

**LfL**

Bayerische Landesanstalt für
Landwirtschaft



Verwendungsnachweis DigiMilch

Zuwendungsempfänger: <i>Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)</i>	Förderkennzeichen: 28DE112A18
Vorhabenbezeichnung: Experimentierfeld „Digitalisierung in der Prozesskette Milcherzeugung“ – Demonstration, Erprobung und Bewertung der Funktionalität, Kompatibilität und Interoperabilität neuer digitaler Produkte und Services entlang der landwirtschaftlichen Produktionskette Milch	
Laufzeit des Vorhabens: 15.10.2019 bis zum 30.11.2025	
Berichtszeitraum: 15.10.2019 bis zum 30.11.2025	

Kurzbericht

Aufgabenstellung

Digitalisierung betrifft alle Akteure landwirtschaftlicher Wertschöpfungsketten. Politik, Interessensvertreter und Branche verbinden vielfältige Erwartungen mit den technologischen Entwicklungen wie beispielsweise mehr Tierwohl oder die Entschärfung der Nährstoffproblematik und damit letztlich eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz der landwirtschaftlichen Produktion. Digitalisierung bietet nämlich eine vielversprechende Möglichkeit, um die gesamte Prozesskette der Milcherzeugung effizienter gestalten und ihre Nachhaltigkeit zu verbessern. Das Thema Digitalisierung besitzt zwar eine enorme Präsenz, der tatsächliche Praxiseinsatz ist aber aktuell insbesondere in kleinstrukturierten Agrarregionen noch als moderat einzustufen. Der hohe Investitionsbedarf, fehlende Entscheidungsalgorithmen, Inkompatibilität zwischen Systemen verschiedener Hersteller, komplizierte Handhabung und fehlendes IT-Know-how stellen wesentliche Hemmnisse beim Einsatz von Digitalisierung dar (Schleicher und Gandorfer, 2018). Landwirtschaftliche Betriebe benötigen sowohl zugängliche Orte, an denen digitale Technologien demonstriert werden, als auch belastbare Informationen zur Eignung für den Einsatz und den erzielbaren Effekten bzw. Nutzen in der Praxis. Weiterhin muss die Vernetzung einzelner Systeme durch den Abbau von Inkompatibilitäten entscheidend verbessert werden. Ziel des

Experimentierfeldes war es, die existierenden digitalen Lösungen für die Prozesskette Milcherzeugung umzusetzen und anzuwenden, ihre Eignung anhand von quantitativen und qualitativen Kriterien in familiengeführten Praxisbetrieben zu überprüfen, die Einsatzerfahrungen und Effekte bzw. Nutzen zu erfassen, ggf. bestehende Lücken/Defizite darzulegen und Hinweise für Lösungsansätze zu entwickeln.

Ablauf des Vorhabens

Das Experimentierfeld „DigiMilch“ startete im Oktober 2019 und wurde zum 30.11.2025 abgeschlossen. Die Ziele des Experimentierfeldes wurden im Rahmen von fünf Demonstrationsprojekten verfolgt, die die zentralen innerbetrieblichen Prozesse vom Wirtschaftsdüngermanagement über die Futterernte bis hin zu vernetzten tierindividuellen Sensorsystemen abbilden. Im ersten Projektjahr lag der Schwerpunkt auf der Personalakquise sowie der Anwerbung von Projektpartnern aus der Wirtschaft. Zusätzlich wurden Praxis- und Versuchsbetriebe in ganz Bayern für die Umsetzung, Datenerfassung und Bewertung gewonnen. Die Datenerfassung, Analyse und Bewertung wurde ab dem ersten Projektjahr kontinuierlich bis Ende des Jahres 2025 durchgeführt. Der Wissenstransfer an verschiedene Zielgruppen wurde ebenso durchgehend durchgeführt. So fanden jährlich mehrere Präsenz- sowie Onlineveranstaltungen statt.

Ergebnisse

Im Rahmen des kontinuierlichen Wissenstransfers war es möglich, auf Präsenz- und Onlineveranstaltungen mehr als 3.700 interessierte Zuhörer zu erreichen. Die Mitarbeiter hielten über 260 Vorträge auf wissenschaftlichen Tagungen sowie praxisnahen Veranstaltungen und veröffentlichten über 80 Beiträge in nationalen und internationalen Zeitschriften. In den fünf Demonstrationsprojekten wurden verschiedene Ziele verfolgt. Während bei manchen Demonstrationsprojekten der Schwerpunkt auf der Überprüfung der Genauigkeit von bereits am Markt angebotenen Technologien lag, konzentrierte sich die Arbeit bei anderen auf die Nutzung von Daten und Technologien zum Management eines Milchviehbetriebs. Im Rahmen der Arbeit im Demonstrationsprojekt „Wirtschaftsdüngermanagement“, konnte festgestellt werden, dass sich NIRS-Sensoren aufgrund der zum Teil sehr großen Abweichung der ermittelten Werte von den Referenzwerten in der Praxis nur bedingt für die Feststellung von Inhaltsstoffen im Wirtschaftsdünger eignen. Die Ergebnisse aus dem Demonstrationsprojekt, „sensorgestützte Ertragsermittlung“, zeigten dagegen, dass sich bei der Ernte von Gras und Silomais die Ermittlung der Trockenmassen mit Hilfe von NIR-Sensoren auf selbstfahrenden Feldhäckslern gut für den praktischen Einsatz eignet. Zusätzlich konnte gezeigt werden, wie digitale Technologien Landwirte bei einem

modernen, differenzierten Grünlandmanagement unterstützen können. Im Demonstrationsprojekt „Fütterungs-management“, konnte belegt werden, dass eine lückenlose Erfassung von Fütterungsdaten ein präzises Controlling auf dem Betrieb ermöglicht und Landwirte sowohl bei der Vermeidung einer Über- oder Unterversorgung der Tiere als auch beim effizienteren Einsatz von Grobfutter unterstützt. Das Demonstrationsprojekt „vernetzte Stalltechnik“ ermittelte während der Projektlaufzeit einen noch hohen Bedarf an Vernetzungen im Stall. Durch die enge Zusammenarbeit mit Firmen und Projektbetrieben konnten innovative Beispiele für die Vernetzung von Stalltechnik auf einem Praxisbetrieb entwickelt und demonstriert werden. Im Demonstrationsprojekt „tierindividuelle Sensorsysteme“ wurde gezeigt, dass die Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Quellen bzw. Sensoren die Genauigkeit von Aussagen über den Gesundheitsstatus von einzelnen Tieren erhöht.

Eingehende Darstellung:

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Overhead

Im Laufe des Projektes wurde ein breit aufgestelltes Netzwerk an Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft, Verbänden und Organisationen sowie aus landwirtschaftlichen Selbsthilfeeinrichtungen und Praxisbetrieben aufgebaut. Mit 30 Software- und Maschinenherstellern sowie mit dem Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e.V. (LKV) und dem Landeskuratorium für pflanzliche Erzeugung in Bayern e.V. (LKP) wurden Kooperationsverträge abgeschlossen, während sechs weitere Unternehmen eine Absichtserklärung unterschrieben und sich ohne Kooperationsvertrag in das Projekt einbrachten. Die Zusammenarbeit und der Austausch mit den Projektpartnern aus der Wirtschaft war je nach Demonstrationsprojekt und Projektphase mehr oder weniger intensiv. Bei manchen Projektpartnern erfolgte eine enge Abstimmung zum Einsatz der Technologien auf den einzelnen Betrieben, während andere beispielsweise häufig bei Veranstaltungen wie Firmenworkshops und Stakeholder-Foren involviert waren. Die Rückmeldung der Projektpartner zum Austausch im Rahmen des Projektes war stets positiv. Geschätzt wurden vor allem die Firmenworkshops als neutraler Ort für den fachlichen Austausch zu aktuellen Themen. Auch die Stakeholder-Foren dienten dem Austausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Praxis und lieferten wertvolle Rückmeldungen zur Arbeit und zu den Ergebnissen aus den Demonstrationsprojekten. Mit 26 Versuchs- und Praxisbetrieben in ganz Bayern konnte das Ziel der Demonstration von

digitalen Technologien auf familiengeführten Praxisbetrieben erreicht werden. Die Projektbetriebe waren stets bei den Fachgremien und Stakeholder-Treffen involviert und nahmen häufig an den Stall- und Feldtagen teil. Durch die Einbindung der Betriebsleiterinnen und Betriebsleiter in Fachtagungen konnten ihre Erfahrungen auch mit einem breiteren Fachpublikum geteilt werden.

Der Wissenstransfer erfolgte kontinuierlich während der gesamten Projektlaufzeit. In Tabelle 1 sind die vom Experimentierfeld organisierten Präsenz- und Onlineveranstaltungen mit der jeweiligen Teilnehmerzahl gelistet. Der Wissenstransfer an verschiedene Zielgruppen fand anhand von Stall- und Feldtagen auf Praxisbetrieben, Vortragsveranstaltungen, sowie Firmenworkshops, Gremiensitzungen und Stakeholder-Foren statt.

Tabelle 1: Übersicht über die im Rahmen des Experimentierfelds organisierten Veranstaltungen

	Veranstaltung	Datum	Teilnehmer	
			Live	Online
1	Kickoff/Stakeholder-Forum	02.12.2019	32	
2	Workshop mit DSP Agrosoft	09.09.2020	10	
3	Firmenworkshop	08.10.2020		27
4	Feldtag Betrieb Auer	14.10.2020	39	
5	DigiMilch im Dialog 2021/ 1. Termin	23.02.2021		118
6	Fachgremium Innenwirtschaft	26.02.2021	24	
7	DigiMilch im Dialog 2021/ 2. Termin	02.03.2021		125
8	DigiMilch im Dialog 2021/ 3. Termin	09.03.2021		183
9	Fachgremium Außenwirtschaft	10.03.2021	25	
10	DigiMilch im Dialog 2021/ 4. Termin	16.03.2021		194
11	DigiMilch im Dialog 2021/ 5. Termin	23.03.2021		183
12	Regionalkonferenz	17.06.2021		288
13	Feldtag Betrieb Hofer	30.06.2021	39	
14	Feldtag Betrieb Auer	13.07.2021	39	
15	Praxistag LLA Triesdorf	13.08.2021	58	
16	Workshop mit EF CattleHub	01.09.2021	10	
17	Workshop mit LAZBW Projekt DigiMo	07.09.2021	10	
18	Stalltag Betrieb Dauser	28.10.2021	32	
19	Stalltag Betrieb Eichenseer	17.11.2021	39	
20	DigiMilch im Dialog 2022/ 1. Termin	08.02.2022		194
21	DigiMilch im Dialog 2022/ 2. Termin	15.02.2022		188
22	DigiMilch im Dialog 2022/ 3. Termin	15.03.2022		180
23	DigiMilch im Dialog 2022/ 4. Termin	22.03.2022		163
24	DigiMilch im Dialog 2022/ 5. Termin	29.03.2022		188
25	Treffen Kompetenznetzwerk Digitalisierung	30.03.2022	48	
26	Stalltag Betrieb Mayr	07.04.2022	79	

			Teilnehmer	
	Veranstaltung	Datum	Live	Online
27	Firmenworkshop	17.05.2022	35	
28	Fachgremium Innenwirtschaft	14.07.2022	18	
29	Praxistag Versuchsbetrieb Achselschwang	28.09.2022	47	
30	Praxistag Versuchsbetrieb Almesbach	13.10.2022	66	
31	ILT Jahrestagung Schwerpunkt Digitalisierung	30.11.2022	136	175
32	DigiMilch im Dialog 2023/ 1. Termin	28.02.2023		99
33	DigiMilch im Dialog 2023/ 2. Termin	07.03.2023		100
34	Feldtag Betrieb Mayerhofer	21.04.2023	73	
35	Firmenworkshop	28.06.2023	17	
36	Feldtag Betrieb Haimerer	26.10.2023	99	
37	Stakeholder-Forum	30.01.2024	53	
38	Praxistag Betrieb Bauer	04.07.2024	58	
39	Abschlussveranstaltung	17.09.2024	53	
40	DigiMilch im Dialog 2025	02.04.2025		90
41	Praxistag Betrieb Babel	04.06.2025	60	
42	Praxistag Betrieb Helminger	26.06.2025	25	
	Summe Teilnehmer		1.224	2.495

DigiMilch hat zudem über den kompletten Projektzeitraum durch PR- und Kommunikationsaktivitäten die Bekanntmachung des Projektes und seiner Ergebnisse vorangetrieben. Als wirksam haben sich dabei verschiedene Maßnahmen erwiesen (s. Auch der Online-Auftritt des Projektes unter www.lfl.bayern.de/digimilch im Rahmen der Website der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde intensiv gepflegt. Allerdings wurde die Erfassung der Besucherzahlen ab Oktober 2022 wegen einer Veränderung der Cookie-Abfrage seitens der LfL ausgesetzt, so dass diese Zahlen nicht zur Verfügung stehen.

Tabelle 2).

Auch der Online-Auftritt des Projektes unter www.lfl.bayern.de/digimilch im Rahmen der Website der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde intensiv gepflegt. Allerdings wurde die Erfassung der Besucherzahlen ab Oktober 2022 wegen einer Veränderung der Cookie-Abfrage seitens der LfL ausgesetzt, so dass diese Zahlen nicht zur Verfügung stehen.

Tabelle 2: Übersicht der wirksamsten Kommunikationsaktivitäten im Rahmen des Experimentierfeldes (Stand 15.10.2025)

Maßnahme	Ergebnis
Video- und Audioformate (Erklärfilme z. B. über YouTube, Podcasts)	46.076 Abrufe (42.286 Video, 3.790 Podcast)
Instagram-Account	1.209 Follower 235 Beiträge mit in der Spitze 9.314 Aufrufen pro Beitrag (2025: 17.401 Aufrufe für neun Beiträge, 2024: 10.940 Aufrufe für 21 Beiträge)
DigiMilch Newsletter	16 Ausgaben mit bis zu 252 Abonnenten
Ergebnis-Flyer & Präsentationen bestellbar per E-Mail	119 Aussendungen
Publikationen Fachzeitschriften & -portale	96
Berichte in externer Presse	76
Pressemeldungen	21
Printprodukte/Flyer	13.550 Flyer, 550 Sticker, 250 Bierdeckel verteilt
Facebook-Account	394 Follower („Duplikat“ Instagram)

Demonstrationsprojekt 1

Im Rahmen des Demonstrationsprojektes „Wirtschaftsdüngermanagement“ wurde der Einsatz von online-Messverfahren auf der Basis der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) zur Erfassung der Inhaltstoffe flüssiger Wirtschaftsdünger unter Praxisbedingungen wissenschaftlich begleitet. Ziel war es, die Messgenauigkeit von NIRS-Sensoren auf landwirtschaftlichen Betrieben in Bayern zu bewerten und deren Eignung für eine bedarfsgerechte und digital unterstützte Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zu überprüfen.

Eine genaue Kenntnis über die Nährstoffgehalte von Wirtschaftsdüngern ist eine Voraussetzung für eine bedarfsgerechte und umweltgerechte Düngung. Für die Düngeplanung werden in der Praxis oftmals Tabellenwerte herangezogen. Diese bilden zumeist einen guten Durchschnittswert, können jedoch jahreszeitliche Nährstoffschwankungen aufgrund von Futterumstellungen, Niederschlag oder Managementmaßnahmen nicht abdecken. Mithilfe einer mehrmaligen Probenahme und anschließenden Analyse im Labor, kann die Nährstoffvariabilität erfasst werden, jedoch trifft das Ergebnis erst bis zu zwei Wochen nach der Probennahme ein. Zudem ist für eine repräsentative Probe eine hohe Probenanzahl an verschiedenen Stellen erforderlich und daher mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. NIRS-Sensoren bieten hingegen die Möglichkeit, Nährstoffgehalte unmittelbar zu bestimmen.

Zur Untersuchung der Praxistauglichkeit von online-Messfahren wurden drei NIRS-Sensoren verschiedener Hersteller (MUT, Dynamica Generale und Zeiss) eingesetzt. Die

Untersuchungen erfolgten auf insgesamt 28 landwirtschaftlichen Betrieben in Bayern, darunter rinderhaltende Betriebe (Bullenmast, Milchvieh, Jungvieh) sowie Biogasbetriebe mit unterschiedlichen Substratmischungen. Insgesamt wurden 694 Gülleproben gezogen und mit den Messwerten der Sensoren verglichen. Dabei wurde besonders darauf geachtet, ein breites Spektrum an in der Praxis auffindbaren Wirtschaftsdüngern zu untersuchen. Bei Rindergüllen wurden Trockensubstanzgehalte von 0,4 bis 14,7 % berücksichtigt, um auch den Einfluss von Verdünnung, Separierung oder die natürliche Sedimentation abzubilden.

Die NIRS-Sensoren wurden an folgenden Positionen integriert:

- NIRS-Sensor an einem Güllefass (15,5 m³)
- NIRS-Sensor an einer Güllepumpe
- NIRS-Sensor an einer Durchflussstation

Zusätzlich wurde ein mobiler Messanhänger (Abbildung 1) entwickelt und aufgebaut, der die gleichzeitige Messung mehrerer Sensoren ermöglichte. Dazu wurden etwa 600 Liter Gülle in einem IBC-Container homogenisiert und anschließend parallel von bis zu drei Sensoren analysiert. Parallel dazu erfolgte eine repräsentative Probennahme für die anschließende nasschemische Laboranalyse. Die Proben wurden unmittelbar nach der Entnahme gekühlt und bis zur nasschemischen Analyse im Labor der LfL tiefgekühlt gelagert



Abbildung 1: Im Projekt entwickelter Messanhänger mit IBC Container zur gleichzeitigen Ermittlung der Messgenauigkeit von bis zu drei NIRS-Sensoren, modular erweiterbar um einen dritten Sensor (nicht dargestellt)

Messgenauigkeit der getesteten Sensoren

In Abbildung 2 sind die so ermittelten relativen Abweichungen zwischen dem Sensor- und Laborwerten für drei Sensoren verschiedener Hersteller für die relevanten Parameter Gesamtstickstoff (N_{ges}), Ammonium-Stickstoff (NH_4-N), Phosphor (P_2O_5), Kalium (K_2O) und Trockensubstanz (TS) für drei Wirtschaftsdüngerarten (Rindergülle, Gärrest, separierte Rindergülle) dargestellt. Die Auswertung zeigte deutliche Unterschiede zwischen Sensorwerten und Laboranalysen in Abhängigkeit von Wirtschaftsdüngerart und Zusammensetzung. Für bestimmte Wirtschaftsdüngerarten, insbesondere Gärreste oder separierte Güllen, konnten teilweise gute Übereinstimmungen zwischen Sensor- und Laborwerten festgestellt werden. Bei Rindergülle traten hingegen häufig größere Abweichungen auf. Ursachen hierfür lagen insbesondere in:

- Verdünnung durch Wasser
- unzureichender Homogenisierung
- Zusatzstoffen wie Gesteinsmehlen
- optischen Veränderungen durch Zusatzstoffe

Ein Beispiel hierfür ist der Zusatz von Eisenchlorid zur Entschwefelung in Biogasanlagen, der zu einer deutlichen Schwarzfärbung des Gärrests führen kann und damit die optische Messung beeinflusst.

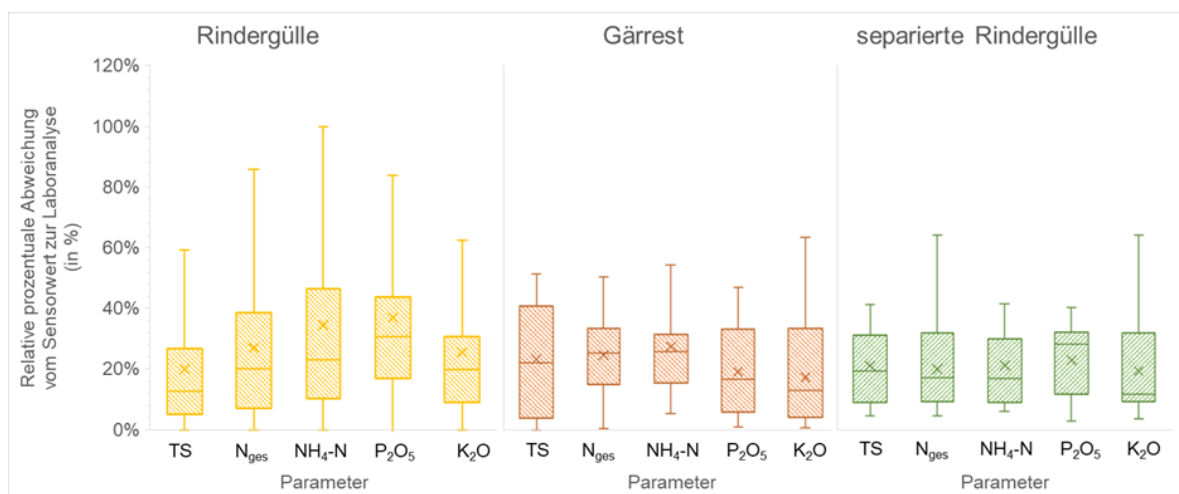


Abbildung 2: Relative prozentuale Abweichung der Sensorwerte zu den Laborwerten für die Parameter TS, N_{ges} , NH_4-N , P_2O_5 und K_2O für Rindergülle ($n=21$ Betriebe), Gärrest ($n=4$ Betriebe) und separierte Rindergülle ($n=2$ Betriebe)

Bei einigen Wirtschaftsdüngern fand sich jedoch keine oder nur eine geringe Abweichung des Sensorwertes zum Laborwert. Diese Ergebnisse decken sich sowohl mit denen des Experimentierfeldes „Best - SH“, die einen ähnlichen Versuchsaufbau gewählt haben

(Thiessen et al., 2022), als auch mit den Ergebnissen aus dem Projekt „NIRS QS“ (Finanzierung BMLEH, FKZ: 2820ABS101).

Die Ergebnisse zeigen, dass NIRS-Sensoren grundsätzlich zuverlässige Ergebnisse liefern können, sofern sich die untersuchten Wirtschaftsdünger innerhalb der Kalibrationsbereiche der Sensoren befinden. Für Wirtschaftsdünger, die nicht in der Kalibration hinterlegt sind, kann es jedoch zu hohen Abweichungen kommen.

Praxisuntersuchungen während der Ausbringung

Zusätzlich wurden auf sieben Betrieben in Bayern Messungen während der Wirtschaftsdüngerausbringung unter Praxisbedingungen durch die Anbringung eines NIRS-Sensors am Güllefass durchgeführt. Dabei wurden die Nährstoffgehalte während des Befüllvorgangs kontinuierlich mit einem NIRS-Sensor erfasst, ein Mittelwert pro Fass gebildet und mit nasschemischen Laboranalysen verglichen. Als Referenzwert wurde jeweils zu Beginn, in der Mitte und zum Ende des Befüllvorgangs Gülle aus dem Fass entnommen, zu einer Mischprobe vereinigt, die daraus gewonnene Laborprobe sofort gekühlt und bis zur Analyse eingefroren. Die Probennahme erfolgte immer zu Beginn und Ende der Ausbringung und bei Schlagwechsel.

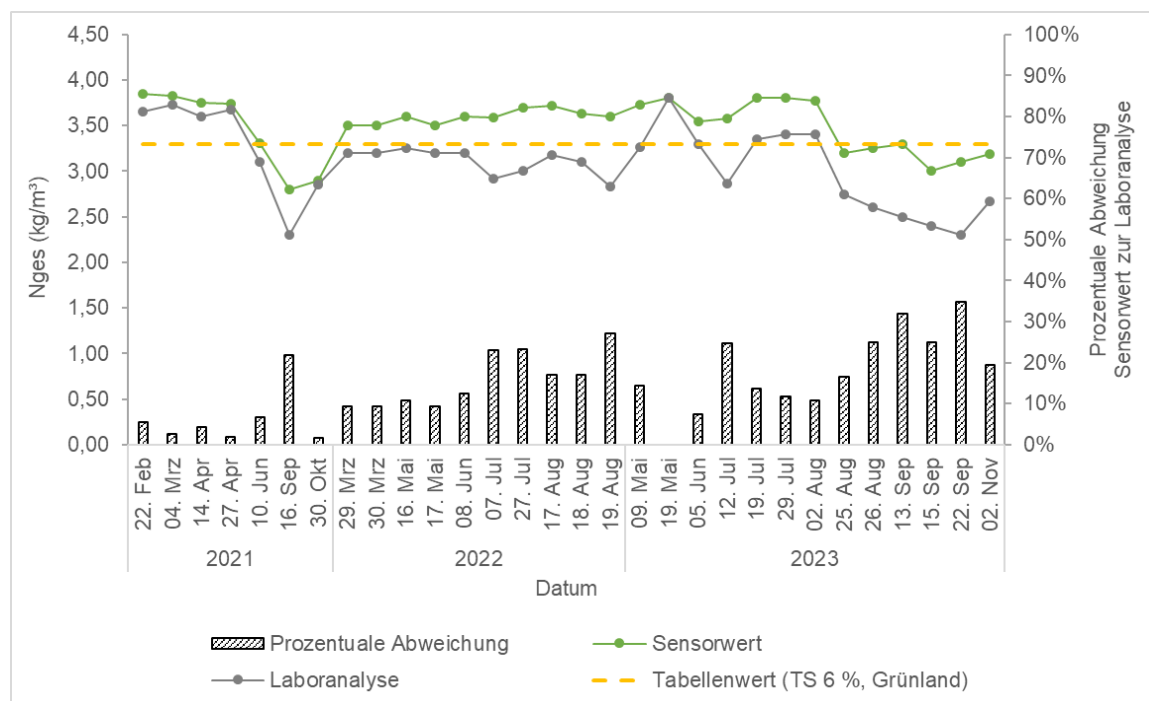


Abbildung 3: Innerbetriebliche Schwankungen im N_{ges} Gehalt der Gülle eines landwirtschaftlichen Betriebes (Milchviehbetrieb) im Jahresverlauf. Darstellung der Sensorwerte im Vergleich zur Laboranalyse sowie die prozentuale Abweichung des Sensorwertes zur Laboranalyse.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft den jahreszeitlichen Verlauf des N_{ges} -Gehaltes einer Milchviehgülle auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in den Jahren 2021 bis 2023. Dabei zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen Labor- und Tabellenwerten im Jahr 2022, während im Jahr 2023 in den Monaten August bis September der N_{ges} -Gehalt durch Heranziehung des Tabellenwertes überschätzt wird.

Die Untersuchungen zeigten deutliche jahreszeitliche Schwankungen der Nährstoffgehalte innerhalb eines Betriebes. In einem untersuchten Milchviehbetrieb konnte das online-Messverfahren diese Schwankungen mit einer durchschnittlichen Abweichung von etwa 15 % zur Laboranalyse erfassen.

Über mehrere Betriebe (sieben Betriebe) hinweg lag die Abweichungen des Sensorwertes zur Laboranalyse jedoch zwischen 0 und 122 % für N_{ges} , was die große Variabilität der Wirtschaftsdüngerzusammensetzung in der Praxis verdeutlicht. Da die Zusammensetzung von Wirtschaftsdüngern jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt aufgrund von Futterumstellungen, Verdünnung durch Niederschlag oder dem Wirtschaftsdüngermanagement (z.B. Separierung, Einsatz von Güllezusatzstoffen), sollte nicht nur eine Einzelprobe in Betracht gezogen werden, sondern die Schwankungsbreite der Nährstoffgehalte innerhalb eines Jahres. Diese Ergebnisse zeigen, dass vor dem Einsatz eines Sensors betriebsindividuell geprüft werden sollte, ob die vorhandenen Kalibrationsmodelle für den jeweiligen Wirtschaftsdünger geeignet sind.

Digitale Datenerfassung und Nährstoffflüsse

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes war die Untersuchung der Möglichkeiten zur digitalen Erfassung innerbetrieblicher Stickstoffflüsse.

Hierfür wurden auf einem Praxisbetrieb verschiedene digitale Systeme kombiniert:

- NIRS-Sensor am Güllefass
- Sensortechnik am Feldhäcksler zur Erfassung der Erntemengen
- Wiegesystem im Futtermischwagen zur Dokumentation der Futterverbräuche

Auf dieser Basis konnten Zu- und Abgänge von Stickstoff im Betrieb erfasst und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich betriebliche Nährstoffflüsse mithilfe digitaler Technik grundsätzlich gut abbilden lassen.

Eine vollständige Integration der Sensordaten in ein Farmmanagementinformationssystem (FMIS) konnte jedoch während der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden, da es beim beteiligten Softwareanbieter zu strukturellen Änderungen kam. Die identifizierten Schnittstellenprobleme wurden dokumentiert und an die Hersteller weitergegeben.

Abbildung 4 zeigt den Stickstofffluss auf einen Praxisbetrieb. Auffällig ist die gute Übereinstimmung zwischen den anhand der Laborwerte ermittelten ausgebrachten Stickstoffmengen aus Wirtschaftsdüngern und denen nach Tabellenwert. Dabei unterschätzte der Tabellenwert im Vergleich zum Laborwert die Stickstoffmenge um 7 %. Die Sensorschätzungen konnten nicht für einen Gesamtvergleich herangezogen werden, da das Güllefass mit NIR Sensor nicht die gesamte Saison zur Verfügung stand. Grundsätzlich deuten diese Ergebnisse an, dass „Standardbetriebe“ gut mit Tabellenwerten bilanziert werden können. Durch die Gegenüberstellung der geernteten Mengen (erfasst durch die Sensortechnik am Feldhäcksler) und der verfütterten Mengen aus dem Silo (gewogen mittels einer Wiegeeinrichtung im Futtermischwagen) konnten außerdem die Silierverluste genau berechnet werden. Darüber hinaus haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Stickstoffflüsse mithilfe digitaler Technik auf dem Milchviehbetrieb abgebildet werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ständige Datenplausibilitätsprüfung, gegebenenfalls auch mittels Probennahmen. Sinnvoll wäre schlussendlich eine Zusammenführung dieser Daten in einer Managementsoftware, welche dem Landwirt einen Überblick über seine Betriebsdaten gibt und somit als Entscheidungsgrundlage dienen kann. Dies konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht abschließend getestet werden.



Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung eines Stickstoffflusses für das Jahr 2023 auf einem Projektbetrieb

Praxisrelevanz und Nutzen für landwirtschaftliche Betriebe

Die Ergebnisse des Demonstrationsprojekts zeigen, dass NIRS-Sensoren grundsätzlich ein hohes Potenzial für das Wirtschaftsdüngermanagement besitzen.

Mögliche Einsatzbereiche sind unter anderem:

- Bestimmung der Nährstoffgehalte in Echtzeit
- Anpassung der Düngung an den Pflanzenbedarf
- Reduzierung von Über- und Underdüngung
- Grundlage für teilflächenspezifische Wirtschaftsdüngerausbringung
- Optimierung der betrieblichen Güllelogistik

Für einen zuverlässigen Einsatz ist jedoch eine Erweiterung und kontinuierliche Anpassung der Sensorkalibrationen erforderlich.

Fazit und Perspektiven

Die Untersuchungen zeigen, dass NIRS-Sensoren ein vielversprechendes Werkzeug zur digitalen Unterstützung des Wirtschaftsdüngermanagements darstellen. Insbesondere die Möglichkeit, Nährstoffgehalte in Echtzeit zu erfassen, eröffnet neue Perspektiven für eine präzisere und ressourcenschonende Düngung.

Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Messgenauigkeit stark von der Zusammensetzung des Wirtschaftsdüngers sowie von der Qualität der zugrunde liegenden Kalibrationsmodelle abhängt. Für eine breite Anwendung in der Praxis sind daher weitere Arbeiten zur Erweiterung der Kalibrationen sowie zur Verbesserung der Systemintegration erforderlich.

Auf Grundlage der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurde an der LfL im Jahr 2024 das Folgeprojekt „NMR-Slurry Detec“ (Finanzierung: StMELF, FKZ: A/23/24) gestartet, in dem die Kernspinresonanz (NMR) als alternatives bzw. ergänzendes Verfahren zur Bestimmung von Gülleinhaltsstoffen untersucht wird.

Demonstrationsprojekt 2

Ziel des Demonstrationsprojekts „sensorgestützte Ertragsermittlung“ war es, die am Markt verfügbaren Techniken zur Ertragserfassung verschiedener Hersteller auf ihre Genauigkeit, Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit zu überprüfen. Für dieses Vorhaben konnten insgesamt zehn Projektbetriebe (acht familiengeführte landwirtschaftliche Betriebe und zwei Betriebe der bayerischen Staatsgüter (BaySG)) gewonnen werden, auf denen die Sensortechniken an selbstfahrenden Feldhäckslern (SFH) vier verschiedener Hersteller (Claas KGaA mbH, CNH Industrial, John Deere GmbH & Co. KG und Bernard Krone Holding SE & Co. KG) unter Praxisbedingungen getestet wurden. Die Betriebe lagen in unterschiedlichen Regionen Bayerns, sodass die Technik bei unterschiedlichen Ernte- und Witterungsbedingungen sowie auf Flächen mit unterschiedlichen Standorteigenschaften

(Jahresertragsniveau, Jahresniederschläge, Flächengeometrie, Relief) getestet werden konnte.

Die Versuche wurden bei verschiedenen Schnitzeitpunkten im Grünland und bei mehreren Ernteterminen im Silomais durchgeführt. Zur Überprüfung der Erfassung der Frischmasseerträge am SFH, die über den Auslenkgrad und die Geschwindigkeit der Vorpresswalzen ermittelt werden, wurden pro Erntetermin mindestens 20 Fahren mithilfe von geeichten Fuhrwerkswaagen (auf den BaySG Betrieben, Genauigkeit ± 10 kg) oder dynamischen Achslastwaagen (Intercomp LS630, Genauigkeit 2-3 % (Herstellerangabe) bei 6 km/h, Intercomp Company, Medina, USA) gewogen. Die Nettogewichte der Wagenladungen wurden mit der ermittelten Frischmasse vom SFH pro Wagenladung verglichen (der durchschnittliche Wiegefehler beim Nettogewicht lag laut Herstellerangabe für die Achslastwagen bei 141 kg, ermittelt für $n = 919$ Wagenladungen mit einem Wertebereich von 860 bis 9.640 kg). Zur Überprüfung der Bestimmung des Trockenmasse- (TM-) Gehalts über den NIRS-Sensor am Auswurfkrümmer des SFH wurde das Erntegut der Fahren nach Entladen im Silo repräsentativ beprobt ($n = 50$; nach Thurner et al., 2011). Zur Ermittlung des Referenz-TM-Gehalts wurden die Stichproben gut gemischt, in einen Crispacbeutel abgepackt, vor Ort gewogen und im Trockenschrank bei 105°C bis zum vollständigen Feuchtigkeitsverlust getrocknet und schließlich rückgewogen. Mit dem Gewicht der Proben im feuchten und im trockenen Zustand konnte der reale TM-Gehalt berechnet werden. Die Inhaltsstoffschätzung, die ebenfalls über den NIRS-Sensor erfolgt, wurde durch eine Laboranalyse der Stichproben im nasschemischen Verfahren nach Weender überprüft. Im Versuchszeitraum von 2020 bis 2023 wurden insgesamt 1.141 Fahren (691 im Grünland, 450 im Silomais) gewogen und beprobt sowie insgesamt 282 Proben (157 mit angewelktem Gras, 125 mit Silomais) im Labor nasschemisch untersucht. Zusätzlich wurde auf zwei der zehn Projektbetriebe (Betrieb A in der Oberpfalz, Betrieb B in Oberbayern) die Genauigkeit der flächenspezifischen Ertragserfassung überprüft, um Aussagen zur Praxistauglichkeit der sensorgestützten Ertragserfassung treffen zu können. Dafür wurden die flächenspezifischen TM-Erträge in t/ha, die vom SFH erfasst wurden, mit den flächenspezifischen Referenzerträgen verglichen. Die Referenzerträge wurden mit den aufsummierten Nettogewichten der einzelnen Fahren pro Schlag und mit dem schlagspezifischen TM-Gehalt (ermittelt durch Laboranalysen) berechnet. Insgesamt wurden 29 Grünlandflächen an zehn verschiedenen Schnittterminen ($n = 68$) und neun Flächen mit Silomais an vier Ernteterminen ($n = 11$) überprüft.

Die Ergebnisse der Untersuchungen pro Wagenladung zeigten, dass die Sensortechnik am SFH sowohl die Frischmasseerträge als auch den TM-Gehalt im Grünland und im Silomais

sehr genau ermitteln kann (Abbildung 5 und Abbildung 6). Auch flächenspezifisch konnten die TM-Erträge mit einer relativen Abweichung zum Referenzwert im Median von 5 % im Grünland und -6,10 % im Silomais sehr genau ermittelt werden.

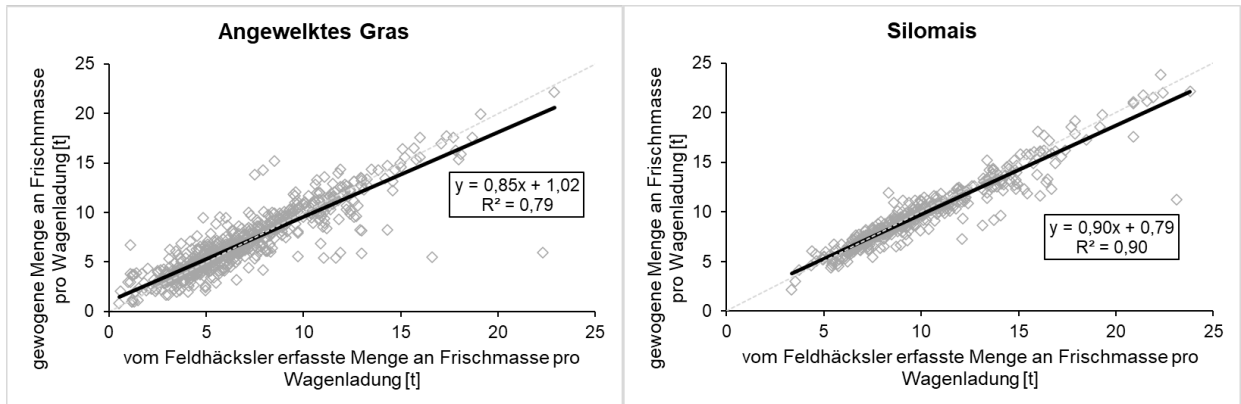


Abbildung 5: Vergleich der gewogenen Frischmasse von angewelktem Gras ($n = 691$) und Silomais ($n = 450$) mit der vom Feldhäcksler ermittelten Frischmasse pro Wagenladung (verschiedene Standorte und Erntezeitpunkte, Versuchsjahre 2020 bis 2023, zehn bayerische Betriebe, vier SFH-Hersteller)

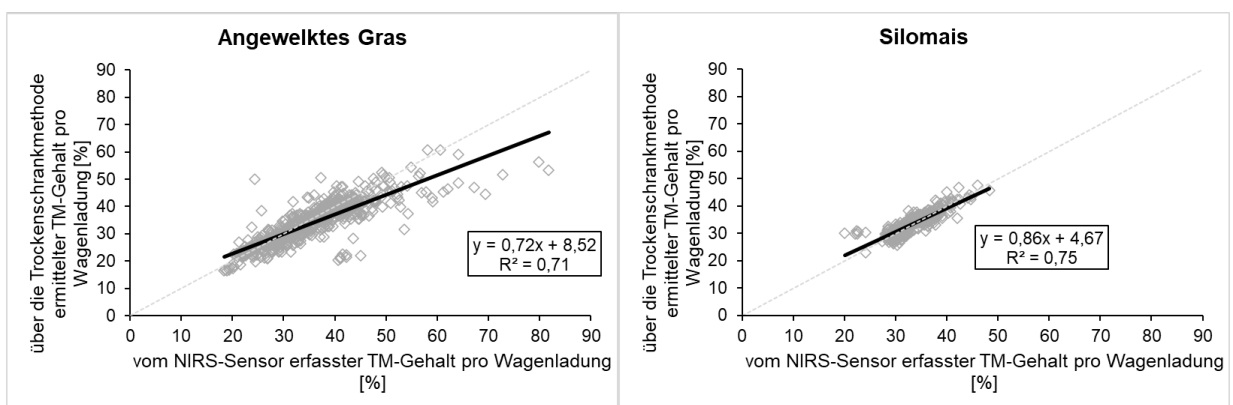


Abbildung 6: Vergleich der mit der Trockenschrankmethode ermittelten und der mit dem NIRS-Sensor erfassten TM-Gehalte pro Wagenladung in angewelktem Gras ($n = 691$) und Silomais ($n = 450$) (unterschiedliche Standorte und Erntezeitpunkte, Versuchsjahre 2020 bis 2023, zehn bayerische Betriebe, vier NIRS-Sensorhersteller mit sechs NIRS-Sensormodellen).

Die Ergebnisse pro Wagenladung zeigten im Silomais eine geringfügig bessere Übereinstimmung als im Grünland. Dies lag zum einem daran, dass der Erntegutfluss bei der Silomaisernte meist gleichmäßiger erfolgt als im Grünland. Die Grünlandstandorte wiesen meist sehr heterogene Bestände auf, was bei der Ernte aus dem Schwad aufgrund der daraus resultierenden vorhandenen Biomasse zu einem ungleichmäßigeren Gutstrom im SFH führte. Ein ungleichmäßiger Gutstrom beeinflusst durch eine zu geringe Auslenkung der Vorpresswalzen bzw. durch schnelle und plötzliche Veränderungen in deren Reaktionsmechanismus die Funktionsfähigkeit der Ertragssensoren und damit die Genauigkeit der Ertragsschätzung. Die Erträge auf dem Grünland sind stark von

Witterungseinflüssen und von den Bodeneigenschaften abhängig, weshalb die Grünlanderträge (auch innerhalb einer Fläche) stark schwanken können. Bei sehr wenig Masse im Schwad war beispielsweise der Auslenkungsgrad der Vorpresswalzen zu gering, sodass die Sensortechnik die Volumenstrommenge häufig nicht korrekt detektieren konnte. Gleiches galt bei stark zunehmender Masse innerhalb eines kurzen Teilstücks im Schwad (Schwadende oder Kurven), bei dem sich der Auslenkungsgrad und die Geschwindigkeit der Vorpresswalzen schlagartig erhöhten oder anschließend wieder reduzierten. Ein weiterer Grund für Ungenauigkeiten in der Sensortechnik war die Limitierung der Messbereiche in den Kalibrierkurven des NIRS-Sensors. Bei sehr hohen TM-Gehalten (laut Untersuchungen über 40 %) oder bei sehr niedrigen TM-Gehalten (laut Untersuchungen unter 25 %) konnten die Werte nicht mehr exakt geschätzt werden. Ein Vergleich der berechneten TM-Menge pro Wagenladung in t TM aus SFH-Daten mit denen aus Referenzdaten ergab einen guten Konkordanz-Korrelationskoeffizienten von 0,82 (Konfidenzintervall 0,79 bis 0,84) bei angewelktem Gras und 0,90 (Konfidenzintervall 0,88 bis 0,92) bei Silomais.

Die Überprüfung der Inhaltstoffschätzung über den NIRS-Sensor zeigte je nach Nährstoffparameter und Fruchtart nur mäßig gute Übereinstimmungen der am Häcksler erfassten Werte mit den Referenzwerten (Abbildung 7). Die Faserkomponenten Rohfaser (CF), Säure-Detergenzien-Faser (ADF) und Neutrale Detergenzien-Faser (NDF) wurden dabei am genauesten geschätzt. Aufgrund des hohen Wassergehalts und der im Verhältnis geringen Konzentration der Nährstoffe im Erntegut ist nicht davon auszugehen, dass die Kalibrierkurven des NIRS-Sensors von der Herstellerseite so exakt angepasst werden können, dass die Schätzungen vom Realwert künftig weniger abweichen. Die Abweichung der Schätzwerte von den Referenzwerten lagen im Durchschnitt je nach Parameterwert unter 20 % und damit für eine erste Einschätzung zur Qualität des Ernteguts während des Erntevorgangs in einem akzeptablen Bereich. Die Hersteller sind bemüht die Sensortechnik auf Basis der Untersuchungsergebnisse stetig anzupassen und zu optimieren.

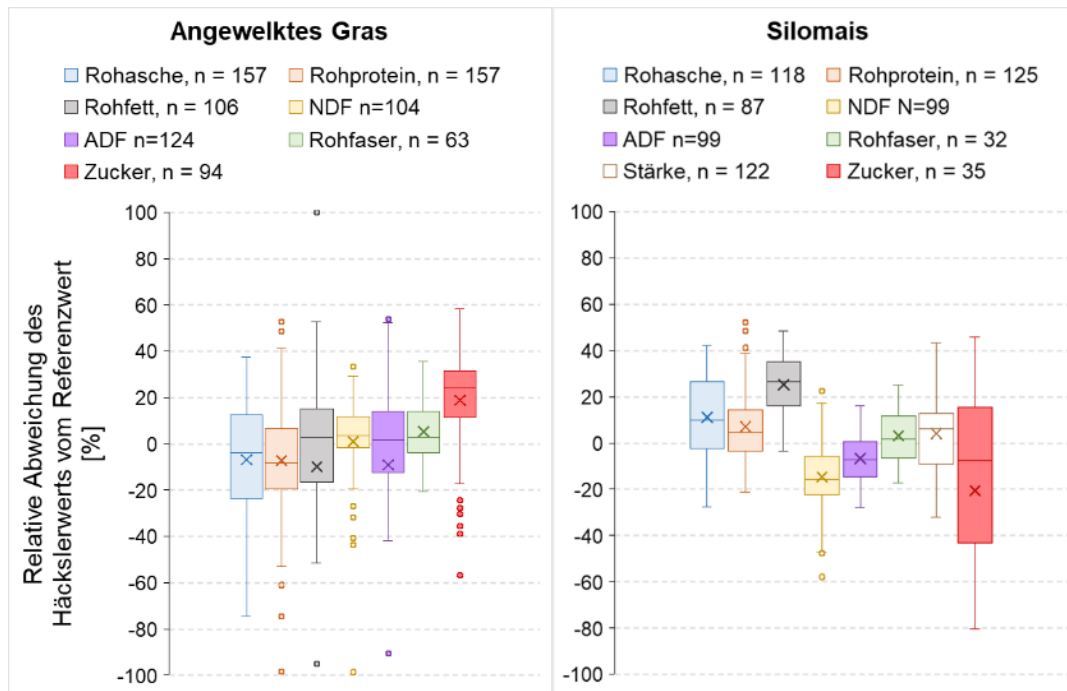


Abbildung 7: Relative Abweichung der mit dem NIRS-Sensor erfassten Nährstoffkomponenten im Erntegut von den im Labor analysierten Nährstoffkomponenten (Versuchsjahre 2021 bis 2023, acht Testbetriebe, drei NIRS-Sensorhersteller und fünf Sensormodelle).

Neben der sensorgestützten Ertragserfassung am SFH wurde auch die satellitengestützte Ertragsschätzung über Fernerkundung in Kombination mit einem Wachstumsprognosemodell als weitere Methode zur Ertragsermittlung im Grünland untersucht. Zur Überprüfung der satellitenbasierten Methode wurden die flächenspezifischen Grünlanderträge der Grünlandflächen von Betrieb A und Betrieb B rückwirkend über fünf Jahre (2018 bis 2022) über ein Wachstumsprognosemodell der Firma Vista Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH geschätzt. Die Ertragsmodellierung erfolgte mithilfe von Satellitenbildern des Sentinel 2 und über das Wachstumsprognosemodell Promet V11, das die Firma Vista entwickelt hat.

Die Gegenüberstellung der modellierten Erträge mit den vorhandenen Ertragsdaten vom SFH zeigten nur mäßige Übereinstimmungen (Abbildung 8) mit einem Konkordanz-Korrelationskoeffizienten von 0,54 (Vertrauensintervall 0,37 bis 0,68). Die Ertragsschätzung im Grünland über Fernerkundungsmethoden lieferte aufgrund der Heterogenität und Komplexität der Grünlandstandorte und deren unterschiedlicher Nutzungsarten und -intensitäten aktuell noch zu unpräzise Ergebnisse. Dabei spielt auch eine gute Qualität der Satellitenbilder (geringer Bewölkungsgrad, kurzer Zeitabstand zwischen den Aufnahmen und dem Schnitzeitpunkt) eine entscheidende Rolle, welche nicht immer gegeben war. Eine Erweiterung des Modells von Vista mit zusätzlichen

Eingangsparametern und in-situ-Daten von unterschiedlichen Standorten deutschlandweit könnte die Genauigkeit der Ertragsschätzungen erhöhen. Grundsätzlich bietet die satellitengestützte Methode jedoch eine vielversprechende und einfache Möglichkeit, um die Ertragserfassung im Grünland flächendeckend zu realisieren. Es ist zu erwarten, dass mit den fortschreitenden Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) noch bessere Modelle entwickelt werden, die die Erträge präziser schätzen können. Die Weiterverfolgung dieser Methode ist daher zielführend.

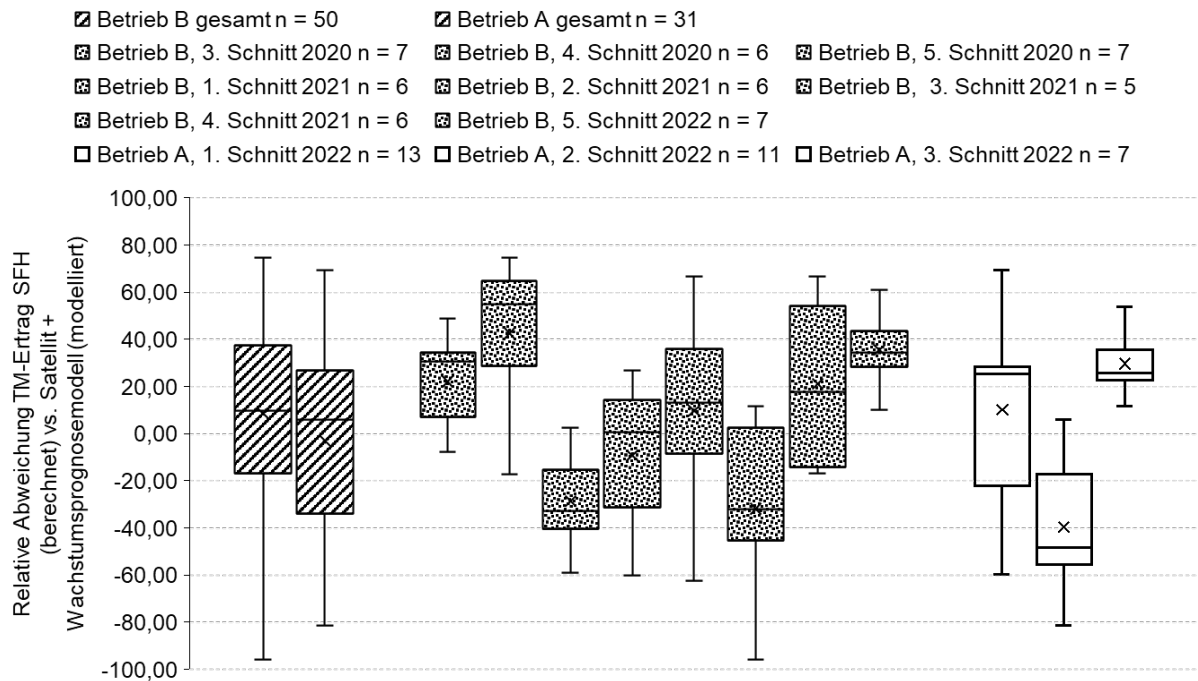


Abbildung 8: Boxplots der relativen Abweichung der Trockenmasseerträge berechnet aus den Daten vom selbstfahrenden Feldhäcksler zu den modellierten Trockenmasseerträgen der Firma Vista in $t \cdot ha^{-1}$ bei zwei bayerischen Betrieben (Betrieb B = Obb., Betrieb A = Opf.)

Neben der Überprüfung der Genauigkeit der Sensortechnik wurde im Demonstrationsprojekt 2 auch die Funktionalität der Technik sowie der Datenfluss und die Datenqualität bewertet. Die Bewertungsmatrix in Abbildung 9 gibt die Erfahrungen und Bewertungen zur sensorgestützten Ertragserfassung über den gesamten Projektzeitraum über alle Hersteller und alle Betriebe, gegliedert in Teilbereiche wieder. Kritisch waren vor allem die Teilbereiche Datentransfer und Schnittstellen. Während der Versuchsphasen kam es teilweise zu Datenverlusten wegen fehlerhaften bzw. fehlenden Softwareupdates der Sensortechnik oder aufgrund fehlender Schnittstellen zwischen dem Telemetriesystem des Feldhäckslers und FMIS des Landwirts. Schnittstellen sollten einen automatischen Datentransfer zwischen Lohnunternehmer und Landwirt ermöglichen. Dies konnte in der Praxis nicht immer realisiert werden. Die Datenweitergabe von Lohnunternehmer zu

Landwirt erfolgte teils noch manuell z. B. per USB-Stick oder ggf. nur als PDF-Dokument. Wenn dies jedoch nicht unmittelbar nach Ernte erledigt wurde, geriet die Datenweitergabe oftmals in den Hintergrund. Eine nachträgliche Datenanforderung vom Landwirt erfolgte meist nicht. In manchen Praxisfällen wurden die Daten vom Lohnunternehmer gelöscht, wenn diese beispielsweise aus der Erntesaison des Vorjahres waren. Aber auch unzureichende Einweisung des Anwenders in die Technik am Feldhäcksler konnten den Datentransfer sowie auch die Datenqualität negativ beeinflussen, wenn z. B. die Technik falsch bedient oder Einstellungen in der Software falsch gesetzt wurden. Im Rahmen des Teilprojekts konnten Softwareschulungen für Lohnunternehmer und Landwirte in Zusammenarbeit mit Claas und John Deere organisiert werden, um diese Wissenslücken zu schließen. Die Softwarelösungen zum Datenmanagement und zur Datenweiterverarbeitung wiesen vor allem im Hinblick auf das Grünlandmanagement Funktionslücken auf. So war es beispielsweise nicht bei jedem Anbieter möglich, Ertragsdaten aus einem Jahr zu einem Jahresertrag zusammenzufassen, um daraus eine Jahresertragskarte zu bilden. Anregungen und Kritik wurden von den Herstellern positiv aufgenommen und für die Weiterentwicklung ihrer Softwarelösungen genutzt. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Datenqualität. Diese wurde im Demonstrationsprojekt zunächst auf Basis von georeferenzierten Auswertungen und über Visualisierung in Geoinformationssystemen (GIS) untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Ertragsdatensätze teilweise unplausible (entweder unnatürlich hohe oder niedrige) Werte beinhalteten. Diese sind meist auf technische Fehler (wie z. B. fehlerhafte Funktion der Technik, fehlendes GPS-Signal) oder Anwenderfehler (wie bereits oben erwähnt z. B. falsche Einstellung der Arbeitsbreite, nicht gereinigte Sensorscheibe) zurückzuführen. Fehlerhafte Datensätze können die sinnhafte Nutzung von Ertragsdaten deutlich schmälern, von daher ist eine sorgfältige Plausibilisierung und Vorprozessierung der Ertragsdaten anzustreben. Des Weiteren ist für den Nutzer schwierig nachzuvollziehen, wie verlässlich und realistisch die Ertragskarten sind, die vom Softwarehersteller angeboten werden. Dies könnte unter anderem eine Ursache sein, dass Ertragsdaten aktuell noch wenig für eine optimierte Bewirtschaftung in der Praxis genutzt werden.

Bewertungskriterien	
Kalibration der Frischmasseerfassung	++
Messbereich NIRS	+
Umfang verfügbare Kalibrationen (bezogen auf Fruchtart)	+
Praktische Handhabung (z. B. Zugänglichkeit Sensoren, Störungsanfälligkeit)	0
Bedienerfreundlichkeit Terminal	0
Software- und Technikupdate	+
Schnittstellen (Maschine – Datenportal)	0
Datentransfer (Maschine – Datenportal)	0
Datenverluste	-
Datenplausibilität	-
Datenqualität	0
Ertragskarten	0
Nutzung Ertragsdaten/-karten für Bewirtschaftung	--

Abbildung 9: Bewertungsmatrix für die Bewertung der Funktionalität und Praxistauglichkeit der sensor-gestützten Ertragsfassung auf Basis von Erfahrungswerten (alle Projektbetriebe und alle Hersteller)

Demonstrationsprojekt 3

Die Fütterung stellt das Bindeglied zwischen der Innen- und Außenwirtschaft dar. Bisher sind meist nur Insellösungen der verschiedenen Hersteller am Markt verfügbar. Im Demonstrationsprojekt „Fütterungsmanagement“ sollte digitale Technik im Bereich Fütterung auf die Vernetzung und die durchgehende Übertragung und Verfügbarkeit von Daten z. B. zu Futtermengen und Futterkomponenten gemäß den zuvor im Projekt erarbeiteten Vorgaben bewertet werden. In zehn Betrieben (drei Betriebe der BaySG und sieben Praxisbetriebe) konnte die Technik von insgesamt sechs Herstellern (SILOKING Mayer Maschinenbau GmbH, B. Strautmann & Söhne GmbH u. Co. KG, Trioliet, Keenan (Alltech GmbH), Faresin Industries Spa und Hirl Misch- und Anlagentechnik e.K.) geprüft werden. Voraussetzung für die Teilnahme der Betriebe am Projekt war die programmierbare Waage am Futtermischwagen bzw. am vollautomatischen Fütterungssystem. Diese Art der Waage speichert die real geladenen Mengen während des Beladungsprozesses je Mischung. Es besteht so die Möglichkeit, mit der dazugehörigen webbasierten Auswertungssoftware des jeweiligen Herstellers den Futtermengenstrom nachzuvollziehen. Das bedeutet, dass der Landwirt sich den Verbrauch jeder einzelnen Rationskomponente über einen gewissen Zeitraum anzeigen lassen und dies für weitere Berechnungen wie etwa die Betriebszweigauswertung nutzen kann.

Die Daten für jeweils einen Datensatz wurden einmal im Monat auf allen Betrieben erhoben. So konnten insgesamt 273 Datensätze erhoben werden. Nach Prüfung des Datenflusses aller Hersteller konnte den Projektbetrieben aufgezeigt werden, welche Kennzahlen aus den während der Versuchsphase gewonnenen Daten berechnet werden können. In der Datenübertragung wurde unter anderem geprüft, ob die korrekten Daten weitergegeben wurden und ob die Zuordnung der Daten stimmte.

Die erfassten Daten und die damit berechneten Kennzahlen geben Auskunft über die Futter- und Nährstoffeffizienz sowie auch über die Wirtschaftlichkeit des Betriebes im Bereich der Fütterung. Sie bieten somit eine Grundlage für das betriebliche Controlling im Fütterungsbereich. Da die Futterkosten den größten Posten in den Direktkosten eines Betriebs darstellen, sind die so gewonnenen Zahlen von großer wirtschaftlicher Bedeutung.

Je nach Hersteller nahm die Realisierung der korrekten Datenübertragung gemäß den Projektvorgaben (siehe Abbildung 10) auf den Betrieben unterschiedlich viel Zeit in Anspruch, so dass nicht alle Betriebe eine Datenerhebung über den gleichen Zeitraum aufweisen. Ein Hauptproblem bei der Datenübertragung war das Fehlen von geeigneten bzw. offenen Schnittstellen, da sich unter anderem noch nicht alle Hersteller auf ein einheitliches Datenformat verständigen konnten. Das stellte auch zum Projektende immer noch die größte Hürde und Herausforderung bei der Erfassung und Nutzung von Daten in der Fütterungskette dar. Einige Hersteller überarbeiten aufgrund des Projektes jetzt die im Hintergrund laufende Fütterungsmanagementsoftware. So sollen die Probleme der Schnittstellen als auch des Datenformates angegangen werden.

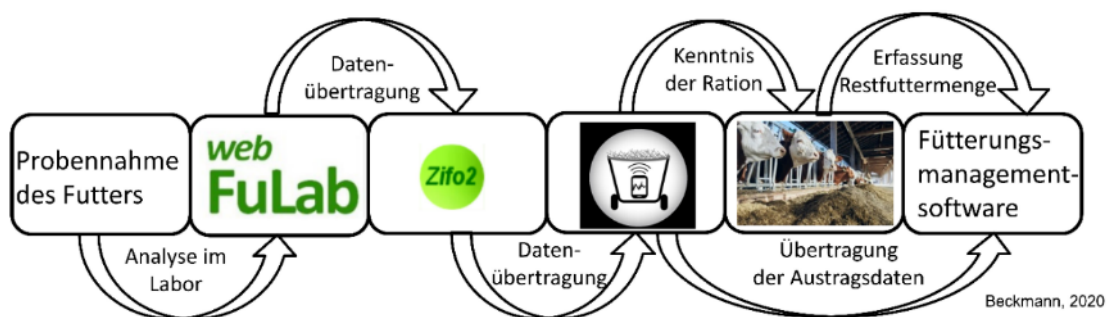


Abbildung 10: Darstellung des optimalen Datenflusses in der Fütterungskette auf einem Milchviehbetrieb.

In Abbildung 10 wird gezeigt, wie der ideale Informationsfluss bei der Fütterung, so wie er im Demonstrationsprojekt 3 untersucht wurde, aussehen kann. In Bayern ist das dank der Programme „webFuLab“ und „Zifo2“ im LKV-Futtermittellabor schon teilweise möglich. „webFuLab“ ist eine Online-Plattform, über die Analyseergebnisse von

Futtermitteln digital erfasst und an den Nutzer (beispielsweise den Betriebsleiter) weitergegeben werden können. „Zifo2“ ist dagegen ein Programm, mit dem Landwirte und Berater Futterrationen berechnen können. Anderen Analytiklaboren, wie den LUFA-Laboren oder dem LKS-Labor, fehlt in der Regel eine Transfer-Plattform wie das „webFuLab“. Der in Abbildung 10 dargestellte Informations- bzw. Datenfluss ließ sich in dieser Form im Verlauf des Projektes leider bei keinem Hersteller darstellen bzw. prüfen. Hauptursache hierfür war zum einen die Restfuttermengenerfassung, die manuell erfolgen muss und zum anderen, die fehlende Schnittstelle einiger Mischwagenhersteller zum Rationsberechnungsprogramm („Zifo2“). Nur bei einem Hersteller ist es gelungen, die Datenübertragung bis zur Erfassung der Austragsdaten (vorgelegte Futtermengen) zu realisieren. Die Austragsdaten werden mittels WLAN, Bluetooth oder Datenstick in die Managementsoftware des Herstellers übertragen, wo der lückenlose Datenfluss endet. All diese Daten, seien es die Beladungs- bzw. Austragsmengen der Rationen, dienen zur Futterplanung sowie zur Berechnung der Futtereffizienz. Die Erfassung der Restfuttermengen ist allerdings weiterhin nur händisch möglich.

Der Betrieb, auf dem die Realisierung eines lückenlosen, digitalen Datenflusses gemäß den Projektvorgaben am schnellsten erfolgte, weist Datensätze über einen Zeitraum von 44 Monaten auf. Die anderen Betriebe weisen weniger Datensätze auf.

Als weiteres Ziel neben der Erstellung eines lückenlosen Datenflusses sollte dargestellt werden, welchen Nutzen die erfassten Daten für die Praxis haben. Für die Berechnungen der Futtereffizienz wurde dem Projekt von der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW) ein selbstprogrammiertes Excel-Tool zur Verfügung gestellt, welches in der Beratung ausschließlich von der LWK NRW verwendet wird und öffentlich nicht zur Verfügung steht. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde dieses Tool um die Parameter der Nährstoff- und Energieeffizienz erweitert. Um diese Parameter zu berechnen, sind neben den Daten aus der Fütterungstechnik, den Ergebnissen aus der Milchgüteprüfung (Milchinhaltstoffe und -menge) und dem Futtermittellabor (Analysen der hofeigenen Futtermittel) weitere Daten aus der Buchführung (Futtermittelpreise) erforderlich. In Zusammenarbeit mit der Abteilung für Informationsmanagement der LfL wurde an der Automatisierung der Zusammenführung der Daten gearbeitet. Der Versuch der Zusammenführung blieb leider aus mehreren Gründen erfolglos. Die größten Hürden stellten das fehlende einheitliche Datenformat sowie die nicht digitalisierten Daten, wie z. B. Angaben aus der Buchführung und die Restfuttermengen dar.

Damit bei allen Betrieben die gleichen Daten vorliegen konnten, wurden über die gesamte Projektlaufzeit alle betriebseigenen Futtermittel in dem gleichen Labor analysiert. Auf Basis der Ergebnisse und unter Einbeziehung des LKV- Beraters des jeweiligen Betriebes wurden die Rationen berechnet. Dabei wurde auf eine hohe Grobfutteraufnahme und auf die Vermeidung von Überschüssen, sei es an Protein oder an Energie, geachtet. Dies hatte zur Folge, dass alle Betriebe im Projektverlauf die Grobfutteraufnahme steigern konnten. Eine hohe Grobfutteraufnahme ist stets anzustreben, da Grobfutter für den Mensch nicht verwertbare Biomasse darstellt und durch die Fütterung von Wiederkäuern in Form von Milch und Fleisch verfügbar gemacht wird. Voraussetzung für eine hohe Grobfutteraufnahme sind gute bis sehr gute Grobfutterqualitäten, was mit den Analysen bestätigt werden sollte.

In einer Meisterarbeit wurde der Fragestellung nachgegangen, welchen Effekt eine hohe Grobfutteraufnahme sowohl auf die Proteineffizienz als auch auf die Ökonomie hat. Alle Rationen wurden nach der Vorgabe des DLG-Merkblatts 444 „Berücksichtigung N- und P-reduzierter Fütterungsverfahren bei den Nährstoffausscheidungen von Milchkühen“ erstellt.

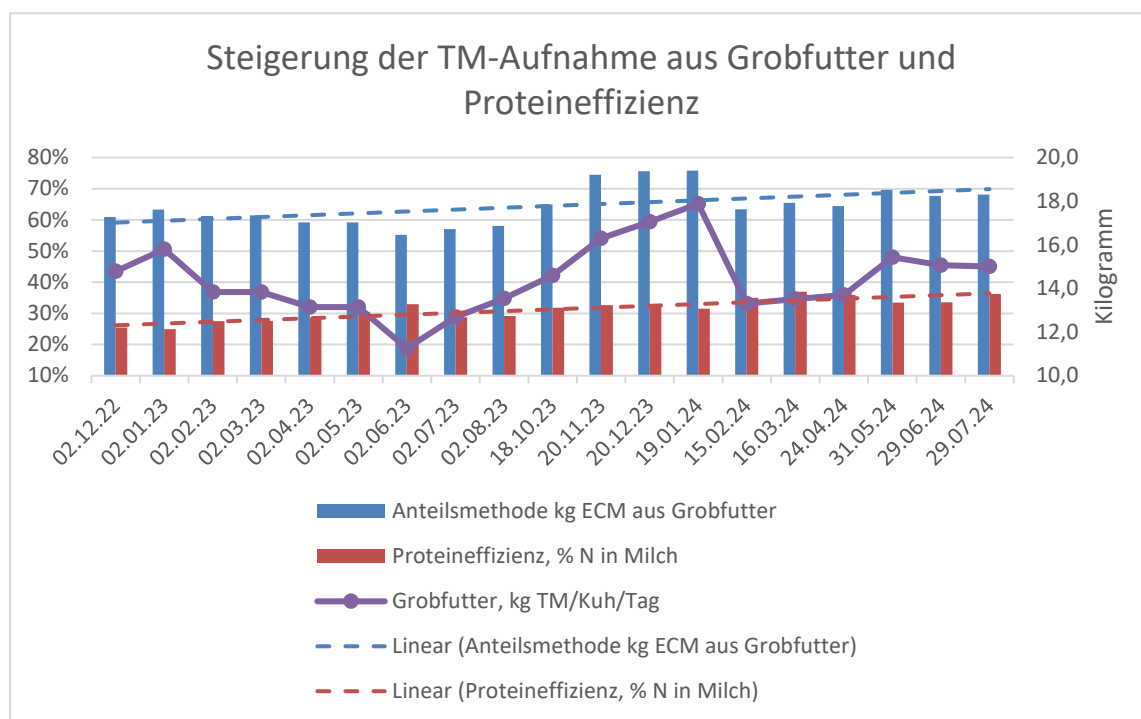


Abbildung 11: Abbildung zum Verlauf der Trockenmasse (TM) -Aufnahme und Steigerung der Proteineffizienz

In Abbildung 11 ist zum jeweiligen Erfassungstermin zu erkennen, dass die Grobfutteraufnahme bis zu Beginn des Versuches (02.02.2023) gesunken ist. Dann

wurde die Ration umgestellt und ein Kilogramm Luzerneheu mit eingemischt. Die weiteren Komponenten der Ration waren Gras- und Maissilage, Rapsextraktionsschrot, Getreideschrot (halb Weizen halb Körnermais) sowie eine Mineralisierung aus Mineralfutter, Viehsalz und Futterkalk. Nach der Spitze der Gesamttrockenmasseaufnahme (19.01.2024) wurde das Luzerneheu rausgenommen, die Ration umgestellt und mit Pressschnitzelsilage als Saffutter ergänzt. Der Anteil der Pressschnitzelsilage betrug etwa 25% der Gesamttrockenmasse. Hier stieg die TM-Aufnahme auch wieder moderat an. Nach drei Monaten (24.04.2024) wurde der Ration zusätzlich ein Kilogramm Luzerneheu hinzugefügt. Dadurch stieg die Trockenmasseaufnahme aus dem Grobfutter um mehr als ein Kilogramm an. Die Regressionslinien der TM-Aufnahme (blaue, gestrichelte Linie) und die der Proteineffizienz (rote, gestrichelte Linie) zeigen auf, dass sich bei hohem Grobfuttereinsatz auch die Proteineffizienz gleichzeitig steigern lässt. Dies gestaltet sich in der Regel als schwierig, da die Grobfutterqualitäten sehr schwanken.

Bei der Anteilsmethode handelt es sich um eine Berechnungsmethode, bei der der Futterenergiegehalt ins Verhältnis zum Energiegehalt des Grobfutters gesetzt wird. Für dieses Verhältnis wird angenommen, dass die Milch im gleichen Verhältnis aus der Energie des Grob- und Konzentratfutters gebildet wird.

Aus den erfassten Daten wurden Kenngrößen wie Trockenmasseaufnahme und Futterkosten berechnet (siehe Abbildung 12). Insgesamt wurden im Projekt 39 Parameter berechnet, die eine Aussage zur Futtereffizienz sowie zur Ökonomik des Betriebes zulassen. Die Kenntnis dieser Größen ist für den Betrieb von enormer Tragweite. Sie haben Einfluss auf die Tiergesundheit, das Tierwohl sowie auf den ökonomischen Erfolg des Betriebes.

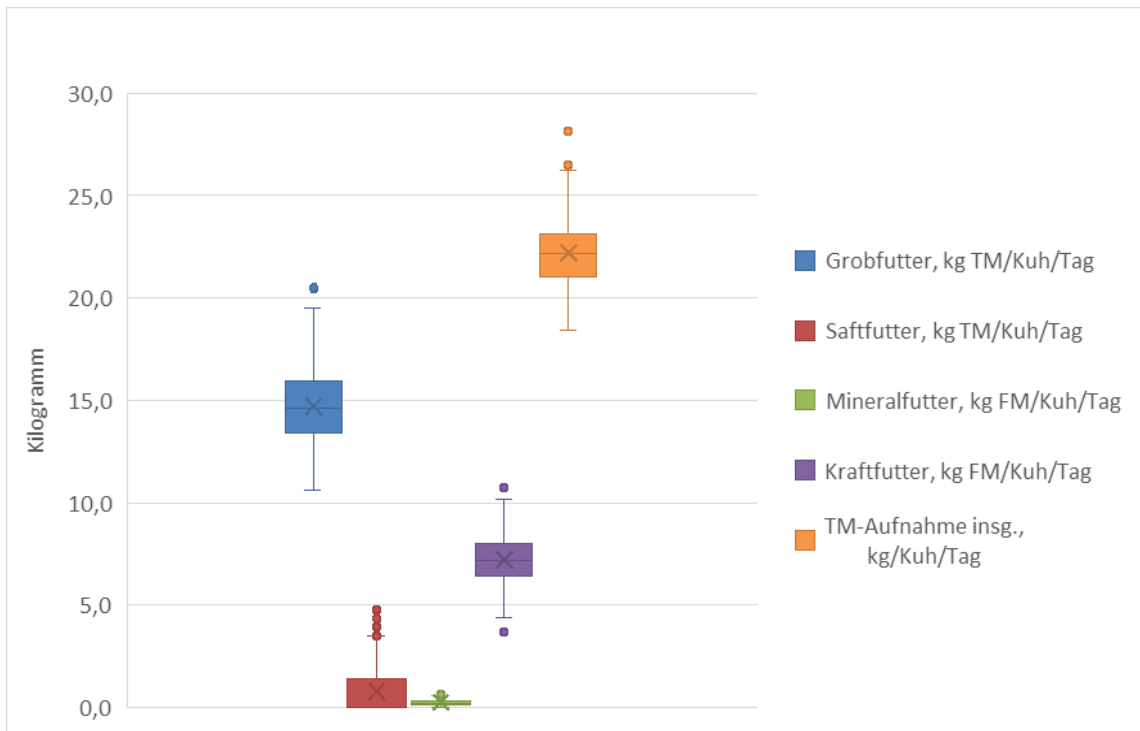


Abbildung 12: Datenverteilung der Futteraufnahme über alle Erhebungen auf den Projektbetrieben

Im Laufe des Projektes wurden weitere Kenngrößen berechnet, welche sowohl die Nährstoff- als auch die Energieeffizienz der Betriebe belegen konnten. Veranschaulicht wird dies am Beispiel des Stickstoff- und Phosphoraufwandes je kg ECM, wie in Abbildung 13 zu sehen. In der Stickstoffeffizienz weisen die schlechtesten Betriebe im Projekt eine um das 2,5-fache schlechtere Effizienz auf als die besten Betriebe. Die breite Streuung der Werte verdeutlicht, welches Potential auf den Betrieben, die noch einen hohen Nährstoffaufwand haben, vorhanden ist. Werden nur die Vorgaben der DLG (Merkblatt 444) herangezogen, so lagen 35% der am Projekt beteiligten Betriebe über diesen Vorgaben.

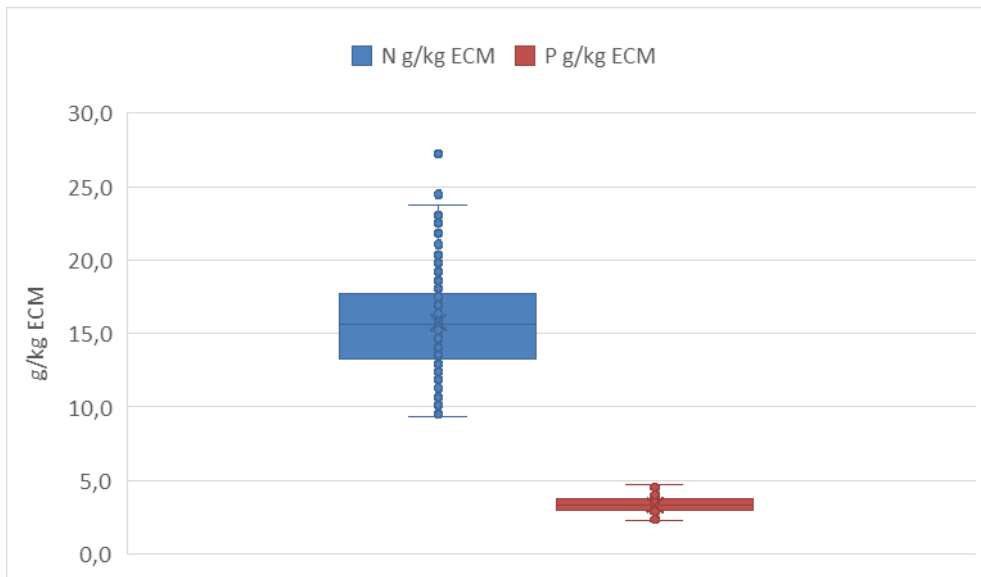


Abbildung 13: Stickstoff (N)- und Phosphor (P)- Aufwand je kg ECM über alle Erhebungen auf den Projektbetrieben

Die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Fütterungsparameter belegen, dass die Genauigkeit des Fütterungsprozess optimiert werden muss, da sie eine direkte Auswirkung auf die Klimabilanz eines Betriebes hat. In der Literatur wird beispielsweise beschrieben, dass die Absenkung des Rohproteingehaltes (CP) um 1%, die Ammoniakemissionen um 17% verringert (Sanjeev et al., 2018).

Die Genauigkeit der gefütterten Komponenten kann mit den Mischprotokollen der Mischwagensoftware kontrolliert werden. Die Genauigkeit der Waagen liegt mit Abweichungen von unter einem Prozent in der minimalen und maximalen Belastung und im Mittel über alle Wiegungen bei 1,3 % (DLG-Prüfbericht 6395). Da alle Mischwagenhersteller die gleichen Waagen eines einzigen Herstellers einbauen, unterscheidet sich die Genauigkeit der Waagen zwischen Futtermischwägen nicht, was bedeutet, dass alle Mischwägen, unabhängig vom Hersteller mit der gleichen Genauigkeit arbeiten und somit die Zahlen vergleichbar sind. Durch dieses Genauigkeit konnte der Einfluss der Fütterung auf den Klimaschutz mit der erfolgreichen Bewerbung eines Praxisbetriebes aus dem Demonstrationsprojekt „Fütterungsmanagement“ für den vom bayerischen Staatministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus ausgelobten bayerischen Klimapreis für „Klimaneutrale Milcherzeugung“ aufgezeigt werden.

Demonstrationsprojekt 4

Die fortschreitende Automatisierung in Milchviehställen, insbesondere durch den Einsatz von Robotersystemen, verändert zentrale Arbeitsabläufe wie das Melken, Füttern und Entmisten grundlegend. Solche intelligenten Technologien sind zunehmend in der Lage, sich flexibel und autonom an die jeweiligen Stallbedingungen anzupassen. Die tatsächliche Autonomie des Gesamtsystems „Milchviehstall“ ist jedoch maßgeblich von einer funktionierenden Kommunikation zwischen den eingesetzten Geräten abhängig. Daraus ergeben sich wachsende Herausforderungen und Anforderungen an die Maschine-zu-Maschine- (M2M-) Vernetzung innerhalb automatisierter bzw. autonomer Stalltechnik.

Zu Beginn des Projekts wurden in Online-Befragungen die Erwartungen der Endanwender an diese Technologien aus arbeitswirtschaftlicher Perspektive sowie ihre Einschätzungen zur Vernetzbarkeit der Stalltechnik erhoben. Die befragten Landwirte wurden hinsichtlich ihrer Erfahrungen mit automatisierter oder digitalisierter Technik in sechs Gruppen eingeteilt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Einteilung der befragten Betriebe

Kategorie	Beschreibung
M1	Betrieb mit Anbindestall
M2	Betrieb mit Laufstall (LS) und Melkstand
A1	Betrieb mit Laufstall (LS) und automatischem Melksystem (AMS)
A2	Betrieb mit Laufstall (LS), automatischem Melksystem (AMS) und Futteranschieberoboter (FR)
A3	Betrieb mit Laufstall (LS), automatischem Melksystem (AMS) und Entmistungsroboter (ER)
A4	Betrieb mit Laufstall (LS), automatischem Melksystem (AMS), Futteranschieberoboter (FR) und Entmistungsroboter (ER)

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Vorerfahrungen mit automatisierten Systemen einen entscheidenden Einfluss auf die Erwartungshaltung haben. In Betrieben, die bereits mehrere automatisierte oder autonome Geräte einsetzen, wird ein deutlicher Bedarf an der Vernetzung von Systemen unterschiedlicher Hersteller sichtbar. Die Vorerfahrungen wirken sich dabei direkt auf die wahrgenommene Notwendigkeit einer herstellerübergreifenden Vernetzung aus (Abbildung 14).

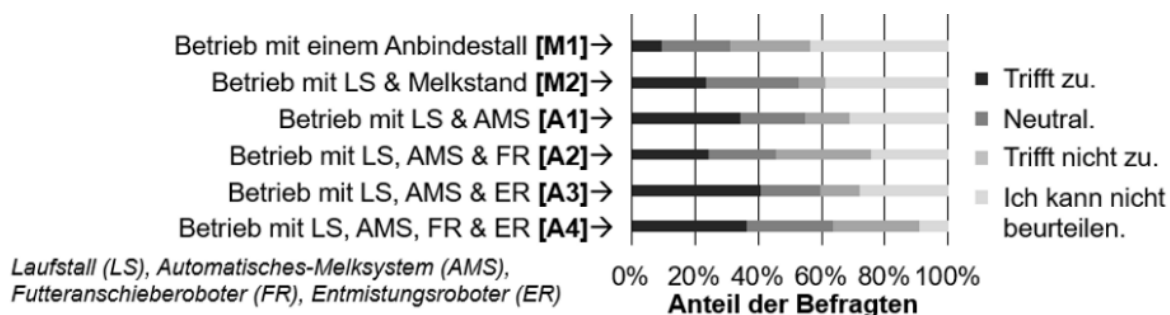


Abbildung 14 Anteile der Befragten, die Erfahrungen mit unzureichender Vernetzung der Geräte im Milchviehstall erlebten [n=231]. Abkürzungen siehe Tabelle 3.

Während lediglich etwa 10 % der weniger erfahrenen Landwirtinnen und Landwirte [M1] die Vernetzung aktuell als unzureichend bewerten, haben ca. 30 % der erfahrenen Nutzergruppen [A1–4] bereits konkreten Bedarf an einer besseren Vernetzung genannt. Die Befragten der Gruppe [A4] betonen insbesondere die Relevanz der Vernetzung, sobald mehrere automatisierte Geräte parallel in einem Stall betrieben werden. Gleichzeitig zeigen sich in der Praxis nach wie vor erhebliche Schwierigkeiten bei der Beurteilung der Vor- und Nachteile vernetzter Systeme, da bislang praxistaugliche Lösungen fehlen.

Die Umfrageergebnisse verdeutlichen zudem (Abbildung 15 und Abbildung 16), dass die erwarteten arbeitswirtschaftlichen Potenziale (wie Zeitersparnis und eine größere Flexibilität der Arbeitsgestaltung) stark vom Automatisierungsgrad des Betriebs abhängen. Landwirtinnen und Landwirte mit geringen Vorerfahrungen in der Automatisierung (M1, M2) erwarten im Vergleich zu erfahrenen Betrieben (A1–4) deutlich geringere Effekte. Die höchsten Erwartungen äußern Betriebe mit einem hohen Automatisierungsgrad (A4).

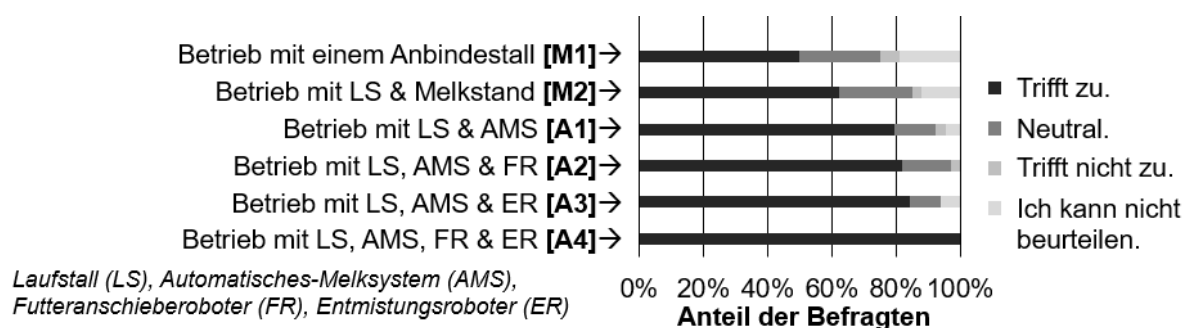


Abbildung 15 Anteile der Befragten, die Zeitersparnis durch die Vernetzung von Geräten im Milchviehstall erwarten [n=231]. Abkürzungen siehe Tabelle 3.

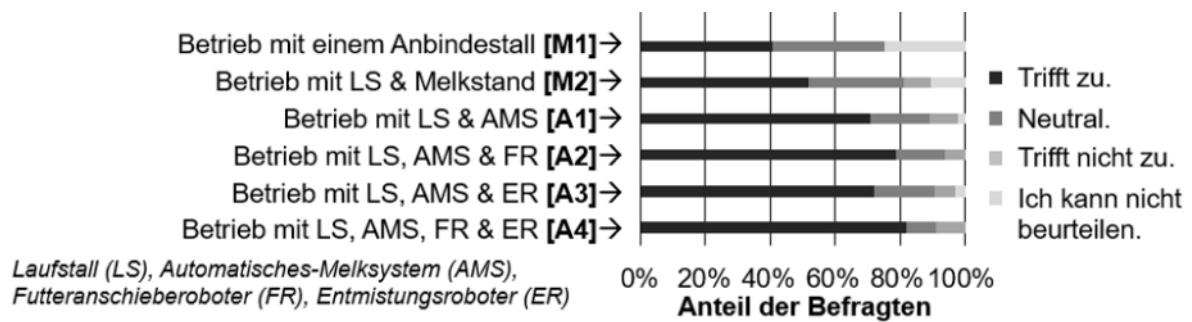


Abbildung 16 Anteile der Befragten, die erhöhte Flexibilität bei der Arbeit durch Vernetzung von Geräten im Milchviehstall erwarten [n=231]. Abkürzungen siehe Tabelle 3.

Der Bedarf an Vernetzung steigt daher mit der Anzahl eingesetzter intelligenter Systeme erheblich an. Solange autonome Systeme nicht miteinander vernetzt sind, bleibt deren Entscheidungspotenzial weitgehend ungenutzt, insbesondere dann, wenn mehrere Systeme zeitgleich betrieben werden. Ohne den Informationsaustausch über die Aktivitäten anderer Geräte können autonome Systeme ihre Funktionen nicht optimal koordinieren und somit den Endanwender nur eingeschränkt entlasten.

Vor diesem Hintergrund wurde in einem Projektbetrieb ein Use Case entwickelt, der exemplarisch die herstellerübergreifende Vernetzung von Stalltechnik erprobt (Abbildung 17). Auf dem Projektbetrieb wurde die technische Infrastruktur zur Vernetzung verschiedener Systeme installiert. Hierzu kooperierten drei familiengeführte Hersteller mit dem Experimentierfeld DigiMilch, um insbesondere kleinere Geräte in ein gemeinsames Managementsystem zu integrieren, obwohl diese bislang in der Regel nicht für eine Vernetzung vorgesehen waren. Dabei wurden sowohl technische Aspekte der Interoperabilität als auch praktische Anforderungen aus Sicht der Landwirte berücksichtigt. Ziel war die Entwicklung einer interoperablen Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemen (u. a. Entmistungsroboter, elektronische Fressgitter) sowie der Einbindung externer Datenquellen (z. B. Wetterdaten) über eine herstellerübergreifende Plattform (SBE der Lock GmbH). Die technische Weiterentwicklung der Kommunikation zwischen den Geräten wurde bis Ende 2024 abgeschlossen, sodass ab Anfang 2025 die ersten Praxistests mit der Steuerungsplattform durchgeführt wurden.



Abbildung 17: Der Entmistungsroboter soll seine Routen entsprechend den Ereignissen am Fressgitter anpassen. Sind die Kühe am Fressgitter fixiert, so soll der Entmistungsroboter diesen Bereich während seiner Entmistungsrouten auslassen.

Während der Planungs- und Installationsphase wurden intensive Abstimmungen mit allen beteiligten Herstellern durchgeführt. Dabei konnten umfangreiche praxisnahe Erkenntnisse gewonnen werden – sowohl in Bezug auf die Bedürfnisse der Endanwender als auch Seitens der Hersteller und hinsichtlich bestehender Hemmnisse, die eine umfassende Digitalisierung bislang erschweren. Diese Erfahrungen wurden unterschiedlichen Zielgruppen präsentiert und u. a. mit Landwirtinnen und Landwirten, Fachberatern, dem KTBL sowie auf nationalen und internationalen wissenschaftlichen Fachtagungen diskutiert. Ein zentrales und immer wieder benanntes Hemmnis ist das mangelnde Bewusstsein dafür, wie wichtig die Vernetzung der Maschinen untereinander dafür ist, dass neuartige Anwendungsfälle überhaupt realisiert werden können. Gerade wenn Maschinen zunehmend (autonom) auf ihre Umwelt reagieren sollen, wird eine Interaktion mit anderen Maschinen unumgänglich, um Kollisionen zu vermeiden. Beispielsweise kann ein automatisches Fütterungssystem nur dann seine Fütterungszeiten automatisch an den Futterverzehr anpassen, wenn es dem Entmistungsroboter mitteilen kann, dass er in dieser Zeit den Fressbereich aussparen soll. Durch den Austausch wurden solche Herausforderungen sowohl den Herstellern bewusst als auch den Landwirten, beides essenzielle Voraussetzung dafür, dass die Produkte entwickelt werden und die letztendlich höheren Entwicklungskosten in den Preisen der Produkte aber auch akzeptiert werden.

Darüber hinaus ist Herr Dr. Poteko aktives Mitglied der neu gegründeten Arbeitsgruppe „KI und Digitalisierung“ im Netzwerk Fokus Tierwohl.

Demonstrationsprojekt 5

Die Optimierung von Tiergesundheit und Tierwohl zählt zu den zentralen Herausforderungen der modernen Nutztierhaltung. Ein vielversprechender Ansatz hierfür ist die Nutzung der umfangreich verfügbaren, automatisch erfassten Daten durch unterschiedlichste tierindividuelle Sensorsysteme. Während viele Systeme bereits auf dem Markt etabliert sind und Landwirte im Betriebsalltag unterstützen, fehlt oftmals eine umfassende Integration dieser Technologien. Die bisher weit verbreitete Isolation der einzelnen Anwendungen erschwert eine ganzheitliche Gesundheitsüberwachung und damit verbunden eine effiziente und zielgerichtete Entscheidungsfindung.

Im Rahmen des Demonstrationsprojekts 5, „Vernetzte, tierindividuelle Sensorsysteme“, wurde zunächst der aktuelle Stand der digitalen Technologien auf bayerischen Milchviehbetrieben systematisch erfasst und analysiert. Dabei lag der Fokus nicht nur auf der Dokumentation der vorhandenen Sensorsysteme, sondern auch auf deren Vernetzung. Ziel war es, die praktische Integration unterschiedlicher technischer Lösungen abzubilden und den potenziellen Mehrwert einer verbesserten Datenvernetzung aufzuzeigen. Im Rahmen des Demonstrationsprojekts wurde zudem die DigiMilch-Datenbank aufgebaut, um die umfangreich erhobenen tierindividuellen Sensordaten systematisch zu bündeln und als wissenschaftliche Datengrundlage für anschließende Auswertungen nutzen zu können. Anhand von zwei weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungen zur tierindividuellen Hitzebelastung und indirekten automatischen Lahmheitserkennung sollte hierbei der Nutzen der Vernetzung verschiedener Sensorsysteme in Bezug auf eine optimierte Gesundheitsüberwachung aufgezeigt werden.

Ein zentraler Aspekt der erfolgreichen Implementierung digitaler Technologien in der Nutztierhaltung ist deren Akzeptanz und Nutzung durch die Landwirte. Im Rahmen von Demonstrationsprojekt 5 wurde deshalb eine Online-Umfrage unter bayerischen Milchviehbetrieben durchgeführt, die wichtige Einblicke in den aktuellen Stand der Digitalisierung, die Nutzung von Sensorsystemen und die Einstellung der Landwirte gegenüber digitalen Anwendungen lieferte. Der Link zur Umfrage wurde über das LKV Bayern und soziale Netzwerke verbreitet. Ziel war es, einen Überblick über den Einsatz digitaler Technologien in Milchviehställen sowie die Erwartungen der Landwirtinnen und

Landwirte zu gewinnen. Ausgewertet wurden 235 vollständig ausgefüllte Fragebögen aus Betrieben mit Laufstall- oder Anbindehaltung. Aufgrund der Durchführung als Online-Umfrage kann eine Beeinflussung der Ergebnisse durch eine geringere Beteiligung digital weniger affiner Betriebe nicht ausgeschlossen werden.

Tiersensoren wurden überwiegend in Laufstallbetrieben eingesetzt. In der Anbindehaltung oder in Kombination mit Weidehaltung kamen tierindividuelle Sensoren kaum bis gar nicht zum Einsatz. Besonders hoch war die Nutzungsrate bei Betrieben mit Laufhof (ca. 62 %), während bei Laufstallbetrieben mit Weidezugang nur etwa die Hälfte entsprechende Technik verwendete. Die Erwartungen an digitale Systeme waren hoch: 87 % der Teilnehmer befürworteten eine zentrale Bündelung aller Informationen in einem Herdenmanagement-System. Die Mehrheit erkannte darin Vorteile wie eine schnellere Problemerkennung (88 %), bessere Übersicht (77 %) und Zeitersparnis (76 %). Besonders Landwirte mit Erfahrung im Umgang mit digitalen Technologien bewerteten die Vernetzung der Stalltechnik als vorteilhaft. Betriebe, die bereits automatische Melksysteme einsetzen, zeigten sich offen dafür, auch weitere automatisierte Systeme wie Fütterung, Entmistung oder Stallklimasteuerung miteinander zu vernetzen – auch wenn dies mit zusätzlichen Investitionen verbunden wäre. Weniger Interesse bestand hingegen an einer Vernetzung in Bereichen wie Einstreuen oder Tierortung, was vor allem auf die geringere Nutzungsfrequenz sowie die begrenzte Verfügbarkeit entsprechender Technik in den Betrieben zurückzuführen sein dürfte. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, praxisnahe, benutzerfreundliche und wirtschaftlich attraktive Lösungen zu entwickeln, die durch eine hohe Systeminteroperabilität einen echten Mehrwert für die Betriebe schaffen.

Lahmheiten zählen weltweit zu den bedeutendsten Gesundheitsproblemen in der Milchviehhaltung und sind sowohl aus ökonomischen als auch aus tierschutzrechtlichen Gründen von hoher Relevanz. Lahmheit ist dabei nicht nur als rein klinisches Symptom zu bewerten, sondern auch als Ausdruck von Schmerz, der sich auf das allgemeine Verhalten und Wohlbefinden der Tiere auswirkt. Veränderungen im Bewegungsablauf, im Liege- und Fressverhalten sowie reduzierte soziale Interaktionen sind typische Begleiterscheinungen, die das Tierwohl erheblich beeinträchtigen können.

Die konventionelle Lahmheitserkennung beruht in der Regel auf visuellen Beobachtungen, die geschultes Personal, Zeitressourcen und eine regelmäßige Kontrolle erfordern. Diese manuelle Erkennung ist jedoch subjektiv geprägt und kann – je nach Erfahrung und Beobachtungszeitpunkt – stark variieren. Dagegen bietet eine

automatische Lahmheitserkennung den Vorteil einer kontinuierlichen und vor allem objektiveren Detektion von Lahmheiten, für die im Falle der indirekten Variante auf den jeweiligen Betrieben bereits genutzte tierindividuelle Sensorsysteme und die von diesen erfassten Leistungs- und Verhaltensdaten herangezogen werden können, um die Investitionskosten gering zu halten.

Zwei vorhergehende Studien am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) konnten durch Algorithmen, die auf Leistungs- und Verhaltensdaten basierten, bereits mit einer Genauigkeit von über 80 % zwischen lahmen und gesunden Tieren unterscheiden. Da hierbei jedoch nur die Verhaltensdaten eines einzigen Pedometers berücksichtigt wurden, sollten in der Untersuchung im Rahmen von DigiMilch nun verschiedene weitere Verhaltensdaten aus Pedometern, Halsbändern und Pansenboli unterschiedlicher Hersteller miteinbezogen werden. Des Weiteren waren alle acht Projektbetriebe, darunter fünf Praxis- und drei Versuchsbetriebe, mit Melkrobotern ausgestattet und auf den Betrieben wurden auch Daten vom LKV Bayern erfasst. In Grub gab es zusätzlich auch Daten der automatischen Wiegetröge, sowie der Tierwaagen und einer body condition score (BCS)-Kamera.

Zur Entwicklung der Algorithmen zur automatisierten Lahmheitserkennung wurden zunächst Referenzdaten zur Klauengesundheit erhoben. Zentrales Element war die systematische Erfassung des Lahmheitsstatus durch regelmäßige Gangbildbewertungen anhand eines dreistufigen Locomotionscores (LMS) nach Lorenzini, Grimm et al. (2017), der auf Basis von Videoaufzeichnungen durchgeführt wurde. Ergänzend wurden im Rahmen der insgesamt 20 Klauenpflegetermine die sichtbaren Klauenbefunde dokumentiert sowie eine Schmerzprobe mit einer Klauenuntersuchungszange an jeder Klaue durchgeführt. Letztere diente dem Zweck, Tiere zu identifizieren, die bereits schmerzhaft waren, aber noch keine sichtbaren Klauenläsionen aufwiesen. Im Anschluss wurden diese Informationen noch kombiniert, indem ein korrigierter Locomotionscore erstellt wurde und der normale LMS2 (Verdacht auf Lahmheit) bei Vorhandensein von Schmerzen oder sichtbaren Befunden zu einem LMS3 (lahm) hochkorrigiert wurde.

Die gewonnenen Daten wurden anschließend mit den tierindividuellen Sensorinformationen aus verschiedenen Quellen, darunter Verhaltensdaten wie Wiederkauen oder Aktivität, Leistungsdaten, klimatische sowie physiologische Daten, in Beziehung gesetzt. Durch die Kombination der manuell erfassten Referenzdaten mit den automatisch erhobenen Sensorparametern konnten anschließend betriebspezifische

Tagesdatensätze erzeugt werden, die die Grundlage für das anschließende Training und die Validierung der Vorhersagemodelle bildeten.

Anschließend wurden die erhobenen Daten zur indirekten, automatisierten Lahmheitserkennung in generalisierten gemischten linearen Regressionsmodellen analysiert, um zu untersuchen, welche tierindividuellen Parameter aus den Bereichen Verhalten, Leistung, Physiologie und Stallklima sich besonders gut für die Erkennung einer Lahmheit eignen. In einem ersten Schritt wurden Regressionsmodelle allein auf Basis von Leistungs- und Aktivitätsdaten entwickelt, da die Aktivität der am meisten erfasste Verhaltensparameter auf vielen Betrieben ist. Diese Kombination allein erwies sich jedoch als unzureichend, um eine zuverlässige Differenzierung zwischen lahmen und nicht lahmen Tieren zu ermöglichen, da mit diesem Modell zu viele gesunde Tiere fälschlicherweise als lahm eingestuft worden wären. Erst durch die Integration zusätzlicher Messgrößen wie Futteraufnahme-, Liegeverhalten, Körpertemperatur und die klimatischen Bedingungen, ließ sich die diagnostische Genauigkeit der Modelle signifikant steigern. Das leistungsfähigste Modell, das auf mehreren Betrieben untersucht werden konnte, erreichte eine Genauigkeit von knapp 90 % bei der Unterscheidung zwischen lahmen und gesunden Kühen an einem gegebenen Tag.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass einzelne Indikatoren, wie etwa Aktivität oder Leistung, für sich genommen nur begrenzte Aussagekraft besitzen. Erst durch die Kombination von verschiedenen Verhaltens-, Leistungs-, physiologischen und klimatischen Parametern kann eine präzise automatische Erkennung von Lahmheit ermöglicht werden. Die zugrunde liegende Doktorarbeit, in der diese Lahmheitserkennungsmodelle systematisch untersucht wurden, wurde im Jahr 2025 publiziert (Hertle 2025).

Die zweite wissenschaftliche Untersuchung innerhalb des Demonstrationsprojektes 5 beschäftigte sich mit dem Thema der tierindividuellen Hitzebelastung. Bereits in den Jahren 2021 und 2022 wurden im Rahmen von DigiMilch erste Referenzdaten zur Atemfrequenz als Indikator für eine Hitzebelastung durch Direktbeobachtungen auf dem Versuchsbetrieb Grub erhoben. Ab 2022 wurden Atemfrequenzsensoren der Firma Gouna GmbH eingesetzt, die in der Lage sind, die Atemzüge pro Minute bei jedem Tier automatisch zu erfassen.

Im Jahr 2023 lag der Fokus auf der Validierung dieser Sensoren für den Einsatz bei Fleckviehkühen, welche im Rahmen einer Bachelorarbeit stattfand. Parallel dazu wurden

im Laufe des Jahres umfangreiche Blutuntersuchungen durchgeführt, um physiologische Parameter zu erfassen, die laut Literatur (Blond et al. 2024; Danchuk et al. 2025) mit metabolischen Veränderungen und möglichen Belastungsreaktionen bei Hitzebelastung in Verbindung stehen können. Hierzu zählten unter anderem freie Fettsäuren, Gesamteiweiß, Hämatokrit und Beta-Hydroxybutyrat (BHB). Die Analysen erfolgten sowohl mittels standardisierter Laborverfahren als auch mithilfe praxisnaher Schnellmethoden, die prinzipiell auch unter Stallbedingungen eingesetzt werden könnten (BHB-Handmessgerät sowie Hämatokritbestimmung mittels Zentrifuge). Drei Blutentnahmetermine Ende 2023 lieferten entsprechende Datensätze. Erste Vergleiche zwischen Laboranalysen und den Schnellmethoden erfolgten mittels einer Bland-Altman-Analyse, die insbesondere für Hämatokrit und BHB eine hohe Übereinstimmung der beiden Messverfahren ergab. Die administrative Umsetzung erforderte einen erheblichen Aufwand: Die dafür notwendige Tierversuchsanzeige wurde im zweiten und dritten Quartal 2023 bei der Regierung von Oberbayern beantragt, genehmigt und anschließend in einen vollständigen Tierversuchsantrag überführt. Eine nichttechnische Zusammenfassung des Projekts wird unter der Kennnummer NTP-ID 00066181-2-X auf dem Portal www.animaltestinfo.de veröffentlicht.

Im Jahr 2024 wurde die bisher umfangreichste Versuchsdurchführung realisiert: In zehn Messzeiträumen wurden jeweils 20 Kühe über sieben Tage hinweg mit Atemfrequenzsensoren ausgestattet. Ergänzend dazu erfolgte eine Messung der rektalen Körpertemperatur sowie die Entnahme von Blutproben 48 Stunden nach Sensoranbringung. Nach weiteren 48 Stunden wurden die Sensoren wieder abgenommen. Parallel wurden über das Jahr hinweg weitere tierindividuelle Daten zu Aktivität (Pedometer), Futteraufnahme (Wiegetröge), Wiederkauverhalten (Pansenbolus), Melkverhalten (AMS) sowie klimatische Umgebungsdaten (Wetterstationen) erfasst.

Erste Auswertungen zeigen eine deutliche Korrelation zwischen dem Temperatur-Feuchte-Index (THI) und der Atemfrequenz: Mit steigendem THI nimmt die Atemfrequenz bei verschiedenen Kühen statistisch signifikant zu, wobei die Stärke der Zunahme individuell variieren kann (Abbildung 18). Die Analysen zeigten, dass die Atemfrequenz zeitnah auf steigende Temperaturen reagiert und somit zur Erkennung einer Hitzebelastung dienen kann. Die Erfassung dieses Parameters könnte, idealerweise in Kombination mit weiteren Parametern somit eine individuellere Beurteilung der Belastungssituation einzelner Tiere ermöglichen. Dies schafft die Voraussetzung für

gezielte Managementmaßnahmen wie Anpassungen der Stallbelüftung oder Fütterung, um die Hitzebelastung zu reduzieren und das Tierwohl zu verbessern.

Auch ausgewählte Blutparameter wurden bereits in Zusammenhang mit dem THI untersucht. Die Auswertung mittels Regressionsmodellen zeigte, dass sowohl der Hämatokrit als auch die Konzentration der freien Fettsäuren (NEFA) mit zunehmendem THI abnahmen. Der Rückgang des Hämatokrits könnte auf eine erhöhte Wasseraufnahme der Tiere während Hitzebelastung und die damit verbundene Verdünnung des Blutes zurückzuführen sein (Lawrence Anebi ADEMU et al. 2025). Die sinkenden NEFA-Konzentrationen könnten darauf hindeuten, dass es unter Hitzebelastung zu einer Reduktion der Lipolyse kommt, um zusätzliche metabolische Wärmeproduktion zu vermeiden (Sammad et al. 2020).

Weitere, vertiefte Analysen der noch nicht ausgewerteten Datensätze sollen genauere Einblicke in die Wechselwirkungen zwischen Hitzebelastung und den verschiedenen physiologischen, klimatischen, leistungs- sowie verhaltensbezogenen Indikatoren ermöglichen.

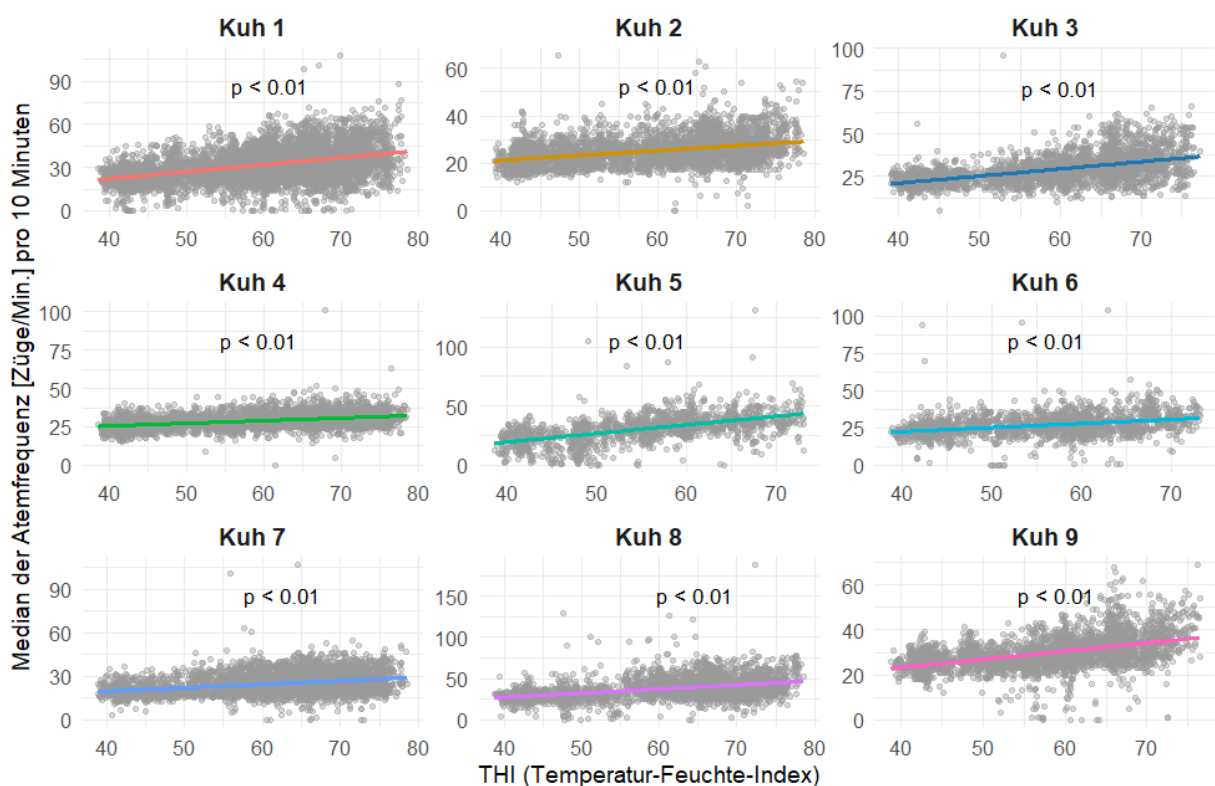


Abbildung 18: Median der Atemfrequenz [Züge/Min.] von 9 Kühen, erfasst in 10-Minuten-Intervallen, dargestellt in Abhängigkeit vom THI (Temperatur-Feuchte-Index)

Literaturverzeichnis

Ademu, L. A.; Ndubuisi, I. D.; Onaleye, K. J.; Josiah, S. D.; Zubairu, G. S.; Lalabe, B. B. et al. (2025): Diurnal Variations and Heat Stress: Physiological and Biochemical Resilience in White Fulani Cattle. In: *J. Agric. Food Environ. Anim. Sci.* 6 (2), S. 510–524

Blond, B.; Majkić, M.; Spasojević, J.; Hristov, S.; Radinović, M.; Nikolić, S. et al. (2024): Influence of Heat Stress on Body Surface Temperature and Blood Metabolic, Endocrine, and Inflammatory Parameters and Their Correlation in Cows. In: *Metabolites* 14 (2). DOI: 10.3390/metabo14020104.

Danchuk, O. V.; Danchuk, V. V.; Chesak, M. H.; Danchuk, V. O. (2025): The effect of chronic heat stress on the mechanisms of nonspecific resistance in lactating cows with vary performance level. In: *TAVM* 13 (2), S. 24–29. DOI: 10.32819/2025.13009.

DLG, e. V. (2016): Prüfbericht 6395. Online verfügbar unter [DLG Prüfbericht 6395 \(PDF\)](#)

DLG, e. V. (2020): Merkblatt 444: Berücksichtigung N- und P-reduzierter Fütterungsverfahren bei den Nährstoffausscheidungen von Milchkühen. Online verfügbar unter [DLG Merkblatt 444 \(PDF\)](#)

Hertle, S. (2025): Suitability of digitally recorded data for automatic lameness detection on dairy farms. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Tierschutz, Verhaltenskunde, Tierhygiene und Tierhaltung.

Lorenzini, I.; Grimm, K.; Misha, E.; Haidn, B. (2017): Using a three point lameness scoring system combined with a clinical examination to increase the reliability of locomotion scoring. In: Proceedings of the 19th International Symposium and 11th International Conference on Lameness in Ruminants.

Sammad, A.; Wang, Y. J.; Umer, S.; Lirong, H.; Khan, I.; Khan, A. et al. (2020): Nutritional Physiology and Biochemistry of Dairy Cattle under the Influence of Heat Stress: Consequences and Opportunities. In: *Animals* 10 (5). DOI: 10.3390/ani10050793.

Sanjeev, E. P. M.; Amon, B.; Ammon, C. et al. (2018): Evaluating the potential of dietary crude protein manipulation in reducing ammonia emissions from cattle and pig manure: A meta-analysis. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110, S. 161–175.

Schleicher, S.; Gandorfer, M. (2018): Digitalisierung in der Landwirtschaft: Eine Analyse der Akzeptanzhemmnisse. In: GIL Jahrestagung.

Thiessen, E.; Eslamifar, M.; Kock, R.; Lausen, P.; Hartung, E. (2022): On Farm Validation of different NIR Sensors for Manure Sensing. In: *VDI-Bericht* Bd. 2406, AgEng-

Land.Technik, International Conference Agricultural Engineering, Berlin, VDI Verlag GmbH, S. 9–16.

Turner, S.; Fröhner, A.; Köhler, B.; Demmel, M. (2011): Online measurement of yield and dry matter content of wilted grass with two forage harvesters – comparison with and verification of reference measurements. In: Stafford, J. V. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th European Conference on Precision Agriculture*, Precision Agriculture 2011, Czech Centre for Science and Society, S. 628–637