Gefördert vom

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zuwendungsempfänger: Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften

Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Graslandwissenschaften

Vorhabenbezeichnung:

**Agrarsysteme der Zukunft: GreenGrass – Innovative Nutzung des Grünlands für eine nachhaltige Intensivierung der Landwirtschaft im Landschaftsmaßstab,** Teilprojekt A

Schlussbericht

Verantwortliche Autor*innen:

Johannes Isselstein, Vera Pfannerstill, Friederike Riesch

Förderkennzeichen: 031B0734A

Laufzeit des Vorhabens: 01. März 2019 – 31. August 2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen FKZ 031B0734A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

## Teil I: Kurzbericht

Das Ziel des Forschungsprojektes GreenGrass war die Entwicklung und der Einsatz innovativer Produktions- und Informationstechnologien zur Implementierung effektiver, flexibler und resilienter Beweidungsregime in Grünlandsystemen. Eine auf Beweidung basierende nachhaltige Intensivierung der Landwirtschaft kann dazu beitragen, die Konkurrenz um Ackerfläche zu verringern und artenreiches Grünland zu erhalten. Damit unterstützt GreenGrass das Erreichen der von den Vereinten Nationen avisierten Ziele für nachhaltige Entwicklung. Mithilfe von zukunftsorientierten Tierlenkungs- (v.a. virtual fencing), Fernerkundungs- und Informationstechnologien soll Weidewirtschaft so gestaltet werden, dass sie für die landwirtschaftliche Praxis wieder attraktiv wird und gleichzeitig Ökosystemdienstleistungen und biologische Vielfalt erhalten werden. Das GreenGrass-Projekt verfolgte dabei einen ganzheitlichen Ansatz, bei dem die Technologien in einer umfassenden interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftler*innen und Landwirt*innen und anderen Akteuren entwickelt werden und sowohl ökologische, ökonomische als auch rechtliche Aspekte betrachtet werden, um eine nachhaltige und tragfähige Agrarproduktion zu erreichen.

Im Teilprojekt A lag der Fokus auf der Entwicklung und Erprobung einer neuen Tierlenkungstechnologie mit Rindern als den Untersuchungstieren. Als vielversprechendste Innovation in der Weidehaltung wurden zu Projektbeginn virtuelle Zäune identifiziert. Dabei tragen die Weidetiere Halsbänder, die beim Annähern an eine virtuelle Grenze Tonsignale senden. Beim Überschreiten der virtuellen Grenze wird ein leichter elektrischer Impuls an das Tier abgegeben. Das Anwendungspotenzial dieser Systeme ist sehr hoch, wurde bisher jedoch nur unzureichend untersucht. Der rechtlichen Zulassung virtueller Zaunsysteme in Deutschland und Europa standen insbesondere Bedenken bezüglich des Tierwohls im Wege, obwohl in bisherigen Studien keine Einschränkungen des Tierwohls festgestellt wurden.

Zur Erprobung virtueller Zäune wurden in GreenGrass insgesamt fünf Versuche, vorwiegend mit Rindern, durchgeführt. Dabei wurden die Funktionstüchtigkeit der Halsbänder getestet, mögliche Auswirkungen auf das Tierwohl evaluiert und der Einfluss auf die landwirtschaftliche Leistungsfähigkeit analysiert. Es wurde eine hohe Funktionstüchtigkeit nachgewiesen, da es nur eine geringe Anzahl an Ausbrüchen vornehmlich in der Habituationsphase oder unter besonderen Umständen gab. Als Indikatoren für das Tierwohl dienten Herzfrequenz, Verhaltensreaktionen und die Konzentration von Stresshormonen. Im Vergleich von Tieren auf Weiden mit physischen Elektro-Zäunen und auf Weiden mit virtuellen Zäunen wurden keine Unterschiede in diesen Indikatoren festgestellt. Somit gibt es keinen Hinweis auf einen negativen Einfluss von virtuellen Zäunen auf das Tierwohl. Stattdessen gab es eine Abnahme der Stresshormone und der Intensität der Verhaltensreaktionen über die Zeit, was für eine Gewöhnung an das virtuelle Zaunsystem spricht. Es konnte darüber hinaus nachgewiesen werden, dass die Rinder lernten, auf die akustischen Signale zu reagieren und den elektrischen Impuls zu vermeiden. Als Indikator dafür wurde die Rate der elektrischen Impulse pro akustische Signale berechnet. Diese nahm über die Zeit ab, genauso wie die absolute Anzahl der elektrischen Impulse pro Tier und Tag. Die landwirtschaftliche Leistungsfähigkeit wurde über die Gewichtszunahme der Rinder gemessen. Diese entsprach der der Rinder auf physisch umzäunten Weiden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass sich das Weideverhalten und die Futterauswahl von Tieren auf physisch und virtuell umzäunten Weiden nicht unterschieden. Durch die Kombination der GPS-Daten der Halsbänder mit UAV-gestützten Fernerkundungsdaten konnte gezeigt werden, dass sich mit zunehmendem Weidetag auf einer Koppelfläche die Liegezeit der Rinder verkürzte, die Gehstrecke zunahm und sich die Rinder gleichmäßiger auf der Weide verteilten, was auf eine abnehmende Futterverfügbarkeit zurückzuführen war. Über diese Daten könnte daher beispielsweise der ideale Zeitpunkt für den Umtrieb auf eine nächste Koppel bestimmt und somit das Weidemanagement erleichtert werden.

Ein weiteres Ziel war die Entwicklung einer innovativen Tierlenkungstechnologie, die nicht nur virtuelles Zäunen, sondern auch gezieltes Beeinflussen der Bewegungsrichtung von Weidetieren über richtungsweisende Signale ermöglichen sollte. Der erste Prototyp des Tierlenkungsdemonstrators wurde im Jahr 2019 entworfen und bis 2022 technisch verbessert und schließlich zum Reaktionsdemonstrator (ReD) weiterentwickelt. Der ReD kann mehrere unterschiedliche akustische Signale aufnehmen und abspielen sowie Vibrationssignale senden. Nach aufwendiger Tierversuchsbeantragung wurde in den Jahren 2023 und 2024 getestet, ob Rinder mit diesem System auch ohne elektrische Impulse gelenkt werden können. Im Experiment waren auf das Vibrationssignal jedoch fast keine Reaktionen festzustellen. Generell waren die Reaktionen deutlich schwächer als in Experimenten mit elektrischen Impulsen. Die Eignung von akustischen Signalen und Vibrationssignalen als Alternativen zum elektrischen Impuls, um Rinder auf einer Weide zu halten, ist daher fraglich. Im Versuch, die Bewegungsrichtung der Rinder über positive Konditionierung mit akustischen Signalen zu lenken, zeigte sich eine deutliche individuelle Seitenpräferenz der Versuchstiere. Sie orientierten sich nicht am akustischen Signal. Weitere Studien sind notwendig, um zu prüfen, ob die Richtungslenkung mit einem kleinschrittigeren Training der Tiere erreicht werden kann.

Ein weiterer Bestandteil des Projekts war die rechtliche Prüfung der Rahmenbedingungen für die Einführung und Anwendung von Tierlenkungstechnologien in der Landwirtschaft. Es wurden auf nationaler und europäischer Ebene bestehende rechtliche Herausforderungen identifiziert und Lösungsmodelle zu entwickelt, die eine rechtssichere, tierschutzgerechte und praxisnahe Nutzung ermöglichen. Die rechtlichen Herausforderungen der virtueller Zäunungstechnologie liegen vor allem im Tierschutzrecht, aber auch in der Haftung und in der technischen Harmonisierung auf EU-Ebene. Die im Rahmen des Projekts erstellte juristische Ausarbeitung dokumentiert detailliert die bestehende Rechtslage, identifizierte Regelungslücken und gibt konkrete Handlungsempfehlungen für Gesetzgeber, Behörden und Praxisakteure.

Zwischen Teilprojekt A und allen anderen Partnern des GreenGrass-Verbundes fand intensiver Informations- und Datenaustausch statt. Es wurden gemeinsame Experimentalarbeiten und Feldtage in Living Labs sowie Reflexions- und Tutorialworkshops durchgeführt. Zugleich wurde eine Vielzahl von externen Partnern und Interessenten einbezogen. Der direkte Wissensaustausch mit den Living Lab-Beiräten wurde genutzt, um regionsspezifische Probleme, Fragestellungen, Anforderungen und Ideen für mögliche Anwendungen der GreenGrass-Innovationen aufzunehmen. Insbesondere der Versuchsbetrieb Relliehausen der Universität Göttingen im Living Lab Südniedersachsen diente als Modell- und Versuchsort. Die interdisziplinären Arbeiten mit gemeinsamer Bearbeitung durch die unterschiedlichen Teilprojekte umfassten unter anderem: Testen eines Prototyps für eine Tierlenkungstechnologie (Arbeitspaket (AP) 1.1 Uni Göttingen, Texas Trading GmbH und Horizont GmbH), Tierbewegungs- und Weidenutzungsmuster mit virtueller Zäunungstechnologie (AP 1.2 Uni Göttingen) und Fernerkundungsdaten (AP 2.1 Uni Köln) für ein verbessertes Weidemanagement, Tierbewegungsdaten mit virtueller Zäunungstechnologie (AP 1.2 Uni Göttingen) und Biodiversitätsdaten (AP 1.3 Uni Gießen). Zudem hat GreenGrass in diversen Arbeitsgruppen mit anderen Konsortien des Förderprogrammes „Agrarsysteme der Zukunft“ (AdZ) zusammengearbeitet. Enge Kooperationen wurden mit den in der Fläche arbeitenden Konsortien DAKIS und NOcsPS aufgebaut. Auch mit den anderen Konsortien fanden vertiefter Austausch und Wissentransfer für die Themenfelder Nachhaltigkeitsbewertung und Akzeptanz statt.

## Teil II: Ausführlichere Darstellung

### Einleitung: Ziele und übergreifende Fragestellung

Die globale Ernährungssicherung verlangt eine Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktivität und gleichzeitig eine Reduktion der Umweltbelastung. Dazu müssen Produktionssysteme entwickelt werden, die eine nachhaltige Steigerung der Pflanzenproduktion im Landschaftskontext unter Berücksichtigung der Standortbedingungen, der sozioökonomischen und agrarpolitischen Rahmenbedingungen sowie die Sicherung ökosystemarer Leistungen ermöglichen (Wolters et al. 2014). In Deutschland macht Dauergrünland 28 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus, global gesehen sind es 70 %. Daher muss auch die Grünlandnutzung effizienter und nachhaltiger werden, um zu den globalen Wertschöpfungsketten der Nahrungsmittelproduktion beizutragen und gleichzeitig die von der UN gesteckten Ziele für nachhaltige Entwicklung (sustainable development goals, SDGs) erreichen zu können.

Traditionell war die Weidehaltung von Wiederkäuern ein wichtiger Bestandteil der Lebensmittelproduktion, da sie auch an Standorten möglich ist, die keinen Ackerbau erlauben. Beweidung steht dabei nicht im Gegensatz zum Erhalt der Biodiversität. Der selektive Verbiss und die Auswahl bestimmter Nahrungspflanzen durch Weidetiere (Lyseng et al. 2018), das Absetzen von Kot und Urin (Sitters & Olde Venterink 2021), Vertritt (Pulido et al. 2018) und Samenausbreitung (Rico et al. 2013) können die Arten- und Lebensraumvielfalt positiv beeinflussen (Socher et al. 2013).

Heute wird Grünland immer seltener zur Beweidung genutzt und häufig in andere Nutzungsformen konvertiert (FAO 2017). Der Verlust artenreichen Grünlands hat dabei negative Auswirkungen auf die Biodiversität, die Bodenqualität und die Kohlenstoffspeicherung. Gleichzeitig ist der Druck auf Landwirt*innen zur kosteneffizienten Produktion durch geringe Lebensmittelpreise sehr hoch (Knaus 2016). Ehemals allgemein bekanntes Wissen bezüglich des Weidemanagements, beispielsweise zu Indikatoren für die Weidequalität oder angemessenen Besatzdichten, gehen durch diese Entwicklung verloren (Varga et al. 2020). Außerdem findet eine Einschränkung des Tierwohls für die nunmehr vorwiegend im Stall gehaltenen Weidetiere statt (**Horn & Isselstein 2022**).

GreenGrass hatte es sich zum Ziel gesetzt, mithilfe innovativer Technologien diesen negativen Entwicklungen entgegenzuwirken. Durch „smarte“ Anwendungen sollte Weidehaltung für Landwirt*innen wieder attraktiv werden. In einem inter- und transdisziplinärem, holistischen Systemansatz sollten innovative, leistungsstarke und nachhaltige Technologien und Managementansätze zur Nutzung von Grünland entwickelt werden, die zu einem ökonomisch und ökologisch tragfähigen Agrarsystem der Zukunft beitragen.

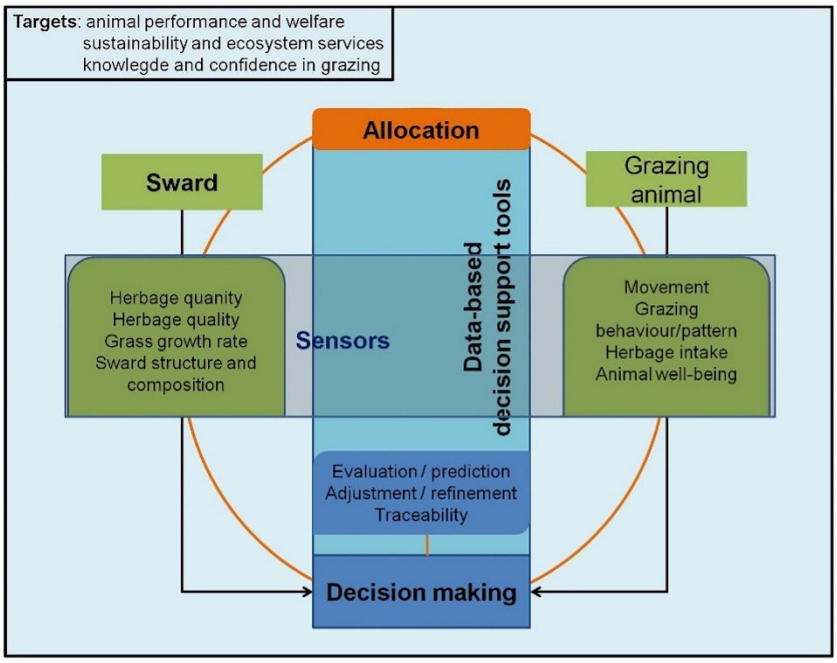
Innerhalb von GreenGrass hatte das Arbeitspaket 1 (AP 1) zum Ziel, neuartige Weidesysteme für landwirtschaftliche Nutztiere unter Anwendung innovativer Tierlenkungstechnologie zu entwickeln und zu erproben. Zu diesem Zweck wurden drei Tasks bearbeitet. **Task 1.1: Tierlenkungstechnologie** widmete sich der Entwicklung einer elektronischen Technologie zur Lenkung von Weidetieren. **Task 1.2: Tierhaltungssysteme mit Weidegang** adressierte die Frage, wie Tierlenkungstechnologie sinnvoll genutzt werden kann, um innovative Weideproduktionssysteme umzusetzen, sowie die agronomische Leistungsfähigkeit solcher Systeme. In **Task 1.3: Biodiversität und Ökosystemleistung** ging es darum, den Nutzen von Produktionssystemen mit Tierlenkungstechnologie für die Biodiversität und Ökosystemleistungen zu ermitteln und gezielt zu steuern. Mit dem Aufstockungsantrag wurde **Task 1.4 Rechtliche Implikationen** hinzugefügt, um die rechtlichen Herausforderungen für die Erforschung und Entwicklung sowie die Einführung digitaler Technologien in die landwirtschaftliche Praxis zu eruieren und Lösungsmodelle für die Einführung der innovativen Technologie des virtuellen Zäunens in die Praxis vorzuschlagen.

Task 1.1 und 1.2 wurden durch Teilprojekt A (Universität Göttingen) zusammen mit den industriellen Projektpartnern Texas Trading GmbH und Horizont GmbH bearbeitet. Für Task 1.3 unter der Leitung der Universität Gießen hat Teilprojekt A Daten zur Vegetationsstruktur und Biomasse auf der Weide als Indikatoren für die Habitatqualität sowie zu den Bewegungsmustern der Weidetiere erhoben und zur Verfügung gestellt (vgl. Baumann et al. 2021, 2023, Jauker et al. 2022, 2023a, b, o.D. in Review). Task 1.4 wurde vollumfänglich durch Teilprojekt A bearbeitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Teilprojekt A zugeordneten Meilensteine dargestellt.

**Task 1.1: Tierlenkungstechnologie (Universität Göttingen – Isselstein, Firma Texas Trading GmbH, Firma Horizont Group GmbH)**

Ein Ziel von Task 1.1 war es, kommerziell verfügbare Spitzentechnologie zum virtuellen Zäunen von Rindern zu beschaffen und nach den Anforderungskriterien von Tierwohl und Hütesicherheit zu testen. Auch die Reaktionen der Rinder bei Interaktionen mit virtuellen Grenzen und Einflüsse der Technologie auf ihr Verhalten sollten untersucht werden. Diese Aufgaben wurden von Teilprojekt A bearbeitet. Parallel dazu arbeiteten die Firmen Texas Trading GmbH und Horizont Group GmbH daran, ein eigenständiges innovatives System zu entwickeln, dass nicht nur virtuelles Zäunen ermöglicht, sondern auch eine gezielte Tierlenkung (Meilensteine M 1.1.3, M 1.1.5, M 1.1.6, M 1.1.8, M 1.1.9). Außerdem wurden weitere Technologien, die die Weidewirtschaft technisch voranbringen können, eruiert.

Hierfür wurde eine Literaturanalyse durchgeführt **(Horn & Isselstein 2022).** Zunächst wurde festgestellt, dass Beweidungsmaßnahmen an die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten angepasst sein müssen, um einerseits Überweidung zu verhindern und andererseits die Ausnutzung der vorhandenen Futterpflanzen zu maximieren. Für präzise, effiziente und nachhaltige Beweidung sind daher Informationen über eine Reihe von Parametern notwendig. Dazu gehören auf der einen Seite die stehende Biomasse sowie die Futterqualität auf der Weide und auf der anderen Seite das Verhalten der Weidetiere, insbesondere Bewegung und Fressverhalten. Mithilfe neuer Technologien, wie Sensoren, die automatisch Daten erheben, und Software, die diese Daten benutzerfreundlich aufbereitet, können Landwirt*innen in ihrer Entscheidungsfindung beispielsweise zum Tierbesatz oder dem Zeitpunkt des Umtriebs auf eine neue Weide unterstützt werden (Grafik 1, **Horn & Isselstein 2022**).




*Grafik 1: Schematische Darstellung der benötigten Parameter für ein wissensbasiertes Weidemanagement und des möglichen Einsatzes smarter Technologien als Entscheidungshilfetools (Horn & Isselstein 2022).*

Ein wesentlicher Grund, weshalb die Weidehaltung für Landwirt*innen aufwendig ist, ist der Aufbau und Unterhalt von Zäunen (Bishop-Hurley et al. 2007). Zur optimalen Ausnutzung der Weideflächen ist es notwendig, zu kontrollieren, wann sich die Tiere wo aufhalten, um damit zu bestimmen, was und wie viel sie weiden. Daher muss der Zugang der Tiere zu einzelnen Flächen kontrolliert werden. Bisherige technische Fortschritte können dabei einzelne Arbeitsschritte erleichtern. Beispielsweise können durch automatische Tore Weidezeiten begrenzt oder einzelne Tiere separiert werden. Der Umtrieb von Tieren könnte mithilfe von Drohnen stattfinden. Hierbei sind dennoch physische Zäune erforderlich, die regelmäßig kontrolliert, freigeschnitten und gegebenenfalls umgesetzt werden müssen **(Horn & Isselstein 2022)**.

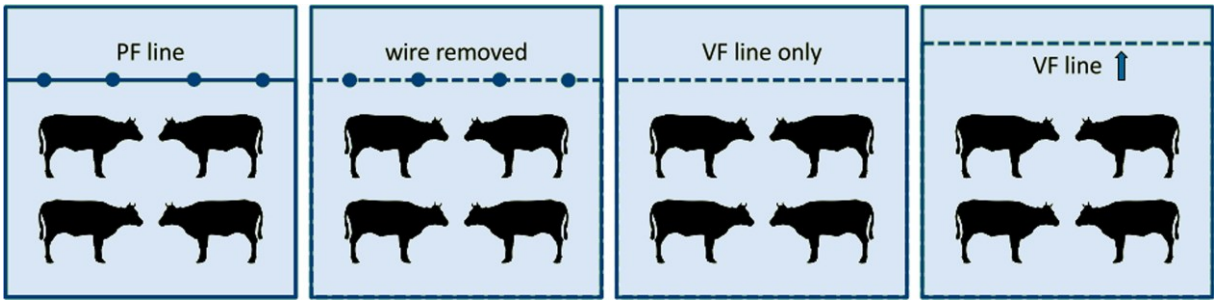
Eine derzeit neue Methode sind virtuelle Zäune, bei denen die Grenzen der Weidefläche mithilfe von GPS-Punkten definiert werden und die Tiere ein Halsband tragen, das ihnen die Lage der virtuellen Grenze mit akustischen und elektrischen Signalen vermittelt. Virtuelle Zäune eröffnen neue Möglichkeiten, die die Nutzung der verfügbaren Weideflächen erleichtern (Stevens et al., 2021), da das Zäunen an sich nicht mehr aufwändig ist (Lomax et al., 2019) und flexibel auf die räumlich-zeitliche Dynamik der Weidebedingungen reagiert werden kann (Campbell et al., 2018, Campbell et al., 2020). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass Wildtiere von virtuellen Zäunen nicht beeinflusst und ihre natürlichen Wanderungen daher nicht behindert werden (Umstätter 2011). Außerdem kann der Aufenthaltsort der Weidetiere über die GPS-Signale überwacht werden (**Hamidi et al. 2023**) (**Wilms et al. 2025**). Virtuelle Zäune haben im Vergleich zu verschiedenen anderen Automatisierungen in der Hütetechnik das größte Anwendungspotenzial (**Horn & Isselstein 2022**, **M 1.1.1, M 1.1.4**). Daher wurden im Verlauf des Projekts anders als geplant keine Hütedrohnen getestet. Mit der Literaturanalyse (**Horn & Isselstein 2022**) wurden D 1.1.1 und D 1.1.4 geliefert.

Ein wichtiger Arbeitsschritt bei der Entwicklung der Funktionsfähigkeit virtueller Zäune ist die Prüfung der Reaktion und des Weideverhaltens der Tiere unter verschiedenen Bedingungen (**M 1.1.7**). In einer ersten Studie (**Hamidi et al. 2022,** erbrachte **D 1.1.7**) wurden 24 weibliche Rinder im Alter von 14-16 Monaten, die noch nicht gekalbt hatten („Färsen“), in sechs Gruppen eingeteilt. Drei Gruppen wurden mit physischen Zäunen (physical fence, pf) eingezäunt, die anderen mit virtuellen Zäunen (virtual fence, vf). Diese wurden miteinander verglichen. Die Indikatoren für das Tierwohl waren die Konzentration von Kortisol-Metaboliten im Kot (Faecal Cortisol Metabolites, FCM), die Gewichtszunahme und die Anzahl der gelaufenen Schritte, die mit einem speziellen Pedometer für Rinder (IceTag, Ice-robotics Ltd, Edinburgh, Scotland) gemessen wurden. Außerdem wurden zum ersten Mal in einer Studie mit virtuellen Zäunen eine kontinuierliche Verhaltensbeobachtung durchgeführt und die Reaktionen auf den elektrischen Impuls klassifiziert. Als virtuelle Zauntechnologie wurde das System von Nofence (®Nofence, AS, Batnfjordsøra Norwegen) verwendet (Grafik 2).

*Grafik 2: Fleckvieh-Färse mit einem Nofence-Halsband, CowManager Ohrmarke (orange) und einem IceTag Pedometer (blau) am rechten Hinterbein (Hamidi et al. 2022).*

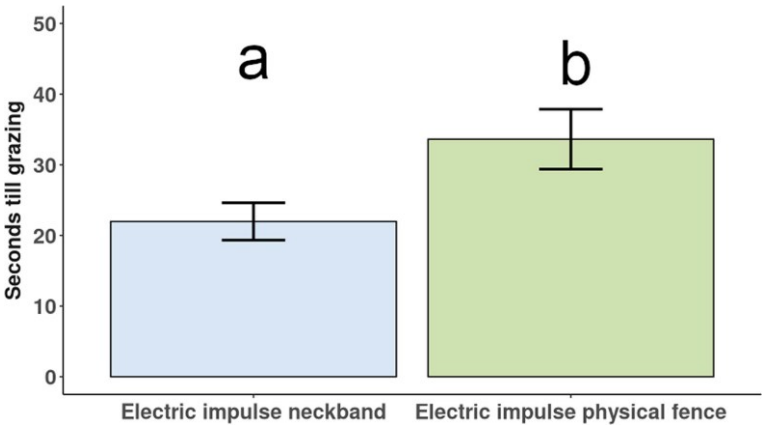
Nur an einer Zaunseite wurde ein virtueller Zaun gesetzt. Die übrigen drei Zaunseiten blieben mit physischen Zäunen sichtbar. Die Färsen in den vf-Gruppen wurden über mehrere Tage an den virtuellen Zaun gewöhnt: Am ersten Tag gab es sowohl eine virtuelle als auch eine physische Zaunlinie. Am zweiten Tag wurden die Zaunlitzen entfernt, die Zaunpfosten blieben stehen. Am dritten Tag wurden auch die Pfosten entfernt. Am achten Tag wurden die Zaunlinien sowohl in der pf-Gruppe als auch in der vf-Gruppe um drei Meter

verschoben, um neue Weidefläche zur Verfügung zu stellen (Grafik 3). Damit wurde getestet, ob die Färsen die Funktionsweise des virtuellen Zaunes so weit verstanden hatten, dass sie die Verschiebung der Zaunlinie wahrnahmen und mit der Ausweitung der Beweidungsfläche reagierten.




*Grafik 3: Schematische Darstellung der Gewöhnung an eine virtuelle Zaunseite aus Hamidi et al. (2022).*

Die Färsen zeigten zwischen den pf- und vf-Gruppen keine Unterschiede in der Konzentration der Stresshormone, der Gewichtszunahme oder im Bewegungsverhalten. Stattdessen hatte der Weidetag eine Auswirkung auf die Anzahl der Schritte pro Stunde, mit mehr Schritten an späteren Weidetagen, an denen schon eine größere Fläche abgegrast war. Die Tiere mussten sich mehr bewegen, um ihren Nährstoffbedarf zu decken. Die kontinuierliche Verhaltensbeobachtung zeigte, dass bei Kontakt mit dem virtuellen Zaun die Zeit bis zur Wiederaufnahme des Grasens kürzer war als bei Kontakt mit dem physischen Zaun (Grafik 4). Dies ist ein Hinweis dafür, dass die negativen Erfahrungen im Zusammenhang mit virtuellen Zäunen vergleichbar oder sogar weniger negativ sind als im Falle eines Kontakts mit einem physischen Zaun.




*Grafik 4: Statistische Auswertung der Zeit, die eine Färse benötigte, um nach einem elektrischen Impuls zum Grasen zurückzukehren. Die Buchstaben „a“ und „b“ zeigen an, dass zwischen den beiden Impulstypen ein signifikanter (P < 0.05) Unterschied besteht (Hamidi et al. 2022).*

In der Studie lernten alle Färsen innerhalb weniger Tage, das akustische Vorwarnsignal mit dem folgenden elektrischen Impuls zu assoziieren. Keines der Tiere brach aus, woraus sich eine 100%ige Effektivität der Technologie in Bezug auf die Hütesicherheit ergibt. Als die Zaunlinie am achten Tag verschoben wurde, bewegten sich alle Tiere auf die neue Fläche mit höherer Futterverfügbarkeit. Daher kann angenommen werden, dass die Färsen sich den Standort der Zaunlinie nicht (nur) über visuelle Landmarken merkten, sondern die akustischen Signale mit der Zaunlinie verknüpften. Das hier getestete Vorgehen zur Gewöhnung an den virtuellen Zaun könnte als „Trainingsprotokoll“ für zukünftige Anwendungen dienen.

Als weiterer Teilaspekt wurde in dieser Studie Sensorik aus der Stallhaltung zur Aktivitäts-, Verhaltens- und Gesundheitsüberwachung eingesetzt, um die Eignung solcher Sensoren für die Weidehaltung mit virtueller Zäunungstechnologie zu prüfen. Es wurde das niederländische System CowManager eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Ohrmarke, die das Verhalten von Milchkühen präzise überwachen und bestimmen kann (Bikker et al., 2014). Die mittels CowManager erhobenen Daten

wurden mit direkten Verhaltensbeobachtungen verglichen. Die Datenaufzeichnungen des CowManager-Sensors zu Fresszeiten fielen signifikant höher aus als die Beobachtungsdaten (**Grinnell et al. 2021, 2022**). Vermutlich führen die aggregierten Aufzeichnungsintervalle des Sensors zu einer Verzerrung in der Datenerfassung, da Verhaltensweisen, die nur kurzzeitig (< 1 min) ausgeführt werden, nicht erfasst werden. Insbesondere wenn Grasen im Weideschritt stattfindet und nicht stationär an einem Fressplatz im Stall, können daher die Fresszeiten überschätzt werden. Diese Auswertung zeigte, dass die CowManager-Sensoren das Verhalten der Färsen auf der Weide nur unzureichend darstellen konnten und deshalb für Tierproduktionssysteme mit Weidezugang nur eingeschränkt geeignet sind.

In einer zweiten Studie wurde der Versuchsaufbau erweitert und genutzt, um die Reaktionen der Rinder auf die Interaktionen mit der virtuellen Zäunungstechnologie detailliert zu analysieren (**Hamidi et al. 2024**). Ziel war es, Belege dafür zu erbringen, dass die Tiere lernen, die aversive Wirkung des Elektroschocks zu vermeiden, indem sie auf das akustische Signal reagieren, und dass sich eine Zaunlinie plötzlich oder dynamisch verschieben kann (Animal Welfare Committee 2022). Es wurden diesmal drei Zaunseiten virtuell ausgezäunt. Wie im vorigen Versuch wurden die Tiere über mehrere Tage an die virtuellen Zäune gewöhnt, indem zuvor installierte physische Zäune nach und nach abgebaut wurden. Eine virtuelle Zaunlinie wurde am 10. Tag verschoben. Zur Analyse des Lernverhaltens wurden drei Methoden angewendet. Erstens wurden die Verhaltensreaktionen auf die Signale der Halsbänder beobachtet. Die Reaktionen wurden in Kategorien je nach Stärke der Reaktion eingeteilt (Kategorie 1: „Tier frisst weiter“, Kategorie 2: „Kopfschütteln“, Kategorie 3: „Rennen“, Kategorie 4: „Ausbrechen“). Die stärkeren Reaktionen nahmen über die Zeit ab, die schwächeren zu. Zweitens wurde das Verhältnis von akustischen Signalen zu elektrischen Impulsen erfasst, um den Erfolg der akustischen Vorwarnung auszuwerten. Die Anzahl der akustischen Signale nahm über die Zeit zu, während die Anzahl der elektrischen Signale abnahm. Dies zeigt, dass die Färsen aktiv mit dem virtuellen Zaun interagierten und lernten, den elektrischen Impuls zu vermeiden. Drittens wurde ausgewertet, wie schnell ein im Halsband integriertes Modul vom „Lehrmodus“ in den „Betriebsmodus“ umschlug. Das Modul misst die Anzahl der akustischen Signale, auf die das Tier wie erwünscht mit einer Entfernung vom Zaun reagierte. Im „Lehrmodus“ muss das Tier dabei nur den Kopf abwenden, um das akustische Signal zu beenden. Im „Betriebsmodus“ muss es sich zwei Meter von der Zaunlinie entfernen. Nach 20 erfolgreichen Reaktionen auf die akustischen Signale, bei denen also kein elektrischer Impuls notwendig war, wechselt das Modul in den Betriebsmodus. Im Versuch wurden zwei Phasen festgelegt: In der ersten hatten die Tiere noch keine Erfahrung mit den Halsbändern und virtuellen Zäunen, in der zweiten Phase waren sie bereits eine Woche virtuell eingezäunt gewesen. Der Wechsel in den Betriebsmodus fand in der zweiten Phase doppelt so schnell statt wie in der ersten Phase. Auch dies ist ein deutliches Zeichen dafür, dass die Tiere lernten, elektrische Impulse zu vermeiden. Zur Betrachtung der Tiergerechtheit virtueller Zäunungstechnologie wurde zusätzlich eine Meta-Analyse durchgeführt, in der bisherige Studien zu Tierwohl und Lernen im Zusammenhang mit virtuellen Zäunen ausgewertet wurden (**Wilms et al. 2024**). Als Indikatoren für Stress wurden in diesen Studien die Herzfrequenz, die Zeit, die das Tier im Liegen verbrachte, sowie die Rückstände von Stresshormonen im Kot (Fecal Cortisol Metabolites, FCM) verwendet. Außerdem wurde das Bewegungsverhalten analysiert. In der Auswertung von 13 Studien, in denen physische mit virtuellen Zaunsystemen verglichen wurden, wurden keine Unterschiede im Level an Stresshormonen, in der Bewegung bzw. in der Zeit des Liegens sowie in der Gewichtszunahme festgestellt. Dies spricht dafür, dass die Auswirkung virtueller Zäune auf das Tierwohl vergleichbar mit der von physischen Zäunen ist. Zudem konnten generell eine Abnahme der elektrischen Impulse über die Zeit und vor allem weniger elektrische Impulse pro akustischem Impuls festgestellt werden, je länger die Tiere die Halsbänder trugen.

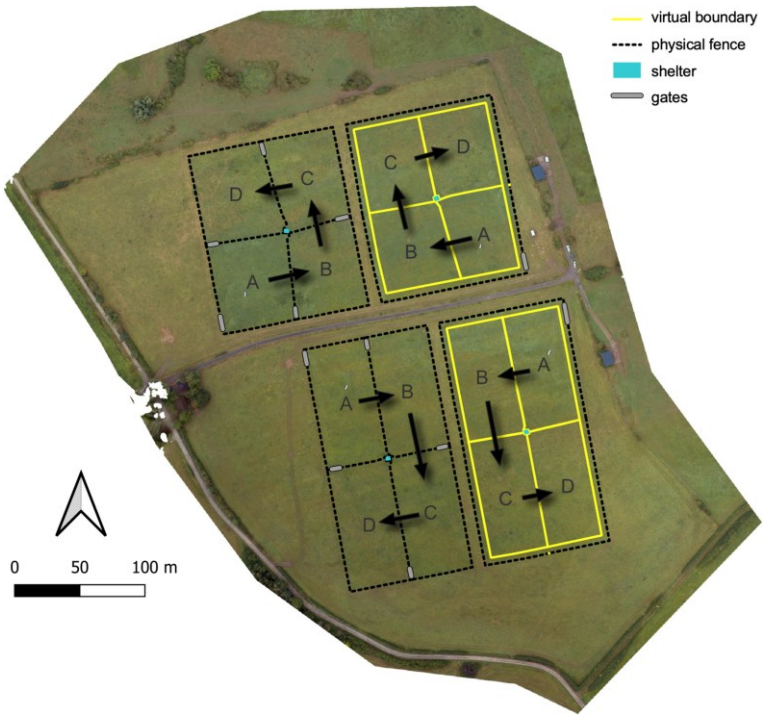
Ein weiteres Ziel von Task 1.1 war die Entwicklung einer über die bisherigen Funktionen virtueller Zäune hinausgehenden Tierlenkungstechnologie. Im Jahr 2019 wurde ein erster Prototyp eines Tierlenkungsdemonstrators (TLD I) von Horizont entworfen. Dieser wurde bis 2022 technisch verbessert (TLD II) und schließlich zum Reaktionsdemonstrator (ReD) weiterentwickelt. Im Unterschied zu den bisherigen Halsbändern erlaubt der ReD, mehrere unterschiedliche akustische Signale abzuspielen. Als zusätzliche Funktion gibt es Vibrationsmotoren, mit denen anstelle eines elektrischen Signals ein Vibrationssignal gesendet werden kann. Es sollte getestet werden, ob mit diesem System die Tiere auch ohne elektrische Impulse, nur durch ein Training zur Reaktion auf Vibration und akustische Signale hin, gelenkt werden können. Es wurden zehn ReD-Halsbänder hergestellt und in den Jahren 2023 und 2024 in Experimenten mit Rindern getestet (**Wilms et al., in Review**, **M 1.1.3**). Die Versuchstiere wurden zunächst an den Versuchsablauf und die Technik gewöhnt. Im ersten Experiment wurden die Reaktionen der Tiere auf verschiedene Stimuli getestet, indem die Herzfrequenz gemessen und Verhaltensreaktionen notiert wurden. Die höchste Anzahl an Reaktionen löste ein akustischer Stimulus mit der Aufnahme des menschlichen Rufes „Komm“ aus, die zweithöchste Anzahl an Reaktionen erfolgte bei einem Klavierspiel. Auf das Vibrationssignal reagierten die Kühe nur in 6 % der Versuche. Bei allen Stimuli waren eine Gewöhnung und Abnahme der Reaktionen und der Herzfrequenz über die Zeit festzustellen. Generell waren die Reaktionen deutlich schwächer als in Experimenten mit elektrischen Impulsen. Im zweiten Experiment wurden die Kühe trainiert, auf ein basierend auf dem ersten Experiment ausgewähltes akustisches Signal hin ihre Bewegungsrichtung zu ändern. In 100 Wiederholungen wurde das Klavierspiel mit Futtergabe aus einem rechtsseitig platzierten Trog kombiniert. Danach sollten die Kühe auf den Stimulus hin von selbst zu dem Trog gehen, bevor dort Futter platziert worden war. Die Erfolgsrate der richtigen Trogwahl lag in beiden Jahren unter 50 %. Stattdessen gab es eine deutliche individuelle Seitenpräferenz der Versuchstiere. Es ist wahrscheinlich, dass das Trainingsprotokoll nicht detailliert genug und die geforderten Lernschritte für die Kühe zu groß waren. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass akustische Signale und Vibrationssignale keine vergleichbaren Reaktionen wie elektrische Impulse auslösen und dass sie, zumindest mit dem angewandten Trainingsprotokoll, nicht geeignet sind, um die Bewegungsrichtung von Kühen zu beeinflussen.

Parallel dazu wurde die Beschreibung der Grundarchitektur der Tierlenkungstechnologie in der Form eines Pflichten- und Lastenheftes fertiggestellt (**M 1.1.6a**) und die Entwicklung des Hütesystemdemonstrators (HüSD) vorangetrieben, dessen Fertigstellung noch aussteht (**M 1.1.8**). Für die Entwicklung der Schnittstelle zum Mehrebenen-Informationssystem (SMI) (**M 1.1.9**) fand ein mehrfacher Informations- und Datenaustausch zwischen Texas Trading und der BTU Cottbus-Senftenberg statt, bei denen Schnittstellen geschaffen und Daten ausgetauscht wurden.

**Task 1.2: Tierhaltungssysteme mit Weidegang (Universität Göttingen - Isselstein, Universität Gießen - Wolters, Agrargesellschaft Emsterland)**

Das generelle Ziel von Task 1.2 war es, zu zeigen, dass innovative Tierlenkungstechnologie in modernen Tierhaltungssystemen mit Weidegang effizient eingesetzt werden kann. Eine effiziente Form der Weidewirtschaft ist Rotationsbeweidung. Hierbei wird eine Weidefläche in kleinere Parzellen unterteilt, die nacheinander beweidet werden, sodass sich Vegetation und Boden zwischen den Weideperioden erholen können. Durch das Ziehen der Zwischenzäune und das Umtreiben zwischen Teilflächen ergibt sich bei Rotationsbeweidung jedoch im Vergleich zur Standweide ein deutlich höherer Arbeitsaufwand. Daher wurde getestet, ob sich virtuelle Zäune dazu eignen, Rotationsbeweidung umzusetzen. Hierzu wurde mit 32 Fleckvieh Färsen ein Rotationsweide-Versuch in vier parallel getesteten Gruppen durchgeführt (**M 1.2.2**, **Hamidi et al. 2023, Grinnell et al. 2025**). Wie im vorigen Versuch (**Hamidi et al. 2022**) wurden pf- mit vf-Gruppen verglichen. Im Unterschied zu der vorigen Studie trugen hier aber alle Tiere ein Halsband, wobei die Halsbänder der pf-Gruppe nur

zur Aufnahme der GPS-Position dienten und weder akustische Signale noch elektrische Impulse sendeten. Außerdem waren in diesem Versuch alle vier Seiten der vf-Gruppe mit einem virtuellen Zaun begrenzt. Die Tiere aus den vf-Gruppen wurden vor dem eigentlichen Versuch in einem zwölftägigen Training an die virtuellen Zäune gewöhnt. Alle Tiere wurden nach drei Tagen von einem ersten auf einen zweiten Paddock gelassen. Dafür wurde bei den pf-Gruppen ein Tor geöffnet; bei den vf-Gruppen wurde zunächst eine Zaunseite erweitert und dann gewartet, bis sich alle Tiere der Gruppe auf der neuen Weidefläche befanden. Anschließend wurde der hintere Zaun auf die Begrenzung des neuen Paddocks verschoben. Ein solcher Umtrieb wurde dreimal wiederholt (Grafik 5).




*Grafik 5: Schematische Darstellung des Umtriebsweideversuchs (Grinnell et al. 2025, Bildautor: Christoph Hütt).*

Trotz einiger Ausbrüche vor allem in der Habituationsphase der Tiere an die neue Weideumgebung lag die durchschnittliche Erfolgsrate, die Färsen innerhalb des virtuellen Zaunes zu halten, bei über 95 %. Somit unterstreicht dieser Versuch die Eignung virtueller Zäune für Umtriebsweiden. Gleichzeitig wurde eine Möglichkeit zur Weiterentwicklung der Halsbänder aufgezeigt: Da es für die vf-Gruppe kein Signal zur Zaunöffnung gab, sondern jedes Tier die Verschiebung durch Annäherung an die ehemalige Zaunlinie selbst testen musste, dauerte der Umtrieb auf den nächsten Paddock deutlich länger als in den pf-Gruppen. In den pf-Gruppen löste das Öffnen des Tors ein Herdenverhalten aus, bei dem ein Tier voranging und die anderen folgten. Ein ähnliches Verhalten könnte ausgelöst werden, wenn die Halsbänder ein Signal zur Zaunöffnung senden würden. Dies würde jedoch ein weiteres und ggf. längeres Training erfordern (**Grinnell et al. 2025**).

In der Studie von **Grinnell et al. (2025)** wurde die Futterqualität und -menge zwischen pf und vf-Weiden verglichen. Die Höhe der Grasnarbe wurde vor und nach der Beweidung an 30 Stellen jeder Koppel mit einem Messgerät für die komprimierte Grasnarbenhöhe („rising plate meter“, Castle, 1976) ermittelt. Zusätzlich wurde an vier dieser Stellen die stehende Biomasse bodennah abgeschnitten, um die Futtermasse -zu bestimmen. Zusätzlich wurden Futterproben genommen und mittels Nahinfrarot-Reflexionsspektroskopie analysiert, um die Konzentrationen von Nährstoffen, metabolisierbarer Energie sowie die Verdaulichkeit der organischen Substanz in vitro zu ermitteln. Außerdem wurden Kotproben der Rinder analysiert, um herauszufinden, wie gut verdaulich das Futter war, dass die Rinder tatsächlich aufgenommen hatten. Es wurden keine Unterschiede zwischen den Zaunsystemen

gefunden. Stattdessen hatte der Beweidungszeitpunkt einen Einfluss auf die Verdaulichkeit des Futters. Die Verdaulichkeit der organischen Substanz war im Kot höher als im Futter, was bedeutet, dass die Rinder aller Gruppen in der Lage waren, aus dem verfügbaren Futter das höherwertige auszuwählen. Auch hier zeigte sich keine signifikante Auswirkung des Zaunsystems, was belegt, dass die Futterauswahl und somit das Weideverhalten durch virtuelle Zäune nicht beeinträchtigt wird. Somit ergeben sich auch unter praxisnahen Bedingungen keine Anzeichen für negative Effekte des virtuellen Zäunens auf das Tierwohl (**Grinnell et al., 2023**).

In der Studie von **Hamidi et al. (2023)** wurde evaluiert, inwieweit die automatisch erhobenen Daten der Halsbänder Auskunft über das Tierverhalten geben können. Der Standort jedes Tieres wurde minütlich über GPS-Daten gespeichert. Wenn sich die GPS-Koordinate zweier aufeinanderfolgender Positionsbestimmungen änderte, wurde davon ausgegangen, dass sich das Tier bewegt hat. Wenn mindestens zwei aufeinanderfolgende GPS-Punkte an derselben Position aufgenommen wurden, wurde das Verhalten als Liegen definiert. Um diese Methode zu validieren, wurde das Verhalten der Tiere vor Ort beobachtet und die Beobachtungsdaten mit den als „Liegen“ vorhergesagten Zeitpunkten verglichen. Der Vergleich ergab eine Genauigkeit von 91 %, mit der aus den GPS-Daten die Zeiten des Liegens erkannt wurden. Darüber hinaus erbrachte die Studie von Hamidi et al. (2023) in Zusammenarbeit mit AP 2 den Proof of Concept, dass durch die Kombination digitaler Technologien am Tier (GPS-Daten aus Nofence-Halsbändern) und UAV-gestützten Fernerkundungsdaten Informationen gewonnen werden können, die das Weidemanagement erleichtern und verbessern können. Die Auswertung der GPS-Daten aus dem Rotationsweide-Versuch zeigte, dass sich mit zunehmendem Weidetag auf einer Koppelfläche die Liegezeit der Rinder verkürzte, die Gehstrecke zunahm und sich die Rinder gleichmäßiger auf der Weide verteilten. Gleichzeitig zeigten die Fernerkundungsdaten, dass die Futterverfügbarkeit im selben Zeitraum auf der Koppel durch die Beweidung abnahm. Die Kombination beider Datenquellen verdeutlicht demnach, dass sich die Rinder sich mehr bewegten, weil sie auf der Suche nach Futter waren. Zukünftige technische Anwendungen, die Daten zum Tierverhalten und zur Futterverfügbarkeit integrieren, könnten daher beispielsweise dabei helfen, den idealen Zeitpunkt für den Umtrieb auf eine nächste Weide zu identifizieren.

Die agronomische Leistungsfähigkeit wurde in den Studien der Literaturanalyse sowie in allen eigenen Studien (**Hamidi et al. 2022, Hamidi et al. 2023, Hamidi et al. 2024, Grinnell et al. 2025**) über das Körpergewicht der Färsen gemessen. Die Gewichtszunahme der virtuell eingezäunten Tiere entsprach in allen Studien der der physisch eingezäunten Tiere. Die agronomische Leistungsfähigkeit bei einer Beweidung mit einem vf-System ist daher als gewährleistet anzusehen. Mit den genannten Studien wurde D 1.2.2 geliefert. Die Arbeiten zur Erfassung der Betriebsdaten in den Living Labs (**M 1.2.1**) wurde erfolgreich abgeschlossen und D 1.2.1 geliefert.

Im Juli und August 2021 wurden den Praxisakteuren in den Living Labs Südniedersachsen und Wesermarsch der Prototyp des Tierlenkungsdemonstrators vorgestellt. Die Entwicklung betriebsspezifischer Lösungen und Prüfung der Leistungsfähigkeit (**M 1.2.3**) wurde aufgrund der Verzögerungen in der Genehmigung der Tierversuche in dieser Projektphase nicht erreicht.

Über die in der Vorhabenbeschreibung gesetzten Ziele hinaus wurde das virtual-fencing-System nicht nur an Kühen, sondern auch an Ziegen getestet (**Wilms et al. 2024**). Es wurden 20 adulte Ziegen dem Protokoll von **Hamidi et al. (2022)** folgend mit Halsbändern der Firma Nofence traininert. Im Unterschied zu den Studien mit den Färsen handelte es sich hier um adulte Ziegen, von denen die meisten Jungtiere mit sich führten. Die Jungtiere trugen keine Halsbänder und konnten sich daher in der vf-Gruppe weiter von ihren Müttern entfernen als in der pf-Gruppe. Es wurden wie zuvor Daten zur Anzahl der akustischen und elektrischen Signale, FCM-Konzentrationen und Tierverhalten erhoben. Hierbei stellte sich heraus, dass bei Tieren mit einer zu kleinen Körpergröße, bzw. einem besonders

schlanken Hals, die elektrischen Signale nicht an das Tier weitergeleitet wurden, da die Auflagefläche des Impulsgebers zu klein war. Zur Anwendung von Halsbändern eines virtuellen Zaunsystems mit kleineren Tieren besteht demzufolge noch Entwicklungspotenzial. Die Rate der elektrischen zu akustischen Signale nahm mit der Zeit ab, was wie in den Experimenten mit den Färsen auf ein Lernen und Vermeiden des elektrischen Impulses schließen lässt. Die Konzentration der Stresshormone unterschied sich nicht signifikant zwischen den Zaunsystemen. Sie war zu Beginn der Studie am höchsten und nahm über die Zeit ab. Dies deutet darauf hin, dass die Ziegen in beiden Zaunsystemen zu Beginn von der neuen Situation (unbekannte Weide, neue Gruppenzusammensetzung) etwas gestresster waren und sich mit der Zeit daran gewöhnten. In den Verhaltensbeobachtungen wurde deutlich, dass die Ziegen in den vf-Gruppen häufiger und länger Wachsamkeitsverhalten (Stehen mit erhobenem Kopf ohne Kauen, Ohren und Blick in eine Richtung ausgerichtet) zeigten als diejenigen in der pf-Gruppe. Dies könnte auf eine erhöhte Unsicherheit der Tiere in Erwartung der akustischen und elektrischen Signale hindeuten, könnte aber auch durch das Verhalten der Jungtiere beeinflusst worden sein, wenn diese sich von den Muttertieren entfernten, da sie den virtuellen Zaun ungehindert überschreiten konnten. Weitere Studien sind nötig, um herauszufinden, ob virtuelles Zäunen generell mit einer erhöhten Wachsamkeit einher geht oder ob dieses Ergebnis auf die versuchsspezifischen Bedingungen zurückzuführen ist.

**Task 1.4: Rechtliche Implikationen der Erforschung und Entwicklung sowie der Einführung in die landwirtschaftliche Praxis von produktions- und sozio-technischen Innovationen der Grünlandnutzung**

Ein zentraler Bestandteil des Projekts GreenGrass war die umfassende rechtliche Prüfung der Rahmenbedingungen für die Einführung und Anwendung virtueller Zäunungstechnologie in der landwirtschaftlichen Praxis. Ziel war es, bestehende rechtliche Herausforderungen auf nationaler und europäischer Ebene zu identifizieren und darauf aufbauend Lösungsmodelle zu entwickeln, die eine rechtssichere, tierschutzgerechte und praxisnahe Nutzung dieser innovativen Technologie ermöglichen.

Einen Schwerpunkt der Analyse bildet das Tierschutzrecht. Die Anwendung elektrischer Reize zur Verhaltenssteuerung von Tieren ist nach § 3 Nr. 11 Tierschutzgesetz grundsätzlich unzulässig, es sei denn, sie erfolgt im Rahmen einer tierschutzgerechten Ausbildung oder Maßnahme, für die eine Ausnahmegenehmigung besteht. Ob virtuelle Zäune unter diese Ausnahmetatbestände fallen oder als tierschutzkonforme Form der Tierführung anzusehen sind, ist derzeit rechtlich nicht eindeutig geklärt. Die Bewertung hängt unter anderem von der Art, Intensität und Häufigkeit der eingesetzten Reize sowie vom Schulungsstand der Tiere ab.

Ein weiteres zentrales Thema ist das Haftungsrecht. Im Fall technischer Fehlfunktionen – etwa bei GPS-Ausfällen, Softwarefehlern oder mangelnder Akkuleistung – besteht das Risiko, dass Tiere unkontrolliert das Weideareal verlassen, was zu Sachschäden, Verkehrsgefährdungen oder Tierverlust führen kann. Die Frage, wer in solchen Fällen haftet, war differenziert zu beantworten. Im Zusammenhang mit der Haftung steht auch die Frage der Kennzeichnung der virtuell eingezäunten Flächen zum Schutz von Wanderern oder Spaziergänger.

Auf europäischer Ebene fehlt bislang eine spezifische Regulierung für virtuelle Zäunungssysteme. Die Einordnung als Tierhaltungs- oder Kontrolltechnik unterliegt derzeit keiner harmonisierten Norm. Auch Fragen der Produktsicherheit, Konformität mit EU-Richtlinien (CE-Zertifizierung) und Marktüberwachung sind noch nicht einheitlich geregelt, was zusätzliche Unsicherheiten bei der Inverkehrbringung solcher Systeme verursacht.

Vor diesem Hintergrund wurden im AP 1.4 des Projekts GreenGrass mehrere Lösungsmodelle entwickelt, die eine rechtlich fundierte und zugleich praxisgerechte Einführung virtueller Zäunungstechnologie ermöglichen könnten: Anhand einer rechtlichen Klarstellung könnten Anpassungen des Tierschutzgesetzes, eine Neufassung einer Rechtsverordnung oder entsprechender Verwaltungsvorschriften explizit definieren, unter welchen Voraussetzungen der Einsatz virtueller Zäune als tierschutzkonform gilt. Die im Rahmen des Projekts erstellte juristische Ausarbeitung dokumentiert detailliert die bestehende Rechtslage, identifizierte Regelungslücken und konkrete Handlungsempfehlungen für Gesetzgeber, Behörden und Praxisakteure. Die Analyse leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Schaffung eines tragfähigen rechtlichen Rahmens für die Anwendung digitaler Tierhaltungstechnologien im Sinne einer nachhaltigen, effizienten und tiergerechten Landwirtschaft. Insofern wurden die Meilensteine 1.4.1 und 1.4.2. erreicht. Der Bericht stellt die Deliverables 1.4.1 und 1.4.2 dar.

**Koordination**

**Task KM 1.1 Planung des Projekts und der internen und externen Kommunikation**

Die Koordination des GreenGrass-Verbundes war für die zielgerichtete wissenschaftliche und administrative Begleitung der Entwicklungs- und Forschungsaufgaben verantwortlich. Zudem fungierte sie als Verbindungsstelle für die interne und externe Kommunikation. Unmittelbar zu Beginn der 1. Förderphase wurden zwei Kick-off Meetings mit allen konsortialen Projektpartnern und strategischen Partnern durchgeführt (**M KM1.1.1**). Außerdem wurde der Kooperationsvertrag, der die Grundsätze der Nutzungsrechte, der Veröffentlichung der Arbeitsergebnisse und der Vertraulichkeit zwischen den Forschungsinstitutionen und den Wirtschaftspartnern regelt, abgeschlossen (**M KM1.1.2**).

**Task KM 1.2 Projekttracking, Projekt- und Finanzcontrolling und Anpassung**

Im Projektverlauf organisierte die Koordination regelmäßige Online-Meetings (ca. alle 6 Wochen), bei denen aktuelle Arbeiten und die weitere Projektentwicklung diskutiert und abgestimmt wurden. Des Weiteren veranstaltete sie die Jahrestreffen der Verbundpartner. Bedingt durch die Corona-Pandemie konnten die geplanten Jahrestreffen in 2020 und 2021 nur im Online-Format stattfinden. In 2020 wurden zwei Treffen durchgeführt (**M KM1.2.1**) Am Jahrestreffen im Juni 2021 nahmen neben allen Projektpartner*innen und strategischen Partner*innen auch die AdZ-Zentralkoordination und der Projektträger Jülich im Online-Format teil (**M KM1.2.2**). Im Dezember 2022 konnte das Jahrestreffen wieder in Person mit allen Projektpartner*innen in Göttingen stattfinden (**M KM1.2.3**), ebenso wie das weitere Jahrestreffen, das aus organisatorischen Gründen vom Ende des Jahres 2023 auf den Beginn 2024 verlegt wurde (**M KM1.2.4**). Die Jahrestreffen boten allen GreenGrass-Teilprojekten die Möglichkeit, den aktuellen Stand ihrer Arbeiten zu präsentieren. Weiterhin wurden in einer Gesamtdiskussion Ideen zur Weiterentwicklung der vorgestellten Ergebnisse gesammelt und Breakout-Sessions für inter- und transdisziplinär zusammenarbeitende Teilprojekte zur Planung von Technologieentwicklungsschritten, gemeinsamen Experimenten und Feldkampagnen, Veranstaltungen z.B. im Rahmen der Living Lab-Beiratstreffen, Datenaggregation und -austausch sowie zur Planung interdisziplinärer Publikationen veranstaltet. Die Treffen wurden auch genutzt, um Ideen und Strategien für Stellungnahmen zu Gutachterkommentaren, Aufstockungsanträge sowie den Verbundantrag für die zweite Förderphase umfassend zu diskutieren. Zur Einbindung der agrarrechtlichen Expertise in den GreenGrass-Verbund wurden 2022 Verhandlungen mit dem Institut für Landwirtschaftsrecht der Universität Göttingen aufgenommen und der entsprechende Aufstockungsantrag im Herbst/Winter 2022 bewilligt.

Eine weitere wichtige Aufgabe der Koordination war die Planung und Beantragung der genehmigungspflichtigen Tierversuche zur Erprobung von virtuellen Zaunsystemen und Tierlenkungstechnologien. Insgesamt wurden seit Beginn des Projektes vier Genehmigungsverfahren durchlaufen, von denen drei vollumfänglich oder teilweise bewilligt wurden:

- Juni 2020: Teilgenehmigung für Nofence-Trainingsversuch zum virtuellen Zäunen mit 24 Färsen in Relliehausen, Südniedersachsen
- Februar 2021: Vollgenehmigung des Nofence-Umtriebsweideversuches mit virtuellen Zäunen mit 32 Färsen nach Vorlage des Berichts zum Nofence-Trainingsversuches
- Juni 2023: Teilgenehmigung für Versuch zur Beeinflussung des Bewegungsverhaltens von Rindern mithilfe akustischer und taktiler Signale mit 10 Färsen nach Ablehnung des ursprünglichen Tierversuchsantrags (eingereicht im November 2021), der die Anwendung eines elektrischen Impulses als aversivem Reiz vorsah
- Juni 2024: Vollgenehmigung eines Versuchs zur Anwendung kommerzieller virtueller Zäunungstechnologie für Naturschutzaufgaben mit 22 Färsen auf dem Gut Darß, Mecklenburg-Vorpommern

Die Koordination beteiligte sich an internationalen Kooperationen zur Erforschung des virtuellen Zäunens. Im Rahmen der EU-Initiative SuperG hatte sich eine internationale Arbeitsgruppe zu ‚virtual fencing' etabliert, zu der die Göttinger Arbeitsgruppe mit den eigenen Erfahrungen beitragen konnte. Darüber hinaus wurden informelle Partnerschaften mit Universitäten in Südafrika und Ghana eingerichtet. Diese Universitäten sind an der Zäunungstechnologie interessiert und die Arbeitsgruppe in Göttingen pflegt den inhaltlichen Austausch mit dem Ziel, dass zukünftig die Technologie versuchsweise auch im afrikanischen Rangeland angewendet werden kann. Ebenso besteht ein Austausch mit österreichischen Forschungseinrichtungen (insbesondere Veterinärmedizinische Universität Wien) zur Erprobung der Nofence-Technologie an Ziegen. Für diese internationalen Kooperationen bzw. Partnerschaften werden keinen GreenGrass-Ressourcen verwendet.

**Task KM 1.3 Information, Kommunikation und Reporting**

Zur Öffentlichkeitsarbeit verfasste die Koordination verschiedene Fach- und Konferenzbeiträge, um die GreenGrass-Vision und sowie die Chancen Herausforderungen des virtuellen Zäunens für die Weidehaltung darzustellen, und beteiligte sich an medialen Beiträgen, z.B. Horn & Isselstein (2019a,b, 2020), Riesch et al. (2020a,b) (**M KM1.3.1** und **M KM1.3.2**). Außerdem erstellte die Koordination eine projekteigene Website (www.greengrass-project.de) und Social-Media-Auftritte (**M KM1.3.3)** und stellte Bildmaterial und Kurzvideos zu den GreenGrass-Innovationen für verschiedene AdZ-Social-Media- Kampagnen zur Verfügung. Es wurden einige Pressetexte, mediale Beiträge und mehrere Zeitungsartikel veröffentlicht (z.B. bei 3sat nano, f3 farm.food.future, Bioökonomie-Reihe „Köpfe des Wandels", Progressive Agrarwende, Deutschlandfunk, Milchpraxis, Grünland Ratgeber). Für zahlreiche Veranstaltungen (u.a. Nacht des Wissens der Universität Göttingen im Juni 2022, den Natur- und Landwirtschaftstag im Rahmen des Veränderungsdialogs Baden-Württembergs in Bernau im Mai 2023, die Messe Agritechnica in Hannover im November 2023, den Tag der Weidehaltung – Innovation meets Praxis der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsenanhalt in Iden im Mai 2024) wurden Rollups, Poster und Handouts erstellt (**M KM1.3.4**). Außerdem unterstützte die Koordination AP 5 bei der Durchführung von Living Lab Beiratstreffen **(M KM1.3.5-7)** (Juli 2021: zwei Treffen zur Vorführung und fachlichen Diskussion der virtuellen Zäunungstechnologie in Relliehausen, Südniedersachsen, mit jeweils 15 Teilnehmenden aus Landwirtschaft, Forschung, Tierschutz und Naturschutz; August 2021: ein Treffen in der Wesermarsch mit 25 Teilnehmenden; Mai 2022: ein Treffen in Brandenburg (Farmwalk auf Betrieb Agrargesellschaft Netzen) mit ca. 20 Teilnehmenden; Juli 2022: zwei Treffen in

Südniedersachsen, u.a. mit dem Präsidenten und Mitarbeiterinnen des Niedersächsischen Landesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (LAVES), der niedersächsischen Landestierschutzbeauftragten und der Weidegenossenschaft Weideland e.V.). Im August 2022 fand in Zusammenarbeit mit AP 3 ein Workshop zum Software-gestützten Mehrebenen-Informationssystem (SMI) statt (**M KM1.3.8**). Im Rahmen der Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie (GfÖ) im September 2023 in Leipzig organisierte die Koordination eine Session unter dem Titel „Livestock as ecosystem engineers: Digital technologies for sustainable grazing systems". Da die Weiterentwicklung des SMIs dynamisch voranschreitet, wurde von der in Zusammenarbeit mit der BTU Cottbus Senftenberg geplanten Erstellung eines Online-Tutorials für Anwender*innen (**M KM 1.3.9**) vorerst abgesehen. Diese soll nachgeholt werden, sobald eine vorläufige Endversion des SMIs vorliegt. Darüber hinaus ist die Koordination in direkten Austausch mit Vertreter*innen aus Landwirtschaft, Industrie, Politik, Bundes- und Landesministerien, Tierschutz und Naturschutz getreten. Beispielsweise wurden Vorträge auf verschiedenen Fachtagungen des Bioland-Verbands gehalten (Februar 2022 und 2023, Oktober 2024, je 40-80 Teilnehmende: Bioland-Betriebe, Verbraucher*innen). Eine Vielzahl von Unterstützungsschreiben zum Potenzial des virtuellen Zäunens als Zukunftstechnologie für eine nachhaltige, tiergerechte und zukunftsfähige Weidehaltung wurden eingeworben (u.a. DLG-Vorstand, BMEL – Stabstelle Zukunft der Nutztierhaltung, Landwirtschaftskammer Bremen, Praxisakteure der Living Lab Beiräte). Weitere Kooperationen wurden sowohl mit AdZ-Verbundprojekten als auch mit Projekten außerhalb der Fördermaßnahme geknüpft, z.B. „Super-G" (EU Horizon 2020), „Waterbuddies"(BLE), „Grazing4Agroecology" (EU Horizon Europe) und mögliche Projektideen und Workshopformate mit anderen Institutionen (z.B. Grünlandzentrum, Weidewirtschaft Liepen, Referat für Naturschutz der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord) eruiert. Im Laufe des Projekts intensivierte die Koordination die interkonsortiale Zusammenarbeit, u.a. im Rahmen der Ringvorlesung „Global Food, Nutrition and Health" an der Universität Bayreuth (Dezember 2021), die gemeinsam mit der zentralen Koordination der Förderrichtlinie AdZ und den Projekten DAKIS, food4future und NOcsPS durchgeführt wurde. Aufgrund der gemeinsamen Ausrichtung auf landgebundene, landwirtschaftliche Produktion fanden seit Dezember 2021 wiederholt Workshops und Fortbildungen in interdisziplinären Arbeitsgruppen mit DAKIS und NOcsPS statt, um Schnittstellen und Synergiepotenziale der Projekte in Bezug auf die Anwendung von Forschungsmethoden und die Entwicklung von Innovationen für eine zukunftsfähige Landwirtschaft zu identifizieren. Im November 2023 war GreenGrass gemeinsam mit der Zentralkoordination, DAKIS und NOcsPS bei der Agritechnica Messe in Hannover mit einem Infostand und einer Podiumsdiskussion vertreten.

**Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Details zu den Ausgaben sind aus dem zahlenmäßigen Nachweis zu entnehmen, der am 31.08.2025 nachgereicht wird. Die hier aufgeführten Zahlen dienen einer groben Einschätzung.

Investitionen und Verbrauchsmaterialen

Für die Beweidungsversuche wurde zunächst das virtual-fencing-System von Nofence in Norwegen beschafft (Kosten ca. 23.500 €). Das zweite für den Vergleich geplante System eSheperd der australischen Firma Agersens/Gallagher war zu Zeitpunkt der Studien in Deutschland nicht verfügbar. Stattdessen wurden zusätzlich Halsbänder der Firma Monil beschafft (Kosten ca. 25.000 €).

Die Durchführung der Testreihen und Weideexperimente erforderte die Einrichtung einer Weidelogistik, die die Trennung bzw. Sortierung von Tieren in Kleingruppen ermöglicht, also Fang-, Treibe- und Unterstandseinrichtungen. Hierfür wurden Weidezelte sowie Zaunelemente beschafft (Kosten ca. 11.400 €). Zur Überwachung des Stresslevels und des Gesundheitszustandes wurden die Sensoren CowManager und IceTag sowie Polar Equine zur Messung der Herzfrequenz gekauft (Kosten

ca. 35.000 €). Zur Messung der agronomischen Leistungsfähigkeit und dem Vergleich der Futteraufnahme zwischen pf- und vf-Weiden wurden zwei GPS-fähige Rising-Plate-Meter beschafft (Kosten ca. 3.000 €). Des Weiteren wurden für die Versuche Verbrauchsmaterialien wie Sprühfarbe zur individuellen Markierung der Versuchstiere und Batterien benötigt (Kosten ca. 2.000 €). Für Laboranalysen fielen Kosten von ca. 1.400 € an.

Für die Durchführung der Austauschtreffen mit Praxispartner*innen und für Veranstaltungen zur Öffentlichkeitsarbeit waren Ausgaben für Raummieten, Bewirtungs- und Druckkosten notwendig (ca. 4.000 €).

Personalaufwand

Aus dem geplanten Personalaufwand wurden die Stellen der wissenschaftlichen Mitarbeit zu 100 %, fünf Jahre, Postdoc, zur Bearbeitung der Koordination (Task KM 1.1-1.3) sowie zu einzelnen Fragestellungen der Tasks 1.1, 1.2 und 1.3. (insgesamt 120 Personalmonate) vollständig besetzt.

Anstelle der Promotionsstelle zu 50 %, drei Jahre (2020 bis 2022, insgesamt 18 volle Personalmonate) zur Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen zum Einfluss der Tierlenkungstechnologie und des Weidesystems auf das Verhalten der Weidetiere, (Tasks 1.1.7, 1.2.3 und 1.2.4) wurden aufgrund des Arbeitsumfangs und des hohen Potenzials des Themas drei Wissenschaftliche Mitarbeitende eingestellt, was insgesamt einem Umfang von ca. 30 vollen Personalmonaten entspricht. Dafür wurden Mittel aus den Beschäftigungsentgelten (0822) und der Vergabe von Aufträgen (0835) in die Position für Beschäftigte E12-15 (0812) umgeschichtet. Die verbleibenden Mittel für Beschäftigungsentgelte wurden für Wissenschaftliche Hilfskräfte mit B.Sc.-Abschluss zur Unterstützung bei sämtlichen in den Tasks 1 und KM anfallenden Arbeiten verwendet. Die Stelle der wissenschaftlichen Mitarbeit (75 %) zur Bearbeitung sämtlicher Fragestellungen des Tasks 1.4. (insgesamt 14 Personalmonate) wurde erfolgreich besetzt und vollständig in Anspruch genommen.

Für Dienstreisen zur Vorstellung der Untersuchungsergebnisse, zur Datenaufnahme und zur Vernetzung mit den Verbundpartnern fielen Kosten von ca. 48.000 € an.

**Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

GreenGrass hat das Potenzial, dazu beizutragen, dass sich die moderne spezialisierte Wiederkäuerhaltung nicht noch weiter vom Grünland löst. Mithilfe innovativer Tierlenkungs- und Fernerkundungstechnologien bietet sich die Möglichkeit, im Grünland über die gesamte Weidesaison eine optimale Nahrungsversorgung von Milchkühen oder Fleischrindern zu gewährleisten und damit die Produktionsleistung nachhaltig zu steigern. Dadurch wird die Erzeugung hochwertiger Güter aus grünlandbasierter Nutztierhaltung möglich, die den gesellschaftlichen Erwartungen an tiergerechte Nutztierhaltungssystemen entsprechen.

Die Arbeiten in AP 1.1 und AP 1.2 erbrachten den Nachweis, dass virtuelles Zäunen keine negativen Auswirkungen auf das Tierwohl hat und die Verhaltensreaktionen auf elektrische Impulse der Halsbänder vergleichbar mit denen auf elektrische Zäune sind. Die Funktionalität virtueller Zäune war in allen Studien hoch. Mittels genauer Verhaltensuntersuchungen wurde nachgewiesen, dass die Tiere lernten, auf akustische Signale zu reagieren und die elektrischen Impulse zu vermeiden. Es wurden Erkenntnisse erlangt, inwiefern virtuelle Zäune in lokale Weidesysteme integriert werden können und gezeigt, dass Rotationsbeweidung mit virtuellen Zäunen die Erwartungen von Landwirt*innen erfüllen kann. Außerdem eignet sich das System in Kombination mit UAV-gestützter Fernerkundungsdaten dafür, ideale Zeitpunkte zum Umtrieb zu erkennen, was das Weidemanagement erleichtern und verbessern kann. Diese Anwendungen verdeutlichen das Potenzial virtueller Zäune zur Erleichterung der Umsetzung und Ausweitung der weidebasierten Rinderhaltung. Zudem wurden Anforderungen zur

Weiterentwicklung eines integrativen Systems erstellt. Derartige Tierlenkungstechnologie birgt das Potenzial, die Wettbewerbsfähigkeit der Weidewirtschaft nachhaltig zu erhöhen. Die in AP 1.4 gewonnenen Erkenntnisse zu den rechtlichen Implikationen der Erforschung und Entwicklung sowie der Einführung in die landwirtschaftliche Praxis von produktions- und sozio-technischen Innovationen der Grünlandnutzung insbesondere der Tierlenkungstechnologie liefern Forschenden, Behörden und zuständigen Institutionen die erforderlichen sachlichen Argumente in Hinblick auf die geringfügige Belastung (Schmerzen, Schäden, Leiden) der Tiere durch das Tierlenkungssystem. Diese Erkenntnisse sind die Basis nicht nur für die Bewilligung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, sondern auch für eine generelle Zulassung der Technologie in einem Feld mit derzeit mangelnder Rechtspraxis. Damit wird der Transformationsanspruch von GreenGrass abgesichert.

Die Erkenntnisse der ersten Phase von GreenGrass fließen direkt in das Vorhaben für Phase 2 ein, in der die Technologien und Ansätze verfeinert und unter einem breiteren Spektrum von Bedingungen sowie für verschiedene Einsatzgebiete (z.B. Naturschutz, Milchviehwirtschaft) getestet werden.

**Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung**

Zu Projektbeginn war für virtuelle Zaunsysteme vornehmlich der norwegische Anbieter Nofence bekannt. Das Hütesystem von Nofence ist seit 2017 in Norwegen für Ziegen zugelassen, seit 2020 auch für Kühe und Schafe. Bereits in frühen Studien des Herstellers konnte eine hohe Funktionalität der Halsbänder nachgewiesen werden (keine Ausbrüche über 11 Tage Trainingsdauer) (Eftang & Bøe 2019). Weitere Studien mit anderen Systemen des virtuellen Zäunens, z.B. eSheperd der australischen Firma Agersens (Technologie seit 2021 übernommen von Gallagher), wurden im Literaturreview zu **M.1.1.1** (**Horn & Isselstein 2022**) analysiert. Sie zeigten alle eine hohe Effizienz darin, die Tiere in der Weide zu halten (Lomax et al., 2019b; Campbell et al., 2017; Campbell et al., 2019a; Campbell et al., 2019b; Campbell et al., 2020; Keshavarzi et al., 2020). In allen Studien war eine deutliche Abnahme insbesondere der elektrischen Signale vom ersten bis zum letzten Trainingstag sichtbar, wobei die Anzahl der elektrischen Impulse pro Tier und Tag tendenziell etwas höher ausfiel verglichen mit dem Nofence-System (Lee et al., 2009; Lomax et al., 2019a/b; Campbell et al., 2018; Campbell et. al., 2020; Verdon et al., 2020). Es wurden keine extremen aversiven Reaktionen auf den unmittelbaren Kontakt mit dem virtuellen Zäunungssystem (z.B. Durchgehen, Lautäußerungen, im Kreis drehen, Ausbrechen) festgestellt und die Reaktionen nach unmittelbarem Kontakt mit dem elektrischen Impuls des virtuellen Zaunes wurden als vergleichbar mit denen bei Kontakt mit dem physischen E-Weidezaun eingestuft. Diese Ergebnisse wurden in der Meta-Studie von **Wilms et al. (2024)** bestätigt, in der 13 separate, bis einschließlich 2022 veröffentlichte Untersuchungen zu virtuellen Zäunen einflossen.

Goliński et al. (2022) und Waterhouse (2023) beschreiben in ihren Reviews vier der marktführenden virtuellen Zaunsysteme. Neben Nofence und eSheperd sind dort Vence und Halter aufgeführt. Die zugrundeliegende Funktionsweise ist bei allen Herstellern gleich: Die Halsbänder sind GPS-gesteuert, senden akustische Vorwarnsignale und elektrische Impulse mit einer Energie zwischen 0.18 und 0.20 J (keine Angaben für eSheperd). Die Preise unterscheiden sich jedoch (Stand 12/2024: Vence: 35 € pro Halsband und Jahr plus 9 € Batterie-Gebühr pro Jahr und 9.000 € bis 11.000 € für die Basistation, eSheperd: 314–224 €, abhängig von der Anzahl der Halsbänder, zusätzlich 5400 € für die Basisstation und Telekommunikationsgebühr von 1,35–1,80 € pro Halsband und Monat, Halter: Leasing: 54 € pro Halsband und Jahr plus 2700 € für die Basisstation, Nofence: 265 € pro Halsband für Rinder, 185 € für Schafe und Ziegen plus max. 52 € pro Halsband jährliche Gebühr für die Datenübertragung (Stand 12/2024). Ein sehr neuer Anbieter ist die norwegische Firma Monil, die 2022 von einem Ingenieursteam mit Erfahrung in Mikro- und Low-Power-Elektronik gegründet wurde. Sie entwickelten ein sehr leichtes VF-Halsband, bei dem das Solarmodul nicht wie bei Nofence unter dem Hals des Tieres hängt, sondern auf dem Nacken aufliegt. Dadurch ist optimale Sonneneinstrahlung gewährleistet.

Zusammen mit der effizienten Batterieleistung ergibt sich bei Monil aufgrund dieser Bauweise eine deutlich längere Leistungsdauer der Halsbänder, sodass Halsbandwechsel zum Aufladen der Akkus während der Weidesaison entfallen. Außerdem ist die Energie des elektrischen Impulses bei Monil mit 0.1 J geringer als bei anderen virtuellen Zäunungssystemen. Aufgrund dieser Vorteile wurden im Laufe des Projekts zusätzlich Halsbänder von Monil angeschafft, um mit diesem System weitere Versuche durchzuführen. Bisher wurden noch keine Studien zum Einsatz von Halsbändern der Firma Monil publiziert. Aktuell vertreibt Monil seine Halsbänder für Rinder zum Preis von ca. 400 € plus einer jährliche Nutzungsgebühr von 50 €. Eine Version für Schafe und Ziegen ist in der Entwicklung und soll 2026 auf den Markt kommen.

Bis zum Jahr 2020 waren Forschungsarbeiten zum virtuellen Zäunen in der EU sowie in Australien im Stadium des Nachweises der Erlernbarkeit sowie der Unbedenklichkeit Technologie bezüglich des Tierwohls. Dabei wurden einfache Versuchssettings (Versuchsarena/-parcours oder Standweide) mit einer statischen virtuellen Grenze an einer Seite der Versuchskoppel betrachtet. Die Studien in GreenGrass waren einige der ersten, die das volle Potenzial des virtuellen Zäunens hinsichtlich seines flexiblen Einsatzes in einem praxisnahen Umtriebsweidesystem untersuchten und eine vollständig virtuelle Zäunung (alle vier Seiten) der Koppelflächen durchführten. Im Verlauf des Projekts wurden von verschiedenen andere Arbeitsgruppen Studien zum virtuellen Zäunen durchgeführt und publiziert, was die Relevanz dieses Themas unterstreicht. Es sind erste Studien zum über wenige Tage oder Wochen hinausgehenden Langzeiteinsatz virtueller Zäunungstechnologie für Rinder erschienen (Aaser et al. 2022: 139 Tage; Staahltoft et al. 2023: 88 Tage; Fuchs et al. 2024: 56 Tage). Alle diese Studien wurden mit dem Nofence-System durchgeführt. In keiner der Studien wurden Hinweise gefunden, dass sich bei langfristiger Anwendung virtueller Zäunungstechnologie negative Effekte in Bezug auf das Verhalten der Tiere, das Tierwohl und die Stressbelastung ergeben.

Nachdem die Anwendbarkeit der virtuellen Zäunungstechnologie für Maßnahmen zur Landschaftspflege und Habitatrestaurierung zunächst nur diskutiert wurde (Umstätter 2011; Campbell et al., 2018), fanden in den letzten Jahren weltweit erste Anwendungsversuche statt. In einer frühen Studie setzten Campbell et al. (2020) in Australien eSheperd-Halsbänder ein, um Rinder von einer Fläche mit jungen Eukalyptus-Sträuchern fernzuhalten. Boyd et al. (2023) nutzten das System von Vence, um mit Mutterkuh-Kalb-Pärchen und nicht-laktierenden Kühen einen hohen Beweidungsdruck auf Feuerschutzstreifen in einem Steppengebiet im Westen der USA zu erhalten. Die Studien von u.a. Aaser et al. (2022, 2024), Staahltoft et al. (2023) und Lund et al. (2024), wurden alle mit der Nofence-Technologie im 'Projekt Virtuelt Hegn, Fanø' auf der dänischen Insel Fanø durchgeführt. Dort wird extensiv beweidet, um die charakteristische Vegetation der Insel im Wattenmeer zu erhalten. Das fünfjährige Projekt fokussierte sich jedoch weniger auf spezielle Naturschutzaufgaben als auf das Lern- und Bewegungsverhalten und die Stressbelastung der Tiere.

Ein besonderes Interesse von GreenGrass lag darin, die Reaktionen von Rindern auf richtungsweisende Impulse zu untersuchen. Unsere kontinuierlichen Marktbeobachtungen und Literaturrecherchen ergeben bisher nur einen Hinweis auf eine andere Arbeitsgruppe, die an virtuellen Zäunen mit richtungsweisenden Stimuli für die Tiere arbeitet. Verdon et al. (2024) veröffentlichten eine Studie mit dem neuseeländischen System Halter, das vor allem für Anwendung in der intensiven, weidebasierten Milchviehwirtschaft konzipiert wurde. Die Halter-Halsbänder können das Audiosignal, das die virtuelle Grenze ankündigt, auf der rechten oder linken Seite abspielen, je nachdem, in welche Richtung das Tier gehen muss, um wieder zurück in die Weidefläche zu kommen. Um die Kühe gezielt zur Rückkehr zum Melkstand zu bewegen, wurde darüber hinaus eine virtuelle Hütefunktion entwickelt, bei der die Rinder mittels Vibration aufgefordert werden, sich zu bewegen und mittels der zweiseitigen akustischen Signale in die richtige Richtung gelenkt werden. Das Halter-System ist allerdings nicht auf dem europäischen Markt verfügbar.

**Veröffentlichungen**

**Peer-reviewte Paper:**


- Grinnell, N. A., Hamidi, D., Komainda, M., Riesch, F., Horn, J., Traulsen, I., Palme, R., & Isselstein, J. (2025). Supporting rotational grazing systems with virtual fencing: paddock transitions, beef heifer performance, and stress response. animal, 19(2), 101416. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101416.
- Grinnell, N. A., Komainda, M., Tonn, B., Hamidi, D., & Isselstein, J. (2023). Long-term effects of extensive grazing on pasture productivity. Animal Production Science, 63(12), 1236-1247. https://doi.org/10.1071/AN22316.
- Hamidi, D., Grinnell, N. A., Komainda, M., Riesch, F., Horn, J., Ammer, S., … & Isselstein, J. (2022). Heifers don't care: no evidence of negative impact on animal welfare of growing heifers when using virtual fences compared to physical fences for grazing. animal, 16(9), 100614. https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100614.
- Hamidi, D., Grinnell, N. A., Komainda, M., Wilms, L., Riesch, F., Horn, J., Hamidi, M., Traulsen, I., & Isselstein, J. (2024). Training cattle for virtual fencing: Different approaches to determine learning success. Applied Animal Behaviour Science, 273, 106220. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2024.106220.
- Hamidi, D., Hütt, C., Komainda, M., Grinell, N.A., Horn, J., Riesch, F., Hamidi, M., Traulsen, I., and Isselstein, J. (2023): Grid grazing: A case study on the potential of combining virtual fencing and remote sensing for innovative grazing management on a grid base. Livestock Science 278, 105373, https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105373.
- Hamidi, D., Komainda, M., Tonn, B., Harbers, J., Grinnell, N. A., & Isselstein, J. (2021). The effect of grazing intensity and sward heterogeneity on the movement behavior of suckler cows on semi-natural grassland. Frontiers in Veterinary Science, 8. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.639096.
- Horn, J., & Isselstein, J. (2022). How do we feed grazing livestock in the future? A case for knowledge-driven grazing systems. Grass and Forage Science, 77(3), 153–166. https://doi.org/10.1111/gfs.12577.
- Hütt, C., Isselstein, J., Komainda, M., Schöttker, O., & Sturm, A. (2024). UAV LiDAR-based grassland biomass estimation for precision livestock management. Journal of Applied Remote Sensing, 18(1), 017502-017502. https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.017502.
- Schmiedgen, A., Komainda, M., Kowalski, K., Hostert, P., Tonn, B., Kayser, M. & Isselstein, J. (2021). Impacts of cutting frequency and position to tree line on herbage accumulation in silvopastoral grassland reveal potential for grassland conservation based on land use and cover information. Ann Appl Biol aab.12681. https://doi.org/10.1111/aab.12681.
- Wätzold, F., Jauker, F., Komainda, M., Schöttker, O., Horn, J., Sturm, A., & Isselstein, J. (2024). Harnessing virtual fencing for more effective and adaptive agri-environment schemes to conserve grassland biodiversity. Biological Conservation, 297, 110736. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110736.
- Wilms, L., Hamidi, D., Lüntzel, C. H. U., Hamidi, M., Komainda, M., Palme, R., Isselstein, J., Waiblinger, S., & Egerbacher, M. (2025). Assessing learning, behaviour, and stress level in goats while testing a virtual fencing training protocol. animal, 19(2), 101413. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101413.
- Wilms, L., Komainda, M., Hamidi, D., Riesch, F., Horn, J., & Isselstein, J. (2024). How do grazing beef and dairy cattle respond to virtual fences? A review. Journal of Animal Science, 102, skae108. https://doi.org/10.1093/jas/skae108.

**Konferenzbeiträge:**


- Baumann K, Jauker F, Hamidi, D., Komainda M, Bolten A, Hütt C, Isselstein J, Bareth G, Wolters V (2023). Towards precision grazing: Spatio-temporal dynamics of the relation between cattle, vegetation, and arthropod abundance. 52nd annual meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland.
- Baumann, K., Komainda, M., Lussem, U., Hütt, C., Isselstein, J., Wolters, V. & Jauker, F. (2021) Using remotely-sensed vegetation structure to explain arthropod abundance patterns in grasslands. 50th annual meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland.
- Grinnell N. A., Hamidi D., Riesch F., Horn J., Komainda M., Ammer S., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Nutzung von Smart Farming Sensoren in der Weidehaltung von Rindern. 15. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. 70-74.
- Grinnell N. A., Komainda M., Tonn B., Hamidi D., Isselstein J. (2022) Extensively managed grasslands: productivity after more than a decade without fertilizer input. Grassland Science in Europe 27, 161-163.
- Grinnell, N., Hamidi, D., Horn, J., Riesch, F., Komainda, M., Ammer, S., Traulsen, I. & Isselstein, J. (2021). The effect of virtual fencing technology on grazing behavior: differences in herbage consumption and grazing patterns. Grassland Science in Europe 26: 181-183.
- Grinnell, N., Hamidi, D., Riesch, F., Horn, J., Komainda, M., Ammer, S., Traulsen, I. & Isselstein, J. (2021). Testing the viability of of a precision dairy ear sensor technology in recording grazing time. Grassland Science in Europe 26: 205-207.
- Grinnell, N.A.,Hamidi, D, Komainda, M, Riesch, F, Horn, J, Palme, R, Isselstein, J. (2023). Rotational stocking with virtual fences: effects on grassland diet digestibility, livestock performance and stress levels of heifers. International Grassland Congress, May 14-19, 2023, Kentucky, USA.
- Hamidi D., Grinnell N. A., Horn J., Riesch F., Komainda M., Ammer S., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Virtuelles Zäunen: Brauchen Rinder sichtbaren Zäune? 15. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. 95-98.
- Hamidi D., Hütt C., Komainda M., Grinnell N. A., Horn J., Riesch F., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Spatial distribution of virtually and physically fenced cattle in relation to forage availability. Grassland Science in Europe 27, 599-601.
- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Horn J., Riesch F., Ammer S., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Effects of electrical impulses on cattle grazing behaviour: virtual vs. physical fencing. Grassland Science in Europe 27, 602-604.
- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Horn J., Riesch F., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Veränderungen im Tierverhalten als Umtriebsindikation. Internationale Weidetagung 2022, Grenzen und Möglichkeiten der Weidehaltung im Berggebiet, 25.
- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Horn J., Riesch F., Hamidi, M., Ammer S., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Ruhen auf der Weide – Möglichkeiten der Detektion mit Hilfe von GPS Daten aus virtuellen Zäunungshalsbändern. Internationale Weidetagung 2022, Grenzen und Möglichkeiten der Weidehaltung im Berggebiet, 77.
- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Riesch F., Horn J., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J. (2022). Virtuelles Zäunen: Chancen für eine verbesserte Tierüberwachung? Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau, Grünland im Spannungsfeld Forschung, Wissenstransfer und öffentliche Wahrnehmungen 65, 97-99.
- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Riesch F., Horn J., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J. (2023). More than a fencing system? Testing the validity of virtual fencing collars for cattle monitoring on pasture. 25. International Grassland Congress, May 14-19, 2023, Kentucky, USA.

- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Riesch F., Horn J., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J. (2023). Monitoring animal movements by virtual fencing collars – a comparison of different time intervals. 74. Annual Meeting, European Federation of Animal Science, August 26th – September 1st, 2023, Lyon, France, 247.
- Hamidi D., Komainda M., Grinnell N. A., Wilms L., Riesch F., Horn J., Hamidi, M., Traulsen I., Isselstein J., (2023). Virtual fencing predictable for cattle? 25. International Grassland Congress, May 14-19, 2023, Kentucky, USA.
- Hamidi D., Komainda M., Tonn B., Harbers J., Grinnell N. A., Isselstein J. (2021). Movement behaviour of cattle analysed with GPS data as affected by three different grazing intensities. Grassland Science in Europe 26, 175-177.
- Hamidi, D. Grinnell, N.A., Komainda, M., Wilms, L., Riesch, F., Horn, J., Hamidi, M., Traulsen, I., Isselstein, J. (2024). The confidence ratio: an approach to calculate the confidential learning of the virtual fencing system. 75th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), September 01-05, 2024, Florence, Italy.
- Hamidi, D., Grinnell, N., Horn, J., Riesch, F., Komainda, M., Ammer, S., Traulsen, I. & Isselstein, J. (2021). Training cattle with virtual fences on permanent pastures. Grassland Science in Europe 26: 187-189.
- Hamidi, D., Grinnell, N.A., Komainda, M., Wilms, L., Riesch, F., Horn, J., Hamidi, M., Traulsen, I., Isselstein J., The visibility of the invisible: Analysing heifers reactions while learning the virtual fence system. 74. Annual Meeting, European Federation of Animal Science, August 26th – September 1st, 2023, Lyon, France, 443.
- Hamidi, D., Hütt, C., Komainda, M., Grinnell, N.A., Horn, J., Riesch, F., Hamidi, M., Traulsen, I., Isselstein, J. (2024). Asking grazing cattle – using virtual fencing collars to make herbage on offer dynamics visible. "Why grassland" General Meeting of the European Grassland Federation, 9– 13 June 2024, Netherlands.
- Harbers, J., Komainda, M., Tonn, B. & Isselstein, J. (2019). Einfluss von Witterungsfaktoren auf das Verhalten von Mutterkühen auf extensiver Standweide. In: Grünland 2050. Beiträge zur 63. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau: 85-88.
- Horn J., Riesch R., Komainda M., Riedel P., Isselstein J., (2023). Herding livestock – the phoenix rises from the ashes? Digital herding as a future tool for grazing livestock. 25. International Grassland Congress, May 14-19, 2023, Kentucky, USA.
- Horn, J. & Isselstein, J. (2019a). Nutztiersysteme auf dem Prüfstand: Mehr Nachhaltigkeit in der Weidebewirtschaftung durch einen integrativen Ansatz. In: Grünland 2050. Beiträge zur 63. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau: 101-104.
- Horn, J. & Isselstein, J. (2019b). Perspektiven innovativer Technologien in einem integrativen Ansatz für eine nachhaltigere Weidebewirtschaftung. Vortrag zur Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie 2019, Münster.
- Horn, J. & Isselstein, J. (2020). How to get cows back to pasture? Current trends in livestock systems and perspectives for improving grazing system with a holistic framework. Grassland Science in Europe 25: 650-652.
- Horn, J. & Isselstein, J. (2021). Where is the livestock future – plate- or land-based? The potential of knowledge-based, holistic grazing concepts for altering grazing livestock systems. The Joint International Grassland and International Rangeland Congress 2021.
- Horn, J., Riesch, R., Komainda, M, Isselstein, J. (2022). Digitale Hütesysteme als innovative Tools für eine zukunftsfähige Weidehaltung von Wiederkäuern zur Erhaltung der traditionellen Almwirtschaft. Internationale Weidetagung 2022. Grenzen und Möglichkeiten der Weidehaltung im Berggebiet, 61.
- Jauker F., Baumann K., Komainda M., Bolten A., Hütt C., Isselstein J., Bareth G., Wolters V. (2023b) Towards precision grazing: Spatio-temporal dynamics of the relation between cattle, vegetation, and arthropod abundance. 52nd annual meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland.

- Jauker F., Hamidi D., Hütt C., Baumann K, Komainda M., Bolten A., Bareth G., Isselstein J., Wolters V. (2023a). Structural diversity concepts for precision grazing aided by remote sensing. 52nd annual meeting of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland.
- Jauker, F., Hamidi, D., Baumann, K., Komainda, M., Hütt, C., Isselstein, J., Wolters, V. (2022). Precision grazing for biodiversity? Spatio-temporal scales of grazing effects on vegetation structure and arthropod abundance. 51. GfÖ Jahrestagung, Metz, Frankreich.
- Riesch, F., Komainda, M., Horn, J. & Isselstein, J. (2020a). Pastures of the future: prospects for virtual fencing to promote grazing in European dairy farming. Grassland Science in Europe 25: 671-673.
- Riesch, F., Komainda, M., Horn, J. & Isselstein, J. (2020b). Grüne Aussichten: mehr Weidegang für Milchkühe durch virtuelle Zäune? In: Chancen der Wertschöpfung, Probleme der Wertschätzung im Grünland, Beiträge zum Sonderband des Online-Workshops der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau: 9-12.
- Riesch, F., Komainda, M., Horn, J. & Isselstein, J. (2021). Real-world applications for virtual fences – what are potential benefits for conservation? The Joint International Grassland and International Rangeland Congress 2021.
- Wilms, L., Hamidi, D., Lüntzel, C.H.U., Isselstein, J., Waiblinger, S., Egerbacher, M., (2024). Training goats to virtual fencing. "Why grassland" General Meeting of the European Grassland Federation, 9– 13 June 2024, Netherlands.


**Geplante Beiträge und Veröffentlichungen:**


- Hamidi, D., Grinnell, N. A., Hütt, C., Hamidi, M., Komainda, M., Riesch, F., Horn, J, Traulsen, I., & Isselstein, J. (o.D.). Mind the gap? Spatial behaviour of virtually compared to physically fenced heifers. 76. Annual Meeting, European Federation of Animal Science, 25.-29. August 2025, Innsbruck, Österreich.
- Jauker, F., Hamidi, D., Hütt, C., Baumann, K., Komainda, M., Bolten, A., Bareth, G., Isselstein, J., & Wolters, V. (o.D.). Towards precision grazing: Spatio-temporal dynamics of the relation between cattle, vegetation, and arthropods. Unter Begutachtung bei Basic and Applied Ecology (eingereicht 10.06.2025).
- Riesch, F. Möck, M. Feindt, P., Balkenhol, N. van Beeck Calkoen, S., Bojarska, K., Gerber, N., Herzog, S., Zetsche M., Isselstein, J. (2025): How to reconcile pasture grazing with wolf recolonisation? Perceptions of management options by livestock farmers in Germany. Unter Begutachtung bei People and Nature (eingereicht nach Überarbeitung 29.05.2025).
- Wilms, L., Horn, J., Riesch, F., Hamidi, D., Komainda, M., Hamidi, M., & Isselstein, J. (o.D.). Investigating cattle responses to acoustic signals to extend the functions of virtual fencing collars. Unter Begutachtung bei Livestock Science (eingereicht 11.04.2025).


**Sonstige Veröffentlichungen und Berichte:**


1. Horn, J. (2020). Revolution in der Weidehaltung? Allgäuer Bauernblatt, 19/2020: 22-25.
2. 3sat nano (16.10.2020). Kühe per Smartphone fernsteuern. https://www.3sat.de/wissen/nano/kuehe-per-smartphone-fernsteuern-100.html
3. Grabmeier, A. (11.11.2020). Virtuelle Zäune: Die Weidehaltung der Zukunft? argraheute. https://www.agrarheute.com/tier/rind/virtuelle-zaeune-weidehaltung-zukunft-574850
4. Horn, J. (2021). Nachhaltige Weidehaltung – Innovationsschub als Schlüssel. Progressive Agrarwende https://progressive-agrarwende.org/nachhaltige-weidehaltung-innovationsschub-als-schluessel/

5. Horn, J. & Isselstein, J. (2021). Back to the roots: Weidehaltung mit Innovationsschub. Wissenschaftsjahr 2020I2021 Bioökonomie in der Reihe: Köpfe des Wandels, https://www.wissenschaftsjahr.de/2020-21/aktuelles/koepfe-des-wandels/back-to-the-roots-weidehaltung-mit-innovationsschub
6. Schulze-Stumpenhorst, C. (30.03.2021). Zaunbau per App. f3 farm.food.future. Landwirtschaftsverlag GmbH. Online- und Printversion. Interview Juliane Horn: https://f3.de/story/zaunbau-app-1266.html
7. Seeland, K. (2021). Wiederkäuer zurück auf die Weide. Nordwest-Zeitung, Sonderbeilage Landwirtschaft 01/2021: 8-9.
8. Horn, J. (2022). Effizient und nachhaltig weiden mit unsichtbarem Zaun. Grünland Ratgeber, 22-24.
9. Jordan, K.P. (12.05.2022). Vernetzte Kühe und virtuelle Zäune. Nordwest-Zeitung. https://www.nwzonline.de/wirtschaft/ovelgoenne-vernetzte-kuehe-und-virtuelle-zaeune_a_51,7,1870140756.html
10. Pagenkemper, S. & Horn, J. (2022). Wie Innovationen die Weidehaltung vor dem Aussterben retten. Milchpraxis (1/2022) (56. Jg.).
11. querFELDein-Podcast (17.05.2022). Wie sieht die Landwirtschaft in Brandenburg 2050 aus? (Isselstein, J.) https://www.quer-feld-ein.blog/podcasts/querfeldein-podcast/
12. Holzminden News (07.08.2022). Beirat und Mitarbeiter der Forschungsgruppe „GreenGrass“ besuchen den Naturpark Solling-Vogler. https://www.holzminden-news.de/region-aktiv/10632-neuhaus-erprobung-virtueller-weidesysteme-eine-vision-fuer-die-zukunft
13. leinetal24 (09.08.2022). GreenGrass im Solling-Vogler. https://www.leinetal24.de/lokales/landkreis-northeim/greengrass-im-naturpark-solling-vogler-91715329.html, zuletzt abgerufen am: 14.07.2023
14. Einbecker Morgenpost (11.08.2022). Virtuelle Weidesysteme – eine Vision? Beirat und Mitarbeiter der Forschungsgruppe »GreenGras« besuchen Naturpark. https://www.einbecker-morgenpost.de/region/nachricht/virtuelle-weidesysteme-eine-vision.html
15. Deutschlandfunk, Das Wochenendjournal (21.08.2022, 9:10 Uhr). Digital vom Melken bis zur Aussaat: Landwirtschaft 4.0. https://www.deutschlandfunk.de/audiothek
16. AdZ Interview zur COP-Serie (17.11.2022). Horn, J. Mit unsichtbaren Zäunen die Weidehaltung wiederbeleben. https://agrarsysteme-der-zukunft.de/news/2022-11-17-mit-unsichtbaren-zaunen-die-weide-wiederbeleben
17. Unterwegs im Naturpark Solling-Vogler, Newsletter Ausgabe 2024/2: Virtuelle Zaunsystem – Eine Vision für die Zukunft? https://www.naturpark-solling-vogler.de/.

**Anhang: Zitierte Literatur**

Aaser, M. F., Staahltoft, S. K., Korsgaard, A. H., Trige-Esbensen, A., Alstrup, A. K. O., Sonne, C., ... & Linder, A. C. (2022). Is virtual fencing an effective way of enclosing cattle? Personality, herd behaviour and welfare. Animals, 12(7), 842.

Animal Welfare Committee, 2022. [Internet], Opinion on the welfare implications of using virtual fencing systems to contain, move and monitor livestock. [cited 2023 Jan 18] available from: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1109654/awc-opinion-virtual-fencing-221005.pdf

Bishop-Hurley, G. J., Swain, D. L., Anderson, D. M., Sikka, P., Crossman, C., & Corke, P. (2007). Virtual fencing applications: Implementing and testing an automated cattle control system. *Computers and Electronics in Agriculture*, *56*(1), 14-22.

Boyd, C. S., O'Connor, R. C., Ranches, J., Bohnert, D. W., Bates, J. D., Johnson, D. D., ... & Doherty, K. E. (2023). Using virtual fencing to create fuel breaks in the sagebrush steppe. Rangeland Ecology & Management, 89, 87-93.

Campbell, D. L., Haynes, S. J., Lea, J. M., Farrer, W. J., & Lee, C. (2018). Temporary exclusion of cattle from a riparian zone using virtual fencing technology. Animals, 9(1), 5.

Campbell, D. L., Haynes, S. J., Lea, J. M., Farrer, W. J., & Lee, C. (2019a). Temporary exclusion of cattle from a riparian zone using virtual fencing technology. Animals, 9(1), 5.

Campbell, D. L., Lea, J. M., Farrer, W. J., Haynes, S. J., & Lee, C. (2017). Tech-savvy beef cattle? How heifers respond to moving virtual fence lines. Animals, 7(9), 72.

Campbell, D. L., Lea, J. M., Keshavarzi, H., & Lee, C. (2019b). Virtual fencing is comparable to electric tape fencing for cattle behavior and welfare. Frontiers in Veterinary Science, 6, 445.

Campbell, D. L., Ouzman, J., Mowat, D., Lea, J. M., Lee, C., & Llewellyn, R. S. (2020). Virtual Fencing Technology Excludes Beef Cattle from an Environmentally Sensitive Area. Animals, 10(6), 1069.

Eftang S.& Bøe K.E. (2019). Virtual fences on cattle –studies on heifers 2018. Report: 33pp.

FAO. (2017). *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. FAOSTAT Database.Knaus 2016

Fuchs, P., Stachowicz, J., Schneider, M. K., Probo, M., Bruckmaier, R. M., & Umstätter, C. (2024). Stress indicators in dairy cows adapting to virtual fencing. Journal of animal science, 102, skae024.

Goliński, P., Sobolewska, P., Stefańska, B., & Golińska, B. (2022). Virtual fencing technology for cattle management in the pasture feeding system—a review. Agriculture, 13(1), 91.

Keshavarzi, H., Lee, C., Lea, J. M., & Campbell, D. L. (2020). Virtual fence responses are socially facilitated in beef cattle. Frontiers in Veterinary Science, 7, 711.

Lee, C., Henshall, J. M., Wark, T. J., Crossman, C. C., Reed, M. T., Brewer, H. G., ... & Fisher, A. D. (2009). Associative learning by cattle to enable effective and ethical virtual fences. Applied Animal Behaviour Science, 119(1-2), 15-22.

Lomax, S., Colusso, P., & Clark, C. E. (2019a). Does Virtual Fencing Work for Grazing Dairy Cattle? Animals, 9(7), 429.

Lomax, S., Colusso, P., Gargulio, J., & Clark, C. (2019b). Determining learning and behavioural response to a virtual fence for dairy cows. Animals, 9, 429.

Lund, S. M., Jacobsen, J. H., Nielsen, M. G., Friis, M. R., Nielsen, N. H., Mortensen, N. Ø., ... & Pertoldi, C. (2024). Spatial Distribution and Hierarchical Behaviour of Cattle Using a Virtual Fence System. Animals, 14(14), 2121.

Lyseng, M. P., Bork, E. W., Hewins, D. B., Alexander, M. J., Carlyle, C. N., Chang, S. X., & Willms, W. D. (2018). Long-term grazing impacts on vegetation diversity, composition, and exotic species presence across an aridity gradient in northern temperate grasslands. *Plant Ecology*, **219**(6), 649–663.

Pulido, M., Schnabel, S., Lavado Contador, J. F., Lozano-Parra, J., & González, F. (2018). The impact of heavy grazing on soil quality and pasture production in rangelands of SW Spain. *Land Degradation & Development*, **29**(2), 219–230.

Rico, Y., Boehmer, H. J., & Wagner, H. H. (2013). Effect of rotational shepherding on demographic cand genetic connectivity of calcareous grassland plants. *Conservation Biology*, **28**, 467–477.

Sitters, J., & Olde Venterink, H. (2021). Stoichiometric impact of herbivore dung versus urine on soils and plants. *Plant and Soil*, **462**(1), 59–65.

Socher, S. A., Prati, D., Boch, S., Müller, J., Baumbach, H., Gockel, S., Hemp, A., Schöning, I., Wells, K., Buscot, F., Kalko, E. K. V., Linsenmair, K. E., Schulze, E. D., Weisser, W. W., & Fischer, M. (2013). Interacting effects of fertilization, mowing and grazing on plant species diversity of 1500 grasslands in Germany differ between regions. *Basic and Applied Ecology*, **14**(2), 126–136.

Staahltoft, S. K., Aaser, M. F., Jensen, J. N. S., Zadran, I., Sørensen, E. B., Nielsen, A. E., ... & Pertoldi, C. (2023). The effectiveness of virtual fencing of bull calves in a holistic grazing system. Animals, 13(5), 917.

Stevens, D. R., Thompson, B. R., Johnson, P., Welten, B., Meenken, E., & Bryant, J. (2021). Integrating digital technologies to aid grassland productivity and sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 602350.

Umstätter C. (2011). The evolution of virtual fences: a review. Computer and Electronics in Agriculture 75: 10-22.

van den Pol-van Dasselaar, A., Hennessy, D., & Isselstein, J. (2020). Grazing of dairy cows in Europe—An in-depth analysis based on the perception of grassland experts. *Sustainability*, *12*(3), 1098.

Varga, A., Demeter, L., Ulicsni, V., Öllerer, K., Biró, M., Babai, D., & Molnár, Z. (2020). Prohibited, but still present: Local and traditional knowledge about the practice and impact of forest grazing by domestic livestock in Hungary. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, **16**(1), 1–12.

Verdon, M., Lee, C., Marini, D., & Rawnsley, R. (2020). Pre-exposure to an electrical stimulus primes associative pairing of audio and electrical stimuli for dairy heifers in a virtual fencing feed attractant trial. Animals, 10(2), 217.

Verdon, M., Hunt, I., & Rawnsley, R. (2024). The effectiveness of a virtual fencing technology to allocate pasture and herd cows to the milking shed. Journal of Dairy Science, 107(8), 6161-6177.

Waterhouse, T. (2023). Virtual fencing systems: balancing production and welfare outcomes. Livestock, 28(5), 227-234.

Wolters, V., Isselstein, J., Stützel, H., Ordon, F., von Haaren, C., Schlecht, E., ... & Seppelt, R. (2014). Nachhaltige ressourceneffiziente Erhöhung der Flächenproduktivität: Zukunftsoptionen der deutschen Agrarökosystemforschung Grundsatzpapier der DFG Senatskommission für Agrarökosystemforschung. Journal für Kulturpflanzen, 66(7), 225-236.