

Fernkontrolle von Rindern in der Schweiz mittels einer Sensorohrmarke

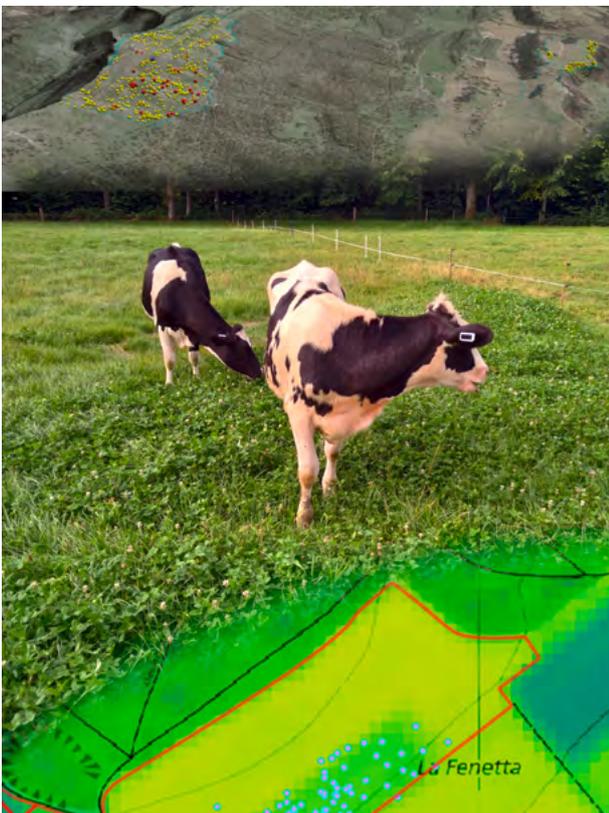
Kosuke Ueda¹, Ulla Heikkilä¹, Thibault Kuntzer¹, Nicolle Gobbo Oliveira Erünlü², Joël Bérard², Olga Wellnitz², Christian Beglinger¹ und Stefan Rieder¹

¹Identitas AG, 3014 Bern, Schweiz

²Agroscope, 1725 Posieux, Schweiz

Auskünfte: Stefan Rieder, E-Mail: stefan.rieder@identitas.ch

<https://doi.org/10.34776/afs14-104> Publikationsdatum: 21. Juni 2023



Rinder, Sensorohrmarken und geographische Auswertungen.
(Foto: Identitas AG)

Zusammenfassung

Die Fernkontrolle von Tieren mit Hilfe digitaler Instrumente gewinnt zunehmend an Bedeutung. Das liegt u.a. an den sich wandelnden Produktionssystemen und strukturellen Entwicklungen in der Landwirtschaft wie grössere Betriebe, Diversifizierung, Fachkräftemangel, Produktionskosten. Monitoring-Systeme versprechen den Tierhaltenden Unterstützung bei

der Überwachung von Tieren aus Distanz und bieten eine Grundlage für die Automatisierung von Meldepflichten. In der vorliegenden Studie wurde eine Sensorohrmarke (SOM) zur Fernkontrolle von Rindern unter Schweizer Tierhaltungsbedingungen eingesetzt und evaluiert. Eine SOM scheint für die Fernkontrolle besonders attraktiv, weil sie mutmasslich die obligatorische Kennzeichnung von Klautieren mit zusätzlichen Daten von Individuen und Herden zu vereinen vermag. Die Fixierung der SOM am Tierohr und damit die Verbindung von Tierkennzeichnung und Datenerhebung bedarf noch weiterer Entwicklung. Mit Erfolg kam die SOM fixiert an einem Halsriemen zur Datenerfassung mittels dreier unabhängiger Datenkanäle (Satellitenkommunikation, Bluetooth, Radio-Frequenz Identifikation) zum Einsatz. Daraus liessen sich Informationen zum Aufenthaltsort der Tiere, zu Tierbewegungen, zum Verhalten von Tieren und zur Landnutzung ableiten. Mehrheitlich bewährte sich die automatisierte Dokumentation, in einzelnen Fällen blieben Herausforderungen bestehen. Bei Stallhaltung wurden kaum Datenpakete über Satellitenkommunikation empfangen. Der Datenstrom über Bluetooth wurde jedoch durchgehend aufrechterhalten. Radio-Frequenz Identifikation erwies sich als eine sichere, wenn auch statische Datenquelle, die stark von der Platzierung der Antennen abhängt. Während der Sömmerung wurde der Datenfluss ausschliesslich über Satellitenkommunikation gewährleistet, ohne dass eine zusätzliche Infrastruktur erforderlich war. Letzteres macht die SOM besonders attraktiv für die Fernkontrolle von Nutztieren in weidebasierten Produktionssystemen.

Key words: sensor ear tag, remote sensing, remote monitoring, animal husbandry, digitization, automation, phenotyping.

Einleitung

Tiefgreifende Treiber in der landwirtschaftlichen Entwicklung, wie Produktionskosten, der Wandel hin zu grösseren Betrieben, grösseren Herden, Fachkräftemangel, Diversifizierung, Tiere ohne Aufsicht, u.v.m., fördern die Nachfrage und den Bedarf nach Technologien zur Standort- und Zeit-unabhängigen Fernkontrolle sowie der Früherkennung von Ereignissen («Remote Sensing» und «Remote Monitoring») – (Neethirajan & Kemp, 2021; Aleluia *et al.*, 2022). In ihrem äusseren Umfeld ist die tierische Landwirtschaft von vielen Seiten unter Druck, sei dies aufgrund ihrer Klimawirkung und der für die Tierhaltung benötigten Ressourcen (BAFU, 2023), aus Gründen des Tierschutzes und der Tiergesundheit (BLV, 2023a), oder durch neue gesellschaftliche Trends wie verändertes Ernährungsverhalten (Poor & Nemecek, 2018; Willett *et al.*, 2019) und einem sich grundsätzlich wandelnden Blick auf das Tier (Fostier, 2019). In all den Bereichen kommen der Dokumentation und Nachverfolgung erhöhte Bedeutung zu (Stachowicz & Umstätter, 2020, 2021). Entsprechend gewinnt der Bedarf an Monitoring-Lösungen im Stall wie auch auf der Weide an Bedeutung (Trotter *et al.*, 2018). Auch in der Schweiz bieten sich Chancen für den Einsatz von Remote Sensing und Monitoring, nicht zuletzt im alpwirtschaftlichen Bereich (Mettler *et al.*, 2022). Remote Sensing besitzt das Potenzial zur Unterstützung von Prozessen, zur Überwachung des Tierwohls sowie zur Automatisierung von administrativen Pflichten in der Tierhaltung.

Konzepte wie «Precision Livestock Farming» (PLF) – (Berckmans, 2017), «Precision Livestock Management» (PLM) – (Williams *et al.*, 2021) oder «Smart Farming» (Walter *et al.*, 2017) bieten teilweise Antworten auf die genannten Bedürfnisse. Nichtsdestotrotz ist die Automatisierung in der Tierhaltung bisher nicht in dem Masse fortgeschritten, wie sich dies vermuten liesse. Neben technischen Hürden wie zu geringer Produktreife, mangelnder Validierung (Groher *et al.*, 2020; Stygar *et al.*, 2021; Gómez *et al.*, 2021), dem Betrieb und Unterhalt der je nach Kommunikationstechnologie nötigen Infrastruktur, verfehlen die Instrumente und die damit erzeugte Information oft die Bedürfnisse der Endnutzer (Masters, 2021; Reissig *et al.*, 2022), oder sind auf einen zu engen Anwendungsbereich optimiert. So sind PLF-Lösungen im Tiermonitoring oft auf intensive «Indoor»-Systeme fokussiert. Im Gegensatz zu einem «Indoor»-System (Stallumfeld) ist unter extensiven «Outdoor»-Verhältnissen die Energieversorgung und eine funktionierende Datenverbindung mithilfe stationärer Infrastruktur jedoch nicht gesichert. Reine «Outdoor»-Lösungen wie-

derum werden ebenfalls oft den Anforderungen eines diversifizierten Tierhaltungsumfelds nicht gerecht, wie es für die Schweiz kennzeichnend ist. Um eine breite, angepasste Verwendbarkeit zu erreichen, und damit die Fragmentierung der Anwendungen zu verringern, sowie um den Mehrwert für die Endnutzer zu erhöhen, sollten diese deshalb enger in die Entwicklung von PLF-Instrumenten und Prozessen eingebunden werden (so genannte «co-creation») – (Wolfert *et al.*, 2023).

Das Monitoring von Tieren aus Distanz ist nicht neu: beispielsweise Kamerafallen oder das Besendern von Tieren in der Wildtierforschung. Kommunikationskanäle wie Mobiltelefonie, Bluetooth, LoRaWAN, oder Satellitenkommunikation (SK) bieten, mit der zunehmenden Miniaturisierung benötigter Technik, jedoch ganz neue Möglichkeiten, was die kontinuierliche Übertragung von Daten anbelangt. Dabei ist insbesondere die Kommunikation per SK in der Regel auch dann möglich, wenn keine Infrastruktur und kein Telefonnetz verfügbar sind. Allerdings benötigt auch ein SK-fähiges Gerät genügend Energie. Damit sind die beiden Hauptanforderungen des kontinuierlichen Tiermonitorings erwähnt: die Energieversorgung, sowie der Datenfluss in ein Netzwerk, über welches die gewonnenen Daten weiterverarbeitet und zu Information prozessiert werden können.

Die verfügbare Sensorik kann neben der eigentlichen Lokalisierung der Tiere – Grundlage für Anwendungen wie diejenige der virtuellen Zäune (Aquilani *et al.*, 2022) – ebenso interessante Bewegungsdaten zur Bestimmung des Tierverhaltens, des Aktivitätsrhythmus oder gar des Gesundheitsstatus (z.B. Stehen, Liegen, Fressen, Geburt, Brunst, Flucht, Lahmheit, etc.) bereitstellen (Stachowicz & Umstätter, 2021; Arablouei *et al.*, 2021). Zusätzlich warten Vitalparameter wie Herzfrequenz, Herzfrequenzvariabilität, Blutdruck, Körpertemperatur, erfasst mittels optischer Verfahren (Photoplethysmographie), auf ihre Einführung in die Tierhaltungspraxis (Nie *et al.*, 2020). Von den verfügbaren Anbringungsarten der Remote Monitoring Basisgeräte am Tier scheint eine Fixierung am Ohr besonders attraktiv, weil sie mutmasslich die obligatorische Kennzeichnung von Klautieren (BLV, 2023b) mit zusätzlichen Daten von Individuen und Herden zu vereinen vermag.

Die Eignung einer Sensorohrmarke (SOM) für Rinder unter Schweizer Tierhaltungsbedingungen wurde anhand eines ausgewählten Modells evaluiert, welches auf langjährigen Forschungsarbeiten der australischen Forschungsanstalt CSIRO (CSIRO, 2023; Arablouei *et al.*, 2023) basiert. Die Untersuchungen knüpften dabei an

Strategien und Politikbereiche der Digitalisierung der Land- und Ernährungswirtschaft an (BLW, 2023a). Der Fokus lag in der Einstufung des Potenzials der SOM im Hinblick auf eine Automatisierung von Aufzeichnungs- und Meldepflichten gemäss Direktzahlungsverordnung (DZV) – (BLW, 2023b) sowie deren genereller Eignung für das Tiermonitoring. Während ein Teilbereich der Eignung in der Verträglichkeit der SOM bestand, an Rindern unterschiedlicher Altersklassen geprüft und separat berichtet wurde (Gobbo Oliveira Erünlü *et al.*, 2023), fasst die vorliegende Studie die Evaluation der Energieversorgung, der Datenübertragung, -qualität und -auswertung zusammen.

Material und Methoden

Tiere

Während der Projektdauer vom Juni 2021 bis Dezember 2022 kamen insgesamt 38 weibliche Holsteinrinder des Versuchsbetriebs von Agroscope Posieux in drei unterschiedlichen Altersgruppen zum Einsatz: neugeborene Kälber (n=12; KB), Jungtiere 7 bis 11 Monate (n=14; JT), trächtige Tiere 18 bis 30 Monate (n=12; TT) – (Tierversuchsgenehmigung 33542; 2021-12-FR-VD).

Sensorohrmarken

Die verwendete SOM hat eine Dimension von 62×35,4×13,5mm und wiegt 32g. Seit dem Dezember 2022 ist die SOM, von der ICAR in Konformität mit dem ISO-Standard 11784/ 11785 zertifiziert (ICAR, 2022). Die SOM verfügt über drei Kommunikationskanäle, Satelli-

ten (SK), Bluetooth (Bluetooth Low Energy – BLE) und Radio-Frequenz Identifikation (RFID), ausserdem über ein Akzelerometer, ein Thermometer, ein Solarpanel sowie einen Prozessor für die Datenverarbeitung («edge computing»). Es kamen 58 SOM zum Einsatz. Im Zuge der Verträglichkeitsprüfung wurde die Datenerhebung in zwei Phasen unterteilt. Eine Phase 1 mit der SOM fixiert am Ohr; eine Phase 2 mit der SOM fixiert an einem Halsriemen (Abb. 1). Die Vergleichbarkeit von auf der SOM prozessierten Metriken je nach Fixation wurde überprüft.

Datenaufbereitung

Die Datengewinnung aus den drei separaten Kanälen SK, BLE und RFID erfolgte am Agroscope Standort Posieux sowie auf zwei Alpen im Neuenburger-Jura, La Frétaz und Le Chasseron.

Die IT-Infrastruktur der Identitas AG diente der Zusammenführung, der Speicherung und Auswertung von Daten aus den drei Kommunikationskanälen.

Neben absoluten GPS-Positionsberichten per SK, lassen BLE- und RFID-Interaktionen relative Lokalisierungen zu. Die RFID-basierte Lokalisierung wird von der nächstgelegenen Antennenposition abgeleitet. Die Antennenpositionen sind fix und bekannt. Zudem wurde ermittelt, ob sich SOM im Einzugsbereich der BLE-Antennen befanden, womit Rückschlüsse über deren Aufenthalt gewonnen werden konnten.

Basierend auf diesen Daten kamen Algorithmen zur Anwendung, um die Anwesenheit von Tieren und damit der Herde in einer bestimmten geografischen Zone und

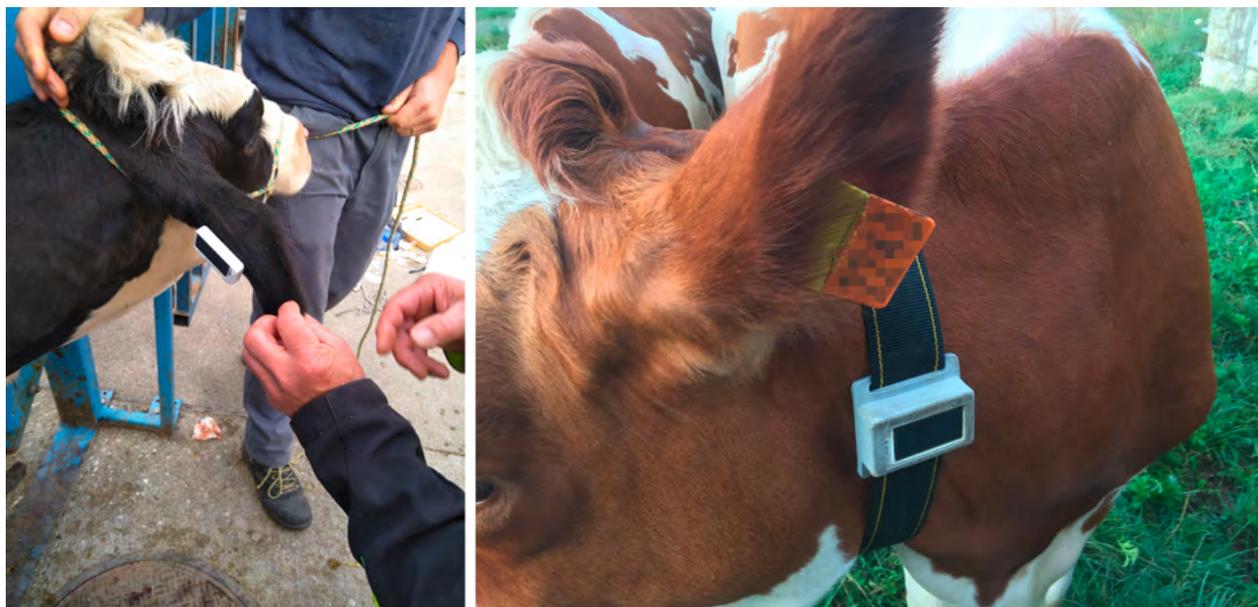


Abb. 1 | Fixierung der SOM während der Versuchsphasen 1 und 2.

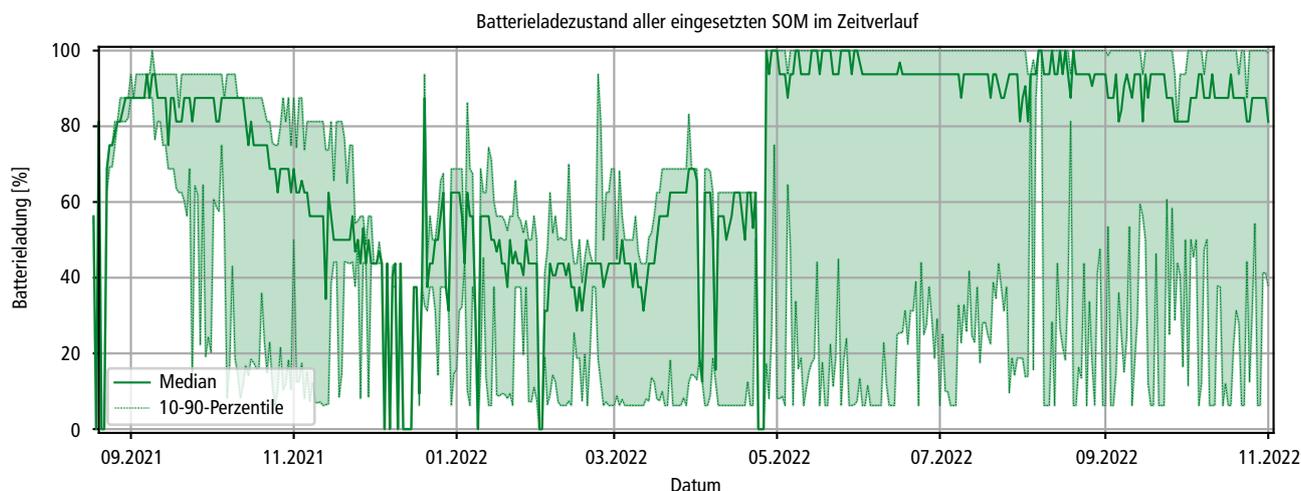


Abb. 2 | Verlauf des Batterieladestatus der SOM über die Versuchsperiode. Ein Unterbruch im August 2022 hängt mit der Umstellung der SOM auf die Halsriemenfixierung zusammen und gibt keinen realen Energiemangel wieder.

in einem bestimmten Zeitfenster zu ermitteln, beispielsweise für ein Auslaufjournal.

Für den Versuchsstandort Posieux standen Wetterdaten der Station Düringen von Agrometeo¹ automatisiert zur Verfügung. Daraus liessen sich die Gesamtsonneneinstrahlung sowie die Temperaturzeitreihen ermitteln und mit dem Batterieladestatus und den Temperaturdaten der SOM in Beziehung setzen. Nach Bedarf wurden Erdbeobachtungen des Sentinel-2-Satelliten des Copernicus-Programms² herangezogen (z.B. zur Weidenutzungsanalyse, Vegetationsaktivität NDVI³). Die Sentinel-2-Daten wurden vom entsprechenden Data Hub⁴ bezogen. Zusätzlich standen Informationen zu Bodenindikatoren über eine Wetterdatenschnittstelle zur Verfügung⁵.

Resultate

Die gesammelten Daten und Erfahrungen erlauben eine robuste Einschätzung der SOM im Hinblick auf Datenqualität, Einsatzspektrum und Technologie.

Die Energieversorgung via Photovoltaik (PV) ist im Winterhalbjahr, bzw. bei längerer Stallhaltung beeinträchtigt. Die SK ist in und im Umfeld von Gebäuden wegen Abschirmungseffekten limitiert. Jedoch konnten auch im Winterhalbjahr BLE-Signale bei ausschliesslicher Stallhaltung empfangen werden. RFID erwies sich als durchgehend verfügbarer Kanal. Als kritisch zeigte sich die

Anfangszeit, am Übergang einer langen Stallphase zu Weidegang, wo die Erfassung von BLE und RFID im Innenbereich auf SK im Aussenbereich wechselte. Während der Sömmerung war die Stromversorgung immer gewährleistet (Abb. 2). Der Vergleich der Fixierung am Ohr gegenüber derjenigen am Halsriemen bestätigte zudem, dass die Energieversorgung auch nach dem Wechsel im August 2022, weiterhin gewährleistet war. Die Informationsausbeute variierte je nach Kanal und Umgebungsbedingungen. Die Signaldichte über SK setzt voraus, dass ein kritischer Batterieladestand nicht unterschritten wird, reicht jedoch auch unter optimalen Lade- und Lichtbedingungen selten an die volle mögliche Rate heran. Mögliche Gründe sind Einflüsse von Topografie, Gebäuden, Bäumen aber auch die Anzahl der verfügbaren Satelliten (Mittlere Anzahl Datenpakete pro SOM und Tag über SK: KB Phase 1, Minimum 0, Maximum 0,68, Gesamtmittelwert 0,22; KB Phase 2, Minimum 1,4, Maximum 3,94, Gesamtmittelwert 2,25; JT und TT Phase 1, Minimum 0,73, Maximum 4,55, Gesamtmittelwert 2,15). Insgesamt ist die Positionsermittlung auf Stufe Herde durchgehend sehr erfolgreich. Auf Stufe Einzeltier wird jedoch nicht jeder Tag durch ein SK-Signal abgedeckt.

Die Untersuchung der RFID-Signale ergab, dass zwar zu meist kurze Zeitspannen (Median ca. 0,5h) zwischen einer Messung an der Antenne im Aussenbereich und der vorherigen Antenne lagen, jedoch die strikte Sequenz zwischen den Antennen im Stallinnern, im Türrahmen und im Aussenbereich nicht komplett sichergestellt war. Es wurden nicht immer alle Tiere beim Passieren der Antennen erfasst. Dessen unbeachtet ergab die Datenausbeute ein gutes Bild auf Stufe Herde.

¹ <https://agrometeo.ch/>

² <https://www.copernicus.eu>

³ https://de.wikipedia.org/wiki/Normalized_Difference_Vegetation_Index

⁴ <https://scihub.copernicus.eu/>

⁵ <https://www.meteomatics.com/en/api/available-parameters/derived-weather-and-convenience-parameters/soil-parameters/#smd>

Auslaufjournal 2022		Betriebs-Nr.	Name							
		Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November		
Tierkategorie										
1			W	W	X	W	W	W	1	
2	L		W	W	L	W	W	W	2	
3	L		W	W	W	W	W	W	3	
4	L		W	W		W	W	W	4	
5	L		W	W		W	W	W	5	
6	L		W	W		W	W	W	6	
7	L		W	W		W	W	W	7	
8	L		W	W		W	W	W	8	
9	L		W	W		W	W	W	9	
10	L		W	W		W	W	W	10	
11	L		W	W		W	W	W	11	
12	L		W	W		W	W	W	12	
13	L		W	W		W	W	W	13	
14			W	W		W	W	W	14	
15			W	W		W	W	W	15	
16			W	W		W	W	W	16	
17	W		W	W		W	W	W	17	
18	L		W	W		W	W	W	18	
19	L		W	W		W	W	W	19	
20	L		W	W		W	W	W	20	
21	L		W	W		W	W	W	21	
22	L		W	W		W	W	W	22	
23	W		L	W		W	W	W	23	
24	L		L	W	W	W	W	W	24	
25	W		L	W	W	W	W	W	25	
26	L		L	X	W	W	W	W	26	
27	W		L	W	W	W	W	W	27	
28	W		L	W	W		W	W	28	
29	W		W	W	W		W	W	29	
30	W		W	W	W	W	W	W	30	
31	W			X	W		W		31	
Total Tage	W	8 26	24 26	29 26	26	28 24	31 26	30	W	
Total Tage	L	19	6					13	L	

Abb. 3 | Automatisiertes Auslauf- und Weidejournal für die KB in Posieux. Die Darstellung erfolgte in Anlehnung an das manuell zu befüllende Formular gemäss DZV.

Aus den Daten wurde ein Auslauf- und Weidejournal (Abb. 3) anhand der KB über beide Versuchsphasen und für den Zeitraum erstellt, in welchem alle Datenströme parallel operativ waren: Mai bis August 2022 für die Ohr-Fixierung, September bis Dezember 2022 für die Halsriemen-Fixierung. Die Ergebnisse wurden mit den offiziellen Aufzeichnungen des landwirtschaftlichen Betriebs von Agroscope in Posieux verglichen.

Unter den meisten Bedingungen stimmen automatisches Journal und handschriftlich nachgeführte Referenz überein. Leere Zellen bedeuten Stallhaltung. In Rot hinterlegt in Abbildung 3 sind Fälle, die vom Journal des Versuchsbetriebs abweichen. Tiefe Batterieladestände und damit keine Kommunikation per SK sowie Beweidung in unmittelbarer Nähe des Stallgebäudes und somit im Einzugsgebiet von BLE, führten zum Eintrag Laufhof (L), richtig wäre Weidegang (W). Diese «Fehleinträge» lassen sich durch zusätzliche BLE-Kalibrationspunkte auf eben diesen Weiden vermeiden. In Orange hinterlegt ist der Messunterbruch im Sommer zwischen dem Zeitpunkt der Entfernung der SOM und der Ausrüstung der Tiere mit SOM an Halsriemen. In Blau finden sich zwei Tage mit Weidedispens wegen Starkniederschlags. An drei Tagen (x) konnte der Auslauf wegen unsicherer

Datenlage nicht bewertet werden. Zuerst die Zusammenfassung der Weide- und Laufhoftage; rechts kursiv die Vorgabe nach DZV für den jeweiligen Monat. Die Fehlerrate beträgt 6,7–8,2 % (13–16 Mängel auf 194 gemessene Tage).

Zusätzlich zu KB in Posieux standen SK-Daten von JT und TT für die Sömmerungsperiode 2022 auf den Alpen Le Chasseron und La Frêtaz zur Auswertung zur Verfügung (Abb. 4).

Die Punktwolke links in Abbildung 4 zeigt Le Chasseron, rechts La Frêtaz. Die Punkte in Gelb entsprechen Positionsdaten. Die roten Punkte stellen Alarme erhöhter Aktivität dar, die blauen Punkte Alarme ausgelöst durch Inaktivität. Der Zeitverlauf der Positionsdaten diente der Berechnung der Bestossung⁶ als weiterem Element mit Automatisierungspotenzial. So wurden auf Le Chasseron zwischen Mai und August 594, und auf La Frêtaz 762 Sömmerungstage ermittelt was, gegeben die gesömmerten Tierkategorien, 2,38, respektive 3,05 Normalstöße ergab⁷.

⁶ <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/instrumente/direktzahlungen/kulturlandschaftsbeitraege/soemmerungsbeitrag.html>

⁷ Berechnung erfolgte für «andere Tiere der Rindergattung über 365 bis 730 Tage alt, weiblich (POSCODE 1128)» gemäss folgender Berechnungshilfe → https://www.sz.ch/public/upload/assets/26032/Berechnung_Normalstoesse_ab_2014.xlsx

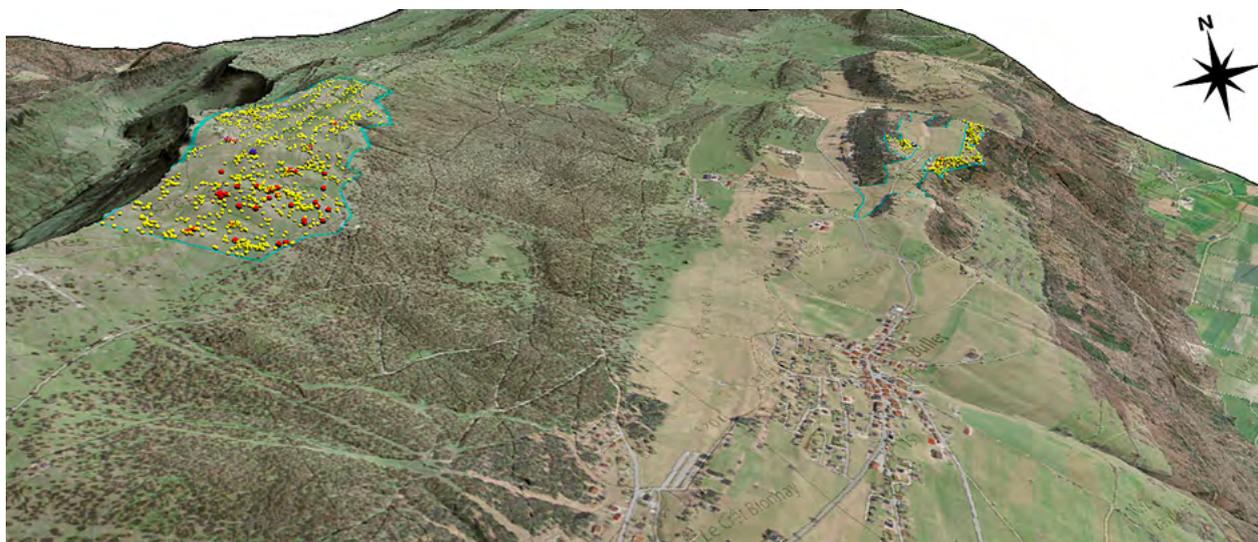


Abb. 4 | Integrierte Geodaten-Visualisierung der Sömmierungsgebiete mit Positionsdaten. (Kartengrundlage ©swisstopo)

Die Auswirkung der SOM-Fixierung auf die Verhaltensmetriken, Alarme und Aktivitätsklassifizierung, konnten aus Messdaten über beide Fixierungstypen (Ohr versus Halsriemen) an der gleichen Tiergruppe der KB in Posieux, im selben Haltungsumfeld überprüft werden. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Gerätealgorithmen auf die Ohr-Fixierung trainiert und optimiert sind, eine polyvalente Wiederverwertung der SOM mit gewissen Einschränkungen aber möglich ist.

In Abbildung 5 links finden sich die Ergebnisse für die KB in Posieux. Am Halsriemen wurden keine Werte der Stufe 0, und merklich weniger hohe Werte beobachtet. Rechts finden sich Ergebnisse von Einzel-SOM, welche erst am Ohr und dann am Halsriemen zum Einsatz kamen. Die Wertehäufigkeiten unterscheiden sich auch auf den einzelnen SOM nach Art der Fixierung, und bestätigen damit das Gruppenergebnis.

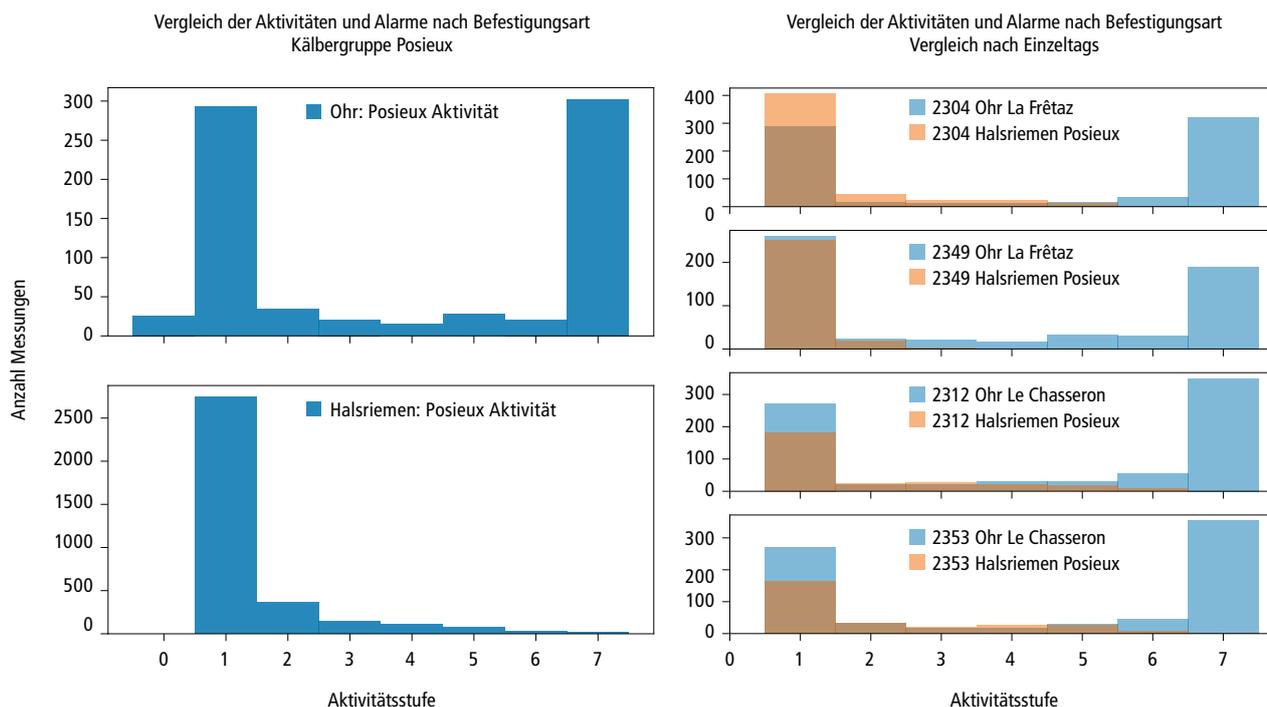


Abb. 5 | Effekt der Ohr- und Halsriemenfixierung auf die Aktivitäts-Auswertungsfunktion der SOM.

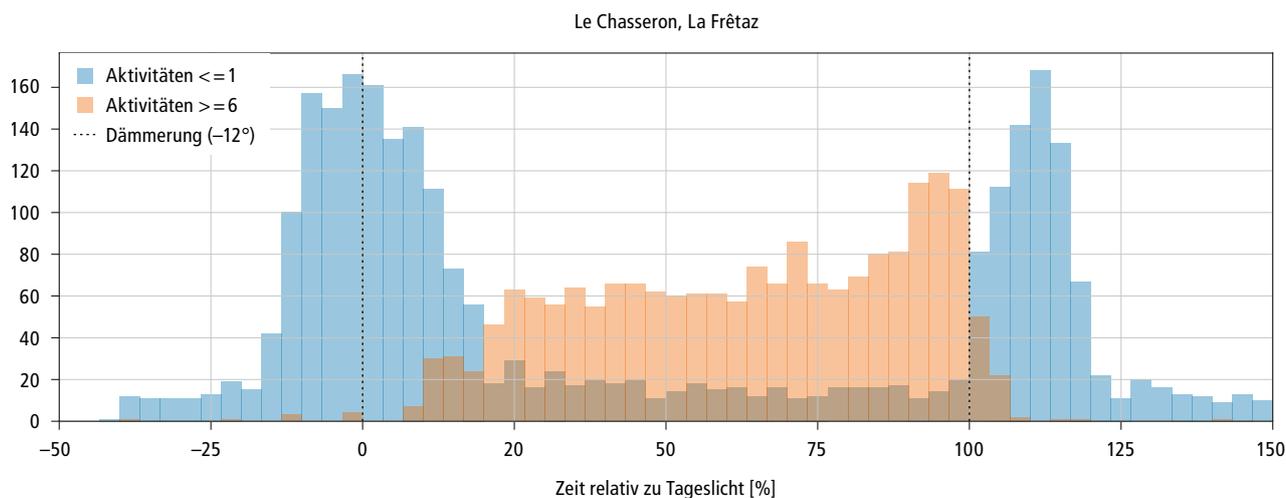


Abb. 6 | Verteilung über 24h der tiefsten und höchsten Aktivitätsklassifizierungsdaten während der Sömmerung der JT und TT.

In Abbildung 6 ist die zeitliche Verteilung der höchsten und niedrigsten Tieraktivitäten über den Tag dargestellt. Die Ermittlung der Tageszeit ist relativ zur Dämmerung (Linien bei 0 und 100 %, Mittag 50 %). Niedrige Aktivität tritt gehäuft um die Dämmerungen herum auf, während Phasen hoher Aktivität über die Zeit mit Tageslicht verteilt sind, und zum Nachmittag hin zunehmen. Die Ermittlung des lokalen Sonnenstands erfolgte für den jeweiligen Standort und das zugehörige Datum. Mittels der Positionsdaten der SOM wurde ein «örtliches Kontaktnetzwerk» mit sieben KB erstellt (Abb. 7). Mit den im Versuch eingesetzten SOM erfolgt nur alle vier

bis sechs Stunden ein Datenpaketversand über SK. Als Kontakt galt deshalb der Aufenthalt von zwei Tieren (zweier SOM) innerhalb eines Rayons von ≤ 5 Metern, innerhalb einer Stunde. Diese Regel liess sich auch variieren (Zeit: 1 Stunde bis 24 Stunden, räumlicher Abstand von 1 Meter bis 10 Metern). Die bisher plausibelsten Resultate, ergab das Verhältnis von 1 Stunde und 5 Metern. Bei gegebener Datenpaketfrequenz pro Tag stellt dieser Parameter ein seltenes Ereignis dar. Damit bildet das auf diese Weise erzeugte «örtliche Kontaktnetzwerk» Interaktionen, resp. Örtliche Ereignisse, ab, die wiederholt in der Tiergruppe vorkommen. Welche Aussage dies zur Gruppenstruktur, Hierarchie und den Beziehungen zwischen den Tieren zulässt ist noch nicht abschliessend geklärt. Die Validierung und der Datenvergleich mit einer Vollerhebung von Tierpositionen sind in Arbeit.

Die Nummern in den farbigen Kreisen bezeichnen die SOM (ein Tier). Die Dicke der Linien in Abbildung 7 stellt die Häufigkeit eines «Kontaktereignisses» zwischen zwei Tieren dar. Das Netzwerk basiert auf total 236 Kontaktereignissen, bei insgesamt 1747 Datenpaketen über SK, erhalten während 80 Tagen zwischen August und November 2022. Durchschnittlich lieferten die SOM in diesem Zeitraum 250 Datenpakete, im Minimum 215, im Maximum 371.

Die Verknüpfung von Positionsdaten mit Geo- und meteorologischen Daten, Satellitenbildern, etc. ist nicht ausgeschöpft. Die verfügbare Information zum Herdenmonitoring erlaubte es ansatzweise die Bewirtschaftung von Weideflächen darzustellen und mit der Vegetationsentwicklung zu überlagern. In Abbildung 8 findet sich als Beispiel der Verlauf des Bodenfeuchtedefizits («Soil Moisture Deficit» SMD) sowie der «Normalized Difference Vegetation Index» (NDVI) für Standorte in Posieux, auf Le Chasseron und La Frêtaz.

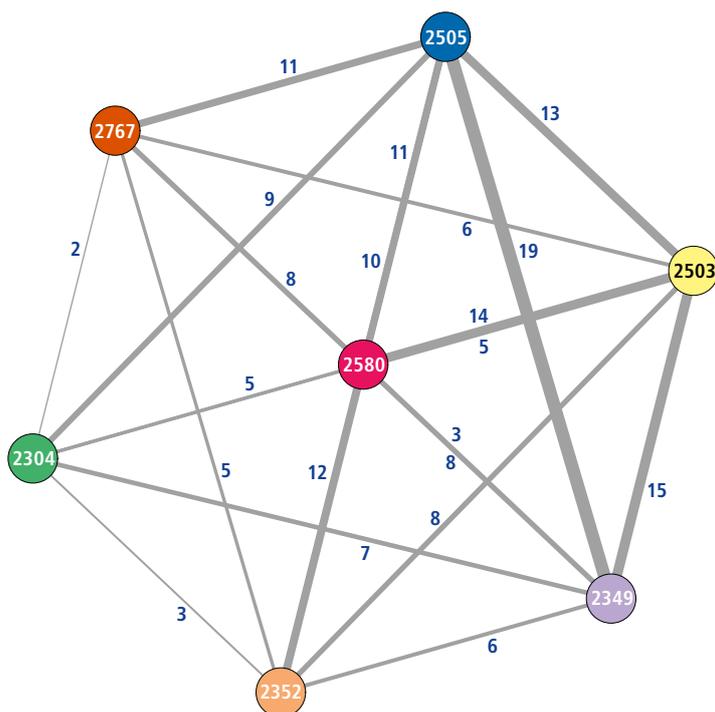


Abb. 7 | «Örtliches Kontaktnetz» zwischen sieben KB.

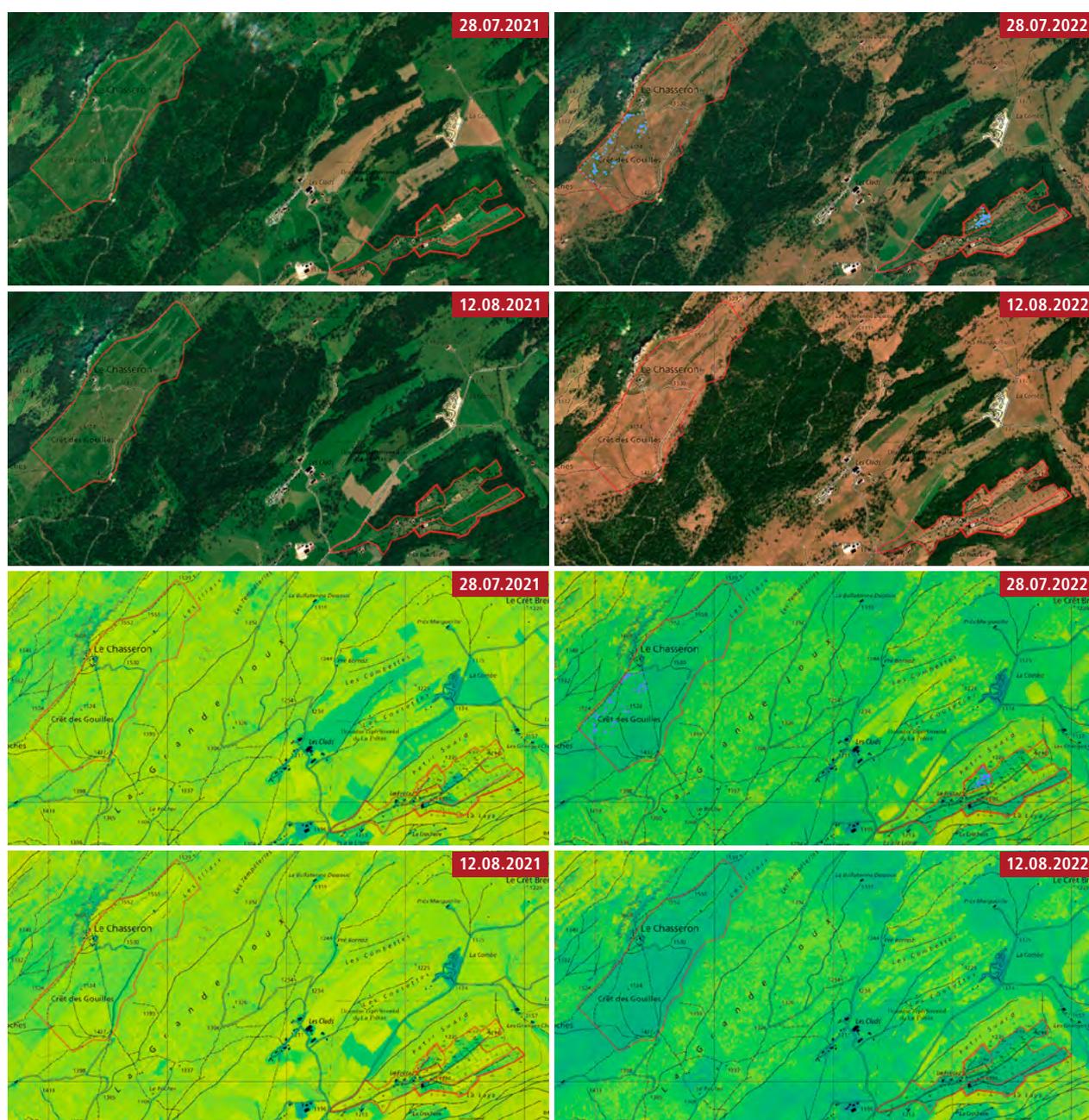


Abb. 8 | SMD-Jahresvergleich für Standorte in Posieux, Le Chasseron und La Frétaz (hoch = trocken). NDVI (gelb = photosynthetisch aktiv; grün-blau = inaktiv) für Le Chasseron und La Frétaz im Sommer 2021 und 2022.

Diskussion

Die an Rindern evaluierten Einzeltechnologien sind in unserem Alltag weitverbreitet und bewährt. Satellitenkommunikation nutzen viele Sportler im Gelände und Autofahrer, welche eine Adresse ins «Navi» eintippen. Mit Bluetooth kommunizierende Geräte gibt es in fast jedem Haushalt. Das eigene Laptop oder Smartphone lässt sich damit beispielsweise mit einem Kopfhörer und Mikrofon verbinden, oder auch mit einem Lautsprecher für den Heimmusikkonsum. RFID-Kommunikation kennen alle, die z.B. im Skiurlaub mit ihrem Ticket Zutritt via Drehschranke zu einer Bahn erlangen, ihren Hund chippen und registrieren, oder auch die Postpaketsendung per «Track and Trace» verfolgen.

Was sich also völlig alltagstauglich, gewöhnlich und wenig spektakulär anhört, wird deutlich anspruchsvoller, wenn dieselben Technologien einzeln, oder wie im vorliegenden Fall kombiniert, an Tieren zur Anwendung gelangen. Damit schliesst sich der Bogen zur Problemstellung. Die Herausforderungen der Technik am Tier im Vergleich zum Einsatz im Humanbereich betreffen primär folgende Punkte:

- die Fixierung und Verträglichkeit am Tier,
- die Robustheit des Geräts,
- die Energieversorgung,
- die Kommunikation und Übermittlung der Daten,
- der Mehrwert der Technologie,
- die Akzeptanz der Tierhalter.

Die Fixierung der SOM am Tierrohr und damit die Verbindung von Tierkennzeichnung und Datenerhebung bedarf noch weiterer Entwicklung. (Gobbo Oliveira Erünlü *et al.*, 2023). Alternative Fixierungsmöglichkeiten der gleichen Technologie bleiben zu prüfen. Die Fixierung am Halsriemen zeigte keine Einschränkungen hinsichtlich der Energieversorgung und der positionsbezogenen Daten. Die Verhaltens-Metriken wiesen am Halsriemen systematisch tiefere Werte aus, blieben jedoch nutzbar. Die Einstufung der Robustheit der eingesetzten SOM ergibt ein ambivalentes Bild. Rund ein Drittel der evaluierten SOM fiel im Versuchsverlauf aus verschiedenen Gründen aus. Der Hersteller ist mittlerweile ISO-zertifiziert und die SOM durch die ICAR getestet und für Grundqualitäten validiert. Eine stetige Weiterentwicklung ist angezeigt, um das Produkt über Jahre im Tierhaltungsumfeld operativ zu behalten.

Die Analysen rund um das Thema Energieversorgung zeigten, dass ambienter Lichteinfall im Stallumfeld auch unter Schweizer Bedingungen ausreichte, um BLE-Kom-

munikation über ausgedehnte Zeiträume zu gewährleisten. Dies bleibt vor einer breiten Anwendung über die Bedingungen in verschiedenen Stallbauten zu überprüfen. Generell erwiesen sich BLE- und RFID-Kommunikation als geeignete Technologien im Stallumfeld, gegenüber dem infrastrukturlosen SK im Freien. Die Nutzung von PV scheint trotz Einschränkungen ein vielversprechender Weg zu sein, der die nötige Energieautonomie gewähren kann, der im Tierbereich so zwingend notwendig ist. Ein etwaiger Einfluss auf die Energieversorgung durch Verschmutzung der Solarpanels, hat sich während des Versuchs nicht verdeutlicht.

Eine SOM mit drei verbauten Kommunikationskanälen hat sich gegenüber der Nutzung einer Einzeltechnologie bewährt. Die Kombination von Kommunikationskanälen ist am besten geeignet die diversen Herausforderungen in der Tierhaltungsumwelt zu adressieren und einen kontinuierlichen Datenfluss zu gewährleisten. Dabei überzeugte allen voran SK durch seine Unabhängigkeit von jeglicher zusätzlichen Infrastruktur. Dies dürfte auch ein entscheidendes Kriterium hinsichtlich Akzeptanz in der Praxis darstellen. Tierhalter sind per se keine Kommunikations- und IT-Spezialisten und dürften wenig Interesse an der komplexen Erstellung von Kommunikationsinfrastruktur in Gebäuden oder im Freien entwickeln. Allerdings scheitert SK innerhalb und nahe an Gebäuden. Zudem gibt es auch im Freien, je nach Topografie und Bewaldung, Einschränkungen in der Kommunikation. Darüber hinaus ist SK als Kommunikationskanal teuer. Dies hat zur Folge, dass mit Ausnahme der Ortung und der Zeit, keine Rohdaten, sondern auf der SOM, sogenannte «edge», vorverarbeitete Information in kompakter Form übermittelt wird. Für das langfristige Tiermonitoring in der landwirtschaftlichen Praxis ist dies kein Hindernis. Ihr Potenzial hat SK insbesondere in den beiden Tiergruppen auf der Sömmerung im Jura voll zur Geltung gebracht.

BLE-Daten erlauben eine relative Positionsbestimmung, und können auch während Phasen geringer Energiestände Informationen zum Herdenaufenthalt liefern. Dafür ist jedoch Infrastruktur in Form von Antennen und Gateways mit Verbindung zu einem gesicherten Internet nötig. Auch Netzstromversorgung ist zwingend. Letzteres dürfte in Stallgebäuden nicht limitierend sein, ein gesichertes Internet aber schon. Mittels BLE liessen sich während des Versuchs Sensorrohdaten übertragen. Im Routinebetrieb steht diese Funktion nicht zur Verfügung. Zudem ist sie durch die Datenmengen und deren Skalierbarkeit limitiert.

Der RFID-Kanal hat den Vorteil, dass dafür von Seiten SOM keine Energieversorgung notwendig ist. Die Energie kommt vom Lesegerät, welches entweder fix im Gebäude verbaut und ans Stromnetz angeschlossen ist, oder von mobilen, batteriebetriebenen Lesegeräten. RFID ist in der Tierkennzeichnung seit Jahren mit der Niedrigfrequenz («low frequency – LF») Standard. Die zugehörigen ISO-Normen werden von der ICAR weltweit vertreten. RFID ist zudem in der Stalltechnik, im Bereich Zugangssteuerung etabliert. RFID, verbaut in der evaluierten SOM, schafft damit einen durch den Tierhalter direkt nutzbaren Mehrwert, indem die Tieridentifikation gleichzeitig für die Stalltechnik sowie in der vorliegenden Versuchsanlage auch für das Meldewesen verwendet werden kann. Andererseits ist die RFID-Technologie statisch. Antennen müssen in Gebäuden strategisch verbaut werden, möchte man sie für das Meldewesen (Auslauf-, Weidejournal) nutzen. Die Distanz zwischen Lesegerät und Antenne ist physikalisch auf rund zehn Meter limitiert. Zwar kann ein Lesegerät mehrere Antennen bedienen, aber zur Abdeckung des Bedarfs in einem Gebäude müssten diverse Lesegeräte für die verschiedenen meldepflichtigen Tiergruppen verbaut werden, um den vollen Nutzen der Automatisierung ausschöpfen zu können. Dies ist mit Kosten sowie mit dem Aufbau und Unterhalt von Infrastruktur verbunden und dürfte wie auch die BLE-Infrastruktur eine Hürde für den breiten Einsatz in der Praxis darstellen. Im Versuch hat sich das Ausrüsten von vielen Tieren einer Herde bewährt. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass über den Status der Herde genügend Information erzeugt werden kann, auch wenn auf Stufe eines einzelnen Tieres, bzw. einer einzelnen SOM, pro Tag nur wenige Datenpakete vorliegen. Je nach Fragestellung sind mehr als vier bis sechs Datenpakete pro Tag inklusive Positionsbestimmungen auf Stufe Einzeltier wünschenswert. Im Vergleich zur Standortmeldung auf der Tierverskehrsdatenbank, bieten allerdings bereits zwei bis drei Datenpakete pro Tag eine deutlich höhere Auflösung hinsichtlich des Aufenthaltsorts und der Kontakte von Nutztieren. Im Bedarfsfall sind zudem heute auch SOM mit bis zu 24 Datenpaketen pro Tag erhältlich.

Soziale Tiere zeichnen sich durch eine charakteristische Herdenstruktur aus, die auf einer Vielzahl von Interaktionen beruht (agonistisches und affiliatives Verhalten). Das Aufzeigen der Herdenstruktur und der Interaktionen gibt Hinweise auf die Qualität einer Tiergruppe bzw. ihr Wohlbefinden. Auffällige, isolierte Tiere deuten möglicherweise auf Probleme in der Gruppe hin und können als Indikatoren für Gesundheit und Leistungserbringung dienen. Das Erkennen der für die Gruppe prägendsten

Tiere (Schlüssel-tiere) mit vielen Interaktionen kann eine Hilfe beim Tiermanagement darstellen und dient einer gezielten Ausrüstung einer Herde mit SOM. Abweichendes Verhalten kann zudem auf besondere Ereignisse in der Tiergruppe deuten. So konnte beispielsweise bei Schafen in Australien Isolation neben Körperhaltung als hochgradig informativ für eine bevorstehende Geburt identifiziert werden (Fogarty *et al.* 2021).

Der trockene Sommer 2022 hat vor Augen geführt, wie wichtig Prognosen und Monitoring in Fällen von grosser Trockenheit für die Versorgung der Tierbestände und die nachhaltige Nutzung der Weidestandorte sind (Abb. 8). Die Verbindung des automatisierten Tierbesatzes mit dem Zustand der Vegetation erlaubt Prognosen für die nachhaltige Bewirtschaftung besonders gefährdeter Flächen. Auf den Alpweiden ist der Dürrestress gut sichtbar. Der Verlauf des Bodenfeuchtedefizits (SMD) zeigt einen ausgedehnten Wassermangel ab ca. Mai 2022, welcher weiter ansteigt und im Juli, August sehr hohe Werte annimmt (Abb. 8). Der Vergleich der optischen Luftaufnahmen deckt ausgedehnte gelb-braune Flächen auf (rot umrandet).

Die primäre Aufgabe der Studie lag in der Erarbeitung eines Datenmechanismus zur automatischen Erstellung des Auslauf- und Weidejournals nach DZV. Die Logik dazu basiert auf dem Datenfluss aus den drei kombinierten Kommunikationskanälen der SOM. Dieser «Proof-of-Concept» ist gelungen (Abb. 3). Die Abweichungen von den schriftlichen Aufzeichnungen des Versuchsbetriebs in Posieux sind erklärbar und beruhen auf technischen Lücken, die sich beheben lassen. Besonders herausfordernd sind die Übergangszeiten nach längerer Stallhaltung, wenn der Batterieladestand der SOM tief und die SK-Kommunikation dadurch vorerst noch eingeschränkt verfügbar ist. Hier bestehen noch weitere Möglichkeiten, die BLE-Signale der SOM für eine präzisere Lokalisierung auszuwerten. Unabhängig von der technischen Machbarkeit stellen sich im Kontext eines operativen Betriebs auch rechtliche Fragen. Wie robust müsste das System diesbezüglich sein und wie würde im Zweifelsfall entschieden? Schafft die Automatisierung die gewünschte Erleichterung für die Bewirtschaftenden und den Vollzug? Können allfällige Schwachstellen im aktuellen System durch die Automatisierung geschlossen werden, oder entstehen einfach andere, deren Behebung noch anspruchsvoller wäre? Die lokalen Verhältnisse in Posieux waren für das Vorhaben ideal. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die generelle Tierhaltungspraxis und die vielerorts üblichen Stallanlagen ist mit dem vorliegenden Projekt nicht abschliessend geklärt. Auch der Support bei der Stellung und beim Be-

trieb von Infrastruktur bleibt vorerst ein offener Punkt. Nur SK-Information können Landwirte umgehend nutzen. Damit eignet sich das derzeitige Instrument primär für Anwendungen im Freien während der Jahreszeiten mit viel Weidegang. Dies könnte im Kontext der Automatisierung von Meldepflichten, des Herdenmonitorings mit und ohne Behirtung, wie zur Vermeidung von Konflikten im Tourismusbereich (Wanderer), oder auch im Kontext der Diskussion rund um die Grossraubtiere bzw. den Herdenschutz geschehen. Mit SOM am Halsriemen ist der Einsatz dieser Remote Sensing Technologie zudem auf weitere Tierarten ausdehnbar und nicht auf das Rind beschränkt.

In einer kürzlich publizierten Studie (Ehlers *et al.* 2022) wurden digitale Entwicklungen und deren Wirkung auf die Agrarpolitik in Europa mittels Szenarien dargestellt und diskutiert. Die Szenarien bewegten sich entlang zweier Achsen mit hoher resp. tiefer Konzentration der digitalen Strukturen sowie einem der Digitalisierung eher förderlichen bzw. eher bremsenden Umfeld. Der hier untersuchte Anwendungsbereich reiht sich ein in den Bereich von Remote Sensing Anwendungen und lässt sich in alle skizzierten, zukünftigen agrarpolitischen Szenarien einbetten. So ist eine Automatisierung des Auslauf- und Weidejournals beispielsweise als ein Element digitaler Steuerung im Rahmen von «Digital Regulation» zu verstehen, aber auch als administrative Vereinfachung und Unterstützung der Tierhaltenden innerhalb eines Szenarios «Light Digitalisation».

Schlussfolgerungen

Die evaluierte SOM ist nicht das einzige Produkt auf dem Markt von Remote Sensing und Monitoring für Tiere. Sie bietet mit den drei Kommunikationskanälen sowie einer Offenheit für eigene Softwareauswertungen momentan eine besonders interessante Datenzugänglichkeit. Weitere Akteure werden bestrebt sein diesen Markt zu erschliessen, der von Businessanalysten als starker Wachstumsmarkt eingestuft wird⁸. Bestrebungen, die Tierkennzeichnung, insbesondere Ohrmarken, mit zusätzlichen Funktionalitäten auszurüsten, gibt es mehrere. Die Eleganz der Verbindung von Tierkennzeichnung – die jeder Tierhalter, aufgrund der gesetzlichen Vorgaben sowieso tätigen muss – mit zusätzlichen phänotypischen Erhebungen direkt am gekennzeichneten Tier, bietet viele Chancen, ist aber nach wie vor eine Nische. Die Verarbeitung und Valorisierung der gewonnenen Daten zu echtem Mehrwert der Endnutzer, sowie Fragen rund um die Sicherheit und Datenhoheit, stellen offene Diskussionspunkte dar.

Auch im Bereich der datenbasierten Einstufung von Tierverhalten, und von Kontakten, im Hinblick auf die Früherkennung von Gesundheitsproblemen und des Wohlbefindens, bieten die von den SOM übermittelten Daten ein hohes Potenzial. Synergien aus der Tierkennzeichnung und der Kombination von Kommunikationstechnologien, angebunden an automatisierte Auswertungen, können auf verschiedene Arten einen Mehrwert liefern. So unterstützen die erhobenen Informationen einerseits die Entscheidungsfindung, andererseits kann eine Automatisierung manueller Dokumentationspflichten zur administrativen Erleichterung der Tierhaltenden beitragen. In diesem Sinne geht das langfristige Potenzial einer SOM weit über den konkreten Fall des Auslauf- und Weidejournals hinaus. Kommunizieren in Zukunft Tiere ausgerüstet mit SOM direkt mit einer Datenbank, liesse sich das gesamte Meldewesen des heutigen Tierverkehrs neu denken und nahezu vollständig automatisieren. Neben der Unterstützung des Tiermanagements und eines Effizienzgewinns für die landwirtschaftliche Tierhaltungspraxis, liesse sich die Rückverfolgbarkeit verfeinern und auch steigenden Erwartungen an Tierwohl und Ressourcennutzung datenbasiert begegnen. Weiter würde ein auf dieser Datenbasis durchgeführtes «Contact Tracing», neue Möglichkeiten im Bereich der epidemiologischen Vorkehrungen für die zuständigen Akteure im Tierseuchenwesen eröffnen. ■

Dank

Die Studie wurde vom Bundesamt für Landwirtschaft, Abteilung Forschung und Beratung mit einem Beitrag unterstützt (Finanzhilfevertrag Nummer 627001913; Aramis Projektnummer 21.16⁹). Die Autoren danken den Mitarbeitenden von Agroscope in Posieux für die tatkräftige Unterstützung mit den Versuchstieren und der Prüfung des Auslaufjournals. Weiter bedanken sich die Autoren beim IT-Betrieb der Identitas AG, sowie der Software-Entwicklung für die Hilfe bei der Einrichtung und beim Betrieb der Informatik-Infrastruktur. Ein Dank geht ebenfalls an die Teams des CSIRO in Australien für die Unterstützung rund um die SOM-Technologie, speziell was die Datengewinnung per BLE anbelangte. Der Firma FreeDimension LLC danken wir für die Zusammenarbeit bei der Entwicklung der Prototypen zur Fixierung der SOM an Halsriemen.

⁸ <https://www.fortunebusinessinsights.com/livestock-monitoring-market-104624>;
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/livestock-monitoring-market-72634532.html>

⁹ Aramis-Projektnummer 21.16 <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=49491>;
Aramis Projektnummer ExSt.2021.1196 <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=48395>

Literatur

- Aleluia, V. M. T., Soares, V. N. G. J., Caldeira, J. M. L. P., Rodrigues, A. M. (2022) Livestock Monitoring: Approaches, Challenges and Opportunities. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 11(4) 67-76. DOI: 10.35940/ijeat.d3458.0411422
- Aquilani, C., Confessore, A., Bozzi, R., Sirtori, F., Pugliese, C. (2022) Review: Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal*, 16(100429), 1-14. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100429
- Arablouei, R., Currie, L., Kusy, B., Ingham, A., Greenwood, P.L., Bishop-Hurley, G.J. (2021) In-situ classification of cattle behavior using accelerometry data. *Computers and Electronics in Agriculture* 183(106045), 1-12. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106045
- Arablouei, R., Wang, X., Bishop-Hurley, G.J., Liu, J. (2023) Multimodal sensor data fusion for in-situ classification of animal behavior using accelerometry and GNSS data. *Smart Agricultural Technology*, 4(100163), 1-12. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100163
- Berckmans, D. (2017) General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, 7(1), 6-11. DOI: 10.2527/af.2017.0102
- Bundesamt für Landwirtschaft (2023b) Direktzahlungsverordnung. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2013/765/de#annex_6/lvl_u1/lvl_2
- Bundesamt für Landwirtschaft (2023a) Forschung und Beratung. https://www.blw.admin.ch/dam/blw/de/dokumente/Das%20BLW/Forschung%20und%20Beratung/forschungskonzept_land-_und_ernaehrungswirtschaft_2021-2024.pdf.download.pdf/Forschungskonzept%20Land-%20und%20Ern%C3%A4hrungswirtschaft%202021-2024%20DE.pdf
- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (2023a) Forschungsprojekt «Smart Animal Health». <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/tiere/forschungsprojekte-tiere/forschungsprojekt-smart-animal-health.html>
- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (2023b) Tierseuchengesetz. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1565_1621_1604/de#art_14
- Bundesamt für Umwelt (2023) Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klimazustand/daten/treibhausgasinventar/landwirtschaft.html>
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation - CSIRO (2023) Research Animals. <https://www.csiro.au/en/research/animals/livestock>
- Ehlers, M.H., Finger, R., El Benni, N., Gocht, A., Sørensen, C.A.G., Gusset, M., Pfeifer, C., Krijn Poppe, K., Regan, A., Rose, D.C., Wolfert, S., Huber, R. (2022) Scenarios for European agricultural policymaking in the era of digitalisation. *Agricultural Systems*, 196(103318), 1-14. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103318. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/2022/02/szenarien-fuer-die-agrarpolitik-im-zeitalter-der-digitalisierung/>
- Fogarty, E.S., Swain, D.L., Cronin, G.M., Moraes, L.E.; Bailey, D.W., Trotter, M. (2021) Developing a Simulated Online Model That Integrates GNSS, Accelerometer and Weather Data to Detect Parturition Events in Grazing Sheep: A Machine Learning Approach. *Animals*, 11(303), 1-22. DOI: 10.3390/ani11020303
- Fostier, A. (2019) Évolution de la place de l'animal et des points de vue sur son élevage dans la société française : quels enjeux pour la recherche agronomique ? Numéro spécial. *De grands défis et des solutions pour l'élevage*. INRAE *Productions Animales*, 32(2), 221-232. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2465>
- Gobbo Oliveira Erünlü, N., Rieder, S., Kuntzer, T., Bérard, J., Wellnitz, O. (2023) Effects of smart ear tags with twin pin fixing system on health and well-being of cows. Publiziert in: *Schweizer Archiv für Tierheilkunde*, 165 (7/8), 625–636.
- Gómez, Y., Stygar, A.H., Boumans, I.J.M.M., Bokkers, E.A.M., Pedersen, L.J., Niemi, J.K., Pastell, M., Manteca, X., Llonch, P. (2021) A Systematic Review on Validated Precision Livestock Farming Technologies for Pig Production and Its Potential to Assess Animal Welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 8(660565), 1-20. DOI: 10.3389/fvets.2021.660565
- Groher, T., Heitkamp, K., Umstätter C. (2020) Digital technology adoption in livestock production with a special focus on ruminant farming. *Animal*, 14(11), 2404-2413. DOI:10.1017/S1751731120001391
- International Committee for Animal Recording - ICAR (2022) RFID devices in conformance with ISO11784 and ISO11785 registered by ICAR in its capacity as the Registration Authority of ISO. The registration is valid for the lifetime of the device. <https://www.icar.org/index.php/rfid-iso/>
- Masters, D.G. (2021) Lost in translation - the use of remote and on-animal sensing for extensive livestock systems. *Animal Frontiers*, 11 (5), 59-62. DOI: 10.1093/af/vfab049
- Mettler, D., Hoffet, F., Fässler, C. (2022) Weiterentwicklung Alptracker 2020/2021. Schlussbericht. Agridea, Lindau. https://www.protectiondestroupeaux.ch/fileadmin/doc/Projekte/Schlussbericht_Weiterentwicklung_Alptracker_2022.pdf
- Neethirajan, S., Kemp, B. (2021) Digital Livestock Farming. *Sensing and Bio-Sensing Research* 32(100408), 1- 12. DOI: 10.1016/j.sbsr.2021.100408
- Nie, L., Berckmans, D., Wang, C., Li, B. (2020) Is Continuous Heart Rate Monitoring of Livestock a Dream or Is It Realistic? A Review. *Sensors*, 20(2291), 1-27. DOI: 10.3390/s20082291
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018) Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992. DOI: 10.1126/science.aaq0216
- Reissig, L., Andrei Stoinescu, A., Mack, G., (2022) Why farmers perceive the use of e-government services as an administrative burden: A conceptual framework on influencing factors. *Journal of Rural Studies* 89, 387-396. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2022.01.002
- Stachowicz, J., Umstätter, C. (2020) Übersicht über kommerziell verfügbare digitale Systeme in der Nutztierhaltung: Angebot für Milchkühe am grössten, für Mast- und Milchschafe sowie Ziegen am kleinsten. *Agroscope Transfer*, 294, 1-28. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/43729>
- Stachowicz, J., Umstätter, C. (2021) Ausgewählte digitale Technologien für die Erhebung gesundheitsrelevanter Indikatoren von Schweinen, Milchkühen und Mastkälbern. *Agroscope Transfer*, 381, 1-8. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/46082>
- Stachowicz, J., Umstätter, C. (2021) Do we automatically detect health- or general welfare-related issues? A framework. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(20210190), 1-13. DOI: 10.1098/rspb.2021.0190
- Stygar, A.H., Gómez, Y., Berteselli, G.V., Dalla Costa, E., Canali, E., Niemi, J.K., Llonch, P., Pastell, M. (2021) A Systematic Review on Commercially Available and Validated Sensor Technologies for Welfare Assessment of Dairy Cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 8(634338), 1-15. DOI: 10.3389/fvets.2021.634338
- Trotter, M., Cosby, A., Manning, J., Thomson, M., Trotter, T., Graz, P., Fogarty, E., Lobb, A., Smart, A. (2018) Demonstrating the value of animal location and behaviour data in the red meat value chain. *Meat and Livestock Australia*. <https://www.mla.com.au/research-and-development/reports/2018/demonstrating-the-value-of-animal-location-and-behaviour-data-in-the-red-meat-value-chain/>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., Buchmann, N. (2017) Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *PNAS*, 114(24), 6148-6150. DOI: 10.1073/pnas.1707462114
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., ..., Murray, C. J. L. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet Commissions*, 393(10170), 447-492. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31788-4
- Williams, T., Wilson, C., Wynn, P., Costa D. (2021) Opportunities for precision livestock management in the face of climate change: a focus on extensive systems. *Animal Frontiers*, 11(5), 63-68. DOI: 10.1093/af/vfab065
- Wolfert, S., Verdouw, C., van Wassenaer, L., Dolfma, W., Klerkx, L. (2023) Digital innovation ecosystems in agri-food: design principles and organizational framework. *Agricultural Systems*, 204(103558), 1-20. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103558