen, D.; Crenna, B.; Denmead, O.T.; Naylor, T.; Rowell, D. Coarse Particulate Matter Emissions from Cattle Feedlots in Australia. *J. Environ. Qual.* **2010**, *39*, 791–798.
32. Vitt, R.; Weber, L.; Zollitsch, W.; Hörtenhuber, S.J.; Baumgartner, J.; Niebuhr, K.; Piringner, M.; Anders, I.; Andre, K.; Hennig-Pauka, I.; et al. Modelled performance of energy saving air treatment devices to mitigate heat stress for confined livestock buildings in Central Europe. *Biosyst. Eng.* **2017**, *164*, 85–97.
33. St-Pierre, N.R.; Cobanov, B.; Schnitkey, G. Economic Losses from Heat Stress by US Livestock Industries. *J. Dairy Sci.* **2003**, *86*, E52–E77.
34. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed.; Lawrence Erlbaum Associates: Hillsdale, MI, USA, **1988**.
35. Hillmann, E.; Schrader, L.; Mayer, C.; Gygax, L. Effects of weight, temperature and behaviour on the circadian rhythm of salivary cortisol in growing pigs. *Animal* **2008**, *2*, 405–409.
36. Ingram, D.L.; Walters, D.E.; Legge, K.F. Variations in motor activity and in food and water intake over 24 h periods in pigs. *J. Agric. Sci.* **1980**, *95*, 371–380.
37. Fraser, D.; Phillips, P.A.; Thompson, B.K.; Tennessen, T. Effect of straw on the Behaviour of Growing Pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **1991**, *30*, 307–318.
38. Saha, C.K.; Zhang, G.; Kai, P.; Bjerg, B. Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room. *Biosyst. Eng.* **2010**, *105*, 279–287.
39. Ekkel, E.D.; Spoolder, H.A.M.; Hulsegge, I.; Hopster, H. Lying characteristics as determinants for space requirements in pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2003**, *80*, 19–30.
40. Ralph, C.R.; Tilbrook, A.J. Invited Review: The usefulness of measuring glucocorticoids for assessing animal welfare. *J. Anim. Sci.* **2016**, *94*, 457–470.
41. Hart, B.L. Biological Basis of the Behavior of Sick Animals. *Neurosci Biobehav Rev.* **1988**, *12*, 123–137.
42. Huynh, T.T.T.; Aarnink, A.J.A.; Verstegen, M.W.A. Reactions of pigs to a hot environment. In *Livestock Environment VII, Proceedings of the Seventh International Symposium, Beijing, China, 18–20 May 2005*; T. Brown-Brandl; American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MO, USA, **2005**.
43. Larsen, M.L.V.; Andersen, H.M.-L.; Pedersen, L.J. Changes in activity and object manipulation before tail damage in finisher pigs as an early detector of tail biting. *Animal* **2019**, *13*, 1037–1044.
44. Statham, P.; Green, L.; Bichard, M.; Mendl, M. Predicting tail-biting from behaviour of pigs prior to outbreaks. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2009**, *121*, 157–164.

45. Meese, G.B.; Ewbank, R. The establishment and nature of the dominance hierarchy in the domesticated pig. *Anim. Behav.* **1973**, *21*, 326–334.
46. Arey, D.S.; Franklin, M.F. Effects of straw and unfamiliarity on fighting between newly mixed growing pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **1995**, *45*, 23–30.
47. Hoy, S. Nutztierethologie; Eugen Ulmer KG: Stuttgart, Germany, **2009**; pp. 105–139.
48. De Haer, L.C.M.; Merks, J.W.M. Patterns of daily food intake in growing pigs. *Anim. Prod.* **1992**, *54*, 95–104.
49. Quiniou, N.; Dubois, S.; Noblet, J. Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight. *Livest. Prod. Sci* **2000**, *63*, 245–253.
50. Nielsen, B.L.; Lawrence, A.B.; Whittemore, C.T. Effect of group size on feeding behaviour, social behaviour, and performance of growing pigs using single-space feeders. *Livest. Prod. Sci* **1995**, *44*, 73–85.
51. Hyun, Y.; Ellis, M. Effect of group size and feeder type on growth performance and feeding patterns in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* **2002**, *80*, 568–574.
52. Reimert, I.; Bolhuis, J.E.; Kemp, B.; Rodenburg, T.B. Indicators of positive and negative emotions and emotional contagion in pigs. *Physiol. Behav.* **2013**, *109*, 42–50.
53. Held, S.D.E.; Špinka, M. Animal play and animal welfare. *Anim. Behav.* **2011**, *81*, 891–899.
54. Lawrence, A. Consumer Demand Theory and the Assessment of Animal Welfare. *Anim. Behav.* **1987**, *35*, 293–295.
55. Guy, J.H.; Meads, Z.A.; Shiel, R.S.; Edwards, S.A. The effect of combining different environmental enrichment materials on enrichment use by growing pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2013**, *144*, 102–107.
56. Jeppsson, K.-H. Diurnal Variation in Ammonia, Carbon Dioxide and Water Vapour Emission from an Uninsulated, Deep Litter Building for Growing/Finishing Pigs. *Biosyst. Eng.* **2002**, *81*, 213–223.
57. Janssen, J.; Krause, K.-H. Stallinterne Beeinflussung der Gesamtemissionen aus Tierhaltungen. *Grundlagen der Landtechnik* **1987**, *37*, 213–220. (In German)
58. Burton, D.L.; Beauchamp, E.G. Nitrogen Losses from Swine Housings. *Agricultural Wastes* **1986**, *15*, 59–74.
59. Ni, J.-Q.; Heber, A.J.; Lim, T.T.; Diehl, C.A.; Duggirala, R.; Haymore, B.L.; Sutton, A.L. Ammonia emission from a large mechanically-ventilated swine building during warm weather. *J. Environ. Qual.* **2000**, *29*, 751–758.
60. Ni, J.-Q.; Heber, A.J.; Cortus, E.L.; Lim, T.-T.; Bogan, B.W.; Grant, R.H.; Boehm, M.T. Assessment of ammonia emissions from swine facilities in the U.S.—Application of knowledge from experimental research. *Environ. Sci. Policy* **2012**, *22*, 25–35.

61. Ekwevugbe, T.; Brown, N.; Fan, D. A Design Model for Building Occupancy Detection Using Sensor Fusion. In Proceedings of the 2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST 2012), Campione d'Italia, Italy, 18–20 June 2012.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article (pages 73-105) is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

5 Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblicke

Im Rahmen der Dissertation und der Arbeit im Projekt *PigsAndMore* wurden verschiedenste Fragestellungen verfolgt und Untersuchungen durchgeführt, die im Wesentlichen die Erreichung folgender Ziele beabsichtigten:

- Entwicklung eines Beratungstools für die systematische und objektive Bewertung der Tierwohlsituation in Mastschweineeställen basierend auf der Bonitur haltungs-, ressourcen-, management- und tierbezogener Indikatoren sowie der Erhebung weiterer die Haltungsumwelt und das Tierverhalten betreffender Faktoren bzw. Indikatoren im Rahmen einer Screeningphase über mehrere Tage;
- Überprüfung der Messgenauigkeit und generellen Eignung von verschiedenen NH₃-Messgeräten, die zum Teil auch für das Screening in *PigsAndMore* eingesetzt wurden, im Rahmen von Untersuchungen auf Laborebene an einer eigens dafür konstruierten Gasmischanlage;
- Überprüfung von PIDs hinsichtlich ihrer Eignung zur validen und zuverlässigen Aufzeichnung der Aktivität einer Gruppe von Mastschweinen sowie der Aktivitätserfassung in bestimmten Fokusbereichen zur Nutzung im Rahmen der Screeningphase in *PigsAndMore*.

In den folgenden Unterkapiteln werden weitere Aspekte betrachtet und diskutiert, die nur zum Teil in den Journalbeiträgen erläutert werden und die auf der Projektarbeit und der Entwicklung eines auf vielen Faktoren und Indikatoren basierenden Tools zur Ermittlung der Tierwohlsituation basieren.

5.1 Qualitätssicherung und Tauglichkeitsprüfung von Ammoniakmessgeräten an der Gasmischanlage

Das Thema NH₃ bzw. NH₃-Emissionen vor allem aus der tierischen Erzeugung steht immer häufiger im Fokus aktueller Diskussionen und gewinnt stetig an Bedeutung. NH₃ wirkt sich entscheidend auf das Klima und die Umwelt aus. Als Quelle des klimarelevanten Gases N₂O und aufgrund seiner Relevanz für die Eutrophierung und Versauerung von Böden und Gewässern (U.S. EPA, 2004; Gerber et al., 2013) spielt es im Rahmen der aktuellen Klimakrise eine wichtige Rolle. Aber nicht nur als

emittierendes Gas, sondern bereits im Stall wirkt es schädigend und beeinflusst die Gesundheit von Mensch und Tier (Seedorf, 2013). Technologien sind deshalb gefragt, die die zuverlässige und kontinuierliche Überwachung von NH_3 und ganz generell der Luftqualität an sich gewährleisten können (EFSA, 2012). Die Kontrolle von NH_3 im Tierstall dient zudem der gesetzlichen Pflichterfüllung, da Konzentrationen von mehr als 20 ppm im Aufenthaltsbereich der Schweine nicht überschritten werden dürfen (TierSchNutzV, 2006).

Für die Messung von NH_3 stehen verschiedene Sensoren bzw. Messgeräte zur Verfügung. Die richtige Auswahl der Messtechnik, abgestimmt auf den geplanten Einsatzort und natürlich auch in Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Budget und der vorhandenen Expertise (Ni & Heber, 2008), ist von entscheidender Bedeutung und dient der Qualitätssicherung gewonnener Daten. Die in Studie 1 (von Jasmund et al., 2022) vorgestellte Gasmischanlage stellt auf Laborebene eine Möglichkeit dar, ganz generell die Messgenauigkeit unabhängig von den Herstellerangaben zu testen und darüber hinaus eine Art „Tauglichkeitsprüfung“ bzw. „Eignungstest“ durchzuführen. Gegebenheiten im Stall, die die Messgenauigkeit entscheidend beeinflussen können, sind an der Gasmischanlage simulierbar. So kann der Einfluss der relativen Luftfeuchte oder von Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen schon vor der eigentlichen Untersuchung im Stall untersucht und eingeschätzt werden und entsprechende Maßnahmen, wie der Wechsel zu einem anderen Messgerät oder auch die mathematische Nachkorrektur der Rohdaten erfolgen.

Wie sich in weiteren Untersuchungen an der Gasmischanlage zeigte, können auch Zusatzgeräte wie die Multipoint Sampler in Kombination mit den eigentlichen Messgeräten (in diesem Fall einem INNOVA 1412) getestet und einem Qualitätsmonitoring unterzogen werden. So können mögliche Fehler, wie das Ansaugen von Falschluf und die Verfälschung der eigentlichen Probeluft, erkannt werden.

Messgeräte und Sensoren sollten jedoch im Rahmen der Qualitätssicherung nicht nur vor Beginn einer Untersuchung getestet werden, sondern – wenn es die Messung zulässt – schon während eines Versuchs über mehrere Monate hinweg, zumindest aber nach Abschluss der gesamten Messperiode (von Jasmund et al., 2022). Dadurch kann das Driftverhalten ermittelt bzw. die Langzeitstabilität der Messgeräte und

Sensoren überprüft und die entsprechenden Kalibrierungsintervalle individuell angepasst werden (von Jasmund et al., 2022).

Weitere Modifikationen an der Gasmischanlage, wie sie in Studie 1 (von Jasmund et al., 2022) beschrieben werden, sollen die Gasmischanlage dahingehend optimieren, zukünftig noch zielgerichteter die Messgenauigkeit und Eignung von NH₃-Messgeräten oder anderer Gassensoren entsprechend des geplanten Einsatzortes (Rinder-, Geflügel- oder Schweinestall) zu überprüfen.

Bezogen auf die Messgeräte Polytron 8100 und C300 sowie den INNOVA 1412 sollen weitere Untersuchungen die Langzeitstabilität unabhängig von den Herstellerangaben und kontinuierlich durchgeführten Kalibrierungen überprüfen. Das gewonnene Wissen über das Messverhalten soll bei der Aus- und Bewertung der im eigentlichen Versuch ermittelten Daten berücksichtigt werden.

Ganz generell müssen jedoch zukünftig Normen und Standardmethoden (weiter-) entwickelt werden, die Begrifflichkeiten, Testungen auf Laborebene sowie Messmethoden und -verfahren in der Praxis und auch die Datenauswertung möglichst standardisieren (Ni & Heber, 2008). Dadurch soll die Messung und die Bewertung von Ergebnissen weltweit verlässlicher und vergleichbarer gemacht werden.

5.2 Eignung und Anwendungsmöglichkeiten für PIDs

Aufgrund der steigenden Tieranzahl pro Betrieb und pro Betreuungsperson ist die übliche Kontrolle des Tierverhaltens und der Aktivität durch visuelle Beobachtung wirtschaftlich unrentabel geworden (Rodríguez et al., 2020) und für alle Tiere schlicht kaum zufriedenstellend umsetzbar. Zudem wächst der gesellschaftliche Druck auf tierhaltende Betriebe, Tiergesundheit und Tierwohl sicher zu stellen und die entsprechenden Dokumentationen der Haltung und Ergebnisse der Beurteilung vorzuhalten (Besteiro et al., 2021). Technische Hilfsmittel und digitale Systeme können dabei helfen, die gesteigerten Anforderungen des Marktes und der Gesellschaft zu erfüllen und gleichzeitig die Versorgung und Überwachung der Tiergesundheit und des Tierwohls sicher zu stellen (Kashiha et al., 2013). PIDs können als solche genutzt werden und bieten sich an, da sie vergleichsweise kostengünstig, robust und flexibel einsetzbar und einfach zu bedienen sind und die gewonnenen Daten leicht verarbeitet und interpretiert werden können (von Jasmund et al., 2020; Besteiro et al., 2021).

Im Rahmen verschiedener Studien konnte die generelle Eignung der PIDs, die Tieraktivität von Schweinen zu erfassen, bestätigt werden (Pedersen & Pedersen, 1995; Blanes & Pedersen, 2005; Ni et al., 2017; Besteiro et al., 2018a, 2018b & 2021; von Jasmund et al., 2020). Darüber hinaus zeigte sich durch eigene Untersuchungen, dass auch in bestimmten Fokusbereichen, wie dem Trogbereich in der Bucht, die zuverlässige Aktivitätsmessung durch PIDs möglich ist (von Jasmund et al., 2020). Voraussetzungen für zuverlässige Aktivitätsmessungen in speziellen Buchtenbereichen sind 1) die möglichst exakte Fokussierung der PIDs, 2) die deutliche Abgrenzbarkeit des ausgewählten Fokusbereichs von anderen Bereichen in der Bucht und 3), dass entsprechendes, für den Fokusbereich spezifisches Verhalten wie „Trinken im Tränkebereich“ von den Tieren gezeigt wird (von Jasmund et al., 2020), da der Sensor nicht zwischen verschiedenen Verhaltensweisen unterscheiden kann (Ni et al., 2017).

Die PIDs überzeugen trotz der eher rudimentären Verhaltens- bzw. Aktivitätserfassung im Vergleich zu bildbasierenden Erfassungs- und Auswertungstechniken dank ihrer einfachen Handhabung, der Unabhängigkeit der Messung von vorherrschenden Lichtverhältnissen und den vergleichsweise geringen Kosten (Ni et al., 2017; Besteiro et al., 2018b; von Jasmund et al., 2020). Wird ein Sensor genutzt, um die Aktivität aller Schweine im gesamten Abteil zu messen, kann es jedoch zu Fehleinschätzungen der Gesamtsituation auf Basis der PID-Daten kommen. Generell neigen die PIDs dazu, die Aktivität im Vergleich zur visuellen Bewertung zu überschätzen (Besteiro et al., 2018a; von Jasmund et al., 2020). Der Unterschied zwischen PID-Aktivitätserfassung und visueller Aktivitätsauswertung könnte aber vor allem auf den sehr unterschiedlichen, die Aktivität von Tieren bewertenden Methoden basieren und für eine größere Sensitivität der PIDs im Vergleich zur menschlichen Einschätzung sprechen (von Jasmund et al., 2020). Zudem bietet die PID-Aktivitätserfassung eine zuverlässigere Objektivität im Vergleich zur Aktivitätsbewertung durch Beobachter (Puppe et al., 1999).

Darüber hinaus zeigte sich bei Besteiro et al. (2021) im Rahmen der Aktivitätserfassung mit nur einem PID in einem Abteil mit insgesamt 300 Ferkeln verteilt auf 12 Buchten, dass die generelle Aktivität der Tiergruppe bei aktiverem Verhalten überschätzt und bei mildereren Aktivitäten unterschätzt wurde. Diese Fehleinschätzung der Gesamtaktivität auf Abteilebene lässt sich zum einen durch die

Verringerung der Empfindlichkeit der PIDs mit zunehmender Entfernung erklären (Ni et al., 2017; Besteiro et al., 2021); zum anderen stören blinde Flecken die Aktivitätserfassung, die durch physische Hindernisse im Abteil sowie durch die Ausrichtung der PIDs selbst und dadurch begünstigte tote Winkel entstehen können (Besteiro et al., 2021). Ziel weiterer Untersuchungen zum Einsatz von PIDs zur Aktivitätserfassung großer Tiergruppen sollte es sein zu überprüfen, inwieweit die Gesamtsituation einer großen Tiergruppe mit nur einem oder wenigen PIDs erfasst werden kann und inwieweit die Gesamtaktivität auch die Aktivität der inaktivsten sowie aktivsten Tiere berücksichtigt und wiedergibt. Denn erste Anzeichen für Inaktivität aufgrund von Krankheiten oder Hitzestress, oder Anzeichen für verstärkte Aktivität aufgrund von Schwanzbeißen sollten im besten Fall nicht in einer „stabilen“ Grundaktivität untergehen, um als Tierhalter/-in möglichst schnell reagieren zu können. Aufgrund der vergleichsweise geringen Kosten bietet es sich jedoch gerade bei den PIDs im Vergleich zu einigen anderen technischen Hilfsmitteln an, diese nicht nur für jeweils ein ganzes Abteil, sondern buchtenweise und darüber hinaus fokussiert auf bestimmte Fokusbereiche je Bucht einzusetzen. So kann die Aktivität gezielter und gruppen- oder bereichsindividueller erfasst werden. Die Verknüpfung von Aktivitätsdaten unterschiedlicher PIDs in einer Bucht bzw. in einer Tiergruppe und im besten Fall in Kombination mit anderen Sensoren wie Temperaturfühler oder Wasseruhr könnten ein deutlich genaueres Gesamtbild der Tier(wohl)situation liefern und als Monitoringtool oder auch als Frühwarnsystem für Verhaltensänderungen und zur Risikoeinschätzung dienen. Beispielhaft zeigt Abbildung 5.1, wie die Verknüpfung und Interpretation verschiedener bereichsspezifisch erfasster Aktivitäten bei der Früherkennung von Problemen und das Tierwohl negativ beeinflussenden Umständen, wie sie in der Literatur beschrieben werden, helfen könnte.

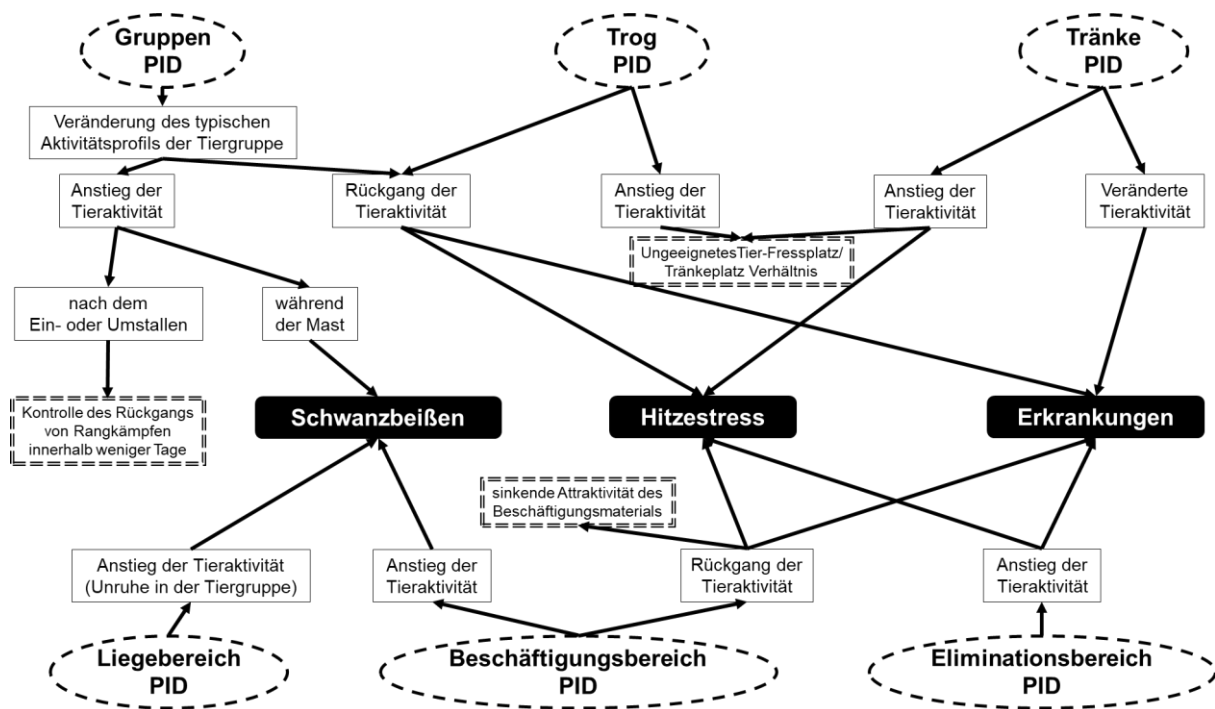


Abbildung 5.1 Übersicht möglicher Umstände, die das Wohlbefinden von Schweinen negativ beeinflussen können, sowie mögliche, durch PIDs detektierbare, indikative Verhaltensänderungen.

So kann die Erfassung und Bewertung der Gruppenaktivität zur Kontrolle der Entwicklung von Rankämpfen in den ersten Stunden und Tagen nach dem Ein- oder Umställen (Meese & Ewbank, 1973) dienen und die Situation gegebenenfalls durch die Gabe von zusätzlichem Beschäftigungsmaterial entschärft werden. Die Bewertung und Verknüpfung von bereichsspezifischen Aktivitätsdaten könnte jedoch auch während der gesamten Aufzuchtphase oder Mast entscheidend zur Früherkennung bzw. Risikoeinschätzung von Schwanzbeißen, Hitzestress oder dem Ausbruch von Krankheiten beitragen. Basis der vorliegenden Überlegungen sind hauptsächlich im Rahmen anderer Studien gewonnene Informationen zur Verbindung zwischen dem Tierverhalten und den genannten Umständen wie Schwanzbeißen. Dieses oder frühe Anzeichen für den Ausbruch von Schwanzbeißen äußern sich beispielweise in einem Anstieg der generellen Tieraktivität (Statham et al., 2009; Ursinus et al., 2014; Larsen et al., 2016 & 2019) und erhöhter Unruhe sowie erhöhter Aktivität im Liegebereich (Zonderland et al., 2011) oder auch der intensiveren Nutzung und Manipulation von Beschäftigungsmaterialien (Zonderland et al., 2011; Ursinus et al., 2014; Larsen et al., 2016). Generell ist die Nutzung des Beschäftigungsmaterials als Form von Spielverhalten ein wichtiger Indikator für Wohlbefinden und positive Emotionen

(Boissy et al., 2007; Held & Špinka, 2011; Reimert et al., 2013) und kann zur Bewertung und Einschätzung des Tierwohls entscheidend beitragen. So kann die Aktivitätsmessung in Buchtenbereichen mit Beschäftigungsmaterial dazu genutzt werden, um Rückschlüsse auf die Attraktivität des angebotenen Materials zu ziehen (von Jasmund et al., 2020). Verliert das Material seinen Reiz, erfüllt es nicht mehr vollumfänglich seinen Zweck. Eine reduzierte bzw. veränderte Aktivität kann den tierbetreuenden Personen dann als wichtige Information dienen, um den richtigen Zeitpunkt für den Wechsel des Beschäftigungsmaterials zu wählen (von Jasmund et al., 2020). So könnte in einem Betrieb ein Pool unterschiedlichster Materialien zusammengestellt und das Angebot in der Bucht abgestimmt auf die Dauer seiner gruppenabhängigen, individuellen Attraktivität ausgetauscht werden.

Ein weiterer, das Tierwohl negativ beeinflussender Umstand ist Hitzestress. Dieser verändert die Aktivität der Tiere in dem Sinne, dass die Gesamtaktivität der Tiergruppe sinkt (Huynh et al., 2005; von Jasmund et al., 2020) sowie die Aktivität am Trog (Huynh et al., 2005; von Jasmund et al., 2020) aufgrund der reduzierten Futteraufnahme (Quiniou et al., 2000; Collin et al., 2001). Die Wasseraufnahme – und vermutlich mit ihr die Aktivität an der Tränke – steigt hingegen bei Hitzestress (Collin et al., 2001) sowie möglicherweise die Aktivität im Eliminationsbereich aufgrund des vermehrten Suhlens in Exkrementen zur Abkühlung.

PIDs könnten auch dazu genutzt werden, frühzeitig mögliche Risikoindikatoren zu identifizieren und so den Ausbruch von Krankheiten abzuschätzen, um entsprechend reagieren zu können. Denn im Krankheitsfall ändert sich das Trinkverhalten (Pijpers et al., 1991; Madsen & Kristensen, 2005; Andersen et al., 2014) und die Gesamtaktivität (Hart, 1988) sowie die Aktivität am Trog reduzieren sich aufgrund von Appetitlosigkeit (Hart, 1988), während sich die Nutzung des Eliminationsbereiches beispielsweise bei Durchfallerkrankungen möglicherweise erhöht.

Darüber hinaus kann die Aktivität an Trog und Tränke auch als Indikator für ein geeignetes oder ungeeignetes Tier-Fressplatz- bzw. Tier-Tränkeplatz-Verhältnis genutzt werden. Mit steigender Gruppengröße und dem Anstieg der Konkurrenz zwischen den Tieren um die Ressourcen kann es zu erhöhtem Stress, Kämpfen und Verhaltensanpassungen kommen. Diese können sich auch in einer veränderten Aktivität und einer Veränderung der Fressphasen niederschlagen (Nielsen et al., 1995;

Hyun & Ellis, 2002) und möglicherweise zu einer Reduzierung oder dem Ausbleiben von Ruhephasen führen.

Die Sensordaten der PIDs in Form von Aktivitätskurven allein sind jedoch nicht ausreichend, um schnell und zielgerichtet reagieren zu können. Es bedarf einer intelligenten und sinnvollen Datenaufbereitung und Ergebnisdarstellung sowie einer Verknüpfung der Ergebnisse zwischen PIDs mit anderen Sensordaten, um das volle Potential solcher technischen Hilfsmittel im Stall auszuschöpfen. Da die das Verhalten und die Aktivität beeinflussenden Faktoren sehr vielfältig und darüber hinaus stark vom Betriebsmanagement abhängig sind, erscheint eine Standardisierung von Aktivitätskurven beispielsweise für den Tagesrhythmus zur einfacheren Beurteilung und besseren Vergleichbarkeit (auch zwischen Betrieben) kaum sinnvoll oder schlicht nicht möglich (Besteiro et al., 2021). Unter Zuhilfenahme von Algorithmen und Künstlicher Intelligenz sollten zukünftige Bemühungen darin liegen, die Aktivitätsdaten von PIDs soweit zu verarbeiten, dass betriebs- oder gruppenindividuelle Kurven erzeugt werden, die intelligent, kontinuierlich und über die Zeit miteinander verglichen werden können. Ziel sollte es sein, dass dadurch eigene, spezifische Parameter und Indikatoren als Basis für die Tierwohlbewertung erzeugt werden. So könnten kurzfristige oder auch schleichende Veränderungen des Verhaltens erkannt und in den Gesamtkontext auch unter Einbeziehung der Managementmaßnahmen gestellt werden. Mögliche Ursachen und Risikofaktoren für den Ausbruch von Schwanzbeißen oder Krankheiten könnten dadurch besser identifiziert werden.

5.3 Multidimensionale, multifaktorielle und kontinuierliche Bewertung des Tierwohls

Die Themen Lebensmittelsicherheit, das Wohlergehen der Nutztiere während ihrer Haltung aber auch der Schutz der Umwelt stellen die größten Herausforderungen für die Tierhaltung in der Zukunft dar (Rodríguez et al., 2020) und werden weiterhin politisch wie auch gesellschaftlich intensiv diskutiert werden. Erzeuger sind daher gezwungen, verstärkt nicht nur eine hohe Qualität der Produkte selbst zu gewährleisten. Auch die Qualität der Haltungs- bzw. Produktionsbedingungen hinsichtlich des Wohlergehens der Tiere und der Auswirkungen auf die Umwelt sind zu berücksichtigen (Rodríguez et al., 2020) und gegebenenfalls auch zu dokumentieren und Behörden oder den Konsumierenden selbst darzulegen.

Die Digitalisierung bzw. die Nutzung technischer Hilfsmittel in der Tierhaltung, die rasant voranschreitet, bietet nicht nur das Potential, die Haltungsbedingungen und somit auch das Tierwohl und die Tiergesundheit zu verbessern. Ganz allgemein kann sie auch zu einer Optimierung der Managemententscheidungen von tierhaltenden Personen unter Berücksichtigung der Bewertung von Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit führen (Sturm et al., 2020). Die Digitalisierung kann sich somit positiv auf alle Bereiche der Produktionskette auswirken. Sie kann die Tierhaltung und das Management optimieren und gleichzeitig die Akzeptanz der Verbraucher/-innen durch mehr Transparenz fördern und dadurch die Zukunftsaussichten der Tierhaltung verbessern.

Der Einsatz technischer Hilfsmittel wie Messgeräte und Sensoren zur Erfassung tier- und haltungsbezogener Indikatoren bringt viele Vorteile bei der Bewertung des Tierwohls sowie der Verbesserung des Managements mit sich. Die Daten bzw. Indikatoren können zeitunabhängig und kontinuierlich über einen bestimmten Zeitraum im Sinne eines Screenings oder auch dauerhaft erhoben werden. Sie werden zunächst objektiv und erst einmal unabhängig von der Expertise, den Erfahrungswerten und Erwartungen der Tierhalter/-innen ermittelt und können später ausgewertet und miteinander verknüpft werden. Die starke Kostensenkung für Computertechnologien als auch für technische Sensorik hat die Verfügbarkeit und Nutzung gesteigert (Sturm et al., 2020). Aufgrund der gesunkenen Kosten können zukünftig sicher mehr Sensoren im Stall eingesetzt bzw. hochwertigere Technologien wie Kamerasysteme für die Erfassung auf Gruppenebene genutzt werden. Zudem könnten sinkende Anschaffungs- und Betriebskosten dazu führen, dass zukünftig bei Tierarten wie Schwein oder Huhn, deren individueller, wirtschaftlicher Wert eher gering ist, auch häufiger einzeltierbezogene Daten kontinuierlich erhoben werden. Dies könnte über tragbare Sensoren erfolgen, wie sie unter anderem in der Milchviehhaltung beispielweise bei der Nutzung von Accelerometern zur Lahmheitsfrüherkennung genutzt werden. Die kontinuierliche, tierindividuelle Erhebung und Auswertung von (Verhaltens-) Daten würde auch eher der gesetzlichen Pflicht (TierSchG), das Leben und Wohlbefinden eines jeden Tieres dauerhaft zu schützen, und der Einhaltung der *Five Freedoms* entsprechen, da stichprobenartige Kontrollen in Form von Eigenkontrollen oder Audits als Momentaufnahmen dies nicht leisten können. Zudem stellt die durch das TierSchG (§ 11) geforderte Pflicht an Nutztierhalter/-innen, intern

betriebliche Eigenkontrollen mittels geeigneter tierbezogener Merkmale durchzuführen, einen Interessenskonflikt dar. Denn es ist davon auszugehen, dass Tierhalter/-innen sich selbst kein schlechtes Zeugnis für ihre geleistete Arbeit ausstellen möchten basierend auf guter fachlicher Praxis.

Versteht man Tierwohl als komplexes und vielschichtiges Thema (OIE, 2021) bzw. Konzept, als nicht stagnierender, sondern sich im stetigen Wandel befindender Zustand, der durch viele Faktoren beeinflusst wird und dessen Verständnis und Bewertung zudem ganz subjektiv von eigenen Wertevorstellungen abhängt (Fraser, 2008), muss man eine möglichst multidimensionale und multifaktorielle, kontinuierliche Erhebung und ganzheitliche Bewertung des Zustandes und der Lebensumstände eines Tieres anstreben. Vor allem die Erhebung vom Tier ausgehender Signale – also tierbezogener Indikatoren – sollte das Ziel von Bewertungssystemen sein, um das Wohl des Tieres und seinen momentanen „Gemütszustand“ zu erfassen. Bei der möglichst objektiven Erfassung solcher Indikatoren wie Aktivität oder Liegeverhalten können Sensoren bereits eingesetzt werden und die Informationslage neben Temperaturerfassung, Wasserverbrauch oder ähnlichem ergänzen. Zukünftig werden sicherlich weitere Indikatoren erhoben werden können, die bisher jedoch noch keine Rolle spielen, da sie noch nicht bekannt oder weit genug erforscht sind oder noch nicht routinemäßig im Stall erhoben werden können, die aber die multidimensionale Einschätzung des Tierwohls ergänzen und unser Verständnis bereichern werden. Als interessante Ansätze seien hierfür beispielhaft die Echtzeit-Überwachung des mentalen Zustandes über die Messung der metabolischen Energiebilanz bzw. der Herzfrequenz (Joosen et al., 2019) oder die Nutzung epigenetischer Biomarker zur Bewertung des Tierwohls auf molekularer Ebene (Nery da Silva et al., 2022) zu nennen. Die Wirkung solcher Indikatoren auf zukünftige Bewertungsschemata, auf unsere bisherige Definition von Tierwohl und gesetzliche Bestimmungen lässt sich noch nicht abschätzen, wird aber in jedem Fall zu einer Weiterentwicklung wie in den letzten Jahrzehnten führen.

Will man Aussagen aus den erhobenen haltungs-, management- und tierbezogenen Indikatoren treffen, wird man sicher immer eine gewisse Standardisierung vornehmen müssen bzw. in Kategorien denken und nach diesen bewerten. Man wird sich auch zukünftig an gewisse Optimal- bzw. Referenzwerte, beispielweise für die Temperatur oder den NH₃-Gehalt im Abteil, orientieren, um Handlungsempfehlungen zu geben

oder auch zwischen Betrieben im Rahmen eines Benchmarkings vergleichen zu können. Solch eine Standardisierung wird auch für tierbezogene Indikatoren gefordert (Sturm et al., 2020; Blömke et al., 2020) und wäre sicher wünschenswert, es ist jedoch fraglich, ob dies auch umsetzbar ist. Sicher sollten Messmethoden und die Kontrolle von Sensoren in gewisser Weise standardisierten Vorgaben folgen und nachvollziehbar sein. Begrifflichkeiten, die zur Indikatorerhebung genutzt werden, wie beispielweise die Begriffe *Hernien* oder *Nekrosen*, sollten fest definiert und von allen gleich verstanden werden. Aktivitätsdaten oder ähnliches lassen sich jedoch vermutlich nicht einfach standardisieren und in bestimmte Kategorien (gute oder schlechte Aktivität über den Tagesverlauf) einteilen. Zu viele Faktoren beeinflussen und steuern die Aktivität von Schweinen, wie die Temperatur im Stall, die Besatzdichte bzw. die Gruppengröße, das Alter und Gewicht der Tiere oder Managementmaßnahmen wie Tierkontrolle oder Fütterungszeiten. Statt einer strikten Standardisierung von Verhaltensdaten sollte hier die betriebs- oder gruppenindividuelle Erkennung eines typischen Verlaufs oder eines typischen Verhaltens Ziel der Datenerfassung und -auswertung sein, die aber auch die Erfahrungswerte bzw. Mustererkennung (Pattern Recognition) anderer oder vorheriger Durchgänge mit einbezieht. Auf diesem Wissen basierend, können Änderungen erkannt und – im besten Fall – auf bestimmte Faktoren wie beispielsweise eine Änderung der Temperatur im Abteil oder technische Probleme bei der Fütterung bezogen werden. Sicher lassen sich auf Basis solch „intelligenter“ Datenauswertung und -verknüpfung zukünftig auch auf Betriebsebene oder ganz allgemein Merkmale für Messgrößen wie Abweichungen oder Schwellenwerte ermitteln und definieren, die, wie es Gómez et al. (2021) fordert, als gültige Signale für negatives oder positives Wohlbefinden genutzt werden können.

Hinsichtlich der Datennutzung lässt sich heute kaum mehr die Möglichkeit der Datenspeicherung als limitierender Faktor benennen, wohl aber eingeschränkte Möglichkeiten der Verknüpfung von Daten und die Umsetzung zu einer intelligenten, multifaktoriell basierenden Auswertung. Es darf nicht nur darum gehen, möglichst viele Daten unterschiedlicher Sensoren zu sammeln, denn die Daten selbst sind bedeutungslos, wenn sie nicht in Informationen umgewandelt werden (Halachmi et al., 2019). Ziel muss es sein, sie sinnvoll zu verarbeiten und auszuwerten, zueinander in Beziehung zu stellen und in Assistenzsysteme zu integrieren, damit Tierhalter/-innen

zielgerichtet und auch im Sinne einer Zeitersparnis konkrete Handlungsempfehlungen vorgeschlagen werden können. Solche Handlungsempfehlungen oder Maßnahmenkataloge beispielsweise im Falle von Hitzestress, einem durch die globale Erwärmung immer relevanteren Problem in der Nutztierhaltung, müssen sowohl kurzfristige Maßnahmen, wie die Erhöhung der Lüftrate, und auch langfristige Maßnahmen, wie den Einbau von Berieselungsanlagen oder die Nutzung von Wärmetauschern, berücksichtigen (Schauberger et al., 2020).

Decision-Support-Systeme wie *PigsAndMore* oder andere Monitoringanwendungen zur Bewertung des Tierwohls sollten so flexibel aufgebaut sein, dass Daten bzw. Informationen aus vielen unterschiedlichen Quellen verarbeitet und im Falle von unzureichenden Bedingungen Tierhalter/-innen gewarnt werden (Bahlo et al., 2019). Aktuell beschränken sich solche Anwendungen jedoch meist auf eine limitierte Anzahl an Sensoren und Indikatoren, obwohl eine größere Anzahl von Indikatoren die Qualität der Anwendung verbessern würde (Bahlo et al., 2019). Zurzeit sind es vor allem Probleme beim Austausch und der Verknüpfung von Daten unterschiedlicher Systeme bzw. Sensoren und das nicht einheitliche Datenlabelling (Sturm et al., 2020). Dieses hemmt die Digitalisierung im Sinne der Einspeisung unterschiedlichster Daten in ein System oder eine Anwendung und somit auch das maschinelle Lernen und die Nutzung Künstlicher Intelligenz.

In *PigsAndMore* wurde bereits der Versuch unternommen, möglichst viele Informationen, Sensordaten und Indikatoren in ein einziges System zu integrieren, um eine objektive, möglichst automatisierte Schwachstellenanalyse und die Ausgabe konkreter Handlungsempfehlungen zu realisieren. Die zuvor angesprochenen Probleme traten jedoch auch hier auf und die Daten mussten händisch eingetragen, mögliche Verknüpfungen vorhergesehen und dem System vorgegeben werden. Dennoch bietet dieses Tool, anders als viele andere, bereits einen deutlich differenzierteren und umfangreicheren Blick auf die Erhebung von Indikatoren und die Bewertung des Tierwohls. So werden im Rahmen der Bonitur, vor allem aber auch in der Screeningphase, eben nicht nur Indikatoren erhoben und Daten ausgewertet, die die Haltungsumwelt oder das Tierverhalten betreffen, sondern möglichst viele Sensoren eingesetzt, die Informationen beider Aspekte in die Bewertung einfließen lassen. Als Beratungstool soll es dabei helfen, eine ganzheitliche Bewertung des

Managements und der Tierwohlsituation in einem Betrieb zu ermöglichen und Stärken und Schwächen aufzudecken.

Ob sich die Kosten (siehe Tabelle 5.1) für eine solch aufwendige Schwachstellenanalyse durch eine konkrete, sich auch monetär auswirkende Verbesserung der Haltung, des Tierwohls und des Managements lohnen, muss sich erst noch in der praktischen Anwendung des Tools zeigen.

Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblicke

Tabelle 5.1 Geschätzte Beratungskosten für die Schwachstellenanalyse und Bewertung des Tierwohls mit *PigsAndMore* in einem fiktiven Betrieb mit einer Ø Betriebsgröße von 800 Mastschweinen. Unter folgenden Annahmen werden bonitiert: 1 Stallgebäude, 4 Abteile, 10 Buchten und insgesamt 150 Tiere im Rahmen der Einzeltierbonitur. Es werden darüber hinaus keine Supportkosten für die Software bzw. Bereitstellungskosten für die Screeningtechnik in Ansatz gebracht.

Kostenposition	Geschätzter Aufwand	Geschätzte Kosten je Position in € für: Einzelberatung mit Vertrag ^a	Geschätzte Kosten je Position in € für: Einzelberatung ohne Vertrag ^b	Geschätzte Kosten je Position in € für: Beratung außerhalb von NRW für sonstige Auftraggeber ^c
1. Tag				
Anfahrt	Fahrtkostenpauschale ^d für zwei Berater/-innen	117,00	136,50	354,00
Personalkosten für				
→ Betriebsinterview	30 – 60 min für zwei Berater/-innen	78,00 – 156,00	91,00 – 182,00	118,00 – 236,00
→ Einschätzung der Betriebssituation und Auswahl eines geeigneten Abteils und einer geeigneten Fokusbucht	3 – 4 h für zwei Berater/-innen	468,00 – 624,00	546,00 – 728,00	708,00 – 944,00
→ Ausstattung der Fokusbucht mit Screeningtechnik				
2. Tag				
Anfahrt	Fahrtkostenpauschale ^d für zwei Berater/-innen	117,00	136,50	354,00
Personalkosten für				
→ Abbau der Screeningtechnik	2 h für zwei Berater/-innen	312,00	364,00	472,00
→ Bonitur ~ 15 min pro Abteil-/Buchtenbonitur ~ 1 min pro Tier (Einzeltierbonitur)	2 – 3 h für zwei Berater/-innen	312,00 – 468,00	364,00 – 546,00	472,00 – 708,00
→ Besprechung erster Ergebnisse im Sinne einer Stärken- und Schwächenanalyse	30 – 60 min für zwei Berater/-innen	78,00 – 156,00	91,00 – 182,00	118,00 – 236,00
Anschlusskosten				
Personalkosten für				
→ Datenauswertung, detaillierte Schwachstellenanalyse und Erstellung eines ausführlichen Ergebnisprotokolls	3 h für einen Berater / eine Beraterin	234,00	273,00	354,00
→ Reinigung des Messequipments	2 - 3 h für einen Berater / eine Beraterin	156,00 – 234,00	182,00 – 273,00	236,00 – 354,00
Gesamtkosten		1.872,00	2.184,00	3.186,00
		-	-	-
zuzüglich gesetzlicher Umsatzsteuer von 19 %		2.418,00	2.821,00	4.012,00
Gesamtsumme		2.227,68	2.598,96	3.791,34
		-	-	-
		2.877,42	3.356,99	4.774,28

^a 78 € pro h laut Gebührentarif (Anlage der Gebührenordnung der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

^b 91 € pro h laut Gebührentarif (Anlage der Gebührenordnung der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

^c 118 € pro h laut Gebührentarif (Anlage der Gebührenordnung der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

^d 0,75 h innerhalb der Teamregion (angenommen für ^a und ^b) oder 1,5 h außerhalb der Region (angenommen für ^c)

Man muss jedoch davon ausgehen, dass sich ein Tool wie *PigsAndMore* in der jetzigen Ausführung nicht mehr rentiert bzw. nicht mehr in Anspruch genommen wird, wenn Sensoren günstiger werden und deren Ausführungen auch für die zuverlässige Messung im Stall unter widrigsten Bedingungen geeignet sind. Möglicherweise werden in Zukunft die einzelnen Sensoren auch weiterhin die Datengrundlage für eine ganz bestimmte, vom jeweiligen Hersteller programmierte Anwendung sein, die einen bestimmten Aspekt beleuchten und ein konkretes Ziel verfolgen, wie beispielsweise die Lahmheitsfrüherkennung. Ziel zukünftiger Überlegungen hinsichtlich der Rohdatenerfassung und -speicherung sollte es jedoch sein, diese einfach zu verknüpfen bzw. sie in andere Systeme unkompliziert integrieren zu können. So könnten die Daten für Dritte einfacher nutzbar und zukünftig eine neue Art der Dienstleistung und Beratung entwickelt werden. Zeit müsste nicht mehr in hohem Maße dafür aufgewendet werden, Daten erneut zu erheben, sondern könnte dazu genutzt werden, die bereits zur Verfügung stehenden sinnvoll aufzuarbeiten und zu verknüpfen. Expertinnen und Experten für den Bereich Künstlicher Intelligenz und selbstlernender Systeme könnten Tools (weiter-) entwickeln, die sicher auch bisher unbekannte Verbindungen zwischen Sensoren und/oder Indikatoren erfassen und so die Bewertung des Managements und des Tierwohls weiter intensivieren und verbessern. Berater/-innen zum Beispiel der Landwirtschaftskammern sollten die Plausibilität solcher rein auf Daten basierender Aussagen prüfen und auf Basis ihres Bezuges zur Praxis und ihren Erfahrungen dabei unterstützen, konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Denn das Thema Digitalisierung und die Nutzung von Daten(quellen) beinhaltet auch, die richtigen Fragen zu stellen und die richtigen Schlussfolgerungen abzuleiten (Sturm et al., 2020).

Eines darf jedoch nicht vergessen werden: Die Technik kann und soll den Menschen (tierhaltende wie auch beratende Person) nicht ersetzen und befreit Tierhalter/-innen nicht von ihren Fürsorgepflichten. Der menschliche Blick auf das Tier darf nicht verloren gehen, denn Technologien zur präzisen Überwachung können zwar dazu genutzt werden, fundiertere Entscheidungen zu treffen, nicht aber dazu, die Intuition und das Management zu ersetzen (Halachmi et al., 2019).

Vor diesem Hintergrund bleibt es herausfordernd, wie sich die Interaktion zwischen den drei Instanzen Mensch, Tier und Technik weiterentwickeln wird. Diese Dissertation liefert auf Basis der geleisteten Untersuchungen wichtige Erkenntnisse zur Validierung von Ammoniakmessgeräten sowie zur Nutzung von PIDs als Aktivitätssensoren in bestimmten Fokusbereichen der Bucht im Mastschweinestall. Sie erläutert die Nutzung der genannten Hilfsmittel im Rahmen einer Screeningphase zur Bewertung der Tierwohlsituation im Projekt *PigsAndMore* und stellt die möglichen Kosten eines derartigen Beratungstools vor. Darüber hinaus werden bereits bestehende technische Hilfsmittel zur Indikatorerfassung und deren Bewertung vorgestellt und Herausforderungen sowie mögliche Entwicklungspotentiale der Digitalisierung in der Nutztierhaltung diskutiert. Es bleibt abzuwarten, welche wissenschaftlichen Erkenntnisse und neu definierten Indikatoren dank bereits zur Verfügung stehender oder zukünftiger Technologien die Tierhaltung und die Bewertung des Tierwohls möglicherweise noch revolutionieren werden.

5.4 Literaturverzeichnis

- Andersen, H. M.-L., Dybkjær, L. & Herskin, M. S. (2014). Growing pigs' drinking behaviour: number of visits, duration, water intake and diurnal variation. *Animal* 8(11), 1881–1888. <https://doi.org/10.1017/S175173111400192X>.
- Bahlo, C., Dahlhaus, P., Thompson, H. & Trotter, M. (2019). The role of interoperable data standards in precision livestock farming in extensive livestock systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.007>.
- Besteiro, R., Rodríguez, M. R., Fernández, M. D., Ortega, J. A. & Velo, R. (2018a). Agreement between passive infrared detector measurements and human observations of animal activity. *Livestock Science*, 214, 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.06.008>.
- Besteiro, R., Arango, T., Rodríguez, M. R., Fernández, M. D. & Velo, R. (2018b). Estimation of patterns in weaned piglets' activity using spectral analysis. *Biosystems Engineering*, 173, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.014>.
- Besteiro, R., Arango, T., Ortega, J., Fernández, M. D. & Rodríguez, M. R. (2021). Long-Term Measurement of Piglet Activity Using Passive Infrared Detectors. *Animals*, 11(6), 1607. <https://doi.org/10.3390/ani11061607>.
- Blanes, V. & Pedersen, S. (2005). Ventilation Flow in Pig Houses measured and calculated by Carbon Dioxide, Moisture and Heat Balance Equations. *Biosystems Engineering*, 92(4), 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.002>.
- Blömke, L., Volkmann, N. & Kemper, N. (2020). Evaluation of an automated assessment system for ear and tail lesions as animal welfare indicators in pigs at slaughter. *Meat Science*, 159, 107934. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107934>.
- Boissy, A., Manteuffel, G., Jensen, M. B., Moe, R. O., Spruijt, B., Keeling, L. J., Winckler, C., Forkman, B., Dimitrov, I., Langbein, J., Bakken, M., Veissier, I. & Aubert, A. (2007). Assessment of positive emotions in animals to improve their welfare. *Physiology & Behavior*, 92(3), 375–397. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.02.003>.
- Collin, A., van Milgen, J., Dubois, S. & Noblet, J. (2001). Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs. *The British Journal of Nutrition*, 86(1), 63–70. <https://doi.org/10.1079/BJN2001356>.
- EFSA (2012). Scientific Opinion on the use of animal-based measures to assess welfare of broilers. EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW). *EFSA Journal* 10(7): 2774.
- Fraser, D. (2008). Understanding animal welfare. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 50(Suppl 1):SI. doi:10.1186/1751-0147-50-SI-SI.
- Gebührentarif (2004). Anlage zu Artikel 1 der Achten Satzung zur Änderung der Gebührenordnung der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen vom 7. Januar 2004.
- Gerber, P.J., Henderson, B., Makkar, H.P.S. (Eds.) (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO₂ emissions. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

- Gómez, Y., Stygar, A. H., Boumans, I. J. M. M., Bokkers, E. A. M., Pedersen, L. J., Niemi, J. K., Pastell, M., Manteca, X. & Llonch, P. (2021). A Systematic Review on Validated Precision Livestock Farming Technologies for Pig Production and Its Potential to Assess Animal Welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 8:660565. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.660565>.
- Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J. & Pastell, M. (2019). Smart Animal Agriculture: Application of Real-Time Sensors to Improve Animal Well-Being and Production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403–425. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020518-114851>.
- Hart, B. L. (1988). Biological Basis of the Behavior of Sick Animals. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 12(2), 123–137. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(88\)80004-6](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(88)80004-6).
- Held, S. D. E. & Špinka, M. (2011). Animal play and animal welfare. *Animal Behaviour*, 81(5), 891–899. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.01.007>.
- Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A. & Verstegen, M.W.A. (2005). Reactions of pigs to a hot environment. In *Livestock Environment VII, Proceedings of the Seventh International Symposium, Beijing, China, 18–20 May 2005*; T. Brown-Brandl; American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MO, USA.
- Hyun, Y. & Ellis, M. (2002). Effect of group size and feeder type on growth performance and feeding patterns in finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 80(3), 568–574. <https://doi.org/10.2527/2002.803568x>.
- Joosen, P., Norton, T., Marchant-Ford, J. & Berckmans, D. (2019). Animal welfare monitoring by real-time physiological signals. In B. O’Brien, D. Hennessy, & L. Shalloo (Hrsg.), *Precision Livestock Farming '19. Papers presented at the 9th European Conference on Precision Livestock Farming* (S. 337-344).
- Kashiha, M., Bahr, C., Haredasht, S. A., Ott, S., Moons, C. P. H., Niewold, T. A., Ödberg, F. O. & Berckmans, D. (2013). The automatic monitoring of pigs water use by cameras. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.015>.
- Larsen, M. L. V., Andersen, H. M.-L. & Pedersen, L. J. (2016). Can tail damage outbreaks in the pig be predicted by behavioural change? *The Veterinary Journal*, 209, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.12.001>.
- Larsen, M. L. V., Andersen, H. M.-L. & Pedersen, L. J. (2019). Changes in activity and object manipulation before tail damage in finisher pigs as an early detector of tail biting. *Animal*, 13(5), 1037–1044. <https://doi.org/10.1017/S1751731118002689>.
- Madsen, T. N. & Kristensen, A. R. (2005). A model for monitoring the condition of young pigs by their drinking behaviour. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(2), 138–154. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.02.014>.
- Meese, G. B. & Ewbank, R. (1973). The establishment and nature of the dominance hierarchy in the domesticated pig. *Animal Behaviour*, 21(2), 326–334. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(73\)80074-0](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(73)80074-0).

- Nery da Silva, A., Silva Araujo, M., Pértille, F. & Zanella, A. J. (2022). How Epigenetics Can Enhance Pig Welfare? *Animals*, 12(1), 32. <https://doi.org/10.3390/ani12010032>.
- Ni, J.-Q. & Heber, A. J. (2008). Sampling and Measurement of Ammonia at Animal Facilities. In *Advances in Agronomy* (Bd. 98, S. 201–269). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00204-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00204-6).
- Ni, J.-Q., Liu, S., Radcliffe, J. S. & Vonderohe, C. (2017). Evaluation and characterisation of Passive Infrared Detectors to monitor pig activities in an environmental research building. *Biosystems Engineering*, 158, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.014>.
- Nielsen, B. L., Lawrence, A. B. & Whittemore, C. T. (1995). Effect of group size on feeding behaviour, social behaviour, and performance of growing pigs using single-space feeders. *Livestock Production Science*, 44(1), 73–85. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(95\)00060-X](https://doi.org/10.1016/0301-6226(95)00060-X).
- OIE (2021). Animal Welfare. What is animal welfare? <https://www.oie.int/en/what-we-do/animal-health-and-welfare/animal-welfare/> [19.03.2022]
- Pedersen, S. & Pedersen, C. B. (1995). Animal Activity Measured by Infrared Detectors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(4), 239–246. <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1051>.
- Pijpers, A., Schoevers, E. J., van Gogh, H., van Leengoed, L. A., Visser, I. J., van Miert, A. S. & Verheijden, J. H. (1991). The influence of disease on feed and water consumption and on pharmacokinetics of orally administered oxytetracycline in pigs. *Journal of Animal Science*, 69(7), 2947–2954. <https://doi.org/10.2527/1991.6972947x>.
- Puppe, B., Schön, P. C. & Wendland, K. (1999). Monitoring of piglets' open field activity and choice behaviour during the replay of maternal vocalization: a comparison between Observer and PID technique. *Laboratory Animals*, 33(3), 215–220. <https://doi.org/10.1258/002367799780578110>.
- Quiniou, N., Dubois, S. & Noblet, J. (2000). Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight. *Livestock Production Science*, 63(3), 245–253. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00135-9).
- Reimert, I., Bolhuis, J. E., Kemp, B. & Rodenburg, T. B. (2013). Indicators of positive and negative emotions and emotional contagion in pigs. *Physiology & Behavior*, 109, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2012.11.002>.
- Rodríguez, M. R., Besteiro, R., Arango, T., Ortega, J., Fernández, M. D. (2020). Analyzing and Modeling Environmental and Production Variables in Weaned Piglet Farms. In João Silva Dias, editor. Prime Archives in Agricultural Research. Hyderabad, India: Vide Leaf.
- Schauberger, G., Hennig-Pauka, I., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S. J., Baumgartner, J., Niebuhr, K., Piringner, M., Knauder, W., Anders, I., Andre, K. & Schönhart, M. (2020). Efficacy of adaptation measures to alleviate heat stress in confined livestock buildings in temperate climate zones. *Biosystems Engineering*, 200, 157–175. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.010>.

- Seedorf, J. (2013). Wirkung von atmosphärischem Ammoniak auf Nutztiere – eine Kurzübersicht. *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift*, 126(3/4), 96-103.
- Statham, P., Green, L., Bichard, M. & Mendl, M. (2009). Predicting tail-biting from behaviour of pigs prior to outbreaks. *Applied Animal Behaviour Science*, 121(3-4), 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2009.09.011>.
- Sturm, B., Nasirahmadi, A., Müller, S. & Kulig, B. (2020). Smart Livestock Farming - Eine Bestandsaufnahme. *Züchtungskunde*, 92(6), 433–450.
- TierSchG (2021). Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 105 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist. <https://www.gesetze-im-internet.de/tierschg/BJNR012770972.html> [26.02.2022]
- TierSchNutztV (2006). Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung - TierSchNutztV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die zuletzt durch Artikel 1a der Verordnung vom 29. Januar 2021 (BGBl. I S. 146) geändert worden ist.
- Ursinus, W. W., van Reenen, C. G., Kemp, B. & Bolhuis, J. E. (2014). Tail biting behaviour and tail damage in pigs and the relationship with general behaviour: Predicting the inevitable? *Applied Animal Behaviour Science*, 156, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2014.04.001>.
- U.S. EPA (2004). National Emission Inventory—Ammonia Emissions from Animal Husbandry Operations. Draft Report. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- von Jasmund, N., Wellnitz, A., Krommweh, M. S. & Büscher, W. (2020). Using Passive Infrared Detectors to Record Group Activity and Activity in Certain Focus Areas in Fattening Pigs. *Animals* 10(5), 792. <https://doi.org/10.3390/ani10050792>.
- von Jasmund, N., Schmithausen, A. J., Krommweh, M. S., Trimborn, M., Boeker, P. & Büscher, W. (2022). Assessment of ammonia sensors and photoacoustic measurement systems using a gas calibration unit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194, 106744. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106744>.
- Zonderland, J. J., Schepers, F., Bracke, M. B. M., den Hartog, L. A. den, Kemp, B. & Spoolder, H. A. M. (2011). Characteristics of biter and victim piglets apparent before a tail-biting outbreak. *Animal*, 5(5), 767–775. <https://doi.org/10.1017/S1751731110002326>.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei all den Menschen bedanken, die mich im Rahmen der Projektarbeit und der Promotion unterstützt und zum Gelingen der vorliegenden Dissertation beigetragen haben. Denn alleine kann man sich zwar viel vornehmen und das ein oder andere auch umsetzen, aber nur gemeinsam kommt man ans Ziel.

Meinem Doktorvater und Erstgutachter Prof. Dr. Wolfgang Büscher gilt mein besonderer Dank für die Überlassung des Forschungsthemas sowie die fachliche und wissenschaftliche Betreuung. Die vielen konstruktiven Gespräche und gemeinsamen Diskussionsrunden haben zu neuen Denkanstößen geführt und sein Vertrauen in meine Fähigkeiten gab mir die Freiheit, neue Ideen auf meine eigene Art und Weise umzusetzen.

Herrn Prof. Dr. Karl Schellander danke ich für sein Wirken als Zweitgutachter und für die vielen Eindrücke und Erfahrungen durch Vorlesungen und Übungen während des Studiums, die meine Arbeit und meinen Werdegang sicher beeinflusst haben.

Frau Prof. Dr. Jenny Stracke danke ich für ihr Wirken als fachnahes Mitglied und Herrn Prof. Dr. Friedhelm Jaeger für den spontanen Austausch und die Unterstützung im Rahmen der wissenschaftlichen Aussprache.

Frau Prof. Dr. Dr. Helga Sauerwein gilt mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss sowie auch für die vielen Erfahrungen während meines Studiums, welche meinen Werdegang prägten.

Ein besonderer Dank gilt Frau Dr. Susanne Plattes, die mein Interesse für Tierverhalten und Tierwohl stets gefördert, mich auf das Projekt *PigsAndMore* aufmerksam gemacht und mir die damit verbundene Promotion von Anfang an zugetraut hat. Herzlichen Dank für den fachlichen und persönlichen Austausch, der mich inspiriert, bestärkt und vorangebracht hat.

Dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) verdanke ich die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens *PigsAndMore*. Außerdem danke ich den Projektpartnern der Landwirtschaftskammer NRW für die konstruktive Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt hier Frau Dr. Katharina Dahlhoff für die

beständige Unterstützung und den fachlichen Austausch im Projekt sowie den Berater/-innen für ihre tatkräftige Unterstützung auf den Fokusbetrieben.

All meinen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich im Laufe meiner Promotion zusammenarbeiten durfte, danke ich herzlichst für die vertrauensvolle und gute Zusammenarbeit, den fachlichen wie privaten Austausch, die tatkräftige Unterstützung und die tolle Zeit im Institut. Bedanken möchte ich mich insbesondere bei Frau Dr. Carolina Strohmaier und Herrn Dr. Peter Ebertz für die herzliche Aufnahme im Büro 33 zu Beginn der Promotion und die wertvollen Erfahrungen, die ich im Rahmen ihrer eigenen Versuchsplanung und -durchführung miterleben durfte. Herzlichen Dank auch an meine liebe Kollegin Dr. Alexandra Lengling, die mich immer und bei allem unterstützt hat und zu einer meiner besten Freundinnen geworden ist. Eine Freundin zu haben, die einem beruflich wie auch privat in einer so wichtigen Lebensphase verlässlich zur Seite steht, ist ein Geschenk, das ich nicht missen möchte.

Auch meinen Co-Autorinnen und Autoren gilt ein besonderer Dank sowie den Mitarbeitern der wissenschaftlichen Werkstatt des Institutes sowie den Mitarbeitern des Campus Frankenforst, ohne die das gute Gelingen der Versuche und die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse nicht möglich gewesen wären.

Mein größter Dank gilt meinen engsten Freunden und Freundinnen und vor allem meiner Familie, die mich durch alle Höhen und Tiefen bis hierher begleitet, unterstützt, mir Mut zugesprochen und mich auch mal auf ganz andere Gedanken gebracht haben. Besonders meiner Mutter Karin danke ich herzlichst für ihr Vertrauen in meine Fähigkeiten und ihre Unterstützung auf unterschiedlichste Art und Weise. Wichtige Eigenschaften wie Zielstrebigkeit, Gründlichkeit und Durchhaltevermögen, die für das Gelingen einer Promotion so bedeutend sind, hat sie mir im Verlauf meiner Kindheit und bis heute vermittelt und vorgelebt.

Meinem Mann Mortimer und meiner Tochter Emilia danke ich ganz besonders für all ihre Liebe und Unterstützung. Ohne Deinen Zuspruch und Dein Vertrauen, Morti, wäre ich niemals bis zu diesem Punkt gekommen; ohne Euch wäre ich nicht die, die ich bin. Nur mit Menschen an seiner Seite, die einem den Rücken stärken und auch mal freihalten, trösten und ermutigen, wenn es mal nicht läuft wie gewünscht, kann man über sich hinauswachsen, seine Ziele erreichen und Träume verwirklichen.