

Bericht

**des Ausschusses für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung**

Technikfolgenabschätzung (TA)

Digitalisierung der Landwirtschaft: technologischer Stand und Perspektiven

Endbericht Teil I

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses.....	5
Zusammenfassung.....	9
1 Einleitung.....	16
2 Sensoren.....	19
2.1 Grundlagen der Sensortechnik und -systeme.....	19
2.1.1 Sensortypen und Messprinzipien.....	19
2.1.2 Sensordatenverarbeitung und -interpretation.....	21
2.1.3 Einsatzbereiche von Sensoren.....	22
2.1.4 Verfahren der Sensordatennutzung.....	22
2.2 Sensoren in der Pflanzenproduktion.....	24
2.2.1 Bodensensoren.....	24
2.2.2 Stickstoffsensorsysteme.....	26
2.2.3 Sensorsysteme zur Unkrautbekämpfung.....	32
2.2.4 Erntesensoren.....	33

	Seite
2.3 Sensoren in der Nutztierproduktion	34
2.3.1 Sensoren für die Einzeltierbeobachtung	35
2.3.2 Sensoren bei automatischen Melksystemen	37
2.3.3 Sensoren bei Fütterungsautomaten	38
2.3.4 Sensoren für das Stallmanagement	38
2.4 Maschinensensoren	39
2.5 Perspektiven	40
2.5.1 Sensortechnik in der Pflanzenproduktion	41
2.5.2 Sensortechnik in der Tierproduktion	43
2.5.3 Maschinensensoren	44
3 Automatisierte Landmaschinen	47
3.1 Navigations- und Assistenzsysteme	48
3.1.1 Satellitengestützte Navigation	48
3.1.2 Automatische Lenksysteme	50
3.1.3 Automatische Teilbreitenschaltung	53
3.1.4 Tractor Implement Management	54
3.2 Telemetriesysteme	54
3.3 Perspektiven	55
3.3.1 Umfelderkennung	56
3.3.2 Autonome Landmaschinen	57
4 Drohnen	61
4.1 Einsatzbereiche im Pflanzenbau	64
4.1.1 Bestandsmonitoring	66
4.1.2 Wildtierortung	67
4.1.3 Bekämpfung von Schädlingen und Unkräutern	68
4.2 Perspektiven	70
5 Roboter	73
5.1 Roboter in der Tierhaltung	73
5.1.1 AMS bzw. Melkroboter	73
5.1.2 Automatische Fütterungssysteme	77
5.1.3 Reinigungsroboter	80

	Seite
5.1.4 Weideroboter	81
5.2 Roboter im Pflanzenbau.....	80
5.2.1 Feldroboter.....	80
5.2.2 Ernteroboter	85
5.3 Perspektiven.....	87
6 Fazit.....	91
7 Literatur	95
7.1 In Auftrag gegebene Gutachten	95
7.2 Weitere Literatur.....	95
8 Anhang.....	111
8.1 Abbildungen	111
8.2 Tabellen	112
8.3 Kästen	112

Vorwort des Ausschusses

Längst hat die Digitalisierung auch in der Landwirtschaft Einzug gehalten. Etliche digitale Agrartechnologien sind bereits praxisreif oder in fortgeschrittener Entwicklung. Im Pflanzenbau ermöglichen satellitengesteuerte Traktoren eine variable Dosierung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, während in der Tierhaltung bereits zahlreiche Roboter für Melk-, Fütterungs- und Entmistungsvorgänge eingesetzt werden. Die dabei erhobenen Daten können mit externen Informationen wie Wetter- oder Satellitendaten verknüpft und mithilfe von Analysetools ausgewertet werden. Die Digitalisierung eröffnet damit große Potenziale. Unter anderem bietet sich die Chance, die landwirtschaftliche Produktion nicht nur wirtschaftlicher, sondern auch ressourcenschonender und damit nachhaltiger zu machen.

Zwar ist die digitale Transformation der Landwirtschaft bereits in vollem Gange, sie trifft jedoch noch auf Umsetzungshürden wie eine oftmals mangelhafte Breitbandversorgung, fehlende Standards oder eine unzureichende Datenverfügbarkeit. Außer Frage steht, dass die Entwicklung einer vorausschauenden Gestaltung durch die Politik bedarf. Dabei gilt es keineswegs nur die Technikinnovation im engeren Sinne oder die infrastrukturellen Rahmenbedingungen im Blick zu behalten. Vielmehr hat die Digitalisierung weitreichende Auswirkungen auf Abläufe und Prozesse in landwirtschaftlichen Betrieben und die gesamte Struktur der Agrarbranche, wobei vor allem auch die ökonomischen Herausforderungen für kleinere und mittlere Betriebe zu beachten sind.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag – auf Initiative des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung – das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit einer Untersuchung zu Stand und Perspektiven der Digitalisierung in der Landwirtschaft beauftragt. Das entsprechende TA-Projekt wurde zweistufig durchgeführt. In der ersten Projektphase ging es darum, einen systematischen Überblick über Stand und Tendenzen bei digitalen Agrartechnologien zu schaffen, die eine wichtige Grundlage für die vernetzte Landwirtschaft darstellen, jedoch teils über sehr unterschiedliche Entwicklungsgrade und Anwendungspotenziale verfügen. Der Fokus der zweiten Projektphase (mit dem resultierenden TAB-Arbeitsbericht Nr. 194) lag auf übergreifenden Fragen der systemisch vernetzten Landwirtschaft und einer vertiefenden Analyse der damit verbundenen Potenziale. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der ersten Projektphase zusammen. Behandelt werden die vier Technikfelder Sensoren, Landmaschinen, Drohnen und Roboter, die von besonderer Bedeutung für die Digitalisierung der Landwirtschaft sind. Nach einer Darstellung der technischen Grundlagen werden jeweils wichtige Anwendungsfelder behandelt und Perspektiven der Technikentwicklung sowie aktuelle Forschungsaktivitäten beleuchtet.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Arbeitsbericht eine fundierte und wertvolle Informationsbasis für die anstehende parlamentarische Befassung mit diesem hochaktuellen Zukunftsthema.

Berlin, den 22. Februar 2022

Kai Gehring
Vorsitzender

Dr. Holger Becker
Berichterstatter

Lars Rohwer
Berichterstatter

Laura Kraft
Berichterstatterin

Prof. Dr. Stephan Seiter
Berichterstatter

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichterstatter

Ralph Lenkert
Berichterstatter

Christoph Kehl
Rolf Meyer
Saskia Steiger

**Digitalisierung
der Landwirtschaft:
technologischer Stand
und Perspektiven**

Teil I des Endberichts zum TA-Projekt

TAB-Arbeitsbericht Nr. 193

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Zusammenfassung

Die Digitalisierung führt aktuell zu grundlegenden Umgestaltungen ganzer Lebens- und Wirtschaftsbereiche – auch die Landwirtschaft ist davon nicht ausgenommen. Viele innovative Agrartechnologien, die wesentlich auf digitaler Datenverarbeitung beruhen, sind bereits praxisreif oder in fortgeschrittener Entwicklung – etwa satellitengesteuerte Landmaschinen, Sensor- und Applikationstechniken mit variabler Dosierung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln oder Roboter für Melk-, Fütterungs- und Entmistungsvorgänge. Digitale Anwendungen erfassen große Mengen an Prozessdaten und bilden so die Grundlage für eine weitreichende Digitalisierung der landwirtschaftlichen Produktion.

Angesichts der großen Erwartungen, die mit dieser Entwicklung verknüpft sind, wurde das TAB vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung beauftragt, den Stand und die Perspektiven der Digitalisierung in der Landwirtschaft zu untersuchen. Die dazugehörige TA-Analyse gliedert sich in zwei Teile: Der vorliegende TAB-Arbeitsbericht Nr. 193 gibt einen Überblick über Entwicklungsstand, Anwendungsmöglichkeiten und Tendenzen digitaler Agrartechnologien in den vier zentralen Technikfeldern Sensoren, Landmaschinen, Drohnen und Roboter. Der TAB-Arbeitsbericht Nr. 194 (TAB 2021) widmet sich dagegen der systemisch vernetzten Landwirtschaft und es wird eine vertiefende Analyse der damit verbundenen Chancen und Risiken vorgenommen.

Sensoren

Sensoren sind Messfühler, die unterschiedliche Messprinzipien nutzen, um physikalische Größen oder chemische Eigenschaften zu erfassen. Von Sensoren aufgezeichnete Daten bilden die Grundlage für die Digitalisierung der Landwirtschaft. Die mit Sensoren erhobenen Messwerte stellen allerdings in der Regel nicht unmittelbar nutzbare Daten zur Verfügung. Vielmehr müssen aus den sensorisch erfassten Messwerten die Zustandsgrößen bestimmt werden, die für die Bewirtschaftung ausschlaggebend sind. Voraussetzung dafür sind Algorithmen, die den Zusammenhang zwischen Messwert und Zustandsgröße als handlungsrelevante Information abbilden. Dies kann unmittelbar und automatisch in Echtzeit erfolgen (Onlineverfahren) oder in eigenständigen, zeitlich unabhängigen Arbeitsschritten (Offlineverfahren).

Sensoren in der Pflanzenproduktion

In der pflanzlichen Produktion kann eine Reihe von Sensoren eingesetzt werden, um die Wachstumsbedingungen für Pflanzen zu optimieren und Erträge zu sichern bzw. zu steigern. Anwendungsbereiche mit besonderer Relevanz sind Boden-, Stickstoff-, Unkraut- sowie Erntesensoren.

Bodensensoren werden zur Bestimmung von Bodeneigenschaften und zur Steuerung der Bodenbearbeitung verwendet. Für eine Offlinenutzung steht bereits eine ganze Reihe von Bodensensoren als Anbaugeräte an Landmaschinen oder als Einzelgeräte kommerziell zur Verfügung. Vermutlich am meisten eingesetzt werden Sensoren, die auf elektromagnetischer Induktion zur Erfassung des relativen Wassergehalts und des Bodentyps beruhen. Mittlerweile werden erste Bodensensorsysteme für die Nutzung im Onlineverfahren angeboten. Die erhobenen Bodeneigenschaften (Bodenart, Wassersättigung und Verdichtung) werden dabei unmittelbar, d.h. in Echtzeit, zur Steuerung einer variablen Bodenbearbeitung bzw. Aussaat genutzt.

Stickstoffsensoren dienen der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Die Stickstoffversorgung bzw. der Stickstoffbedarf von Pflanzenbeständen wird dabei aus der Lichtreflexion mithilfe von Multispektralsensoren und Vegetationsindizes indirekt erschlossen. Durch Applikationsalgorithmen wird anschließend aus den Sensorwerten die auszubringende Stickstoffmenge bestimmt. Für eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung werden eine entsprechende Bordelektronik auf dem Traktor und ein Düngerstreuer mit variabler Streutechnik benötigt, um die vom Sensorsystem vorgegebenen variierenden Applikationsmengen ausbringen zu können. Für eine Nutzung im Onlineverfahren sind mittlerweile verschiedene Stickstoffsensorsysteme kommerziell verfügbar.

Bei den Sensorsystemen zur Steuerung der *Unkrautbekämpfung* ist zwischen bildgebenden und nicht bildgebenden Sensoren zu unterscheiden. Nicht bildgebende Sensoren werden im Onlineverfahren genutzt, wobei über die Messung der Lichtreflexion nur eine Unterscheidung von Pflanzen und Boden, aber keine Unterscheidung zwischen Unkraut- und Kulturpflanze möglich ist. Deshalb können entsprechende Sensorsysteme nur vor der Aussaat bzw. im Voraufbau (vor dem Sichtbarwerden der Kulturpflanzen nach der Saat) eingesetzt werden. Solche Systeme werden als Kombination von Sensoren, Software und Felspritze angeboten. Bildgebende Sensoren hingegen ermöglichen durch die Bildanalyse eine gezielte Unkrauterkenntnis und damit eine Unkrautbekämpfung auch im Kulturpflanzenbestand. Entsprechende Sensorsysteme sind mittlerweile praxisreif und erste kommerzielle Anwendungen für die Nutzung im Onlineverfahren am Markt erhältlich.

Erntesensoren sind in der Regel integraler Bestandteil von Erntemaschinen. Sie dienen zum einen der Messung der Erntemenge mithilfe von Ertragssensoren, welche die erzielten Erträge teilflächenspezifisch abbilden; eine in den Mähdrescher integrierte, kontinuierliche Ertragsermittlung ist schon seit den 1990er Jahren kommerziell verfügbar. Erntesensoren werden aber auch zur Erfassung von Qualitätseigenschaften des Erntegutes (wie Feuchte und wertbestimmende Inhaltsstoffe, z. B. Protein, Stärke, Ölgehalt) eingesetzt. Entsprechende Systeme stehen für die Ernte von Getreide, Öl-, Eiweiß- sowie Futterpflanzen kommerziell zur Verfügung. Schließlich sind mittlerweile zahlreiche Sensoren zur Steuerung der Ernteprozesse Bestandteil von Erntemaschinen. Sie erfassen sowohl Daten zur Umgebung als auch zu maschineninternen Prozessen. In Mähdreschern beispielsweise ermitteln Sensoren Bodenunebenheiten, damit durch die automatisierte Steuerung die Arbeitshöhe sowie die Neigung des Schneidwerks angepasst werden können.

Sensoren in der Nutztierproduktion

In der Tierhaltung kommen Sensortechnologien sowohl in den Stallungen als auch in der Weidewirtschaft zum Einsatz. Anwendungsgebiete sind die Einzeltierbeobachtung (Herdenmanagement), Melk- und Fütterungsprozesse sowie die Steuerung des Stallklimas (Stallmanagement).

Sensorsysteme für die kontinuierliche *Einzeltierbeobachtung* sind in der Milchviehhaltung am weitesten entwickelt, um beginnende Erkrankungen frühzeitig zu erkennen und den Brunstzeitpunkt exakt zu bestimmen. Ermittelt werden können z. B. die Bewegungen und die Position einer Kuh im Stall (durch Bewegungs- und Positionssensoren an Halsband oder Ohrmarke), die Futteraufnahme und die Wiederkauaktivität (durch akustische Sensoren oder Drucksensoren), die innere oder äußere Körpertemperatur (durch Temperatursensor an Ohrmarke oder als Kapsel im Pansen) sowie der pH-Wert im Pansen (durch chemische Sensoren). Allen diesen Sensorsystemen ist gemeinsam, dass die am Tier gesammelten Messwerte an eines oder mehrere Empfängergeräte gesendet und in der Regel von dort an den zentralen Computer des Betriebs zur Auswertung übertragen werden. Die Sensordaten werden zudem oftmals in einem Herdenmanagementprogramm zusammengeführt. Auffällige Verhaltensweisen werden über den Abgleich aktueller und früherer Daten ermittelt und in Echtzeit über eine Benachrichtigung auf mobilen Endgeräten angezeigt.

Sensoren sind in der Milchviehhaltung zudem ein wichtiger Bestandteil der *Automatisierung des Melk- und Fütterungsprozesses*. Bei automatischen Melksystemen wird Sensortechnik einerseits zur Steuerung des Melkvorgangs und andererseits zur Kontrolle der Milchmenge und -qualität eingesetzt (z. B. durch Bestimmung der Farbe und elektrischen Leitfähigkeit der Milch). Fütterungsautomaten messen per Sensor den Füllstand des Futtertroggs und erfassen basierend auf einer Einzeltiererkennung automatisch die Futteraufnahme des Tieres.

Im Rahmen des *Stallmanagements* kommen ebenfalls zahlreiche Sensorsysteme zum Einsatz, wie z. B. Wärmebildkameras oder Thermosensoren zur Temperaturkontrolle in Ställen, zur Regelung der Trinkwassertemperatur in der Geflügelhaltung oder chemische Sensoren zur Erfassung von Schadgaskonzentrationen in Geflügel- und Schweineställen. Die Messergebnisse von Sensoren werden dabei in der Regel kontinuierlich mit voreingestellten Zielwerten abgeglichen und die entsprechenden Anlagen daraufhin mithilfe von Regelungs- und Steuerungstechnik in die gewünschten Betriebszustände gebracht.

Maschinensensoren

Landwirtschaftliche Maschinen im Feldbetrieb sind heutzutage nicht nur mit Sensoren zur Steuerung von Arbeitsprozessen, sondern auch mit umfangreicher Sensortechnik zur Messung interner Maschinenzustände ausgestattet. Die Überwachung der Maschinensituation und die Messung von Daten durch Sensoren in Echtzeit (z. B. Geschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch, Verschleiß, Betriebszustand) ermöglichen es, optimale Betriebszustände für die jeweilige Maschine zu erreichen – und damit deren Ausfallzeiten so gering wie möglich zu halten – sowie den Betriebsmittelverbrauch (Kraftstoffe, Öle etc.) und Abgas- und Geräuschemissionen zu minimieren. Sensoren geben automatisch Störmeldungen aus, wenn die spezifischen Maschinenwerte von voreingestellten Zielwerten abweichen, oder stellen mithilfe von Regelungs- und Steuerungstechnik den gewünschten Betriebszustand her.

Perspektiven

Bei Sensortechnik und -systemen für die Landwirtschaft wurden in den letzten 20 Jahren große Fortschritte erzielt. Neue Messprinzipien und Sensortypen wurden erschlossen. Ebenso wurden die Möglichkeiten der Sensordatenverarbeitung und -interpretation weiterentwickelt. Dabei ist eine deutliche Tendenz hin zu Onlineverfahren zu erkennen, bei denen die Sensorwerte in Echtzeit die Ausprägung von Bewirtschaftungsmaßnahmen bestimmen. Allerdings sind viele Sensorsysteme nach wie vor Insellösungen. Perspektiven der landwirtschaftlichen Sensornutzung liegen deshalb vor allem im Bereich der Entwicklung von Multisensorplattformen bzw. -systemen, die verschiedene Sensoren kombinieren, sowie der Sensordatenfusion, also der Verknüpfung und gemeinsamen Interpretation von Daten unterschiedlicher Einzelsensoren. Neuen Methoden der Datenanalyse und der wissensbasierten Entscheidungsfindung, etwa mithilfe des maschinellen Lernens, wird dabei eine wichtige Rolle zukommen.

Automatisierte Landmaschinen

Unter Landmaschinen werden Traktoren, Ernte- und Bodenbearbeitungsmaschinen, Sä- und Düngetechnik sowie weitere Anbaugeräte verstanden. Moderne Landmaschinen verfügen über eine satellitengestützte Navigation sowie verschiedene Assistenzfunktionen auf Grundlage zahlreicher Sensoren und bieten neue Möglichkeiten zur automatischen Dokumentation der durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Navigations- und Assistenzsysteme

Eine für die moderne Landmaschinentechnik überaus zentrale Technologie ist der GNSS-Empfänger (globales Navigationssatellitensystem), ohne den Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft nicht durchführbar wären. Die präzise Ortung (± 2 cm) ist inzwischen Stand der Technik und wird verbreitet genutzt. Auch werden auf der Basis satellitengestützter Positionsbestimmung etliche Assistenzfunktionen, wie z. B. Parallelfahrssysteme oder die automatische Teilbreitenschaltung, bereits standardmäßig angeboten.

Parallelfahrssysteme unterstützen die Feldarbeit, indem sie die exakte Einhaltung von Abständen der Fahrspur sowie Arbeiten bei schlechter Sicht oder in der Nacht ermöglichen. Zudem helfen sie der FahrerIn/dem Fahrer, sich besser auf die jeweilige Bewirtschaftungsmaßnahme konzentrieren zu können. Voraussetzung ist neben der satellitengestützten Positionsbestimmung ein Lenkassistent oder -automat. Das Marktangebot ist vielfältig. Von praktisch allen Herstellern wird eine große Anzahl von Standardspurführungsmodi angeboten. Zusätzlich werden Funktionen wie die Spurplanung und Optimierung der Spurreihenfolge offeriert, welche die optimalen Routen für die Landmaschinen ermitteln und während der Feldbearbeitung automatisch die passende Sequenz von Spurreihenfolge und -wechsel starten.

Zu den verbreitet genutzten Spezialfunktionen gehört die *automatische Teilbreitenschaltung*, durch welche das Ein- und Ausschalten von Teilbreiten der Anbaugeräte (wie Feldspritzen, Düngerstreuer, Einzelkornsä- und Drillmaschinen) ermöglicht wird. Dadurch können unnötige Überlappungen vermieden und Betriebsmittel (wie Pflanzenschutzmittel, Dünger und Saatgut) eingespart werden.

Ein noch relativ neuer Trend ist das *Tractor Implement Management* (TIM). Dabei steuert nicht wie bislang üblich die Zugmaschine den Prozess auf dem Schlag, sondern das jeweilige Anbaugerät. TIM-Systeme sind vereinzelt bereits am Markt verfügbar, werden jedoch bislang noch wenig genutzt.

Telemetriesysteme

Telemetrie- oder Telematiksysteme sind digitale Datenerfassungs- und -übertragungssysteme, mit denen sich unterschiedliche Betriebsparameter von Landmaschinen (z. B. Positions-, Prozess- und maschineninterne Daten) aufzeichnen und an einen Server übermitteln lassen.

Einfache Telemetriesysteme dienen dem *Flottenmanagement*, d. h. der Flottenüberwachung (und auch Diebstahlsicherung): Mittels eines GNSS-Empfängers werden geografische Lage, Geschwindigkeit und Wegstrecke der Fahrzeuge sowie Datum und Uhrzeit erfasst. Die erhobenen Daten werden im Anschluss auf einen Server übertragen, wo sie in Echtzeit abgerufen werden können. Bei komplexen Telemetriesystemen werden zusätzlich zur Standortbestimmung Daten der Maschinenleistung (z. B. Drehzahlen oder Zählerstände) sowie Prozessdaten (z. B. bei Erntemaschinen Daten zum Ertrag) erhoben und an ein Datenerfassungssystem weitergegeben. Über die Flottenüberwachung hinaus lässt sich so die Einsatzfähigkeit der Maschine optimieren, z. B. der Durchsatz eines Mähdeschers, Feldhäckslers oder einer Quaderballenpresse effizienter gestalten. Unter der Bezeichnung Predictive Maintenance bieten Anbieter von Telemetriesystemen zudem eine Fernwartung an, um technische Mängel durch eine Zustandsprüfung vorausschauend zu erkennen. Maschinendaten werden hierfür in Echtzeit an den Hersteller übermittelt und analysiert.

Telemetriesysteme sind technisch ausgereift. Aktuell zeichnet sich der Trend ab, dass Landmaschinenhersteller deren Funktionen zunehmend als Teil von Farmmanagementsystemen anbieten bzw. in diese integrieren. Ziel ist, betriebliche Abläufe ganzheitlich zu optimieren, indem alle relevanten Daten eines Betriebs in einem Programm gesammelt werden.

Perspektiven

Es ist davon auszugehen, dass der Trend zur Automatisierung von Landmaschinen weiter anhält. Aktuelle Entwicklungen gehen in Richtung Vollautonomie. Um von der automatisiert fahrenden Landmaschine zu einem vollautonomen Fahrbetrieb zu gelangen, müssen alle Funktionen, die bislang der Mensch auf der Maschine übernimmt, durch autonome Lösungen ersetzt werden. Diese umfassen außer der reinen Navigation auch die Prozesssteuerung sowie die Umgebungüberwachung und -interpretation. Insbesondere die Umfelderkennung von Landmaschinen stellt dabei ein wichtiges Forschungsfeld dar, da es einer sicheren Erkennung von statischen und dynamischen Hindernissen (z. B. Steine, Tiere oder Personen) auf dem Feld bedarf, um autonome Funktionen sicher auszuführen.

Derzeit existiert eine Vielzahl an Forschungsprototypen, die autonome Funktionen haben und so mindestens eine Teilautonomie des Systems realisieren. Jedoch hat bis dato kein Hersteller ein vollautonomes Produkt auf den Markt gebracht. Es ist davon auszugehen, dass die aktuellen Pilotstudien perspektivisch zu entsprechenden kommerziellen Produkten führen werden.

Drohnen

Drohnen sind unbemannte Luftfahrzeuge, welche in der Regel mittels Fernbedienung vom Boden aus gesteuert werden. Dadurch, dass verschiedene Sensorsysteme, Navigations- und Funksysteme oder kleinere Lasten an einer Drohne befestigt werden können, sind die landwirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten sehr vielfältig.

Grundsätzlich lassen sich zwei Drohnentypen unterscheiden: zum einen Drehflügler (Multikopter), die über horizontal rotierende Propeller verfügen, und zum anderen Starrflügler, deren Konstruktionsweise herkömmlichen Flugzeugen ähnelt. In der Landwirtschaft kommen am häufigsten kleine Drehflügler mit Elektroantrieb zum Einsatz, welche 4, 6 oder 8 Propeller haben. Sie sind sehr manövrierfähig und präzise steuerbar, haben jedoch nur eine begrenzte Tragfähigkeit und Flugzeit, was die landwirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten beschränkt. Die landwirtschaftliche Drohnennutzung stößt zudem an enge rechtliche Grenzen. So ist bei Drohnen unter 5 kg nur

der Flug in Sichtweite des Piloten und bis zu einer Flughöhe von 100 m erlaubt, was bei größeren Schlägen ein Hindernis darstellen kann. Das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln ist grundsätzlich nicht erlaubt, ebenso der Betrieb bei einem Startgewicht von mehr als 25 kg.

Einsatzbereiche im Pflanzenbau

Als Trägerplattform für unterschiedliche Sensoren sind Drohnen für den Einsatz im Pflanzenbau geradezu prädestiniert. Da Sensorsysteme wie Digital- und Wärmebildkameras, multispektrale und hyperspektrale Sensoren immer kleiner und leichter werden, können sie zunehmend problemlos von Drohnen transportiert werden. Dadurch ergeben sich vielfältige Nutzungsmöglichkeiten, vor allem beim Bestandsmonitoring, bei der Wildtierortung sowie der Schädlings- und Unkrautbekämpfung.

Beim *Bestandsmonitoring* ist ein großer Vorteil die hohe Bildauflösung von Drohnenaufnahmen, die sich zudem weitgehend witterungsunabhängig und zeitlich hochflexibel erstellen lassen. Mehrere Aufnahmen können zusammen mit den Koordinaten zu hochdetaillierten Orthofotos umgewandelt werden, die einen Geländebereich entzerrungsfrei abbilden. Nutzen lässt sich dies z. B. für die Kartierung und Vermessung von Schlägen. Aus entsprechenden Luftbildern können in Abhängigkeit von den jeweils verwendeten optischen Sensoren aber auch diverse Pflanzenparameter (z. B. Gesundheitszustand, Phänotyp, Wuchshöhe, Biomasse oder Bodenbedeckungsgrad) erfasst werden. Da die per Drohne aufgenommenen Luftbilder georeferenziert werden können, sind sie grundsätzlich für Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft verwendbar. Allerdings müssen die rohen Bilddaten dafür nicht nur mit geeigneter Software nachbearbeitet werden, sondern es sind üblicherweise weitere Informationen erforderlich, um passende Applikationskarten für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen erstellen zu können.

Die *Wildtierortung* ist wahrscheinlich die verbreitetste landwirtschaftliche Nutzung der Drohnentechnologie. Eine rechtzeitige Ortung von im Feld befindlichen Jungtieren oder Gelegen bedeutet nicht nur aktiver Tierschutz, sondern dient auch dem Schutz der Ernte, da Kadaver die Ernte kontaminieren können. Drohnen, die mit einer Echtfarb- und Wärmebildkamera bestückt sind, sind sehr gut zur Jungtierrettung einsetzbar – gegenüber anderen Methoden (wie dem Absuchen des Feldes mit entsprechend ausgebildeten Jagdhunden) sind Drohnen schneller und außerdem genauer. Die Rehkitzortung wird verbreitet als Dienstleistung von Unternehmen, spezialisierten Vereinen oder überbetrieblichen Zusammenschlüssen wie Maschinenringen angeboten.

Neben der Wildtierortung ist die *biologische Schädlingsbekämpfung* ein in der landwirtschaftlichen Praxis bereits etabliertes Einsatzfeld. Im Fokus steht dabei die Bekämpfung des Maiszünslers. Dieser richtet vor allem in Maisbeständen mit einer großen Wuchshöhe Schaden an, bei denen eine Überfahrt mit dem Traktor kaum mehr durchführbar ist. Firmen bieten die Ausbringung und die Planung der Ausbringung von Schlupfwespen mittels Multikoptern an, zudem teilweise auch das Ausbringen von Schneckenkorn zur Bekämpfung von Schnecken.

Einsatzbereiche in der Tierhaltung

Im Bereich der Tierhaltung sind Drohnenanwendungen deutlich weniger weit entwickelt als im Pflanzenbau. Da die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen vor allem im Außenbereich gegeben und in der Stallwirtschaft stationäre Überwachungssysteme bereits etabliert sind, sind Drohnen primär dann geeignet, wenn sich Tiere zum Weiden außerhalb von Ställen aufhalten. Hier sind stationäre Überwachungssysteme unter Umständen unhandlich oder teuer und eine Überwachung der Tiere kann (bei entsprechenden Betriebsgrößen) zudem äußerst zeitaufwendig sein. Drohnen könnten perspektivisch eine Alternative sein, wenngleich die begrenzte Flugzeit für die drohnenbasierte Weideüberwachung noch ein größeres Hindernis darstellt. Anwendungsgebiete wie beispielsweise die Erfassung von Gesundheitsparametern von Weidetieren oder das Zählen von Tieren anhand ihrer Wärmestrahlung sind derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Perspektiven

Landwirtschaftliche Drohnenleistungen werden derzeit noch hauptsächlich von spezialisierten Firmen angeboten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Analyse der generierten Bilddaten sehr komplex ist und den

Einsatz kostspieliger Bildbearbeitungs- und -analysesoftware sowie entsprechendes Know-how erfordert. Der Echtzeitbetrieb ist in der Regel noch nicht möglich, was einen wesentlichen Nachteil gegenüber bodengebundenen Sensorsystemen darstellt. Außerdem begrenzen die aktuell verwendete Technik (begrenzte Flugzeit und Tragevermögen) sowie die relativ hohen rechtlichen Hürden die Anwendungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft.

Während die grundsätzliche Weiterentwicklung der Drohnentechnologie (Steuerung und Flugeigenschaften, Akkukapazität etc.) von der Privatwirtschaft umfassend vorangetrieben wird, wird die Adaption der Fluggeräte an landwirtschaftliche Einsatzzwecke bisher nur von spezialisierten Unternehmen oder einzelnen Forschungsgruppen verfolgt. Spezifischer Forschungsbedarf besteht bei der Entwicklung montierbarer Werkzeuge, die für landwirtschaftliche Zwecke nutzbar sind (z.B. Streueinrichtungen für Saatgut), sowie im Bereich der Datenverarbeitung, wofür geeignete, auf landwirtschaftliche Einsatzszenarien zugeschnittene Algorithmen und Softwarelösungen benötigt werden.

Roboter

Als Roboter werden Apparate bezeichnet, die komplexe physische Aufgaben mit einer hohen Autonomie durchführen können. In der Landwirtschaft werden sie bislang vor allem in der Tierhaltung und hier insbesondere der Stallwirtschaft zur Automatisierung diverser Routinetätigkeiten eingesetzt. Dahingegen befinden sich Robotiksysteme für landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen im Pflanzenbau noch weitestgehend in der Forschungs- und Entwicklungsphase.

Roboter in der Tierhaltung

Roboter für die Tierhaltung sind für unterschiedliche Anwendungszwecke auf dem Markt. Die gebräuchlichsten Technologien sind automatische Melksysteme, automatische Fütterungssysteme sowie Reinigungsroboter.

Unter *automatischen Melksystemen* (AMS) wird ein automatisiertes System zum Melken von Kühen verstanden. Wesentlicher Bestandteil ist die Melkbox, in der die Tiere mithilfe des Ansetzarms gemolken werden. Dabei erfolgt eine automatische Qualitäts- und Mengenkontrolle der Milch. Mittlerweile gibt es eine breite Auswahl an Systemen. Neben Ein- und Mehrboxenanlagen werden heute auch vollautomatisierte Melkkarusselle angeboten. Für den wirtschaftlichen Einsatz erfordern AMS je nach Anlagentyp eine bestimmte Größe des Milchviehbestands. Primäre Vorteile gegenüber konventionellen Melkanlagen sind Zeitersparnisse, außerdem eine Reduktion der körperlichen Belastung und flexiblere Arbeitszeiten.

Automatische Fütterungssysteme sind in der intensiven Schweine- und Geflügelhaltung weitverbreitet und werden zunehmend auch in der Milchvieh- und Rinderhaltung eingeführt. Automatische Fütterungssysteme reduzieren den Arbeitszeitaufwand und ermöglichen multiple Fütterungszeiten. Allerdings sind mit ihnen in der Regel erhebliche Investitionen verbunden, da es sich um komplexe Anlagen handelt, die aus einem Futtervorratsbereich, Silos für Kraftfutter und Mineralien und einer Misch- und Fütterungseinrichtung bestehen. Häufig sind Anpassungen in den Stallanlagen erforderlich. Komplexere Fütterungssysteme ermöglichen eine weitgehend automatisierte Futtervorlage. Zu den einfachsten und günstigsten Systemen gehören automatische Futterschieber in der Milchvieh- und Rinderhaltung.

Selbstfahrende *autonome Reinigungs- bzw. Entmistungsroboter* werden für das Reinigen der Laufflächen in Ställen mit Spaltenböden und Betonlaufgängen eingesetzt. Die Sauberkeit der Laufflächen hat z.B. in der Rinderhaltung Einfluss auf die Klauengesundheit und verringert Geruchs- und Ammoniakemissionen. Zudem kann durch eine Automatisierung der hohe Zeitaufwand für körperlich anstrengende Reinigungs- und Entmistungsarbeiten reduziert werden. Die Funktionen eines Reinigungsroboters umfassen das Anfeuchten und Sammeln von Mist in einem Tank sowie den Transport des Materials zu einer Sammelstation.

Roboter im Pflanzenbau

Bedingt durch unterschiedliche pflanzenbauliche Anwendungsbereiche zeichnen sich Roboter im Pflanzenbau durch verschiedene Konstruktionsformen aus. Ziel ist es, durch den Einsatz autonomer Systeme pflanzenbauliche Prozesse zu automatisieren, um damit Arbeits- sowie ggf. Betriebskosten einsparen zu können. Gerade vor dem

Hintergrund steigender Lohnkosten sowie eines Mangels an Fachkräften sind Robotiksysteme prinzipiell interessant. Robotiklösungen zur vollständigen Automatisierung pflanzenbaulicher Prozesse (Phänotypisierung, Aussaat, Düngung, Ernte, Pflanzenschutz/Unkrautbekämpfung etc.) sind u. a. aufgrund der schwer kontrollierbaren Umweltbedingungen und den daraus resultierenden hohen Anforderungen an die sensorische Umfelderkennung und die autonome Steuerung noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Gleichwohl wird an zahlreichen Konzepten gearbeitet und in einigen Bereichen, wie der Unkrautbekämpfung oder der Ernte, stehen erste praxistaugliche Prototypen zur Verfügung.

Durch die eher geringen Stückzahlen in Verbindung mit der nur saisonalen Nutzung ergeben sich relativ hohe Anschaffungskosten für Feldroboter, was tendenziell zu einem ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis führt. Daher ist ein Trend zum modularen Aufbau von autonomen Robotiksystemen für den Feld- und Ernteeinsatz erkennbar. Ziel ist es, die Grundaufgaben (Navigation, Objekt- bzw. Hinderniserkennung, Pfadplanung) auf einer Trägerplattform zu bündeln und Werkzeuge für die landwirtschaftlichen Aufgaben austauschbar zu gestalten. Damit wird die Trägerplattform universell einsetzbar, erreicht eine höhere Nutzungsdauer und die Kosten sowie der Amortisierungszeitraum verringern sich.

Perspektiven

Während die weitere Verbreitung von Robotiklösungen in der Nutztierhaltung im Wesentlichen durch die (für einen wirtschaftlichen Einsatz) erforderliche Betriebsgröße begrenzt wird, ist im Ackerbau neben dem technologischen Entwicklungsbedarf auch eine grundlegende Neuausrichtung der Ackerbauprozesse und Pflanzenbausysteme erforderlich. Die bisherige Entwicklung in der Landtechnik ging hin zu immer leistungsfähigeren Maschinen, die damit auch größer und schwerer wurden und sich nicht ohne Weiteres durch robotische Kleinmaschinen ersetzen lassen. Deshalb werden neue Maschinenkonzepte (z. B. im Schwarmverband operierende Einheiten) sowie daran angepasste Pflanzenbausysteme benötigt, die derzeit allerdings noch im Stadium der Grundlagenforschung sind. Gelingt es, hier weiterzukommen, könnte darin auch eine Chance liegen, dem Trend zu immer größeren Landmaschinen und dessen negativen Effekten (zunehmende Bodenverdichtung, wachsender Kapitalbedarf etc.) entgegenzuwirken.

Fazit

Digitale Technologien gewinnen in der landwirtschaftlichen Praxis immer mehr an Bedeutung und durchdringen inzwischen alle Bereiche der Landtechnik. Sowohl im Pflanzenbau als auch in der Tierproduktion ist ein Trend zur zunehmenden Automatisierung bis hin zur autonomen Arbeitserledigung mithilfe digitaler Systeme festzustellen, wobei die Zielsetzung vorrangig die Erhöhung der Arbeitsproduktivität (Einsparung von Arbeitszeit bzw. Arbeitskräften) sowie die Steigerung der Produktionseffizienz (geringerer Inputeinsatz pro Produktionseinheit bzw. absolute Verringerung des Inputeinsatzes) ist. Während der Trend im Pflanzenbau zur teilflächenspezifischen bzw. varierten Bewirtschaftung geht, stehen in der Tierproduktion die einzeltierbezogene Fütterung, Behandlung und Leistungsmessung durch automatisierte Systeme im Vordergrund. Bislang bewegen sich die verfügbaren digitalen Agrartechnologien noch durchweg im Rahmen der etablierten Agrartechniken und Bewirtschaftungsverfahren. Der weitere Fortschritt könnte allerdings zu grundlegenden Veränderungen der landwirtschaftlichen Prozesse führen (z. B. gezielte Bewirtschaftung von Einzelpflanzen bzw. -tieren mittels autonomer Technologien), wie es beispielsweise im Ackerbau mit bestimmten Robotikkonzepten zu erwarten ist.

Das größte Potenzial zur Optimierung landwirtschaftlicher Prozesse wird in der umfassenden Vernetzung digitaler Einzelanwendungen auf Betriebsebene gesehen. Hinsichtlich der Realisierbarkeit dieser Vision und ihren möglichen Auswirkungen bestehen noch viele Unklarheiten, die im TAB-Arbeitsbericht Nr. 194 (TAB 2021) erörtert werden.

1 Einleitung

Wie in vielen Wirtschaftsbereichen eröffnet die Digitalisierung in Zusammenhang mit neuen Lern- und Datenanalyseverfahren auch in der Landwirtschaft neue Möglichkeiten, Produktionsprozesse datenbasiert zu steuern und zu optimieren. Dies betrifft etwa eine differenziertere Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen (Präzisionsackerbau, auch Precision Farming) oder die einzeltierbezogene Erfassung von Gesundheits- und Leistungsdaten (Präzisionstierwirtschaft, auch Precision Livestock Farming). Unerlässliche Grundlage dafür sind innovative Agrartechnologien (etwa satellitengesteuerte Landmaschinen, Sensorsysteme zur Erfassung von Zustandsgrößen oder Roboter zur Automatisierung von Routinetätigkeiten), die digitale Daten erfassen, verarbeiten und damit eine digitale Repräsentation landwirtschaftlicher Prozesse ermöglichen.

Angesichts der vielfältigen, teils unvereinbar erscheinenden Anforderungen, denen die Landwirtschaft aktuell gegenübersteht – Ernährungssicherung bei steigender Weltbevölkerung einerseits, nachhaltigere Produktion andererseits –, werden die beschriebenen Entwicklungen und ihre Perspektiven politisch intensiv diskutiert. Die Hoffnung ist, durch die umfassende Vernetzung digitalisierter Anwendungen, Prozesse und Datenbestände die Landwirtschaft insgesamt ressourcenschonender, damit effizienter und gleichzeitig nachhaltiger ausrichten zu können. Generell ist festzustellen, dass in der Diskussion gerne auf erfolgreiche Einzelanwendungen und ihre Potenziale verwiesen wird. Hinsichtlich der Fragen, wie eine umfassend vernetzte Landwirtschaft 4.0 realisiert werden könnte und welche Wirkungen sie hätte, gibt es jedoch noch große Unsicherheiten. Deshalb hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung das TAB beauftragt, ein TA-Projekt zum Thema Digitalisierung der Landwirtschaft durchzuführen und den Chancen und Herausforderungen dieser Entwicklung auf den Grund zu gehen.

Zielsetzung und Gliederung des Berichts

Für die Bearbeitung dieses Themenfeldes sind sinnvollerweise zwei Ebenen zu unterscheiden: zum einen die Digitalisierung spezifischer landwirtschaftlicher Produktionsschritte mithilfe von digitalen Einzelanwendungen, zum anderen die Vernetzung dieser Einzelanwendungen zu umfassenden, digital gesteuerten Produktionssystemen (Landwirtschaft 4.0). Das dazu gehörige TA-Projekt gliederte sich entsprechend in zwei Teiluntersuchungen:

1. Digitalisierung der Landwirtschaft: technologischer Stand und Perspektiven
2. Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte

In der ersten Projektphase ging es primär darum, einen systematischen Überblick über Stand und Tendenzen bei digitalen Agrartechnologien zu schaffen, die eine Grundlage für die vernetzte Landwirtschaft darstellen, jedoch teils über sehr unterschiedliche Entwicklungsgrade und Anwendungspotenziale verfügen. Der Fokus der zweiten Projektphase (mit dem resultierenden TAB-Arbeitsbericht Nr. 194; TAB 2021) lag auf übergreifenden Fragen der systemisch vernetzten Landwirtschaft und einer vertiefenden Analyse der damit verbundenen Chancen und Risiken. Der vorliegende TAB-Arbeitsbericht Nr. 193 fasst die Ergebnisse der ersten Projektphase zusammen.

Digitaltechnologien, die in landwirtschaftlichen Betrieben zum Einsatz kommen, sind überaus vielfältig und heterogen und lassen sich unterschiedlich systematisieren: Eine Strukturierung kann anhand der zugrundeliegenden Basistechnologien, der betrieblichen Anwendungsfelder oder der Funktionalitäten (z. B. Zustandserfassung auf der Prozessebene, Optimierung von betrieblichen Abläufen) der Technologien erfolgen. Im vorliegenden Bericht werden Stand und Perspektiven der Technikentwicklung in vier zentralen Technikfeldern vorgestellt:

Sensoren (Kap. 2) erfassen vielfältige Prozessdaten, die für digitalisierte Entscheidungsfindungen und Bewirtschaftungstechniken benötigt werden. Sensoren sind integraler Bestandteil fast aller digitalen Agrartechnologien, außerdem gibt es Sensorsysteme, die als eigenständige digitale Technologien fungieren. Die Anzahl der verfügbaren Sensorsysteme und ihre Anwendungsfelder haben sich in den letzten Jahren deutlich erhöht.

Landmaschinen (Kap. 3) sind aus der Pflanzenproduktion nicht mehr wegzudenken. Sie verfügen über immer mehr automatisierte Assistenzfunktionen und agieren zunehmend vernetzt, wobei der Trend hin zu autonomen Maschinen geht. Der Entwicklung der Landmaschinentechnik kommt eine zentrale Rolle bei der weiteren Ausgestaltung und Optimierung von landwirtschaftlichen Produktionsprozessen zu.

Drohnen (Kap. 4) sind unbemannte Luftfahrzeuge, die in Bodennähe operieren. Sie können Träger von Sensor-, Navigations- und Funksystemen oder leichter Ausbringungstechnik sein. Ihre Einsatzmöglichkeiten in der pflanzlichen Produktion werden zunehmend erweitert.

Roboter (Kap. 5) sind autonome Systeme, die spezifische physische Aufgaben in der Landwirtschaft (wie z.B. das Melken) selbstständig ausführen. Sie stellen einen entscheidenden Schritt in der Automatisierung landwirtschaftlicher Produktionsprozesse dar.

In den Kapiteln zu den einzelnen Technikfeldern werden nach einer Darstellung der technischen Grundlagen jeweils wichtige Anwendungsfelder behandelt. Im Fokus stehen dabei kommerziell verfügbare Techniken sowie Technikentwicklungen, die eine hohe Relevanz besitzen. Schließlich wird jeweils auf Perspektiven und aktuelle Forschungsaktivitäten eingegangen.

Im Fazit (Kap. 6) werden die wesentlichen Ergebnisse noch einmal zusammengefasst.

In Auftrag gegebene Gutachten

Der Bericht basiert auf folgenden Kurzgutachten, die im Rahmen der ersten Projektphase vergeben wurden:

- › Sensortechnik in Pflanzen- und Tierproduktion. Tobias Rinza, TriAhead GmbH, Wusterhausen
- › Stand und Perspektiven autonomer und satellitengestützter Navigation in Landmaschinen. Prof. Dr. Joachim Hertzberg, Dr. Kai Lingemann, Dr. Stephan Scheuren, Dr. Stefan Stiene, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Osnabrück
- › Drohnen in der Landwirtschaft. Prof. Dr. Heinz Bernhardt, Josef Bauerdick, Michael Mederle, Matthias Reger, Technische Universität München, München
- › Stand und Tendenzen der Roboteranwendungen im Bereich der Pflanzen- und Tierproduktion. Prof. Dr. Thomas Herlitzius, Jens Fehrmann, Technische Universität Dresden, Dresden

Zusätzlich flossen in diesen Bericht auch Teile eines Gutachtens ein, das im Rahmen der zweiten Projektphase erstellt wurde:

- › Auswirkungen der Digitalisierung auf landwirtschaftliche Betriebe. Prof. Dr. Reiner Doluschitz, Dr. Nicola Gindele, Göppingen

Ergänzend zu den Gutachten hat das TAB eigenständige Recherchen vorgenommen. Die Verantwortung für die Auswahl und die Interpretation der Gutachtenergebnisse liegt ausdrücklich bei den Autoren und der Autorin des vorliegenden Berichts. Eine Kommentierung des Berichtsentwurfs durch die Gutachter/innen ist erfolgt. Ihnen sei für die gute Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Ein besonderer Dank geht auch an Carmen Priefer für die Mitarbeit an konzeptionellen Fragen, Christoph Revermann und Arnold Sauter für die Durchsicht und Kommentierung von Entwurfsversionen sowie an Carmen Dienhardt und Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die redaktionelle Bearbeitung des Manuskripts und die Erstellung des Endlayouts.

2 Sensoren

Von Sensoren erfasste Daten bilden die Grundlage für die Digitalisierung der Landwirtschaft. Sensoren stellen Messfühler bzw. Messwertaufnehmer dar (Rinza 2017, S.10), mit denen vielfältige Zustände ermittelt werden können. Die mittels Sensoren aufgezeichneten Daten werden weitgehend in digitaler Form zur Verfügung gestellt (Doluschitz/Gindele 2019, S.45). Ziel des Sensoreinsatzes in der Landwirtschaft ist die Steuerung, Optimierung, Automatisierung, Kontrolle und Dokumentation von landwirtschaftlichen Produktionsprozessen (Rinza 2017, S.7).

Im Folgenden werden erst die technischen Grundlagen der Sensortechnik und von Sensorsystemen behandelt (Kap. 2.1). Es wird ein Überblick gegeben über wichtige Sensortypen bzw. Messprinzipien, die Sensordatenverarbeitung und -interpretation sowie die Notwendigkeit von Entscheidungsalgorithmen, um aus den Sensordaten Bewirtschaftungsmaßnahmen ableiten zu können. Außerdem werden die zwei grundsätzlichen Ansätze Off- und Onlineverfahren zur Nutzung von Sensordaten eingeführt.

Anschließend werden wichtige Sensorsysteme in ausgewählten Anwendungsbereichen der Pflanzenproduktion (Kap. 2.2) und der Tierproduktion (Kap. 2.3) vorgestellt. Außerdem wird auf Maschinensensoren eingegangen (Kap. 2.4). Die Darstellung konzentriert sich dabei auf marktübliche und im Kontext der Digitalisierung der Landwirtschaft wegweisende Sensorsysteme und ihre Einsatzfelder.

Es stehen mittlerweile viele Sensoren bzw. Sensorsysteme für die praktische Anwendung in der Landwirtschaft zur Verfügung. Die Entwicklung konzentriert sich auf eine weitere Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Sensoren, ihre Kombination zur gleichzeitigen Erfassung von verschiedenen Messwerten, eine verstärkte Vernetzung sowie eine automatisierte Interpretation der Daten und die Ableitung von handlungsrelevantem Wissen (Rinza 2017, S.65). Abschließend werden entsprechend Trends in der aktuellen Forschung und Perspektiven der Sensortechnik behandelt (Kap. 2.5).

2.1 Grundlagen der Sensortechnik und -systeme

2.1.1 Sensortypen und Messprinzipien

Sensoren nutzen eine Vielzahl von Messprinzipien, um physikalische Größen oder chemische Eigenschaften zu erfassen. Wichtige *Messgrößen bzw. -prinzipien*, die in der Landwirtschaft Anwendung finden, sind (verändert nach Rinza 2017, S.10 f.):

- › optische (bzw. elektrooptische) Signale,
- › bildgebende Techniken,
- › elektrische Leitfähigkeit,
- › Magnetfeld,
- › akustische Signale,
- › Temperatur,
- › Position eines Objekts,
- › Durchfluss von Flüssigkeiten oder Gasen
- › Geschwindigkeit.

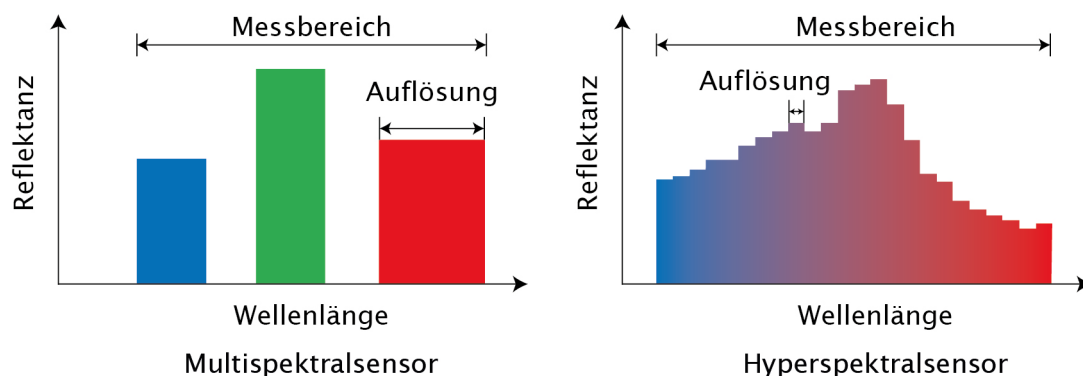
Ein Sensor erfasst in der Regel eine physikalische Größe und wandelt sie mit magnetischen, induktiven, kapazitiven, feldstärkegesteuerten, radioaktiven, ladungstechnischen, piezo- oder photoelektrischen Wandlern in eine elektrische Spannung. Diese wird anschließend in ein festes Verhältnis zur Eingangsgröße gesetzt. Somit skaliert ein Sensor die aufgezeichneten Signale, damit diese interpretiert und weiterverarbeitet werden können (Rinza 2017, S. 11). Die von einem Sensor gemessene Größe wird somit in Form einer – noch analogen – elektrischen Spannung oder eines elektrischen Stroms wiedergegeben. Dieser Messwert wird anschließend in einen digitalen Wert, in Form eines (meist elektrischen) Digitalsignals, umgewandelt.

Im Folgenden werden *ausgewählte Sensortypen*, die in der Landwirtschaft weit verbreitet sind, genauer vorgestellt.

Hyper- und Multispektralsensoren gehören zu den optischen Sensoren. Sie messen die Reflexion von elektromagnetischer Strahlung, die von einer Oberfläche und darunter liegenden Schichten (wie Boden, Pflanzen etc.) ausgeht, wobei die Reflexion in einem Zusammenhang mit den chemischen und physikalischen Eigenschaften der reflektierenden Objekte steht. Hyperspektralsensoren (Abb. 2.1) messen ein kontinuierliches Spektrum über den kompletten Messbereich (z. B. sichtbares Licht und angrenzender Infrarotbereich), und die Auflösung der direkt aneinander angrenzenden Banden liegt dabei meist im Bereich von wenigen Nanometern oder darunter. Multispektralsensoren (Abb. 2.1) zeichnen dagegen einzelne Banden mit stark variierender Bandbreite auf, die nicht direkt angrenzend sind (Noack 2018).

Hyper- bzw. Multispektralsensoren werden insbesondere zur Bestimmung von Bodeneigenschaften (Kap. 2.2.1), der Pflanzenbiomasse, der Chlorophyllkonzentration und der Stickstoffversorgung der Pflanzen (Kap. 2.2.2), des Trockenmassegehalts und der wertbestimmenden Inhaltsstoffen des Ernteguts (Kap. 2.2.4) sowie des Nährstoffgehalts von Gülle genutzt (Noack 2018; Weltzien/Gebbers 2016). Spektralsensoren werden außerdem mittels Drohnen (Kap. 4) und Satelliten eingesetzt und dienen der Überwachung der Pflanzenentwicklung, der Bestimmung von Anbaukulturen und der Abschätzung des Ertragspotenzials (Noack 2018).

Abb. 2.1 Messbereiche und Auflösung von Multispektral- und Hyperspektralsensoren



Quelle: Noack 2018

Aus den mit diesen Sensoren gemessenen spezifischen Reflexionsmustern müssen jeweils die für die landwirtschaftliche Produktion relevanten Istparameter abgeleitet, mit Sollwerten verglichen und daraus Zielgrößen abgeleitet werden. Bei Pflanzenbeständen können dies beispielsweise verschiedene Vegetationsindizes sein, aus denen wiederum Stickstoffdüngermengen abgeleitet werden (Adamchuk et al. 2018, S. 131 ff.; Kap. 2.2.2). Zur Herstellung solcher Beziehungen werden neuere mathematische Methoden wie künstliche neuronale Netzwerke, Support Vector Machines und Partial Least Squares Regression eingesetzt (Kap. 2.5.1). Die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Ableitung von Eigenschaften aus spektralen Signaturen stehen in engem Zusammenhang mit den verwendeten Methoden und der Anzahl der für die Modellbildung verwendeten Referenzwerte (Noack 2018). Die neuen mathematischen Ansätze für die Ableitung von Informationen werden von einigen Wissenschaftler/innen (Mainzer 2014, nach Noack 2018) kritisiert, da sie sich ausschließlich auf die Herstellung eines empirischen

Zusammenhangs zwischen Daten und Phänomenen beschränken, ohne die kausalen Ursachen zu kennen und zu berücksichtigen.

Bildgebende Sensoren liefern Kamerabilder, auf deren Basis verschiedene Objekte erkannt werden können. Es werden unterschiedliche Kamerateypen zur zwei- (2-D-) oder dreidimensionalen (3-D-)Abbildung genutzt, die den RGB-Farbraum (rot, grün und blau), das Rot- und Nahinfrarotspektrum oder multispektrale Bänder erfassen (Mavridou et al. 2019). Die digitalen Kamerabilder müssen mit einer entsprechenden Software zur Bildverarbeitung und -interpretation gefiltert, zerlegt und klassifiziert werden, um die zu erkennenden Objekte bzw. Konturen von Objekten zu bestimmen (Vazquez-Arellano et al. 2016). Beispielsweise werden bei der Unkrauterkennerung die ermittelten geometrischen Formmerkmale mit einer Datenbasis von repräsentativen Individuen aller untersuchten Unkrautarten und Kulturpflanzen verglichen (Oebel/Gerhards 2006). Bei bildgebenden Sensorsystemen werden zur Datenanalyse oftmals Techniken des maschinellen Lernens eingesetzt (Kubinger et al. 2017).

Umgebungseinflüsse wie sich ändernde Lichtverhältnisse bedingt durch unterschiedliche Tages- und Jahreszeiten sowie Witterungsverhältnisse ebenso wie Störungen durch Staub, Pollenflug, Nebel oder Niederschlag stellen eine große Herausforderung für bildgebende Sensorsysteme dar. Außerdem erschwert die große Datenmenge, die diese Sensoren bereitstellen, aktuell noch die Auswertung und Ableitung von Handlungsanweisungen in Echtzeit (Kubinger et al. 2017; McCarthy et al. 2010).

Die Anwendungsfelder von bildgebenden Sensoren in der Landwirtschaft sind vielfältig (Kubinger et al. 2017; Mavridou et al. 2019):

- › Navigation von Landmaschinen, insbesondere bei Reihenkulturen entlang der Pflanzenreihen;
- › Phänotypisierung von Pflanzen in der Pflanzenzucht (Ruckelshausen 2014);
- › Erkennung von Unkrautarten im Pflanzenbestand zur gezielten Unkrautbekämpfung (Kap. 2.2.3);
- › Erkennung von Krankheits- oder Schädlingsbefall in Pflanzenbeständen;
- › Bestimmung von Erntegut und Reifegrad für eine automatisierte Obst- und Gemüseernte;
- › Beobachtung des Tierverhaltens beim Stallmanagement (Kap. 2.3.4);
- › Umgebungsüberwachung bei autonomen (bzw. teilautonomen) Landmaschinen im Freien (z. B. bei Mähdeschern, Kap. 2.2.4) und im Stall (z. B. bei frei navigierenden Fütterungs- und Reinigungsrobotern, Kap. 2.3.4).

Bildgebenden Sensoren kommt ein sehr hoher Stellenwert insbesondere bei der Realisierung von autonomen Landmaschinen und Robotern zu, da sie ein wichtiger Bestandteil der Umgebungserkennung sind (Kap. 3.3).

2.1.2 Sensordatenverarbeitung und -interpretation

Die mit Sensoren erhobenen Messwerte stellen in der Regel nicht direkt nutzbare Daten über Boden, Pflanzen und Tiere zur Verfügung.¹ Deshalb sind sie als solche noch nicht aussagekräftig. Vielmehr muss eine Übersetzung der Messwerte in Zustandsbeschreibungen wie beispielsweise Humusgehalt des Bodens, Biomasse eines Pflanzenbestands oder Qualitätsparameter der Milch erfolgen. Aus den direkt mit dem Sensor erfassten Messwerten müssen also die bewirtschaftungsrelevanten Zustandsgrößen bestimmt werden. Voraussetzung sind wissenschaft-

¹ Die einzige Ausnahme bildet die kontinuierliche direkte Bestimmung des bewirtschaftungsrelevanten pH-Wertes mit einem pH-Elektroden-Sensor (Kap. 2.2.1).

lich fundierte Algorithmen, die den Zusammenhang zwischen Messwert und Zustandsgröße als handlungsrelevante Information abbilden (Weltzien/Gebbers 2016). Teilweise ist neben den Sensormesswerten ein Hinzuziehen von weiteren Daten notwendig, wie z. B. die mittels eines N-Testers² erhobene Stickstoffversorgung der Pflanze.

Anschließend ist aus den sensorbasierten Zustandswerten die Ausprägung der Bewirtschaftungsmaßnahme zu bestimmen, wofür die erwähnten Algorithmen notwendig sind. Ergebnis ist die Steuerung der Bewirtschaftungsmaßnahme, wie beispielsweise eine teilflächenspezifische Variation der Aussaatmenge, der Düngermenge oder der Ausbringungsmenge eines Pflanzenschutzmittels in der Pflanzenproduktion bzw. eine variierte Bereitstellung von Kraftfutter in der Tierproduktion, mittels einer Applikationskarte oder einer direkten Steuerung der Applikation. Die Festlegung einer variierten Bewirtschaftungsmaßnahme kann im Onlineverfahren unmittelbar und automatisch erfolgen oder im Offlineverfahren einen eigenständigen Arbeitsschritt darstellen (Kap. 2.1.4).

2.1.3 Einsatzbereiche von Sensoren

Moderne Landmaschinen sind mittlerweile mit einer Vielzahl von Sensoren ausgerüstet (Kap. 3) und verschiedene Sensoren werden zunehmend sowohl in der pflanzlichen Produktion (Außenwirtschaft) als auch in der tierischen Produktion (Innenwirtschaft) eingesetzt (Doluschitz/Gindele 2019, S. 45; Link-Dolezal et al. 2012). Bei der Sensornutzung in der Pflanzenproduktion (Kap. 2.2) sind folgende grundsätzliche Einsatzbereiche zu unterscheiden:

- › Sensoren als integraler Bestandteil von Landmaschinen (z. B. Erntesensoren, Maschinensensoren),
- › Sensorsysteme als eigenständige Komponenten zum Anbau an Traktoren (z. B. Stickstoffsensoren, Bodenscanner),
- › Sensoren in der Fernerkundung von Drohnen bis Satelliten.

In der Tierproduktion (Kap. 2.3) gibt es folgende Einsatzbereiche:

- › Sensoren unmittelbar am oder im Tier (z. B. am Halsband, an der Ohrenmarke oder als Sensorkapsel im Pansen),
- › Sensorsysteme zum Monitoring von Einzeltieren oder Tierbeständen (z. B. 3-D-Sensoren zur Evaluierung der Körperkondition von Milchkühen, Sensor zum Verhaltensmonitoring von Schweinen; Kap. 2.3.1 u. 2.3.4),
- › Sensoren als integraler Bestandteil von automatisierten Maschinen in der Tierhaltung (z. B. Melkroboter, Fütterungsautomaten),
- › Sensorsysteme im Stallbereich (z. B. Temperatursensoren für Stallmanagement, Kap. 2.3.4).

2.1.4 Verfahren der Sensordatennutzung

Bei der Nutzung von Sensordaten werden anhand der zeitlichen Beziehung zwischen Informationsgewinnung (d. h. sensorischer Datenerfassung) und Informationsumsetzung (d. h. Durchführung von Bewirtschaftungsmaßnahmen) grundsätzlich folgende Verfahren unterschieden (Rösch et al. 2007, S. 32):

- › Offlineverfahren (Kartieransatz),
- › Onlineverfahren (Sensoransatz),

² N-Tester messen die Chlorophyllkonzentration im jüngsten vollentwickelten Blatt von Getreide (zum Zeitpunkt Schossen bzw. Ährenschieben), wobei mindestens 30 repräsentativ über den Schlag ausgewählte Pflanzen gemessen werden. Aus den N-Tester-Messwerten wird unter Berücksichtigung von weiteren Parametern, wie z. B. Sorte, Ertrag und bisher gedüngte Stickstoffmenge und der N_{\min} -Menge im Boden, der Stickstoffbedarf bestimmt.

› Kombination von Off- und Onlineverfahren (Sensoransatz mit Kartenüberlagerung).

Bei *Offlineverfahren* sind die Datenerfassung durch Sensoreinsatz, die Dateninterpretation (z. B. Erstellung von Karten und Ableitung von Maschinenaufträgen) sowie die Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahmen zeitlich unabhängige Arbeitsschritte. Sensordaten, die im Offlineverfahren genutzt werden, können von vorherigen Maßnahmen stammen (z. B. Ertragsdaten), mit speziellen Sensorsystemen direkt auf dem Feld oder aus der Luft (z. B. mittels Drohnen) erhoben werden oder von Satelliten generiert werden. Die Sensordaten werden georeferenziert erhoben, also kleinen Rasterzellen bzw. Teilflächen zugeordnet. Das Ergebnis sind Bodenkarten, Pflanzenbestandskarten, Ertragskarten etc. Deshalb werden Offlineverfahren oftmals auch als Kartieransatz (Mapping Approach) bezeichnet.

Aus den vorliegenden Merkmalskarten ist dann mithilfe von Erfahrungen, einfachen Regeln oder geeigneten Modellen die Ausgestaltung der Bewirtschaftungsmaßnahmen abzuleiten. Das Ergebnis sind Applikationskarten für die jeweilige Bewirtschaftungsmaßnahme. Eine Applikationskarte enthält einen georeferenzierten, teilflächen-spezifischen Maschinenauftrag mit für die Landmaschine verwertbaren Angaben darüber, auf welchen Teilflächen die betreffende Maßnahme durchgeführt bzw. mit welcher Intensität die Maßnahme auf den Teilflächen ausgeführt werden soll (Rösch et al. 2007, S. 33).

Den Kartieransatz zeichnet aus, dass verschiedene Datensätze, ggf. aus mehreren Jahren, zusammengeführt werden. Dieser Ansatz ist insbesondere dann von Vorteil, wenn der Maschinenauftrag für die Bewirtschaftungsmaßnahme von sich nur langsam ändernden Merkmalen abhängig ist (z. B. von bestimmten Bodeneigenschaften wie Grundnährstoffgehalte). Außerdem sind stabile Merkmale oftmals für mehrere Bewirtschaftungsmaßnahmen verwendbar, wodurch der Aufwand für die Datenerfassung sinkt (Rösch et al. 2007, S. 32). Die Kartenerstellung ist unter Umständen mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden, allerdings kann die Landwirtin/der Landwirt die Datenauswertung nachvollziehen und Einfluss auf den Maschinenauftrag nehmen.

Mögliche Anwendungsfelder von Offlineverfahren in der Pflanzenproduktion sind Bodenbearbeitung, Aussaat, Grün- und Stickstoffdüngung sowie die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln (Rösch et al. 2007, S. 32). In der Tierhaltung können insbesondere Sensorsysteme zur Tiergesundheit und zum Tierverhalten als Offlineverfahren angesehen werden. Bei diesen Systemen erfolgen zwar eine unmittelbare Auswertung der Sensordaten und ggf. eine Information der Landwirtin/des Landwirts, aber die eingeleiteten Maßnahmen sind davon zeitlich unabhängig.

Onlineverfahren sind sogenannte Echtzeitverfahren, d. h., der Messvorgang des Sensors, die Datenanalyse sowie die Erstellung des Maschinenauftrages und die Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahme erfolgen automatisch und unmittelbar. Für eine variierende Stickstoffdüngung bedeutet dies beispielsweise, dass Daten mit einem Sensor direkt auf dem Feld erfasst, daraus Informationen über die Biomasse des Bestands bzw. die Stickstoffversorgung der Pflanze abgeleitet und der jeweilige Stickstoffbedarf bestimmt sowie die angepasste Ausbringung des Stickstoffdüngers unmittelbar ausgeführt werden. Beim Onlineverfahren sind Sensoren ein integraler Bestandteil eines Systems, das auch die Steuerung der Bewirtschaftungsmaßnahme übernimmt. Entsprechend wird teilweise auch von Sensoransatz gesprochen (Rösch et al. 2007, S. 33 f.).

Bei Onlineverfahren besteht keine prinzipielle Notwendigkeit einer georeferenzierten Applikationskarte, aber in der Regel wird sie zu Dokumentationszwecken erstellt. Onlineverfahren sind besonders geeignet für Maßnahmen, die auf zeitlich schnell verändernde Boden- und Pflanzeigenschaften (wie z. B. Stickstoffversorgung der Pflanzen, Verunkrautung) reagieren sollen (Rösch et al. 2007, S. 34). Die Sensorsysteme erfordern teilweise eine Kalibrierung, um sie auf die am Standort vorherrschenden Verhältnisse zum jeweiligen Zeitpunkt einzustellen (Reckleben 2014). Ansonsten ist mit der Nutzung von Onlinesensorsystemen kein zusätzlicher Arbeitsaufwand verbunden. Die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsalgorithmen und die Eingreifmöglichkeiten der Landwirtin oder des Landwirts sind dagegen eingeschränkt (Weltzien/Gebbers 2016).

Die *Kombination von Off- und Onlineverfahren* wird auch als Sensoransatz mit Kartenüberlagerung bezeichnet (Rösch et al. 2007, S. 34). Die Datenbasis für Bewirtschaftungsmaßnahmen wird dadurch erhöht, da sowohl aktuell in Echtzeit gewonnene Sensordaten als auch auf der Landmaschine vorhandene Kartenwerte in die Applikationsanweisung einfließen. So können sowohl die aktuell erhobenen Sensordaten als Korrekturgröße oder zur Bestätigung der Kartenwerte für Applikationsmengen dienen als auch die Kartenwerte zur Bestätigung bzw. zur Korrektur der in Echtzeit gewonnenen Sensorwerte herangezogen werden (Ehlert 2010). Der Sensoransatz mit Kartenüberlagerung kann bei Stickstoffdüngung und Pflanzenschutzmaßnahmen eingesetzt werden und ist für Situationen von geringer bis hoher räumlicher und zeitlicher Variabilität geeignet (Link-Dolezal et al. 2012).

2.2 Sensoren in der Pflanzenproduktion

In der pflanzlichen Produktion können verschiedene Sensoren eingesetzt werden, um die Wachstumsbedingungen für Pflanzen zu optimieren und Erträge zu sichern bzw. zu steigern. In diesem Kapitel werden folgende Anwendungsbereiche mit besonderer Relevanz betrachtet:

- › Bodensensoren
- › Stickstoffsensoren
- › Unkrautsensoren
- › Erntesensoren

Weitere mögliche Anwendungsfelder von Sensoren in der Pflanzenproduktion sind die Bewässerung, die Pflanzenkrankheits- und Schädlingsbekämpfung, auf die hier nicht eingegangen wird.

2.2.1 Bodensensoren

Unter Bodensensoren werden hier Sensorsysteme zur Bestimmung von Bodeneigenschaften (bzw. Bodenparametern) und zur Steuerung der Bodenbearbeitung zusammengefasst. Die oftmals kleinräumige Variation von Bodeneigenschaften ist mit den traditionellen Bodenuntersuchungsmethoden, die auf Beprobung und Laboranalysen beruhen, mit einem zeitlich und monetär akzeptablen Aufwand nicht abbildbar (Gebbers et al. 2014). Bodensensorsysteme bieten neue Möglichkeiten einer effizienten Bodenkartierung. Für eine Offlinenutzung stehen bereits verschiedene Bodensensoren als Anbau- oder Einzelgeräte kommerziell zur Verfügung – zur *Erfassung von Bodeneigenschaften* beispielsweise fahrzeuggetragene Sensorsysteme, die unterschiedliche Messprinzipien nutzen sowie im Nahbereich des Bodens (maximal 2 m darüber) oder im Boden arbeiten (Gebbers et al. 2014).

Am längsten kommerziell angeboten und vermutlich am meisten genutzt werden *Sensoren beruhend auf elektromagnetischer Induktion*, umgangssprachlich auch als Bodenscanner bezeichnet. Das Sensorgerät wird an ein Fahrzeug angehängt und die Messwerte während der Überfahrt zusammen mit den Positionsbestimmungen aus einem Satellitennavigationssystem aufgezeichnet (Gebbers et al. 2014). Die Funktionsweise besteht darin, dass im Sekundentakt die Sendespule während der Fahrt elektromagnetische Wellen in den Boden schickt, die abhängig u. a. von Bodenart, Wassergehalt und Verdichtungen unterschiedlich starke Ströme induzieren. Sie erzeugen in der Empfangsspule eine Sekundärwelle, die dann entsprechend ausgewertet wird (Rudolf 2017). Damit erfolgt eine Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens sowie in der Folge eine Erfassung von Bodentextur (z. B. Tiefe von Dichtlagerung), relativer Wassergehalt und Bodentyp. Die Sensormessungen werden für die Erstellung von Bodenkarten im Offlineverfahren genutzt und erlauben eine variable Steuerung der Bearbeitungstiefe von Bodenbearbeitungsgeräten sowie eine variable Anpassung der Aussaatmenge von Sämaschinen in Abhängigkeit von Bodenbedingungen (Bodenfeuchte, Bodenart) mittels Applikationskarten (Adamchuk et al. 2018,

S. 127 f.). Beispiele für kommerziell verfügbare Sensorsysteme mit elektromagnetischer Induktion sind »Topsoil Mapper«³, »iScan«⁴, »EM38-MK2«⁵ und »SoilXplorer«⁶.

Optische Sensoren mit multispektraler Reflexionsmessung im Nahbereich nehmen eine Messung im sichtbaren Rot und Nahinfrarot vor. Am permanent im Boden geführten Sensorkopf befindet sich an der Unterseite eine Verschleißplatte mit einem Saphirfenster, durch das der Boden beleuchtet und die reflektierte Strahlung aufgenommen und an ein Spektrometer weitergeleitet wird (Gebbers et al. 2014). Es kann eine Bestimmung der organischen Substanz (Humus), der Bodenzusammensetzung (Ton- und Sandgehalt), der Bodenfeuchte und von Nährstoffen im Boden vorgenommen werden (Adamchuk et al. 2018, S. 129). Eine Nutzung kann nur bei trockenem Boden erfolgen. Außerdem ist eine Kalibrierung für jedes Feld notwendig. Dazu müssen Referenzproben gesammelt, im Labor mit Standardmethoden analysiert und dann mit den jeweiligen Spektren korreliert werden (Gebbers et al. 2014). Hier liegt vermutlich die Ursache, dass diese Sensoren bislang nur selten genutzt werden (Weltzien/Gebbers 2016). Ein Beispiel für ein verfügbares Sensorsystem ist der »OpticMapper«⁷. Weiterhin wird mittlerweile eine Kombination mit einem elektromagnetischen Sensor angeboten; Beispiele sind der »iScan+«⁸ und der »SmartFirmer«⁹. Da der organische Gehalt des Bodens eng mit dessen Fähigkeit, Wasser und Nährstoffe zu speichern, und somit dem Ertragspotenzial korreliert, ist prinzipiell auch eine Nutzung im Onlineverfahren (z. B. bei der Aussaat) möglich (Noack 2018).

Ein weiterer Sensortyp ist der *Gamma*sensor. Mit der Gammastrahlenspektroskopie erfolgt eine Messung der natürlichen Gammastrahlung des Bodens. Die typischen Spitzenwerte (Peaks) der Messung stehen in Korrelation mit dem geologischen Ursprung des Bodens (z. B. Löss, Geschiebe, Torf), der Bodentextur (z. B. Tongehalt) sowie dem Kalium- und Eisengehalt des Oberbodens (Adamchuk et al. 2018, S. 129). Eine sorgfältige Kalibrierung mit analysierten Bodenproben ist notwendig, da die Messergebnisse standortspezifisch und vom Ursprungsgestein des Bodens abhängig sind (Priori et al. 2013). Das Messsystem »Geophilus«¹⁰ kombiniert einen Gamma- mit einem elektrischen Widerstandssensor, womit hochaufgelöste 3-D-Bodenkarten (bis 1,5 m Bodentiefe) erstellt werden.

Ein *elektrochemischer Sensor* wird zur Messung des Boden-pH-Wertes verwendet. Der pH-Wert ist ein wichtiger pflanzenbaulicher Faktor, da er die Verfügbarkeit von Nährstoffen beeinflusst. Die Messung erfolgt während der Überfahrt, bei der kontinuierlich Bodenproben mit einem Probenstab gesammelt und die pH-Werte der Bodenprobe mit einer Antimonelektrode bestimmt werden. Die Ergebnisse können zur teilflächenspezifischen Kalkung im Offlineverfahren genutzt werden (Gebbers et al. 2014). Ein kommerziell verfügbares Sensorsystem ist der Bodenscanner »MSP3«¹¹.

Mechanische Bodensensoren können einerseits den Eindringungswiderstand in den Boden oder andererseits den Kraftaufwand für das Ziehen eines Instruments durch den Boden messen (Adamchuk et al. 2018, S. 130), was u. a. zur Bestimmung von Bodenverdichtungen genutzt werden kann. Ein Beispiel ist das Penetrometer. Es wird an einen Traktor angebaut, stößt in kurzen Abständen Sonden in den Boden und misst den Eindringungswiderstand. Da die Messung im Stop-and-go-Modus in kurzen Abständen wiederholt werden muss, gilt das Verfahren als unpraktisch. Eine kontinuierliche Messung ist mit horizontalen Penetrometern möglich und kann durch Kraftsensoren oder über den Kraftstoffverbrauch erfolgen (Hemmat/Adamchuk 2008).

Seit Anfang 2020 ist das Sensorsystem »FarmLab«¹² auf dem Markt, das mit *optischen Sensoren umfangreiche Bodenanalysen* ermöglicht. Dieses Sensorsystem ähnelt einem Spaten und wird wie dieser mit dem Fuß in den Boden gestochen. Die Sensoren liefern bis zu 5.000 Einzeldaten pro Messung bis 30 cm Bodentiefe (Bodeneinstich), die über eine Mobilfunkverbindung auf einem Cloudserver gesendet und mithilfe spezieller Auswertelgorithmen analysiert werden. Die Auswertung wird innerhalb von maximal 20 Sekunden an die Nutzerin/den Nutzer gesendet. Es werden zahlreiche Bodenparameter bestimmt: N_{min} (Nitrat und Ammonium), pflanzenver-

³ www.geoprospectors.com/de/produkte-leistungen/landwirtschaft/ (18.8.2021)

⁴ www.veristech.com/the-sensors/iscan (18.8.2021)

⁵ www.geonics.com/html/em38.html (18.8.2021)

⁶ <https://agxtend.com/de/produkte/soilxplorer> (18.8.2021)

⁷ <https://www.environmental-expert.com/products/veris-opticmapper-dual-wavelength-optical-sensor-601563> (18.8.2021)

⁸ www.veristech.com/the-sensors/iscan (18.8.2021) <https://youtu.be/ERkZdLm44bg>

⁹ www.precisionplanting.com/products/product/smartfirmer (18.8.2021)

¹⁰ www.geophilus.de/geophilus-messsystem.html (18.8.2021)

¹¹ www.veristech.com/the-sensors/msp (18.8.2021)

¹² <http://stenon.io/> (18.8.2021)

fügbaren Phosphor, Kalium, Magnesium, pH-Wert, Bodentemperatur und -feuchtigkeit sowie Bodenart und -textur. Dieser Sensorspaten soll somit eine komplette Bodenanalyse in Laborqualität ermöglichen (Rudolf 2019). Ein weiteres Beispiel ist das Sensorsystem »P4000«¹³, das der umfangreichen Charakterisierung von Bodenprofilen dient. Es wird an einen Traktor angebaut und enthält einen Penetrometer (siehe mechanische Bodensensoren), einen Sensor zur elektrischen Leitfähigkeit des Bodens sowie optische Sensoren zur Messung der Reflexion im Rot- und Nahinfrarotbereich.

Eine *Fernerkundung von Bodeneigenschaften* erfolgt mit *multispektralen bzw. hyperspektralen optischen Sensoren* (Kap. 2.1.1). Insbesondere die Reflexion im Bereich des sichtbaren und nahinfraroten Lichts sowie des kurzwelligeren Infrarots lässt sich zur Bestimmung von Bodeneigenschaften nutzen. Auf diese Weise wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen die organische Substanz des Bodens, die Bodenstruktur, die Bodenfeuchte, der Nährstoffgehalt, die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert ermittelt (Ge et al. 2011; Mulla 2013).

Mittlerweile werden erste Bodensensorsysteme im *Onlineverfahren* angeboten. Die mit dem Sensor erhobenen Bodeneigenschaften werden dabei unmittelbar, d. h. in Echtzeit, zur *Steuerung einer variablen Bodenbearbeitung bzw. Aussaat* herangezogen. Ein Beispiel für ein solches Onlinesensorsystem ist der »Topsoil Mapper«¹⁴. Der Bodensensor arbeitet mit elektromagnetischer Induktion, wird an der Fronthydraulik des Traktors montiert und benötigt keinen Bodenkontakt für die Messung. Die Bodeneigenschaften Bodenart, Wassersättigung und Verdichtung werden ermittelt, daraus dann die optimale Bearbeitungstiefe bei der Bodenbearbeitung bzw. die den unterschiedlichen Standortbedingungen angepasste Aussaatstärke berechnet und schließlich die Steuerung der entsprechenden Landmaschine vorgenommen.

Zahlreiche weitere Sensortypen und Messgrößen werden derzeit erforscht, wie mechanische (z. B. Zugkraft), chemische (z. B. Feldeffekttransistoren), akustische (Schall im Boden), optische (z. B. Raman- und Plasmaspektroskopie), elektrische (z. B. Georadar) und Radioaktivitätssensoren (z. B. Röntgenfluoreszenz) (Viscarra Rosel/Bouma 2016; Weltzien/Gebbers 2016).

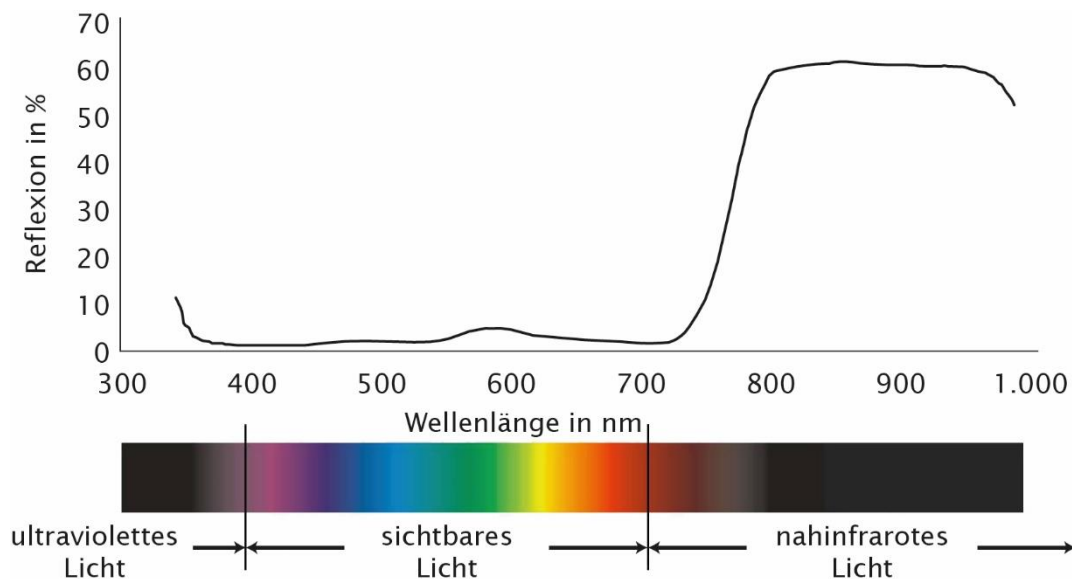
2.2.2 Stickstoffsensorsysteme

Stickstoffsensoren (N-Sensoren) erfassen nicht direkt die Stickstoffversorgung bzw. den Stickstoffbedarf eines Pflanzenbestands. Vielmehr wird die Lichtreflexion des Pflanzenbestands mittels *optischer Sensoren*, sogenannter *Reflexionssensoren* (Kap. 2.1.1), in seiner räumlichen Variabilität gemessen. Dies erfolgt mit Fotodioden, welche die Stärke und Wellenlänge des aufgenommenen Lichts in elektrische Signale umwandeln (DLG 2013, S. 7). Es wird der Sachverhalt genutzt, dass Pflanzenbestände die verschiedenen Wellenlängen des Lichts in spezifischer Weise absorbieren bzw. reflektieren, mit dem Ergebnis einer typischen Reflexionskurve, wie die Abbildung 2.2 zeigt (DLG 2013). Blau und Rot des sichtbaren Lichts werden von Chlorophyll zur Photosynthese stark absorbiert, das Licht im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich hingegen weniger stark, sodass dem menschlichen Auge die Vegetation grün erscheint. Während die Reflexionskurven von Vegetationen im sichtbaren Wellenbereich durch Absorption geprägt werden, sind im nahen Infrarot (NIR) hauptsächlich Reflexionsvorgänge wirksam (Lilienthal 2014).

¹³ <http://veristech.com/the-sensors/p4000> (18.8.2021)

¹⁴ <https://www.topsoil-mapper.com/> (18.8.2021)

Abb.2.2 Typische Reflexionskurve eines gesunden Pflanzenbestands



Quelle: DLG 2013, S.8

Für die Stickstoffdüngung werden *Multispektralsensoren* (Kap. 2.1.1) eingesetzt, die drei bis fünf Wellenlängenbereiche im sichtbaren roten und nahinfraroten Bereich erfassen. Wenn die gemessenen Reflexionen in diesen beiden Wellenlängenbereichen, d.h. das durch die Photosynthese genutzte sichtbare Licht und das durch die pflanzliche Biomasse reflektierte NIR-Licht, ins Verhältnis gesetzt werden, können Aussagen über die Vegetation (Chlorophyllgehalt und Biomasse) getroffen werden (Lilienthal 2014).

Zur Beschreibung dieser Beziehung wurden verschiedene *Vegetationsindizes* entwickelt. Wichtige Indizes sind (Lilienthal 2014; Reckleben 2014):

- › Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ist ein Indikator für die Biomasse, der die Effekte von Störgrößen limitiert.
- › Der Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) berücksichtigt die Reflexion des Bodens bei geringer Vegetationsbedeckung.
- › Der Red Edge Inflection Point (REIP) wird als Indikator für die Chlorophyllkonzentration und Stickstoffaufnahme genutzt.

Es gibt weitere Vegetationsindizes, die teilweise von Stickstoffsensorsystemen verwendet werden (Lilienthal 2014). Aus den Sensor- bzw. Indexwerten muss auf die auszubringende Nährstoffmenge geschlossen werden. Dies erfolgt durch *Applikationsalgorithmen*, die kultur- und düngungsterminspezifisch sein müssen. Weiterhin werden für eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung eine entsprechende Bordelektronik auf dem Traktor und ein Düngerstreuer mit variabler Streutechnik benötigt, um die vom Sensorsystem vorgegebenen variierenden Applikationsmengen umsetzen zu können. Die getätigten Düngergaben werden ggf. georeferenziert aufgezeichnet und dokumentiert.

Grundsätzlich gilt bei der *Berechnung der Düngergaben*: Hohe Werte der Vegetationsindizes bedeuten mehr Biomasse und Chlorophyll, lassen somit auf eine gute Stickstoffversorgung schließen und bedingen eine entsprechend geringere Stickstoffdüngung. Da von den Messwerten der Reflexionssensoren bisher nur auf die Stickstoffversorgung rückgeschlossen wird und andere ertragsbegrenzende Faktoren, wie z.B. Pflanzenkrankheiten sowie die Versorgung mit Phosphor und Wasser, nicht berücksichtigt werden, ist ein optimal versorgter und gesunder Bestand die Voraussetzung für eine sensorgestützte Stickstoffdüngung (DLG 2013, S. 10).

Für eine Nutzung im Onlineverfahren sind mittlerweile verschiedene *Stickstoffsensorsysteme kommerziell verfügbar* (Tab. 2.1), die sich in verschiedenen Merkmalen unterscheiden. So wird etwa zwischen passiven und aktiven Sensoren differenziert. Das am längsten verfügbare Sensorsystem ist ein passiver Sensor, z. B. »N-Sensor«¹⁵, der mit natürlichem Sonnenlicht arbeitet und deshalb nur am Tag eingesetzt werden kann. Alle anderen Sensorsysteme sind aktive Sensoren, die eine künstliche Lichtquelle (lichtemittierende Dioden – LED) besitzen und somit auch in der Dämmerung und Nacht nutzbar sind (DLG 2013, S. 7; Drücker 2018). Die Onlinestickstoffsensorsysteme variieren in einer Reihe weiterer Merkmale (z. B. Anzahl der Sensoren, Montage und Nutzungsbereiche; siehe Tab. 2.1). Ein wichtiger Unterschied besteht bei der genauen Ausgestaltung der Vegetationsindizes und Düngungsalgorithmen, die aber nicht offengelegt sind. Ein Praxisversuch mit Winterweizen in der Vegetationsperiode 2017 zeigte, dass die getesteten Sensorsysteme zu deutlich unterschiedlichen Stickstoffdüngungen zu den verschiedenen Düngungsterminen geführt hatten (Ramm/Reckleben 2019).

Grundsätzlich benötigen alle Onlinestickstoffsensorsysteme zu jedem Düngungstermin eine *Kalibrierung*, müssen also an die zum Zeitpunkt der Düngung am Standort herrschenden Verhältnisse (Bestandsentwicklung, Düngerstrategie, Stickstoffbedarf und sortenspezifische Reflexion) angepasst werden. Bei der freien Kalibrierung entscheidet die Landwirtin/der Landwirt über die durchschnittliche Stickstoffgabe sowie die maximale Stickstoffmenge für schlecht versorgte und die minimale Stickstoffmenge für gut versorgte Teilflächen. Zur Bestimmung der Referenzstickstoffgabe stehen N-Tester zur Verfügung (Reckleben 2014).

¹⁵ <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/tools-und-services/n-sensor/> (18.8.2021)

Tab. 2.1 Sensorsysteme zur Stickstoffdüngung

Sensorsystem	N-Sensor	N-Sensor ALS 2	CROP SENSOR	GreenSeeker	CropSpec	ISARIA
Hersteller	Yara GmbH & Co. KG	Yara GmbH & Co. KG	CLAAs Vertriebsgesellschaft mbH	Trimble Inc.	Topcon Deutschland Positioning GmbH	Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Praxiseinsatz seit	1999	2006	2010	2009	2011	2009
Lichtquelle	Tageslicht	LED (vorher Xenonblitzlampe)	LED	LED	LED	LED
Sensor	optischer Multi-spektralsensor (versch. Wellenlängen)	optischer Multi-spektralsensor (versch. Wellenlängen)	optischer Multi-spektralsensor (4 Wellenlängen)	optischer Multi-spektralsensor (2 Wellenlängen)	optischer Multi-spektralsensor (2 Wellenlängen)	optischer Multi-spektralsensor (4 Wellenlängen)
Lichtdetektor	Spektrometer	Fotodioden	Fotodioden	Fotodioden	Fotodioden	Fotodioden
genutzte Vegetationsindizes	SR, REIP	SR, REIP	NDVI, REIP	NDVI	REIP	NDVI, REIP
Montage	Schlepperdach	Variabel	Frontanbau	Frontanbau	Schlepperdach	Frontanbau
Messrichtung	schräg	schräg/senkrecht	senkrecht	senkrecht	schräg	senkrecht
Nutzungsarten	freie und absolute Kalibrierung	freie und absolute Kalibrierung	freie Kalibrierung, Map Overlay	freie Kalibrierung	freie Kalibrierung	freie Kalibrierung, Map Overlay
Nutzungsbereiche	N-Düngung, Wachstumsregulator	N-Düngung, Wachstumsregulator, Pflanzenschutzmittel	N-Düngung, Wachstumsregulator, Pflanzenschutzmittel	N-Düngung	N-Düngung	N-Düngung, Wachstumsregulator, Pflanzenschutzmittel

Eigene Zusammenstellung nach DLG 2013, Lilienthal 2014 und Reckleben 2014

Absolute Kalibrierung bedeutet, dass die Düngungsstrategie für jedes Entwicklungsstadium von Getreide bereits festgelegt ist und bei der Kalibrierung nur noch über das Niveau der Stickstoffdüngung und den Regelbereich (d.h. minimale und maximale Gabe) entschieden werden muss (Reckleben 2014). Die zwei Sensorsysteme »CROP SENSOR«¹⁶ und »ISARIA«¹⁷ enthalten zusätzlich ein *Expertendüngersystem* für Winterweizen als optionales Modul. Bei diesem System wird der Bestand automatisch mit der für den Zielertrag notwendigen Stickstoffmenge gedüngt und eine Kalibrierung entfällt. Außerdem ist eine Kombination von Onlinesensorsystemen mit dem Kartenansatz als Map Overlay möglich. Dabei wird der Schlag anhand von verschiedenen Daten, wie z. B. von Boden- und Ertragskarten, in Ertragserwartungszonen aufgeteilt und die Sensordüngung entsprechend angepasst (Drücker 2018).

Onlinestickstoffsensoren lassen sich grundsätzlich auch zu einer variierten Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln wie Wachstumsreglern¹⁸ und Fungiziden nutzen. Mit dem Sensor wird die Entwicklung bzw. die Biomasse des Pflanzenbestands ermittelt und die Ausbringungsmenge entsprechend angepasst. Dafür sind passende Applikationsalgorithmen notwendig, wie z. B. »agriPORT«¹⁹.

Eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung kann grundsätzlich auch auf der Basis von optischen Spektralensoren, die an Drohnen oder Satelliten montiert sind, im Offlineverfahren erfolgen (Kap. 4). Dabei werden in der Regel die gleichen Wellenlängenbereiche und Vegetationsindizes verwendet wie bei Onlinesensorsystemen. Die spektralen Informationen von Satellitenaufnahmen mehrerer Jahre zur Biomasseentwicklung können wiederum zur Ableitung von Ertragspotenzialkarten genutzt werden. Werden diese zusätzlich mit Wetterdaten und Pflanzenwachstumsmodellen kombiniert, ist eine Schätzung des teilflächenspezifischen Gesamtstickstoffbedarfs möglich, aus dem sich Sollwertkarten für eine standortangepasste Düngung ableiten lassen (Noack 2018). Ertragspotenzialkarten werden von verschiedenen Dienstleistern (z. B. AGRO-SATConsulting GmbH²⁰, FarmFacts GmbH²¹, Geosys Holdings ULC²², green spin GmbH²³) angeboten. Schließlich gibt es mittlerweile auch kommerzielle Anbieter (VISTA Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH²⁴), die aus Satellitendaten der laufenden Vegetationsperiode aktuelle Biomasse- und Applikationskarten erstellen. Satellitenaufnahmen sind meist durch eine geringere spektrale Auflösung weniger spezifisch mit Eigenschaften des Pflanzenbestands verknüpft und weisen eine geringere räumliche Auflösung (etwa 5 bis 30 m) auf (Noack 2018).

Bei der Anwendung von Stickstoffsensorsystemen, insbesondere im Onlineverfahren, bestehen noch einige *Grenzen und Probleme*:

- › Bei dünnen Pflanzenbeständen hat die Bodenreflexion noch einen starken Einfluss auf das Messergebnis. Eine entsprechende Korrektur findet bisher nicht statt. Die verfügbaren Sensorsysteme sind daher beispielsweise nicht für eine Herbstdüngung geeignet (Lilienthal 2014).
- › Bei Pflanzenbeständen mit größeren Blattmassen lässt sich mit den verwendeten Vegetationsindizes keine enge Beziehung mehr zur Stickstoffversorgung der Vegetation herstellen, sodass keine validen Düngergaben berechnet werden können (Lilienthal 2014).²⁵

¹⁶ <https://www.claas.de/blueprint/servlet/blob/2216510/d4da75dd0afe3e5651b021c7036134ca/374376-23-dataRaw.pdf> (18.8.2021)

¹⁷ <https://isaria-digitalfarming.com/> (18.8.2021)

¹⁸ Unter Wachstumsreglern (bzw. Halmverkürzern) werden unterschiedliche chemische Substanzen verstanden, die im Getreidebau eingesetzt werden, um die Standfestigkeit der Pflanzen zu verbessern und das Umknicken zu verhindern. Wachstumsregler greifen hierfür in den Phytohormonhaushalt der Pflanze ein und beeinflussen verschiedene Wachstumsparameter der Pflanze (Schönberger 2014; Strotmann 2019).

¹⁹ https://www.agricon.de/betrieb?gclid=CjwKCAjwn8SLBhAyEiwAHNTJbehzQTbYGRN-Vrmz5SGu0U0EN9TkFh51Bhd3QObh5ExI2De9izDT9DxoCPpAQAvD_BwE (18.8.2021)

²⁰ <http://agro-sat.de/> (18.8.2021)

²¹ www.nextfarming.de/ (18.8.2021)

²² <https://geosys.com/precision-ag-farm-solutions/> (18.8.2021)

²³ www.greenspin.de/ (18.8.2021)

²⁴ www.talkingfields.de/ (18.8.2021)

²⁵ Da N-Sensoren bislang nur in Getreide und Raps kommerziell eingesetzt werden, gilt die Aussage insbesondere für Getreide (Lilienthal 2014). Ob dieses Problem auch bei anderen Nutzpflanzenarten besteht, ist nicht bekannt.

- › Bei der freien Kalibrierung ist, insbesondere in der Anfangsphase der Nutzung eines N-Sensorsystems, die richtige Einschätzung des Ertragspotenzials und der Stickstoffnachlieferung des Bodens schwierig und kann zu Fehleinschätzungen führen (Reckleben 2014; Vinzent et al. 2019).

2.2.3 Sensorsysteme zur Unkrautbekämpfung

Bei den Sensorsystemen, die zur Steuerung der Unkrautbekämpfung eingesetzt werden, ist zwischen nicht bildgebenden und bildgebenden Sensoren zu unterscheiden (Ruckelshausen 2014). Während sich mit nicht bildgebenden Sensoren nur das Vorhandensein von Vegetation ermitteln lässt, ermöglichen bildgebende Sensoren darüber hinaus eine Unterscheidung von Unkraut und Kulturpflanze sowie die Erkennung von Unkrautarten.

Nicht bildgebende Sensoren zur Unkrautpflanzenerkennung nutzen optische Sensoren, die die Lichtreflexion der Vegetation im Rot- und Nahinfrarotbereich messen. Unkrautpflanzen können aufgespürt werden, weil sich die Reflexionskurven von Pflanzen signifikant von der Reflexion des Bodens unterscheiden (Fernández-Quintanilla et al. 2018). Diese Sensortechnik entspricht im Prinzip der Technik der Stickstoffsensoren. Nicht bildgebende optische Sensoren werden im Onlineverfahren genutzt, wobei nur eine Unterscheidung von Pflanzen und Boden, aber keine Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanze möglich ist. Aufgrund dessen können entsprechende Sensorsysteme nur vor der Aussaat bzw. im Voraufbau (wenn sich noch keine Kulturpflanzen auf dem Feld befinden) oder bei Reihenkulturen zwischen den Reihen eingesetzt werden. Außerdem ist der Einsatz von Breitband- bzw. Totalherbiziden erforderlich, da nicht zwischen Unkrautarten differenziert werden kann (TAB 2021, Kap. 3.2.1).

Aus den Sensormesswerten wird mittels eines Vegetationsindex (z.B. NDVI) in Echtzeit bestimmt, auf welcher Fläche und in welcher Menge Herbizide auszubringen sind. Entsprechend erfolgt die Ansteuerung der einzelnen Düsen der Pflanzenschutzspritze. Ziel ist ein verringerter Herbizidverbrauch, indem die Herbizidanwendung auf die tatsächlich vorhandene Verunkrautung beschränkt wird. Solche Systeme werden als Kombination von Sensoren, Software und Feldspritze angeboten; Beispiele sind »AmaSpot«²⁶, »WEED-IT«²⁷ und »Weedseeker«²⁸.

Bildgebende Sensoren ermöglichen über die Ermittlung spektraler und morphologischer Charakteristika der Pflanzen (wie Form, Farbe und Textur) eine differenzierte Erkennung von Unkrautarten und Kulturpflanzen und stellen einen intensiv untersuchten wissenschaftlichen Ansatz dar (Peteinatos et al. 2014). Diese Technik nutzt Kameras mit zwei spektralen Kanälen im roten und nahinfraroten Spektrum sowie Software zur Bilderkennung (Oebel/Gerhards 2006). Durch Bildanalyse und automatisierte Machine-Learning-Prozesse können Kulturpflanze und Unkraut unterschieden sowie Unkrautarten erkannt werden. Dies ermöglicht eine gezielte Unkrautbekämpfung auch im Kulturpflanzenbestand. Bildgebende Sensorsysteme sind mittlerweile praxisreif und erste kommerzielle Anwendungen im Onlineverfahren kommen auf den Markt. Dabei werden verschiedene Ansätze genutzt, nämlich eine Integration des Sensorsystems mit Bilderkennung in traditionelles Feldspritzengerät, z.B. »See & Spray«²⁹, oder eine Umsetzung in Form autonomer Kleingeräte (Roboter) mit Elektromotor, die die einzelne Unkrautpflanze chemisch oder mechanisch bekämpfen, z.B. »BoniRob«³⁰ und »AVO«³¹ (Kap. 5.2.1).

²⁶ <https://info.amazone.de/DisplayInfo.aspx?id=45907> (18.8.2021)

²⁷ www.weed-it.com/ (18.8.2021)

²⁸ <https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-938448/WeedSeeker2%20System%20%2D%20Flyer%20%2D%20German.pdf> (18.8.2021)

²⁹ <https://bluerivertechnology.com/our-products/> (18.8.2021)

³⁰ www-q.bosch-presse.de/pressportal/de/de/intelligenz-auf-dem-acker-agrarroboter-von-bosch-beseitigt-unkraut-automatisch-und-ohne-gift-33608.html (18.8.2021)

³¹ www.ecorobotix.com/de/ (18.8.2021)

2.2.4 Erntesensoren

Unter Erntesensoren, die in der Regel integraler Bestandteil von Erntemaschinen sind, werden hier zusammengefasst:

- › Sensoren zur Messung der Erntemenge (Ertragssensoren),
- › Sensoren zur Erfassung von Qualitätseigenschaften des Erntegutes,
- › Sensoren zur Steuerung von Ernteprozessen.

Sensorsysteme zur kontinuierlichen Bestimmung der Erntemenge, sogenannte Ertragssensoren, bilden die Grundlage für Ertragskartierungen, die teilflächenspezifisch die erzielten Erträge abbilden. Eine in den Mähdrescher integrierte, kontinuierliche Ertragsermittlung ist schon seit den 1990er Jahren kommerziell verfügbar. Durchsatzsensoren in Mähdreschern können auf zwei prinzipiellen Messprinzipien beruhen, entweder einer Volumenmessung oder einer Massenermittlung (Chung et al. 2016; Demmel 2001). Eine Volumenmessung erfolgt mit einem Paddelrad oder einer Lichtschranke. Dabei wird das ermittelte Volumen des Getreidestroms über das spezifische Gewicht in Massenwerte umgerechnet. Beim Messprinzip der Massenstromermittlung wird eine Kraft-/Impulsmessung oder ein radiometrisches Messsystem (Absorption von Gammastrahlen durch die Masse) genutzt (Chung et al. 2016; Demmel/Muhr 2002). Für die flächenspezifische Ertragserfassung und Kartierung werden neben der Erntemenge (Korndurchsatz) außerdem der Trockenmassegehalt (Feuchtesensor), die abgeerntete Fläche (mittels Geschwindigkeits- und Schnittbreitensensoren) und die genaue Positionsbestimmung benötigt (Arslan/Colvin 2002). Mit dem Sensor zur Feuchtermittlung wird die Getreidefeuchte kontinuierlich erfasst und die Ertragsmessung auf einen Ertrag mit Standardfeuchte (in der Regel 15 %) umgerechnet, da nur so Ertragsvergleiche im Feld und zwischen den Jahren möglich sind (Demmel 2001, S. 7).

Zahlreiche Feldhäcksler zur Ernte von Silomais, Gras und Getreideganzpflanzensilage sind inzwischen mit Sensortechnik zur Ertrags- und Feuchtemessung sowie Ertragskartierung ausgestattet (Buchholtz et al. 2018). Beim Feldhäcksler erfolgt in der Regel die Ertragsmessung mittels eines Durchflusssensors (z. B. Messen des Spaltes zwischen Press- und Glattwalze; Ehlert 1999) und die Feuchtemessung mit einem optischen NIR-Sensor (z. B. DLG 2014a). Fehler bei der Ertragsmessung sind abhängig von der Häufigkeit der Kalibrierung des Sensors. Der Durchflusssensor sollte mindestens beim Betriebswechsel, besser bei jedem Schlagwechsel kalibriert werden. Dafür eignen sich am besten Häckselwagen mit eingebauter Wiegevorrichtung oder auch stationäre Fuhrwerks- sowie mobile Achslastwaagen (Buchholtz et al. 2018). Eine Ertragsmessung und -kartierung gibt es mittlerweile auch für Kartoffelroder (Göggerle 2019) und ist prinzipiell bei Zuckerrübenroder möglich (Kromer et al. 2001).³²

Sensoren zur Bestimmung der Erntequalität umfassen Feuchtesensoren und Sensoren zur Bestimmung wertbestimmender Inhaltsstoffe. Die Feuchtebestimmung erfolgt in der Regel bei Mähdreschern mit Kapazitätssensoren (Chung et al. 2016; Demmel 2001) und bei Feldhäckslern mit NIR-Sensoren (DLG 2010, 2014a, 2014b, 2019a u. 2019b).

Optische NIR-Sensoren bzw. Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) werden außerdem für die Bestimmung von Inhaltsstoffen (z. B. Protein, Stärke, Ölgehalt) im Erntegut genutzt. Entsprechende Sensorsysteme stehen für die Ernte von Getreide, Öl- und Eiweißpflanzen sowie Futterpflanzen kommerziell zur Verfügung. Die Inhaltsstoffbestimmung kann integriert in den Ernteprozess, z. B. »HarvestLab 3000«³³, oder mit einem mobilen Handmessgerät (mit Cloudeinbindung), z. B. für Weizen und Gerste mit dem »GrainSense Analyzer«³⁴, erfolgen.

Schließlich sind mittlerweile zahlreiche *Sensoren zur Steuerung der Ernteprozesse* Bestandteil von Erntemaschinen. Sie erfassen sowohl Daten zur Umgebung als auch zum internen Ernteprozess. In Mähdreschern ermitteln Sensoren Bodenunebenheiten und entsprechend wird durch die automatisierte Steuerung dann die Arbeitshöhe sowie Neigung des Schneidwerks angepasst. Aktuelle Mähdrescher ermöglichen es, Fahrgeschwindigkeit,

³² Als Roder werden spezialisierte Maschinen bezeichnet, die für die Ernte von Hackfrüchten (Kartoffeln, Rüben etc.) geeignet sind.

³³ www.deere.de/de/agrar-management-systemloesungen/praezisionslandwirtschaft/harvestlab-3000/ (18.8.2021) Das »HarvestLab 3000« kann auch auf Gülletankwagen installiert und für eine Bestimmung der Nährstoffgehalte der Gülle während der Ausbringung genutzt werden, um eine bedarfsgerechte und ggf. sogar teilflächenspezifische Ausbringung zu erreichen.

³⁴ www.grainsense.com/germany (18.8.2021)

Verlustniveau, Bruchkornanteil und Verunreinigung vorzugeben. Bei sich ändernden Erntebedingungen werden die Einstellungen des Mähdreschers automatisch angepasst, um die vorgewählten Zielwerte einzuhalten (Böttinger 2019). 2019 wurde ein erster vorausschauender Mähdrescher vorgestellt, der die Bestandssituation (Biomasseumfang und Beschaffenheit wie stehend oder liegend) wie ein routinierter Mensch erkennen soll. Er enthält den üblichen Durchsatzregler, der jetzt aber durch Kameras und Pflanzenwachstumsmodelle unterstützt wird. Die neue Erkennungstechnik steuert nicht nur den Durchsatzregler, sondern auch die Einstellungstechnik (Rademacher 2019).

Weiterhin können Sensordaten zu Eigenschaften des Erntegutes wiederum zur Steuerung des Ernteprozesses genutzt werden. Ein Beispiel ist beim Feldhäcksler die kontinuierliche Anpassung der Schnittlängen während der Ernte entsprechend der mit einem NIR-Sensor erfassten Trockenmassegehalte, um eine optimale Silageverdichtung ohne Sauerstoffeinschlüsse zu gewährleisten (John Deere 2019).

Zur Tiererkennung während der Ernte werden optische Infrarotsensoren eingesetzt. Diese erkennen Rehkitze (und andere Wildtiere), die vor dem Mähwerk im Gras verborgen liegen und für die Fahrerin/den Fahrer nicht sichtbar sind. Bei einer Tiererkennung wird ein Signal an die Mähwerkshydraulik gesendet und das Mähwerk blitzschnell automatisch angehoben. Zielsetzung ist neben dem (auch gesetzlich vorgeschriebenen) Tierschutz die Verhinderung von Maschinenschäden bzw. -ausfällen sowie von Futtermittelverunreinigungen durch Tierkadaver (Rinza 2017, S. 35 f.). Ein Beispiel ist das Tiererkennungssystem »SENSOSAFE«.³⁵

Insgesamt steigen mit der zunehmenden Automatisierung von Erntevorgängen der Bedarf an Sensordaten und damit die Anzahl der auf Erntemaschinen eingesetzten Sensoren. Insbesondere Roboter zur automatischen Ernte von Gartenbau- und Obstprodukten erfordern die Kombination verschiedener Sensortypen, um die komplexen Vorgänge steuern zu können (Kap. 5.2.2). Als Beispiel wird ein Ernteroboter für Erdbeeren angeführt, der ein Kamerasystem zur Identifikation reifer Erdbeeren, einen induktiven Sensor zur Steuerung der Erntevorrichtung und einen Ultraschallsensor zur Überwachung der Bodenfreiheit des Roboterarms und der Spurführung kombiniert (all-electronics 2015).

2.3 Sensoren in der Nutztierproduktion

In der Tierhaltung kommen Sensortechnologien sowohl in den Stallungen als auch in der Weidewirtschaft zum Einsatz. Sie dienen der Überwachung der Tiergesundheit, der Steuerung der Fütterung und der Erfassung von Tierleistungen (z. B. Milchleistung und -qualität) sowie der Optimierung von Haltungsbedingungen im Stall. Sensordaten bilden mittlerweile eine Grundlage für das Herden- und Stallmanagement. Unter Herdenmanagement wird die (oftmals tierindividuelle) Bestandsführung und Dokumentation der landwirtschaftlichen Nutztiere im Betrieb verstanden. Dazu gehören Überwachung und Management von Tierverhalten und -gesundheit, Fruchtbarkeitsmanagement, Fütterungsmanagement und -kontrolle sowie Leistungskontrolle. Unter Stallmanagement werden die Steuerung von Stallklima, die Fütterung, die Wiegetechnik sowie Mahl- und Mischanlagen zusammengefasst.

Bei der Sensornutzung in der Tierproduktion gibt es erhebliche Unterschiede zwischen Milchvieh-, Schweine- und Geflügelhaltung (Büscher 2018). Folgende Anwendungsgebiete sind von besonderer Bedeutung und werden in diesem Kapitel behandelt:

- › Sensoren für die Einzeltierbeobachtung (Herdenmanagement),
- › Sensoren für AMS,
- › Sensoren für automatische Fütterungssysteme,
- › Sensoren zur Steuerung des Stallklimas (Stallmanagement).

³⁵ https://www.poettinger.at/de_de/produkte/detail/sens1/sensosafe (18.8.2021)

2.3.1 Sensoren für die Einzeltierbeobachtung

Sensorsysteme zur Tierbeobachtung und für das Herdenmanagement sind in der Milchviehhaltung am weitesten entwickelt. Grundsätzliche Komponenten bei der Einzeltierüberwachung sind:

- › Sensoren am oder im Tier,
- › die Radiofrequenztechnologie³⁶ zur Übertragung der Sensordaten vom Tier auf eine Funkstation und die anschließende Weiterleitung an einen zentralen Rechner,
- › die Datenauswertung und -aufbereitung mit entsprechenden Algorithmen sowie ggf. die Meldung an die Landwirtin oder den Landwirt.

Sensordaten werden oftmals in einem Herdenmanagementprogramm zusammengeführt. Eine sensorbasierte Tierbeobachtung erfolgt kontinuierlich, im Unterschied zur punktuellen visuellen Tierbeobachtung. So können beginnende Erkrankungen frühzeitig vor deren klinischen Symptomen entdeckt und höhere Brunsterkennungsraten erzielt werden (Fasching et al. 2018).

In Abhängigkeit von Messprinzip und Zielgröße werden Sensoren zur Tierbeobachtung platziert am

- › Ohr (Ohrmarke),
- › Hals/Nacken (Halsband),
- › Schwanzansatz,
- › Fuß (Schrittzähler) oder
- › im Pansen (Sensorkapsel) (Fasching et al. 2018).³⁷

Mit *Positionssensoren* werden die Bewegungen und die Position einer Kuh im Stall ermittelt. Sie unterstützen die Analyse von Verhaltensweisen und erleichtern die Identifikation einer Kuh im Falle einer Alarmmeldung (Rinza 2017, S. 38). Eine Ohrmarke bzw. ein Halsband sendet zusammen mit der Tierkennung Signale, die von verschiedenen Empfängergeräten im Stall aufgezeichnet werden und aus denen durch Triangulation in Echtzeit die Position bestimmt wird (GEA 2020; Tullo et al. 2016; Wolfger et al. 2017; Zoetis 2020). Positionsverfolgung und -aufzeichnung sind beispielsweise Bestandteil der Ohrmarken bei »SMARTBOW«³⁸ und »CowManager«³⁹ sowie des Halsbandes mit dem System »GEA DairyMilk M6900«⁴⁰.

Mit *Beschleunigungs- bzw. Bewegungssensoren* können verschiedene charakteristische Bewegungen des Tieres erfasst werden. Da beim Wiederkäuen das Ohr einer Kuh ein sehr charakteristisches und wiederkehrendes Bewegungsmuster zeigt (Reiter et al. 2018), kann die Wiederkauaktivität mittels eines Bewegungssensors in einer Ohrmarke analysiert werden. Verringerte Wiederkauaktivität ist ein Indiz für Gesundheitsprobleme. Diese Sensortechnik wird beispielsweise bei »SMARTBOW« genutzt.

³⁶ Die Radiofrequenztechnologie basiert auf einem Sender-Empfänger-System, das auf der Grundlage von Radiowellen zum Lokalisieren und Identifizieren von Objekten oder Lebewesen eingesetzt wird. Grundlage sind Radio-Frequency-Identification(RFID)-Chips, deren Basis spezifische Transponder sind, die entweder mit einem entsprechenden Lesegerät (in geringer Reichweite) oder mit hochfrequenten Radiowellen Daten übertragen.

³⁷ Die Sensoren zur Einzeltierbeobachtung sind in der Regel batteriebetrieben, Wartungs- und Kostenaufwand variieren je nach System. So wird die Batterielaufzeit für Sensoren zur Gesundheitsüberwachung und Brunsterkennung, angebracht an der Ohrmarke von Kühen, mit bis zu 2 Jahren angegeben, z.B. »SMARTBOW« (agrarheute 2019). Die Batterie lässt sich bei diesem System vergleichsweise einfach wechseln. Die Ohrmarke ist wiederverwendbar, sodass die Wartungskosten gering sind. Bei den Pansensoren wird die Sensorkapsel oral verabreicht und verbleibt bis zur Schlachtung im Pansen des Tieres. Die Akkulaufzeit wird für Systeme, wie z.B. »dropnostix Sensor-Bolus« mit bis zu 4 Jahren angegeben (DLG 2019c).

³⁸ www.smartbow.com/de/ (18.8.2021)

³⁹ www.cowmanager.com/de-de/ (18.8.2021)

⁴⁰ www.gea.com/de/products/milking-farming-barn/dairymilk-milking-cluster/cow-sensor/index.jsp (18.8.2021)

Bewegungssensoren in einem Halsband erfassen über die Kaubewegung Dauer und Menge der Futteraufnahme sowie das Weideverhalten (Neethirajan et al. 2017; z. B. »CowScout Hals« aus der GEA DairyMilk-Produktlinie⁴¹). Mit einem Bewegungssensor am Fuß der Kuh können die Aktivitäten (Steh-, Liege- und Laufzeiten) aufgezeichnet werden (z. B. »CowScout Fuß« aus der GEA DairyMilk-Produktlinie). Die sensorbasierte Messung von Wiederkau- und Bewegungsverhalten wird außerdem zur Brunsterkennung genutzt, da brünstige Kühe im Vergleich zu nicht brünstigen eine deutlich erhöhte Aktivität zeigen (Fasching 2016). In der Regel werden dafür mehrere Parameter verwendet. Mit einer sensorbasierten Brunsterkennung werden bis über 90 % der Brunstereignisse erkannt, deutlich mehr als mit einer Tierbeobachtung durch den Menschen (Fasching et al. 2018).

Zur Erfassung der Futteraufnahme und Wiederkauaktivität werden weiterhin *Drucksensoren* eingesetzt. Beispielsweise nutzt das »RumiWatchSystem«⁴² – gemeinsam mit einem Bewegungssensor – einen Drucksensor im Nasenband des Halfters, mit dem die Nahrungsbisse, die Kaubewegungen und die Wasseraufnahmen aufgezeichnet werden, um daraus Zeitpunkt und Dauer von Futteraufnahme, vom Wiederkäuen und von anderen Aktivitäten zu bestimmen (Ruuska et al. 2016; Werner et al. 2018). Dieses System ist auch für die Weidehaltung ausgelegt (Rombach et al. 2018; Werner et al. 2018).

Schließlich werden in der Milchviehhaltung *akustische Sensoren* eingesetzt, um anhand akustischer Signale Beißen und Kauen zu identifizieren und darüber die Wiederkauaktivität zu bestimmen (Neethirajan et al. 2017). Das Erkennen von Auffälligkeiten beim Wiederkäuen dient der Gesundheitsüberwachung der Kuh und soll bei einer frühzeitigen Diagnose und Behandlung von Krankheiten helfen. Ein kommerzielles Beispiel ist das »SCR Heetime® HR System«⁴³. Dieses Halsbandsensorsystem umfasst neben dem speziell abgestimmten Mikrofon noch einen Bewegungssensor und hat als zusätzliche Funktion die Brunsterkennung. Untersuchungen haben gezeigt, dass der aus den Sensorwerten gebildete Gesundheitsindex geeignet ist, Stoffwechselerkrankungen, Mastitis⁴⁴ und Metritis⁴⁵ aufzuspüren (Stangaferro et al. 2016a, 2016b u. 2016c).

Akustische Sensoren werden außerdem in der intensiven Schweinehaltung zur Erkennung von Atemwegserkrankungen eingesetzt, die dort weitverbreitet sind. Da Husten bei Infekten der Atemwege spezielle Charakteristika aufweist, werden die mit einem akustischen Sensor aufgezeichneten Geräusche in Echtzeit mit entsprechenden Algorithmen analysiert, um erkrankte Schweine zu identifizieren. Dies ermöglicht eine frühzeitige Isolation bzw. individuelle Behandlung erkrankter Tiere mit Antibiotika (Berckmans 2014). Eine kommerzielle Nutzung erfolgt mit »SoundTalks®«⁴⁶.

Mit *Temperatursensoren* kann sowohl die äußere als auch die innere Körpertemperatur gemessen werden. So etwa beim »CowManager« mit einem Ohrsensor. Daneben umfasst der »CowManager« verschiedene Sensoren zur Messung von Aktivität (Steh-, Liege- u. Laufzeiten), Wiederkäuen, Futteraufnahme und Ruhezeiten und liefert Echtzeitinformationen über Fruchtbarkeit, Gesundheit und Ernährung inklusive Brunst- und Gesundheitsalarmen (Rinza 2017, S. 38).

Eine Messung der inneren Körpertemperatur erfolgt mit einer Sensorkapsel im Pansen der Kuh, die Informationen über den Gesundheitszustand von Milchkühen sowie die Phasen des Reproduktionszyklus wie Brunst oder Abkalbung liefert. Mit der Temperaturmessung kann Fieber infolge einer Infektion oder eine Untertemperatur (Gebärparese), die vor der Abkalbung auftreten kann, frühzeitig erkannt werden. Dabei müssen jedoch Temperaturschwankungen aufgrund der Wasseraufnahme korrigiert werden. Umgekehrt lässt sich die Analyse dieser Temperaturschwankungen aber auch dafür nutzen, um die Wasseraufnahme der Tiere zu kontrollieren und atypisches Trinkverhalten zu entdecken (Fasching 2016). Zur Verfügung stehende Sensorsysteme sind beispielsweise

⁴¹ www.gea.com/en/products/milking-farming-barn/activity-detection-cowscout.jsp (18.8.2021)

⁴² www.rumiwatch.ch/index.html (18.8.2021)

⁴³ www.allflex.global/uk/product/heatime-hr-system/ (18.8.2021)

⁴⁴ Mastitis ist eine Entzündungsreaktion des Euters, die vor allem durch Bakterien ausgelöst wird. Die Zellzahl in der Milch ist erhöht (über 100.000 Zellen/ml). Die Folge sind verringerte Milchleistung, Behandlungskosten und ggf. eine vorzeitige Schlachtung.

⁴⁵ Metritis ist eine Entzündung der Gebärmutterwand, die vorwiegend durch bakterielle Erreger innerhalb der ersten 21 Tage nach der Kalbung auftritt und sich negativ auf die Milchleistung und Fruchtbarkeit der Kuh auswirkt.

⁴⁶ www.soundtalks.com/soundtalks/ (18.8.2021)

das »dropnostix Monitoring System«⁴⁷ und »smaXtec«⁴⁸, die Hinweise auf Gesundheitsprobleme, Brunst und Abkalbung geben.

Weiterhin ist mit einem Pansensensorsystem eine kontinuierliche Ermittlung des pH-Wertes im Pansen mittels eines *chemischen Sensors* möglich. Mit dem zunehmenden Einsatz leicht verdaulicher Kohlenhydrate (Kraftfutter) zur Erhöhung der Milchleistung wird im Gegenzug der für den Wiederkäuer lebenswichtige Anteil an strukturwirksamer Rohfaser in der Futterration immer geringer. Die Folge kann ein zu starkes Absinken des pH-Wertes im Pansen sein, woraus dann eine subklinische Pansenazidose⁴⁹ als weitverbreitetes tiergesundheitliches Problem bei Milchkühen entsteht (Gasteiner 2015). Eine Messung der pH-Veränderungen im Zeitverlauf ermöglicht Rückschlüsse auf Angepasstheit der Futterration mit dem Ziel einer Optimierung der Fütterung. Eine Messung des pH-Wertes ist beispielsweise Bestandteil von »smaXtec«.

Allen vorgestellten Sensorsystemen zur Früherkennung von Gesundheitsproblemen sowie Verhaltensabweichung von Einzeltieren und beim Gruppenverhalten (Pache 2016) ist gemeinsam, dass die am Tier gesammelten Messwerte an ein oder mehrere Empfängergeräte gesendet und von dort in der Regel an den zentralen Computer des Betriebs zur Auswertung übertragen sowie die tierindividuellen Daten ggf. mit dem Herdenmanagementsystem des Betriebs verknüpft werden. Auffällige Verhaltensweisen, wie z. B. eine verminderte Wiederkauaktivität des Tieres, werden über den Abgleich aktueller und historischer Daten ermittelt und in Echtzeit über eine Benachrichtigung auf dem Handy, Tablet o.Ä. angezeigt. Bei einigen Systemen wird die zugrundeliegende Mustererkennung laufend an das tierindividuelle Verhalten angepasst, um die Fehlerquote bzw. Fehlalarme zu reduzieren. Solche Systeme benötigen hierbei eine 3- bis 14-tägige Einlernphase, bis sie verwertbare Ergebnisse liefern (Fasching et al. 2018).

In der Weide- und Almwirtschaft finden ebenfalls Sensorsysteme Verwendung, die in ihren Funktionen vergleichbar sind mit Sensorsystemen für den Stallbetrieb. Der Einzeltierortung auf der Weide kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Dabei können sich für Almbetriebe aufgrund der Topografie spezifische Herausforderungen hinsichtlich der Reichweite bzw. Funkabdeckung ergeben. Ein Lösungsansatz ist die Verwendung einer LoRaWAN-Antenne⁵⁰, die je nach Topografie des Einsatzgebiets (z. B. Hochgebirge) einen Radius von bis zu 15 km abdecken kann. Diese Technik wird beispielsweise für das Ortungssystem »Alptracker«⁵¹ genutzt. Die (punktuellen) Positionsbestimmung wird alle 15 Minuten mit der LoRaWAN-Antenne vorgenommen und an das Endgerät der Landwirtin/des Landwirts übermittelt. Das Trackingsystem ist für Weidetiere (Milchvieh, Schafe und Ziegen) konzipiert und wird über ein Halsband am Kopf des Tieres befestigt.

2.3.2 Sensoren bei automatischen Melksystemen

Sensoren sind ein wichtiger Bestandteil von AMS (KTBL 2013), auch Melkroboter genannt (Kap. 5.1.1). Sensortechnik wird einerseits zur Steuerung des Melkvorgangs und andererseits zur Kontrolle der Milchmenge und -qualität benötigt. Die Positionierung des Roboterarms zur Vorreinigung der Euterviertel und zum Ansetzen der Melkbecher erfordert eine genaue *Lokalisation des Euters und der Zitzen*. Dazu erfolgt eine Positionsbestimmung der Kuh in der Melkbox mittels einer 3-D-Kamera zur Grobortung sowie die Feinortung der Zitze mittels Laser, Infrarotkamera oder Ultraschallsensor (Luther et al. 2004; Wagner 2017). Euter- und Zitzenposition werden üblicherweise nach jedem Melken gespeichert.

⁴⁷ <https://www.dropnostix.com/de/produkt/> (18.8.2021)

⁴⁸ <https://smaxtec.com/de/> (18.8.2021)

⁴⁹ Die Pansenazidose ist eine Stoffwechselerkrankung bei Rindern, die zu einem stark sinkenden pH-Wert im Pansen und zu einer Übersäuerung führt. Die häufigste Ausprägung ist die subakute oder subklinische Pansenazidose (Subacute Rumen Acidosis – SARA), die in der Regel bestandsweise gehäuft auftritt und einem nicht immer einwandfrei nachzuweisenden, krankhaften und krankmachenden Zustand entspricht. Die negativen tiergesundheitlichen Auswirkungen sind vielfältig und betreffen verschiedene Organsysteme und Gewebe des Tieres (Gasteiner/Guggenberger 2014, S.4f.).

⁵⁰ Der Langstreckenfunk (Long Range Radio – LoRa) ist eine drahtlose Funktechnologie mit großer Reichweite und geringem Energieverbrauch. LoRa-Netzwerke arbeiten im Gegensatz zu neuen Mobilfunkstandards (4G oder 5G) in einem nicht lizenzierten Spektrum, d. h., hier entfallen keine Regulierungs- und Auktionskosten. Vielmehr wird ein offenes einheitliches Protokoll verwendet, das von der LoRa-Alliance, einer offenen gemeinnützigen Vereinigung, bereitgestellt wird (Mohan/Eckstein 2019).

⁵¹ www.alptracker-ag.ch/ (18.8.2021)

Die *elektrische Leitfähigkeit der Milch* wird mit einem Sensor bei jedem Viertel des Euters (d.h. je Euterkörper und Zitze) gemessen, um frühzeitig eine Euterentzündung (Mastitis) zu erkennen. Die Messung beruht darauf, dass bei einer beginnenden Euterentzündung die Milch meist mehr Salz enthält und dadurch die Leitfähigkeit steigt. Da sich die elektrische Leitfähigkeit der Milch von Kuh zu Kuh unterscheidet, erfolgt ein Vergleich des aktuellen Wertes mit dem Durchschnitt der vergangenen Tage für jede Kuh, um Auffälligkeiten zu entdecken (Kamphuis et al. 2008; Wagner 2017).

Zur Beurteilung der Eutergesundheit wird zusätzlich die *Milchfarbe* untersucht, um Blut in der Milch zu erkennen und diese Milch ggf. abzutrennen. Dazu wird ein Blut- oder Farbsensor genutzt (Wagner 2017). Weiterhin steht eine regelmäßige, automatische Messung der somatischen Zellzahl⁵² in der Milch jeder Kuh zur Verfügung (z. B. Zellsensor »GEA DairyMilk M6850«⁵³ für jedes Euterviertel). In Melkrobotern erfolgt außerdem eine Erfassung der *Milchtemperatur*. Die Milchtemperatur steht in Verbindung mit der Körpertemperatur der Kuh und kann zusammen mit anderen Daten Hinweise auf bestimmte Krankheiten liefern (Wagner 2017).

Bei AMS werden Milchinhaltsstoffe wie Fett-, Protein- sowie Laktosegehalt bei jeder Kuh und jedem Melkvorgang erfasst. Milchinhaltsstoffe können beispielsweise mit einem NIR-Sensorsystem bestimmt werden (Iweka et al. 2016). Schließlich werden weitere Daten erhoben, wie die Milchmenge, die Anmelk- und Melkzeit, die Melkgeschwindigkeit sowie die Anzahl der Melkungen und der Verweigerungen pro Tag (Rinza 2017, S. 39).

2.3.3 Sensoren bei Fütterungsautomaten

Neben dem Melken ist die Automatisierung bei der Fütterungstechnik weit vorangeschritten (Kap. 5.1.2). Fütterungsautomaten werden insbesondere in der Schweine- und Geflügelhaltung, zunehmend aber auch in der Rinderhaltung eingesetzt. Eine alters- und leistungsoptimierte Einzeltierfütterung erfolgt bei Milchkühen über die Kraftfuttergabe im Melkroboter und bei Schweinen über Abrufstationen. Ein Transponder zur Identifizierung des Einzeltiers ist Voraussetzung für eine tierindividuelle Fütterung. Fütterungsautomaten messen per Sensor den Füllstand des Futtertroges und erfassen basierend auf einer Einzeltiererkennung automatisch die Futteraufnahme des Tieres (Rinza 2017, S. 39).

Die automatisierte Fütterung in der Rinderhaltung kann einerseits als stationäres System über Bänder oder Schienen laufen und andererseits als frei navigierendes System gestaltet werden. Zur Umgebungserkennung bei frei navigierenden Systemen werden Laser, Stereokameras, Infrarot und Radar eingesetzt (Bernhardt 2019).

2.3.4 Sensoren für das Stallmanagement

Im Rahmen des Stallmanagements kommen ebenfalls Sensorsysteme zum Einsatz. Aktuelle Messergebnisse von Sensoren werden dabei in der Regel mit voreingestellten Zielwerten abgeglichen und die entsprechenden Anlagen daraufhin mithilfe von Regelungs- und Steuerungstechnik in die gewünschten Betriebszustände gebracht (Rinza 2017, S. 42). Verschiedene Sensorsysteme kontrollieren und steuern *direkt* Beleuchtung, Belüftung, Temperatur, Luftbelastung etc. Ausgewählte Beispiele sind (Rinza 2017, S. 43):

Wärmebildkameras oder Thermosensoren zur Temperaturkontrolle in Ställen: Bei Milchkühen führen hohe Temperaturen zu Hitzestress, der zu gesundheitlichen Problemen (z. B. Kreislaufprobleme, Energiemangel), verminderter Futteraufnahme und geringerer Milchleistung führen kann (Eilers 2012). In der Schweinehaltung kommt es bei einer schlechten Zuluftführung mit Zugluft zu Erkältungen, Husten, Lungenentzündungen sowie zu Verhaltensstörungen wie Ohren- oder Schwanzbeißen (BZL 2020). Temperatursensoren sind integraler Bestandteil von automatisierter Lüftungs- und Klimatechnik im Stall; Wärmebildkameras, z. B. »oCam«⁵⁴, ermöglichen die Erkennung von thermischen Auffälligkeiten.

⁵² Anhand des Zellzahlgehalts der Milch kann die Eutergesundheit des Tieres beurteilt werden (www.milchuntersuchung.de/Zellgehalt_2.html; 18.8.2021).

⁵³ www.gea.com/de/products/dairymilk-m6850-cell-count-sensor.jsp (18.8.2021)

⁵⁴ www.infratec.de/thermografie/waermebildkameras/ (18.8.2021).

Temperatursensoren zur Regelung der Trinkwassertemperatur in der Geflügelhaltung: In Geflügelställen kann eine zu hohe Trinkwassertemperatur zu einer Vermehrung von Mikroorganismen führen. Um dies zu vermeiden, wurde beispielsweise mit dem Tränkesystem »Optima E-Control«⁵⁵ ein Druckminderersystem entwickelt, das neben der elektronischen Steuerung des Wasserdrucks die Temperatur der Wassersäule überwacht, auf den gewünschten Wert automatisch einstellt und eine vollautomatisierte Wasserversorgung an den Tränken erlaubt. Sind die Temperaturen des Tränkewassers zu hoch, regelt das System die Temperatur durch die automatische Zufuhr von kaltem Wasser.

Chemische Sensoren zur Erfassung von Schadgaskonzentrationen in Geflügel- und Schweineställen: Schadstoffe wie Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Staub in der Stallluft können die Atemwege belasten und zu Lungenfunktionsstörungen bei den Nutztieren und den dort arbeitenden Menschen führen.

Mit bildgebenden Sensorsystemen ist eine *indirekte Erfassung der Stallsituation über das Tierverhalten* möglich. Ein solches Verhaltensmonitoringsystem ist »EyeNamic«⁵⁶. Kameras beobachten kontinuierlich die Stallfläche und aus den Bildern werden in Echtzeit die räumliche Verteilung und die Aktivität der Tiere bestimmt. Abweichungen von der zu erwartenden Verteilung stellen einen Indikator für Störungen (z. B. bei der Futter- oder Wasserversorgung) dar (Berckmans 2014 u. 2017).

2.4 Maschinensensoren

Landwirtschaftliche Maschinen im Feldbetrieb sind heutzutage mit umfangreicher Sensortechnik ausgestattet. Sensortechnik in Landmaschinen kann zwei Funktionen erfüllen:

- › Sensoren zur Messung interner Maschinenzustände,
- › Sensoren zur Steuerung von Arbeitsprozessen und zur Messung von Arbeitsergebnissen.

Zu Letzteren zählen insbesondere Erntesensoren in Mähdreschern und anderen Erntemaschinen, die bereits im Kapitel 2.2.4 behandelt wurden. Im Folgenden werden Sensoren vorgestellt, die maschineninterne Prozesse und Zustände von Landmaschinen erfassen.

Sensoren zur Messung interner Maschinenzustände bilden einen Schwerpunkt im Bereich der Landmaschinenteknik und sind Bestandteil der Serienausstattung von modernen Landmaschinen. Die Überwachung der aktuellen Maschinensituation und die Messung von situativen Daten durch Sensoren in Echtzeit (z. B. Geschwindigkeit, Kraftstoff, Verschleiß, Betriebszustand) ermöglichen es, optimale Betriebszustände für die jeweilige Maschine zu erreichen und bilden die Basis für eine prädiktive Fernwartung (Predictive Maintenance) vonseiten des Herstellers (z. B. Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Verschleißteilen). Sensoren geben automatisch Störmeldungen aus, wenn die spezifischen Maschinenwerte von voreingestellten Zielwerten abweichen, und/oder stellen mithilfe von Regelungs- und Steuerungstechnik den gewünschten Betriebszustand her.

Zielsetzung ist, optimale Betriebszustände zu erreichen und damit die Ausfallzeiten von Maschinen so gering wie möglich zu halten sowie den Verbrauch von Betriebsmitteln (Kraftstoffe, Öle etc.) und Abgas- und Geräuschemissionen zu senken. Außerdem kann sich die Fahrerin oder der Fahrer dadurch ganz auf den jeweiligen Arbeitsprozess konzentrieren (Rinza 2017, S. 44). Beispiele für Sensoren zur Messung interner Maschinenzustände sind (Rinza 2017, S. 44 f.):

- › Sensoren zur Messung der Drehzahl und -richtung bzw. Maschinenleistung mittels magnetischer Messprinzipien^{57, 58};

⁵⁵ www.lubing.de/optima-e-control.html (18.8.2021)

⁵⁶ www.fancom.com/solutions/biometrics/eyenamic-behaviour-monitor-for-broilers (18.8.2021)

⁵⁷ www.rheintacho.de/produkte/drehzahlsensoren/ (18.8.2021)

⁵⁸ www.ifm.com/de/de/category/015/015_020/015_020_030#!/S/BD/DM/1/D/0/F/0/T/24 (18.8.2021)

- › Sensoren zur Erfassung des Drehmoments, um Überlastungen zu verhindern und eine optimale Auslastung des Motors zu erreichen, z. B. »T12HP«⁵⁹;
- › Sensoren zur Messung der Beschleunigung von Landmaschinen, um kontinuierlich ein optimales Niveau für die jeweilige Bewirtschaftungsmaßnahme zu halten, z. B. »ADXL«⁶⁰.

2.5 Perspektiven

Bei Sensortechnik und -systemen für die Landwirtschaft wurden in den letzten 20 Jahren große Fortschritte erzielt. Neue Messprinzipien und Sensortypen wurden entwickelt, zudem haben sich die Ansätze zur Sensordatenverarbeitung und -interpretation deutlich verbessert. Sensorsysteme für verschiedene Anwendungsfelder stehen kommerziell zur Verfügung. Dabei ist eine deutliche Tendenz hin zu Onlinesensorsystemen zu erkennen, bei denen die Sensorwerte in Echtzeit die Ausprägung von Bewirtschaftungsmaßnahmen bestimmen.

Allerdings werden nach wie vor im landwirtschaftlichen Betrieb in der Regel viel mehr Daten (Sensor-, Prozess-, Maschinen-, Ertragsdaten) erfasst, als sie in Entscheidungsfindungssystemen und datengestützten Techniken genutzt werden; dies gilt insbesondere für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung (Rinza 2017, S. 53 f.; Steinberger 2012; Weltzien/Gebbers 2016). Ursachen sind u. a. Kompatibilitätsprobleme bei der Datenverarbeitung von unterschiedlichen Sensoren, ein zu hoher Zeit- und Kostenaufwand und fehlende multikausale Entscheidungsfindungssysteme (Weltzien 2016; Weltzien/Gebbers 2016). Die meisten Sensorsysteme werden bisher als Insellösungen angeboten (Umstätter et al. 2020).

Die zukünftige Entwicklung von Sensortechnik und -systemen betrifft grundsätzlich folgende Bereiche:

Neue Sensortypen und Sensoren: Entwicklung und Erprobung neuer Messprinzipien werden sich fortsetzen und zu neuen Sensoren für die Landwirtschaft führen. Zielsetzungen sind, weitere Parameter zu erfassen, die Messgenauigkeit zu erhöhen und die Datenerhebung zuverlässiger zu machen (Rinza 2017, S. 56 f.).

Multisensorplattformen bzw. Multisensorsysteme: Multisensorplattformen bezeichnen Trägersysteme, die unterschiedliche Sensoren beinhalten. Die Kombination verschiedener Sensoren zu einem Multisensorsystem ermöglicht es, verschiedene Messwerte zu einem Sachverhalt zu erfassen und so eine vollständigere Beurteilung z. B. des Bodenzustands zu erhalten. Die Verknüpfung von messenden und bildgebenden Sensoren zur Beurteilung von Feld- bzw. Tierzuständen wird ein zukünftiger Entwicklungsschwerpunkt sein (Rinza 2017, S. 57). Multisensorsysteme lassen sich im landwirtschaftlichen Bereich auf Landmaschinen, Drohnen oder auch Robotern realisieren. Sensornetzwerke (mehrere Sensoren auf dem Feld) stellen einen Sonderfall da und könnten beispielsweise für die Bewässerung an Bedeutung gewinnen.

Sensordatenfusion: Der Begriff Sensordatenfusion beschreibt das Verknüpfen von Messdaten unterschiedlicher Einzelsensoren. Die Fusion von Daten verschiedener Sensoren oder anderer Datenquellen ist ein wichtiger Ansatz, um bessere und verlässlichere Informationen für Bewirtschaftungsentscheidungen zu erhalten (Mahmood et al. 2012; Ruckelshausen 2014). Eine Nutzung der vielfältigen Daten erfordert Lösungen, bei denen die Datenformate und -mengen durch leistungsfähige Algorithmen miteinander korreliert werden, um im Anschluss die Informationen mithilfe geeigneter Softwaretools zu analysieren (Rinza 2017, S. 54; Weltzien 2016). Sensordatenfusion ist von besonderer Relevanz bei der Erfassung von Bodeneigenschaften (z. B. Mahmood et al. 2012), der Bestimmung des Zustands von Pflanzenbeständen (z. B. Weis et al. 2013), der Navigation von Landmaschinen (z. B. Benet/Lenain 2017; Peschak et al. 2017) sowie bei Sensorsystemen zu Tiergesundheit und -verhalten.

Datenanalyse und wissensbasierte Entscheidungsfindung: Die automatisierte Interpretation von Sensordaten (insbesondere aus der Sensorfusion) und die Ableitung von handlungsrelevantem Wissen sind eine zentrale Her-

⁵⁹ www.hbm.com/de/6384/t12hp-drehmomentaufnehmer-mit-hoechster-praezision/ (18.8.2021)

⁶⁰ www.analog.com/en/products/mems/accelerometers/adxl372.html (18.8.2021)

ausforderung für die Weiter- und Neuentwicklung von Sensorsystemen (Ruckelshausen 2014). Bei der Datenanalyse kommt Methoden des maschinellen Lernens⁶¹ eine große Bedeutung zu, deren Anwendung in der Sensordatenanalyse noch relativ am Anfang steht (Behmann et al. 2015). Zielsetzung sind multikausale, komplexe Entscheidungsfindungssysteme, die eine Datenfusion aus verschiedenen Quellen vornehmen und gleichzeitig eine einfache Handhabung erlauben (Weltzien/Gebbers 2016).

Integration in Farmmanagementsysteme: Ein automatischer Import von Sensor- und Applikationsdaten sowie externen Daten wird mittlerweile von den meisten Farmmanagementsystemen angeboten (TAB 2021, Kap. 2.2.3). Eine Nutzung dieser Daten in intelligenten Entscheidungsfindungssystemen, die Bewirtschaftungsentscheidungen unterstützen, steht aber erst ganz am Anfang.

Im Folgenden werden wichtige Perspektiven in den drei Anwendungsfeldern Pflanzen- und Tierproduktion sowie Landmaschinen vorgestellt und durch ausgewählte laufende Forschungsaktivitäten belegt.

2.5.1 Sensortechnik in der Pflanzenproduktion

Sensorsysteme in der Pflanzenproduktion sind heute noch durchweg Einzelsysteme, die nicht für alle wichtigen Bewirtschaftungsmaßnahmen in praxistauglicher Form zur Verfügung stehen. Probleme beim gleichzeitigen Einsatz von unterschiedlichen Sensoren in landwirtschaftlichen Prozessen ergeben sich, wenn Daten in abweichenden Formaten generiert werden. Kompatibilitätsprobleme bei der Datenverarbeitung führen dazu, dass die erhobenen Daten oftmals nicht ausgewertet werden oder ungenutzt bleiben (Rinza 2017, S. 53; Weltzien/Gebbers 2016). Da der Pflanzenbau ein offenes System mit vielfältigen Umwelteinflüssen darstellt und es potenziell eine große Vielfalt von Pflanzenbausystemen gibt, werden die Verknüpfung von Daten und die Berücksichtigung von Störgrößen bzw. Umwelteinflüssen bei der Bestimmung von Anbaumaßnahmen auf absehbare Zeit eine Herausforderung bleiben. Deshalb sind insgesamt nur schrittweise Fortschritte zu erwarten.

Neue Sensortypen und -systeme sind für verschiedene abiotische und biotische Stressfaktoren in der Entwicklung. Forschungsschwerpunkte liegen bei der Erfassung von Bodeneigenschaften und dem Nährstoffgehalt im Boden, der Unkrautbekämpfung, der Fungizid- und Insektizidanwendung sowie der Bewässerung. Ein Beispiel aus dem Bereich Bodensensoren ist die Forschung zu neuen Messverfahren wie die Raman-⁶² und Terahertzspektroskopie⁶³ für eine Bodenanalyse (ATB 2020a; Weltzien/Gebbers 2016). Ein Beispiel aus dem Bereich der Pflanzensensoren sind Forschungsarbeiten zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten mit einer Multispektralkamera (Dammer 2014).

Ein weiteres Forschungsthema ist die Infrarotthermografie (Wärmebildkameras). Die Oberflächentemperatur von Pflanzen oder des Bodens ist ein frühzeitiger Indikator für Wasserunterversorgung und kann potenziell zur Bewässerungssteuerung genutzt werden. Bei Trockenstress verringern Pflanzen die Transpiration, was zu einer höheren Bestandstemperatur führt, wobei sich Trockenstress so früher erkennen lässt als mit optischen Sensoren (Khanal et al. 2017). Sensorsysteme auf der Basis von Infrarotthermografie und eine darauf aufbauende sensorgestützte Beregnungssteuerung werden derzeit für den Kartoffelanbau in Nord-Ost-Niedersachsen (Thünen-Institut 2020) und für verschiedene Kulturen in Brandenburg (EIP-AGRI 2019, S. 81) untersucht und auf Praxisflächen getestet.

⁶¹ Unter maschinellem Lernen werden Ansätze verstanden, die Computerprogrammen erlauben, neues Wissen zu erwerben, ohne dafür ausdrücklich programmiert zu sein. Der Lernprozess beruht typischerweise auf Trainingsdaten, aus denen Algorithmen ein statistisches Modell aufbauen, mit dem Muster und Gesetzmäßigkeiten in den Lerndaten erkannt und auf neue Sachverhalte angewendet werden. Es gibt eine ganze Reihe von Lernmodellen wie z. B. Regression, Clustering, Bayesian Model, Entscheidungsbaum und künstliche neuronale Netzwerke (Liakos et al. 2018).

⁶² Die Ramanspektroskopie ist eine auf dem Ramaneffekt basierende schwingungsspektroskopische Methode zur Untersuchung von Materialeigenschaften. Sie wird zur Identifikation von Chemikalien oder auch zur Drogenfahndung beim Zoll verwendet.

⁶³ Die Terahertz (THz-)spektroskopie (auch Ferninfrarot (farIR-)spektroskopie genannt) ist eine Methode zur berührungslosen (und zerstörungsfreien) Untersuchung der Wechselwirkung von Materialien mit elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich. Moleküle zeigen in diesem Spektralbereich charakteristische Signaturen in ihren Absorptionsspektren. Diese Methode bietet neue Anwendungsmöglichkeiten vor dem Hintergrund, dass einige Stoffe für sichtbares Licht oder Infrarot undurchdringlich sind, jedoch für THz-Wellen transparent (Fraunhofer ITWM 2017).

Den *Multisensorplattformen* und der *Sensordatenfusion* kommt in der Pflanzenproduktion eine große Bedeutung zu, da Boden- und Pflanzeigenschaften komplexe Sachverhalte sind, die in der Regel durch eine Merkmalserfassung mit einem einzelnen Sensor nicht bestimmt werden können (Ruckelshausen 2014; Weltzien/Gebbers 2016). Verschiedene Multisensorplattformen werden u. a. für die Phänotypisierung in der Pflanzenzucht, die Bestimmung von Bodenparametern und eine befallsspezifische Fungizidanwendung beforscht.

Im Bereich Boden findet in Deutschland beispielsweise Forschung zur Entwicklung einer mobilen Multisensorplattform (UV-, Vis-NIR- und THz-Sensoren) statt, um mit darauf abgestimmten Bodenprozessmodellen räumlich hochaufgelöste Bodeninformationen zu generieren, die dann die Grundlage für ein nutzerfreundliches Entscheidungsunterstützungssystem zur Steuerung der Stickstoff-, Phosphor-, Kali- und Kalkdüngung bilden sollen (ATB 2020a).

Multisensorsysteme werden ebenso für die Detektion von Krankheiten im Getreide entwickelt, z. B. für die Erkennung von Gelbrostnestern in Winterweizen mittels optischer Sensoren. Die optische Erkennung von Gelbrost erfolgt in einem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Forschungsprojekt auf der Grundlage von RGB- und Multispektralkameras, wobei fahrzeug- und drohnengetragene Sensoren getestet werden. Für Bekämpfungsentscheidungen sind neben der Identifizierung von Krankheitsnestern zusätzlich Pflanzenparameter (wie Pflanzenoberfläche oder -höhe) notwendig, um die lokalen Zielfläche, die von der Fungizidspritzflüssigkeit benetzt werden muss, zu erfassen und die Ertragserwartung zu beurteilen. Für die Bilddaten sollen ein Klassifizierungsalgorithmus, der die erkrankten Flächen erkennt, sowie zusätzlich ein Datenauswertungs- und Managementsystem entwickelt werden, um Bekämpfungsentscheidungen zu ermöglichen (ATB 2020b).

Ein anderer Ansatz zur Datenfusion wird in einem Projekt zur mechanischen Unkrautbekämpfung verfolgt, das im Rahmen des EU-Förderprogramms »Europäische Innovations-Partnerschaft Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit« (EIP-Agri) durchgeführt wird. Hier werden Positionsdaten der Saat und Kamertechnik zur Erkennung von Unkräutern kombiniert, um das Hackschar gezielt zu steuern und die Position der aus der Saat entstandenen Pflanzen von der Bearbeitung auszunehmen (EIP-Agri 2019, S. 109).

Bei der Sensordatenfusion besteht noch grundlegender Forschungsbedarf. Zunächst gibt es praktische Umsetzungshemmnisse wie die noch unzureichende Standardisierung von Datenformaten oder das Problem, dass sich verschiedene Sensortypen (z. B. mechanische und elektrische Sensoren) bei der Datenerhebung gegenseitig stören können. Vor allem aber stellt die Auswertung der aus unterschiedlichen Messverfahren generierten Daten komplexe Herausforderungen an die Analyse bzw. Interpretation der fusionierten Messdaten (Gebbers et al. 2019) und deren Management (Datenbanken).

An *Sensoren für eine Einzelpflanzenerkennung* und eine Erfassung von Pflanzenparametern (z. B. Morphologie) wird geforscht, erste Systeme stehen zur Verfügung (Ruckelshausen 2014). Einzelpflanzensensorsysteme sind von großer Bedeutung für die Phänotypisierung in der Pflanzenzüchtung, mittelfristig könnten sie auch in Sonderkulturen wie Obst- und Weinbau relevant werden. Dagegen wird für den Ackerbau erwartet, dass auf absehbare Zeit eine sensorgestützte Erfassung des Zustands von Einzelpflanzen nicht praktikabel sein wird, weil die Bewirtschaftung von Einzelpflanzen technisch herausfordernd ist und voraussichtlich wenig effizient sein wird. Im Ackerbau wird stattdessen der Fokus vorerst auf der Weiterentwicklung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung liegen (Rinza 2017, S. 55).

Diesbezüglich sind *Applikationsalgorithmen zur Interpretation von Sensormesswerten* (und der Ableitung von Bewirtschaftungsmaßnahmen) von entscheidender Bedeutung für die weitere Verbreitung von Sensorsystemen in der landwirtschaftlichen Praxis. Bei Onlinesensorsystemen stellen die Entscheidungsalgorithmen in der Regel eine Blackbox dar, die von den Anbietern von Sensorsystemen entwickelt und nicht offengelegt werden. Bisher in der Landwirtschaft eingesetzte Sensorsysteme nutzen teilweise einfach Korrelationen zwischen Messwerten und Bestandsparametern, wie z. B. Vegetationsindizes bei N-Sensoren, die in ihrer Aussagekraft eingeschränkt sind (Lilienthal 2014). Schließlich stehen zunehmend neue Sensordaten zur Verfügung, für die noch Applikationsalgorithmen fehlen. So sind seit Kurzem Bodensensoren in Entwicklung, die den im Boden verfügbaren Stickstoff direkt messen, aber es mangelt noch an aussagekräftigen Pflanzenmodellen, um auf der Basis des Stickstoffgehalts im Boden Aussagen über die notwendige Höhe der Düngergaben zu generieren.⁶⁴

⁶⁴ Gebbers, R., ATB Potsdam, persönliche Mitteilung 28.10.2019

In diesem Zusammenhang gewinnen *künstliche Intelligenz* sowie *maschinelles Lernen* für pflanzenbauliche Sensorsysteme zunehmend an Bedeutung und versprechen, bestehende Probleme zu lösen. Ansätze des maschinellen Lernens werden zur Interpretation von Sensormesswerten eingesetzt und erlauben die Analyse großer, mehrdimensionaler Datensätze mit unbekannten statistischen Eigenschaften (Behmann et al. 2015). Aktuelle Anwendungsfelder einer Sensordatenauswertung mit verschiedenen Lernmodellen sind:

- › *Bodeneigenschaften*: In den Untersuchungen wurden Parameter wie Bodentemperatur, Bodentrocknung, Bodenfeuchte, organische Bodensubstanz und Stickstoffgehalt bestimmt (Liakos et al. 2018).
- › *Wassermanagement*: Hier steht die Abschätzung der Evapotranspiration⁶⁵ im Mittelpunkt (Liakos et al. 2018).
- › *Unkrautererkennung*: Maschinelles Lernen wird zur Unterscheidung von Kulturpflanzen und Unkraut sowie zur Erkennung von Unkrautarten auf der Basis von nicht bildgebenden und bildgebenden Sensordaten eingesetzt (Behmann et al. 2015; Liakos et al. 2018). Hier sind die ersten kommerziellen Sensorsysteme verfügbar.
- › *Krankheitserkennung*: Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf Weizen und die Detektion von Gelbrost und Blattdürre auf Basis von Hyperspektral-, Fluoreszenz- und bildgebenden Sensoren (Behmann et al. 2015; Liakos et al. 2018). Ein Deep-Learning-Modell zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten wurde für 25 Pflanzenarten entwickelt (Ferentinos 2018).
- › *Erkennung von Schadinsekten*: Erste Ergebnisse zur Erkennung verschiedener Insekten wurden publiziert. Da lebende Insekten schwierig mit bildgebenden oder optischen Sensoren zu erfassen sind, wird es vermutlich leichter sein, die durch Insekten verursachten Pflanzenschäden in einem frühen Stadium zu erfassen (Behmann et al. 2015).
- › *Ertragsabschätzung*: Ansätze des maschinellen Lernens wurden für eine Ertragsvorhersage u. a. bei Weizen und Reis sowie zur Fruchterkennung bei Kirschen, Zitronen, Tomaten und Weintrauben eingesetzt (Liakos et al. 2018; Zabawa et al. 2019).

Maschinelles Lernen erfordert umfangreiche Referenzmessungen (bzw. Trainingsdaten), da sowohl Böden als auch Pflanzen räumlich, zeitlich sowie arten- und sortenspezifisch eine große Variabilität aufweisen (Noack 2018). Anwendungen des maschinellen Lernens sind bisher vielfach noch nicht ausreichend mit Algorithmen für Bewirtschaftungsentscheidungen verbunden (Liakos et al. 2018). Trotzdem wird erwartet, dass zukünftig neue Onlinesensorsysteme, die Methoden des maschinellen Lernens nutzen, den landwirtschaftlichen Betrieben zur Verfügung stehen werden (Behmann et al. 2015).

2.5.2 Sensortechnik in der Tierproduktion

Bei Melkrobotern sowie bei der Tierfütterung und dem Stallmanagement ist bereits ein hoher Stand der Sensornutzung und Automatisierung erreicht. Die Entwicklung bei Sensortechniken und Sensorsystemen für die Tierproduktion zielt insbesondere auf eine noch bessere Erfassung von Tierverhalten, -gesundheit und -leistung sowie deren Bestimmungsfaktoren. Dabei bestehen deutliche Unterschiede zwischen den Nutztierarten. Während für die Rinderhaltung (insbesondere Milchvieh) schon viele Sensorsysteme zum Tiermonitoring kommerziell erhältlich sind, gibt es für die Schweine- und Geflügelhaltung bislang nur wenige Anwendungen (Umstätter et al. 2020).

Ein Schwerpunkt sind Forschungsaktivitäten zur Entwicklung und Erprobung *neuer Sensorsysteme*, die der Überwachung der Tiergesundheit dienen. Ein Ansatz beinhaltet *akustische Sensoren*, um Tiergesundheitsprobleme zu erkennen. Hierzu laufen u. a. folgende Forschungsprojekte:

- › In den Projekten »SoundHooves« – gefördert vom BMEL – und »TriScha« – gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) – werden akustisch aufgenommene Gangmuster und der Trittschall

⁶⁵ Evapotranspiration bezeichnet die Summe aus Transpiration und Evaporation, also der Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen.

analysiert, um Gliedmaßen- und Klauenerkrankungen (z. B. Lahmheit) frühzeitig zu erkennen (BMEL 2018, S. 192 ff.; FBN 2020a).

- › Im Projekt »SOUNDWEL« werden Lautäußerungen von Mastschweinen dazu genutzt, um mithilfe künstlicher neuronaler Netzwerke den Emotionszustand und das Wohlbefinden der Schweine zu bestimmen sowie Gefahren für die Tiergesundheit (wie z. B. Ferkelerdrücken, Kämpfe oder Hunger) zu identifizieren (FBN 2020b).

Bildgebende Sensoren zum Gesundheitsmonitoring sind ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Kamerabasierte Sensorsysteme werden zur Ermittlung des Body Condition Score (BCS) von Milchvieh entwickelt (Pache 2016; Rinza 2017, S. 40). Der BCS dient der Bewertung der generellen Körperkondition von Milchkühen und lässt Rückschlüsse auf den Ernährungszustand der Tiere zu. Traditionell wird die Beurteilung des Fettdepots von Milchkühen durch Betrachtung und Abtasten der Tiere ausgeführt und ist somit arbeitsaufwendig. Dies soll künftig durch Sensorsysteme mit Bildanalyseverfahren automatisiert erfolgen. Es gibt mittlerweile erste kommerzielle Systeme, wie z. B. eine direkt am Melkroboter angebrachte 3-D-Kamera, die den Kuhrücken täglich vermisst und darüber eine automatisierte tierindividuelle Beurteilung des BCS erlaubt (DeLaval 2020). Bildgebende Sensorsysteme mit 3-D-Scans zu Körperkondition und Bewegungsverhalten sollen künftig auch Auskunft über die Klauengesundheit und Anzeichen möglicher Lahmheit geben (Bernhardt 2019, S. 188; Le Cozler et al. 2019). Bilder einer Multispektralkamera werden im Projekt »PigWatch« genutzt zur Erkennung von Hautverletzungen mit frischem oder geronnenem Blut bei Schweinen, indem Hämoglobin durch eine Wellenlänge gezielt absorbiert und dadurch nachgewiesen werden kann (FiBL 2019). Damit soll ein frühzeitiges Eingreifen der Landwirtin/des Landwirts ermöglicht werden, da Schwanzbeißen und Aggressionen bei Schweinen Verletzungen verursachen, die sich auf Gesundheit, Wohlbefinden und Produktivität auswirken.

Sensorsysteme zum Monitoring von Tierverhalten und -gesundheit stellen bisher oftmals Insellösungen dar (Umstätter et al. 2020). Die Ableitung eines Tierparameters beruht in der Regel auf den Messwerten eines einzelnen Sensors (Kap. 2.3.1). Zukünftig wird hier die *Sensordatenfusion* an Bedeutung gewinnen. In zwei europäischen Innovationspartnerschaften wird beispielsweise aktuell daran gearbeitet, verschiedene Sensormesswerte zu einem aussagekräftigen Tierwohllindikator für Milchviehbetriebe zusammenzuführen (EIP-Agri 2019, S. 35 u. 52).

Mit der zunehmenden Erfassung und Verarbeitung von Tierdaten stellt sich die Frage, wie diese für die Landwirtin/den Landwirt im Stall am effektivsten verfügbar gemacht werden sollen. Mittlerweile gibt es erste Systeme, die mit Augmented Reality arbeiten. Dabei werden je nach Position und Blickrichtung in Smart Devices zusätzliche Informationen zum Tier (z. B. zu Fruchtbarkeit, Gesundheit) aus dem Datenbestand eingeblendet (Bernhardt 2019).

2.5.3 Maschinensensoren

Landmaschinen (Traktoren, Erntemaschinen etc.) sind mittlerweile schon mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. Mithilfe dieser Sensoren wird die Maschinensteuerung zunehmend automatisiert und damit die Fahrer/innen stark entlastet sowie die Arbeitsausführung weiter optimiert. Forschung und Entwicklung zur Maschinensensorik für Landmaschinen werden deutlich von dem aktuellen Trend in der Landmaschinenteknik zu größeren, leistungsfähigeren und autonom arbeitenden Landmaschinen geprägt. Insbesondere *autonome Landmaschinen* (Kap. 3.3.2) erfordern neue Sensorsysteme (Dörr et al. 2019). Dabei gewinnen bildgebende Sensoren (diverse Kameratechniken) und die Sensordatenfusion auf der Landmaschine an Bedeutung.

Außerdem ist von einer zunehmenden *Vernetzung von Sensorsystemen* auszugehen. Beispielsweise könnte ein NIR-Inhaltsstoffsensor (Kap. 2.2.4) am Güllefass mit einem Onlinestickstoffsensor (Kap. 2.2.2) sowie einem Telemetriemodul auf dem Traktor (Kap. 3.2) vernetzt und über Mobilfunk an das Internet und den Hofrechner angebunden werden. Damit wären eine teilflächenspezifische Güllendüngung auf der Basis des Stickstoffgehalts der Gülle und dem Stickstoffbedarf des Pflanzenbestands sowie deren Dokumentation möglich (Schollen 2018).

Die Entwicklung hin zu größeren und schwereren Landmaschinen hat zur Folge, dass sich die Gefahr von Bodenverdichtungen erhöht. Deshalb wird weiterhin an einer Optimierung der *Reifen-Boden-Interaktion* gearbeitet, um eine verminderte Bodenverdichtung durch verbesserte Reifen, Raupenlaufwerke oder Maschinensysteme

zu erreichen. Dies birgt neue Anforderungen an die zustandsmessende Maschinensensorik, um z. B. das externe und interne Kraftübertragungsverhalten von Reifen oder Raupenlaufwerken zu optimieren (Bürger/Böttinger 2018).

Schließlich wird erwartet, dass zukünftig durch die Auswertung der sehr umfangreichen mit Maschinensensoren erhobenen Daten neue Informationen gewonnen werden können (Schollen 2018). Beispielsweise wird bei Mähdreschern an Big-Data-basierten Regelsystemen für automatisierte Maschineneinstellungen gearbeitet (Böttinger 2019)

3 Automatisierte Landmaschinen

Unter Landmaschinen werden Traktoren, Ernte- und Bodenbearbeitungsmaschinen, Sä- und Düngetechnik sowie weitere Anbaugeräte verstanden (Hartl 2017, S. 6). Diese werden vor allem in der Feldbestellung genutzt, wie z. B. beim Pflügen, Drillen, Spritzen, Ernten etc. Moderne Landmaschinen verfügen über eine satellitengestützte Navigation, verschiedene digitale Funktionen auf Grundlage zahlreicher Sensoren (Kap. 2) und neue Möglichkeiten der Informationsverarbeitung, die Einsparpotenziale bei Betriebsmitteln und eine erhöhte Flächenleistung sowie Fahrerentlastungen versprechen (Schmitz 2017, S. 22). Auch zeichnet sich der Trend ab, Landmaschinen künftig durch automatisierte Funktionen stärker mit Einzelmaschinen, Prozessen und Datenbeständen zu vernetzen. Hierdurch ergeben sich perspektivisch gänzlich neue Optionen zur Gestaltung und Optimierung von landwirtschaftlichen Prozessketten (Hertzberg et al. 2017, S. 5).

Historisch markiert die Entwicklung des »Lanz Bulldog« der Heinrich Lanz AG als erster Ackerschlepper im Jahr 1921 die Geburtsstunde der modernen Landmaschine, die im Lauf der Zeit immer größer und schwerer wurden (dazu und zum Folgenden Doluschitz/Gindele 2019, S. 19 f.). Die Durchführung erster Versuche der satellitengestützten Navigation für Landmaschinen in den 1980er Jahren, mit der späteren Freigabe des zuvor militärisch genutzten GPS-Signals⁶⁶ für die zivile Nutzung, gilt als weiterer Meilenstein (Lowenberg-DeBoer/Erickson 2019, S. 2). Durch die Ortung über ein Navigationssatellitensystem sowie die Entwicklung des ersten Ertragsmessgeräts für Mähdrescher wurde der Grundstein für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung geschaffen. Die erste Ertragskarte, die georeferenziert die Ernteerträge innerhalb eines Schlags aufzeichnete, wurde 1984 erstellt. 1991 kamen die ersten auf Geoinformationssystemen (GIS) basierenden Applikationskarten auf den Markt und es wurden erste Versuche zur orts- und teilschlagspezifischen Bodenbearbeitung durchgeführt.⁶⁷ Die Positionsgenauigkeit belief sich damals auf etwa 100 m. Nach der technischen Optimierung der Positionsbestimmung durch die Einführung von Real-Time-Kinematic(RTK)-Korrektursignalen⁶⁸ wurden kurz vor der Jahrtausendwende die ersten Lenkassistentensysteme für Landmaschinen auf dem Markt angeboten. Diese Systeme erreichten eine Genauigkeit von bis zu 50 cm. Die zunächst hohen Investitionskosten und die geringe Erfahrung mit Satellitenortungssystemen verhinderten allerdings vorerst noch die Marktdurchdringung der Technologie. Erst mit der Vorstellung von automatischen Lenksystemen im Jahr 2003 kam Interesse seitens großer Ackerbaubetriebe auf, versprachen diese Technologien doch eine Entlastung bei der Steuerung von Maschinen mit großen Arbeitsbreiten. Die weitere Verbesserung und Vereinfachung der Technik führten schließlich dazu, dass auch mittelgroße Ackerbaubetriebe Interesse an Spurführungssystemen zeigten und schließlich die Investitionskosten deutlich sanken (Streicher 2018).

Automatisierte Landmaschinen decken ein weites Spektrum von Maschinen unterschiedlicher technischer Ausstattung, Funktionalität und Anwendungsbereiche ab. Grundsätzlich zu unterscheiden ist zwischen den sogenannten Selbstfahrern – Landmaschinen mit eigenem Antrieb und eigener Lenkung wie Traktor, Mähdrescher, Häcksler, Rübenernter etc. – und den Anbaugeräten. Zu Letzteren gehören Spezialmaschinen, die der Ausführung von bestimmten Bewirtschaftungsmaßnahmen dienen (z. B. Ballenpresse oder Sämaschine), jedoch keine eigene Antriebseinheit aufweisen und deshalb an eine Zugmaschine angehängt bzw. angebaut werden. Beide Maschinentypen können über automatisierte Funktionen verfügen, die spezifische und präzise definierte Aufgaben im Rahmen landwirtschaftlicher Prozesse zuverlässig und weitgehend selbstständig erledigen.

Mittlerweile ist die technische Ausstattung mit automatischen Spurführungssystemen und satellitengestützter Navigation eine Standardausführung neuer Landmaschinen mit eigenem Antrieb (dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S. 10). 2016 wurden weltweit über 300.000 Traktoren verkauft, die über eine satellitengestützte Navigationslösung verfügen. Diese Zahl soll sich laut Ghaffarzadeh (2018) bis 2027 auf über 660.000 Einheiten pro Jahr erhöhen. Zum Vergleich: Die Zahl aller weltweit verkauften Traktoren lag von 2010 bis 2014

⁶⁶ Unter Global Positioning System (GPS) wird ein vom US-Verteidigungsministerium entwickeltes globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung verstanden.

⁶⁷ GIS bezeichnet ein rechnergestütztes Informationssystem, das aus Hard- und Software sowie Daten und Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und grafisch präsentiert werden (Bill/Fritsch 1994, S. 5).

⁶⁸ Bei der RTK-Vermessung handelt es sich um ein satellitengestütztes Verfahren zur hochgenauen Positionsbestimmung mit Genauigkeiten von bis zu 2 cm (siehe dazu die Ausführungen in Kap. 3.1.1).

zwischen 1,7 und 2,2 Mio. (agrievolution.com 2014).⁶⁹ Über den Anteil der Traktoren mit satellitengestützter Navigation oder anderweitigen intelligenten Funktionen in Deutschland gibt es keine Informationen. Umfragen deuten jedoch an, dass automatisierte Funktionen schon weitverbreitet sind. PwC (2016b, S. 12) zufolge nutzen von den 100 befragten Betrieben 53 % intelligente (d. h. automatisierte) Landmaschinen

Die folgenden Ausführungen fokussieren – basierend auf dem Gutachten von Hertzberg et al. (2017) – auf Landmaschinen mit eigenem Antrieb, sogenannten Selbstfahrern. Diese sind in der Regel mit Navigations- und Assistenzsystemen ausgestattet, welche die Grundlage für ein breites Spektrum automatisierter Funktionen bilden (Kap. 3.1). Weiterhin sind Telemetriesysteme ebenfalls von großer Bedeutung und werden in Kapitel 3.2 näher dargestellt. Abschließend werden aktuelle Forschungen und herstellernetriebene Entwicklungen besprochen, welche die Umsetzung einer Vollautonomie von Landmaschinen anstreben (Kap. 3.3).

3.1 Navigations- und Assistenzsysteme

3.1.1 Satellitengestützte Navigation

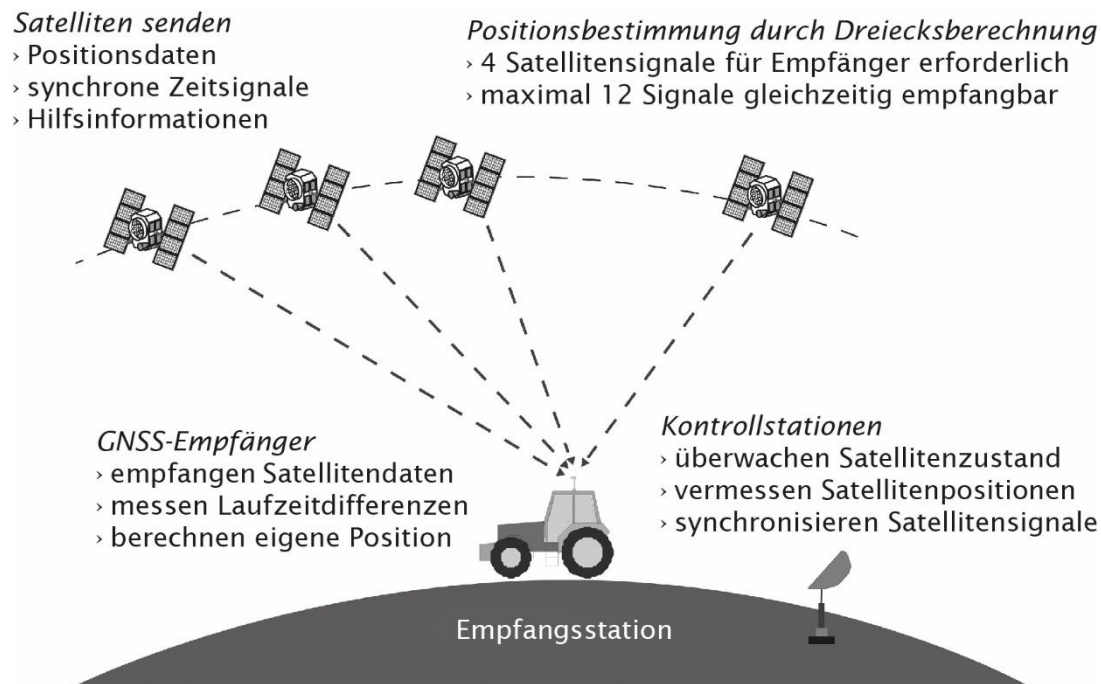
Eine für die moderne Landmaschinentechnik zentrale Technologie ist der GNSS-Empfänger, ohne den Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft nicht durchführbar wären. Systeme zur satellitenbasierten Positionserkennung ermöglichen u. a. die Ortung und Navigation von Landmaschinen, die teilflächenspezifische Durchführung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (z. B. Bodenbearbeitung, Düngung) nach Applikationskarten im Offlineverfahren, die georeferenzierte Dokumentation von teilflächenspezifischen Ausbringungsmengen (z. B. von Herbiziden) oder von Boden- und Bestandserhebungen (z. B. Bodenleitfähigkeit, Biomasse).

Der GNSS-Empfänger erhält Signale von Navigationssatelliten zur Positionsbestimmung (auf der Erde und in der Luft). Das Satellitensignal enthält Informationen über die Position des Satelliten und die Uhrzeit, zu der diese Position im All eingenommen wurde. Die Position des Empfängergeräts wird aus der Messung der Laufzeit der Signale verschiedener Satelliten zum GNSS-Empfänger abgeleitet. So können bei gleichzeitigem Empfang der Signale von vier Satelliten die Koordinaten jedes Ortes auf der Erdoberfläche bestimmt werden (Abb. 3.1) (Rösch et al. 2007, S. 39; dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S. 9). Waren Navigationssysteme bis 2011 auf das Positionierungssystem der USA (GPS) angewiesen, sind seither GNSS-Empfänger erhältlich, die auch Signale anderer GNSS-Systeme aufzeichnen und auswerten können. Neben NAVSTAR GPS (USA) gehören zu den gängigen Formaten auch GLONASS (Russland), Beidou (China) und seit Dezember 2016 Galileo (Europa).

Die Genauigkeit aller Navigationssysteme liegt im offenen Frequenzbereich bei etwa ± 10 m. In der Landwirtschaft gibt es jedoch auch Anwendungen, die einen hohen Genauigkeitsbereich von wenigen Zentimetern erfordern. Mit dem Differential-Global-Positioning (DGP)-System besteht die Möglichkeit, mithilfe von Korrektursignalen den Genauigkeitsbereich der Positionserkennung zu erhöhen (dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S. 9).

⁶⁹ In Europa wurden gemäß Hartl (2017, S. 9) 2016 165.353 Traktoren neu zugelassen, in Deutschland gab es 2018 insgesamt 27.670 Neuzulassungen (Stirnemann/Renius 2019, S. 48).

Abb. 3.1 Funktionsweise der Ortsbestimmung mit GNSS



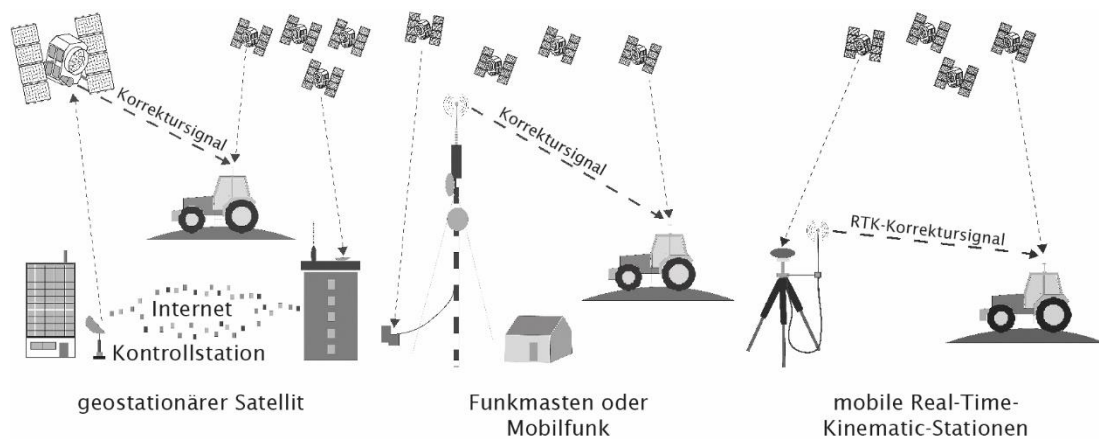
Quelle: nach KTBL 2018, S. 242

Dies kann über satellitengestützte Zusatzsysteme (Space Based Augmentation Systems – SBAS) erreicht werden, die Korrektursignale über geostationäre Satelliten verschicken. Hierzu gehören der European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)⁷⁰, das US-amerikanische Wide Area Augmentation System (WAAS), das japanische Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS) und die indische GPS Aided Geo Augmented Navigation (GAGAN). Diese Signale können von verschiedenen GNSS-Empfängern direkt verarbeitet werden und erhöhen die Genauigkeit auf 1 bis 5 m. Eine noch höhere Genauigkeit von bis zu 1 cm Auflösung bietet die RTK-Vermessung. Hier werden mobile oder stationäre Referenzstationen an exakt eingemessenen Referenzpunkten auf dem Boden betrieben. Diese erhalten vom Fahrzeug eine Positionsschätzung von dessen GNSS-Empfänger und errechnen ein optimales Korrektursignal, das zurück an das Fahrzeug geschickt wird. Da die Reichweite dieser Referenzstationen auf bis zu 20 km begrenzt ist, gibt es Satellitenpositionierungsdienste wie SAPOS®⁷¹, die ein Netzwerk von Referenzstationen umfassen und das RTK-Korrektursignal über das Mobilfunknetzwerk bereitstellen. Die Abbildung 3.2 illustriert die Funktionsweise von DGPS-Verfahren.

⁷⁰ EGNOS ist ein europäisches DGP-System, welches als alternativer Korrekturdienst über geostationäre Satelliten die Positionsgenauigkeit von GNSS erhöht. Die dabei erzielbaren Genauigkeiten liegen in einem Bereich von 1 bis 3 m (Rapp/MLR 2018).

⁷¹ SAPOS wird von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) angeboten; <https://sapos.de/> (18.8.2019). Die Korrektursignalfomate unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihrer Kosten: So ist das Korrektursignal SAPOS in einigen Bundesländern kostenfrei verfügbar, z. B. in Baden-Württemberg oder Nordrhein-Westfalen. In anderen belaufen sich die Kosten für die Nutzung zur Erzielung von 0,3 bis 0,8 m Lagegenauigkeit und 0,5 bis 1,5 m Höhengenaugkeit (SAPOS-EPS) auf ca. 150 Euro pro Jahr. Für eine höhere Lagegenauigkeit von bis zu 2 cm und eine Höhengenaugkeit von 2 bis 3 cm (SAPOS-HEPS) können Kosten bis zu 250 Euro im Monat entstehen. Höhere Genauigkeiten (SAPOS-GPPS) benötigen entsprechend mehr finanzielle Mittel (WD 2018, S. 5 f.).

Abb. 3.2 Funktionsweise von DGPS-Verfahren



Quelle: nach KTBL 2018, S. 242

Zu den Marktführern bei kommerziell verfügbaren GNSS-Empfängern gehören Trimble Inc.⁷², Topcon Deutschland Positioning GmbH⁷³ oder Leica Geosystems AG⁷⁴. Für die landwirtschaftliche Nutzung werden verschiedene Ausführungen von GNSS-Empfangsgeräten angeboten. Es existieren Kooperationen zwischen Landmaschinen- und GNSS-Empfänger-Herstellern, sodass viele Landmaschinen ab Werk mit GNSS-Systemen unterschiedlicher Ausstattung (bezüglich der Positionsgenauigkeit und der Signale, die sie verarbeiten können) angeboten werden.

Bei den Navigationssystemen lassen sinkende Kosten bei RTK-GNSS-Empfängern (Gabl/Heller 2019) und neuere Entwicklungen wie Multi-GNSS-Empfänger (d. h. Empfänger, welche nicht nur GPS, sondern auch Signale von GLONASS, Beidou, Galileo etc. verarbeiten) qualitativ höherwertige Assistenzsysteme bzw. neuartige Anwendungsgebiete künftig erwarten. Beispielsweise zeigen Guo et al. (2018), dass mit der Verwendung von Multi-GNSS-Empfängern und der Methode des Precise Point Positioning (PPP), einem Mess- und Auswerteverfahren, welches ohne lokale oder regionale Referenzstation auskommt (Wanninger/Heßelbarth 2009, S. 3), eine hohe Präzision im Millimeterbereich erzielt werden kann (Guo et al. 2018, S. 909; Wang et al. 2018). Im Vergleich zur RTK-Vermessung bietet PPP eine höhere Empfangszuverlässigkeit, außerdem ergeben sich geringere Investitionskosten (kein Netzwerk an Referenzstationen erforderlich) und niedrigere Betriebskosten (durch den Wegfall der Gebühr für die Nutzung von RTK-Korrektursignalen) (Guo et al. 2018, S. 895 f.).

3.1.2 Automatische Lenksysteme

Automatische Lenksysteme von Traktoren und anderen selbstfahrenden Landmaschinen enthalten die Komponenten satellitengestützte Positionsbestimmung, Software zur Fahrzeugsteuerung und automatisierte Lenkungssteuerung. Es stehen unterschiedliche Lenksystemen zur Verfügung, die sich im Grad ihrer Fahrautomatisierung und in ihrer Positionsgenauigkeit unterscheiden (Doluschitz/Gindele 2019, S. 51):

- › Manuelle Lenksysteme assistieren der Fahrerin/dem Fahrer mithilfe optischer (z. B. einer Lichtbalkenanzeige) oder akustischer Signale beim manuellen Lenken. Hiermit lässt sich eine begrenzte Genauigkeit von 0,5 bis 1 m erreichen, die Arbeitsentlastung für die Fahrerin/den Fahrer ist gering.
- › Lenkassistentensysteme greifen über die Lenkhydraulik oder mithilfe eines Elektromotors am Lenkrad direkt in die Lenkung ein. Nach der manuellen Lenkung auf die virtuelle Fahrspur im Feld erfolgt eine automatische

⁷² <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-r2> (18.8.2021)

⁷³ www.topconpositioning.com/de/gnss-empfaenger-fuer-die-landwirtschaft (18.8.2021)

⁷⁴ <https://leica-geosystems.com/de-de/products/gnss-systems> (18.8.2021)

Steuerung und der Mensch übernimmt dann eine überwachende Funktion. Es wird eine Genauigkeit von bis zu 0,3 m erreicht, die Arbeitsentlastung ist hoch.

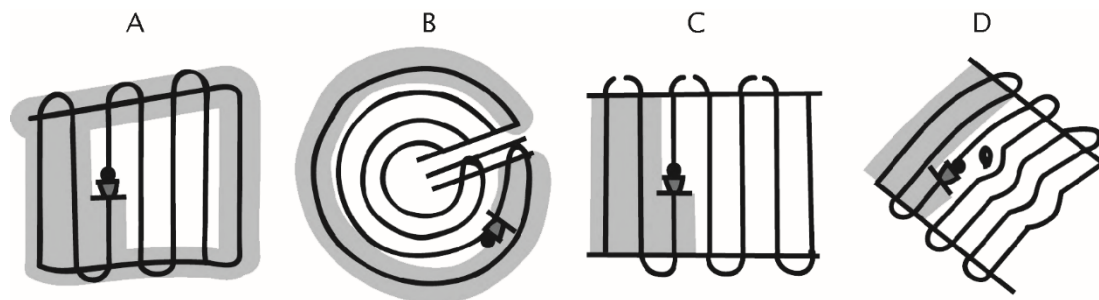
- › Lenkautomaten sind in die Hydraulik der Landmaschine integriert und ermöglichen eine autonome Fahrt auch um Hindernisse und im Vorgewende. Die Fahrzeugführenden müssen das Fahrzeug lediglich an die Nähe der Fahrspur heranfahren. Es wird eine hochgenaue Positionsbestimmung von bis zu 0,02 m erreicht.

Automatische Lenksysteme sind eine Teilkomponente von Parallelfahrssystemen, die eine praktische und mittlerweile weitverbreitete Anwendung darstellen. Parallelfahrssysteme unterstützen die Feldarbeit, indem sie die exakte Einhaltung von Abständen der Fahrspur sowie Arbeiten bei schlechter Sicht oder in der Nacht ermöglichen. Zudem erlauben sie es der FahrerIn/dem Fahrer, sich besser auf die jeweilige Bewirtschaftungsmaßnahme konzentrieren zu können (KTBL 2018, S. 249). Parallelfahrssysteme erfordern folgende Komponenten:

- › satellitengestützte Positionsbestimmung und Korrekturdienst,
- › Vorabfestlegung der Fahrwege oder deren Speicherung beim ersten Arbeitsgang,
- › Software für Parallelfahrssystem,
- › Lenkassistent oder Lenkautomat.

Die Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft unterschiedliche Standardspurführungsmodi von Parallelfahrssystemen: Bild A beinhaltet einen Spurführungsmodus mit parallelen Geraden und Vorgewende.⁷⁵

Abb. 3.3 Beispielhafte Darstellung von Spurführungsmodi



grau unterlegt: bewirtschaftete Ackerfläche

nicht unterlegt: unbehandelte Ackerfläche

Quelle: nach Trimble Germany GmbH

Der Vorgewendebereich kann bewirtschaftet werden, wie Bild A verdeutlicht, oder als Wendestreifen entsprechend Bild C brach liegen. Bild B zeigt ein Kreesegment, und zuletzt wird anhand von Bild D eine adaptive Kontur als möglicher Spurführungsmodus dargestellt. Mithilfe einer adaptiven Kontur wird ein manuell gefahrener Konturpfad aufgezeichnet, was gerade bei Hindernissen im Feld oder asymmetrischen Schlägen von Vorteil ist. Auf Basis dieser Kontur kann in der Folge das Parallelfahrssystem agieren.⁷⁶

Das Marktangebot an Lenk- inklusive Parallelfahrssystemen ist vielfältig (Doluschitz/Gindele 2019, S. 51; KTBL 2018), wobei verfügbare Systeme im Grad ihrer Fahrautomatisierung und der erzielbaren Genauigkeit variieren. Zudem existieren elektrische und elektrohydraulische Varianten. Da Lenkautomaten tief in die Mecha-

⁷⁵ Unter Vorgewende wird im Ackerbau jener Querstreifen am Ende eines der Länge nach gepflügten Ackers bezeichnet, auf dem die Landmaschine gewendet wird (http://woerterbuchnetz.de/cgi-bin/WBNetz/wbgui_py?sigle=DWB&lemma=Vorgewende; 18.8.2021).

⁷⁶ www.deere.com/common/docs/html/services_and_support/onscreen_help/16-1/de/autotrac_guidance/guidance_select_guidance_method_adaptive_curve_track.htm (18.8.2021)

tronik einer Landmaschine eingreifen, werden viele Lösungen vom Maschinenhersteller als Gesamtpaket zusammen mit integriertem GNSS-Empfänger angeboten, um infolge mangelnder einheitlicher Schnittstellen Kompatibilität zu gewährleisten (Hertzberg et al. 2017, S.9). Beispiele sind »AutoTrac«⁷⁷, »IntelliSteer«⁷⁸, »AccuGuide«⁷⁹, »GPS PILOT«⁸⁰ oder »VariotronicTI«⁸¹. Darüber hinaus stehen aber auch Nachrüstlösungen zur Verfügung, die mit verschiedenen Herstellern kompatibel sind, z. B. »Autopilot«⁸² oder »mojoRTK«⁸³.

Der Funktionsumfang der unterschiedlichen Anbieter ist sehr ähnlich (Hertzberg et al. 2017, S. 11 f.). Praktisch alle Hersteller bieten eine große Anzahl von Standardspurführungsmodi an. Zusätzlich werden Spurplanung und Optimierung der Spurreihenfolge offeriert, welche optimale Routen für die Landmaschinen ermitteln und während der Feldbearbeitung automatisch die passende Sequenz von Spurreihenfolge und -wechsel starten. Eine spezielle Form der automatischen Spurführung stellt das Controlled Traffic Farming dar, das vor allem in Australien praktiziert wird (Kasten 3.1).

Kasten 3.1 Controlled Traffic Farming

Controlled Traffic Farming (CTF) verwendet Parallelfahrssysteme auf eine spezifische Art und Weise. Bei CTF nutzen Landmaschinen über Jahre hinweg dieselben Fahrgassen für alle Arbeitsgänge – satellitengestützte Navigation sowie automatische Lenksysteme sind dafür Voraussetzung (Holpp et al. 2013, S.2). Die zu bearbeitende Fläche wird in einen Fahr- und Wachstumsraum getrennt, mit dem Ziel, die Bodenverdichtung des jeweiligen Schlags durch die Überfahrten von Landmaschinen so gering wie möglich zu halten. CTF ist als Antwort auf die Entwicklung von immer größeren (und damit schwereren) Landmaschinen zu sehen, die immer größere Felder bewirtschaften. Es wird bereits seit Mitte der 1990er Jahre großflächig im australischen Getreidebau⁸⁴ eingesetzt (Holpp et al. 2013, S.2). Im Gegensatz dazu steht die Random-Traffic-Praxis, d.h. die zufällige Überfahrt über die zu bewirtschaftenden Flächen (Hefner et al. 2017). Durch das zufällige Befahren wird eine größere Fläche des Schlags dem Risiko von Bodenverdichtung ausgesetzt.

Eine hohe Bodenverdichtung erschwert die Wurzeldurchdringung des Bodens durch Pflanzen und beeinträchtigt deren Wasser- und Nährstoffversorgung. Die Folgen sind eine verminderte Pflanzenentwicklung und geringere Erträge. Durch CTF können unbefahrene Flächen geschaffen werden, die eine verbesserte Bodenstruktur aufweisen (Hefner et al. 2017, S.382). Zudem ist ein geringerer Anteil der Gesamtfläche eines Schlags von der Bodenverdichtung betroffen (Gasso et al. 2013).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die überwachte Automatisierung der Fahraufgabe durch Parallelfahrssysteme mittlerweile Stand der Technik ist (Hertzberg et al. 2017). Vollautonome Systeme, die unüberwacht definierte Aufgaben eigenständig übernehmen, sind hingegen noch nicht verfügbar (siehe hierzu die Ausführungen in Kap. 3.3.2).

⁷⁷ www.deere.de/de/agrar-management-systeme/C3%B6sungen/lenk-und-steuersysteme/autotrac/ (18.8.2021)

⁷⁸ <https://agriculture.newholland.com/eu/de-de/precision-land-management/produkte/automatische-spurfuehrung-und-lenkung/integrierte-lenkung-intellisteer> (18.8.2021)

⁷⁹ www.caseih.com/emea/de-at/produkte/afs%C2%AE-advanced-farming-systems/guidance-steering (18.8.2021)

⁸⁰ www.claas-suedostbayern.de/produkte/claas/easy/nachruestung-gps-lenksysteme/automatische_system (18.8.2021)

⁸¹ <https://www.fendt.com/de/smart-farming/spurfuehrung> (18.8.2021)

⁸² <https://agriculture.trimble.de/product/automatisches-lenksystem-autopilot/> (18.8.2021)

⁸³ www.virtualwrench.com/leica-web/app/content/public/mojortk/products/content1239049201433.html (18.8.2021)

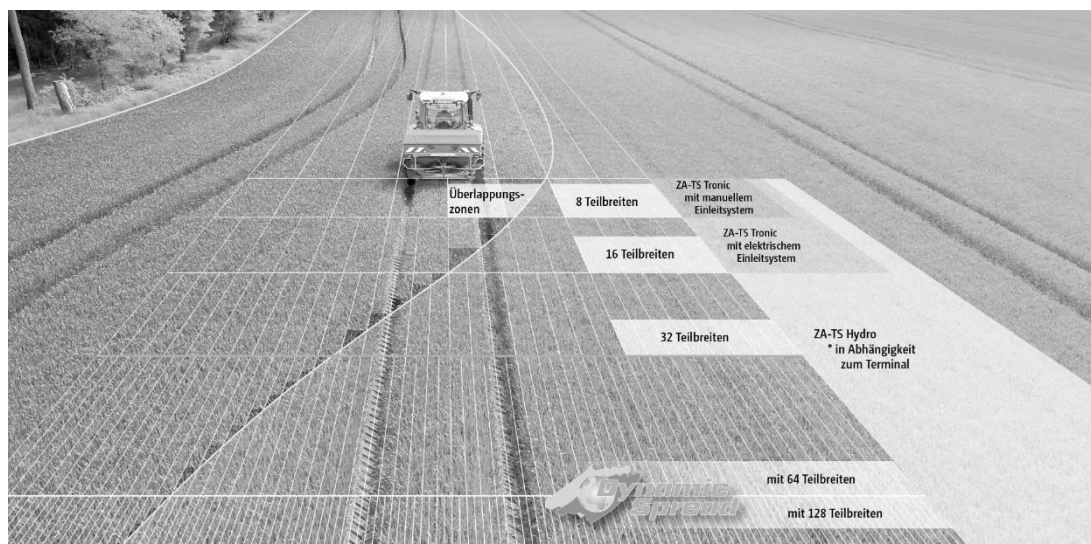
⁸⁴ In Australien werden speziell angepassten Fahrzeuge und Geräte mit großer Spurweite und schmalen Reifen genutzt, sodass der Fahrspuranteil unter 15 % bleibt. Das australische System lässt sich nicht direkt auf Deutschland und andere europäische Länder übertragen, da die zulässige Spurweite auf öffentlichen Straßen begrenzt ist (Blumenthal et al. 2018).

3.1.3 Automatische Teilbreitenschaltung

Die automatische Teilbreitenschaltung (Automatic Section Control – ASC) bezeichnet die Möglichkeit des Ein- und Ausschaltens von Teilbreiten der Anbaugeräte wie z. B. Feldspritzen, Düngerstreuern, Einzelkornsä- und Drillmaschinen. Ziel ist eine Überlappung am Vorgewende oder am Feldrand bei nicht rechteckigen Feldern zu vermeiden und so bei Maßnahmen wie z. B. bei der Düngung eine Unterdosierung mit Düngemitteln durch Behandlungslücken bzw. eine Überdosierung zu verhindern. Voraussetzungen sind eine satellitengestützte Navigation, eine Hinterlegung bzw. Erfassung der Fahrwege, eine elektrische Ansteuerung von Teilbereichen am Anbaugerät sowie die technische Möglichkeit einer separaten An- und Abschaltung bzw. Variation der Teilbreiten am Anbaugerät (Paar 2012). Die folgende Abbildung 3.4 verdeutlicht diese Einteilung der Bearbeitungsfläche. Die mit einzelnen Balken unterlegten Segmente stellen die aktiven Teilbreiten dar, die es noch zu bewirtschaften gilt.

Aufgrund wachsender Bewirtschaftungsflächen bzw. Arbeitsbreiten in der landwirtschaftlichen Produktion sowie höherer Fahrgeschwindigkeiten von Landmaschinen steigt das Risiko für Überlappungen, z. B. zwischen den Fahrspuren (Paar 2012). Für die Verwendung der automatischen Teilbreitenschaltung sind neben der Arbeitsbreite auch die Form und Größe der Ackerschläge relevant, wobei Überlappungen zunehmen, je unregelmäßiger die Schlagform ist und je mehr Feldgehölze und andere Landschaftselemente sich innerhalb eines Feldes befinden. Durch das Vermeiden unnötiger Überlappungen trägt die automatische Teilbreitenschaltung zur Einsparung von Betriebsmitteln wie Pflanzenschutzmittel, Dünger und Saatgut bei. Ebenfalls kann durch eine gleichmäßige Verteilung von Betriebsmitteln auf dem Feld, z. B. von Düngemittel, das Risiko für eine ungleichmäßige Abreifung der Einzelpflanzen vermindert werden.

Abb. 3.4 Beispielhafte Darstellung einer Teilbreitenschaltung bei einem Düngerstreuer



Quelle: AMAZONEN-WERKE H. Dreyer GmbH & Co. KG

Die automatische Teilbreitenschaltung wurde in etliche Anbaugeräte integriert: bei Düngerstreuern z. B. »Section Control«⁸⁵ oder »Exacta CL GEOSPREAD«⁸⁶, Feldspritzen, Einzelkornsä- und Drillmaschinen, Gülleverteiler

⁸⁵ www.grimme.com/vertriebsgesellschaft/producttypes/assistentensysteme/section-control (18.8.2021)

⁸⁶ www.kverneland.de/Duengerstreuer/Kverneland-Exacta-CL-GEOSPREAD (18.8.2021)

oder Hackmaschinen (Handler/Blumauer 2015). Die automatische Teilbreitenschaltung ist aber auch als externes Nachrüstsystem verfügbar, wie u. a. die »Section Control Box«⁸⁷ oder »ASC 10«⁸⁸.

3.1.4 Tractor Implement Management

Bei landwirtschaftlichen Anbaugeräten, wie z. B. der Ballenpresse oder Sämaschinen, zeichnen sich aktuell neue Entwicklungen ab, die unter dem Begriff Tractor Implement Management (TIM) zusammengefasst werden (Hertzberg et al. 2017, S. 26 f.). Davon ausgehend, dass das jeweilige Anbaugerät bessere Informationen über die jeweils durchzuführende Aufgabe besitzt als der Traktor bzw. die Zugmaschine, an der diese befestigt ist, werden Steuerungsbefehle an die Zugmaschine übermittelt. So kann eine Sämaschine in Abhängigkeit ihrer Funktion die Fahrgeschwindigkeit vorgeben oder eine Ballenpresse den Traktor anhalten, wenn die Presskammer voll ist und weitere Aktionen wie das Einwickeln und Ausstoßen der Ballen anstehen. Solche Systeme sind beispielsweise »Ultima«⁸⁹ und »ISOBUS«⁹⁰ sowie unter der Bezeichnung »Tractor Implement Automation« (TIA)⁹¹ bereits am Markt verfügbar, werden jedoch bislang noch wenig genutzt (Hertzberg et al. 2017, S. 27 ff.). Hertzberg et al. (2017, S. 27) zufolge stellt TIM einen notwendigen Baustein für eine Vollautomatisierung von Landmaschinen dar. Damit diese Technik auch herstellerübergreifend funktionieren kann, ist die Entwicklung offener Schnittstellen zur Kommunikation zwischen Maschinen verschiedener Hersteller von zentraler Bedeutung.

3.2 Telemetriesysteme

Telemetrie- oder Telematiksysteme sind digitale Datenerfassungs- und -übertragungssysteme, mit denen sich unterschiedliche Betriebsparameter von Landmaschinen – z. B. Positionsdaten, maschineninterne Daten wie Drehzahl oder auch spezifische Prozessdaten – aufzeichnen und an einen Server übermitteln lassen. Telematikanwendungen ermöglichen zudem den Fernzugang zu den Maschinen. Somit können Landmaschinen nicht nur überwacht, auch Fahroder Arbeitsanweisungen können übermittelt werden.

Einfache Telemetriesysteme, z. B. »BPT 1500«⁹² oder »LINK 740«⁹³, dienen dem Flottenmanagement, d. h. der Flottenüberwachung (und auch Diebstahlsicherung). Mittels eines (zumeist) nicht korrigierten GNSS-Empfängers werden die geografische Lage, Geschwindigkeit und Wegstrecke der Fahrzeuge sowie Datum und Uhrzeit erfasst. Die erhobenen Daten werden im Anschluss über Mobilfunk auf einen Server übertragen, wo sie in Echtzeit abgerufen werden können (Streicher 2019a). Auf dieser Grundlage lässt sich eine optimale Ausnutzung des Maschinenparks erzielen, z. B. durch eine Optimierung von Stillstandszeiten aufgrund von Reparaturen, Warte- und Wendezeiten (d. h. Lenkfahrtunterbrechungen) oder Leerfahrzeiten. So können Arbeitszeiten und Treibstoff eingespart und die (wetterabhängigen und vielfach kurzen) Zeitfenster für Aussaat-, Pflege- und Erntearbeiten möglichst optimal genutzt werden.

Bei komplexen Telemetriesystemen werden zusätzlich zur Standortbestimmung Daten der Maschinenleistung (z. B. Drehzahlen, Maschineneinstellungen, Zählerstände der Maschine) sowie Prozessdaten (z. B. zu Erträgen bei Erntemaschinen) aufgezeichnet. Diese Daten werden über einheitliche Schnittstellen (ISOBUS) an ein Datenerfassungssystem, d. h. an den Bordcomputer der Landmaschine, weitergegeben. Von hier werden die Daten (in einstellbaren Zeitabständen) per Mobilfunk an einen Datenserver des Telemetrieansbieters übermittelt. Dieser verarbeitet die Daten und speichert sie. Über ein Endgerät (Computer, Smartphone, Tablet etc.) kann die Landwirtin/der Landwirt die Daten abrufen oder weiterverwenden, z. B. in eine Ackerschlagdatei oder in ein Farmmanagementprogramm importieren. Komplexe Telemetriesysteme sind vielfach Teil der Ausstattung bei modernen

⁸⁷ <https://mueller-elektronik.de/produkte/section-control-box/> (18.8.2021)

⁸⁸ www.topconpositioning.com/de/agricultural-machine-control/section-and-rate-control/asc-10 (18.8.2021)

⁸⁹ www.landtechnik.co.at/fileadmin/PDF/Krone_Ultima_Prospekt.pdf (18.8.2021)

⁹⁰ www.fendt.com/de/smart-farming/maschinensteuerung (18.8.2021)

⁹¹ www.deere.co.uk/en/agricultural-management-solutions/guidance-automation/tractor-implement-automation/ (18.8.2021)

⁹² www.blaupunkt-telematics.com/produkte.html (18.8.2021)

⁹³ https://telematics.tomtom.com/de_de/webfleet/products/link/ (18.8.2021)

Landmaschinen – beispielhaft sind die folgenden Systeme von Landmaschinenherstellern: »AFS Connect«⁹⁴ oder »JDLINK«⁹⁵. Es gibt aber auch nahezu herstellernunabhängige Nachrüstsätze, die von spezialisierten IT-Dienstleistungsunternehmen angeboten werden (z. B. »farm-box«⁹⁶ oder »Vehicle Connectivity Gateway VCG«⁹⁷) (Streicher 2019a).

Komplexe Telemetriesysteme ermöglichen es über das einfache Flottenmanagement hinaus, die Einsatzfähigkeit der Maschine zu optimieren, z. B. den Durchsatz eines Mähdreschers, Feldhäckslers oder einer Quaderballenpresse effizienter zu gestalten. Unter der Bezeichnung Predictive Maintenance bieten Anbieter von Telemetriesystemen für Landmaschinen datenbasierte Dienstleistungen an (mit entsprechender Diagnosesoftware), mit dem Ziel, technische Mängel durch eine (Echtzeit-)Zustandsprüfung prädiktiv zu erkennen und vorherzusagen, z. B. durch Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmter Verschleißteile. Maschinendaten werden hierfür von der Landmaschine an den Hersteller übermittelt und analysiert. Entsprechend komplexe Telemetriesysteme sind verfügbar, z. B. »Connect«⁹⁸, oder in Entwicklung (CLAAS 2018, S. 23).

Telemetriesysteme unterstützen zudem Landwirtinnen/Landwirte bei administrativen Aufgaben, wie z. B. bei der automatischen Dokumentation von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf dem Feld (Streicher 2019a). Dies ist z. B. vor dem Hintergrund von Gewässerschutzauflagen beim Ausbringen von Düngemitteln von Relevanz (Hertzberg et al. 2017, S. 29). Neben der Protokollierung von ausgebrachten Düngemitteln (wo genau wie viel von welchem Mittel appliziert wurde) ist aber auch die Speicherung von weiteren Daten, die bei der Feldbearbeitung anfallen, wie Kraftstoffverbrauch, Erträge und Trockenmassegehalt, von Bedeutung; dies bieten z. B. Systeme wie »TELEMATICS«⁹⁹ und »SmartConnect«¹⁰⁰ an. Dokumentarische Funktionen können wichtig sein zur Planung und Optimierung von Prozessketten oder Fruchtfolgen; sie stellen eine Form des Wissensmanagements dar (Hertzberg et al. 2017, S. 29 ff.). Dies kann bei komplexen landwirtschaftlichen Prozessen, die von unterschiedlichen Personen durchgeführt werden, wie beispielsweise das Ausbringen von Düngemitteln durch Lohnunternehmen, von hoher Relevanz für den landwirtschaftlichen Betrieb sein.

Im Allgemeinen benötigen Telemetriesysteme eine weniger genaue Positionsbestimmung als maschineninterne Assistenzsysteme, wie z. B. Parallelfahrssysteme. Für das einfache Flottenmanagement sind unkorrigierte Satellitensignale zumeist ausreichend, bei komplexeren Telemetriefunktionen können die EGNOS-Korrekturdaten verwendet werden (Streicher 2019b). Telemetriesysteme sind technisch weitgehend ausgereift. Indessen zeichnet sich der Trend ab, dass Landmaschinenhersteller Funktionen der Telemetriesysteme zunehmend als Teil von Farmmanagementsystemen anbieten bzw. in diese integrieren (TAB 2021, Kap. 2.2.3). Dies nicht zuletzt, um durch Komplettlösungen Schnittstellen- bzw. Datentransferprobleme zu vermeiden (Streicher 2019a). Ziel aktueller Entwicklungen im Bereich der Farmmanagementsysteme ist es, nicht ausschließlich den Maschinenpark zu steuern und zu überwachen, sondern zusätzlich sämtliche Prozesse der landwirtschaftlichen Produktion eines Betriebs zu optimieren (Hertzberg et al. 2017, S. 32).

3.3 Perspektiven

Es ist davon auszugehen, dass der Trend zur Automatisierung von Landmaschinen und ihrer Funktionen weiter anhält. Aktuelle Entwicklungen gehen in Richtung eines vollautonomen Betriebs (zur Abgrenzung von Automatisierung und Autonomisierung Kasten 3.2), wobei dieser derzeit noch stark durch die Möglichkeiten zur Erfassung des Maschinenumfelds begrenzt wird (Hertzberg et al. 2017, S. 3). Im Folgenden wird die aktuelle Entwicklung in Richtung vollautonomer Landmaschinen beleuchtet. Zunächst werden die Herausforderungen bei der Umfelderfassung beschrieben und anschließend autonome Maschinenkonzepte näher vorgestellt.

⁹⁴ www.caseih.com/emea/de-de/produkte/afs%20AE-advanced-farming-systems/afs-connect (18.8.2021)

⁹⁵ www.deere.com/assets/publications/index.html?id=004d03e7#35 (18.8.2021)

⁹⁶ <https://isobus.org/precision-farming/> (18.8.2021)

⁹⁷ www.dsa.de/de/loesungen/produkte/vehicle-connectivity-gateway/ (18.8.2021)

⁹⁸ www.fendt.com/int/fendt-connected-services (18.8.2021)

⁹⁹ <https://www.claas.de/produkte/easy/vernetzte-maschinen/telematics> (18.8.2019)

¹⁰⁰ <https://landmaschinen.krone.de/deutsch/smartconnect/> (18.8.2021)

Kasten 3.2 Begriffliche Abgrenzung von Automatisierung und Autonomisierung

Die Begriffe der Automatisierung und der Autonomisierung von technischen Systemen sind klar voneinander abzugrenzen. Nach der DIN 19233 ist Automatisierung definiert als das Ausrüsten einer Einrichtung, sodass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet (TU Freiberg o. J.). Automatisierte Systeme erledigen im Allgemeinen eine fest vorgegebene Aufgabe in einer definierten Umgebung. Ein Beispiel dafür sind Schweißroboter in der Industrie, die immer wieder einen definierten Ablauf exakt wiederholen.

Autonome Systeme hingegen müssen (auch in unvorhergesehenen Situationen) in der Lage sein, selbst Entscheidungen darüber zu treffen, welche Handlungsschritte in welcher Reihenfolge für das Erreichen eines bestimmten Zielzustands durchzuführen sind. Dazu müssen sie ihre Umgebung wahrnehmen, zu einem gewissen Grad verstehen und die Auswirkungen ihrer Handlungen abschätzen und bewerten können. Die aktuell am Markt verfügbaren Assistenzsysteme für automatisierte Landmaschinen ermöglichen bestenfalls eine überwachte Autonomie und benötigen eine FahrerIn/einen Fahrer auf der Landmaschine. Autonome Systeme unterscheiden sich gravierend im Vergleich zu automatisierten Systemen in ihren Anforderungen an die notwendige Zuverlässigkeit des Systems in unbekannten oder unüblichen Situationen. Vollautonome Systeme müssen in jeder Situation verlässlich und sicher agieren und auch unbekannte, kritische Gegebenheiten (z. B. verschmutzte oder defekte Sensoren) erkennen und darauf reagieren können – nicht bloß in kontrollierten Labor-situationen oder unter optimalen Bedingungen auf dem Feld. Die adäquate Umfelderkennung ist hierfür eine zentrale Voraussetzung.

Quelle: Hertzberg et al. 2017, S. 27 f.

3.3.1 Umfelderkennung

Die Umfelderkennung von Landmaschinen ist ein wichtiges Forschungsfeld, bedarf es doch einer Erkennung von statischen und dynamischen Hindernissen, z. B. Steine oder Personen, auf dem Feld, um autonome Funktionen sicher auszuführen (dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S. 25 f.). Ein zusätzlicher Nutzen einer validen Umfelderkennung liegt darin, die Navigation von Landmaschinen unabhängig von Empfangsstörungen oder -verzerrungen der globalen satellitengestützten Navigation aufrechterhalten zu können. Allerdings werden Objekte bei vielen Arbeitsvorgängen – etwa beim Mähen – oft erst sehr kurzfristig sichtbar. Dementsprechend stellt neben der Klassifizierung von Objekten die extrem kurze Reaktionszeit zwischen Erkennung des Objekts und der durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahme eine Herausforderung dar (Gaus et al. 2018, S. 11). Es ist davon auszugehen, dass Landmaschinen künftig mit immer mehr Sensorik zur Umfelderkennung ausgestattet werden. In aktuellen Forschungsvorhaben wird sich vor allem mit Sensortechnologien auf der Basis von Multi- und Hyperspektralkameras oder Radarsensoren beschäftigt. Dabei sind die automatisierte Klassifizierung und die Positionsbestimmung von Objekten im Raum mithilfe von 3-D-Daten ein Schwerpunkt der Forschung (Blume et al. 2018, S. 1). Ziel ist die Erstellung von Umgebungsrepräsentationen, die die komplette 3-D-Geometrie eines Feldes inklusive Höhenprofil und umliegender Strukturen – wie Bewaldung, Straßen, Feldzugangspunkte – umfassen, was jedoch noch eine Zukunftstechnologie ist.

Weiterer Forschungsbedarf zeigt sich bei der semantischen Annotation¹⁰¹ von kartiertem Wissen, was z. B. für die Objekterkennung wichtig ist und zukünftig die weitere Automatisierung und Autonomisierung von Landwirtschaftsprozessen signifikant unterstützen könnte (dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S. 3). In verschiedenen Forschungsprojekten wird aktuell zu diesen Fragestellungen, z. B. im Projekt »SOILAssist2« des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz, gearbeitet. Hierbei werden verschiedene Ernteszenarien betrachtet und ein Assistenzsystem entwickelt, das auf einer semantischen Umgebungsrepräsentation beruht. Ziel ist »die räumliche und zeitliche Prozessplanung und Koordination mehrerer Fahrzeuge unter Berücksichtigung eines Modells, das Bodeneigenschaften repräsentiert«.¹⁰²

¹⁰¹ Semantische Annotation beschreibt den Prozess des Hinzufügens von semantischen Metadaten in Dokumente, zur näheren Beschreibung des Dokuments in einer maschinen-verarbeitbaren Form (Reif 2006).

¹⁰² <https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekte-uebersicht/projekt/soilassist2> (18.8.2021)

3.3.2 Autonome Landmaschinen

Um von der automatisiert fahrenden Landmaschine zu einem vollautonomen Fahrbetrieb zu gelangen, muss nicht nur das Steuern der Maschine automatisiert werden. Vielmehr müssen alle Funktionen, die der Mensch auf der Maschine übernimmt, durch autonome oder ferngesteuerte Lösungen ersetzt werden (dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S. 13 f.). Diese umfassen außer der reinen Navigation auch die Prozesssteuerung sowie die Umgebungsüberwachung und -interpretation. Es existiert eine Vielzahl an Forschungsprototypen, die autonome Funktionen haben und so mindestens eine Teilautonomie des Systems realisieren. Jedoch hat bis dato kein Hersteller ein Produkt auf den Markt gebracht, das alle genannten Punkte vollständig erfüllt.

Aktuell lassen sich hinsichtlich der Entwicklung von autonomen Landmaschinen zwei Trends beobachten: autonome landwirtschaftliche Großtechnik als nächste Stufe konventioneller Landmaschinen und Robotik als autonome Kleintechnik. Während autonome landwirtschaftliche Großtechnik stärker darauf angelegt ist, konventionelle Agrarprozesse weiter zu automatisieren, werden Robotersysteme mehr oder weniger gezielt dafür verwendet, Agrarprozesse zu verändern, z. B. um durch kleinere Systeme die Bodenbelastung zu reduzieren. Es ist offen, welche der beiden Richtungen in Zukunft dominieren wird (Gaus et al. 2018, S. 2). In Kapitel 5 wird die autonome Kleintechnik näher behandelt. Die folgenden Ausführungen fokussieren hingegen auf Systeme, die sich in Form und Funktionalität an konventionelle Landmaschinen anlehnen.

Gegenwärtig können im Bereich der autonomen Großtechnik drei Ansätze unterschieden werden:

- › Automatisierung bisheriger Traktorkonzepte mit oder ohne Fahrerkabine
- › Master-Slave-Systeme
- › Gantryssysteme

Aus Forschungsarbeiten zu autonomen Traktoren (Oksanen 2015) sind mittlerweile produktnahe Entwicklungen hervorgegangen, deren Ansätze von der Autonomisierung bestehender Traktoren bis hin zu neuen Traktortypen ohne Fahrerkabine reichen (Gaus et al. 2018, S. 7f.). Gemeinsam ist den Entwicklungen, dass das Fahren des Traktors sowie das Ankoppeln von Anbaugeräten autonom erfolgt. Automatisierte Traktoren ohne Fahrerkabinen beispielsweise setzen auf eine umfassende Umgebungserkennung, zumeist mittels einer Kombination aus Radar und Lidar¹⁰³ sowie einer RGB-Kamera. Ein detektiertes Hindernis wird direkt auf einen entfernten Bildschirm (z. B. Tablet) gesendet, was es den Bedienenden ermöglicht, die Szene zu interpretieren und die entsprechende Reaktion des Fahrzeuges anzustoßen. Ein Beispiel hierfür ist das »Case IH Autonomous Concept Vehicle«¹⁰⁴ (Abb. 3.5).

Trotz der teilautonomen Betriebsweise bleibt bei solchen Systemen die Frage offen, wie die Anfahrt zum und Abfahrt vom Feld auf öffentlichen Straßen gesetzlich geregelt werden soll, da der vollautonome Fahrbetrieb aktuell nicht mit der Straßenverkehrsordnung konform geht.

Im Bereich der autonomen Traktorkonzepte mit Fahrerkabine gibt es bereits einige Prototypen unterschiedlicher Hersteller: Ausgestattet mit einer umfassenden Umfelderkennung lässt der »NHD Concept Autonomous Tractor«¹⁰⁵ sowohl einen manuellen als auch autonomen Betrieb zu. Ein weiterer Prototyp, der »ZF Innovation Tractor«, kann per Tablet aus der Ferne manövriert werden; darüber hinaus ist das System in der Lage, selbstständig Arbeitsgeräte zu erkennen und steuert vollautonom die richtige Position zum Ankoppeln an. Dieser Vorgang wird automatisch unterbrochen, wenn ein Mensch zwischen Traktor und Arbeitsgerät tritt. Die dazu notwendige Umfelderkennung ist kamerabasiert.¹⁰⁶

¹⁰³ Unter Light Detection and Ranging (Lidar) werden bestimmte Sensorsysteme zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung zusammengefasst. Lidar basiert auf einem ähnlichen Verfahren wie Radar. Statt Radiowellen werden jedoch Laserstrahlen zur 3-dimensionalen Vermessung der Umgebung eingesetzt.

¹⁰⁴ <https://media.cnhindustrial.com/EUROPE/CNH-INDUSTRIAL-CORPORATE/cnh-industrial-brands-reveal-concept-autonomous-tractor-development--driverless-technology-to-boost-/s/a2259742-061a-412a-8a12-d307dbaedd88> (18.8.2021)

¹⁰⁵ <https://agriculture.newholland.com/apac/en-nz/about-us/whats-up/news-events/2017/new-holland-nhdrive-concept-autonomous-tractor> (18.8.2021)

¹⁰⁶ ZF Group (<https://youtu.be/W1m7gyy8kEA>; 18.8.2021)

Abb. 3.5 Case IH – autonomes Traktorkonzept



Quelle: CNH Industrial Österreich GmbH

Master-Slave-Systeme oder Systeme, die auf einer elektronischen Deichsel basieren, befinden sich mittlerweile in einem produktfähigen Stadium (Gaus et al. 2018, S. 8 f.). Mithilfe von Master-Slave-Systemen können mehrere landwirtschaftliche Großmaschinen nebeneinander auf einem Feld Tätigkeiten verrichten, wobei nur eine Maschine mit einer Fahrerin/einem Fahrer besetzt ist. Die weiteren Landmaschinen folgen quasi autonom. Im Rahmen dieser überwachten Autonomie kontrollieren die Bedienenden auch die unbemannten Maschinen und stellen deren Betrieb sicher. Durch dieses Master-Slave-Prinzip können mehrere kleinere und damit leichtere Landmaschinen eingesetzt werden und so die durch einen einzigen großen und zugleich schweren Traktor verursachte Bodenbeanspruchung reduzieren. Erste praxisreife Konzepte präsentierte die AGCO Fendt GmbH auf der »AGRITECHNICA« 2011 (FAST o.J.).

Gantrysysteme, auch Brückensysteme genannt, sind ein weiterer Entwicklungsansatz für autonome Landmaschinentechnik (Abb. 3.6), der aus dem Bereich des Controlled Traffic Farming hervorgegangen ist (Gaus et al. 2018, S. 9). Es handelt sich dabei um Geräteträger, sogenannte Gantries, welche gemäß dem Gedanken des Controlled Traffic Farming durch außen liegende Reifen den Fahrspuranteil reduzieren und somit eine große Arbeitsbreite sowie einen großen Wachstumsraum für die Pflanzen ermöglichen (Holpp et al. 2013, S. 2).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Automatisierung von Landmaschinen besteht (Gaus et al. 2018, S. 28 f.). Dies betrifft nicht nur die Automatisierung der Fahraufgabe hin zu einem vollautonomen Fahrbetrieb während der Nutzung (inklusive Verbesserung der Umfelderkennung), sondern insbesondere die Automatisierung von Bewirtschaftungsprozessen.

Abb. 3.6 Gantrysystem ASAWS 9000 bei der Zwiebelerte



Quelle: Pedersen 2020

Gaus et al. (2018, S. 28 f.) verweisen in diesem Zusammenhang auf fehlende »Prozessmodelle oder -beschreibungen, mit deren Hilfe Automatisierungsalgorithmen [angesichts der komplexen Vorgänge zwischen Boden und Werkzeug] Handlungsanweisungen für die Maschine ableiten könnten«. Um diesen Mangel zu beheben, werden Gaus et al. (2018, S. 28 f.) zufolge Forschungsprogramme benötigt, »die explizit die Verknüpfung von Methoden künstlicher Intelligenz (KI) mit den Anwendungsfeldern im Ackerbau fördern«. In dem Maße, in dem Assistenzfunktionen komplexer werden, sind diese zudem verstärkt auf die Kommunikation der Maschinen untereinander und/oder mit einem zentralen Server angewiesen, um prozessrelevante Daten austauschen zu können. Umsetzungsprobleme ergeben sich dabei durch die mangelnde Netzabdeckung in den ländlichen Räumen. Kompatible Datenformate oder Systeme wie ISOBUS, die die Kommunikation zwischen Maschinen unterschiedlicher Hersteller ermöglichen, sind schon heute von großer Relevanz (TAB 2021, Kap. 2.1.2; Hertzberg et al. 2017, S. 21).

4 Drohnen

Eine Drohne (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) ist ein unbemanntes Luftfahrzeug, welches in der Regel mittels Fernbedienung vom Boden aus gesteuert wird. Drohnen stammen ursprünglich aus dem militärischen Bereich und werden dort seit den 1960er Jahren operativ eingesetzt (Weber et al. 2018). Mittlerweile finden sie in vielen kommerziellen sowie privaten Bereichen große Verbreitung – auch weit über das ursprüngliche Aufgabenfeld, die Erstellung von Luftbildern, hinaus (Schneider et al. 2018). Durch die Möglichkeit, verschiedene Sensorsysteme, Navigations- und Funksysteme oder kleinere Lasten an einer Drohne zu befestigen, sind die Nutzungsmöglichkeiten sehr vielfältig. In der Landwirtschaft können sie u. a. zur Kartierung landwirtschaftlicher Flächen, zur Schädlingsbekämpfung oder zum Monitoring des Pflanzenbestands eingesetzt werden.

Drohnen gehören zu den Techniken der Fernerkundung. Unter diesem Begriff werden alle Erdbeobachtungen aus der Luft, vom erdnahen Bereich bis zu Satelliten, verstanden. Laut Umfragen ist die derzeitige Nutzung von Drohnen in der deutschen Landwirtschaft noch eher gering und liegt im einstelligen Bereich (z.B. Bitkom/DBV 2016). Dennoch gilt die Landwirtschaft bereits seit Längerem als besonders vielversprechendes Anwendungsfeld für drohnenbasierte Dienstleistungen (PwC 2016a).

Auf der Grundlage des Gutachtens von Bernhardt et al. (2017b) werden im Folgenden erst technische und rechtliche Aspekte des Drohneneinsatzes in der Landwirtschaft diskutiert (Kap. 4.1). Anschließend werden landwirtschaftliche Einsatzfelder der Drohnentechnologie im Pflanzenbau (Kap. 4.2) und der Tierhaltung (Kap. 4.3) näher vorgestellt sowie Perspektiven in Forschung und Entwicklung aufgezeigt (Kap. 4.4). Technische und rechtliche Grundlagen

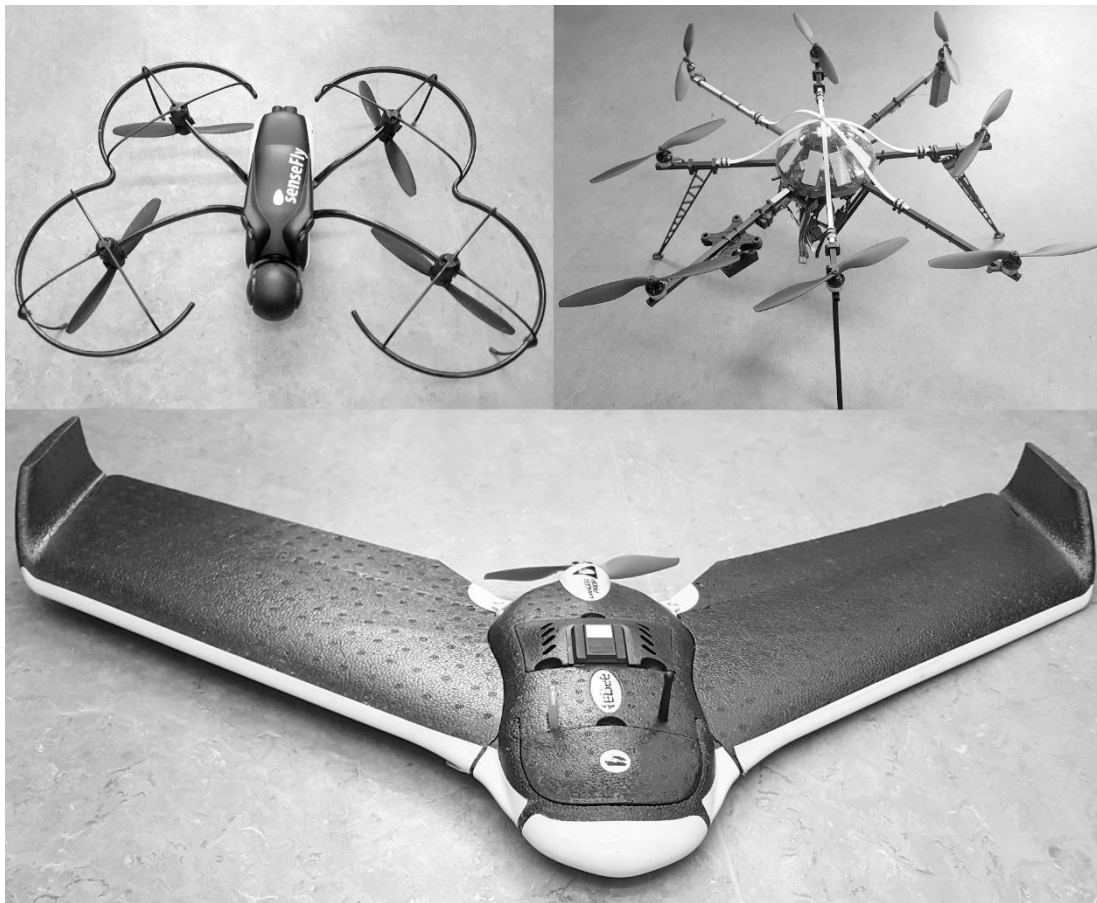
Drohnen können die Größe eines bemannten Flugzeuges und über 60 m Spannweite erreichen, wie z.B. die Aufklärungsdrohne »Condor«¹⁰⁷, die als Demonstrator in den 1980er Jahren entwickelt wurde (Bernhardt et al. 2017, S. 3). Die im Agrarsektor eingesetzten Drohnen entsprechen jedoch eher den Abmessungen normaler Modellflugzeuge bzw. -helikopter (Reinhard 2013, S. 178). Grundsätzlich können zwei gängige Konstruktionstypen von Drohnen unterschieden werden (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 4 ff. u. 9 ff.):

Bei *Multikoptern* oder *Drehflüglern* (Abb. 4.1 oben) wird der Auftrieb hauptsächlich durch mindestens einen um eine vertikale Achse drehenden Propeller erzeugt. Start und Landung erfolgen damit wie bei Hubschraubern senkrecht aus dem Stand (nach dem Vertical-Take-off-and-Landing-Prinzip; Strickert 2016). Es gibt Modelle mit vier (Quadrokopter), sechs (Hexakopter) und acht Rotoren (Oktokopter). Sensorik, wie z.B. Kamerasysteme, können am Gimbal, einer kardanischen Aufhängung, erschütterungsfrei befestigt werden. Die Traglast wird dabei primär von der Zahl der Rotoren bestimmt (je mehr Rotoren, desto schwerere Lasten können transportiert werden), wobei aber auch die Größe der Rotoren und die Rotorgeschwindigkeit ausschlaggebend sind. Eine höhere Traglast geht auf Kosten der Flugzeit und Reichweite.

Unter *Starr- oder Nurflüglern* (Abb. 4.1 unten) werden Drohnen verstanden, deren Konstruktionsweise herkömmlichen Flugzeugen ähnelt. Die Beschleunigung erfolgt in der Regel über einen am Heck befindlichen Propeller, der Auftrieb wird durch seitlich fest angebrachte Tragflächen erzeugt. Start und Landung können dadurch (anders als bei Multikoptern) nicht aus dem Stand durchgeführt werden, wodurch entweder relativ lange Start- und Landebahnen oder spezielle Vorrichtungen benötigt werden (Tchouchenkov et al. 2012); kleinere Geräte können aber auch per Hand gestartet werden.

¹⁰⁷ www.boeing.com/history/products/condor-unmanned-aerial-vehicle.page (18.8.2021)

Abb. 4.1 Drohntypen: Quadrokopter (oben links), Oktokopter (oben rechts) und Starrflügler (unten)



Quelle: Bernhardt et al. 2017, S.4 u. 9

Marktübliche Drohnen erreichen je nach Typ eine Fluggeschwindigkeit von bis zu 80 km/h, eine Flughöhe von weit über 100 m und eine Flugdauer – je nach Nutzlast – von ca. 30 bis maximal 60 Minuten (Niemeyer 2014; Shi et al. 2016; Tchouchenkov et al. 2012). In der landwirtschaftlichen Nutzung und vielfach auch Forschung werden bislang hauptsächlich Multikopter eingesetzt (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S.4 ff). Die wesentlichen Gründe hierfür sind die im Vergleich zu Starrflüglern einfacheren Start- und Landeprozesse sowie die bessere Manövrierfähigkeit. Multikoptern wird eine höhere Lebensdauer als den Starrflüglern zugeschrieben, da das Risiko von Bruchlandungen deutlich kleiner ist (Rudd et al. 2017). Zudem können Multikopter in jede beliebige Richtung (auch rückwärts) fliegen bzw. in der Luft stehen bleiben, was für die Erstellung von Bildaufnahmen von großem Vorteil sein kann.

Aber auch Starrflügler verfügen über spezifische Vorteile. Sie sind schneller als Multikopter (bei gleicher Antriebsleistung) und witterungsunempfindlicher (Tchouchenkov et al. 2012). Zudem können sie größere Lasten transportieren (bzw. es werden bei gleicher Nutzlast längere Flugzeiten erreicht) (Shi et al. 2016; Toth/Jutzi 2017). Vor allem aber verfügen sie im Vergleich zu Multikoptern über längere Einsatzzeiten, was sie vor allem für die Erkundung größerer landwirtschaftlicher Flächen infrage kommen lässt.¹⁰⁸

¹⁰⁸ Bei Multikoptern wird die erreichbare Flugzeit dadurch begrenzt, dass für den Auftrieb die ständige Bewegung der Rotoren erforderlich ist, was einen hohen Energieverbrauch bedingt (Störkel 2017). Im Gegensatz dazu wird der Auftrieb bei Starrflüglern durch die Horizontalbewegung generiert (Haeffs 2016). Abdullahi und Sherif (2015) geben für Multikopter eine maximale Einsatzzeit von 20 Minuten an, für Starrflügler 60 Minuten.

Am häufigsten sind in der Landwirtschaft kleine Drehflügler mit Elektroantrieb (üblicherweise Lithiumpolymer-Akkus) und bis ca. 1 m Durchmesser vorzufinden, welche 4, 6 oder 8 Propeller haben (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 3 u. 6). Sie sind ca. 1 bis 5 kg schwer, sehr manövrierfähig und präzise steuerbar. Die mögliche Nutzlast übersteigt mittlerweile 2 kg. Das Herzstück bildet ein Flugcontroller, der Sensordaten und Steuerbefehle des Piloten verarbeitet und die einzelnen Motoren kontrolliert. Die Position wird über ein GNSS-Modul bestimmt, wodurch auch Funktionen wie Wegpunktnavigation oder Geofencing¹⁰⁹ realisiert werden können (Toth/Jutzi 2017). Parameter wie Beschleunigung, Geschwindigkeit oder Flughöhe werden über spezielle Sensoren, Barometer bzw. Gyroskope¹¹⁰ erfasst. Die Entfernungsmessung zum Boden erfolgt über Ultraschall- bzw. Infrarotsensoren (Czerulla 2017).

Drohnen werden in der Regel vom Menschen vom Boden aus gesteuert, meist unter Verwendung von funkbasierten Konsolen (Weller o. J.). Es gibt verschiedene Flugmodi, wobei zwischen autonomem Flug, Fliegen mit Autopiloten oder First-Person-View-Flug¹¹¹ unterschieden wird. Der Aktionsradius eines zivilen UAV ist durch technische Faktoren – insbesondere die Akkulaufzeit sowie die Kommunikationsreichweite –, aber auch durch die gesetzlichen Vorschriften für unbemannte Flugsysteme limitiert (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 7 u. 54). Ein wesentlicher Aspekt ist die Energieversorgung. Die aktuell verwendete Technik über wiederaufladbare Batterien begrenzt die Flugzeit sowie die mögliche Reichweite stark. Gängige Multikopter für den professionellen zivilen Einsatz verfügen derzeit über eine Einsatzdauer von maximal 30 Minuten und eine Reichweite von 5 bis maximal 10 km. Werden vordefinierte Routen abgeflogen, kann die Reichweite unter Umständen auch mehr betragen (Tchouchenkov et al. 2012).

Die landwirtschaftliche Drohnennutzung stößt zudem an enge rechtliche Grenzen (Kasten 4.1). So ist für den Einsatz von Drohnen, die schwerer sind als 250 g, eine Registrierung erforderlich und es muss ein Kompetenznachweis erbracht werden. Für den Abwurf von Gegenständen sowie für Drohnen, die das Startgewicht von 25 kg überschreiten, sind aufwendigere Betriebsgenehmigungen einzuholen, was viele landwirtschaftliche Einsatzszenarien betreffen dürfte. Zudem ist das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln per Drohne grundsätzlich nicht erlaubt, Ausnahmegenehmigungen werden nur für spezielle Anwendungsszenarien erteilt.

Kasten 4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Juni 2019 wurde auf *EU-Ebene* ein Regelwerk für Drohnen bekanntgegeben, welches den Einsatz von Drohnen europaweit vereinheitlicht. Die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947¹¹² wurde im Mai 2021 nach einem längeren Abstimmungsprozess in nationales Recht überführt (Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021). Demzufolge müssen sich Betreiber von Drohnen mit einer Startmasse ab 0,25 kg registrieren lassen und über einen Kompetenznachweis verfügen (Drohnenführerschein). Ausgehend von einer Risikoklassifizierung ist darüber hinaus der Betrieb von Drohnen für die zivile Nutzung in bestimmten Gebieten (rund um Flughäfen, Regierungsgebäude etc.) verboten bzw. nur mit Sondergenehmigungen erlaubt. Für drei definierte Risikoklassen – Betriebskategorien »offen«, »speziell« und »zulassungspflichtig« – gelten unterschiedliche Regulierungsmaßnahmen. Ein »geringes« Risiko stellen z. B. Drohnenflüge dar, die unter direkter Sicht des Piloten mit einer maximalen Startmasse von unter 25 kg in einer maximalen Flughöhe von 120 m über Grund oder Wasser und in einem sicheren Abstand zu unbeteiligten Personen und Gegenständen am Boden durchgeführt werden (Betriebskategorie »offen«). Ein Transport gefährlicher Güter oder der Abwurf von Gegenständen ist in dieser Kategorie nicht erlaubt, was wichtige landwirtschaftliche Einsatzzwecke (z. B. das Ausbringen von Nützlingen) betrifft, die somit höheren Risikokategorien zuzuordnen sind (Betriebskategorien »speziell« oder »zulassungspflichtig«). Für solche Einsätze sind dann auf jeden Fall Betriebsgenehmigungen einzuholen, in deren Rahmen eine Risikobewertung durchzuführen ist.

¹⁰⁹ Geofencing beschreibt die automatische Einhaltung von Fluggrenzen und Überflugsverboten, die auf der Basis von Ortungs- und Navigationssystemen umgesetzt wird.

¹¹⁰ Ein Gyroskop dient der Erfassung von Beschleunigungs- und Rotationsinformationen beim Drohnenflug.

¹¹¹ Unter First-Person-View-Flug wird der Flugbetrieb einer Drohne verstanden, in dem durch Kamertechnik die Pilotin/der Pilot den Flug aus der Sicht der Drohne erlebt, obgleich die Drohne per Fernsteuerung manövriert wird.

¹¹² Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge.

Grundsätzlich verboten ist in Deutschland (§ 18 Pflanzenschutzgesetz¹¹³) und der EU (Richtlinie 2009/128/EG¹¹⁴) das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln aus Flugzeugen (bemannt oder unbemannt). Ausnahme genehmigungen sind möglich, jedoch nur für Weinbau in Steillagen und den Kronenbereich von Wäldern. Zudem bedarf die Beförderung von weiteren Stoffen, die durch Rechtsverordnungen als gefährliche Güter eingestuft sind (§ 27 Abs. 1 LuftVG), einer Genehmigung durch die Luftfahrtbehörde.

Drohnen sind demnach laut § 1 des Luftverkehrsgesetz (LuftVG) als Luftfahrzeuge zur Nutzung des Luftraums berechtigt, unterliegen dabei jedoch je nach Gewichtsklasse weitreichenden Einschränkungen. In Deutschland trat diesbezüglich Anfang 2017 erstmalig eine neue Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten in Kraft, die zu Veränderungen in der Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) und der Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) führten.

Quelle: Bernhardt et al. 2017, S. 29 ff.; Reger et al. 2018a, S. 65 ff.

4.1 Einsatzbereiche im Pflanzenbau

Als Trägerplattform für unterschiedliche Sensoren sind Drohnen für den Einsatz im Pflanzenbau geradezu prädestiniert. Da Sensorsysteme (Kap. 2) wie Digital- und Wärmebildkameras, multi- und hyperspektrale Sensoren immer kleiner und leichter werden, können sie zunehmend problemlos von Drohnen transportiert werden (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 12). Dadurch ergeben sich vielfältige Nutzungsmöglichkeiten, vor allem bei der Beobachtung von Veränderungen im Bestand. Für diese braucht es in der Regel eine zeitlich sowie räumlich hohe Beobachtungsdichte, wozu Drohnen sehr gut geeignet sind. Zu den größten Pluspunkten eines Drohneneinsatzes gehört außerdem, dass Parameter nicht invasiv, also ohne sie zu beeinflussen, erfasst werden können (Schaumberger et al. 2015). Tabelle 4.1 zeigt, welche Einsatzgebiete im Pflanzenbau möglich sind, mit welchem Drohnentyp der Einsatzzweck erfüllt werden kann und ob das Einsatzgebiet schon in der Praxis angewendet wird.

¹¹³ Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz – PflSchG)

¹¹⁴ Richtlinie 2009/128/EG über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden

Tab.4.1 Einsatz- und Forschungsfelder von Drohnen im Pflanzenbau

Einsatzgebiet	Multikopter	Starrflügler	Anwendung	Forschung
<i>Bestandsmonitoring</i>				
Bestandshöhe	✓	✓		✓
Biomasse	✓	✓	✓	✓
Ertragsschätzung	✓	✓	✓	✓
Nährstoffstatus	✓	✓	(✓)*	✓
Wassermangel	✓	✓	(✓)*	✓
Reifegrad	✓	✓		✓
Pflanzenkrankheiten	✓	✓		✓
Schädlingsbefall	✓	✓		✓
Unkraut- und Unkrautdichteerkennung	✓	✓		✓
<i>Bodenparametererfassung</i>				
Bodenstruktur	✓	✓		✓
Erosionsschäden	✓	✓	✓	✓
Drainagenlokalisation	✓	✓	✓	
<i>Schadstellenerfassung</i>				
Hagelschäden	✓	✓		✓
Wild- und Mäuseschaden	✓	✓	✓	✓
Vernässungsstellen	✓	✓	✓	✓
<i>Betriebsmitteleinsatz</i>				
Nützlingsverteilung	✓		✓	
Pflanzenschutzmittel- ausbringung	✓		✓	✓
Vergrämungsmittel- ausbringung	✓			✓
<i>verschiedenes</i>				
Wilddetektion	✓		✓	
Flächenvermessung	✓	✓	✓	

* Die Messungen des Nährstoffstatus und des Wassermangels bei Pflanzen sind aktuell nicht exakt erfassbar.

Quelle: Bernhardt et al. 2017, S. 19

Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsfelder ausgeführt. Dazu gehören das Bestandsmonitoring (als Grundlage für die Präzisionslandwirtschaft), die Wildtierortung sowie die Schädlings- und Unkrautbekämpfung.

4.2.1 Bestandsmonitoring

Generell gilt: Je hochauflösender die Erfassung eines Pflanzenbestands durch Drohnen erfolgen kann, desto genauer und nützlicher sind die resultierenden Daten (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 13 f. u. 49). Hier ist ein großer Vorteil des Drohneneinsatzes gegenüber der satellitenbasierten Fernerkundung zu sehen. Denn die Bildauflösung von Drohnenaufnahmen ist aufgrund der deutlich geringeren Flughöhe (100 m vs. Erdboden) in der Regel um ein Vielfaches höher (im Zentimeter- statt im Meterbereich; Abdullahi et al. 2015) als die von Satellitenaufnahmen (Grenzdörffer 2017, S. 2). Zudem lassen sich Drohnen weitgehend witterungsunabhängig und zeitlich hochflexibel einsetzen. Insbesondere lassen sich Erkundungen auch bei starker Bewölkung durchführen, was bei Satelliten oft nicht möglich ist. Gegenüber bodengebundenen Sensorträgern haben Drohnen den Vorteil, dass sie auch arbeiten können, wenn eine Befahrung der Zielfläche nicht erwünscht oder durchführbar ist.

Aufgrund der Tatsache, dass Drohnen mit RTK-Systemen (Kap. 3.1.1) ausgestattet werden können, ist es möglich, jedem Bild eine äußerst genaue Position zuzuordnen (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 11 u. 17 f.). Mehrere Fotos können zusammen mit den Koordinaten zu hochdetaillierten Orthofotos umgewandelt werden, die einen Geländebereich entzerrungsfrei darstellen. Sowohl normale 2-D-Bilder als auch 3-D-Modelle können so am Computer erstellt werden; dafür sind bereits diverse Programme als Freeware erhältlich (Knabel 2016). Während bei einem normalen Luftbild aufgrund der zentralen Aufnahme und durch das Relief der Landschaft geometrische Verzerrungen entstehen, werden diese bei einem Orthofoto durch Überlagerung mehrerer aneinandergelagerter Bilder und Korrekturberechnungen entzerrt – Messungen können so in den Bildern maßstabsgetreu durchgeführt werden.

Nutzen lässt sich diese Technik in der Landwirtschaft z. B. für die Kartierung und Vermessung von Schlägen oder die Wartung von Photovoltaik- (BayWa 2017) oder Sprinkleranlagen. Aus entsprechenden Luftbildern können in Abhängigkeit der jeweils verwendeten optischen Sensoren aber auch diverse Pflanzenparameter erfasst werden, aus denen sich detaillierte Informationen zum Pflanzenbestand sowie (bei wiederholtem Überflug) zur Pflanzenentwicklung ableiten lassen (z. T. in Abhängigkeit von der Vegetationsphase; Kap. 2.1). Dazu gehören

- › spektraloptische Merkmale, wie z. B. Gesundheitszustand/Stressfaktoren, Phänotyp,
- › geometrische Parameter, wie z. B. Wuchshöhe, Biomasse, Bodenbedeckungsgrad, Anzahl der Pflanzen, sowie
- › temporale Eigenschaften, wie z. B. Biomasseentwicklung, Entwicklung von Stresssymptomen (Krankheiten o. Ä.), Aufnahme und Verwertung von Nährstoffen (Grenzdörffer 2017, S. 3 f.).

Hochaufgelöste Drohnenbilder können z. B. für die Beurteilung von Schäden in Beständen, die Abschätzung von Wuchshöhen oder der Vegetationsdichte sowie Pflanzenzählungen genutzt werden (Allbach/Leiner 2016). Ein weiterer Einsatzbereich, der in der Praxis bereits rudimentär angewandt wird, ist die Bestimmung der Pflanzenvitalität mittels Multispektral- oder NIR-Sensoren (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 12 ff.). Jede Pflanze strahlt – in Abhängigkeit vom Chlorophyll- und Wassergehalt, vom Grad der Nährstoffversorgung, von Stressindikatoren und weiteren Parametern – eine gewisse Spektralsignatur ab, die sich aus Wellen des sichtbaren sowie des Infrarotlichtes zusammensetzt. Zur Interpretation dieser Signatur wurden Pflanzenindizes wie der NDVI definiert, die Rückschlüsse auf den Chlorophyllgehalt sowie mittelbar die Gesundheit der Pflanzen ermöglichen (Kap. 2.1). Auf diese Weise lassen sich drohnenbasiert wertvolle Informationen zur Vitalität des Pflanzenbestands ableiten, die wiederum Hinweise auf Stressfaktoren wie Unkraut- oder Schädlingsbefall, Nährstoff- oder Wassermangel geben können (Schaumberger et al. 2015).

Da die per Drohne aufgenommenen Luftbilder georeferenziert werden können, sind sie grundsätzlich für Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft verwendbar (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 13 f.). Allerdings müssen die rohen Bilddaten dafür nicht nur mit passender Software nachbearbeitet werden, sondern es sind üblicherweise weitere Informationen erforderlich, um passende Applikationskarten für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen erstellen zu können (McKinnon 2016, S. 5 f.; Ševarlić et al. 2016). Ein Beispiel: Durch Verknüpfung von historischen Ertragskarten und Bodenuntersuchungsdaten mit Spektralbildern lässt sich exakt eruieren, wo im Feld eine Unterversorgung von Nährstoffen vorliegt. Diese Information lässt sich nun für gezielte Düngemaßnahmen nutzen, deren Erfolg mit der Drohne überwacht werden kann – durch Fotos der folgenden Aufwüchse.

Für die Erstellung flächendeckender Fernerkundungsaufnahmen in ausreichender Qualität ist Know-how für die Planung und Durchführung der Überflüge sowie für die Bearbeitung und Analyse der generierten Bilddaten erforderlich, über das Landwirte üblicherweise nicht verfügen. Aus diesem Grund haben sich Spezialisten wie die SaarDrones GbR¹¹⁵ etabliert, die professionelle Drohnenleistungen für die Landwirtschaft aus einer Hand anbieten (Erhebung inklusive Analyse und Aufarbeitung der Daten) (Bernhardt et al. 2017, S. 13). Dazu gehören beispielsweise Drohnenflüge mit Multispektral- oder RGB-Kameras, um den Wachstumszustand und eventuelle Schäden o. Ä. im Feld abbilden zu können.

Viele Einsatzmöglichkeiten sind aber noch experimenteller Art (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 14 u. 21 f.). So ist es neben der Identifikation von Wachstums- und Gesundheitsparametern prinzipiell auch möglich, bestimmte Pflanzenarten auf Luftbildern gezielt von anderen zu unterscheiden, z. B. Nutzpflanzen von Unkräutern (Castaldi et al. 2017). Hierbei sind jedoch Faktoren wie spektrale Reflexionseigenschaften sowie Textur- und Formparameter zu berücksichtigen, damit eine eindeutige Unterscheidung von beispielsweise Unkraut- und Nutzpflanzen durchgeführt werden kann (Ustyuzhanin et al. 2015). Aus diesem Grund sind Systeme in diesem Bereich noch nicht praxisreif. Die zügige, automatische Erfassung von Textur und Form einer Pflanze bzw. Pflanzenart ist Gegenstand einiger Untersuchungen (z. B. Lottes et al. 2017).

Ein weiteres Forschungsfeld ist die drohnenbasierte Erkennung der räumlichen Verteilung von Befallsituationen im Bestand (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 22). In verschiedenen durch das BMEL geförderten Projekten wurde sich dieser Thematik gewidmet. Das Verbundprojekt »Entscheidungsunterstützung im Pflanzenschutz durch Schädlingserkennung mittels UAV« (2016–2019) hatte zum Ziel, Algorithmen zur Erkennung von schadhafte Veränderungen durch Feldmäuse oder Gelbrost zu entwickeln. Die Algorithmen zur Auswertung von Drohnenbildern sollen letztendlich der landwirtschaftlichen Praxis zur Verfügung gestellt werden.¹¹⁶ Ähnliches versuchten Wissenschaftler/innen unter Leitung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB) im Projekt »Sensorgestützte Onlinedetektion von Krankheiten im Getreide – FungiDetect« (2016–2020). Durch die Kopplung verschiedener sensorgestützter Ansätze, darunter Drohnen, soll ein »praxistaugliches Verfahren« entwickelt werden, um Gelbrostnester in Winterweizen frühzeitig identifizieren zu können.¹¹⁷ Auch die Bestimmung des Wasserbedarfs eines Pflanzenbestands ist Gegenstand der Forschung. Mithilfe von Infrarotsensoren kann die Temperatur der Pflanzen erkannt werden, wodurch ein Rückschluss auf die Evapotranspiration und den Bewässerungsbedarf möglich ist (Mund 2019). Im Projekt »pETchy: Patterns of evapotranspiration changing throughout the year« (2017–2020) wurde am Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung untersucht (ZALF 2017), wie Pflanzenbestände mit unterschiedlicher Biodiversität auf Trockenstress reagieren. Dazu wurden Befliegungen mit Drohnen durchgeführt, die mit Wärme- und Multispektralkameras ausgestattet waren.

4.2.2 Wildtierortung

Die Ortung von größeren Wildtieren zur Vermeidung des Mähtodes ist die wahrscheinlich gängigste Einsatzmöglichkeit von Drohnen in der Landwirtschaft (zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 15). Da der erste Grünlandschnitt zur Herstellung von Silage in der Regel in die Brut- und Setzzeit verschiedener Wildtiere fällt, können durch die Mahd Tiere verletzt oder getötet werden. Laut einer Hochrechnung der Deutschen Wildtier Stiftung (2018) könnten in Deutschland jährlich bis zu 90.000 Rehkitze vom Mähtod bedroht sein – gesicherte Zahlen dazu liegen jedoch nicht vor. Eine rechtzeitige Ortung von im Feld befindlichen Jungtieren oder Gelegen ist nicht nur ein wichtiger Teil des aktiven Tierschutzes (Wagner 2012) und auch rechtlich verpflichtend, sondern dient zudem dem Schutz der Ernte, da Kadaver in der Silage zu Fehlgärungen und zur Bildung von Leichengift (z. B. Botulismus) führen und die Ernte kontaminieren können (Elliger 2019). Drohnen, die mit einer Echtfarb- und Wärmebildkamera bestückt sind, sind sehr gut zur Jungtierrettung einsetzbar. Gegenüber anderen Methoden, wie dem Absuchen des Feldes mit entsprechend ausgebildeten Jagdhunden, ist der Drohneneinsatz schneller und außerdem genauer (Natürlich Jagd 2018). Im BMEL-Projekt »Wildretter«¹¹⁸ (Laufzeit 2008–2011 sowie 2012–2015) wurden neuartige Technologien und Konzepte zur Wildrettung bei der Frühjahrsmahd entwickelt, darunter

¹¹⁵ www.saardrones.de/drohnen-in-der-landwirtschaft (18.8.2021)

¹¹⁶ https://service.ble.de/ptdb/index2.php?detail_id=163451&site_key=293&stichw=uav&zeilenzahl_zachler=16#newContent (18.8.2021)

¹¹⁷ www.atb-potsdam.de/de/forschung/forschungsprojekte/projektsuche/projekt/projekt/fungidetec (18.8.2021)

¹¹⁸ www.wildretter.de/home.html (18.8.2021)

auch eine drohnenbasierte Lösung (»fliegender Kitzretter«), die anschließend in ein praxisreifes Produkt überführt wurde (Mutzhas 2018).

Um die Wildtiere zu orten, wird die Grünlandfläche vor der Mahd von einer Drohne überflogen (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 15). Während des systematisch vorgeplanten Überflugs der Fläche mit der Drohne erfolgt eine direkte Übertragung der Infrarotbilder auf einen Bildschirm. Da die Erkennung aus der Luft senkrecht zum Boden läuft, können zumindest größere Tiere wie Rehkitze lokalisiert werden, ohne dass diese optisch sowie thermisch durch Gras abgeschirmt werden. Gleichzeitig ist es möglich, eine große Fläche vergleichsweise in kurzer Zeit zu erfassen. Die Kitze werden nach dem Überflug markiert und können entweder aus dem Risikobereich gebracht oder der Risikobereich kann bei der Mahd umfahren werden (Janker 2015). Schwierigkeiten entstehen häufig durch die engen Zeitfenster, da sich die Mähtermine nach der Witterung richten und hier häufig sehr kurzfristig entschieden wird, dass gemäht wird. Außerdem lassen sich Kitze durch Wärmebildkameras nur in den frühen Morgenstunden zuverlässig aufspüren, wenn die Sonne den Pflanzenbestand sowie den Boden noch nicht erwärmt hat. Aufgrund des hohen finanziellen Aufwandes für professionelles Equipment (alles in allem ca. 15.000 Euro; Böhrnsen 2017) wird die Rehkitzortung heute zumeist als Dienstleistung durch Unternehmen, Vereine¹¹⁹ oder Maschinenringe angeboten (Möbius 2016).

Neben dem Schutz junger Wildtiere ist es ebenso möglich, Drohnen zur Lokalisation von beispielsweise Wildschweinen im Bestand einzusetzen, um diese zu vergrämen oder gezielt zu bejagen (Suter 2019; dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 16). Dies kann vor allem dann von Interesse sein, wenn der Schadensdruck in landwirtschaftlichen Flächen hoch ist oder wenn Krankheiten im Wildtierbestand durch Abschuss einzelner Tiere bekämpft werden müssen. Durch den Einsatz von Drohnen mit handelsüblichen Kameras können einzelne Tiere bzw. Tiergruppen bejagt werden, ohne andere Tiere durch Treiben aufzuschrecken. Durch Mapping einzelner Flächen sind ebenso eine sehr genaue Schätzung und Kartierung von Wildtier- oder Unwetterschäden möglich (Scharffetter 2018). Dies ist wichtig, um im Versicherungsfall einen gegebenen Schaden zeitnah erfassen und ausgleichen zu können.

4.2.3 Bekämpfung von Schädlingen und Unkräutern

Neben der Wildtierortung ist auch die biologische Schädlingsbekämpfung ein in der landwirtschaftlichen Praxis bereits etabliertes Einsatzfeld von Drohnen (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 16). Im Fokus steht dabei die Bekämpfung des Maiszünslers. Dieser richtet vor allem in Maisbeständen mit einer großen Wuchshöhe Schaden an, bei denen eine Überfahrt mit dem Traktor kaum mehr durchführbar ist. Firmen wie die FarmFacts GmbH¹²⁰ oder Tree Kopter – Smart Farming¹²¹ bieten die Ausbringung von Schlupfwespen mittels Multikoptern an. Hierbei werden die in einem Behälter am Multikopter befindlichen Kapseln mit Schlupfwespenlarven, kurz bevor der Maiszünsler seine Eier ablegt, in gleichmäßigen Abständen in die betroffenen Maisfelder gestreut (Lutz 2017). Als natürlicher Feind des Maiszünslers hilft die Schlupfwespe, den Schädlingsbestand zu regulieren. Die Methode eignet sich gleichermaßen für konventionell sowie ökologisch wirtschaftende Betriebe. Gleichzeitig bieten erste Anbieter wie AGRAiR der Remote Vision GmbH¹²² das Ausbringen von Schneckenkorn zur Bekämpfung von Schnecken an.

Unbemannte Flugobjekte sind ebenso in der Lage, Pflanzenschutzmittel punktgenau und dosiert in einem Bestand zu verteilen (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 16). Dies wird beispielsweise mittels ferngesteuerter Helikoptermodelle bereits seit Anfang der 2000er Jahre in Japan erprobt und angewandt (Lewis 1998). Von Interesse ist der Einsatz von Spritzdrohnen vor allem in Steillagen in Berggebieten und im Weinbau (Simpson 2016), da hier Traktoren oft nur schwer einsetzbar sind. Gegenüber Helikoptern haben Drohnen den Vorteil, dass eine zielgenauere Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln möglich ist und die Abdrift verringert werden kann (Becker/Steinmetz 2018). In der Schweiz wurde kürzlich das Versprühen von Pflanzenschutzmitteln per Drohne bewilligt und wird bereits von Firmen wie AGRAiR angeboten. In Deutschland hingegen ist die Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Fluggeräten gemäß Pflanzenschutzgesetz grundsätzlich untersagt und

¹¹⁹ www.rehrettung-hegau-bodensee.de/ (18.8.2021); www.wildtierhilfe-mv.de/luftrettung/ (18.8.2021)

¹²⁰ www.nextfarming.de/produkte/next-farming-service/next-drohnen-service/ (18.8.2021)

¹²¹ www.luftbilder-thueringen.net (18.8.2021)

¹²² www.agrain.ch/ (18.8.2021)

wird nur ausnahmsweise genehmigt (Kasten 4.1). Bislang wurden in Deutschland keine Drohnen für diesen Zweck zugelassen, da noch viele technische Fragen offen sind (u. a. Abdriftproblematik, Flächenleistung, Applikationsqualität; Becker/Steinmetz 2018). Derzeit laufen in Deutschland verschiedene Projekte (u. a. gefördert von der Bundesregierung, dem Bundesland Baden-Württemberg und der EU), die sich diesen Fragen widmen (Becker/Steinmetz 2018; Bundesregierung 2019).

Eine Voraussetzung für die drohnenbasierte Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln sind leistungsfähige Multikopter, die über eine ausreichende Tragekapazität und Einsatzdauer verfügen. Drohnen, die mit 10-l-Tanks ausgestattet sind, sind bereits am Markt erhältlich, z. B. die Agras MG-1P Serie¹²³. Ein besonders leistungstarkes, speziell für den Einsatz in der Landwirtschaft konzipiertes Modell wurde in den USA entwickelt. Der »Agronator«¹²⁴ wiegt bis zu 110 kg, kann bis zu 35 kg zusätzlicher Nutzlasten befördern und je nach Schwere der Last bis zu 40 Minuten in der Luft eingesetzt werden. Die Drohne kann mit geeignetem Equipment u. a. für die Verteilung von Schneckenkorn oder mineralischen Düngern genutzt werden (Schweizer Landtechnik 2018). Einsatzbereiche in der Tierhaltung

4.3 Einsatzbereiche in der Tierhaltung

In der Tierhaltung sind Drohnenanwendungen deutlich weniger weit entwickelt als im Pflanzenbau (mit Ausnahme der Kartierung und Vermessung von Flächen und Anlagen). Da die Einsatzmöglichkeiten von Drohnen vor allem im Außenbereich gegeben und in der Stallwirtschaft seit Jahren stationäre Überwachungssysteme etabliert sind, ist der Drohneneinsatz primär dann von Interesse, wenn sich Tiere zum Weiden außerhalb von Ställen aufhalten (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 20). Hier sind stationäre Überwachungssysteme unter Umständen unhandlich oder teuer und eine Überwachung der Tiere kann, bei entsprechenden Betriebsgrößen, zudem äußerst zeitaufwendig sein. Drohnen könnten perspektivisch eine Alternative sein, wenngleich die begrenzte Flugzeit für diesen Anwendungszweck noch ein größeres Hindernis darstellt. Die Überprüfung von Zauneinrichtungen entlang von Weiden ist mit Drohnen jedoch bereits möglich und zeitsparend und wird laut Martin Richenhagen, Präsident des Landmaschinenherstellers AGCO, im südamerikanischen Raum bereits angewandt (Grefe 2016). In Deutschland könnte diese Einsatzmöglichkeit beispielsweise in den Alpenregionen perspektivisch von größerer Bedeutung sein, wird jedoch noch nicht verbreitet praktiziert. Einsatzmöglichkeiten und Forschungsfelder für die Tierhaltung sind in der Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Generell ist festzustellen, dass Drohnen in der Nutztierhaltung derzeit in Deutschland und Europa kaum Verwendung finden (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 26 f.). Auffällig ist zudem, dass sich auch die Forschung im europäischen Raum hauptsächlich auf den Pflanzenbau konzentriert, weltweit hingegen durchaus die Tierhaltung im Fokus steht. Dies kann auf die Struktur der europäischen Landwirtschaft zurückgeführt werden. Während hierzulande die Weidehaltung eher kleinräumig strukturiert ist, werden in anderen Teilen der Welt, insbesondere auf dem amerikanischen Kontinent, Tiere auf teilweise großen Flächen gehalten. Hier kann es aufwendig und teuer sein, eine Überwachung vom Boden aus zu organisieren, weshalb günstige Alternativen zur Tierüberwachung (z. B. via Drohnen) von größerem Interesse sind.

Untersucht wird etwa die Möglichkeit, mittels Drohnen Gesundheitsparameter von Tieren zu überwachen (z. B. Äsungsverhalten, Bewegungsmuster, Körpertemperatur; dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 26). Webb et al. (2017) beispielsweise implementierten Weidevieh hierfür eine RFID-Ohrmarke, welche die Temperatur eines Tieres erfassen und senden konnte. Ein RFID-Repeater, angebracht an einer Drohne, konnte in ca. 45 m Flughöhe diese Signale auslesen und an einen Prozessrechner versenden. Laut Webb et al. (2017) konnten sich die Tiere binnen einer Woche an die Geräusche der Drohne gewöhnen und wurden somit nicht durch deren Einsatz beeinflusst.

¹²³ www.dji.com/de/mg-1p (18.8.2021)

¹²⁴ <http://agronator.de/> (18.8.2021)

Tab. 4.2 Einsatz- und Forschungsfelder von Drohnen in der Tierhaltung

Einsatzgebiet	Multikopter	Starrflügler	Anwendung	Forschung
Überprüfen von Zauneinrichtungen	✓ besser für Detail	✓ besser für lange Strecke	✓	✓
Äsungsverhalten nachvollziehen	✓	✓		✓
gerichtete Steuerung der Tiere	✓			✓
Überprüfung grundlegender Gesundheitsparameter	✓			✓
Einzeltiererkennung	✓			✓
Erreichen auch von schwer zugänglichen Arealen, wie Almweiden	✓			✓
Prüfen der Körpertemperatur	✓			✓
Zählen aufgrund der Wärmestrahlung	✓			✓

Quelle: Bernhardt et al. 2017, S. 27

Die Möglichkeit, Tiere anhand ihrer (Wärme-)Strahlung zu zählen, ist ebenfalls Gegenstand der Forschung (Harsany 2017). Dahingegen führte eine drohnenbasierte Kameraerkennung von Tieren durch die Ohrmarken (Erkennung der amtlichen Kennzeichnung) bisweilen zu keinen akzeptablen Ergebnissen (Solecki/Church 2016). Nur Nummern, welche sich auf dem Rücken befinden, konnten zuverlässig auch aus größeren Höhen identifiziert und zur Unterscheidung von Tieren genutzt werden.

In aktuellen Forschungen wird zudem die Möglichkeit beschrieben, Weidetiere künftig mit Drohnen gerichtet steuern zu können, beispielsweise indem die Laute eines Fressfeindes der Tiere abgespielt werden (Jung/Ariyur 2017). Wäre dies vollständig autonom durchführbar, könnten teure Helikopterflüge vermieden und Einsätze in unwegsamem Gelände erleichtert werden.

4.4 Perspektiven

Mit Agrardrohnen bieten sich der Landwirtschaft neue technische Möglichkeiten, die zuvor nicht oder nur sehr umständlich gegeben waren (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 49 f.). Eine Drohne kann zum einen als Sensorträger, zum anderen zum Transport von Betriebsmitteln genutzt werden. Mit dem unbemannten Flug in relativer Bodennähe eröffnet sich hierbei eine neue Einsatzebene, die in dieser Form bisher nicht vorhanden war. Als Beispiele für erste Anwendungen können die Rehkitzrettung im Grünland oder die Ausbringung von Schlupfwespenlarven im Maisbestand angeführt werden. Für die Rehkitzrettung beispielsweise ist grundsätzlich bereits eine RGB-Kamera ausreichend. Für den Abwurf von Schlupfwespenlarven ist zwar eine Drohne mit höherer Tragkraft erforderlich, doch keine teuren Sensorsysteme o. Ä.

Die Adaption der Fluggeräte an landwirtschaftliche Einsatzzwecke wird bisher meist von spezialisierten Unternehmen oder einzelnen Forschergruppen vorgenommen (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 50 u. 54 ff.). Beispiele sind hierfür der Einsatz als Trägergerät von (Multispektral-)Kameras oder Applikationsgeräten

zur Nutzung in der Präzisionslandwirtschaft. Andere in der Wissenschaft beforschten Gebiete sind nahezu praxisreif – Bestandshöhenerfassungen beispielsweise werden bereits in der wissenschaftlichen Analyse eingesetzt, der Schritt zur Praxis ist ohne Weiteres möglich. Eine erhebliche praktische Hürde stellt jedoch der Umstand dar, dass für viele landwirtschaftliche Anwendungsbereiche der Einsatz einer komplexen und kostspieligen Bildbearbeitungs- und -analysesoftware notwendig ist.¹²⁵ Viele landwirtschaftliche Drohnendienstleistungen werden deshalb von spezialisierten Firmen angeboten, die über das entsprechende Know-how verfügen und die beträchtlichen Anschaffungskosten für Software und Geräte durch eine ausreichende Auslastung abdecken können. Es braucht günstige Lösungen, die auch Laien adäquat bedienen können – ansonsten könnte dies den Einsatz von Drohnen im Agrarbereich stark ausbremsen.

Ein weiteres Anwendungsproblem ist darin zu sehen, dass bei nahezu allen Einsatzgebieten in der Landwirtschaft der Echtzeitbetrieb noch nicht möglich ist (Wild/Schmiedel 2017; dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 21). Während eines Drohnenfluges werden große Mengen an Bilddaten erhoben, die in der Regel erst nach der Landung prozessiert und ausgewertet werden können und somit dem Landwirt erst zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Dies beschränkt insbesondere die Einsatzmöglichkeiten im Bereich der sensorbasierten Präzisionslandwirtschaft. Wünschenswert wäre, dass die ermittelten Daten der Drohne in Echtzeit via Funk an das Arbeitsgerät am Boden geleitet und dort für Prozessentscheidungen herangezogen werden können; etwa, um beispielsweise die teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln oder Dünger mit Traktor und Anbaugerät per Drohne automatisiert aus der Luft zu überwachen.

Ein derartiges Anwendungsszenario wird derzeit auch durch die Probleme bei der Energieversorgung beschränkt (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 54). Die aktuell verwendete Technik über wiederaufladbare Batterien begrenzt die mögliche Flugzeit und das Tragvermögen stark; der Dauerbetrieb im Feld scheidet somit aus. Es gibt zwar einige Ansätze, dies zu umgehen (z. B. den kabelgebundenen Betrieb; Gieselmann 2017), was aber zu Einschränkungen der Nutzbarkeit führt. Ein interessanter Lösungsvorschlag ist eine Landestation mit automatisiertem Akkuwechselsystem, die beispielsweise auf einem Traktordach montiert werden könnte (Wild/Schmiedel 2017) – erste Prototypen derartiger Akkuwechselstationen, die auch als Funkstation fungieren, wurden bereits vorgestellt (Sokolov 2016).

Das breite wirtschaftliche Interesse und das potenziell große Marktvolumen führen dazu, dass die Entwicklung der Drohnentechnologie in der Privatwirtschaft stark vorangetrieben wird (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 3 u. 53). Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei dem »Wingcopter«¹²⁶, einer Kombination aus Starrflügler und Multikopter (Niemeyer 2014, S. 30). Wingcopter können durch Drehen der Rotoren und Flügel zwischen Senkrecht- und Gleitflug wechseln. Vornehmlich wurden Wingcopter für Lieferdienste konzipiert und werden auch entsprechend eingesetzt (Heunemann 2019). Solche hybriden Konstruktionen vereinen die »Vorteile schwebefähiger Flugplattformen mit den energieeffizienten Streckenflugeigenschaften von Starrflüglern« und sind deshalb auch in der Landwirtschaft sehr gut als »fliegendes Monitor- und Analysesystem« nutzbar (Eschmann/Ostermann 2017, S. 17 u. 26). Im Bereich der Drohnentechnologie wird zudem an einer verlängerten Akkulaufzeit, besseren Flugeigenschaften, Kollisionsvermeidungssystemen und autonomen Flugprogrammen gearbeitet. Insgesamt ist ein ausgeprägter Trend hin zu einem hohen Automatisierungsgrad bei gleichzeitiger einfacher Anwendbarkeit festzustellen, was auch die Einstiegshürden für den landwirtschaftlichen Einsatz senken dürfte.

Einer weiten Verbreitung der Drohnennutzung in der Landwirtschaft dürften allerdings die relativ hohen rechtlichen Hürden entgegenstehen (Kasten 4.1; dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. 33 f.). Der Betrieb von unbemannten Flugobjekten unterliegt relativ weitreichenden Einschränkungen bzw. Auflagen. In einem dicht besiedelten Land wie Deutschland liegen viele landwirtschaftliche Flächen in der Nähe von Straßen, Wohnsiedlungen oder Umweltschutzflächen. Hier müssen im Vorfeld Flugverbotszonen sorgfältig geprüft werden, die über die reinen Sperrzonen an und um Flughäfen o. Ä. hinausgehen. Dies hat einen organisatorischen sowie technischen Aufwand zur Folge, der den Anwendern unter Umständen viel Geduld, Geld und Anstrengung abnötigt.

¹²⁵ Als Beispiele können hier die Softwareprogramme »Pix4D« (<https://www.pix4d.com/>; 18.8.2021) oder »Agisoft Metashape« (<https://www.agisoft.com/>; 18.8.2021) genannt werden. Jahreslizenzen für derartige Software kosten teilweise mehrere Tausend Euro.

¹²⁶ <https://wingcopter.com/> (18.8.2021)

5 Roboter

Unter einem Roboter »wird eine maschinell betriebene Anlage verstanden, die über ein bestimmtes Maß an Autonomie verfügt, innerhalb einer bestimmten Umgebung physisch agiert und bestimmte Aufgaben durchführt« (EFI 2016, S. 52). Roboter verrichten in der Landwirtschaft mittlerweile komplexe Aufgaben selbstständig; eingesetzt werden sie bislang vor allem in der Tierhaltung und hier insbesondere der Innenwirtschaft.¹²⁷ Speziell AMS weisen eine hohe Marktdurchdringung auf. Dahingegen befinden sich Robotiksysteme für landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen im Pflanzenbau (Agrarrobotik) noch weitestgehend in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Von der konventionellen Landmaschinentechnik lässt sich die Agrarrobotik dadurch abgrenzen, dass sie typischerweise auf kleine, fahrerlose und autonom operierende Maschinen abzielt (Hertzberg 2018, S. 46).

Wichtige Treiber für die Entwicklung der Robotik in der Landwirtschaft sind technologischer Art: die Verfügbarkeit satellitengestützter Navigationssysteme, die Möglichkeit einer präzisen, elektrischen Steuerung von Geräten und Werkzeugen, eine zunehmende Miniaturisierung der Sensorik und Steuerungselektronik sowie Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz (z. B. maschinelles Lernen) (Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 9 f.). Aber auch veränderte Rahmenbedingungen der Landwirtschaft aufgrund steigender Lohnkosten, ein Mangel an qualifizierten Arbeitskräften sowie immer größere Produktionseinheiten tragen zur robotischen Automatisierung der Agrarproduktion bei.

Die folgenden Ausführungen behandeln, basierend auf dem Gutachten von Herlitzius und Fehrmann (2017), zunächst Robotiklösungen in der Tierhaltung (Kap. 5.1) und dabei vor allem die Hauptanwendungsbereiche in der Innenwirtschaft. Daran anschließend werden Roboter im Pflanzenbau (Kap. 5.2) vorgestellt. Abschließend werden in Kapitel 5.3 künftige Entwicklungstrends und Perspektiven der Robotik in der landwirtschaftlichen Nutzung diskutiert.

5.1 Roboter in der Tierhaltung

Roboter für die Tierhaltung sind für unterschiedliche Anwendungszwecke auf dem Markt. Der Fokus liegt auf Robotiklösungen für die Innenwirtschaft bzw. den Stallbetrieb. Die gebräuchlichsten Robotertechnologien sind AMS und automatische Fütterungssysteme sowie Reinigungsroboter. Diese werden in der Folge näher beschrieben. Robotiklösungen für die Außenwirtschaft (z. B. Weideroboter) befinden sich in der Forschungs- und Entwicklungsphase und werden ebenfalls kurz erläutert.

5.1.1 AMS bzw. Melkroboter

Unter AMS wird ein automatisiertes System zum Melken von Kühen verstanden. Es handelt sich um eine am Markt etablierte Technologie, die sich mittlerweile in der dritten oder vierten technischen Entwicklungsstufe befindet (Harms 2017, S. 7). Laut KTBL (2018, S. 333) sind in Deutschland 50 bis 70 % aller neu installierten Melkanlagen AMS.

Wesentlicher Bestandteil von AMS ist die Melkbox, in der die Tiere mit einem Ansatzarm gemolken werden (dazu und zum Folgenden Doluschitz/Gindele 2019, S. 60 f.). Um die Kühe in die Melkbox zu locken, kommen tierindividuell angepasste Futterrationen – bestehend aus für Kühe attraktivem Kraftfutter – zum Einsatz. In der Melkbox wird das Tier über einen Transponder (meist als Ohrmarke) erkannt und entsprechende Futterrationen

¹²⁷ Die IFR (2017) schätzt, dass 2015 weltweit mehr als 6.440 Servicroboter im Agrarbereich verkauft wurden. Hierbei im Wesentlichen 5.665 Melkroboter und weitere 160 Stallroboter (Fütterung, Reinigung) (nach Hertzberg et al. 2017, S. 13).

werden, wenn eine Melkberechtigung besteht, zugeteilt.¹²⁸ Indes identifiziert der Ansetzarm mithilfe von Ultraschall, Laser oder optischer Sensoren das Kuheuter und führt den Melkprozess automatisiert durch. Hierzu gehören das Reinigen der Zitzen, das Ansetzen des Melkgeschirrs sowie das Melken (dazu und zum Folgenden Doluschitz/Gindele 2019, S. 61; Harms/Wendl 2012, S. 70). Beim eigentlichen Melkprozess wird eine automatische Qualitäts- und Mengenkontrolle der Milch durchgeführt (u. a. Bestimmung der Leitfähigkeit, Identifizierung von bluthaltiger Milch und Milchmenge). Ist das Melkgeschirr entfernt, erfolgt die hygienische Behandlung des Euters und der Zitzen durch den Roboter. Zudem analysiert eine Software Daten zu tierindividuellen Eigenschaften (z. B. Zwischenmelkzeiten und Milchleistung der einzelnen Kuh). Die neue Generation von Melkrobotern (z. B. »RDS Futureline Elite«¹²⁹ oder »TIM AktivPuls® Robo«¹³⁰) integriert diese Daten in Herdenmanagementprogramme, wobei neben der Überwachung der Milchleistung sowie -qualität auch Aspekte der Tiergesundheit (Eutergesundheit, Fruchtbarkeit o. Ä.) dokumentiert werden.

Mittlerweile gibt es eine breite Auswahl an AMS (Bernhardt 2019, S. 183), beispielsweise »Astronaut A5«¹³¹, »DairyRobot R9500«¹³², »MidiLine™«¹³³, FULLWOOD-Rotary-Melkstände¹³⁴ oder »VE®-Melksystem S90«¹³⁵. Wurden zunächst Einboxen- und in der Folge Mehrboxenanlagen entwickelt, werden heute auch vollautomatisierte Melkkarusselle von Herstellern angeboten (Harms 2017, S. 7). Die Systeme unterscheiden sich wie folgt (Abb. 5.1):

Einboxenanlagen sind kompakte, autonom funktionierende Anlagen, die im Prinzip frei im Stall aufgestellt werden können. Jede Einboxenanlage besteht aus einem Melkroboter inklusive Ansetzarm und Melkwerkzeug (Unrath 2004, S. 20); über eine Milchdruckleitung ist die Melkanlage mit den Anlagen zur Milchlagerung verbunden (agrarheute 2015). Die Auslastung einer Melkbox liegt in der Praxis bei ca. 60 Kühen (Hunecke/Brümmer 2018, S. 3). Grundlagen für die Nutzung von Einboxenanlagen sind der Laufstall und das freie Melken, d. h. die Kuh geht eigenständig zum Melken in die Melkbox.

Mehrboxenanlagen setzen sich aus zwei bis vier hintereinander oder parallel liegenden Melkboxen zusammen. Dabei werden alle Boxen nur durch einen Ansetzarm bedient, der z. B. per Schwenkarm an der hochverlegten Melkleitung befestigt ist und nach erfolgter Melkung des einen Tieres zur nächsten Box schwenkt (Swing-over-Melkstände). Um die Auslastung der Boxen zu gewährleisten, verfügen Mehrboxenanlagen zumeist über Vor- und Nachselektionseinrichtungen¹³⁶ (Harms 2005, S. 19). Je nach Größe werden Mehrboxenanlagen in den Stall integriert oder sie machen ein separates Melkhaus¹³⁷ erforderlich (Harsch o. J.; Unrath 2004, S. 20). Je nach Boxenanzahl sind sie für mittlere Herdengrößen (zwischen 80 und 170 Kühen) geeignet (Unrath 2004, S. 20).

Automatische Melkkarusselle bestehen aus einer rotierenden Plattform mit ca. 20 bis 40 Plätzen (je nach Hersteller), an welchen Melkroboter installiert sind. Während des Drehvorgangs werden bei vollautomatisierten Melkkarussellen die einzelnen Arbeitsschritte des Melkprozesses durchgeführt. Hat sich die Plattform um eine Dreivierteldrehung bewegt, kann das Tier das Karussell wieder verlassen und ein neues Tier in den freien Karussellplatz getrieben werden. Im Gegensatz zu Ein- und Mehrboxenanlagen, bei denen die Tiere die freie Wahl des Zeitpunkts der Melkung haben, werden bei automatischen Melkkarussellen die Kühe in die Boxen des Karussells getrieben (Geidel 2016, S. 2). Die Melkung erfolgt zu festen Zeiten, um eine Auslastung des Karussells zu gewährleisten. Generell eignen sich AMS eher für große Herden (über 180 Tiere) (Geidel 2016, S. 24); je nach Größe der Anlage ist ein Melkhaus erforderlich.

¹²⁸ Besteht keine Melkberechtigung, wird das Tier mittels Selektionstoren daran gehindert, den Melkbereich zu betreten. Melkberechtigungen werden entweder automatisch generiert (z. B. abhängig davon, ob das Tier kurz zuvor bereits gemolken wurde) oder manuell zugewiesen (z. B. bei Tieren, die erst noch an das System gewöhnt werden müssen) (Harms o. J.).

¹²⁹ <https://de.sacmilking.com/loesungen/robot-dairy-solution-kuh> (18.8.2021)

¹³⁰ www.system-happel.de/de/index.php?pg=aktivpuls-robot2020.php (18.8.2021)

¹³¹ www.lely.com/de/loesungen/melken/astronaut-a5/ (18.8.2021)

¹³² www.gea.com/de/productgroups/milking-systems/index.jsp (18.8.2021)

¹³³ www.delaval.com/de/unsere-loesungen/melken/melkstandssysteme/ (18.8.2021)

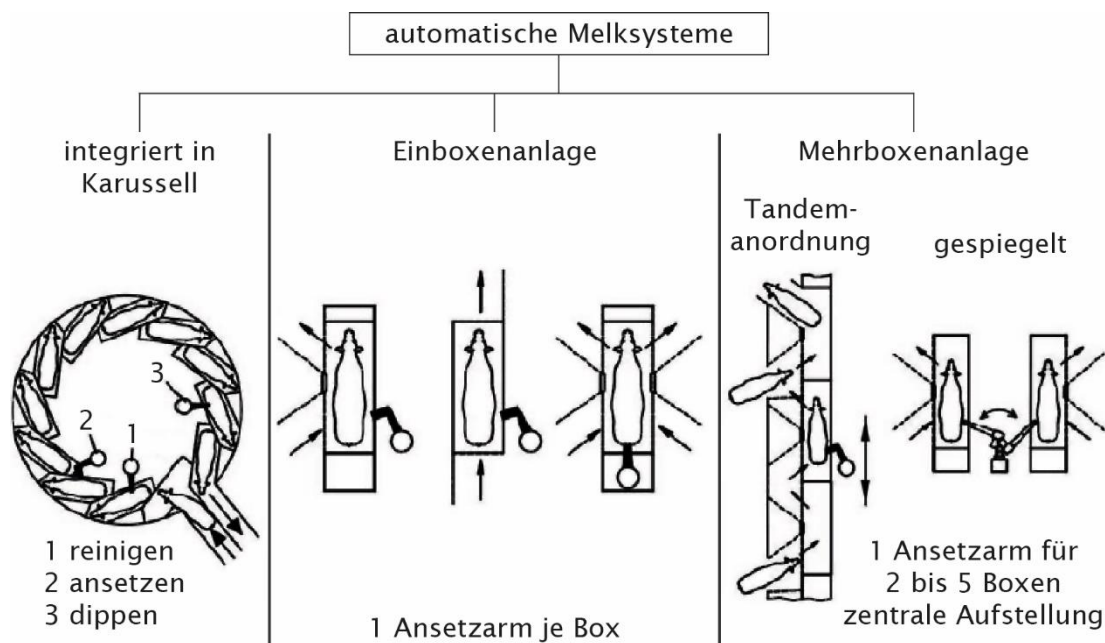
¹³⁴ www.lemmer-fullwood.info/technik/melktechnik/melkstandanlagen/ (18.8.2021)

¹³⁵ www.system-happel.de/de/index.php?pg=melktechnik.php (18.8.2021)

¹³⁶ Unter Vor- und Nachselektionseinrichtungen werden entsprechend abgesperrte (Warte-)Bereiche verstanden, die den Melkboxen vor oder nachgelagert werden. Sie dienen der Lenkung der Tiere im Stall und sollen ein Gedränge der Tiere vor den Melkboxen verhindern bzw. Tiere direkt in den Fress- oder in den Liegebereich leiten.

¹³⁷ Ein Melkhaus ist ein separater Anbau, welcher mit dem Stallgebäude verbunden ist und in dem sowohl die Melkstände als auch die Melkkammer untergebracht sind.

Abb. 5.1 Bauformen automatischer Melksysteme



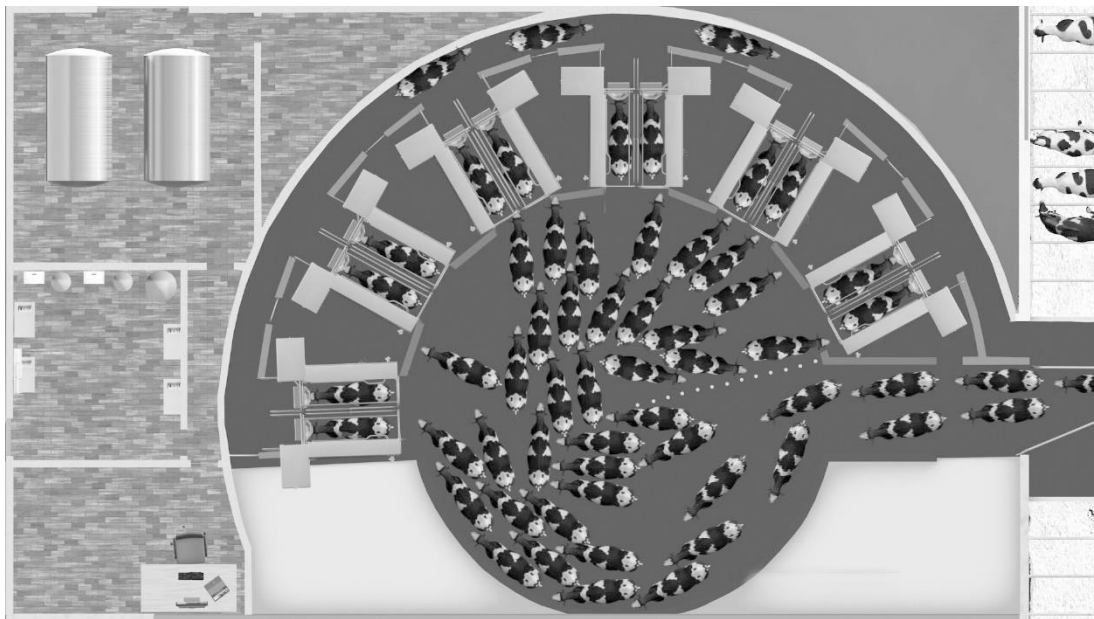
Quelle: nach Harms/Wendl 2012, S 68

Eine Weiterentwicklung von Melkkarussellen stellen *Batch-Milking-Systeme* dar, die für größere Herden geeignet sind. Das in einer brandenburgischen Milchviehanlage installierte System »M²erlin BatchMilking 4.0«¹³⁸ besteht aus 12 Melkrobotern, die in einem Melkhaus halbkreisförmig um einen Vorwartebereich angeordnet sind (Abb. 5.2). In diesem können sich bis zu 100 Tiere aufhalten und zu festgesetzten Zeiten völlig autonom gemolken werden (bis zu 90 Tiere pro Stunde) (Lemmer 2018). Im Gegensatz zu automatischen Melkkarussellen, bei denen die Kühe in die Melkboxen getrieben werden, erfolgt bei Batch-Milking-Systemen der Zutritt der Kuh in die Melkbox selbstständig (Bernhardt 2019).

Für den wirtschaftlichen Einsatz erfordern AMS eine bestimmte Größe des Milchviehbestands (TAB 2021, Kap. 4.2.1). Vorteile von AMS auf Arbeitsebene sind Zeitersparnisse gegenüber konventionellen Melkanlagen (Hartmann/Achilles 2018, S. 333), außerdem eine Reduktion körperlicher Belastung und flexiblere Arbeitszeiten. Gleichzeitig sind aber auch die Arbeitszeiten schlechter planbar, da in der Regel (zumindest bei den weitverbreiteten Ein- und Mehrboxenanlagen) eine 24-Stunden-Rufbereitschaft erforderlich ist, um bei technischen Störungen schnell eingreifen zu können (Harms 2017, S. 7). Seit Einführung von AMS wird kontrovers diskutiert, inwiefern deren Nutzung die Milchqualität, Eutergesundheit und Milchleistung beeinflusst.

¹³⁸ <https://www.lemmer-fullwood.info/loesungen/melksysteme/batch-milking/> (18.8.2019)

Abb.5.2 Batch-Milking-System



Quelle: Lemmer-Fullwood GmbH

Positiv auf die Eutergesundheit wirkt sich das viertelbezogene Melken des Euters aus, da in Abhängigkeit vom Milchfluss die Melkbecher des Melkwerkzeuges abgenommen und ein für die Eutergesundheit negativ wirkendes Blindmelken (maschinelles Melken ohne Milchfluss) vermieden wird (dazu und zum Folgenden Harms/Wendl 2012, S. 70). In Bezug auf die Milchqualität wurden nach Einführung von AMS teilweise erhöhte Zell- und Keimzahlen in der Milch beobachtet, die aber zumeist die gültigen Obergrenzen der Keimbelastung für Milch nicht übersteigen und sich im Lauf der Nutzung wieder absenken (Landwirtschaftskammer Oberösterreich 2012, S. 9; LVLf 2006, S. 16). Grund dafür scheint zu sein, dass AMS anfangs häufig an der technischen Auslastungsgrenze betrieben werden ohne ein entsprechend angepasstes Qualitäts- und Hygienemanagement (Natrop et al. 2009).

Bei AMS erhöht sich in der Regel die Melkfrequenz auf etwa 2,5 Melkungen je Kuh und Tag (wobei die individuelle Varianz hoch sein kann) gegenüber den standardmäßig 2 Melkungen bei konventionellen Melkanlagen (Bach/Cabrera 2017; Trilk et al. 2005). Die Auslastung eines AMS während der 24 Stunden eines Tages ist in komplexer Weise von den Faktoren Fütterung, Tierverhalten und Herdenmanagement abhängig (John et al. 2016; Oberschätzl-Kopp 2017, S. 40). Mit der Einführung eines AMS stellt ein Teil der Betriebe auf ganzjährige Stallhaltung um, um eine hohe Auslastung des AMS zu gewährleisten, während andere Betriebe den Weidegang in Abhängigkeit von den betrieblichen Bedingungen und der Einstellung des Landwirts beibehalten (Schewe/Stuart 2015).

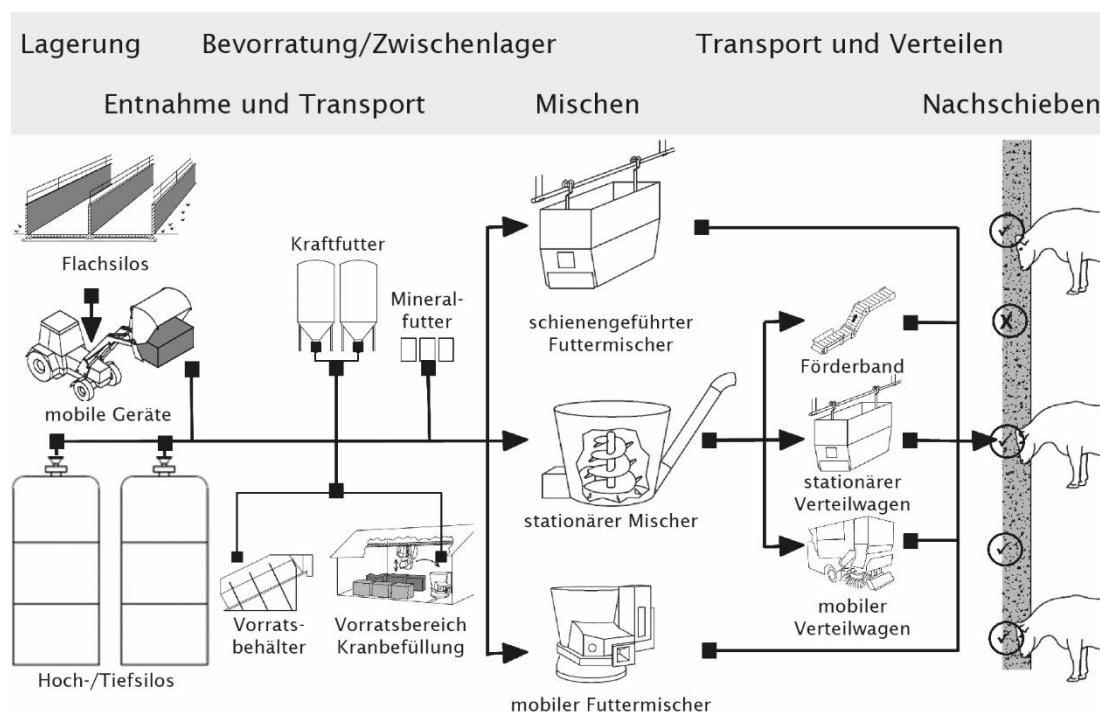
Bei der weiteren Entwicklung von AMS stehen tierbezogene Aspekte im Mittelpunkt des Forschungsinteresses, z. B. die Verbesserung des Herdenmanagements (Tierumtriebsformen bzw. Regelung des Zutritts der Tiere zu den Melkboxen) (Oberschätzl-Kopp 2017) sowie die Entwicklung der Sensorik zur Erfassung weiterer tierbezogener Gesundheitsparameter (Geidel 2016; Harms/Wendl 2012, S. 73; LVLf 2006, S. 8). Ein zwar nicht direkt technikbezogenes, aber für die Weiterentwicklung von AMS hochrelevantes Forschungsfeld ist herdenspezifisches und tierindividuelles Verhalten von Milchvieh in der Stallhaltung (EFSA 2008, S. 124). Schließlich werden in den landwirtschaftlichen Betrieben neben AMS zunehmend automatische Fütterungs- oder Reinigungssysteme eingeführt (Harms/Wendl 2012, S. 73), insbesondere wenn die Umstellung auf AMS mit einer Vergrößerung des Milchviehbestands oder einem Stallneubau verbunden ist.

5.1.2 Automatische Fütterungssysteme

Automatische Fütterungssysteme dienen der Automatisierung des Fütterungsprozesses in der Tierhaltung. In der intensiven Schweine- und Geflügelhaltung sind sie weitverbreitet, während die Nutzung in der deutschen Milchvieh- und Rinderhaltung noch eher gering ist, wenngleich Umfragen auf eine wachsende Beliebtheit hindeuten (Oberschätzl-Kopp 2017, S. 17). Automatische Fütterungssysteme reduzieren den für die Fütterung erforderlichen Arbeitszeitaufwand und ermöglichen multiple Fütterungszeiten (Reger et al. 2018b). Es sind in der Regel erhebliche Investitionen erforderlich, da es sich um komplexe Anlagen handelt, die aus einem Futtervorratsbereich, Silos für Kraftfutter und Mineralien, Anpassungen in den Stallanlagen und einer Misch- und Fütterungseinrichtung bestehen. Mit automatisierten Fütterungssystemen erfolgt die Fütterung einer Tiergruppe mehrmals am Tag mit der gleichen Ration (vs. einer einzeltierbezogenen Fütterung) (Oberschätzl-Kopp 2017, S. 19). Grundsätzlich lassen sich *drei Automatisierungsstufen* unterscheiden (dazu und zum Folgenden Haidn/Leicher 2017, S.47; Oberschätzl-Kopp 2017, S. 18 f.; Abb. 5.3):

- › *Stufe I:* Hier ist ausschließlich der Prozess des Vorlegens des Futters Teil der Automatisierung. Nicht dazu gehören die Entnahme des Futters aus Silos, der Transport zu einem stationären Futtermischer sowie die tiergruppenspezifische Mischung von Kraft- und Mineralfutter.
- › *Stufe II:* Die Automatisierung erstreckt sich hier auf die Prozesse des Mischens des Futters sowie das Vorlegen, nicht jedoch auf den Transport des Futters vom Silo zum Fütterungssystem.
- › *Stufe III:* Auf dieser Stufe laufen alle Fütterungsprozesse – vom Silo bis zum Trog der Tiere – vollautomatisch ab.

Abb.5.3 Prozesskette zur Realisierung verschiedener Automatisierungsstufen der Fütterung von Rindern



Quelle: DLG 2014c, S. 6

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von automatischen Fütterungssystemen – gebundene, *stationäre Systeme* und frei navigierende *mobile Systeme* (Abb. 5.3). Stationäre Systeme erledigen das Mischen des Futters (bestehend aus Grund- und Kraftfutter) sowie den Transport und das Verteilen des Futters über schienengeführte Transportwagen oder -bänder (Bernhardt 2019, S. 185). Unter mobilen Systemen werden autonom fahrende Futtermischwagen oder autonom fahrende Futtermischwagen verstanden, die neben der Futtermischung auch die Verteilung des Futters übernehmen (Oberschätzl-Kopp 2017, S. 19 f.).

Zu den einfachsten und günstigsten Systemen (Automatisierungsstufe I) gehören automatische Futterschieber. Sie werden in der Rinderhaltung genutzt und dienen der automatisierten Futtervorlage für die Tiere (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 13). Beim automatischen Futterschieber können verschiedene Routen und Zeiten einprogrammiert werden, an denen das Gerät den Stall abfährt und Futter vorlegt. Autonom fahrende Futterschieber sind u. a. »Butler Gold Pro«¹³⁹, »Juno«¹⁴⁰ oder »FRone«¹⁴¹. Sie verfügen über spezifische Sensorik wie einen Kreisel zum Bestimmen der Fahrzeuglage, einen Ultraschallsensor zur Abstandsbestimmung, eine induktive Sensorik, Radsensoren zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der Wegstrecke sowie einen Kollisionsdetektor aus Sicherheitsgründen (Abb. 5.4).

Abb. 5.4 Automatischer Futterschieber



Quelle: GEA Group AG

Komplexere Fütterungssysteme ermöglichen eine weitgehend automatisierte Futtervorlage mit Grund- und Kraftfutter. Die mobilen Systeme sind der Automatisierungsstufe II zuzuordnen. Verschiedene Hersteller bieten derartige Systeme mittlerweile an (agrarheute 2014; dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 12 f.). Die Systeme »Vector«¹⁴² und »MULTIFEEDER –V4.1«¹⁴³ zeichnen sich durch einen mobilen Futtermischwagen aus, der mittels im Boden eingelassener Metallstreifen oder Induktionsschleifen selbstständig zu den Fressgittern navigiert und dort das Futter verteilt (DLG 2014c, S. 8 f.). Bei dem System »Vector« werden beispielsweise die folgenden Prozesse automatisch durchgeführt: die Futterentnahme aus im Stall befindlichen Futterküchen, das Befüllen des Futtermischers durch einen schienengeführten Greifer, das Mischen des Futters im Behälter, die Navigation entlang des Fressgitters mittels Ultraschallsensoren, das Verteilen des Futters und das Nachschieben zum Futtertrog (Abb. 5.5). Über eine Batterie wird das Gerät mit Energie versorgt. Zudem verfügt der »Vector« über einen Futterhöhsensor, der die Höhe des Futters in der Futtervorlage misst und höhenabhängig das Futter

¹³⁹ <https://wasserbauer.at/produkte/futterschieber-butler-gold-pro> (18.8.2021)

¹⁴⁰ www.lely.com/de/losungen/futtern/juno/ (18.8.2021)

¹⁴¹ www.gea.com/de/products/frone-feed-pusher.jsp (18.8.2021)

¹⁴² www.lely.com/de/losungen/futtern/vector/ (18.8.2021)

¹⁴³ www.cormall.dk/produkt/feed-roboter-multifeeder/ (18.8.2021)

nachdosiert. Recke und Strüwe (2015) geben Investitionskosten in Höhe von 150.000 Euro für den »Vector« für einen Familienbetrieb mit 210 Tieren an.

Abb. 5.5 Fütterungsroboter



Quelle: Lely Holding S.à.r.l.

Ein Beispiel für die Automatisierungsstufe III ist der »Innovado«¹⁴⁴. Dieser selbstfahrende Futtermischwagen kann sich im Stall autonom bewegen, sodass keine Futterküche mehr benötigt wird. Durch eine erweiterte Umfelderkennung (ToF-Kameras¹⁴⁵, Laserscanner etc.) und per satellitengestützter Navigation (GNSS) kann er zusätzlich Fahrten auf dem Hof absolvieren sowie die Futtermittelentnahme in Außensilos (Flachsilos) selbstständig durchführen (Abb. 5.6) (Haidn/Leicher 2017, S. 53).

Forschung und Entwicklung zu automatisierten Fütterungstechnologien fokussieren verstärkt auf die Automatisierung der angegliederten Prozesse, wie beispielsweise das aufwendige Abwickeln der Siloplane, z. B. »Wicky«¹⁴⁶ (Bernhardt 2017, S. 3 f.). Auch eine sensorgestützte Erfassung der Futter(misch-)qualität innerhalb von Futtermischwagen auf der Grundlage von Bilderkennungstechniken ist ein Forschungsgebiet, welches bereits zu ersten marktreifen Anwendungen geführt hat, z. B. »VISIOMIX«¹⁴⁷.

¹⁴⁴ www.schuitemaker-landtechnik.de/produkte/f/C3%BCttern/allgemeine-informationen-innovado.html (18.8.2021)

¹⁴⁵ Time-of-Flight(ToF)-Kameras bezeichnen 3-D-Kameras, die auf einer Lichtlaufzeitmessung basieren (Kutscher/Mielke 2005).

¹⁴⁶ www.topagrar.com/technik/news/wasserbauer-wicky-automatisiertes-abdecksystem-fuer-fahrtilos-9383257.html (18.8.2021)

¹⁴⁷ www.dinamicagenerale.com/de-ww/visiomix.aspx (18.8.2021)

Abb. 5.6 Vollautomatisches Fütterungssystem »Innovado«



Quelle: Schuitemaker Machines B.V.

5.1.3 Reinigungsroboter

Selbstfahrende autonome Reinigungs- bzw. Entmistungsroboter sind eine weitere marktverfügbare Technologie, die für das Reinigen der Laufflächen in Ställen mit Spaltenböden und Betonlaufgängen eingesetzt wird (Abb. 5.7) (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 14 f.). Stallhygiene und Sauberkeit der Laufflächen haben z. B. in der Rinderhaltung Einfluss auf die Klauengesundheit und verringern Geruchs- und Ammoniakemissionen. Zudem kann durch eine Automatisierung der vergleichsweise hohe Arbeitszeitbedarf für körperlich anstrengende Reinigungs- und Entmistungsarbeiten reduziert werden.

Die Aufgaben des Reinigungsroboters sind das Anfeuchten und Sammeln von Mist in einem Tank sowie der Transport des Materials zu einer Sammelstation (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 15). Hierzu werden Stallkarten nach einem erstmaligen Abfahren erstellt und Fahrtrouten in Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad festgelegt. Es werden nur die Gänge gereinigt, höher gelegene Liegeboxen der Tiere können von marktverfügbaren Robotern aufgrund der Stufe nicht erreicht werden (Fübbeker 2017, S. 2). Während des Reinigungsprozesses sorgen Ultraschallsensoren dafür, dass ein vordefinierter Abstand zu einer Betonkante oder zur Wand eingehalten wird. Der Antrieb erfolgt elektrisch. In einer Dockingstation kann das Gerät Wasser und Energie nachtanken sowie den aufgesammelten Mist in einem Abwurfschacht entladen. Verschiedene Hersteller bieten Reinigungs- oder Entmistungsroboter an, z. B. »Discovery Collector«¹⁴⁸.

¹⁴⁸ www.lely.com/de/losungen/kuhkomfort/discovery-collector/ (18.8.2021)

Abb. 5.7 Reinigungsroboter »Discovery« bei der Arbeit



Quelle: Lely Holding S.à.r.l.

In Bezug auf automatische Reinigungsverfahren wird ein Verbesserungsbedarf in der Tier- bzw. Umfelderkennung der Roboter konstatiert (Bernhardt 2017, S. 163). Zudem wird aktuell daran geforscht, automatisierte Reinigungsverfahren auszuweiten und Kombinationssysteme zu entwickeln, die im Milchviehstall sowohl die Reinigung der Laufflächen als auch der Liegeboxen und zusätzlich das Einstreuen der Boxen übernehmen. Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft hat ein entsprechendes Forschungsprojekt (Laufzeit: 2015–2020) gemeinsam mit der Technischen Universität Braunschweig und der Peter Prinzing GmbH durchgeführt und den »MultiRob«¹⁴⁹ entwickelt. Dieser basiert auf einem herkömmlichen Reinigungsroboter und erkennt selbstständig, ob eine (Tierliege-)Box belegt ist. Ist diese frei, fährt der »MultiRob« einen Besen aus und reinigt die Box. Über ein Dosiersystem wird zudem Einstreumaterial ausgebracht (Bernhardt 2019, S. 186 f.).

5.1.4 Weideroboter

Für den Einsatz von Robotern und automatischen Systemen in der Außenwirtschaft der Tierhaltung gibt es aktuell noch keine praxisreifen Anwendungen. Als Beispiel für ein Forschungsprototyp wird der Weideroboter »iLeed«¹⁵⁰ kurz beschrieben, der aus einem EU-geförderten Projekt (Laufzeit 2013–2017) hervorgegangen ist. Ziel des Projekts war die Optimierung der Weidefütterung und des Weidemanagements, indem selektive Maßnahmen (z.B. Nachsaat von Fehlstellen, Verhinderung von Verunkrautung) nach jeder Weidephase der Tiere autonom durchgeführt werden, um den hohen Arbeitsaufwand für die Pflege der Weide zu reduzieren. Hierzu

¹⁴⁹ www.lfl.bayern.de/ilt/tierhaltung/rinder/225237/index.php (18.8.2021)

¹⁵⁰ www.lfl.bayern.de/ilt/mechatronik/169372/index.php (18.8.2021)

wurde ein Fahrzeug entwickelt, welches mittels eines 2-D-Laserscanners in der Lage ist, Weidereste¹⁵¹ zu detektieren, anzufahren und mit dem angebauten Mulcher¹⁵² zu beseitigen (Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 15 f.). Weiterhin liefert der Sensor Daten zur Grashöhe und damit indirekt zur Ermittlung der Biomasse. Ein NIR-Sensor führt Messungen zur Futterqualität durch. Die Fahrzeugnavigation erfolgt über GNSS.

5.2 Roboter im Pflanzenbau

Roboter im Pflanzenbau zeichnen sich durch verschiedene Bau- und Konstruktionsformen aus, die durch unterschiedliche pflanzenbauliche Anwendungsbereiche bedingt sind. Ziel ist es, durch den Einsatz autonomer Systeme pflanzenbauliche Prozesse zu automatisieren, um damit Arbeits- sowie Betriebskosten einsparen zu können. Gerade vor dem Hintergrund steigender Lohnkosten sowie eines Mangels an Fachkräften sind Robotiksysteme prinzipiell interessant. Zudem bieten sie die Möglichkeit, durch den Einsatz von autonomen Kleinmaschinen neue umweltschonendere Produktionssysteme zu etablieren (de Witte 2019). Aktuell gibt es allerdings nur sehr wenige marktverfügbare Robotersysteme für den Pflanzenbau. Vielmehr befindet sich ein Großteil der Systeme noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase.

Im Folgenden werden Feldroboter (für Aussaat, Bodenbearbeitung, Unkrautbekämpfung etc.) und Ernteroboter getrennt betrachtet. Diese Unterteilung erfolgt vor dem Hintergrund, dass diese beiden Anwendungsgebiete unterschiedliche technische Anforderungen stellen. Bei der Feldarbeit besteht die Herausforderung vor allem in der Bewältigung der komplexen und veränderlichen Umgebungsbedingungen bzw. Variation des Pflanzenbestands (unterschiedliche Bodenbeschaffenheit, heterogener Pflanzenbestand etc.). Ernteroboter werden bisher vor allem im Obst- und Gemüsebau eingesetzt. Bei der technischen Weiterentwicklung stehen die automatisierte Erntefruchterkennung sowie die Greif- bzw. Greifarntechnik im Vordergrund.

5.2.1 Feldroboter

Feldroboter können sehr unterschiedliche Einsatzbereiche umfassen, was sich in der vielfältigen Forschungs- und Entwicklungslandschaft widerspiegelt.¹⁵³ Anwendungsgebiete sind:

- › *Bonitur* (Bestimmung von Pflanzenmerkmalen sowie der Pflanzengesundheit);
- › *Bodenuntersuchung* zur Bestimmung von Bodeneigenschaften;
- › *Bodenbearbeitung* wie z. B. Hacken des Bodens;
- › *Aussaat*;
- › *Unkrautbekämpfung* mittels mechanischer oder chemischer Methoden;
- › *Pflegearbeiten im Obst- oder Weinbau* wie das Ausästen bzw. das Beschneiden von Weinreben.

Viele der aktuell in der Entwicklung befindlichen Prototypen haben ein multifunktionales Einsatzspektrum und/oder sind modular aufgebaut, sodass sie sich nicht einem Anwendungsbereich eindeutig zuordnen lassen. Im Folgenden werden vier ausgewählte Entwicklungen – Roboter zur Phänotypisierung, Aussaatroboter, Roboter zur Unkrautbekämpfung sowie Pflanzenschutzroboter – exemplarisch vorgestellt, um einen Überblick über das breite Spektrum an Einsatzmöglichkeiten für Feldroboter sowie deren Entwicklungsstand zu geben.

¹⁵¹ Unter Weideresten werden jene durch die Tiere nicht gefressenen, überständigen Vegetationsreste verstanden, die nach Beendigung des Weideganges auf der Weide verbleiben (www.anl.bayern.de/fachinformationen/beweidung/glossar_ziel.htm; 18.8.2021).

¹⁵² Ein Mulcher ist eine Maschine zum Mähen und gleichzeitigem Verkleinern des Mähgutes.

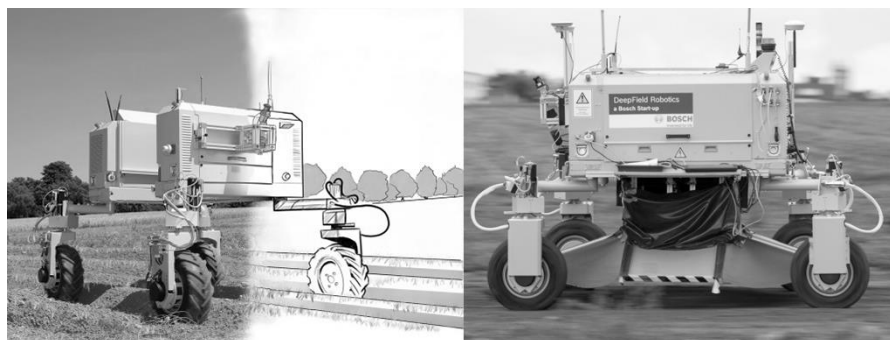
¹⁵³ Für einen Überblick Schwich et al. (2019) und Shamshiri et al. (2018).

Roboter zur Phänotypisierung

In der Pflanzenzüchtung war bisher die Bonitur von Pflanzenentwicklung und -eigenschaften für viele Zuchtlinien (Phänotypisierung) ein sehr arbeitsaufwendiger Prozess, der bei der visuellen Bonitur nicht objektiv und kontinuierlich in den Zuchtgärten durchgeführt werden konnte. Zur Automatisierung der Bonituarbeit wurde in Deutschland der »BoniRob« entwickelt. Ausgangspunkt war ein von 2008 bis 2011 durchgeführtes Projekt der Hochschule Osnabrück in Zusammenarbeit mit AMAZONEN-WERKE H. Dreyer SE & Co. KG und der Robert Bosch GmbH (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 19 f.). Ziel war der Aufbau einer autonomen Roboterplattform zur automatisierten Phänotypisierung von Maispflanzen. Zur Ermittlung geometrischer Pflanzenparameter wurde der »BoniRob« mit zahlreichen optischen Sensoren ausgestattet. Dazu gehören Laserabstossensensoren, 3-D-ToF- bzw. Farbkameras, Lichtgitter und NIR-Sensoren¹⁵⁴ (Ruckelshausen 2014). Die Navigation erfolgte auf der Grundlage eines korrigierten Satellitensignals (RTK-Signal; Kap. 3.1.1), ergänzt durch Daten eines 3-D-Laserscanners und einer auf der Trägheit des Systems basierenden Sensorik (inertiales Messsystem) (Rahe et al. 2014). In Feldversuchen wurde mit »BoniRob« die Reihenerkennung verschieden großer Maispflanzen untersucht. Zudem wurde ein Modul für Bodenanalysen entwickelt und getestet (Göttinger et al. 2014).

Mit dem Abschluss des Projekts »BoniRob« an der Hochschule Osnabrück im Jahr 2011 wurde der Roboter von der Bosch GmbH (2015) weiterentwickelt, u. a. im Rahmen des Projekts »Remote Farming«, das im Zeitraum von 2011 bis 2014 durchgeführt wurde und sich der extern kontrollierten mechanischen Beikrautregulierung in Möhren widmete (Bangert et al. 2013; dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 20 f.). Im Projekt wurde ein Modul zur mechanischen Unkrautbekämpfung entwickelt, wobei bildgebende Daten vom Feld via Internet an einen Menschen zur Identifizierung der Beikräuter übertragen wurden. Neuere Versionen des Roboters wurden auf der Landtechnikmesse »AGRITECHNICA« 2015 vorgestellt, darunter die Prototypen zur mechanischen Unkrautbekämpfung (»Weedmobile«) und der überarbeitete »BoniRob v3«. Interessant ist, dass der Roboter im Zuge der Weiterentwicklung deutlich verkleinert und vereinfacht wurde, um ein vermarktungsfähiges Konzept zu erhalten (Gaus et al. 2018, S. 35).

Abb. 5.8 »BoniRob«: Prototyp zur Pflanzenphänotypisierung



links Trägerplattform; rechts »BoniRob« inklusive Anwendung zur Phänotypisierung von Pflanzenständen

Quelle: Robert Bosch GmbH

In seiner aktuellen Version handelt es sich um einen modularen Feldroboter von etwa 1 t Gewicht und ca. 2 m Höhe (Abb. 5.8), der als Trägerfahrzeug aufgebaut ist und dessen Fahrwerk variabel verändert (Spurbreite und Überfahrthöhe) und so leicht an unterschiedliche Bedingungen angepasst werden kann (Gaus et al. 2018, S. 35S.). Der Antrieb erfolgt elektrisch. An der Trägerplattform können unterschiedliche Werkzeugmodule angebracht

¹⁵⁴ Bei der sensorbasierten Phänotypisierung werden mithilfe der NIR-Spektroskopie Qualitätsmerkmale wie etwa Feuchte-, Protein- und Stärkegehalte oder die Backqualität und Wachstumsphasen der Pflanzen über die Geometrie bestimmt (Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 20).

werden – u. a. zur Bestimmung von Pflanzen- (Phenotyping-App) und Bodeneigenschaften (Penetrometer-App) oder zur Bekämpfung von Unkraut (Weeding-App) (Schwich et al. 2019, S. 41 f.).

Der »BoniRob« wird gegenwärtig im Rahmen des BMEL-geförderten Verbundprojekts »Experimentierfeld Agro-Nordwest« unter Beteiligung von Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis weiterentwickelt (Laufzeit: 2019–2022). Ein Forschungsschwerpunkt liegt auf der sensorbasierten mechanischen Unkrautregulierung und einem Vergleich mit herkömmlichen Verfahren der Unkrautregulierung.¹⁵⁵

Roboter zur Unkrautbekämpfung

Bei Robotern zur Unkrautbekämpfung werden verschiedene Konzepte verfolgt, denen der elektrische Antrieb und Sensorsysteme zur Erkennung von Unkräutern gemeinsam sind. Ein wesentlicher Unterschied besteht hinsichtlich der Art der Unkrautbekämpfung (chemisch, mechanisch oder thermisch). Es gibt u. a. folgende kommerziellen Angebote:

- › »Dick«¹⁵⁶ (chemische, mechanische oder thermische Unkrautbekämpfung),
- › »Avo«¹⁵⁷ (chemische Unkrautbekämpfung),
- › »Robocrop Spot Sprayer«¹⁵⁸ (chemische Unkrautbekämpfung)
- › und »Oz Weeding Robot«¹⁵⁹ (mechanische Unkrautbekämpfung), der im Folgenden exemplarisch vorgestellt werden soll.

Der »Oz Weeding Robot« (Abb. 5.9) ist ein autonomer Feldroboter, der für den Einsatz in Reihenkulturen im Gemüse- und Weinbau konzipiert wurde und primär der mechanischen Unkrautbekämpfung dient (Schwich et al. 2019, S. 5 f.).

Der relativ kleine Roboter mit einem Leergewicht von rund 100 kg und einer Fahrzeugbreite von 40 cm ist bereits marktverfügbar. Mithilfe spezifischer Werkzeuge (Pflug, Unkrautbürste, Stiel, Federzinken- und Standardegge) entfernt der Roboter mechanisch Unkraut. Hierbei arbeitet er autonom (nach einer Anlernphase) die einzelnen Pflanzenreihen ab. Alternativ ist er mithilfe eines speziellen Modus aber auch in der Lage, Menschen selbstständig zu folgen, was z. B. zum Abtransport der Ernte genutzt werden kann (kleinere Anhänger können angehängt werden). Zudem kann der Roboter per Fernsteuerung (mit einer Reichweite von 10 m) manuell bedient werden. Der Antrieb erfolgt über Elektromotoren, die einen Betrieb von 3 bis 10 Stunden (je nach Bodenbeschaffenheit und Einsatzzweck) ermöglichen.

¹⁵⁵ www.agro-nordwest.de/schwerpunkte/#psp5 (18.8.2021)

¹⁵⁶ <https://www.smallrobotcompany.com/weed-killing> (18.8.2021)

¹⁵⁷ www.ecorobotix.com/de/avo-autonomen-roboter/ (18.8.2021)

¹⁵⁸ <https://garford.com/de/robocrop-spot-sprayer/> (18.8.2021)

¹⁵⁹ www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/weeding-robot-oz/ (18.8.2021)

Abb. 5.9 »OZ Weeding Robot«



Quelle: Naïo Technologies

Roboterschwarm für Aussaat

Im Rahmen des durch die Europäische Kommission geförderten Projekts »Mobile Agricultural Robot Swarms« (MARS) hat die AGCO Fendt GmbH die Konzeptidee für ein Robotersystem von kleinen Fahrzeugschwärmen zur präzisen Aussaat untersucht (Laufzeit 2014–2015).¹⁶⁰ Aus dem Projekt ging ein Robotersystem hervor, das kontinuierlich weiterentwickelt wird.

Das Robotersystem »Xaver«¹⁶¹ (Abb. 5.10) besteht aus einer Logistikeinheit sowie aus kleinen, im Schwarm operierenden Robotereinheiten, die mithilfe von cloudbasierten Lösungen die präzise Aussaat von Mais planen, durchführen und exakt dokumentieren (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 28 f.). Dabei werden der Ablageort und der Saatzeitpunkt für jedes Saatkorn genau festgehalten. So ist für nachfolgende Prozesse wie Unkrautbekämpfung, Pflanzenschutz und Düngen exakt bekannt, wo sich die Einzelpflanze befindet. Die einzelnen Maschineneinheiten sind batteriebetrieben, besitzen einen elektrischen Antrieb, haben ein geringes Gewicht (ca. 50 kg) und durch die relativ großen Reifen ist der Bodendruck vernachlässigbar gering.

¹⁶⁰ <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/find-connect/projects/saving-time-and-resources-swarm-seeding-robots> (18.8.2021)

¹⁶¹ www.fendt.com/us/xaver (18.8.2021)

Abb. 5.10 Robotereinheit »Xaver«



Quelle: AGCO GmbH/Fendt

Roboter für Pflanzenschutz im Obst- und Weinbau

Als Beispiel für die Entwicklung von Pflanzenschutzrobotern wird das Forschungsprojekt »elWObot« (»elektrisch betriebener Wein- und Obstbauroboter«)¹⁶² vorgestellt, das von 2012 bis 2015 von der Technischen Universität Dresden in Zusammenarbeit mit der Raussendorf Maschinen- und Gerätebau GmbH, der Hochschule Osnabrück und der Hochschule Geisenheim durchgeführt wurde und die Konstruktion eines elektrisch angetriebenen Plantagenroboters für den Obst- und Weinbau zum Ziel hatte. »elWObot« baute auf dem Forschungsprojekt »Cäsar« (2009–2012)¹⁶³ auf, in dem ein multifunktionales Trägerfahrzeug für die Automatisierung von Arbeitsprozessen in geschlossenen Obst- und Weinanlagen entwickelt wurde (Pflanzenschutz, Bodenpflege, Düngung, Konturschnitt, Ernte und Transport; Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 22).

»elWObot« (Abb. 5.11) verfügt über einen dieselelektrischen Einzelradantrieb mit elektrischer Einzelradlenkung (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 23 f.). Dies ermöglicht eine Navigation des Fahrwerks auf engstem Raum. Die Navigation in der Baumreihe wird mit einem 2-D-Laserscanner (Lidar) durchgeführt, wobei die Orientierung an den Baumstämmen erfolgt. Gleichzeitig wird mit dem Sensor ein 270°-Sicherheitsbereich überwacht. Befindet sich ein Hindernis im Sichtbereich, bleibt das Fahrzeug stehen, bis dieses entfernt wurde. »elWObot« ist in der Lage, das Ende einer Baumreihe zu erkennen und selbstständig in die nächste Baumreihe zu wenden. Ein 3-D-Laserscanner scannt die Laubwand ab und appliziert in Abhängigkeit des Blattvolumens Pflanzenschutzmittel. Auch Lücken in den Baumreihen werden erkannt, hier wird dann kein Pflanzenschutzmittel ausgebracht.

Das Fahrzeug »elWObot« ist als Forschungsprototyp einzustufen (Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 25). Hinsichtlich Funktionalität, Zuverlässigkeit und Bedienkomfort gibt es noch erheblichen Entwicklungsbedarf. Das angestrebte Anwendungsspektrum umfasst neben der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln auch Aufgaben wie die Bearbeitung des Bodens, den Laubschnitt oder das Mulchen (Rügheimer 2016). Für den Prototypen existiert derzeit jedoch nur ein elektrisches Pflanzenschutzgerät zum Sprühen von Pflanzenschutzmitteln, weitere Komponenten wie einen Mulcher zur Grünlandpflege gilt es noch zu entwickeln. Auch eine Fernüberwachung ist derzeit nicht möglich.

¹⁶² <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/die-fakultaet/news/schwere-technik-hightech-in-der-landwirtschaft> (18.8.2021)

¹⁶³ https://www.raussendorf.de/pdf/raussendorf_obstroboter_02.pdf (18.8.2021)

Abb. 5.11 »eWObot« mit sensorgesteuertem Pflanzenschutzgerät im Praxistest



Quelle: TU Dresden

5.2.2 Ernteroboter

Ernteroboter dienen dazu, die arbeitsintensiven, körperlich belastenden und repetitiven Erntearbeiten auf dem Feld (oder in Gewächshäusern) zu automatisieren, für die es immer schwieriger wird, Arbeitskräfte zu finden. Trotz des großen Automatisierungsbedarfs in diesem Bereich sind Robotiklösungen zur autonomen Durchführung von Ernteprozessen trotz einiger weniger kommerzieller Markteinführungen¹⁶⁴ immer noch weitgehend Gegenstand der Forschung. Gründe dafür liegen in den sehr heterogenen Umweltbedingungen, unter denen diese Roboter agieren müssen (Shamshiri et al. 2018, S. 6). Spezifische Herausforderungen stellen u. a. die Erntefruchterkennung bei unterschiedlichen Pflanzenwuchsbedingungen (bezüglich der Pflanzendichte, Wuchshöhe und -richtung), die Detektion des Reifegrads der Früchte sowie die Koordination und Handhabung der Pflückaktivität dar (u. a. Greifen und Pflücken der Frucht, ohne diese zu beschädigen). Ein entscheidendes Kriterium für eine ökonomische Rentabilität automatisierter Ernteprozesse im Gegensatz zum manuellen Pflücken ist die Pflückzeit, also die Zeit, in der über den Reifegrad der Frucht entschieden und entsprechend der Entscheidungskriterien die Frucht gepflückt wird oder nicht. Shamshiri et al. (2018, S. 6) führen hier beispielhaft eine durchschnittliche manuelle Pflückzeit für rote Paprikaschoten von ca. 6 Sekunden pro Frucht an und konstatieren weiter, dass die durchschnittliche Pflückzeit von automatisierten Systemen aktuell noch darüber liegt. Entsprechend konzentriert sich die Forschung im Bereich der automatisierten Ernteroboter vor allem auf die Erhöhung der Greifgeschwindigkeiten und die Verbesserung der Griffvariabilität sowie auf die verlässliche Erkennung erntefähiger Früchte durch den Roboter in möglichst kurzer Zeit (Arad et al. 2020; Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 32; Mu et al. 2020; Shamshiri et al. 2018; Xiong et al. 2019).

Aus den zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten¹⁶⁵ für automatisierte Ernteroboter werden im Folgenden exemplarisch der »Robotic Strawberry Harvester« – ein kurz vor der Markteinführung befindlicher Roboter zur Erdbeerernte – sowie das EU-finanzierte Forschungsprojekt »Sweeper« und der hieraus entwickelte Prototyp näher vorgestellt.

¹⁶⁴ Als einer der weltweit ersten kommerziell verfügbaren Ernteroboter gilt ein von der BayWa-Tochter T&G Global (BayWa 2019) in der neuseeländischen Apfelernte eingesetztes Gerät. Entwickelt wurde das Gerät von Abundant Robotics, Inc.

¹⁶⁵ Beispiele sind Entwicklungen für die Ernte von Tomaten (Panasonic 2018), Gurken (Fraunhofer Gesellschaft 2018), Erdbeeren (Xiong et al. 2019), Orangen (Ferreira et al. 2018) oder Kiwis (www.roboticsplus.co.nz/kiwifruit-picker; 18.8.2021).

Robotic Strawberry Harvester

Der »Robotic Strawberry Harvester«¹⁶⁶ ist ein System zur automatisierten Erdbeerernte. Voraussetzung für den Einsatz des Ernteroboters ist ein Anbauverfahren der Erdbeeren, das an die Erntetechnologie angepasst ist (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 27 f.). Hierzu werden die Erdbeerpflanzen auf einer Art zeilenförmigem Hochbeet angepflanzt. Dadurch hängen die Erdbeeren an den Seitenwänden des Hochbeetes herunter und sind somit für den Roboter frei zugänglich (Abb. 5.12).

Auf der Basis von Bilderkennungstechnologien erkennt das Kamerasystem die Farbe der zu erntenden Erdbeeren. Erfüllt eine Erdbeere bestimmte vordefinierbare optische Reifekriterien, wird die Frucht gepflückt.¹⁶⁷ Der »Robotic Strawberry Harvester« besteht aus 24 Roboterarmen, die jeweils mit Schneidwerkzeug bestückt sind und die am Stängel abgeschnittenen Erdbeeren in einen Sammelkorb legen. Ultraschallsensoren sorgen für die Kollisionsvermeidung und halten das Fahrzeug in der Spur. Dabei orientieren sie sich an den Erdbeerpflanzreihen. Das System soll bis zu sechs manuelle Pflücker ersetzen können.

Abb. 5.12 »Robotic Strawberry Harvester«



Quelle: Agrobot

Sweeper

»Sweeper« war ein EU-Forschungsprojekt (Laufzeit: 2015–2018) zur automatisierten Ernte von Paprikaschoten im Gewächshaus. Das Projekt wurde federführend koordiniert durch die Wageningen Universität in Zusammenarbeit mit sechs (inter)nationalen Partnern (Arad et al. 2020; Abb. 5.13).¹⁶⁸

Der »Sweeper« besteht aus einer selbstständig fahrenden Plattform, ausgestattet mit einer Scherenhebebühne, um alle für die Ernte relevanten Arbeitshöhen zu erreichen. Das System ist so konzipiert, dass es sich auf entsprechenden Röhrengleisen entlang der Pflanzenreihen bewegt und über einem standardisierten industriellen Roboterarm verfügt. Dieser enthält ein speziell gefertigtes Greiforgan mit Schneidevorrichtung, Pflanzenstielhalte-mechanismus, RGB-Kameras und LED-Einbauten zur Umfelderkennung. Der entwickelte Prototyp ist in der

¹⁶⁶ www.agrobot.com/ (18.8.2021)

¹⁶⁷ Das System zur Früchterkennung wurde von der AgVision Corp. entwickelt (www.agvisionsoftware.com/; 18.8.2021).

¹⁶⁸ Das Forschungsprojekt »Sweeper« knüpft an die Ergebnisse des zuvor abgeschlossenen EU-Forschungsprojekt »CROPS« an (www.sweeper-robot.eu/participants; 18.8.2021).

Lage, die Paprikaschoten zu detektieren, diese gemäß den hinterlegten Reifegradkriterien zu ernten und in einem Transportbehälter abzulegen.

Wie die meisten Ernteroboter ist auch der »Sweeper« für den Einsatz in Reihenkulturen gedacht und bedarf entsprechend standardisierter Rahmenbedingungen, wie z. B. einer zweireihigen Bepflanzung mit einem durchschnittlichen Mittelgang von 20 cm dazwischen (Arad et al. 2020). »Sweeper«

Abb. 5.13 »Sweeper«



Quelle: www.sweeper-robot.eu

5.3 Perspektiven

Für die Landwirtschaft bietet die Robotik neue technische Möglichkeiten, Arbeitsprozesse in der Tierhaltung und im Pflanzenbau zu automatisieren.

In der Tierhaltung haben sich robotische Technologien wie AMS und automatische Fütterungssysteme sowie Reinigungsroboter bereits in der Praxis etabliert. Sie dienen dazu, arbeitsintensive Routinarbeiten wie das Melken oder Füttern der Tiere maschinell zu erledigen, wodurch Arbeitszeit eingespart werden kann. Die hohen Investitionskosten für die Technologien sowie die für eine Installation teils erforderlichen baulichen Veränderungen am Stallgebäude haben zur Folge, dass der Einsatz häufig nur für größere Betriebe infrage kommt (dazu TAB 2021, Kap. 4.2.1).

Im Pflanzenbau befindet sich eine Vielzahl von Agrarrobotern zur Automatisierung von Feldarbeiten, wie z. B. Ernte, Unkrautbekämpfung oder Bodenbearbeitung, in der Entwicklung. Die Systeme sind jedoch bis auf wenige Ausnahmen noch nicht ausgereift und kommerziell verfügbar. Dies hat sicherlich damit zu tun, dass die verfügbaren Technologien mit den heterogenen und veränderlichen Einsatzbedingungen auf dem Feld noch nicht

zurechtkommen und ein zuverlässiger Einsatz somit nicht sichergestellt ist. Ein weiterer Grund ist aber darin zu sehen, so Hertzberg (2018, S. 46), dass »physisch kleine, leichte Agrarroboter mit autonomer Steuerung [nicht] dafür geeignet sind, die aktuellen großen, hoch effizienten und hoch schlagkräftigen Landmaschinen in ihren aktuellen Arbeitsprozessen 1:1 zu ersetzen«. Es handelt sich folglich noch um Nischenprodukte.

Zu erwarten ist, dass mit den Fortschritten im Bereich der künstlichen Intelligenz und autonomer Robotik auch die Feldrobotik einen weiteren technologischen Schub erfahren wird. Damit sich Roboter im Pflanzenbau zukünftig durchsetzen, braucht es voraussichtlich neben der Weiterentwicklung der Technologien, z.B. im Bereich der sensorischen Umfelderkennung oder der Energieversorgung, auch eine Neuausrichtung der Ackerbauprozesse und Pflanzenbausysteme (Hertzberg 2018). Wegener et al. (2019) verweisen in diesem Zusammenhang auf das Konzept des Spot Farming. Agrarflächen werden dabei nach ihren teilflächenspezifischen Eigenschaften in möglichst kleinräumige Spots unterteilt, die durch kleine autonome Robotersysteme bewirtschaftet werden. Auf einem großen Ackerschlag könnten so z.B. nicht wie bisher nur eine, sondern verschiedene Fruchtfolgen gleichzeitig angebaut und bewirtschaftet werden (Gaus et al. 2018; Minßen/Schattenberg 2018; Urso et al. 2017). De Witte (2019, S. 99) führt dazu aus, dass die pflanzenbaulichen Potenziale, die Spot-Farming-Konzepte aufzeigen, nur realisierbar sind, »wenn das gesamte Anbauverfahren inklusive der Ernte mit autonomen Kleinmaschinen erfolgt und sich die neuentwickelten Verfahren stärker an den Bedürfnissen der Kulturpflanzen orientieren«.

Ein derzeit noch relativ visionärer Entwicklungspfad, der in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen könnte, betrifft autonome Feldroboter, die koordiniert in einem Schwarmverband geführt werden (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 34). Diese Einheiten sind in der Lage, sich autonom zu bewegen und im Verband flexible Arbeitsbreiten sowie unterschiedlich gestaffelte Arbeitsprozesse abzudecken. Schwarmtechnologien erreichen aufgrund der Elektrifizierung, der genauen Navigation, der umfassenden Sensorausstattung und der autonomen Fahrfunktionen auch deutlich höhere Automatisierungsgrade als die gezogene, bisher noch weitgehend mechanisch oder hydraulisch angetriebene Gerätetechnik. Vorteile gegenüber herkömmlichen großtechnischen Landmaschinen mit großen Arbeitsbreiten liegen laut Minßen und Schattenberg (2018, S. 27) darin, dass Maschinenschwärme über eine höhere Flächenleistung und geringere Wendezeiten verfügen. Auch sind sie den einzelnen kleineren Robotereinheiten überlegen, da sie mit ihrer skalierbaren Schlagkraft auch große Flächen bearbeiten können und genügend Zugkraft zur Bodenbearbeitung aufbringen. Derartige Maschinenkonzepte sowie auch die damit verknüpfte Weiterentwicklung der Pflanzenbausysteme sind jedoch noch im Stadium der Grundlagenforschung (Kasten 5.1).

Kasten 5.1 Projekt »Feldschwarm«

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt »Feldschwarm« (Laufzeit: 2017–2020)¹⁶⁹ hat zum Ziel, »Grundlagentechnologien für autonom operierende Anbaugeräte in der Landtechnik« zu entwickeln. Hierzu wird an kleinen, vergleichsweise leichten Robotern gearbeitet, die elektrisch angetrieben werden, per Funk gekoppelt sind und im Schwarm (semi)autark die Feldbearbeitung übernehmen. Diese Roboter bzw. Feldschwarmeinheiten werden mit modularen Agrarwerkzeugen ausgestattet, sodass verschiedene Werkzeuge angebaut und entsprechend unterschiedliche Anwendungen durchgeführt werden können (z.B. säen, pflügen und düngen). Die einzelnen autonomen Einheiten werden über ein bemanntes Leitfahrzeug und Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (Funk) und GNSS gesteuert. Die Umfelderkennung, Ortung und die Schwarmführung erfolgen in Echtzeit. So werden von den Feldschwarmeinheiten kontinuierlich z.B. Rückmeldungen an das Leitsystem über ihren Standort oder über den Fortschritt ihrer Arbeitsaufgabe gesendet (TU Dresden 2019).

Das Verbundprojekt ist in die Einzelprojekte »Automatisierung, Prozesse, Werkzeuge«, »Feldschwarmkomponenten«, »Umfeldsensorik und Schwarmnavigation« sowie »Feldschwarmsysteme« untergliedert. Beteiligt sind elf Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft. Geleitet wird das Projekt von einem Vorstand, bestehend aus Vertretern der Firmen John Deere und BITSz electronics sowie der Technischen Universität Dresden.

Quelle: Herlitzius/Fehrmann 2017, S. 29

¹⁶⁹ www.feldschwarm.de/ (18.8.2021)

In der Weiterentwicklung der Agrarrobotik wird auch die Chance gesehen, dem Trend zum Einsatz immer größerer Landmaschinen zu begegnen und den hiermit häufig verbundenen negativen Begleiterscheinungen (zunehmende Bodenverdichtung, große einheitliche Ackerstrukturen mit abnehmender Biodiversität, hohe Investitionskosten) entgegenzuwirken (Gaus et al. 2018, S. 42; Hillerbrand et al. 2019). Allerdings ist die Entwicklung vollautonomer Feldroboter technisch komplex und insofern mit einem überproportional hohen Entwicklungs- und Kostenaufwand verbunden (dazu und zum Folgenden Herlitzius/Fehrman 2017, S. 30 ff.). Bei den im Vergleich zur Industrie geringen Stückzahlen in der Landtechnik ergeben sich tendenziell relativ hohe Anschaffungskosten für Feldroboter, was in Verbindung mit der nur saisonalen Einsatzmöglichkeit zu einem ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis führen kann. Aus diesem Grund ist ein Trend zum modularen Aufbau von autonomen oder automatischen Robotersystemen für den Feld- und Ernteeinsatz erkennbar. Ziel ist es, die Grundaufgaben (Navigation, Objekt- und Hinderniserkennung, Pfadplanung) auf einer Trägerplattform zu bündeln und Werkzeuge für die landwirtschaftlichen Aufgaben austauschbar zu gestalten. Damit wird die Trägerplattform universeller einsetzbar, erreicht eine höhere Nutzungsdauer und die Kosten für die Anwender/innen sowie der Amortisierungszeitraum sinken.

6 Fazit

Digitale Technologien gewinnen in der landwirtschaftlichen Praxis immer mehr an Bedeutung und durchdringen inzwischen alle Bereiche der Landtechnik. Zu den bereits im Einsatz befindlichen digitalen Anwendungen zählen im Pflanzenbau beispielsweise satellitengesteuerte Landmaschinen, Sensor- und Applikationstechniken mit variabler Dosierung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln oder die biologische Schädlingsbekämpfung mithilfe von Drohnen. In der Tierproduktion sind Roboter für automatisierte Melk-, Fütterungs- und Entmistungsvorgänge sowie Sensoren zur Überprüfung von Vitaldaten und zum Herdenmanagement bereits relativ verbreitet. In beiden Bereichen ist ein Trend zur zunehmenden Automatisierung bis hin zur autonomen Arbeitserledigung festzustellen, wobei die Zielsetzungen vorrangig die Erhöhung der Arbeitsproduktivität (Einsparung von Arbeitszeit bzw. Arbeitskräften) sowie die Steigerung der Produktionseffizienz (geringerer Inputeinsatz pro Produktionseinheit bzw. absolute Verringerung des Inputeinsatzes) sind. Während der Trend im Pflanzenbau zur teilflächenspezifischen bzw. varierten Bewirtschaftung geht, stehen in der Tierproduktion die einzeltierbezogene Fütterung, Behandlung und Leistungsmessung durch automatisierte Systeme im Vordergrund.

Aus der großen Vielfalt der digitalen Agrartechnologien und ihrer Anwendungsfelder wurden die vier Technikfelder Sensoren, Landmaschinen, Drohnen und Roboter genauer beleuchtet, die von besonderer Bedeutung für die Digitalisierung der Landwirtschaft sind.

Sensoren

Die von Sensoren bzw. Sensorsystemen erfassten Daten bilden eine Grundlage für die Digitalisierung der Landwirtschaft. Die (digitalen) Messdaten der Sensoren müssen dabei mithilfe von Interpretationsalgorithmen in bewirtschaftungsrelevante Parameter übersetzt werden, um daraus mit Entscheidungsalgorithmen konkrete Bewirtschaftungsmaßnahmen ableiten zu können. Nicht nur die Sensortechnik hat in den letzten 20 Jahren große Fortschritte gemacht, sondern auch neue Messprinzipien und Sensortypen wurden erschlossen. Die Ansätze zur Sensordatenverarbeitung und -interpretation wurden deutlich weiterentwickelt.

Eine zunehmende Zahl von kommerziell angebotenen Sensorsystemen für verschiedene Anwendungsfelder sowohl in der Pflanzenproduktion (Bestimmung von Bodeneigenschaften, des Stickstoffbedarfs, der Steuerung der Unkrautbekämpfung, Messung der Erntemenge und -qualität) als auch in der Nutztierproduktion (zur Tierbeobachtung und für das Herdenmanagement, zur Kontrolle der Milchmenge und -qualität, für die tierindividuelle Fütterung und das Stallmanagement) steht inzwischen zur Verfügung – entweder als Einzelanwendungen oder als integraler Bestandteil von Anlagen und Maschinen. Dabei ist eine deutliche Tendenz hin zu Onlineverfahren zu erkennen, bei denen die Sensorwerte in Echtzeit die Ausprägung von Bewirtschaftungsmaßnahmen bestimmen.

Allerdings sind viele Sensorsysteme nach wie vor Insellösungen. Perspektiven der landwirtschaftlichen Sensornutzung liegen deshalb vor allem im Bereich der Entwicklung von Multisensorplattformen bzw. -systemen, die verschiedene Sensoren kombinieren, sowie der Sensordatenfusion, also der Verknüpfung und gemeinsamen Interpretation von Daten unterschiedlicher Einzelsensoren. Neuen Methoden der Datenanalyse und der wissensbasierten Entscheidungsfindung, etwa des maschinellen Lernens, wird dabei eine wichtige Rolle zukommen.

Landmaschinen

Landmaschinen umfassen Traktoren, Erntemaschinen sowie vielfältige Anbaugeräte. Die präzise Ortung (± 2 cm) auf Basis von RTK-Vermessung ist Stand der Technik, wird verbreitet genutzt und stellt einen Einstieg in die Präzisionslandwirtschaft dar (dazu und zum Folgenden Hertzberg et al. 2017, S.3 f.). Insbesondere dort, wo satellitengestützte Navigation Komfortgewinn und Einsparung von Betriebsmitteln (Saatgut, Dünger, Pflanzenschutzmittel, Treibstoff) erlaubt, beginnt sie, sich durchzusetzen. Auf Grundlage zahlreicher Sensoren sowie neuer Möglichkeiten der Informationsverarbeitung werden etliche Assistenzfunktionen, wie z. B. Parallelfahrssysteme oder die automatische Teilbreitenschaltung, bereits standardmäßig angeboten.

Aktuelle Forschungsvorhaben zielen auf eine weitere Automatisierung oder gar eine vollautonome Betriebsweise von Landmaschinen. Eine sichere Erfassung von statischen und dynamischen Hindernissen ist dafür eine wichtige Voraussetzung, die bislang nur unzureichend erfüllt ist. Hier werden weitere Fortschritte im Bereich der Sensorhardware benötigt, vor allem aber auch eine Weiterentwicklung der Verfahren zur automatischen Sensordateninterpretation (Hertzberg et al. 2017, S. 3). Daneben besteht insbesondere im Hinblick auf die Automatisierung von Bewirtschaftungsprozessen noch erheblicher Forschungsbedarf. Ein wichtiger Trend in diesem Zusammenhang ist das Tractor Implement Management, also die Steuerung von Prozessen auf dem Schlag (und entsprechender Traktorfunktionen) durch das Anbaugerät.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die aktuellen Pilotstudien zu autonomen Landmaschinen perspektivisch zu entsprechenden kommerziellen Produkten führen werden.

Drohnen

Drohnen sind unbemannte Luftfahrzeuge, die in der Regel mittels Fernbedienung vom Boden aus gesteuert werden, aber prinzipiell auch vollautonom eingesetzt werden können. Als Sensorträger oder zum Transport von Betriebsmitteln eröffnen Agrardrohnen der Landwirtschaft eine neue Beobachtungs- und Aktionsebene zwischen bodengebundenen Anwendungen einerseits und der satellitenbasierten Fernerkundung andererseits (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. VI ff.). Insbesondere im Bereich der Pflanzenproduktion bieten sich dadurch neue Optionen der Produktionsoptimierung. Erste Anwendungen, wie das Erfassen von Wildschäden aus der Luft oder die Verteilung von Nützlingen in Kulturbeständen, sind bereits etabliert.

Landwirtschaftliche Drohndienstleistungen werden derzeit noch hauptsächlich von spezialisierten Firmen angeboten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Analyse der generierten Bilddaten sehr komplex ist und kostspielige Bildbearbeitungs- und -analysesoftware sowie entsprechendes Know-how erfordert. Für die weitere Verbreitung von Drohnen in der Landwirtschaft werden deshalb vermehrt günstige Lösungen benötigt, die auch von Laien adäquat bedient werden können. Der Echtzeitbetrieb ist in der Regel noch nicht möglich, was einen wesentlichen Nachteil gegenüber bodengebundenen Sensorsystemen darstellt. Außerdem begrenzen die aktuell verwendete Technik (kurze Flugzeiten und geringes Tragevermögen) sowie die relativ hohen rechtlichen Einsatzhürden die Anwendungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft.

Die Nutzung von Drohnen im Agrarbereich besitzt großes Potenzial, das zurzeit bei Weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Während die Weiterentwicklung der Drohnentechnologie (Steuerung, Flugeigenschaften, Akkukapazität etc.) von der Privatwirtschaft umfassend vorangetrieben wird, wird die Adaption der Fluggeräte an landwirtschaftliche Einsatzzwecke bisher nur von spezialisierten Unternehmen oder einzelnen Forschungsgruppen vorgenommen (dazu und zum Folgenden Bernhardt et al. 2017, S. VII u. 56). Spezifischer Entwicklungsbedarf besteht bei montierbaren Werkzeugen, die für landwirtschaftliche Zwecke geeignet sind, z. B. Streueinrichtungen für Saatgut, sowie bei der Datenverarbeitung, wofür passende, auf landwirtschaftliche Einsatzszenarien zugeschnittene Algorithmen und Softwarelösungen benötigt werden.

Roboter

Als Roboter werden Apparate bezeichnet, die komplexe physische Aufgaben mit einer hohen Autonomie durchführen können. In der Landwirtschaft werden sie bislang vor allem in der Tierhaltung zur Automatisierung von arbeitsintensiven Routinearbeiten eingesetzt. AMS, Fütterungsautomaten und Reinigungsroboter sind ausgereift und haben bereits eine gute Marktakzeptanz erreicht. Dahingegen befinden sich Robotiklösungen zur vollständigen Automatisierung pflanzenbaulicher Prozesse (Aussaat, Düngung, Ernte, Pflanzenschutz bzw. Unkrautbekämpfung etc.) u. a. aufgrund der schwer kontrollierbaren Umweltbedingungen und den daraus resultierenden hohen Anforderungen an die sensorische Umfelderkennung und die autonome Steuerung noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Gleichwohl wird auch im Bereich der Feldrobotik an zahlreichen Konzepten gearbeitet und in Bereichen wie der Unkrautbekämpfung oder der Ernte stehen erste praxistaugliche Prototypen zur Verfügung.

Während die weitere Verbreitung von Robotiklösungen in der Nutztierhaltung im Wesentlichen durch die (für einen wirtschaftlichen Einsatz) erforderliche Betriebsgröße begrenzt wird, ist im Ackerbau neben dem technologischen Entwicklungsbedarf auch eine grundlegende Neuausrichtung der Ackerbauprozesse und Pflanzenbausysteme erforderlich. Die bisherige Entwicklung in der Landtechnik ging hin zu immer leistungsfähigeren Maschinen, die damit auch größer und schwerer wurden und sich nicht ohne Weiteres durch robotische Kleinmaschinen ersetzen lassen. Deshalb werden neue Maschinenkonzepte, z. B. im Schwarmverband operierende Einheiten, sowie daran angepasste Pflanzenbausysteme benötigt, die derzeit allerdings noch im Stadium der Grundlagenforschung sind. Gelingt es, hier weiterzukommen, könnte darin auch eine Chance liegen, dem Trend zu immer größeren Landmaschinen und dessen negativen Effekten (zunehmende Bodenverdichtung, wachsender Kapitalbedarf etc.) entgegenzuwirken.

Schlussbemerkung

Bislang bewegen sich die verfügbaren digitalen Agrartechnologien noch durchweg im Rahmen der etablierten Agrartechniken und Bewirtschaftungsverfahren. Der weitere Fortschritt könnte jedoch zu grundlegenden Veränderungen der landwirtschaftlichen Prozesse führen, wie es beispielsweise im Ackerbau mit bestimmten Robotikkonzepten zu erwarten ist. So oder so ist in allen diskutierten Technikfeldern eine dynamische Entwicklung zu erwarten. Das größte Potenzial zur Optimierung landwirtschaftlicher Prozesse wird jedoch in der umfassenden Vernetzung dieser digitalen Einzelanwendungen auf Betriebsebene gesehen. Hinsichtlich der Realisierbarkeit dieser Vision und ihren möglichen Auswirkungen bestehen allerdings noch viele Unklarheiten, die Thema des TAB-Arbeitsberichts Nr. 194 (TAB 2021) sind. Fragen stellen sich einerseits hinsichtlich der technischen Voraussetzungen und rechtlichen Implikationen einer Vernetzung und Integration digitaler Einzelanwendungen. Offen ist zudem, in welchem Umfang die Digitalisierung zu einer ökologisch verträglichen Landwirtschaft beizutragen vermag. Schließlich ist zu beachten, dass die fortschreitende Digitalisierung speziell für die landwirtschaftlichen Betriebe Herausforderungen bereithält, weil neues Wissen und andere Fähigkeiten gefordert sind, tendenziell tiefgreifendere Veränderungen der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse notwendig werden sowie weitreichende wirtschaftliche Entscheidungen getroffen werden müssen.

7 Literatur

7.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Bernhardt, H.; Bauerdick, J.; Mederle, M.; Reger, M. (2017): Drohnen in der Landwirtschaft. Technische Universität München, München

Doluschitz, R.; Gindele, N. (2019): Auswirkungen der Digitalisierung auf landwirtschaftliche Betriebe. Göppingen

Herlitzius, T.; Fehrmann, J. (2017): Stand und Tendenzen der Roboteranwendungen im Bereich der Pflanzen- und Tierproduktion (LandRob). Technische Universität Dresden, Dresden

Hertzberg, J.; Lingemann, K.; Scheuren, S.; Stiene S. (2017): Kurzgutachten zu Stand und Perspektiven autonomer und satellitengestützter Navigation in Landmaschinen. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Osnabrück

Rinza, T. (2017): Sensortechnik in Pflanzen- und Tierproduktion. TriAhead GmbH, Wusterhausen

7.2 Weitere Literatur

Adamchuk, V.; Ji, W.; Viscarra Rossel, R.; Gebbers, R.; Tremblay, N. (2018): Proximal soil and plant sensing. American Society of Agronomy. In: Shannon, D.; Clay, D.; Kitchen, N. (Hg.): Precision agriculture basics. American Society of Agronomy; Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, S. 123–144

Abdullahi, H.; Mahieddine, F.; Sheriff, R. (2015): Technology impact on agricultural productivity: A review of precision agriculture using unmanned aerial vehicles. In: Pillai, P.; Hu, Y.; Otung, I.; Giambene, G. (Hg.): Wireless and satellite systems. Cham, S. 388–400

agrarheute (2014): Im Check: Automatische Rinderfütterung. 2.12.2014, www.agrarheute.com/tier/rind/check-automatische-rinderfuetterung-453398 (11.8.2021)

agrarheute (2015): AMS: Einbox- und Mehrboxanlagen – die Unterschiede. 8.9.2015, www.agrarheute.com/tier/rind/ams-einbox-mehrboxanlagen-unterschiede-443611 (11.8.2021)

agrarheute (2019): SMARTBOW IM FAKTENCHECK. <https://www.agrarheute.com/media/2019-11/smartbow-faktencheck-46626233.pdf> (18.8.2021)

Agrievolution.com (2014): 2014 Global tractor market report. www.cema-agri.org/images/publications/2015-02_Agrievolution_Tractor_Market_Report.pdf (10.8.2021)

Allbach, B.; Leiner, P. (2016): Air-based mobile urban sensing – copters as sensor carriers in smart cities. In: Schrenk, M.; Popovich, V.; Zeile, P.; Elisei, P.; Beyer, C. (Hg.): REAL CORP 2016. Smart Me Up! How to become and how to stay a Smart City, and does this improve quality of life? Beiträge zur 21. Internationalen Konferenz zu Stadtplanung, Regionalentwicklung und Informationsgesellschaft, Wien, S. 67–77

All-electronics.de (2015): Ultraschall-Sensoren im Ernteroboter. 3.6.2015, www.all-electronics.de/ultraschall-sensoren-im-ernteroboter/ (11.8.2021)

Arad, B.; Balendonck, J.; Barth, R.; Ben-Shahar, O.; Edan, Y.; Hellström, T.; Hemming, J.; Kurtser, P.; Ringdahl, O.; Tielen, T.; van Tuijl, B. (2020): Development of a sweet pepper harvesting robot. In: Journal of Field Robotics, S. 1–13

- Arslan, S.; Colvin, T. (2002): Grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction, and errors. In: *Precision Agriculture* 3, S. 135–154
- ATB (Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V.) (2020a): Integriertes System zum ortsspezifischen Management der Bodenfruchtbarkeit, Teilprojekt A: Projektkoordination sowie Entwicklung von Sensorplattformen, UV-, Vis-NIR- und THz-Sensoren – I4S. <https://www.atb-potsdam.de/de/forschung/forschungsprojekte/projektsuche/projekt/projekt/i4s-phase-2> (18.8.2021)
- ATB (2020b): Sensorgestützte online Detektion von Krankheiten im Getreide. Teilprojekt 1. <https://www.atb-potsdam.de/de/forschung/forschungsprojekte/projektsuche/projekt/projekt/fungidetect> (18.8.2021)
- Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Verkehr und digitale Infrastruktur (15. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 19/28179 – Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/29354, Berlin
- Bach, A.; Cabrera, V. (2017): Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. In: *Journal of Dairy Science* 100, S. 7720–7728
- Bangert, W.; Kielhorn, A.; Rahe, F.; Albert, A.; Biber, P.; Grzonka, S.; Haug, S.; Michaels, A.; Mentrup, D.; Hänsel, M.; Kinski, D. et al. (2013): Field-robot-based agriculture: »RemoteFarming.1« and »BoniRob-Apps«. Düsseldorf, www.robots4u.eu/publications/bangert13vdi_agEng/bangert13vdi_agEng.pdf (11.8.2021)
- BayWa AG (2017): Drohnencheck für die Solaranlage. In: *Photovoltaik* 9, S. 48
- BayWa AG (2019): BayWa setzt weltweit ersten kommerziell genutzten Pflück-Roboter ein. 26.3.2019, www.baywa.de/standort/mellrichstadt/baywa_mellrichstadt/news/detail/article/baywa-setzt-weltweit-ersten-kommerziell-genutzten-pflueck-roboter-ein/ (11.8.2021)
- Becker, M.; Steinmetz, T. (2018): Drohnen zum Spritzen in Steillagen. *Der Badische Winzer*, 8.8.2018, www.der-badische-winzer.de/drohnen-zum-spritzen-in-steillagen (11.8.2021)
- Behmann, J.; Mahlein, A.-K.; Rumpf, T.; Römer, C.; Plümer, L. (2015): A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. In: *Precision Agriculture* 16, S. 239–260
- Benet, B.; Lenain, R. (2017): Multi-sensor fusion method for crop row tracking and traversability operations. *Conférence AXEMA-EURAGENG*, 25.2.2017, Paris, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01769644/document> (18.8.2021)
- Berckmans, D. (2014): Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. In: *Revue scientifique et technique* 33(1), S. 189–196
- Berckmans, D. (2017): General introduction to precision livestock farming. In: *Animal Frontiers* 7(1), S. 6–11
- Bernhardt, H. (2017): Technik in der Rinderhaltung. In: Frerichs, L. (Hg.): *Jahrbuch Agrartechnik 2016*. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig, S. 160–171
- Bernhardt, H. (2019): Technik in der Rinderhaltung. In: Frerichs, L. (Hg.): *Jahrbuch Agrartechnik 2018*. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig, S. 182–194
- Bill, R.; Fritsch, D. (1994): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. Band 1 – Hardware, Software und Daten. Heidelberg

- Bitkom (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.); DBV (Deutscher Bauernverband) (2016): Digitalisierung in der Landwirtschaft (Rohleder, B.; Krüskens, B.). 2.11.2016, www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/Bitkom-Presskonferenz-Digitalisierung-in-der-Landwirtschaft-02-11-2016-Praesentation.pdf (11.8.2021)
- BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (Hg.) (2018): Innovationstage 2018. Innovative Ideen – smarte Produkte. 23. und 24. Oktober 2018, Bonn
- Blume, T.; Stasewitsch, I.; Schattenberg, J.; Frerichs, L. (2018): Objekterkennung und Positionsbestimmung in der Landwirtschaft am Beispiel eines Ankoppelassistenten. In: Landtechnik 73(1), S. 1–9
- Blumenthal, B.; Kirchmeier, H.; Marx, M.; Brandhuber, R.; Demmel, M. (2018): Regelspurverfahren im Ackerbau. Ergebnisse aus dem Agro-Klima-Forschungsprojekt Regelspurverfahren – Controlled-Traffic-Farming. Freising-Weihenstephan
- Böhrnsen, A. (2017): Rehkitze vor dem Mähtod retten. In: profi (7), S. 90–92
- Böttinger, S. (2019): Mähdrescher. In: Frerichs, L. (Hg.): Jahrbuch Agrartechnik 2018. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig, S. 152–168
- Buchholtz, J.; Schröder, H.; Tode, J. (2018): Erträge messen statt schätzen. In: Bauernblatt 15. September 2018, S. 6–11, www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/G/grundwasser/Downloads/Bauernblatt_2018_Ertragsmessung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (11.8.2021)
- BLZ (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft) (2020): Hitzestress bei Schweinen: Ställe effektiv kühlen. www.praxis-agrar.de/tier/schweine/hitzestress-bei-schweinen/ (11.8.2021)
- Bundesregierung (2019): Einsatz von Drohnen im Weinbau: Potenziale und rechtliche Rahmenbedingungen. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Carina Konrad, Frank Sitta, Dr. Gero Clemens Hocker und weitere Abgeordneter und der Fraktion der FDP. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/12901, Berlin
- Bürger, A.; Böttinger, S. (2018): Reifen/Reifen-Boden-Interaktion. In: Frerichs, L. (Hg.): Jahrbuch Agrartechnik 2017. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, Braunschweig, S. 62–78
- Büscher, W. (2018): Digitalisierung des Stalles – aktueller Stand und Perspektiven. Vortrag, 27. Hülseberger Gespräche der H. Wilhelm Schaumann Stiftung, 11. bis 13. Juni 2018, Hamburg, https://www.schaumann-stiftung.de/statics/www_schaumann_stiftung_de/downloads/H%c3%bclsenberger%20Gespr%c3%a4che/Einzelvotr%c3%a4ge%202018/doc_hwss_hue_g_2018_3_2_Buescher_Kurzfaz.pdf (11.8.2021)
- Castaldi, F.; Pelosi, F.; Pascucci, S.; Casa, R. (2017): Assessing the potential of images from unmanned aerial vehicles (UAV) to support herbicide patch spraying in maize. In: Precision Agriculture 18(1), S. 76–94
- Chung, S.-O.; Choi, M.-C.; Lee, K.-H.; Kim, Y.-J.; Soon-Jung Hong, S.-J.; Minzan Li, M. (2016): Sensing Technologies for Grain Crop Yield Monitoring Systems: A Review. In: Journal of Biosystems Engineering 41(4), S. 408–417
- CLAAS KGaA mbH (2018): Schnittstellen. Geschäftsbericht 2018. Harsewinkel, www.claas-gruppe.com/blueprint/servlet/blob/2141104/6811ac2e24a8903ee0887244e4a76dbc/geschaeftsbericht-2018-data.pdf (1.7.2021)
- Czerulla, H. (2017): Ready for Take-off. Alles, was man zum Drohnenflug braucht. In: c't Magazin 15, S. 71–74
- Dammer, K.-H. (2014): Sensorgesteuerte Applikation von Pflanzenschutzmitteln. In: ATB (Hg.): Sensoren.Modelle.Erntetechnik. Kolloquium zur Verabschiedung von Dr. Ehlert. Bornimer Agrartechnische Berichte 85, S. 51–57
- DeLaval (2020): DeLaval Body Condition Scoring Kamera. Tägliche, automatisierte Beurteilung der Körperkondition Ihrer Kühe. www.delaval.com/globalassets/inriver-resources/document/brochure/dl958_bcs-kamera.pdf (23.3.2021)

- Demmel, M. (2001): Ertragsermittlung im Mähdrescher – Ertragsmessgeräte für die lokale Ertragsermittlung. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, DLG Merkblatt 303, Frankfurt a.M., www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_303.pdf (11.8.2021)
- Demmel, M.; Muhr, T. (2002): Techniken für Prozessdatenerfassung und Datenmanagement beim Mähdreschereinsatz. In: Wendl, G. (Hg.): Ackerbau der Zukunft. Tagungsband. Landtechnische Jahrestagung, 4.12.2002, Deggendorf, Landtechnik-Schrift Nr. 14, S.59–77
- Deter, A. (2016): ZF zeigt Traktor der Zukunft: Per Fingerwisch ankoppeln. Top agrar online, 20.7.2016, www.topagrar.com/technik/news/zf-zeigt-traktor-der-zukunft-per-fingerwisch-ankoppeln-9382493.html (1.7.2021)
- Deutsche Wildtier Stiftung (2018): Stoppt den Mähtod! 16.7.2018, www.deutschewildtierstiftung.de/aktuelles/stoppt-den-maethod (23.3.2021)
- DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V.) (2010): HarvestLab – Feuchtemessung in Mais. DLG-Prüfbericht 5913F, DLG Testzentrum Technik und Betriebsmittel, Groß-Umstadt, <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/pbdocs/5913F.pdf> (11.8.2021)
- DLG (2013): Optische Sensoren im Pflanzenbau. DLG-Merkblatt 390, DLG Fachzentrum Landwirtschaft, Frankfurt a.M., www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_390.pdf (11.8.2021)
- DLG (2014a): CLAAS Jaguar 960. Feuchtemessung in Mais mit einem NIR-Sensor am Auswurfkrümmer des Feldhäckslers. DLG-Prüfbericht 6168F, DLG Testzentrum Technik und Betriebsmittel, Groß-Umstadt, <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/6168F.pdf> (11.8.2021)
- DLG (2014b): KRONE BiG X 700. Feuchtemessung in Mais mit einem NIR-Sensor am Auswurfbogen eines Feldhäckslers. DLG-Prüfbericht 6237F, DLG Testzentrum Technik und Betriebsmittel, Groß-Umstadt, <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/6237F.pdf> (11.8.2021)
- DLG (2014c): Automatische Fütterungssysteme für Rinder: Technik – Leistung – Planungshinweise. DLG-Merkblatt 398, DLG Fachzentrum Landwirtschaft, Frankfurt a. M., www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_398.pdf (11.8.2021)
- DLG (2019a): CLAAS NIR Sensor (FW: 1.30.7; Kalibrationsmodell: Gras V4.1.1). Feuchtemessung in Gras. DLG-Prüfbericht 7020, DLG TestService GmbH, Groß-Umstadt, <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7020.pdf> (11.8.2021)
- DLG (2019b): New Holland NIR Sensor (Firmware: 1.4.0.33; Kalibrationsmodell: Mais 415-190927). Feuchtemessung in Mais. DLG-Prüfbericht 7032, DLG TestService GmbH, Groß-Umstadt, <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7032.pdf> (11.8.2021)
- DLG (2019c): Pansensor dropnostix Sensor-Bolus. Pansensaftbeständigkeit. DLG-Prüfbericht 7002, DLG TestService GmbH, Groß-Umstadt, <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7002-72.pdf> (18.8.2021)
- Dörr, J.; Fairclough, B.; Henningsen, J.; Jahic, J.; Kersting, S.; Mennig, P.; Peper, C.; Scholten-Buschhoff, F. (2019): Scouting the Autonomous Agricultural Machinery Market. IESE-Report Nr. 041.19/E, Kaiserslautern/Lüdinghausen
- Drücker, H. (2018): Sensoren für die variable Stickstoffdüngung – Funktionsprinzipien und Marktübersicht. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 26.11.2018, www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/348/article/33577.html (11.8.2021)
- EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (2016): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2016. Berlin, www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Gutachten/2016/EFI_Gutachten_2016.pdf (11.8.2021)

- EFSA (European Food Safety Authority) (2008): Scientific report on the effects of farming systems on dairy cow welfare and disease. Report of the Panel on Animal Health and Welfare. In: Annex to the EFSA Journal (2009)1143, 1–38
- Ehlert, D. (1999): Durchsatzermittlung zur Ertragskartierung im Feldhäcksler. In: Agrartechnische Forschung 5(1), S. 19–25
- Ehlert, D. (2010): Techniken für eine sensorgestützte mineralische Düngung. In: Wendl, G. (Hg.): Technik im Ackerbau – schlagkräftig und effizient. Landtechnische Jahrestagung, 10.11.2010, Deggendorf, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, S. 13–22
- Eilers, U. (2012): Anforderungen und Steuerung des Klimas in Rinderställen. Landwirtschaftliches Zentrum für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft, Wild und Fischerei Baden-Württemberg, Aulendorf, www.landwirtschaft-bw.info/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_rh/pdf/a/Anforderungen%20und%20Steuerung%20des%20Klimas%20in%20Rinderst%C3%A4llen.pdf?attachment=true (11.8.2021)
- EIP-Agri (Europäische Innovations-Partnerschaften für Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit) (2019): Projekte der EIP-Agri in Deutschland. (Stand: Januar 2019). https://www.netzwerk-laendlicher-raum.de/fileadmin/sites/ELER/Dateien/01_Hintergrund/EIP/EIP-Projekte/eip-agri-projekte_online_endfassung.pdf (17.12.2019)
- Elliger, A. (2019): Markierung geretteter Kitze. Landwirtschaftliches Zentrum für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft, Wild und Fischerei Baden-Württemberg, WFS-Mitteilungen Nr. 1, Aulendorf
- Eschmann, C.; Ostermann, T. (2017): Unbemanntes Kippflügel-Flugsystem für vollautomatisierte, großflächige Multi-Sensorik-Anwendungen. In: ATB (Hg.): 22. Workshop Computer-Bildanalyse und unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft. 23. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte 93, Potsdam, S. 17–27
- Fasching, C. (2016): Precision Livestock Farming – Überblick über Systeme in der Rinderhaltung und ihre Bedeutung für Tierwohl und Tiergesundheit. In: Nutztierschutztagung Raumberg-Gumpenstein 2016, S. 15–22
- Fasching, C.; Ofner-Schröck, E.; Huber, G.; Taferner, K.; Gasteiner, J. (2018): Sensortechnik im Herdenmanagement. Ikonline Landwirtschaftskammer Steiermark, 7.5.2018, www.lkv-stmk.at/files/leistungspruefung/leistungspruefung_milch/Sensortechnik.pdf (23.3.2021)
- FAST (Institut für Fahrzeugsystemtechnik) (o. J.): Projekt EDA legt Grundlage für Agritechnica-Goldmedaille. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- FBN (Forschungsinstitut für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere) (2020a): Projekt »TriScha – Trittschallanalyse zur Erkennung von Klauenerkrankungen bei Rindern; Evaluierung der entwickelten Trittmustermess- und -auswerteanlage«. www.fbn-dummerstorf.de/forschung/projekte/0048/ (23.3.2021)
- FBN (2020b): Projekt »ERA – SOUNDWEL – Entwicklung eines Werkzeugs zur automatischen Echtzeit-Ermittlung von Emotionen und Wohlbefinden in den Lautäußerungen von Mastschweinen«. www.fbn-dummerstorf.de/forschung/projekte/0021/ (23.3.2021)
- Fendt (2018): Fendt Variotronic Produkte. Stand: Dezember 2018. Marktoberdorf, www.fendt.com/de/geneva-assets/article/3903/534292-fen-variantronic-produkte-de-1901281.pdf (1.7.2021)
- Ferentinos, K.P. (2018): Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. In: Computers and Electronics in Agriculture 145, S. 311–318
- Fernández-Quintanilla, C.; Pena, J.; Andújar, D.; Dorado, J.; Ribeiro, A.; López-Granados, F. (2018): Is the current state of the art of weed monitoring suitable for site-specific weed management in arable crops? In: Weed Research 58, S. 259–272

- Ferreira, M.; Sanchez, A.; Braunbeck, O.; Santos, E. (2018): Harvesting fruits using a mobile platform: A case study. In: *Engenharia Agrícola* 38(2), S. 293–299
- FiBL (Forschungsinstitut für biologischen Landbau) (2019): PigWatch – Tierbeobachtung durch Mensch und Technik. 16.5.2019, www.fibl.org/de/infothek/meldung/pigwatch-tierbeobachtung-durch-mensch-und-technik.html (11.8.2021)
- Fraunhofer Gesellschaft (Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (2018): Automation in agriculture. Lightweight robots harvest cucumbers. München, www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/press-media/2018/February/ResearchNews/lightweight-robots-harvest-cucumbers.pdf (11.8.2021)
- Fraunhofer ITWM (Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik) (2017): Terahertz-Spectrometer. Kaiserslautern, www.itwm.fraunhofer.de/content/dam/itwm/de/documents/MC_Infomaterial/mc_flyer_terahertz-spectrometer_EN.pdf (11.8.2021)
- Fübbeker, A. (2017): Gülleschieber für planbefestigte Boden- oder Spaltenboden. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 24.1.2017, <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/348/article/30355.html> (11.8.2021)
- Gabl, M.; Heller, A. (2019): Möglichkeiten und Grenzen von Low-Cost-RTK-GNSS-Receiver. *AGIT-Journal für angewandte Geoinformatik* Nr. 5, S. 306–314
- Gasso, V.; Sørensen, C.; Oudshoorn, F.; Green, O. (2013): Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts. In: *European Journal of Agronomy* 48, S. 66–73
- Gasteiner, J.; Guggenberger, T. (2014): Langzeitmessung des Vormagen-pH-Wertes bei Milchkühen. Abschlussbericht PanSens III. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning
- Gasteiner, J. (2015): Neuere Erkenntnisse zur Pansenphysiologie und Pansenpathologie bei Milchkühen. In: Gasteiner, J.; Haidn, B.; Oberschätzl, R.; Brandmüller, K.; Schuler, W.: *Automatische Grundfuttervorlage für Rinder*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.), Freising-Weihenstephan, S. 7–23
- Gaus, C.-C.; Minßen, T.-F.; Urso, L.-M.; de Witte, T.; Wegener, J. (2018): Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, http://orgprints.org/32438/1/32437_14NA004_011_012_thuenen_institut_de_Witte_Landmaschinen_Pflanzenbau.pdf (11.8.2021)
- Ge, Y.; Thomasson, J.; Sui, R. (2011): Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. In: *Frontiers of Earth Science* 5(3), S. 229–238
- GEA (GEA Farm Technologies GmbH) (2020): CowView. Die smarte Art, die Herde mobil zu managen, Bönen
- Gebbers, R.; Dworak, V.; Landwehr, N. (2019): Digitalisierung in der Landwirtschaft. Präsentation anlässlich des Besuchs des Staatssekretärs Thomas Kalinski, Staatskanzlei des Landes Brandenburg. ATB, Potsdam
- Gebbers, R.; Schirrmann, M.; Kramer, E. (2014): Sensorgestützte Bodenkartierung – Bodensensoren für die Landwirtschaft. In: ATB (Hg.): *Sensoren. Modelle. Erntetechnik*. Kolloquium zur Verabschiedung von Dr. Ehlert. Bornimer Agrartechnische Berichte 85, S. 39–49
- Geidel, S. (2016): Automatisches Melksystem – ein moderner Arbeitsplatz für Mensch und Kuh. Vortrag zum Tiergesundheitstag der Universität Leipzig VETMED am 1.12.2016. Tiergesundheitstag, Leipzig, www.tll.de/www/daten/veranstaltungen/materialien/melksysteme/300517_geidel.pdf (23.3.2021)
- Ghaffarzadeh, K. (2018): Agricultural Robots and Drones 2018–2038: Technologies, Markets and Players. www.idtechex.com/de/research-report/agricultural-robots-and-drones-2018-2038-technologies-markets-and-players/578 (23.3.2021)

- Gieselmann, C. (2017): Pod-Copter: Ein kabelgebundenes und autonom fliegendes UAV zum Einsatz als zeitlich unbegrenzte Trägerplattform in der Landwirtschaft. In: ATB (Hg.): 22. Workshop Computer-Bildanalyse und unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft. 23. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte 93, Potsdam, S. 159–168
- Göggerle, T. (2019): Neuer Kartoffel-Roder mit Web-Anbindung. Agrarheute, 5.11.2019, www.agrarheute.com/technik/ackerbautechnik/kartoffel-roder-avr-puma-40-561008 (24.3.2021)
- Göttinger, M.; Scholz, C.; Möller, K.; Ruckelshausen, A.; Strothmann, W.; Hinck, S.; Grzonka, S. (2014): GNSS-based navigation for the multipurpose field robot platform BoniRob to measure soil properties. Proceedings 72. International Conference Agricultural Engineering. Berlin, www.hs-osnabrueck.de/fileadmin/HSOS/Homepages/COALA/Veroeffentlichungen/2010-VDI-BoniRob.pdf (24.3.2021)
- Grefe, C. (2016): Wenn der Bauer das will ... ZEIT ONLINE, 28.1.2016, www.zeit.de/2016/05/landwirtschaft-bauern-automatik-computer-folgen (24.3.2021)
- Grenzdörffer, G. (2017): Automatische Ableitung geometrischer Pflanzenparameter aus UAS-Aufnahmen im Feldversuchswesen am Beispiel von Eisbergsalat und Blumenkohl. In: ATB (Hg.): 22. Workshop Computer-Bildanalyse und unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft. 23. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte 93, S. 190–198
- Guo, J.; Li, X.; Li, Z.; Hu, L.; Yang, G.; Zhao, C.; Fairbairn, D.; Watson, D.; Ge, M. (2018): Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. In: Precision Agriculture 19(5), S. 895–911
- Haeffs, J. (2016): Was ist eine Drohne? Alles, was Ihr zu Drohnen wissen müsst. Verein Deutscher Ingenieure e. V., 24.8.2016, <https://blog.vdi.de/2016/08/was-ist-eine-drohne/> (19.8.2017)
- Haidn, B.; Leicher, C. (2017): Automatisches Füttern – Neues aus Praxis und Forschung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hg.): Automatisches Grundfuttervorlage für Rinder. LfL-Information, S. 47–68
- Handler, F.; Blumauer, E. (2015): Der Nutzen der automatischen Teilbreitenschaltung bei Düngung und Pflanzenschutz. BLT Fachtagung »Innovative Agrartechnik«, BLT Wieselburg/HBLFA Francisco Josephinum, Wieselburg
- Harms, J. (2005): Untersuchungen zum Einsatz verschiedener Varianten des Tierumtriebs bei automatischen Melksystemen (Einboxenanlagen). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan, www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_19791.pdf (24.3.2021)
- Harms, J. (2017): Automatisches Melken – Erfahrungen, Tipps und Tricks. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.): Automatisches Melken. LfL-Information, S. 7–18, www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/tagungsband_ams_2017_m%C3%A4rz.pdf (11.8.2021)
- Harms, J. (o.J.): Automatisches Melken – Fragen und Antworten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt_projekte_31_ams-fragen-antworten.pdf (24.3.2021)
- Harms, J.; Wendl, G. (2012): Automatische Melksysteme – Trends, Entwicklungen, Umsetzung. In: 39. Viehwirtschaftliche Fachtagung: Milchproduktion – Status quo und Anpassung an zukünftige Herausforderungen, Irdning, S. 67–74
- Harsany, C. (2017): Thermal Imagery to Count Cattle with UAV Technology in an Industrialized Beef Operation. Poster, Undergraduate Research and Innovation Conference, Thompson Rivers University, Kamloops
- Harsch, M. (o.J.): Welches Melkverfahren passt zu meinem Betrieb? http://lvvg-bw.de/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_rh/pdf/w/Welches%20Melkverfahren%20passt%20zu%20meinem%20Betrieb.pdf (18.8.2021)

- Hartl, U. (2017): Branchenanalyse Landtechnik. Entwicklungstrends und Herausforderungen. Working Paper Forschungsförderung Nr. 052, Hans Böckler Stiftung, Düsseldorf
- Hartmann, W.; Achilles, W. (2018): Milchgewinnung und -lagerung. In: KTBL 2018, S. 331–337
- Hefner, M.; Norremark, M.; Kristensen, H. (2017): Das Konzept des »controlled traffic farming« im ökologischen Gemüseanbau. In: Wolfrum, S.; Heuwinkel, H.; Reents, H.; Wiesinger, K.; Hülsbergen, K.-J. (Hg.): Ökologischen Landbau weiterdenken – Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Berlin, S. 382–385
- Hemmat, A.; Adamchuk, V. (2008): Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. In: Computers and Electronics in Agriculture 63, S. 89–103
- Hertzberg, J. (2018): Robotik im Ackerbau. Vortrag, 27. Hülsenberger Gespräche, H. Wilhelm Schaumann Stiftung, Hamburg www.schaumann-stiftung.de/statics/www_schaumann_stiftung_de/downloads/H%C3%BClsenberger%20Gespr%C3%A4che/bro_hwss_huelsenberger_gespraeche_2018.pdf (11.8.2021)
- Heunemann, F. (2019): Anschlag für Frachtdrohne. Frankfurter Allgemeine, 18.12.2019, www.faz.net/aktuell/rhein-main/darmstaedter-start-up-wingcopter-bekommt-finanzierung-16541114.html (11.8.2021)
- Hillerbrand, F.; Treiber, M.; Bauerdick, J.; Bernhardt, H. (2019): Robotik in der Außenwirtschaft. Entwicklungskonzepte und tendenzielle Einflussmöglichkeiten auf die Prozesssteuerung durch den Landwirt. In: Meyer-Aurich, A.; Gandorfer, M.; Barta, N.; Gronauer, A.; Kantelhardt, J.; Floto, H. (Hg.): Digitalisierung für landwirtschaftliche Betriebe in kleinstrukturierten Regionen – ein Widerspruch in sich? Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 77–82
- Holpp, M.; Anken, T.; Oberholzer, H.; Reiser, R.; Rek, J.; Weisskopf, P.; Zihlmann, U. (2013): Controlled Traffic Farming. Mit permanenten Fahrspuren zu mehr Bodenschonung. Forschungsanstalt Agroscope, ART-Bericht Nr. 761, Ettenhausen
- Hunecke, C.; Brümmer, B. (2018): Faktoren zur Verbreitung von automatischen Melksystemen in Deutschland. Milchtrends.de, www.milchtrends.de/fileadmin/milchtrends/5_Aktuelles/18-06_Melkroboter.pdf (11.8.2021)
- IFR (International Federation of Robotics) (2017): Executive Summary World Robotics 2016 Service Robots. https://ifr.org/downloads/press/02_2016/Executive_Summary_Service_Robots_2016.pdf (11.8.2021)
- Iweka, P.; Kawamura, S.; Morita, A.; Mitani, T.; Okatani, T.; Koseki, S. (2016): Development of a Near-infrared Spectroscopic Sensing System for Milk Quality Evaluation during Milking. CIGR-AgEng Conference, Aarhus
- Janker, A. (2015): Mögliche Konzepte zur Markteinführung einer Flugdrohne zu Wildrettungszwecken unter den Aspekten des § 1 TierSchG. Masterarbeit, Universität Hohenheim, Stuttgart
- John, A.; Clark, C.; Freeman, M.; Kerrisk, K.; Garcia, S.; Halachmi, I. (2016): Review: Milking robot utilization, a successful precision livestock farming evolution. In: Animal 10(9), S. 1484–1492
- John Deere (2019): Ein Sensor, drei Anwendung – HarvestLab 3000. In: John Deere: John Deere Technologien für die Präzisionslandwirtschaft. Walldorf, S. 34–38
- Jung, S.; Ariyur, K. (2017): Strategic Cattle Roundup using Multiple Quadrotor UAVs. In: International Journal of Aeronautical and Space Science 18(2), S. 315–326
- Kamphuis, C.; Pietersma, D.; van der Tol, R.; Wiedemann, M.; Hogeveen, H. (2008): Using sensor data patterns from an automatic milking system to develop predictive variables for classifying clinical mastitis and abnormal milk. In: Computers and Electronics in Agriculture 62, S. 169–181
- Khanal, S.; Fulton, J.; Shearer, S. (2017): An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. In: Computers and Electronics in Agriculture 139, S. 22–32

- Knabel, J. (2016): Diese kostenlose App macht aus einer Drohne einen 3D Scanner. 3Druck.com, 14.2.2016, <https://3druck.com/scanner/diese-kostenlose-app-macht-aus-einer-drone-einen-3d-scanner-0742015/> (11.8.2021)
- Kromer, K.-H.; Degen, P.; Häfner M.; Schmittmann, O. (2001): Teilflächenspezifische Ertragsmessung bei Zuckerrüben. In: Landtechnik 1/2001, S. 26–27
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2013): Automatische Melksysteme. Verfahren – Kosten – Bewertung. KTBL-Schrift 497, Darmstadt
- KTBL (2018): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt
- Kubinger, W.; Peschak, B.; Wöber, W.; Sulz, C. (2017): Bildgebende Sensorsysteme für robotische Systeme in der Agrar- und Landtechnik. In: Elektrotechnik & Informationstechnik 134(6), S. 316–322
- Kutscher, N.; Mielke, B. (2005): 3D Kameras – basierend auf Lichtlaufzeitmessung. Seminar »Autonome Fahrzeuge«, Institut für Informatik, Freie Universität Berlin, www.inf.fu-berlin.de/lehre/SS05/Autonome_Fahrzeuge/3dKameras.pdf (11.8.2021)
- Rapp, P.; MLR (Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz) (2018): Handhabung von Real Time Kinematic (RTK). Kleine Anfrage des Abg. Dr. Patrick Rapp CDU und Antwort des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz. Landtag von Baden-Württemberg, Drucksache 16/3574, Stuttgart
- Landwirtschaftskammer Oberösterreich (2012): AMS: A(utomatische) M(elk) S(ysteme). Umfrageergebnisse von Praxisbetrieben und fachliche Ergänzungen. Linz
- Le Cozler, Y.; Allain, C.; Caillot, A.; Delouard, J.; Delattre, L.; Luginbuhl, T.; Faverdin, P. (2019): High-precision scanning system for complete 3D cow body shape imaging and analysis of morphological traits. In: Computers and Electronics in Agriculture 157, S. 447–453
- Lemmer, J.-E. (2018): Effizienz und Tierwohl »vom Feinsten«! In: Milchprofi 2, S. 2–4
- Lewis, P. (1998): Japan promotes unmanned helicopters for crop dusting. FlightGlobal, 29.4.1998, www.flightglobal.com/japan-promotes-unmanned-helicopters-for-crop-dusting/20824.article (24.3.2021)
- Liakos, K.; Busato, P.; Moshou, D.; Pearson, S.; Bochtis, D. (2018): Machine Learning in Agriculture: A Review. In: Sensors 18(8), S. 2674
- Lilienthal, H. (2014): Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte. In: Journal für Kulturpflanzen 66(2), S. 34–41
- Link-Dolezal, J.; Zecha, C.; Claupein, W. (2012): Sensoreinsatz und Datenanalyse in der Landwirtschaft. In: tm – Technisches Messen 79(11), S. 504–508
- Lottes, P.; Khanna, R.; Pfeiffer, J.; Siegwart, R.; Stachniss, C. (2017): UAV-Based Crop and Weed Classification. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, S. 3024–3031
- Lowenberg-DeBoer, J.; Erickson, B. (2019): Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. In: Agronomy Journal 111(4), S. 1–18
- Luther, H.; Stamer, E.; Junge, W.; Kalm, E. (2004): Analyse der Ansetzvorgänge bei einem automatischen Mehrboxenmelksystem. In: Züchtungskunde 76(3), S. 175–187
- Lutz, K. (2017): Digitalisierung der Landwirtschaft: Revolution mit evolutionärem Charakter. In: Hildebrandt, A.; Landhäußer, W. (Hg.): CSR und Digitalisierung. Berlin/Heidelberg, S. 429–442
- LVLF (Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung) (2006): Bewertung der Anwendung Automatischer Melksysteme (Trilk, J.; Zube, P.; Münch, K.; May, D.). Schriftenreihe des

- Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Potsdam, <https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/files/4988/automelk.pdf> (11.8.2021)
- Mahmood, H.; Hoogmoed, W.; van Henten, E. (2012): Sensor data fusion to predict multiple soil properties. In: Precision Agriculture 13, S. 628–645
- Mainzer, K. (2014): Die Berechnung der Welt: Von der Weltformel zu Big Data. München
- Mavridou, E.; Vrochidou, E.; Papakostas, G.; Pachidis, T.; Kaburlasos, V. (2019): Machine Vision Systems in Precision Agriculture for Crop Farming. In: Journal of Imaging 5(12), S. 89
- McCarthy, C.; Hancock, N.; Raine, S. (2010): Applied machine vision of plants: a review with implications for field deployment in automated farming operations. In: Intelligent Service Robotics 3(4), S. 209–217
- McKinnon, T. (2016): Agricultural Drones: What Farmers Need to Know. Agribotix white papers, www.drone-dusters.com/assets/files/WhatFarmersNeedToKnow_web.pdf (24.3.2021)
- Minßen, T.-F.; Schattenberg, J. (2018): Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen. (Projektverlängerung). Technische Universität Braunschweig, <https://orgprints.org/33539/1/33539-14NA004-uni-braunschweig-frerichs-2018-autonome-landmaschinen.pdf> (24.3.2021)
- Möbius, J. (2016): Wildrettung: Drohnen im Praxis-Check. Agrarheute, 9.5.2016, www.agrarheute.com/pflanze/gruenland/wildrettung-drohnen-praxis-check-523001 (24.3.2021)
- Mohan, V.; Eckstein, M. (2019): LoRa-Technologie ebnet den Weg zur Smart City. Elektronik Praxis, 25.1.2019, www.elektronikpraxis.vogel.de/lora-technologie-ebnet-den-weg-zur-smart-city-a-793622/ (24.3.2021)
- Mu, L.; Cui, G.; Liu, Y.; Cui, Y.; Fu, L.; Gejima, Y. (2020): Design and simulation of an integrated end-effector for picking kiwifruit by robot. In: Information Processing in Agriculture 7(1), S. 58–71
- Mulla, D. (2013): Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. In: Biosystems Engineering 114, S. 358–371
- Mund, F.; Zimmermann, B.; Schlepphorst, R.; Meinardi, D.; Kraft, M. (2019): Mit Sens547oren gegen Trockenstress. Top agrar online, 24.9.2019, www.topagrar.com/acker/aus-dem-heft/mit-sensoren-gegen-trockenstress-11821658.html (11.8.2021)
- Mutzhas, N. (2018): Rehkitz-Rettung aus der Luft! Geo-konzept, 20.3.2018, <https://geo-konzept.de/rehkitz-rettung-aus-der-luft/> (11.8.2021)
- Natrop, C.; Holsteg, M.; Pries, M. (2009): Der Melkroboter: Ein »Buch mit sieben Siegeln«? Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster
- Natürlich Jagd (2018): Kitzrettung mit dem Oktokopter. 14.5.2018, www.natuerlich-jagd.de/im-revier/kitzrettung-mit-dem-oktokopter.html (11.8.2021)
- Neethirajan, S.; Tuteja, S.; Huang, S.-T.; Kelton, D. (2017): Recent advancement in biosensors technology for animal and livestock health management. In: Biosensors and Bioelectronics 98, S. 398–407
- Niemeyer, F. (2014): Konzept und prototypische Umsetzung eines »Four Vision«-Kamerasystems mit Anwendungen in kommunalen und landwirtschaftlichen Bereichen für den Einsatz auf UAVs (Unmanned Aerial Vehicle). Dissertation, Rostock
- Noack, P. (2018): Einsatz von Multi- und Hyperspektralsensoren in der Landwirtschaft. In: Kersten, T.; Gülch, E.; Schiewe, J.; Kolbe, T.; Stilla, U. (Hg.): Tagungsband der 38. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF und PFGK18 in München. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 27, S. 840–850
- Oberschätzl-Kopp, R. (2017): Verhalten von Milchkühen bei statischen und dynamischen Fütterungskonzepten in automatisierten Stallsystemen. Dissertation, München

- Oebel, H.; Gerhards, R. (2006): Kamerateuerte Unkrautkämpfung – eine Verfahrenstechnik für die Praxis. In: Journal of Plant Diseases and Protection, Sonderheft XX, S. 181–187
- Oksanen, T. (2015): Accuracy and Performance Experiences of Four Wheel Steered Autonomous Agricultural Tractor in Sowing Operation. In: Mejias, L.; Corke, P.; Roberts, J. (Hg.): Field and service robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics 105, Cham, S. 425–438
- Paar, J. (2012): Automatische Teilbreitenschaltung – Section Control. Landwirt.com, 8.3.2012, www.landwirt.com/Automatische-Teilbreitenschaltung---Section-Control,,11549,,Bericht.html (11.8.2021)
- Pache, S. (2016). Landwirtschaft 4.0 im Stall – Tierortung und Sensortechnik im Stall. Vortrag simul+ Forum, 19.10.2016, Dresden, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Ökologie des Freistaates Sachsen, www.landwirtschaft.sachsen.de/download/20161019_Pache.pdf (11.8.2021)
- Panasonic (2018): Introducing AI-Equipped Tomato Harvesting Robots to Farms May Help to Create Jobs. 23.5.2018, <https://news.panasonic.com/global/stories/2018/57801.html> (11.8.2021)
- Peschak, B.; Wöher, W.; Otrebski, R.; Sulz, C.; Thalhammer, S. (2017): Sensorfusion für landwirtschaftliche Applikationen. In: Ruckelshausen, A.; Meyer-Aurich, A.; Lentz, W.; Theuvsen B. (Hg.): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Digitale Transformation – Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft. Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 109–112
- Peteinatos, G.; Weis, M.; Andújar, D.; Rueda Ayala, V.; Gerhards, R. (2014): Potential use of ground-based sensor technologies for weed detection. In: Pest Management Science 70(2), S. 190–199
- Priori, S.; Bianconi, N.; Costantini, E. (2013): Can γ -radiometrics predict soil textural data in different parent materials? In: ATB: 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing. Bornimer Agrartechnische Berichte 82, Potsdam, S. 107–112
- PwC (PricewaterhouseCoopers) (2016a): Clarity from above. PwC global report on the commercial applications of drone technology. www.pwc.pl/pl/pdf/clarity-from-above-pwc.pdf (11.8.2021)
- PwC (2016b): Quo vadis, agricola? Smart Farming: Nachhaltigkeit und Effizienz durch den Einsatz digitaler Technologien (Bovensiepen, G.; Hornbach, R.; Raimund, S.). www.pwc.de/de/handel-und-konsumguter/assets/smart-farming-studie-2016.pdf (11.8.2021)
- Rademacher, T. (2019): Trends zur Verfahrenstechnik der Druschfruchternte. DLG Pressemitteilung Nr. T7 vom 11.9., Kassel
- Rahe, F.; Heitmeyer, K.; Biber, P.; Weiss, U.; Ruckelshausen, A.; Gremmes, H.; Klose, R.; Thiel, M.; Trautz, D. (2014): Erste Feldversuche mit dem autonomen Feldroboter BoniRob. In: Proceedings 72. International Conference Agricultural Engineering, Braunschweig. VDI Bericht, Düsseldorf, S. 419–424, www.hs-osnabrueck.de/fileadmin/HSOS/Homepages/COALA/Veroeffentlichungen/2010-VDI-BoniRob.pdf (11.8.2021)
- Ramm, S.; Reckleben, Y. (2019): Sensor- und satellitengestützte Stickstoffdüngung. Ein Weg zu mehr N-Effizienz? In: Getreidemagazin 01/2019, Sonderdruck, www.nextfarming.de/fileadmin/assets/nextfarming/dokumente/pressemitteilungen/Artikel_Getreidemagazin_01_2019_Ramm_und_Reckleben.pdf (11.8.2021)
- Recke, G.; Strüve, H. (2015): Zur Wirtschaftlichkeit der automatisierten Fütterung in der Rinderhaltung. In: Ruckelshausen, A.; Schwarz, H.-P.; Theuvsen, B. (Hg.): Komplexität versus Bedienbarkeit, Mensch-Maschine-Schnittstellen. Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 149–152
- Reckleben, Y. (2014): Sensoren für die Stickstoffdüngung – Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz. In: Journal für Kulturpflanzen Nr. 66(2), S. 42–47
- Reger, M.; Bauerdick, J.; Bernhardt, H. (2018a): Drohnen in der Landwirtschaft: Aktuelle und zukünftige Rechtslage in Deutschland, der EU, den USA und Japan. In: LANDTECHNIK – Agricultural Engineering 73(3), S. 62–80

- Reger, M.; Friedrich, J.; Wörz, S.; Stumpfenhausen, J.; Sieghart, A.; Bernhardt, H. (2018b): Challenges in modern automated Feeding Systems. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers (Hg.): ASABE 2018 Annual International Meeting. St. Joseph
- Reif, G. (2006): Semantische Annotation. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hg.): Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Berlin/Heidelberg, S.405–418
- Reinhard, J. (2013): Structure from Motion, Drohnen & Co. Neue Wege in der Dokumentation archäologischer Ausgrabungen. In: Tugium. Jahrbuch des Staatsarchivs des Kantons Zug, des Amtes für Denkmalpflege und Archäologie, des Kantonalen Museums für Urgeschichte Zug und der Burg Zug 29, S. 177–188
- Reiter, S.; Sattlecker, G.; Lidauer, L.; Kickinger, F.; Öhlschuster, M.; Auer, W.; Schweinzer, V.; Klein-Jöbstl, D.; Drillich, M.; Iwersen, M. (2018): Evaluation of an ear-tag-based accelerometer for monitoring rumination in dairy cows. In: Journal of Dairy Science 101, S. 3398–3411
- Rombach, M.; Münger, A.; Niederhauser, J.; Südekum, K.-H.; Schori, F. (2018): Evaluation and validation of an automatic jaw movement recorder (RumiWatch) for ingestive and rumination behaviors of dairy cows during grazing and supplementation. In: Journal of Dairy Science 101, S. 2463–2475
- Rösch, C.; Dusseldorp, M.; Meyer, R. (2007): Precision Agriculture. Landwirtschaft mit Satellit und Sensor. Frankfurt a.M.
- Ruckelshausen, A. (2014): Neue Sensorentwicklungen – ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten. In: Journal für Kulturpflanzen 66(2), S. 73–79
- Rudd, J.; Roberson, G.; Classen, J. (2017): Application of satellite, unmanned aircraft system, and ground-based sensor data for precision agriculture: a review. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers (Hg.): 2017 ASABE Annual International Meeting. St. Joseph
- Rudolph, W. (2017): Der Trend geht zum Zweit-Sensor. In: eilbote 24, S. 13
- Rudolph, W. (2019): Schnelltest mit dem Sensorspaten. In: eilbote 21, S. 16
- Rügheimer, H. (2016): Elwobot: Mit Einzelradantrieb durch den Weinberg. Intelligente Welt, 18.2.2016, <https://intelligente-welt.de/elwobot-mit-einzelradantrieb-durch-den-weinberg/> (11.8.2021)
- Ruuska, S.; Kajava, S.; Mughal, M.; Zehner, N.; Mononen, J. (2016): Validation of a pressure sensor-based system for measuring eating, rumination and drinking behaviour of dairy cattle. In: Applied Animal Behaviour Science 174, S. 19–23
- Scharffetter, N. (2018): Drohnen bei der Ernte – Wildschaden erkennen und Sauen aufspüren. Jäger, 10.7.2018, www.jaegermagazin.de/jaeger-praxis/praxistipps/drohnen-bei-der-ernte-wildschaden-erkennen-und-sauen-aufspueren/ (11.8.2021)
- Schaumberger, A.; Schellberg, J.; Hollberg, J. (2015): Spektrometrie – moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen. In: Pötsch, E. (Hg.): Bericht über das 20. Alpenländische Expertenforum zum Thema Bedeutung und Funktionen des Pflanzenbestandes im Grünland. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (Hg.), Irdning-Donnersbachtal, S. 23–32
- Schewe, R.L.; Stuart, D. (2015): Diversity in agricultural technology adoption: How are automatic milking systems used and to what end? In: Agriculture and Human Values 32, S. 199–213
- Schmitz, B. (2017): Digitale Landwirtschaft aus der Sicht eines Landmaschinenherstellers. In: (Hg.): Ackerbau – technische Lösungen für die Zukunft. Tagungsband, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, S. 21–26
- Schneider, S.; Bookhagen, B.; Eschbach, P. (2018): Forschung im Fluge. Wie UAV die Wissenschaft bereichern und vor neue Herausforderungen stellen. In: Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 27(3), S. 45–50

- Schollen, F.-P. (2018): Schwelle zur Landwirtschaft 4.0. In: eilbote 29, S. 10
- Schönberger, H. (2014): Winterweizen: Wachstumsregler und Fungizide im Hohertragsbereich. Praxisnah, 17.12.2014, www.praxisnah.de/index.cfm/article/8583.html (11.8.2021)
- Schweizer Landtechnik (2018): »Agronator« – Düngerstreuer-Drohne mit 30 kg Nutzlast. 2.5.2018, www.agrar-technik.ch/zeitschrift/schweizer-landtechnik/newsticker/artikel/agronator-duengerstreuer-drohne-mit-30-kg-nutzlast/ (11.8.2021)
- Schwich, S.; Stasewitsch, I.; Fricke, M.; Schattenberg, J. (2019): Übersicht zur Feld-Robotik in der Landtechnik. In: Frerichs, L. (Hg.): Jahrbuch Agrartechnik 2018/Yearbook Agricultural Engineering. Braunschweig, S. 1–11
- Ševarlić, M.; Nastić, R.; Živković, M.; Živković, L. (2016): New Technologies in Precise Agriculture and Possibilities of Application in Serbia. In: Ševarlic, M. (Hg.): Emerging Technologies and the Development of Agriculture. Thematic Proceedings. Serbian Association of Agricultural Economists, Belgrad, S. 121–137
- Shamshiri, R.; Weltzien, C.; Hameed, I.; Yule, I.; Grift, T.; Balasundram, S.; Pitonakova, L.; Ahmad, D.; Chowdhary, G. (2018): Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. In: International Journal of Agricultural and Biological Engineering 11(4), S. 1–11
- Shi, Y.; Murray, S.; Rooney, W.; Valasek, J.; Olsenholler, J.; Pugh, N.; Henrickson, J.; Bowden, E.; Zhang, D.; Thomasson, J. (2016): Corn and sorghum phenotyping using a fixed-wing UAV-based remote sensing system. In: Valasek, J.; Thomasson, J. (Hg.): Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping. Proceedings Volume 9866, SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, Baltimore
- Simpson, H. (2016): Unmanned helicopter could revolutionise spraying vineyards in Marlborough. Stuff, 8.5.2016, www.stuff.co.nz/technology/gadgets/79714697/unmanned-helicopter-could-revolutionise-spraying-vineyards-in-marlborough (11.8.2021)
- Sokolov, D. (2016): Automatischer Akkuwechsel für Flugdrohnen. Heise online, 11.5.2016, <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Automatischer-Akkuwechsel-fuer-Flugdrohnen-3191491.html> (11.8.2021)
- Solecki, C.; Church, J. (2016): 0206 Comparison of high definition Zenmuse X3 and x5 video cameras onboard unmanned aerial vehicles for future use in precision ranching. In: Journal of Animal Science Nr. 94 (Supplement 5), S. 98
- Stangaferro, M.; Wijma, R.; Caixeta, L.; Al-Abri, M.; Giordano, J. (2016a): Use of rumination and activity monitoring for the identification of dairy cows with health disorders: Part I. Metabolic and digestive disorders. In: Journal of Dairy Science 99, S. 7395–7410
- Stangaferro, M.; Wijma, R.; Caixeta, L.; Al-Abri, M.; Giordano, J. (2016b): Use of rumination and activity monitoring for the identification of dairy cows with health disorders: Part II. Mastitis. In: Journal of Dairy Science 99, S. 7411–7421
- Stangaferro, M.; Wijma, R.; Caixeta, L.; Al-Abri, M.; Giordano, J. (2016c): Use of rumination and activity monitoring for the identification of dairy cows with health disorders: Part III. Metritis. In: Journal of Dairy Science 99, S. 7422–7433
- Steinberger, G. (2012): Methodische Untersuchungen zur Integration automatisch erfasster Prozessdaten von mobilen Arbeitsmaschinen in ein Informationsmanagementsystem »Precision Farming«. Dissertation, München
- Stirnemann, R.; Renius, K. (2019): Gesamtentwicklung Traktoren. In: Frerichs, L. (Hg.): Jahrbuch Agrartechnik 2018. Yearbook Agricultural Engineering. Braunschweig, S. 47–58
- Störkel, H. (2017): Befliegung mit der Flugdrohne erschließen neue Einsatzgebiete. GeoMon, Frankfurt a.M.

- Streicher, G. (2018): Geschichte der Satellitennavigation. ALB Bayern, 1.12.2018, www.alb-bayern.de/De/Technik/SatellitengestuetzteLandtechnik/Informationen/geschichte-satellitenortung-technische_GeschichteSatellitenortung.html (11.8.2021)
- Streicher, G. (2019a): Aufbau und Funktionsweise von Telemetriesystemen. ALB Bayern, Januar 2019, www.alb-bayern.de/De/Technik/SatellitengestuetzteLandtechnik/Telemetrie/technik-funktionsweise_Telemetrie (11.8.2021)
- Streicher, G. (2019b): Einsatzbereiche unterschiedlicher Satellitenortungssysteme. ALB Bayern, Januar 2019, www.alb-bayern.de/De/Technik/SatellitengestuetzteLandtechnik/bauen-bewaessern-biogas_Einsatzbereiche (11.8.2021)
- Strickert, G. (2016): Faktencheck Multikopter: Ähnlichkeiten und Unterschiede zu etablierten VTOL-Konfigurationen. DLR, Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig, <https://www.dglr.de/publikationen/2017/420026.pdf> (11.8.2021)
- Strotmann, K. (2019): Wann rentieren sich Wachstumsregler im Getreide? *agrarheute*, 25.3.2019, www.agrarheute.com/pflanze/getreide/rentieren-wachstumsregler-getreide-552643 (11.8.2021)
- Suter, S. (2019): Drohneneinsatz im Wildschweinmanagement. Vortragsfolien, 1. Erfurter Jagdkolloquium, www.fh-erfurt.de/lgf/fileadmin/FO/Tagungen/3_Suter_Drohnen_Wildschweinmanagement.pdf (11.8.2021)
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. (Kehl, C.; Meyer, R.; Steiger, S.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 194, Berlin
- Tchouchenkov, I.; Schönbein, R.; Segor, F. (2012): Kleine Flugroboter in der Sicherheitstechnik: Möglichkeiten und Grenzen. Kontrollsystem AMFIS verarbeitet Sensordaten, die unbemannte Fluggeräte liefern. In: *Der Sicherheitsdienst* 64(3), S. 12–14
- TU Freiberg (Technische Universität Bergakademie Freiberg) (o. J.): Begriffe zur Automatisierung (DIN 19233). https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/institut-fuer-automatisierungstechnik-6735/download/as_1.pdf (11.8.2021)
- Thünen-Institut (2020): Projekt »Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln«. www.thuenen.de/de/at/projekte/umwelttechnologie-bodenpflanze/sensorgestuetzte-beregnungssteuerung-in-kartoffeln/ (11.8.2021)
- Toth, C.; Jutzi, B. (2017): Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung. In: Heipke, C. (Hg): *Handbuch der Geodäsie. Band »Photogrammetrie und Fernerkundung«*, S. 29–64
- Trilk, J.; Zube, P.; May, D. (2005): Management, Kostenaufwand und Wirtschaftlichkeit Automatischer Melksysteme in Auswertung mehrjähriger praktischer Nutzung. In: *Züchtungskunde* 77(4), S. 256–270
- TU Dresden (Technische Universität Dresden) (2019): Neue Technik für die nachhaltige Landwirtschaft der Zukunft. www.feldschwarm.de/images/Presse/2019-02-27_PI_InfoveranstaltungFeldschwarm.pdf (11.8.2021)
- Tullo, E.; Fontana, I.; Gottardo, D.; Sloth, K.; Guarino, M. (2016): Technical note: Validation of a commercial system for the continuous and automated monitoring of dairy cow activity. In: *Journal of Dairy Science* 99, S. 7489–7494
- Umstätter, C.; Martini, D.; Adrion, F. (2020): Opinion Paper: Digitales Tiermonitoring – Was bringt die Zukunft? In: *Landtechnik* 75(1), S. 14–23
- Unrath, J. (2004): Analyse und Bewertung von Parametern der Produktionsumwelt bei der Milchgewinnung mit automatischen Melksystemen (AMS). Dissertation, Berlin

- Urso, L.-M.; Wegener, J.; von Hörsten, D.; Kottmann, L.; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C. (2017): Der Pflanzenbau der Zukunft – Ist ein Neudenken erforderlich? In: Ruckelshausen, A.; Meyer-Aurich, A.; Lentz, W.; Theuvsen, B. (Hg.): Digitale Transformation – Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft. Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 149–152
- Ustyuzhanin, A.; Intreß, J.; Schirrmann, M.; Chochlov, N.; Dammer, K.-H. (2015): Identifizierung von Beifußblättriger Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) mittels Bildverarbeitung in einem Winterroggenfeld. In: Gesunde Pflanzen 67(4), S. 165–173
- Vázquez-Arellano, M.; Griepentrog, H.; Reiser, D.; Paraforos, D. (2016): 3-D Imaging Systems for Agricultural Applications – A Review. In: Sensors 16(5), S. 618
- Viscarra Rossel, R.; Bouma, J. (2016): Soil sensing: A new paradigm for agriculture. In: Agricultural Systems 148, S. 71–74
- Wagner, J. (2012): Schach dem Mähtod. Von traditionellen Methoden der Wildrettung zu modernen Techniken der »Wildretter«. Abschlussarbeit, Wien,
- Wagner, M. (2017): Was man über Melkroboter wissen muss. melkroboter.net, 1.4.2017, www.melkroboter.net/ (11.8.2021)
- Wang, L.; Li, Z.; Ge, M.; Neitzel, F.; Wang, Z.; Yuan, H. (2018): Validation and Assessment of Multi-GNSS Real-Time Precise Point Positioning in Simulated Kinematic Mode Using IGS Real-Time Service. In: Remote Sensing 10(2), S. 337
- Wanninger, L.; Heßelbarth, A. (2009): GNSS Precise Point Positioning und seine Anwendung in der Hydrographie. In: DVW e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement: Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt. DVW-Schriftenreihe Band 58, Augsburg, S. 3–18
- Webb, P.; Mehlhorn, S.; Smartt, P. (2017): Developing Protocols for Using a UAV to Monitor Herd Health. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers (Hg.): 2017 ASABE Annual International Meeting, St. Joseph
- Weber, K.; Rinke, B.; Alwardt, C. (2018): Dr. Seltsam, oder wie ich lernte, die Drohne zu lieben. Ein Überblick aktueller Debatten zum Drohneneinsatz. In: Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 27(3), S. 11–13
- Wegener, J.; Urso, L.; von Hörsten, D.; Hegewald, H. (2019): Spot farming – an alternative for future plant production. Spot farming – eine Alternative für die zukünftige Pflanzenproduktion. In: Journal für Kulturpflanzen 71(4), S. 70–89
- Weis, M.; Andújar, D.; Peteinatos, G.; Gerhards, R. (2013): Improving the determination of plant characteristics by fusion of four different sensors. In: Stafford, J. (Hg.): Precision Agriculture '13. Wageningen, S. 63–69
- Weller, W. (o. J.): Der rasante Höhenflug der Drohnen. Humboldt-Universität zu Berlin, <https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/18452/14224/1/22nlJeOBTJFFo.pdf> (11.8.2021)
- Weltzien, C. (2016): Digitale Landwirtschaft – oder warum Landwirtschaft 4.0 auch nur kleine Brötchen backt. In: Landtechnik 71(2), S. 66–68
- Weltzien, C.; Gebbers, R. (2016): Aktueller Stand der Technik im Bereich der Sensoren für Precision Agriculture. In: Ruckelshausen, A.; Meyer-Aurich, A.; Rath, T.; Recke, G.; Theuvsen, B. (Hg.): Intelligente Systeme – Stand der Technik und neue Möglichkeiten. Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 217–220
- Werner, J.; Leso, L.; Umstatter, C.; Niederhauser, J.; Kennedy, E.; Geoghegan, A.; Shalloo, L.; Schick, M.; O'Brien, B. (2018): Evaluation of the RumiWatchSystem for measuring grazing behavior of cows. In: Journal of Neuroscience Methods 300, S. 138–146

- Wild, K.; Schmiedel, T. (2017): Anforderungen an den Einsatz von Multikoptern zur kontinuierlichen Informationsbereitstellung für Echtzeitanwendungen im Pflanzenbau. In: Ruckelshausen, A.; Meyer-Aurich, A.; Lentz, W.; Theuvsen, B. (Hg.): Digitale Transformation – Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft. Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 165–168
- WD (Wissenschaftliche Dienste) (2018): Möglichkeiten der Regelung von Satellitensignalen (RTK-Signal oder SAPOS). Deutscher Bundestag, WD 10 – 3000 – 013/18, Berlin
- De Witte, T. (2019): Wirtschaftliche Perspektiven autonomer Kleinmaschinen im Ackerbau. In: Journal für Kulturpflanzen 71(4), S. 95–100
- Wolfger, B.; Jones, B.; Orsel, K.; Bewley, J. (2017): Technical note: Evaluation of an ear-attached real-time location monitoring system. In: Journal of Dairy Science 100, S. 2219–2224
- Xiong, Y.; Ge, Y.; Grimstad, L.; From, P. (2019): An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation. In: Journal of Field Robotics 5(2), S. 1
- Zabawa, L.; Kicherer, A.; Klingbeil, L.; Milioto, A.; Roscher, R.; Töpfer, R.; Kuhlmann, H. (2019): Detektion von Weintrauben in Bildern mit Hilfe von Fully Convolutional Neural Nets. In: ATB (Hg.): 25. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 17. April 2019, Bonn. Bornimer Agrartechnische Berichte 102, S. 15–20
- ZALF (Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung) (2017): Im Drohnenflug dem Wasser auf der Spur. Pressemitteilung vom 3.3.2017, www.zalf.de/de/aktuelles/Seiten/LWH/Drohnenflug.aspx (11.8.2021)

8 Anhang

8.1 Abbildungen

	Seite
Abb. 2.1 Messbereiche und Auflösung von Multispektral- und Hyperspektralsensoren.....	20
Abb. 2.2 Typische Reflexionskurve eines gesunden Pflanzenbestands	27
Abb. 3.1 Funktionsweise der Ortsbestimmung mit GNSS.....	47
Abb. 3.2 Funktionsweise von DGPS-Verfahren	48
Abb. 3.3 Beispielhafte Darstellung von Spurführungsmodi.....	49
Abb. 3.4 Beispielhafte Darstellung einer Teilbreitenschaltung bei einem Düngerstreuer.....	51
Abb. 3.5 Case IH – autonomes Traktorkonzept	56
Abb. 3.6 Gantrysystem ASAWS 9000 bei der Zwiebeelernte	57
Abb. 4.1 Drohnentypen: Quadrocopter (oben links), Oktokopter (oben rechts) und Starrflügler (unten)	60
Abb. 5.1 Bauformen automatischer Melksysteme.....	73
Abb. 5.2 Batch-Milking-System.....	74
Abb. 5.3 Prozesskette zur Realisierung verschiedener Automatisierungsstufen der Fütterung von Rindern.....	75
Abb. 5.4 Automatischer Futterschieber	76
Abb. 5.5 Fütterungsroboter	77
Abb. 5.6 Vollautomatisches Fütterungssystem »Innovado«	78
Abb. 5.7 Reinigungsroboter »Discovery« bei der Arbeit.....	79
Abb. 5.8 »BoniRob«: Prototyp zur Pflanzenphänotypisierung	81
Abb. 5.9 »OZ Weeding Robot«.....	83
Abb. 5.10 Robotereinheit »Xaver«.....	84
Abb. 5.11 »elWObot« mit sensorgesteuertem Pflanzenschutzgerät im Praxistest	85
Abb. 5.12 »Robotic Strawberry Harvester«	86
Abb. 5.13 »Sweeper«	87

8.2 Tabellen

	Seite
Tab. 2.1 Sensorsysteme zur Stickstoffdüngung.....	29
Tab. 4.1 Einsatz- und Forschungsfelder von Drohnen im Pflanzenbau	63
Tab. 4.2 Einsatz- und Forschungsfelder von Drohnen in der Tierhaltung	68

8.3 Kästen

Kasten 3.1 Controlled Traffic Farming	50
Kasten 3.2 Begriffliche Abgrenzung von Automatisierung und Autonomisierung	54
Kasten 4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	61
Kasten 5.1 Projekt »Feldschwarm«	88