

# Internet of Livestock (IoL)



# Internet of Livestock (IoL) – Technologietransformation aus der Industrie 4.0 in die Nutztierhaltung durch kleinteilige Vernetzung neuer intelligenter Sensorik und Aktorik am Tier

Sebastian Schäfer und Peter Schneider, Schneider Elektronik GmbH & Co KG Großharthau

Danilo Zimmermann und Annett Baudisch nubix Software-Design GmbH Dresden

Prof. Dr. habil. Sandra Rose und Sarah Jahn, Hochschule Neubrandenburg

Doreen Nitsche, Kirsten Kouwert, Sr. Steffen Pache

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
1.1	Ausgangssituation .....	6
1.2	Aufgabenstellung.....	7
1.3	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens .....	8
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	10
1.5	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	13
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
<b>2</b>	<b>Federführende Projektbearbeitung durch die nubix Software-Design GmbH</b> .....	<b>14</b>
2.1	Erreichte Ergebnisse und Diskussion.....	14
<b>3</b>	<b>Federführende Projektbearbeitung durch die Schneider Elektronik GmbH &amp; Co KG</b> .....	<b>20</b>
3.1	Erreichte Ergebnisse und Diskussion.....	20
<b>4</b>	<b>Federführende Projektbearbeitung durch die Hochschule Neubrandenburg und das LfULG</b> .....	<b>30</b>
4.1	Erreichte Ergebnisse und Diskussion.....	30
<b>5</b>	<b>Projektergebnisse</b> .....	<b>43</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>45</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schaubild der Sensorik am Bsp. der Milchviehhaltung (Quelle: DLG 2021).....	7
Abbildung 2:	Arbeitspakete und Meilensteine des Vorhabens und die zeitliche Planung der Durchführung (Farben kennzeichnen den Federführenden; gelbe Markierung zeigt gemeinschaftliche AP auf) .....	12
Abbildung 3:	Funktionsmuster für den Test des Peltier-Elementes .....	16
Abbildung 4:	Energy-Harvester .....	17
Abbildung 5:	Sensorboard .....	18
Abbildung 6:	3D-Modell Gehäuse.....	19
Abbildung 7:	NECKTAG® Ortung durch Triangulation mittels AoA-Richtungsfindung.....	20
Abbildung 8:	Array Texas Instruments (TI) (links) und Array Telink (rechts) .....	21
Abbildung 9:	Necktag® Version 0, 2x Tiertag (links und rechts), 1x Referenztag (mittig) .....	23
Abbildung 10:	Necktag® inkl. SE Mikrocontroller-Zentraleinheit mit Funktechnik und Ortungsfunktion & SE eigener Sensorik sowie stalltauglicher Necktag®-Gehäusekonstruktion mit Bügel zur Anbringung am Halsband.....	24

Abbildung 11:	Referenz- Necktag® inkl. SE Mikrocontroller-Zentraleinheit mit Funktechnik und Ortungsfunktion & SE eigener Sensorik und stalltauglicher Necktag®-Gehäusekonstruktion für die Anbringung an fixen Standorten im Stall .....	24
Abbildung 12:	Necktag® Version 2 .....	25
Abbildung 13:	Necktag® Version 3 .....	25
Abbildung 14:	Necktag® Version 4 im Vergleich zu einer herkömmlichen Ohrmarke .....	26
Abbildung 15:	bestückte SE Platine mit einem Luftfeuchte- und Temperatursensor .....	27
Abbildung 16:	Softwaretool „IOL Start“ im Jahr 2021 .....	27
Abbildung 17:	Plattformunabhängige Software „IoL Farm“ zur auswählbaren Anzeige von Echtzeitortungs-, Tracking- und Sensordaten in Versuchsgruppe 12 im LVG Köllitsch .....	28
Abbildung 18:	links-Antenne A1 vor der Installation, mitte- installierte Bluetooth-Antenne und rechts weiterentwickelte NECKTAG® Multisensoren .....	28
Abbildung 19:	Verlauf der Temperaturmessergebnisse der Tinytags und der drei NECKTAG® Multisensoren .....	31
Abbildung 20:	Boxplots zum statischen Luftdruckversuch im Milchviehstall .....	33
Abbildung 21:	Versuchsaufbau zur Überprüfung der Ortungsfunktion der Necktag® bestehend aus einem 6 m x 9 m großen Raster (rot eingezeichnet), vier Antennen (je eine pro Eckpunkt) .....	34
Abbildung 22:	Darstellung der gemessenen Ortungswerte unter der Berücksichtigung von einer Abweichung von 1 m .....	34
Abbildung 23:	Lokalisationsraster in Gruppe 12 des Liegeboxenlaufstalls des LVG Köllitsch ..	35
Abbildung 24:	Dynamischer Ortungstest beispielhaft vom 04.01.2023 09:44 bis 09:46 Uhr .....	36
Abbildung 25:	Temperaturverlauf des Synchronisationstests vom 07.08.2023 .....	36
Abbildung 26:	Box-Plots zur Beschreibung der Luftgüte einer Silageumgebung .....	38
Abbildung 27:	Zusammenfassendes Ergebnis der Use case- Analyse .....	40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Leistungsvergleich des Peltier-Elementes unter verschiedenen Temperaturdifferenzen .....	16
Tabelle 2:	Freifeldmessung TI Array; 100 Messwerte pro Tag-Position (Azimuth-Winkel); Entfernung Tag zu Array = 10m .....	21
Tabelle 3:	Freifeldmessung Telink Array; 100 Messwerte pro Tag-Position (Azimuth-Winkel); Entfernung Tag zu Array = 10m.....	21

## Abkürzungsverzeichnis

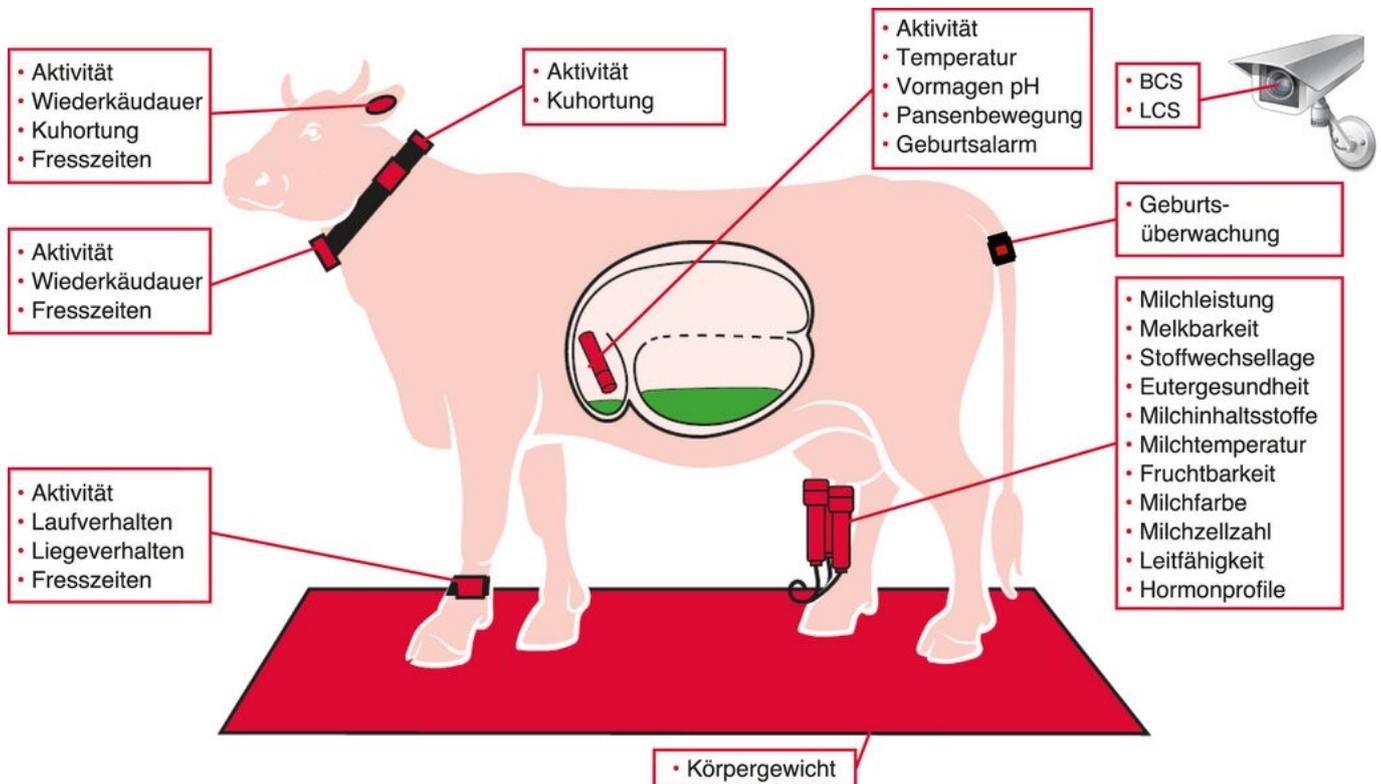
AgEng	International Conference on Agricultural Engineering
AP	Arbeitspaket
BCS	Body-Condition-Score
BLE	Bluetooth
BTU	Fachtagung " Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung"
°C	Grad Celsius
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
ECPLF	european conference of precision-livestock-farming
hPa	Hektopascal
HSNB	Hochschule Neubrandenburg
IoL	Internet of Livestock
LCS	Locomotion Score
LED	Leuchtdiode
K	Kelvin
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Lx	Lux
NU	nubix Software Design GmbH
m	Meter
PC	Personalcomputer
%	Prozent
SE	Schneider Elektronik GmbH & Co. KG
V	Volt
Vgl-	vergleiche
W	Watt
Ws	Wattsekunde
μW	Mykrowatt

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Das Internet der Dinge hat im Alltag der Gesellschaft bereits Einzug gehalten. Smartwatches, Fitness-Tracker und Smartphone, Einparkhilfen und Gesichtserkennung zur Öffnung der eigenen Haustür gehören für viele Menschen in der heutigen Zeit zum Standardhilfsmittel im Alltag. Kleinste Sensoren diagnostizieren Funktionsabläufe und Umgebungsbedingungen von Menschen, Maschinen, Gebäudeeinrichtungen und Fahrzeugen, signalisieren vorausschauende Abweichungen von dem Sollzustand, kommunizieren mit dem Menschen als Entscheidungsträger und können so Totalausfälle mindern sowie die Lebenszeit des Menschen und die Nutzungsdauer unserer technischen Produktionsmittel und Konsumgüter deutlich verlängern. Dieser Entwicklungsprozess, angetrieben von der 4. Industrie-Revolution, durchdringt in den letzten 10 Jahren erfolgreich alle wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und privaten Bereiche.

Diese Entwicklung hielt zeitverzögert Einzug in die Entwicklung der Produktionsprozesse in der Nutztierhaltung ist gekennzeichnet von der Nutzung verschiedenster Sensoren, Roboter und Kommunikationssysteme unterschiedlichster Hersteller mit unterschiedlichsten Funktionsweisen, sodass eine Vielzahl schwer vernetzbarer Insellösungen entstand. In dem im Jahr 2021 veröffentlichten DLG Merkblatt 466 zu den digitalen Anwendungen für das Herdenmanagement in der Milchviehhaltung wird im Schaubild (Abbildung 1) am Beispiel der Milchkuhhaltung die Vielfalt der in der Praxis verfügbaren Sensorik zur Datengewinnung dargestellt. Bei der Fülle an Technikangeboten kristallisierten sich die fehlende Kompatibilität, mangelnde Informationsaufbereitung für Entscheidungen sowie Rückkopplungen über die Aufgabenerledigung heraus und standen daher im Fokus zukünftiger Betrachtungen.



**Abbildung 1: Schaubild der Sensorik am Bsp. der Milchviehhaltung (Quelle: DLG 2021)**

Für diese Problemstellungen plante das Konsortium mit seinem Konzept der Transformation von Industrie4.0-Technologien in die landwirtschaftliche Nutztierhaltung – am Beispiel einer nachhaltigen Milchviehhaltung – einen Lösungsansatz in dem Verbundprojekt IoL aufzeigen.

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Zielstellung des Verbundprojektes „Internet of Livestock“ (IoL) beinhaltete die Konzipierung, industrielle Erforschung und experimentelle Erprobung eines neuen Sensorsystems. Der innovative Ansatz des Projektes bestand in der Entwicklung neuer multifunktionaler Funksensoren zur Aufnahme von Zustandsdaten und zur Lokalisation landwirtschaftlicher Nutztiere sowie in der autarken Energiebereitstellung für die Sensorik. Mittels energiesparender Bluetooth 5.1 Technologie (BLE\_5.1) sollte die Datenübertragung zum Host-Computer erfolgen, um eine standardisierte Informationsbereitstellung für Farmmanagement- und Informationssysteme beim Landwirt zu schaffen.

Durch die Definition konfigurierbarer Sensor-Parameter sollten die Funktionsmuster für verschiedene Einsatzbedingungen am Tier, an Maschinen/Geräten sowie als Equipment für Operatoren (Tierpfleger, Herdenmanager, Besamer, Tierarzt u.a.) konzipiert werden. Darüber hinaus sollte durch die BLE\_5.1-Technologie eine bidirektionale Kommunikation zur Ansteuerung von Aktoren am Tier, an Maschinen/Geräten oder beim Operator erstmalig erschlossen werden.

Entsprechend der Kooperationsvereinbarung vom 09.06.2021 erfolgte während der Projektlaufzeit eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen dem Referat Tierhaltung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), der Hochschule Neubrandenburg (HSNB), der Schneider Elektronik GmbH & Co. KG (SE) sowie der nubix Software Design GmbH (NU). Neben den jährlichen Projekttreffen am Standort Köllitsch des LfULG, fanden im 14-tägigen Turnus Meetings in Form von Videokonferenzen statt. Für die kollektive Erarbeitung des gemeinsamen Hauptzieles wurden für die einzelnen Verbundpartner die Teilaufgaben definiert.

Die Teilaufgaben und Entwicklungsetappen der SE beinhalteten die Konzeption und Entwicklung der Antennen-Basisstation für den bidirektionalen Datenaustausch und der Echtzeitlokalisierung, die Konzeption und Entwicklung der Funktechnik und Aktorik des Tags sowie die notwendige Softwareentwicklung und Systemintegration.

Die Teilaufgaben der NU umfassten die Entwicklungsabschnitte Energy Harvesting, Sensorik für physikalische Kenngrößen sowie Sensorik chemischer und biologischer Kenngrößen.

Die Zusammenführung der Entwicklungsstufen zwischen SE und NU erfolgte in gemeinsamer Federführung der beiden Projektpartner.

Die Teilaufgaben der HSNB bestanden aus der wissenschaftlichen Recherche im Umfeld der Projektziele, der biostatistischen Auswertung und fachliche Bewertung der durchgeführten Versuche und Erprobungen sowie der wissenschaftlichen Diskussion und Publikation der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse. Die Erstellung des Pflichtenheftes, die Versuchsplanung und -durchführung sowie die experimentelle Erprobung der Funktionsmuster in der praktischen Einsatzumgebung im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch, als auch die Diskussion der Verwertungsmöglichkeiten oblag dem LfULG.

### **1.3 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens**

Für die Durchführung des Projektes "Internet of Livestock" wurde ein Konsortium notwendig, welches die Expertise auf dem Gebiet der Digitalisierung der Tierhaltung im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft, des Wissenstransfers sowie dem technischen know How in den Bereichen der Soft- und Hardwareentwicklung und Energiegewinnung mitbrachte, um den Technologietransfer aus der Industrie in die praktische Landwirtschaft zu vollziehen.

Die Wirtschaftspartner Schneider Elektronik GmbH & Co. KG (SE) und die nubix Software-Design GmbH (NU) verfügten über das notwendige Know-how von Industrie4.0-Technologien zur einsatzspezifischen Konfigurierung von multifunktionalen Funksensoren im Zusammenhang mit Energy Harvesting und der Lokalisation über Bluetooth 5.1 BLE. Zusätzlich wiesen diese beiden Projektpartner bereits umfangreiche Erfahrungen aus der Zulieferung von Systemkomponenten für den rauen Einsatz in Stallanlagen

oder im Verkehrswesen auf und waren in der Lage, die anspruchsvollen Ingenieurleistungen im Rahmen der industriellen Forschung zu realisieren. Durch eine umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Vorfeld wurde in der nubix Software-Design GmbH eigenes Know-how auf dem Gebiet der Sensorik und deren Vernetzung geschaffen. Hier ist das nubix eigene ELMA Protokoll zu nennen, welches angewandt auf verschiedene Bereiche der IoL im jeweiligen Einsatzgebiet hocheffiziente Datenübertragung leistet und kleinste Geräte miteinander vernetzt werden können. Auch mit den Herausforderungen in der Nutztierhaltung hat sich die nubix Software-Design GmbH in der Vergangenheit beschäftigt und die autarke Energieversorgung der Funksensoren mehrfach thematisiert. So wurde in einem internen Forschungsprojekt ein bestehendes Sensor-Modul mit einer entsprechenden Schaltung mit Akku und Solarzelle erweitert. Die Schneider Elektronik GmbH & Co. KG kann auf langjährige Erfahrungen für Hard- und Softwareentwicklungen im Bereich der Transponder Funklokalisierung und Identifikation zurückgreifen. Das Unternehmen hatte mit den Hardware-Entwicklungen sowie der Bedien- und Auswertungssoftware für Funk-Readersysteme eine sehr gute Ausgangsbasis für die Systemintegration der im Projekt zu entwickelnden Hard- und Softwarekomponenten. Auf eine breite Erfahrung in der Entwicklung und Konstruktion von mobilen Geräten, auch für raue Umgebungsbedingungen, sowie in der Ausrüstung von Freizeiteinrichtungen auf Basis von RFID und Barcode-ID Technik, konnte zurückgegriffen werden.

Frau Prof. Dr. Alexandra Rose, Leiterin des Fachgebietes Landtechnik an der Hochschule Neubrandenburg (HSNB), brachte für die Projektbearbeitung die notwendige wissenschaftliche Expertise zur Automatisierung von Prozessen und der statistischen Aufbereitung von Versuchsreihen sowie zum Wissenstransfer auf internationaler Ebene mit in das Konsortium. Mit Ihrer Kompetenz zur Versuchsbetreuung, statistischen Auswertung, Ergebniskommentierung und der Kompetenz der Mitarbeiter/innen des Referates Tierhaltung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) zum Wissenstransfer in die landwirtschaftliche Praxis und der Durchführung von praxisrelevanten Feldversuchen, konnten alle Bedarfswelder für ein Gelingen des Projektes qualifiziert aufgefüllt werden. Mit dem gemeinsamen Know-how der HSNB und dem LfULG wurden für die landwirtschaftliche Praxis Umsetzungskonzepte mit den Wirtschaftspartnern erarbeitet und über die Projektlaufzeit mit wissenschaftlicher Recherche in landwirtschaftlichen- und außerlandwirtschaftlichen Bereichen begleitet. Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem Thema Energy Harvesting auf Sensorebene, da im Besonderen bei Sensoren am Tier von langjährigen Lebenszyklen für eine praktische Akzeptanz ausgegangen werden muss.

Die eingereichte Projektskizze und auch der Projektantrag bauten auf keinem direkten Vorgängerprojekt, sondern auf den Erfahrungen der Projektpartner aus vorangegangenen Entwicklungen auf, um neue Wege zur Entwicklung einer Technologie der reibungslosen Datenübertragung gehen zu können.

Alle Projektpartner hatten ein großes Interesse an einer zielführenden, experimentellen Entwicklung eines Sensorsystems, welches überprüft in relevanter Einsatzumgebung während einer Projektlaufzeit von nur 24 Monaten, einen essentiellen Beitrag zum Technologietransfer aus dem Sektor des Internets der Dinge in die praktische Landwirtschaft, im speziellen der Milchviehhaltung, leistet.

#### Planung und Ablauf des Vorhabens

Entsprechend der Kooperationsvereinbarung vom 09.06.2021 erfolgte während der Projektlaufzeit eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen dem Referat Tierhaltung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), der Hochschule Neubrandenburg (HSNB), der Schneider Elektronik GmbH & Co. KG (SE) sowie der nubix Software Design GmbH (NU).

Für das Vorhaben Internet of Livestock (IoL) wurden folgende fünf Forschungs- und Entwicklungszellen verifiziert und in die Planung eingebracht.

- 1. Sensorik am Tier mit physikalischen Messaufgaben für biologische Parameter (wie Akustik, Puls, Herzfrequenz, Sauerstoffsättigung u.a.) und Umgebungsparameter (wie Lichtspektren, Schadgasdetektion, Akustik, Temperatur, Enthalpie u.a.), die geeignet erscheinen, Abweichungen des Gesundheitsstatus und des Tierwohls vom biologischen Normalzustand beschreiben zu können.
- 2. Sensorik für Maschinen und Einrichtungen mit physikalischen Messaufgaben für Umgebungsparameter, die für eine gezielte Maschine – Tier- bzw. Maschine – Mensch-Kommunikation geeignet sind und über Aktor-Ausgabeleitungen verfügen.
- 3. Sensorik für Operatoren mit physikalischen Messaufgaben für Umgebungsparameter und zur Identifikation, die für eine gezielte Mensch– Tier- bzw. Mensch – Maschine-Kommunikation geeignet sind und über Aktor-Ausgabeleitungen verfügen.
- 4. Antennenarray für die Weide und den Stall auf Basis von Bluetooth 5.1 LE mit 3D-Lokalisation der vernetzten Sensoren sowie die Anbindung an einen Host-Computer.
- 5. Host-Computer für die Datenaggregation und Vorverarbeitung, für die Lokalisation und das Tracking, für die Schnittstellen-Software zu Farmmanagement- und Informationssystemen (Internet, Cloud oder Hof-Netzwerk) sowie für die Rückkopplung von Steuerfunktionen an die Sensorik der Tiere, Maschinen und Operatoren.

Diese fünf Forschungs- und Entwicklungszellen bildeten die Grundlage für die Einteilung der Aufgaben in vierzehn verschiedene Arbeitspakete und der anschließenden Zuordnung, je nach Fach- und Sachkompetenz, zu den bearbeitenden Projektpartnern. Das Projekt war in folgende Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1: Erstellung Pflichtenheft

AP2: Energy Harvesting

AP3: Sensorik Physikalische Kenngrößen

AP4: Sensorik chemischer & biologischer Kenngrößen

AP5: Funktechnische Anforderungen für den bidirektionalen Datenaustausch

AP6: Funktechnik Basisstation

AP7: Funktechnik & Aktortechnik Tag

AP8: Zusammenführung zum intelligenten Tag

AP9: Softwareentwicklung

AP10: Systemintegration

AP11: Experimentelle Erprobung

AP12: wissenschaftliche Recherche

AP13: wissenschaftliche Bewertung

AP14: Berichtswesen und Wissenstransfer

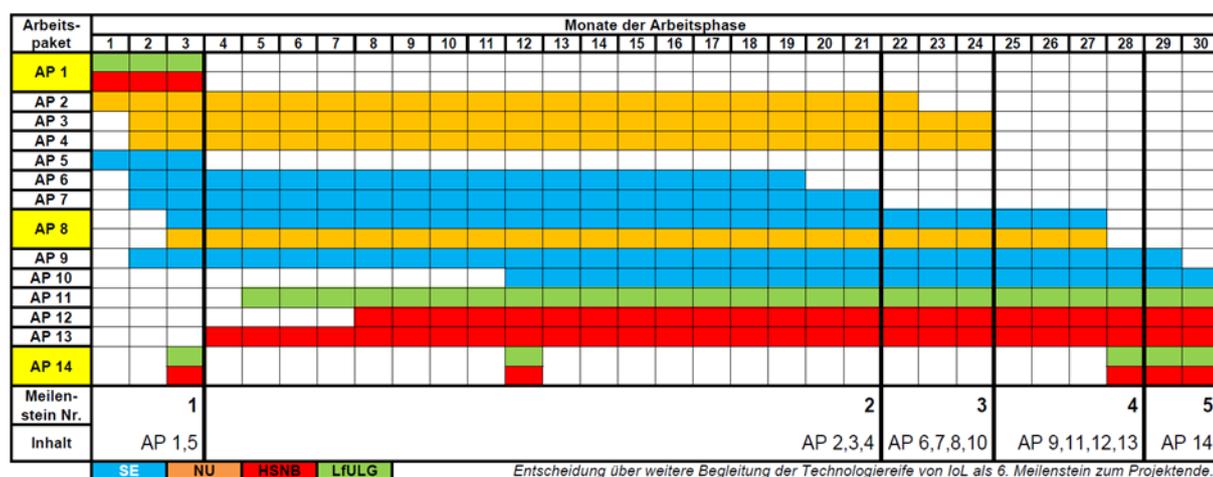
Die Teilaufgaben und Entwicklungsetappen des Kooperationspartners SE beinhalteten die Konzeption und Entwicklung der Antennen-Basisstation für den bidirektionalen Datenaustausch und der Echtzeitlokalisierung, die Konzeption und Entwicklung der Funktechnik und Aktorik des Tags sowie die notwendige Softwareentwicklung und Systemintegration. Dagegen umfassten die Teilaufgaben des Kooperationspartners NU die Entwicklungsabschnitte Energy Harvesting, Sensorik für physikalische Kenngrößen sowie Sensorik chemischer und biologischer Kenngrößen. Die Zusammenführung der Entwicklungsstufen zwischen SE und NU erfolgte in gemeinsamer Federführung der beiden Projektpartner.

Die Teilaufgaben der HSNB bestanden aus der wissenschaftlichen Recherche im Rahmen der Projektziele, der biostatistischen Auswertung und fachlichen Bewertung der durchgeführten Versuche und Er-

probungen sowie der wissenschaftlichen Diskussion und Publikation der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse. Die Erstellung des Pflichtenheftes, die Versuchsplanung und -durchführung sowie die experimentelle Erprobung der Funktionsmuster in der praktischen Einsatzumgebung im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch, als auch die Diskussion der Verwertungsmöglichkeiten, oblag dem LfULG. Das Aufgabenfeld „Berichtswesen“ und der entsprechende Wissenstransfer wurde in gemeinsamer Federführung von der HSNB und dem LfULG umgesetzt.

Die Projektleitung oblag dem Wirtschaftspartner Schneider Elektronik GmbH & Co. KG, der organisatorisch den reibungslosen Ablauf des Projektes in der Verantwortung innehielt.

Das in der gemeinsamen Vorhabenbeschreibung abgestimmte Balkendiagramm bildete die Grundlage für die Zeit- und Ressourcenplanung und -einteilung. In den Projektmeetings (online) im 14-tägigen Rhythmus und den jährlichen Präsenzmeetings im LfULG am Standort Köllitsch, wurde der Projektfortschritt mit den Projektpartnern diskutiert sowie notwendige Anpassungen zur ursprünglichen Planung und die weitere Ausrichtung beschlossen. Im Verlauf des Vorhabens kam es aus verschiedenen Gründen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie zu zeitlichen Verzögerungen gegenüber der ursprünglichen 24-monatigen Zeit- und Arbeitsplanung. Unter Berücksichtigung der kostenneutralen sechsmonatigen Verlängerung (Bewilligung BLE vom: 04.04.2023) wurde der Ablaufplan des Vorhabens bis zum 14.11.2023 wie in Abbildung 2 dargestellt, angepasst und durchgeführt.



**Abbildung 2: Arbeitspakete und Meilensteine des Vorhabens und die zeitliche Planung der Durchführung (Farben kennzeichnen den Federführenden; gelbe Markierung zeigt gemeinschaftliche AP auf)**

## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Bereits „Qualitätsbewertung von Naturschutzgebieten“ und UMSTÄTTER (2020) beschrieben, insbesondere für den Milchviehbereich, eine große Vielzahl digitaler Assistenzsysteme. Die Sensorangebote im landwirtschaftlichen Sektor sind vielseitig, aber lediglich Insellösungen. Die Schnittstellen zu den Farmmanagementsystemen sind nur bedingt kompatibel und ein bidirektionaler Datenaustausch ist kaum gegeben. Aus diesem Grund war eine entwicklungsoffene, smarte Vernetzung der Sensorik, Farmmanagement- und Informationssysteme (FMIS) mit der Aktorik bisher nicht möglich. Die erhobenen Daten wurden nicht alle übergeben, sondern nur gefiltert. Der Tierhalter besaß demnach nicht die Datenhoheit in seinem Stall und konnte die Sensorik nur bedingt nutzen (MOHR 2021).

Während sich Sensoren zur Erfassung von Gesundheitsparametern wie Aktivität, Fresszeit und Wiederkauen in der Praxis gefestigt haben, so spielt die Kombination mit Umweltparametern eine untergeordnete Rolle. Für die Steuerung von Curtains, Firstöffnungen, Lüftern und Licht werden typischerweise Klimadaten durch Messung von Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Lichtmenge außerhalb der Stallhülle herangezogen (Benz 2023). Dabei empfiehlt die Schweizer Eidgenossenschaft (2009) Messungen zur Beurteilung des Stallklimas prinzipiell im Tierbereich vorzunehmen. Bisher gab es keinen evaluierten Sensor, welcher Messungen des Mikroklimas an der Kuh vornimmt und daraus automatisierte Maßnahmen zur Verbesserung des Stallklimas ableitet.

Des Weiteren kann es zu Störungen der Sensorik im gleichen Frequenzbereich kommen. Die meisten auf dem Markt etablierten Sensoren zur Lokalisation und zum Gesundheitsmonitoring können aus diesem Grund nicht parallel in einem Stallgebäude eingesetzt werden. Durch die Verwendung des BLE\_5.1 Funkprotokollstandards werden Möglichkeiten zur robusten, bidirektionalen, energiearmen und bulkfähigen Datenübertragung, sowie zur theoretisch dezimetergenauen Echtzeitlokalisierung bereitgestellt. Auf Basis dieses Standards kann somit auf bidirektionalem Übertragungsweg, neben der Echtzeitlokalisierung, die Aggregation von Sensor- und Aktor-Informationen sowie eine Zustandssteuerung der Aktorik erfolgen. Rund um den Funkprotokollstandard BLE\_5.1 existieren auf dem Markt erhältliche Standardkomponenten, die es ermöglichen, kostengünstige Endprodukte zu schaffen.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Eine Zusammenarbeit erfolgte nur unter den Kooperationspartnern des Projektes. Weitere Unternehmen oder Auftragnehmer waren nicht in das Projekt involviert.

## 2 Federführende Projektbearbeitung durch die nubix Software-Design GmbH

### 2.1 Erreichte Ergebnisse und Diskussion

Die nubix Software-Design GmbH erarbeitet folgende Arbeitspakete und konnte damit wertvollen Erkenntnisse zur weiteren Bearbeitung bzw. Konstruktion des Demonstratorsystems erlangen.

#### ■ Arbeitspaket 2: Energy Harvesting

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 wurden folgende Möglichkeiten des Energy Harvesting untersucht:

##### • - Solarzelle

Eine weit verbreitete konventionelle und effektive Methode, um Energie zu gewinnen, besteht in dem Einsatz einer Solarzelle. Bisher herrschen in den Tierhaltungsställen meist ungünstige Lichtverhältnisse zur Energieernte. Hinzu kommen noch Beeinträchtigungen durch Verschmutzung durch eine hohe Emissionsbelastung mittels Stäube und Gase. Zunächst wurden am Standort Köllitsch Tests vorgenommen, um an allen denkbaren Bereichen die Lichtverhältnisse zu quantifizieren. Im Durchschnitt sind tagsüber nur etwa 150 - 250 Lux zu erwarten. Zum Vergleich, außerhalb des Stalls unter freiem Himmel konnten Werte zwischen 10000 Lux (bewölkt) und > 50000 Lux (sonnig, Wert überstieg den möglichen Messbereich) gemessen werden.

Anhand der gemessenen Beleuchtungsstärke innerhalb des Stalles wurden im weiteren insbesondere Solarzellen genauer untersucht, die speziell für diffuses Licht geeignet sind. Zu erwähnen sei hier noch, dass die Solarzelle ein möglichst breitbandiges Lichtspektrum benötigt, wie es bei Sonnenlicht oder auch bei Leuchtstoffröhren der Fall ist. Sollten in Zukunft die Ställe mit schmalbändiger LED-Beleuchtung ausgestattet werden, wird die Energieausbeute dadurch deutlich geringer ausfallen.

Von den elektrischen Parametern kamen mehrere Solarzellen in Frage, da sich aber auch die Abmessungen an dem bestehenden Gehäuse orientieren mussten, hat sich die Auswahl auf vier Typen reduziert. Untersucht wurden sie alle mit dem gleichen Messaufbau.

Die Messwerte für Strom und Spannung werden durch zwei digitale Multimeter erfasst. Die Helligkeit der Lichtquelle war einstellbar, sodass die Solarzelle aufsteigend von 50 Lux bis 300 Lux beleuchtet wurde. Der Laststrom ist durch die Widerstandsdekade variabel einstellbar. Die Solarzelle mit der höchsten gemessenen Effizienz wurde nach dem Test für das Funktionsmuster im Projekt ausgewählt. Allerdings wurde bereits in diesem Entwicklungsstatus deutlich, dass die alleinige Energieversorgung über die Solarzelle nicht ausreichen wird.

##### • - Vibration

Es besteht auch die Möglichkeit, aus einer schwingenden Masse Energie zu gewinnen. Ein Prinzip nutzt piezoelektrische Materialien, die mit einer Ladungstrennung reagieren, wenn sie durch eine Bewegung oder eine periodische Vibration verformt werden. Piezoelektrische Generatoren erzeugen typischerweise große Spannungen im Bereich von zehn bis hundert Volt, aber nur sehr kleine Ströme. Die Idee hinter diesem Prinzip war, dass bei jedem Schritt und während des Wiederkauens der Kuh eine Masse beschleunigt und zum Schwingen angeregt wird, wodurch eine Energiegewinnung erzielt werden kann.

Eine weitere Methode mechanische in elektrische Energie umzuwandeln sind elektrodynamische oder induktive Generatoren, bei denen eine Kombination aus einem Magneten und einer Spule die Schlüsselemente für die Stromerzeugung sind. Wenn eine Kombination dieser Bauteile einer Vibration ausgesetzt ist und sich der Magnet relativ zur Spule bewegt, wird in der Spule ein elektrischer Strom induziert. Die Spannungen eines elektrodynamischen Generators sind typischerweise niedriger als die von piezoelektrischen Wandlern. Bei den Versuchen im Labor wurde allerdings festgestellt, dass hier Aufwand-Baugröße-Kosten-Nutzen in keinem Verhältnis zueinanderstehen, somit wurden diese beiden Arten der Energieerzeugung abgewählt.

- - Peltier-Element

Eine ausgewachsene Kuh erzeugt eine Wärmeleistung von bis zu 1,5 kW, die sie über ihre Oberfläche abgibt. Aus diesem Grund wurde untersucht, ob aus Temperaturdifferenzen zwischen Kuh und Umgebung, Energie mittels des Seebeck-Effekts gewonnen werden kann. Diesen Effekt nutzt ein Peltier-Element aus, sodass ein Stromfluss erzeugt wird, wenn an diesem Element eine Temperaturdifferenz herrscht. Das zu untersuchende Peltier-Element (DUT) war thermisch verbunden mit einer Kühlplatte, deren Temperatur direkt unter dem DUT mit dem Multimeter überwacht wurde. Auf dem DUT befand sich ein zweites Peltier-Element, welches als Wärmequelle fungiert (Temperaturdifferenz erzeugt einen Stromfluss <-> Stromfluss erzeugt Temperaturdifferenz). Die Temperatur auf der Oberseite des DUT wurde mittels einer Thermokamera gemessen. Das Harvester-Board diente als Last und lud einen Kondensator (470 mF). Der Kondensator wurde mit Absicht hinsichtlich der Kapazität überdimensioniert, damit der Harvester innerhalb des Testzeitraumes diesen nicht bis zur Ladeschlussspannung aufladen konnte.

Es wurde ein 30-minütiger Testlauf mit einer Temperaturdifferenz von 5 Kelvin und einer mit 10 Kelvin durchgeführt und folgende Ergebnisse (Tabelle 1) realisiert:

**Tabelle 1: Leistungsvergleich des Peltier-Elementes unter verschiedenen Temperaturdifferenzen**

1	5 K	10 K
Spannung Testbeginn	0,08 V	0,146 V
Spannung Testende	2,01 V	2,695 V
Erzeugte Energie	0,948 Ws	1,702 Ws
Mittelwert der Leistung	527 $\mu$ W	945 $\mu$ W

Unter Laborbedingungen konnte eine signifikante Energie gemessen werden, sodass diese Art der Energieversorgung in das Funktionsmuster integriert wurde. Dafür musste das geplante Demonstratorgehäuse so umgestaltet werden, dass das Peltier-Element direkt auf der Kuh platziert ist und das Gehäuse als kühlendes Gegenstück wirkte. Störfaktor war hier, dass der Gurt zur Befestigung des Necktags zwischen Kuh und Gehäuse verlief, sodass kein direkter Kontakt des Peltier-Elementes mit der Kuh hergestellt werden konnte (Abbildung 3, links). Die Befestigung am Halsband wurde daher so verändert, dass der Gurt links und rechts als Schlaufe in den Bügel eingefädelt und anschließend mit sich selbst verbunden, sodass der direkte Kontakt zwischen Gehäuse und Kuh gewährleistet war (Abbildung 3, rechts).



**Abbildung 3: Funktionsmuster für den Test des Peltier-Elementes**

- Radio frequency energy harvesting (RFEH)

Eine vierte Möglichkeit der Energiebereitstellung bestand darin, Energie kontaktlos zu übertragen. Die kontaktlose Übertragung per RFEH beträgt zudem lediglich nur maximal 0,5 Meter, was zusätzlich eine Herausforderung an die Gestaltung des Stalls stellt. Die hohen Umrüstungskosten des Stalls sind daher

als Ausschlusskriterium zu betrachten. Viel effektiver ist hier der Einsatz einer Art "Durchgang" mit speziellen Leuchtstoffröhren, die die vorhandene Solarzelle kurzzeitig mit einer hohen Energiemenge versorgen, sodass ein z.B. Akku wieder geladen werden kann.

Aus der Betrachtung und den Vorversuchen der 4 Varianten der Energiebereitstellung kann, trotz der Lichtverhältnisse in Stall und Melkstand, die Solarzelle in Verbindung mit einem Peltier-Element die Lösung für die Energieversorgung der Sensoren sein. Das Peltier-Element kann in der kühlen und dunklen Jahreszeit die Energiegewinnung dominieren. Je kälter es im Stall ist, desto höher ist der Energieertrag. Dagegen steigt die Effizienz der Solarzelle an hellen, sonnigen Tagen an. Durch diese gerade gegenteiligen Bedingungen ist es möglich, mit Hilfe beider Systeme ganzjährig Energie für die Sensoren bereitzustellen.

Aus den Erkenntnissen der Vorversuche entstand der Prototyp des Energy-Harvesters (AEM10941) mit einem Supercap als Energiepuffer und einem Akku (AEM00300) für bis zu 20 Stunden Betriebsbereitschaft (Abbildung 4).

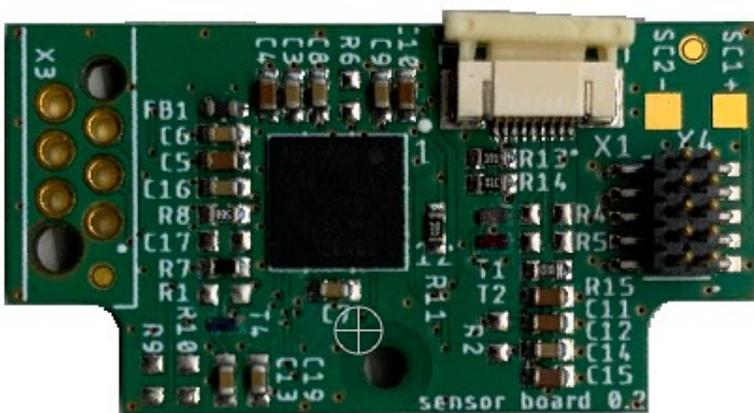


**Abbildung 4: Energy-Harvester**

#### ■ Arbeitspakete 3 und 4: Sensorik physikalischer, chemischer & biologischer Kenngrößen

Für die Erfassung physikalischer, chemischer & biologischer Kenngrößen stand eine Vielzahl verschiedener Sensoren zur Verfügung. Um zunächst eine Analyse der Qualität der einzelnen Sensoren abschätzen zu können, wurde eine Platine mit mehreren Sensoren angefertigt, um diese der Einfachheit halber mit einem käuflichen Demoboard (Arduino Uno) auszuwerten. Hier wurden neben den im Pflichtenheft geforderten Messwerten (Temperatur, Lichtqualität und -spektrum, Luftqualität, Temperatur-Feuchte-Index), zusätzlich noch ein Beschleunigungs- und GPS-Sensor eingesetzt. Hintergrund dafür war, die

Bewegungsabläufe der Kuh mit aufzeichnen zu können. Mithilfe dieses Prototyps und der daran durchgeführten Tests war es möglich, die für das Projekt am besten geeigneten Sensoren auszuwählen, die später in das Funktionsmuster integriert wurden. Das Demoboard wurde so gestaltet, dass die Stromaufnahme aller Sensoren einzeln gemessen werden konnte. Daraus konnte abgeleitet werden, welche Sensoren für das spätere System in Frage kommen und welche sich aufgrund des Energiebedarfs nicht eignen. Nach den Erkenntnissen aus dem Vorabtest erfolgte die Weiterentwicklung des Demonstrators durch die Integration von zwei Sensoren, die sämtliche im internen Pflichtenheft festgelegten Messungen abdecken können und die Ausarbeitung des Schaltplanes und des Layouts wurde finalisiert. Die abschließende Fertigung des Sensorboards markierte einen wichtigen Meilenstein im Entwicklungsprozess, da das System nun in der Lage war, die gewünschten Messungen in einer präzisen und zuverlässigen Weise durchzuführen (Abbildung 5).



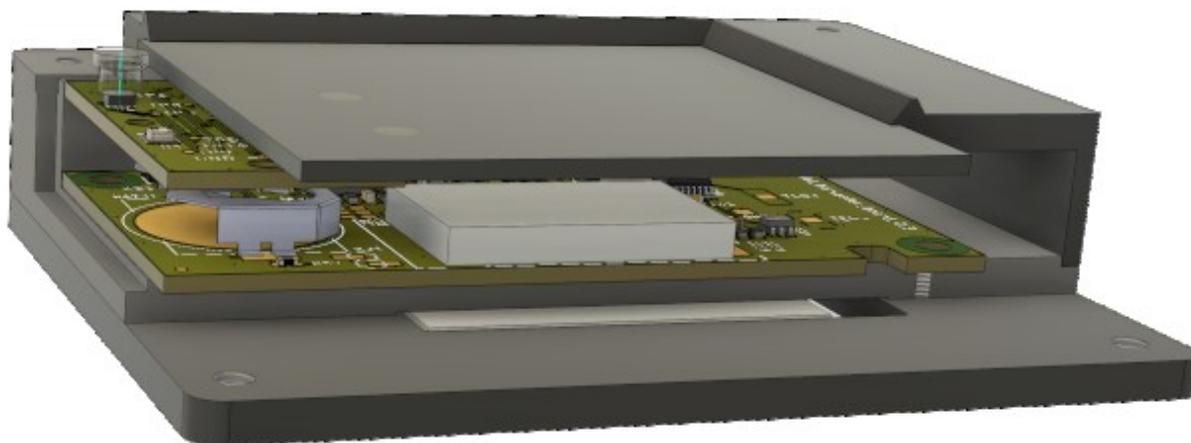
**Abbildung 5: Sensorboard**

Der Lage- / Beschleunigungssensor, der zu Beginn auf dem Demo-Board integriert war, fand auf Grund des hohen Energiebedarfs keine Verwendung. Dieser Sensor muss, um seine gewünschte Funktion zu gewährleisten, permanent Messungen durchführen. Das führt zu einer deutlichen Überschreitung der zur Verfügung stehenden Energiemenge und wurde dadurch abgewählt.

#### ■ Arbeitspaket 8: Zusammenführung zum intelligenten Tag

Um die Zusammenführung der Komponenten des Demonstrators von NU und SE zu ermöglichen, wurde der Aufbau im Gehäuse an sich und die erforderliche Schnittstelle definiert. Das Gehäuse sollte so flach wie möglich gestaltet werden, sodass die Kuh mit dem Gehäuse möglichst nicht an Haltungseinrichtungen hängenbleiben kann. Eine weitere Herausforderung war die Einbindung der Sensoren in das Gehäuse. Die Sensoren mussten so in das Gehäuse integriert werden, dass sie vor äußeren Einflüssen geschützt sind und der Datenaufnahme voll dienlich sein können. Für den Sensor zur Messung der

Lichtqualität kam ein Lichtleiter zum Einsatz, der das Licht mit möglichst wenig Dämpfung in das Gehäuseinnere leiten sollte. Durch dieses Element wurde die notwendige Öffnung staubdicht verschlossen. Für den Gassensor wurde eine hinreichend kleine Öffnung integriert, der über einen anschließenden Kanal die Luft zum Sensor leitet. Ein entsprechendes 3D-Modell des Demonstrators ist in der Abbildung 6 dargestellt.



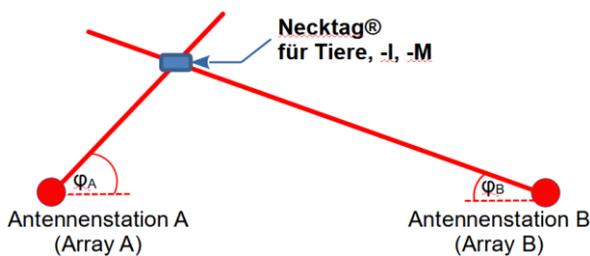
**Abbildung 6: 3D-Modell Gehäuse**

### 3 Federführende Projektbearbeitung durch die Schneider Elektronik GmbH & Co KG

#### 3.1 Erreichte Ergebnisse und Diskussion

##### ■ Arbeitspaket 5: Funktechnische Anforderungen für den bidirektionalen Datenaustausch

Für den Datenaustausch im Indoor- und Outdoor-Bereich zwischen Basisstation und NECKTAG® für Tiere, Maschinen & Einrichtungen (NECKTAG® -M), gesicherten Kontrolle und Operatoren (Necktag -I) erfolgte zunächst die Recherche nach geeigneten Funkprotokollen und deren funktechnischen Anforderungen auf Basis des Pflichtenheftes. Diese Anforderungen umfassten ein geeignetes energiesparendes, robustes und bulkfähiges Funkprotokoll in Verknüpfung mit der Möglichkeit zur Datenübertragung von Sensor- und Aktordaten und der Verwendung eines Verfahrens zur flächendeckenden Echtzeitlokalisierung. Nach Analyse und Aufbereitung der Rechercheergebnisse wurde das Funkprotokoll Bluetooth Low Energy 5.1 (BLE\_5.1) für die weitere grundlegende technologische Konzeptionierung des Gesamtsystems ausgewählt. Die Auswahl des Verfahrens zur Lokalisierung erfolgte nach eingehender Prüfung hinsichtlich der technischen Möglichkeiten von BLE\_5.1. Die Lokalisierung soll durch die Triangulation mittels Verwendung der Angle of Arrival [AoA] Technologie erfolgen (Abbildung 7).

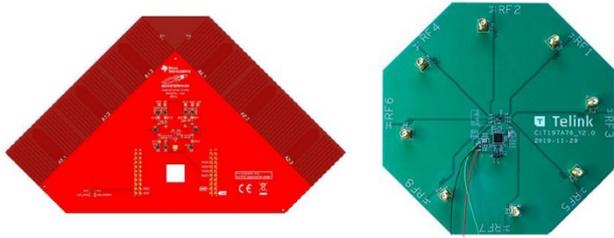


**Abbildung 7: NECKTAG® Ortung durch Triangulation mittels AoA-Richtungsfindung**

##### ■ Arbeitspaket 6: Funktechnik Basisstation

- IoL Antennenarray - Antennenbasisstation

Für die Funktechnik der Basisstation wurden zunächst Freifeld bzw. Outdoor Antennenmessungen zur Evaluierung der BLE\_5.1 AoA-Richtungsfindung im Projektzeitraum 2021 durchgeführt. Hierbei wurden zwei verschiedene Antennenarray-Evaluierungsplatinen mit jeweils dazugehörigen Tag-Evaluierungsplatinen beschafft, im Freifeld vermessen und gegenübergestellt. Die beiden im folgenden betrachteten Arrays sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: Array Texas Instruments (TI) (links) und Array Telink (rechts)**

In der Tabelle 2 sind die Messergebnisse der Freifeldmessung für das TI Array dargestellt.

**Tabelle 2: Freifeldmessung TI Array; 100 Messwerte pro Tag-Position (Azimuth-Winkel); Entfernung Tag zu Array = 10m**

<b>Tag-Position zu Array (Azimuth-Winkel)</b>	45°	22,5°	0°	-22,5°	-45°
<b>Abweichung in [m]</b>	0,20	0,79	1,11	0,16	0,49
<b>Messwerte pro Sekunde</b>	7,59	6,18	7,53	7,53	7,62

In der Tabelle 3 sind die Messergebnisse der Freifeldmessung für das Telink Array dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Konzeptionen der beiden Arrays ergaben sich im Zusammenhang mit der genutzten herstellerseitigen Evaluierungssoftware unterschiedliche maximal mögliche Ortungswinkel.

**Tabelle 3: Freifeldmessung Telink Array; 100 Messwerte pro Tag-Position (Azimuth-Winkel); Entfernung Tag zu Array = 10m**

<b>Tag-Position zu Array (Azimuth-Winkel)</b>	0°	90°	180°	270°
<b>Abweichung in [m]</b>	0,13	0,44	0,50	0,91
<b>Messwerte pro Sekunde</b>	1,29	1,29	1,29	1,29

Unter Verwendung des TI Arrays wurde eine SE eigene Software entwickelt, welche die Evaluierung der IQ-Datensätze im Rahmen der BLE\_5.1 AoA-Richtungsfindung unabhängig von der herstellerbedingten Evaluierungssoftware ermöglichte. Die IQ-Messwerte wurden vom Antennenarray aus der BLE\_5.1 Contant Tone Extension (CTE) gewonnen und waren in Ihrer Qualität abhängig vom Design des Antennenarrays. Mittels der CTE Sampling Slots und dem jeweiligen zugeschalteten Antennenarray-Element konnte eine Phasenverschiebung durch die eintreffende CTE gemessen werden. Resultierend aus der geometrischen Array Dimensionierung und der gemessenen Phasenverschiebung ergab sich ein Ortungswinkel zur AOA-Richtungsfindung.

Nach der erfolgreichen Evaluierung der BLE\_5.1 AoA-Richtungsfindungstechnologie mittels der in Abbildung 8 dargestellten Antennen-Arrays schloss sich gemäß der Vorhabenbeschreibung sowie den Ortungsanforderungen aus dem Pflichtenheft unter Beachtung der komplexen Anforderungen im Indoor-

und Outdoorbereich die Entwicklung eines eigenen Antennenarrays mit geeigneter Gehäusekonstruktion an. Die Antennenarrays wurden im Einzelnen und im Gesamtverbund erfolgreich entwickelt und getestet, zu Funktionsmuster gefertigt und am 30.11.23 im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch integriert (s. AP10). Das in diesem AP erfolgreich implementierte Antennen-Array konnte den BLE\_5.1 Funkprotokollstandard nutzen, die 3D-Echtzeitlokalisierung über 3D-Ortung der Necktag® Transponder (für Tiere, Maschinen, Einrichtungen) realisieren, mit dem IOL HOST-PC über eine Power-Over-Ethernet (PoE) Anbindung kommunizieren, verfügte über ein geeignetes robustes Gehäuse (verwendbar für Indoor- und Outdoorbereich) und wurde an einer Array-Aufhängung zur Montage in der Stallumgebung befestigt.

Um die experimentelle Erprobung für die Projektpartner HSNB und LfULG zu ermöglichen wurde im Jahr 2021 ein Host-PC mit BLE\_5.1 Antennenstation aufgebaut und die entwickelte IOL-Datenbank eingerichtet. Der HOST-PC Version 2021 diente mittels einer durch SE entwickelten Software „IOL Start“ zur Sensordatenaggregation der Necktag® Version 0 (s. AP7 und AP 9) und Speicherung der Messwerte in der IOL Datenbank. Die nachfolgende HOST-PC Version 2022 diente als IoL Daten- und Softwarezentrum (IoL-DSZ). Die auf dem IoL-DSZ basierende entwickelte Software „IoL“ diente zur Sensordatenaggregation der Necktag® Version 1,2,3,4 sowie zur Antennenarray Ansteuerung, zum Datenaustausch und zur Berechnung der 3D-Echtzeitlokalisationsdaten (s. AP7, AP8 und AP 9) und zur Speicherung der Daten in der IOL Datenbank. Des Weiteren diente dieser zur Bereitstellung einer Schnittstelle für den plattformunabhängigen Datenaustausch zu übergeordneten Fremdsystemen.

Das entwickelte IOL Gateway ist eine optimierte Version der ursprünglich installierten BLE\_5.1 Antennenstation (vgl. IOL Host-PC Version 2021) und diente zur plattformunabhängigen, autarken Sensordatenaggregation der Necktag® Version 1,2,3,4 und nutzte den BLE\_5.1 Funkprotokollstandard. Es versendete die empfangenen Daten an den Host-PC und konnte flexibel im Stall, unabhängig vom Standort des Host-PC, angebracht werden. Die Kommunikation zur IOL HOST-PC Software und Versorgung des IOL-Gateways wurde über eine PoE-Anbindung realisiert. Durch die Gesamtsystemkonzeption konnten auch mehrere redundante Gateways im Stall angebracht werden. Des Weiteren wurde im IOL-Gateway Sensorik integriert, die als Referenz diente und der Sensorik aus der Necktag® Version 2 (vgl. AP 7) entspricht.

## ■ Arbeitspaket 7: Funktechnik & Aktortechnik Tag

- - Necktag® Version 0 (Seit 01.11.2021)

Für die Evaluierung der Bluetooth Low Energy Funktechnik im Labor und unter Stallbedingungen wurden zunächst CC2650 Sensortag Evaluierungsboards beschafft. Die CC2650 Tags bilden die Necktag® Version 0. Die CC2650 Evaluierungsboards benötigten zur Energieversorgung Batterien und hatten

dadurch eine begrenzte funktionelle Laufzeit. Diese dienten im Projektzeitraum 2021/2022 vorübergehend zur Bearbeitung für AP7, AP9 und AP11. Die Sensorik umfasste die Einheiten zur Messung des Luftdruckes, der Temperatur, der Luftfeuchte und der Lichtstärke. Damit war die integrierte Sensorik für die im Pflichtenheft definierten sensorischen Parameter geeignet. Die integrierte Aktorik wurde über „IOL Start“ und Bluetooth angesteuert.

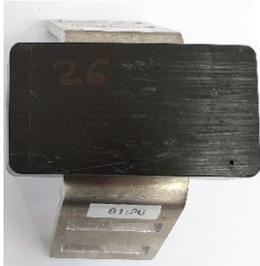
Für erste experimentelle Erprobungen durch das LfULG, HSNB und SE im Stall wurden drei CC2650 Evaluierungsboards mit Sensoren in einem speziell dafür gefertigten Necktag®-Gehäuse integriert. Hierbei wurde am 01.11.2021 ein Referenztag zur Arretierung im Stall und zwei Tags für die Anbringung am Tier präpariert (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Necktag® Version 0, 2x Tiertag (links und rechts), 1x Referenztag (mittig)**

•- Necktag® Version 1 (Seit 30.11.2022)

Gemäß der Vorhabenbeschreibung wurde in diesem Arbeitspunkt die Mikrocontroller-Zentraleinheit mit Funktechnik entwickelt, evaluiert und in die Necktag® Version 1 integriert. Die Mikrocontroller-Zentraleinheit mit Funktechnik erfüllt alle notwendigen Anforderungen, wie z.B. die im AP8 definierte Hardware-Kommunikationsschnittstelle zum NU Sensorik-Teil, die Ortungsfunktion über BLE\_5.1, die Anbindung von beliebiger Aktorik und beliebiger Sensorik, die Modularität aufgrund des Platinen-Layouts bei kleinem Formfaktor sowie die Necktag®-Gehäusekonstruktion mit vorübergehender batteriegepeister Versorgung. Zudem wurde dafür ein geeignetes, stalltaugliches Necktag®-Transpondergehäuse mit Bügel zur Anbringung am Halsband konstruiert und gefertigt (Abbildung 10 und Abbildung 11).



**Abbildung 10: Necktag® inkl. SE Mikrocontroller-Zentraleinheit mit Funktechnik und Ortungsfunktion & SE eigener Sensorik sowie stalltauglicher Necktag®-Gehäusekonstruktion mit Bügel zur Anbringung am Halsband**



**Abbildung 11: Referenz- Necktag® inkl. SE Mikrocontroller-Zentraleinheit mit Funktechnik und Ortungsfunktion & SE eigener Sensorik und stalltauglicher Necktag®-Gehäusekonstruktion für die Anbringung an fixen Standorten im Stall**

Am 30.11.2022 wurden für die weitere Versuchsdurchführung zunächst 6 Necktag® (4 Tiertransponder und 2 Referenztransponder) mit Ortungsfunktion & Sensorik der Necktag® Version 1 bereitgestellt, welche die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte, Lichtstärke und Batteriespannung messen konnten.

•- Intelligentes Necktag® Version 2 (Seit 14.06.2023)

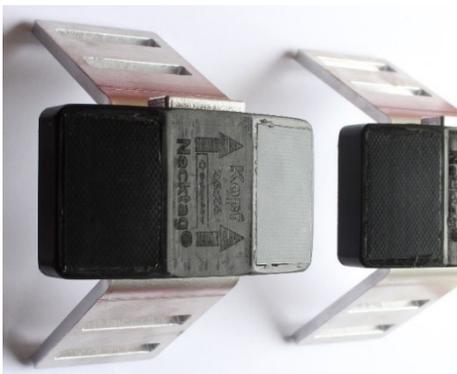
Im Zuge der Projektverlängerung und unter Beachtung des Projektstandes wurden weitere hard- und softwaretechnische Entwicklungen im Bereich der Sensorik sowie Eigenentwicklungen im Bereich Energy Harvesting realisiert und der Necktag® Version 2 erstellt. Dieser war in der Lage die Parameter Temperatur (°C), rel. Luftfeuchte (%), Luftdruck (hPa), Lage, Luftgüte und die Versorgungsspannung (mV) zu erfassen. Die Ortungsfunktion und die Möglichkeit zur Verwendung von beliebiger Aktorik (z.B. Anschluss eines Halbleiterrelais zum Nutzen der Schaltfunktion des Tags) war ebenfalls implementiert. Die Necktag® Version 2 umfasste zudem ein neu konstruiertes, verkleinertes und abgeschrägtes, stalltaugliches Necktag®-Transpondergehäuse mit Bügel zur Anbringung am Halsband (Abbildung 12). Die Anbindung der Sensorik zur Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgüte wurde über eine spezielle Gehäuseanbindung an der Längsseite realisiert.



**Abbildung 12: Necktag® Version 2**

•- Intelligentes Necktag® Version 3 (27.07.2023)

Im Necktag® Version 3 wurden die soft- und hardwareseitigen Weiterentwicklungen im Bereich Energy Harvesting implementiert und die Entwicklungen der Ortung, Aktorik & Sensorik aus Necktag® Version 2 genutzt. Der Necktag® Version 3 basiert somit auf der grundlegenden Gehäusekonstruktion aus der Version 2 mit angepasster Anbringungsmöglichkeit der Energy Harvesting Solar Hardwareelemente und dem Bügel zur Anbringung am Halsband (Abbildung 13).



**Abbildung 13: Necktag® Version 3**

•-Intelligentes Necktag® Version 4 (24.10.2023)

Für die Konstruktion des Necktag® Version 4 wurde ein gänzlich neuer Gehäusekonstruktionsansatz verfolgt. Das Tag-Gehäuse wurde in Form einer Ohrmarke entworfen und konstruiert (siehe Abbildung 14). Der Formfaktor wurde an den herkömmlichen auf den Markt erhältlichen Ohrmarkengrößen angelehnt. In dem Necktag® ist eine Solar Energy Harvesting Funktion und eine skalierbare Implementierungsmöglichkeit der entwickelten Sensorik aus der NecktagVersion 2 bzw. Version 3. Um das Gehäuse

flexibel zu gestalten, konnte im Zuge dieser Entwicklungsstufe erfolgreich ein eigenes Spritzgussverfahren entwickelt und angewendet werden.



**Abbildung 14: Necktag® Version 4 im Vergleich zu einer herkömmlichen Ohrmarke**

#### ■ Arbeitspaket 8: Zusammenführung zum intelligenten Tag

Die Richtwerte der einzusetzenden Mikrocontroller-Zentraleinheit bezüglich des Versorgungsspannungsbereiches und des Energiebedarfs in Abhängigkeit verschiedener Schnittstellen zur Sensorik sowie verschiedener Betriebs- und Energiemodi dienten zur grundlegenden Energieverbrauchsschätzung und zur Energy Harvesting Konzeptionierung. Es erfolgte die Fertigung von zwei verschiedenen Gehäusentwürfen für die separate Testung des Energy-Harvesting.

Die Erstellung des intelligenten Tag erforderte eine Hardware-Schnittstellendefinition, welche die Kommunikation mit dem Sensorik Modul hardware- und softwaretechnisch beschreibt. Auf Basis der Hardwareschnittstellendefinition schlossen sich ausführliche Tests und Verbesserungen hinsichtlich der zu Verfügung stehenden definierten Kommunikationsschnittstelle des Sensorik Moduls an. Im Zuge der Projektverlängerung wurde durch die Schneider Elektronik GmbH & Co.KG eine weitere Entwicklung in den Bereichen Sensorik und Energy Harvesting realisiert, welche bis zum Projektabschluss ausführlich im Laufstall des Lehr- und Versuchsgutes in Köllitsch getestet und der Funktionsnachweis der intelligenten Necktag® Funktionsmuster erbracht.

Die Komponenten für das intelligente Necktag® umfassten die Necktag® Sensorik, das Necktag® Energy Harvesting (Solarzelle mit Superkondensator zur Energiespeicherung). Um ein effizientes Energiemanagement zu gewährleisten sowie die Echtzeitortungsdatenpakete, Aktorik- und Sensordaten und zusätzliche sensorische Entscheidungsunterstützungsdaten an die Antennenbasisstationen übermitteln zu können, wurde für die Mikrocontrollereinheit eine geeignete Firmware im Rahmen des AP8 entwickelt. Die Sensorik und deren Funktionalitäten sind im AP 7 unter Necktag® Version 2 aufgeführt. Um

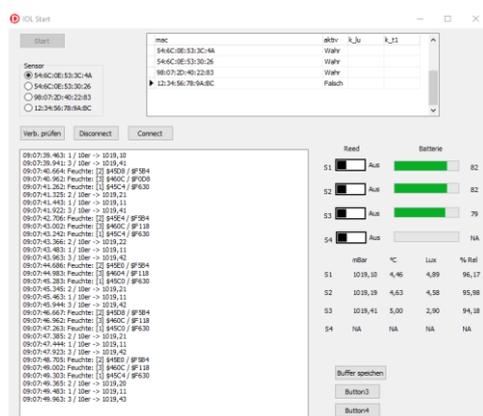
flexibel das Mikro- und Makroklima an der Kuh erfassen zu können, sind die Sensor-Platinenlayouts modular gehalten, in einem gesonderten Gehäuse an der Necktag® Version 4 Gehäuseabdeckung angebracht und mit speziellen Filtern ausgestattet. In der Abbildung 15 sind die Leiterplatten für den Luftfeuchte- und Temperatursensor dargestellt. Der Lage- und Luftdrucksensor sowie die Anschlussmöglichkeiten zur Zustandssteuerung für Aktorik sind auf dem Platinenlayout der Mikrocontrollerzentraleinheit implementiert.



**Abbildung 15: bestückte SE Platine mit einem Luftfeuchte- und Temperatursensor**

## ■ Arbeitspaket 9: Softwareentwicklung

Zur Evaluierung und experimentellen Erprobung der Necktag® Version 0 (CC2650 Sensortags, vgl. AP7) im Labor und im LVG Köllitsch wurde die Software „IOL Start“ im Projektzeitraum 2021 entwickelt (Abbildung 16) und auf dem IOL HOST - PC Version 2021 (vgl. AP6) eingerichtet. Diese diente zum bidirektionalen Datenaustausch mit der Sensorik und Aktorik der CC2650 Sensortags mit Datenvisualisierung sowie zur Speicherung der Rohdaten in der IOL-Datenbank.



**Abbildung 16: Softwaretool „IOL Start“ im Jahr 2021**

Im Projektjahr 2022 wurde die Software „IoL“ zur 3D Echtzeitortung der Necktag® Transponder (Abbildung 17) sowie zur Abholung der Transponder-Messdaten und zur Speicherung dieser Werte in der IOL Datenbank für weitere Auswertungen mit einer plattformunabhängigen Schnittstelle zu übergeordneten Fremdsystemen entwickelt.



**Abbildung 17: Plattformunabhängige Software „IoL Farm“ zur auswählbaren Anzeige von Echtzeitortungs-, Tracking- und Sensordaten in Versuchsgruppe 12 im LVG Köllitsch**

■ Arbeitspaket 10: Systemintegration

Am 24.09.21 erfolgte die Integration und die Inbetriebnahme der Host-Computer Version 2021 (vgl. AP 6) und der BLE\_5.1 Antennenstation im Stall (LVG Köllitsch). Dazu wurden zwei Necktag® Version 0 im Laufstall des LVG Köllitsch an Kühen und einer an einer Haltungseinrichtung angebracht. Nach erfolgreichen statischen Vortests der Necktag® Version 1 im Freigelände und einer Gebäudehülle erfolgte am 30.11.2022 die nächste Systemintegration im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch. Dabei wurde ein Antennen-Array, bestehend aus fünf Antennen in einer Höhe von 4,20 bis 6,22 m Höhe über dem Stallboden (Abbildung 18) installiert.



**Abbildung 18: links-Antenne A1 vor der Installation, mitte- installierte Bluetooth-Antenne und rechts weiterentwickelte NECKTAG® Multisensoren**

Zu diesem System gehörte ein neuer Host-Computer mit der IOL Datenbank und einer integrierten Software, eine Antennenbasisstation und fünf Antennenarrays zur Transponder-Ortung & Sensordatenaggregation sowie sechs Necktag® Version 1 für weitere Tests in der Einsatzumgebung. Ab dem Juni 2023 konnten im Praxisversuch neun weitere Intelligentes Necktag® der Version 2 in die Erprobung gebracht werden. Die positiven Testergebnisse dieser Version führten einen Monat Später bereits zur Einführung der Necktag® Version 3 und Version 4 im Laufstall des LVG Köllitsch.

## **4 Federführende Projektbearbeitung durch die Hochschule Neubrandenburg und das LfULG**

### **4.1 Erreichte Ergebnisse und Diskussion**

#### **■ Arbeitspaket 1: Pflichtenheft und Konzeptionierung**

Die Erstellung des Pflichtenheftes erfolgte unter der Federführung durch die HSNB und das LfULG. Das Pflichtenheft diente der Festlegung der Vorgehensweise im Projekt und enthielt neben den Projektzielen auch die Fixierung der Produktspezifikation und der Parameterdefinitionen.

#### **■ Arbeitspaket 11: Experimentelle Erprobung (HSNB und LfULG)**

In diesem Arbeitspaket stand die entwicklungsbegleitende Erprobung des Funktionsmusters des NECKTAG® Multisensors und des IoT-Systems unter landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen der Milchviehhaltung im Fokus. Dafür bildete der 1998 erbaute Liegeboxenlaufstall mit den Abmaßen 46x25 m für 120 Milchkühe des LfULG, die Erprobungsbasis. Der Liegeboxenlaufstall mit Spaltenboden ist in vier Leistungsgruppen und eine Wellnessgruppe räumlich aufgeteilt. Die Wandseiten des Stalls sind offen und können, je nach Wetterlage, durch Wetterschutznetze geöffnet bzw. geschlossen werden. Die Giebelseiten sind in Dachstuhlhöhe mit Space boards aus Holz versehen. Dabei sind die Zwischenräume zur Licht- und Luftdurchlässigkeit auf 28 mm ausgelegt.

Die Einrichtung der Versuchsbasis im LVG Köllitsch erfolgte am 24.09.2021 mit der Installation eines Host-Computers und eines Antennensystems mit drei Necktag® Version 0. Die Energieversorgung erfolgte in der Version der Tags mittels einer CR2032 Batterie, dessen Kapazität stetig am Host-Computer ables- und darstellbar war. Eine passwortgeschützte, interne Datenbank ermöglichte den Abruf der gespeicherten Daten zu jeder Zeit und an jedem Ort über den TeamViewer (Microsoft Corporation, USA) oder mittels AnyDesk (AnyDesk Software GmbH, Deutschland).

Ein Necktag® Version 0 wurde als Referenzsensor an einer definierten Position des Laufstalles in einer Höhe von 1,34 m über dem Spaltenboden fixiert und die anderen beiden Multisensoren wurden am Halsband von zwei ausgewählten Kühen befestigt. Erste generelle Funktionstests der einzelnen Sensorkomponenten zur Erfassung der Parameter Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit, sowohl statisch als auch unter Praxisbedingungen an den Halsbändern ausgewählter Tiere, dienten der schnellen und frühzeitigen Behebung von Fehlern. Diese Funktionstests umfassten Messungenauigkeiten und Lücken in der Datenübertragung, woraus die Eliminierung von Störquellen und die Anpassung der Software des Host-Computers resultierte. Aus den Funktionstests konnte die optimale Übertragungsrates der Daten zum Host-Computer auf 30 Sekunden via Bluetooth Low Energy 5.1 (BLE 5.1) im Dauerbetrieb der

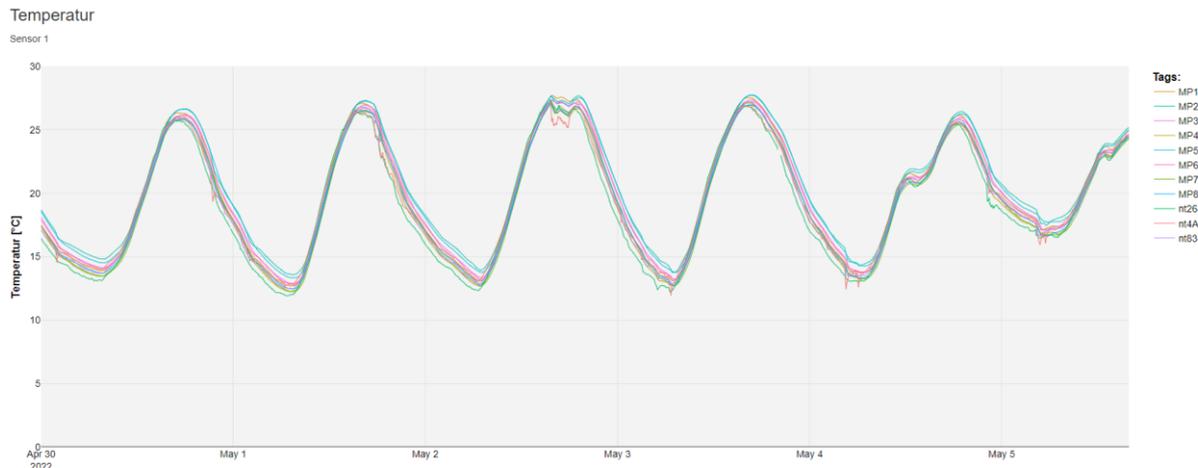
Necktag® Version 0 bestimmt werden. Zudem konnte festgestellt werden, dass einige Sensorkomponenten, wie der Sensor zur Bestimmung der rel. Luftfeuchte, bei einem Batterieladezustand von weniger als 66 % keine Daten überträgt, so dass ein 14-tägiger Turnus für den Batteriewechsel festgelegt wurde. Weiterhin war die Schutzwirkung und die Robustheit des Gehäuses der Necktag® Version 0 unter Einsatzbedingungen im Milchviehstall Teil der Überprüfung des Systems zur Datenaufnahme und Lokalisation.

## Referenzmessungen

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Necktag® Version 0 und der Datenübertragung im gesamten System, wurden statische Tests durchgeführt. Dafür wurden die drei Necktag® zusammen mit dem Tinytag Ultra 2 (Gemini Data Loggers Ltd, England) als validiertes Referenzsystem in ein abgeschlossenes Gefäß gelegt und die Messintervalle aufeinander abgestimmt.

## Temperatur (°C)

Nach ersten Testläufen gaben die Necktag® die Messwerte ohne Kommastellen aus und es kam zu großen Ausfallzeiten. Anpassungen an der Sensorik durch den Kooperationspartner SE wurden entsprechend durchgeführt, sodass weitere Testläufe erfolgten. Nach der Überprüfung der Sensoren in einem Behältnis zur Abschirmung von äußeren Einflüssen, betrug die Abweichung zwischen den einzelnen Necktag® konstant im Mittel 0,7K und zu den Tinytags 1,5K (Abbildung 19).



**Abbildung 19: Verlauf der Temperaturmessergebnisse der Tinytags und der drei NECKTAG® Multisensoren**

## **rel. Luftfeuchte (%)**

Die Ergebnisse der Messungen der rel. Luftfeuchte durch die Necktag® zeigten zunächst Differenzen zu den aufgestellten Referenzmessungen mittels Tinytags auf. Bei der Auswertung der rel. Luftfeuchtigkeit zeigte sich eine Abweichung zwischen 20-25%, wobei die gemessene Luftfeuchtigkeit der Necktag® konstant zu hoch war und die Änderungen stark zeitverzögert und schwächer in den Ausschlägen auftraten. Das Gehäuse der Necktag® hat einen großen Einfluss auf die Luftzirkulation. Dadurch kam es zu erhöhten Werten und die Anpassung an die Umgebungswerte dauerte sehr lange. Verantwortlich für die Messergebnisse der Prüfung der rel. Luftfeuchtigkeit war zunächst das Anreichern eines vor dem Necktag® befindlichen Schutzvlieses als Filter mit Wasser. Bei den anschließenden Messungen ohne Gehäuse waren die ermittelten Werte nahezu identisch zu den Ergebnissen der Tinytags (+3-4% rel. Luftfeuchte). Nachdem das Schutzvlies aus den Gehäusen entfernt und zusätzliche Lochbohrungen am Gehäusedeckel vorgenommen wurde, konnte eine bessere Luftzirkulation und damit der verbundene Abtransport von Feuchtigkeit aus dem Sensor erfolgen. Daraufhin wurde eine konstante Abweichung der Werte der Necktag® gegenüber der Referenzmethode detektiert, sodass eine rechnerische Korrektur möglich war. Die aus diesen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse führten zu einer Anpassung des Gehäuses der Necktag®. Auch der Vergleichstest der Necktag® späterer Versionen hinsichtlich der Sensorparameter Temperatur, rel. Luftfeuchte und THI mündete in dem Gleichklang der Testparameter, sodass für die wissenschaftliche Auswertung die Daten aus allen Funktionsmustern ermöglicht wurde. Der Temperatur-Feuchtigkeits-Index (THI) ist ein wichtiger Indikator zur Bestimmung von Hitzestress bei Milchkühen (ZAHNER 2018). Aus den vom Necktag® ermittelten Werten für die Parameter Temperatur (°C) und rel. Luftfeuchte (%) wird durch die Ausgabesoftware der THI nach ZIMBELMANN et al. (2009) für die Beschreibung des Wohl der Milchkühe ermittelt.

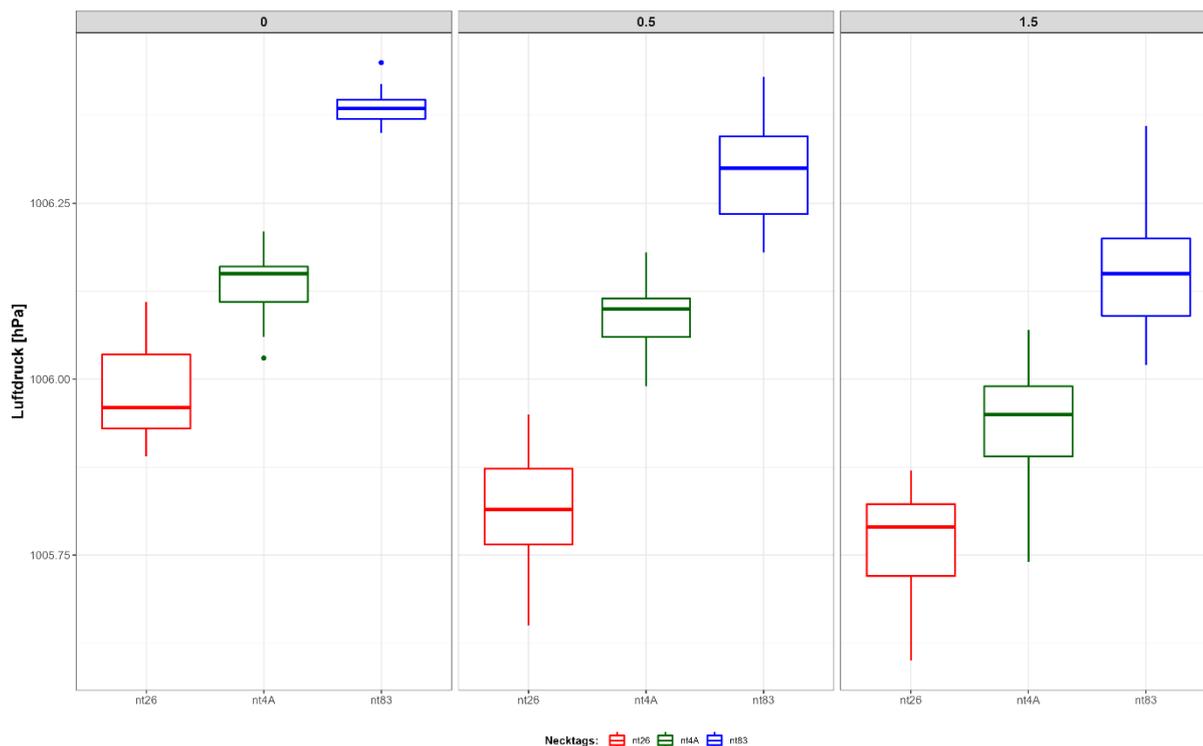
## **Beleuchtungsstärke (lx)**

Ein Luxmeter (Almemo®-Datenlogger der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, Deutschland) kam als Referenzsystem zur Überprüfung der vom Necktag® aufgenommenen Werte der Beleuchtungsstärke zum Einsatz. Die Messergebnisse beider Systeme ergaben keine signifikanten Unterschiede, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass die Lichtöffnungen in ihrer Art und Platzierung so beibehalten werden können. Im Hinblick auf das Energy Harvesting wurde zudem ermittelt, ob im Stall auch in dunkleren Zeiträumen ausreichend Licht für die Energiegewinnung über die Solarzelle zur Verfügung steht (AP 2).

Luftdruckversuche zur Erkennung des Steh- und Liegeverhaltens der Kuh über die Luftdruckänderung

Mit dem Wissen, dass eine Höhenänderung von einem Meter mit einer Änderung des Luftdrucks von 0,12 hPa einhergeht (Deutscher Wetterdienst 2014), wurde untersucht, ob über diese Luftdruckände-

rung das Steh- und Liegeverhalten der Kühe erkannt werden kann. Um die gewonnenen Luftdruckerkenntnisse des Laborversuches auf die Haltungsumgebung zu übertragen, wurde zunächst ein statischer Versuch im Stall durchgeführt. Hierfür wurden die drei Necktag® auf den Boden (0,0 m) bzw. Stativen mit definierten Höhen (0,5 m, und 1,5 m) angebracht. Jeweils für 10 Minuten wurden unterschiedliche Höhenkombinationen für die Tags eingestellt. Dabei konnte die Tendenz der Luftdruckänderung in unterschiedlichen Höhen festgestellt werden. Allerdings unterschieden sich die von den einzelnen Necktag® ermittelten Werte für den Luftdruck innerhalb einer Erprobungshöhe und mit zunehmender Höhe fiel der Luftdruck ab (Abbildung 20).



**Abbildung 20: Boxplots zum statischen Luftdruckversuch im Milchviehstall**

Aufgrund der teils positiven Ergebnisse der statischen Vorversuche zur Ableitung des Liegeverhaltens von Kühen aus der Veränderung des Luftdruckes folgte die Erprobung der Necktag® am Halsband der zwei ausgewählten Kühe. Parallel wurden die Tiere in der Versuchsreihe beobachtet und die Zeiten der Steh- und Liegeperioden notiert. Der ausgewertete Vergleich der Luftdruckdaten mit den Beobachtungsdaten erbrachte keine verwertbaren Ergebnisse. Es konnten anhand der aufgezeichneten Daten keine Rückschlüsse auf das aus der Tierbeobachtung resultierende Steh- und Liegeverhalten der Tiere gezogen werden. Die Vorgänge „Hinlegen“ oder „Aufstehen“ konnten somit nicht erkannt bzw. nachgewiesen werden.

Das Ortungssystem zweier Necktag® der Version 1 wurde erstmals in der Turnhalle des LVG Köllitsch getestet. Dafür wurden vier Antennen in einer Höhe von 4,11 m an den Eckpunkten eines 6 m x 9 m großen Rasterfeldes (Abbildung 21) aufgestellt. Um Verwechslungen der Spalten und Zeilen zu vermeiden,

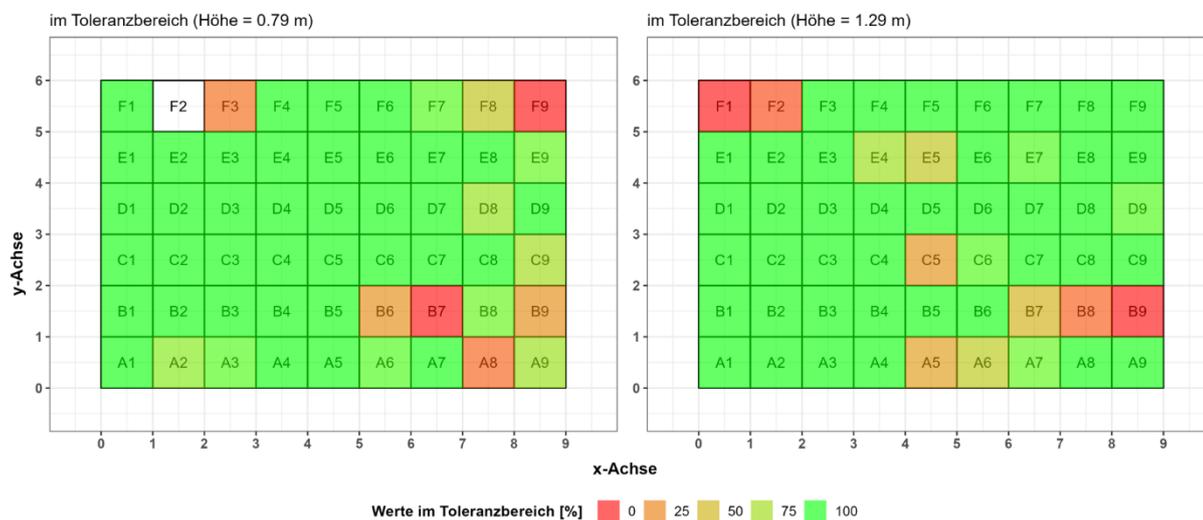
bekamen die Felder in den Zeilen (y-Achse) die Buchstaben A bis F und die Felder der Spalten (x-Achse) die Zahlen 1 bis 9 zugeordnet. So bekam jedes Feld eine Bezeichnung aus Buchstaben und Zahl (A1 bis F9) und hatte eine Größe von 1,0 m x 1,0 m. Zwei Necktag® wurden jeweils auf einem Stativ befestigt, über welches auch unterschiedliche Messhöhen eingestellt werden konnten.



**Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Überprüfung der Ortungsfunktion der Necktag® bestehend aus einem 6 m x 9 m großen Raster (rot eingezeichnet), vier Antennen (je eine pro Eckpunkt)**

Jedes der beiden höhenverschiedenen Stative mit jeweils einem Necktag® durchwanderte das komplette Raster mit einer Verweildauer von einer Minute pro Feld. Alle 2 Sekunden wurde die Position erfasst und an den Computer gesendet. Pro Feld und Sensor wurden somit 30 Werte erfasst. Die Versuchsdurchführung erfolgte mit jeweils zwei Höhen pro Sensor (0,79 m vs. 1,29 m bzw. 0,62 m vs. 1,12 m).

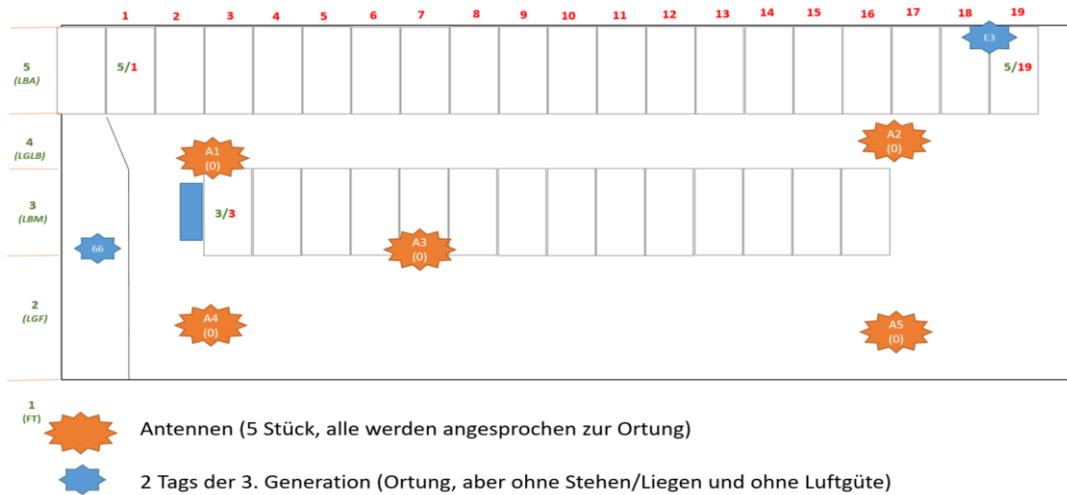
Wie in der Abbildung 22 dargestellt, lagen fast alle erfassten Positionswerte innerhalb des gewünschten Toleranzbereichs. Ungenauigkeiten kamen vorrangig an den Rändern des Testfeldes vor.



**Abbildung 22: Darstellung der gemessenen Ortungswerte unter der Berücksichtigung von einer Abweichung von 1 m**

Die räumliche Einteilung in der Rindergruppe 12 wurde zur dynamischen Überprüfung der Ortungsfunktion des IoL-Systems nach dem in der Abbildung 23 dargestellten Raster vorgenommen. Dazu wurden die Reihen in Querrichtung in eine Liegeboxenreihe Außen (LBA), einen Laufgang zwischen Liegeboxen

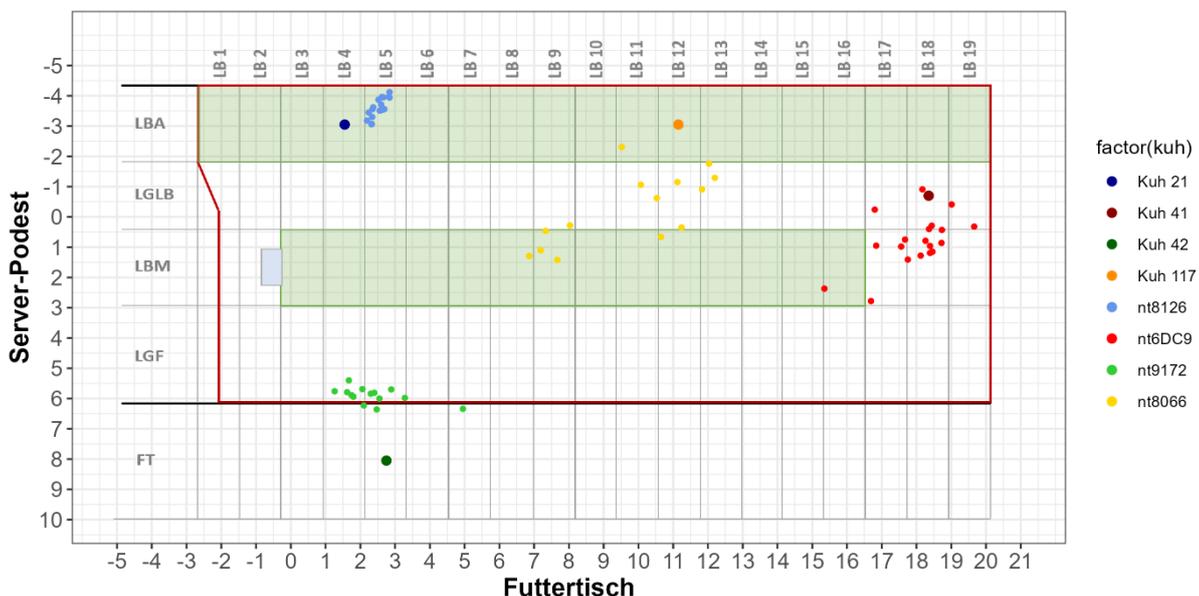
(LGLB), einer Liegeboxenreihe Mitte (LBM), einem Laufgang Futtertisch (LGF) und einem Futtertisch (FT) untergliedert.



**Abbildung 23: Lokalisationsraster in Gruppe 12 des Liegeboxenlaufstalls des LVG Köllitsch**

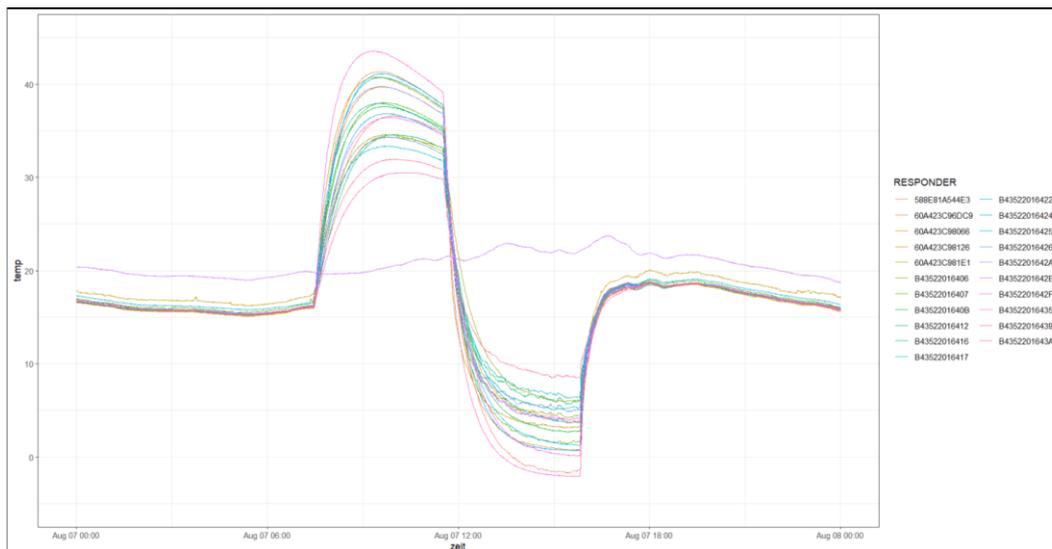
Bei einer Positionsermittlung durch die Necktag® alle 5 Sekunden, wurde die im Pflichtenheft festgelegte Ortungsgenauigkeit von 1 m eingehalten. Dabei wich ein Necktag® stärker von der aktuellen Position ab als der andere und hatte einige Ausfälle in der Positionsbestimmung. Der technische Fehler in dem einen Necktag® wurde behoben und ab Januar 2023 wurden fortlaufend dynamische Tests der Ortungsfunktion durchgeführt und zur Validierung mit einer Tierbeobachtung untermauert.

In der Abbildung 24 sind die Ergebnisse eines ausgewählten Zeitraumes des dynamischen Ortungstests vom 04.01.2023 dargestellt. Die jeweils hervorgehobenen (dunkleren) Plots stellen die in der Tierbeobachtung festgestellte Position des Tieres dar, welche aufgrund der kurzen Taktung lediglich einen Wert für den dargestellten Auswertungszeitraum aufweisen. Die gedeckteren (helleren) Plots stellen die im Beobachtungszeitraum ausgegebenen Ortungswerte durch jeden einzelnen Necktag® dar.



## Abbildung 24: Dynamischer Ortungstest beispielhaft vom 04.01.2023 09:44 bis 09:46 Uhr

Nachdem die Anzahl der entwickelten und im Einsatz befindlichen Necktag®, auf insgesamt 19 Stück angewachsen war, wurden diese einem Synchronisationstest unterzogen. Dabei stand der Gleichlauf der Sensoren in deren Datenermittlung im Vordergrund. Dazu wurden alle Necktag® und zwei Tinytags an einem Ort für zwei Tage zum Messen in gleicher Umgebung platziert und anschließend in einer Thermokiste einer Wärme- und anschließend einer Kältezufuhr kontrolliert ausgesetzt. In der nachstehenden Abbildung 25 sind die Temperaturkurven der Neck- und Tinytags dargestellt. Der Necktag® 64:2E ist dabei als Referenzsensor in der Gruppe verblieben.



## Abbildung 25: Temperaturverlauf des Synchronisationstests vom 07.08.2023

Alle Necktag® reagierten im Verhältnis gleich auf die Temperatur der sie ausgesetzt wurden. Unterschiede in den Ausschlägen lassen sich durch die unterschiedlichen Positionen in der Thermobox und der unterschiedlichen Distanz zu den Wärmflaschen bzw. Kühlakkus erklären. Ebenso hatten alle Sensoren den gleichen Zeitbedarf um sich wieder auf die Stalltemperatur einzustellen.

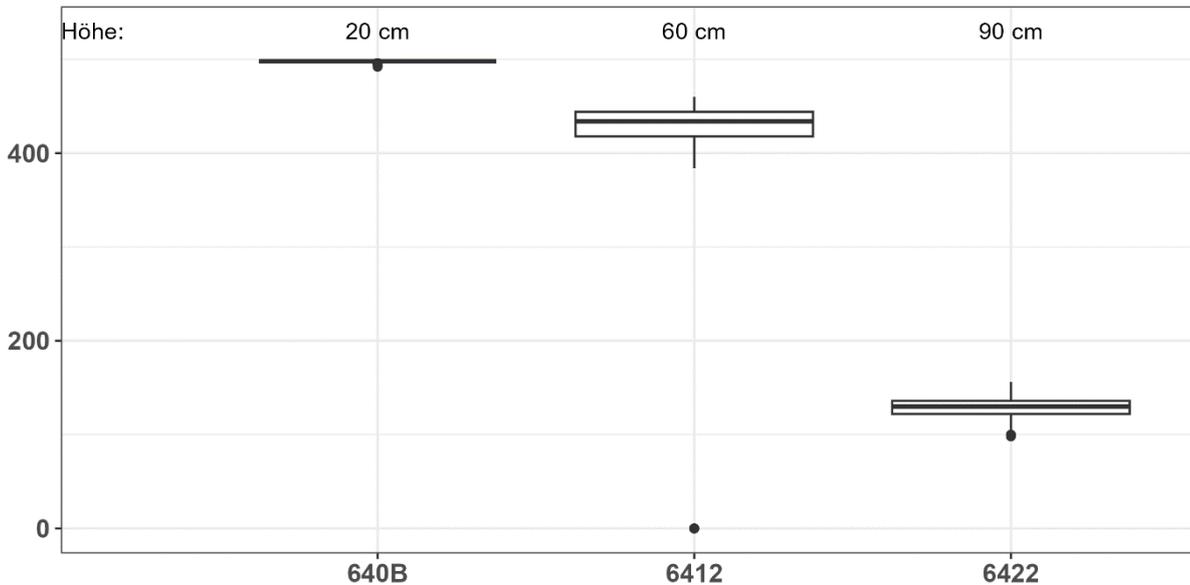
Tests zur Beschreibung von Mikro- und Makroklima um das Tier

Für den Vergleich des Mikro- und Makroklimas um eine Milchkuh, wurden die Daten von drei besonderen Milchkühen verglichen mit drei Necktag®, die als Referenz in der Stallhülle in 2,40 m bis 2,70 m Höhe angebracht waren. Es konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen den Mikro- und Makro-Temperaturen festgestellt werden, wobei die Mikrotemperatur (am Tier gemessen) im Mittel 4,56 °C höher war. Bei der Betrachtung im tageszeitlichen Verlauf, konnte festgestellt werden, dass insbesondere über die Mittagsstunden hinweg, die Temperaturdifferenz des Mikro- und Makroklimas am geringsten ist. Daraus lässt sich ableiten, dass sich insbesondere zur kühleren Tageszeit das Mikro- und Makroklima stark voneinander abgrenzen, wohingegen bei wärmerer Lufttemperatur sich diese stark annähern. Zur Überprüfung dieser Annahme, wurde die Betrachtung auf die Außentemperatur ausgeweitet, wobei

analoge Ergebnisse entstanden. Weiterhin konnten gleichermaßen signifikante Unterschiede in der rel. Luftfeuchte zwischen Mikro- und Makroklima festgestellt werden. Es zeigte sich bei der Auswertung der rel. Luftfeuchte, dass diese bis zu einer Umgebungstemperatur von 25 °C im Makroklima größer ist als direkt an der Kuh. Es wird vermutet, dass die rel. Luftfeuchte im Mikroklima durch die höhere Temperatur an der Kuh beeinflusst wird.

#### Tests zur Beschreibung der Luftgüte

Um die Luftgüte in der unmittelbaren Umgebung des Tieres messen, überwachen und steuern zu können, wurde im Pflichtenheft der Einsatz eines Luftgütesensors im Necktag® vereinbart. Die Kostenminimierung im Blick, sollte ein handelsüblicher Sensor zum Einsatz kommen. Die Wahl fiel auf den Bosch BME 680, welcher für den Einsatz im Humansektor bestimmt ist und die Luftqualität mittels sieben verschiedener Indizes beschreibt. Dazu misst der Luftgütesensor die Luftbestandteile Kohlenmonoxyd, Azeton, Ethanol/Ethan und Isoprene und ermittelt aus deren Gehalt einen Index zur Beschreibung der Luftgüte. Um den für den Gebrauch in Büroräumen konzipierten Sensor BME 680 auf den Einsatz in der Tierhaltung zu testen, wurde dieser in Behältern der Umgebungsluft von Silage, Heu, Rinderkot, sowie Rinderurin ausgesetzt. Die ausgewählten Necktag® wurden in unterschiedlichen Höhen über dem zu überprüfenden Medium angebracht. Aus den Auswertungen in der **Abbildung 26** wird ersichtlich, dass die Necktag® mit zunehmender Nähe zur untersuchten Materie höhere Indizes für die Luftgüte auswiesen.



x-Achse= Sensor; y-Achse= Luftgüte

### Abbildung 26: Box-Plots zur Beschreibung der Luftgüte einer Silageumgebung

Für das Medium Heu konnte ein gegenläufiges Ergebnis festgehalten werden. Mit steigender Entfernung zum Heu, wurden höhere Luftgütewerte durch die Tags ausgewiesen. Die höheren Luftgütewerte in größerer Entfernung lässt vermuten, dass diese aus dem mit zunehmender Entfernung steigenden Anteil an Stallluft resultieren. Für den Rinderkot und -urin konnte analog zur Erprobung mit dem Medium Silage festgestellt werden, dass bei einer zunehmenden Entfernung des Necktag® zum Medium, die Anteile flüchtiger organischer Verbindungen rückläufig sind.

## ■ Arbeitspaket 12: Wissenschaftliche Recherche

Während der Projektlaufzeit wurde das Projekt „IoL“ auf Fachtagungen, Praktikerschulungen und Anwenderseminaren, überbetrieblichen Ausbildungskursen und Fachmessen in Form von Vorträgen, Postern oder Demonstrationen vorgestellt. Im Projekt ist es gelungen, ein Demonstratorsystem zu entwickeln, welches im realen Einsatz, im Rahmen eines Versuchsaufbaus im LVG Köllitsch, im betrieblichen Umfeld erprobt wurde. Parallel zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit als Referenzsensor innerhalb der Stallhülle, sowie der Anbringung am Tier, wurden die Voraussetzungen für die Einbindung verschiedener Akteure geschaffen. Zukunftsweisend wurden in Zusammenkünften mit Workshop Charakter verschiedene Use cases diskutiert. Dazu wurden Unterteilungen in verschiedene Rubriken vorgenommen. In nachfolgender Abbildung 27 ist das Ergebnis der Use-Case-Analyse visualisiert.

# Mensch-Tier-Maschine Interaktion

## Use case Sammlung

### Fütterung

- Fressplätze werden durch Einzeltier angesteuert und nur bei Anrecht zugänglich
- Futterschieberoboter mit Infrarotkamera zur Überwachung Nacherwärmung TMR
- Fütterungszeiten und Restfuttermanagement: Wartezeiten am Futtertisch ohne Futteraufnahme ; Kopplung Zeitraum Melkzeit & wann ablegen in Liegebox → Terminierung Fütterung verbessern
- „Aceton Sensor“ an Futterschieberoboter oder automatischer Fütterung zur Detektion von Ketosen

### Tierverkehr/ Separation /Treiben

- Smart Cow Traffic → Kühe automatisch in Gruppe zurück sortieren
- optische Tiererkennung → amtliche Kontrollen, Tierschutzgerechtheit
- Lokalisationsfunktion des Responders zeigt Aufenthaltsort in der Gruppe auf → Notwendigkeit Separieren der Tieren entfällt

### Melken

- Schnittstelle Uhrzeit Melkung und Fresszeit der Tiere → Managementtool zur Verbesserung betrieblichen Abläufe

### Sonderarbeiten

- Klauengesundheit → CBS nimmt mittels Mikrofon Laufgeräusche im Rücklauf auf und detektiert durch unrhythmische Gangbild lahme Kühe

### Liegeboxenpflege

- Spaltenschieberoboter erhebt Füllstände der Liegeboxen und gibt Signal an Einstreueautomatik weiter
- Lokalisation des Responders gibt Auskunft darüber welche Liegeboxen belegt sind, sodass diese nicht mit eingestreut werden
- Ortungsfunktion führt Statistik über Nutzungsfrequenz von Liegeboxen und zeigt Wartungsbedarf auf

### Entmistung

- Spaltenschieberoboter erhebt Luftgütedaten und ändert Fahrintervall, bzw. erhöht verteilte Wassermenge oder setzt Milchsäure zu
- Spaltenschieberoboter kommuniziert mit Lokalisationsfunktion des Responders und schiebt Stallbereiche nach Nutzungsintensität ab, nicht nach festen Fahrmuster

### Stallklima

- automatisches Öffnen und Schließen von Curtains/ First je nach Temperatur und Luftgütedaten
- Kopplung an Wetterstation (Schließen Fürst bei Niederschlag oder Sturm)
- Ansteuerung Ventilatoren und Vernebelungsanlage anhand Luftgüte/ Lufttemperatur
- Stallgeräte stellen bei Tierbeobachtung mittels Kamera und Infrarottemperatursensor Überhitzungserscheinung fest und steuern Ventilatoren an

### Tierverhalten

- plötzliche Veränderung Verhaltensmuster → warum Stallbereiche gemieden? Schreckverhalten zu bestimmten Uhrzeiten/Prozessen? Hinweise auf mögliche Störfaktoren
- Tierbeobachtung mittels Stallgeräten (z.B. Anschieberoboter) Erkennen ranghoher und rangniedriger Tiere (Individualdistanzen und Ausweichverhalten) → Instrument bei der Zusammenstellung von Herden und Entscheidung von Belegungsdaten
- Mikrofon nimmt Störgeräusche war und gibt Warnmeldung bei Grenzwertüberschreitung

Abbildung 27: Zusammenfassendes Ergebnis der Use case- Analyse

Im Zusammenhang mit dem entwickelten Demonstrator Systems, werden die Vorteile in der Nutzung insbesondere bei Betrieben mit hohem Automatisierungsgrad in der Verfahrenstechnik gesehen. Das Potential der Vernetzung verschiedener Akteure im Stall ist als sehr groß beschreibbar.

### ■ Arbeitspaket 13: Wissenschaftliche Bewertung

Die Sensorik im Necktag® erfasst die Umweltparameter Lichtstärke (lx), rel. Luftfeuchtigkeit (%), Temperatur (°C) und Luftgüte direkt an der Kuh, da der Sensor am Halsband im Nackenbereich befestigt ist. Somit kann erstmals das Makroklima direkt am Tier gemessen werden. Zudem ist ein Ortungssystem im Necktag® integriert. Durch diese Kombination ist es möglich, Rückschlüsse auf das Aufenthaltsverhalten in Bezug auf das Stallklima der einzelnen Tiere zu ziehen. Bisherige Sensorik misst nicht das gesamte Spektrum der Umweltparameter von Tieren, sondern nur einzelne Parameter. Weiterhin sind bestehende Sensorsysteme meist nicht miteinander kombinierbar und stellen lediglich Insellösungen dar. Der Necktag® kann nach weiterer Anpassung zukünftig auch an Stalleinrichtungen, wie Lüfter, Curtains u.a. angebracht werden, so dass diese bei Erreichen definierter Schwellenwerte automatisiert und an das jeweilige Tier angepasst gesteuert werden können. Durch eine automatisierte, tierbezogene Klimasteuerung kann sowohl das Tierwohl als auch die Tiergesundheit erhöht werden, da v.a. Hitzestress frühzeitig erkannt und minimiert werden kann.

Aus denen im Projekt verfolgten Energiegewinnungsansätzen kristallisierte sich eine mögliche Kombination aus thermoelektrischen Bauelementen, welche die Körperwärme vom Tier zur Erzeugung von Energie nutzt, und einem photoelektrischen Bauelement heraus. Final setzte sich die alleinige Nutzung eines Solarpanels auf dem Necktag® durch.

Mit Projektende wurde ein Demonstratorsystem in Funktion gebracht, welches am Tier im Stall erste Funktionstests gut erfüllt hat. Bis zur Marktreife sind noch Optimierungen und Tests in relevanter Einsatzumgebung notwendig, um ein voll funktionsfähiges Sensorsystem vermarkten zu können. Bei erfolgreicher Markteinführung bringt das entwickelte IoL-System, neben der verbesserten Tierüberwachung, auch eine deutliche Verbesserung von Klima- und Emissionsmaßnahmen mit sich. Damit einhergehend kann schneller im Sinne des Tierwohls gehandelt und durch die Kommunikation zwischen Sensoren und Aktoren ein Teil der Stalleinrichtung automatisiert werden, was zu einer Entlastung des / der Landwirt:in führt.

Zukünftig besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Erweiterung des Systems auf eine Einheit zum Einsatz auf der Weide, der ergonomischen Anpassung an den Sitz des Necktag®, der weiteren Erprobung an Haltungseinrichtungen und automatisierten Maschinen.

## ■ Arbeitspaket 14: Berichtswesen und Wissenstransfer

Während der Projektlaufzeit wurde das BLE-Projekt "IoL" auf Tagungen (AgEnG, ECPLF, BTU), in Workshops, in Fortbildungen, in der Fach- und Hochschulausbildung, während Praktikerschulungen (z.B. Praxistag Milchviehhaltung des Projektes „Digi-Milch“ im Bildungszentrum Triesdorf) und auf Messen (Agra, AgriTechnika) in Form von Vorträgen, Diskussionsbeiträgen oder Postern vorgestellt. Veröffentlichungen erfolgten in den Journalen Technical Note (Function of Multisensor), Journal of Dairy Research und Computers and Electronics in Agriculture. Im Rahmen des Projektes wurde im Jahr 2023 von Viktoria Eismann eine Bachelorarbeit zum Thema "Analyse der Unterschiede zwischen Mikro- und Makroklima in Bezug auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Temperatur-Feuchtigkeits-Index in einem sächsischen Milchviehstall" und im Jahr 2024 von Frau Sabrina Wetzlaugk eine Masterarbeit zum Thema „Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf den Aufenthaltsort und das Aktivitätsverhalten laktierender Milchkühe im Stall“ angefertigt.

## 5 Projektergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes können den Forschungsbereichen „Sensorik am Tier“, „Host-Computer“, „Antennenarray“ und „Energy Harvesting“ entsprechend zugeordnet werden:

### Sensorik am Tier

Wesentliches Ergebnis des BLE-Projektes "IoL" war die Entwicklung eines Multisensors (Necktag®) zur Anbringung am Halsband der Kuh mit Sitz im Nacken oder an Maschinen und Geräten. Dieser misst die Umgebungsparameter Beleuchtungsstärke (lx), relative Luftfeuchtigkeit (%), Luftdruck (hPa), Temperatur (°C), sowie die Luftgüte direkt am Tier. Die ausgewählten Parameter sind geeignet, um Abweichungen im Verhalten und des Tierwohls vom biologischen Normalzustand zu erkennen und zu beschreiben. Um die entwickelte Sensorik zunächst auf Plausibilität hin zu untersuchen, wurden Tests am Versuchsstandort Köllitsch mit Referenzsensoren durchgeführt. Mit Hilfe der Erkenntnisse konnte anschließend die Auswertung der Messergebnisse durchgeführt und weitere technische Entwicklungen vorgenommen werden.

### Host-Computer

Der Host-Computer mit integrierter Software wurde im Stall eingerichtet und diente zur Datenaggregation, Vorverarbeitung, Lokalisation und zum Tracking der Tiere. Mittels der entwickelten anwendungs-offenen Host-Computer Software-Schnittstelle wurde der plattformunabhängige Datenaustausch und die Vernetzungsmöglichkeit zu übergeordneten Farmmanagement- und Informationssystemen (Internet, Cloud oder Hof-Netzwerk) sowie die Rückkopplung von Steuerfunktionen an die o.g. Sensorik realisiert.

### Antennenarray im Stall

Das Antennensystem zur Vernetzung der Sensoren sowie die Anbindung an den Host-Computer auf Basis von BLE\_5.1 inkl. 3D-Echtzeitlokalisierung der vernetzten Sensoren wurde zu Beginn des Projektes im Stall aufgebaut und im Laufe des Projektes optimiert, sodass über fünf Arrays eine Triangulation realisiert werden konnte. Das integrierte Ortungssystem kann auf Basis der Necktag® Echtzeitlokalisierung den Aufenthaltsort der Kuh sowie die Positionen von Akteuren, Maschinen und Einrichtungen in einer definierten XYZ-Koordinatenebene erkennen.

### Energy Harvesting

Es wurden einige Ansätze zur eigenständigen Energieversorgung des Necktag® untersucht. Jedoch waren nicht alle Methoden zum Energy Harvesting erfolgreich. Überraschend war die Energieausbeute durch den Seebeck-Effekt. Mittels eines Peltier-Elements konnte die Körperwärme der Kuh genutzt werden, um einen Stromfluss zu generieren. Gerade in der kalten und dunklen Jahreszeit kann dieser Effekt die Energiegewinnung über ein Solarmodul ergänzen und unterstützen. Um die Körperwärme optimal nutzen zu können, wurde zudem das bestehende Gehäuse so umgearbeitet, dass ein direkter Kontakt

des Peltier-Elements mit der Kuh ermöglicht wurde. Weiterhin kam ein entsprechend ausbalanciertes Solarmodul zum Einsatz.

Die Energiegewinnung durch ein Piezo-Element war zwar interessant, musste aber auf Grund der potentiell zu geringen Energieausbeute ausgeschlossen werden. Auch das Radiofrequenz-Harvesting (RFEH) wurde in Betracht gezogen, allerdings stand hier der Kosten-Nutzen-Faktor in keinem Verhältnis zueinander.

## Literaturverzeichnis

DEUTSCHER WETTERDIENST (HG.) (2014): WIE STELLE ICH MEIN BAROMETER RICHTIG EIN? ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.DWD.DE/DE/WETTER/THEMA\\_DES\\_TAGES/2014/11/21.HTML](https://www.dwd.de/DE/WETTER/THEMA_DES_TAGES/2014/11/21.HTML), ZULETZT GEPRÜFT AM 24.10.2023.

DLG-MERKBLATT 466: 2021

DIGITALE ANWENDUNGEN FÜR DAS HERDENMANAGEMENT IN DER -MILCHVIEHHALTUNG<sup>3</sup>

MOHR, U. (2013): MILCHVIEHSTALL 4.0. AKTUELLER STAND, ZUKÜNFTIGE MÖGLICHKEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN. BRENNPUNKT WIEDERKÄUER. HAFL. ZOLLIKOFEN, 13.04.2031.

STACHOWICZ, J.; UMSTÄTTER, C. (2020): A RE-EVALUATION OF THE IMPACT OF TEMPERATURE HUMIDITY INDEX (THI) AND ÜBERSICHT ÜBER KOMMERZIELL VERFÜGBARE DIGITALE SYSTEME IN DER NUTZTIERHALTUNG. HG. V. SCHWEIZER EIDGENOSSENSCHAFT (294).

ZAHNER, J. (2018): HITZESTRESS IM MILCHVIEHSTALL – AUSWIRKUNGEN AUF DIE KUH. HG. V. BAYRISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT. INSTITUT FÜR LANDTECHNIK UND TIERHALTUNG.

ZIMBELMANN. (2009): A REEVALUATION OF THE IMPACT OF TEMPERATURE HUMIDITY INDEX (THI) AND BLACK GLOBE HUMIDITY INDEX (BGHI) ON MILK PRODUCTION IN HIGH PRODUCING DAIRY COWS

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-0; Telefax: + 49 351 2612-1099  
E-Mail: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de  
www.lfulg.sachsen.de

**Autor:**

Doreen Nitsche  
Abteilung7 /Referat 74  
Am Park 3, 04886 Köllitsch  
Telefon: + 49 34222 462104  
E-Mail: doreen.nitsche@smekul.sachsen.de

**Redaktion:**

Doreen Nitsche  
Abteilung7 /Referat 74  
Am Park 3, 04886 Köllitsch  
Telefon: + 49 34222 462104  
E-Mail: doreen.nitsche@smekul.sachsen

**Bildnachweis**

Doreen.Nitsche

**Redaktionsschluss:**

28.02.2025

**Bestellservice**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

**Hinweis**

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

*Täglich für ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de