

Seminararbeit

Sensorik-gestützte Robotik-Systeme zur Automatisierung landwirtschaftlicher Prozesse

Nico Elsner
Studiengang: Robotik

11. Juni 2023

Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Pfitzner
Betreuer: Prof. Dr. Christian Pfitzner
Ausgabedatum: 23.03.2023
Abgabedatum: 20.06.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Hauptteil	2
3 Systeme	3
3.1 Drohnen	3
3.2 Schienensysteme	3
3.3 Roboterfahrzeuge	4
4 Sensorik	5
4.1 Temperatursensor	5
4.2 Bodenfeuchtigkeitssensor	6
4.3 Nahinfrarotspektroskopie	6
5 Anwendungen in der Landwirtschaft	7
5.1 Saat und Ernte	7
5.2 Tierpflege	7
5.3 Bodenpflege	8
5.4 Bewässerung	8
5.5 Schädlingsbekämpfung	8
6 Künstliche Intelligenz	9
7 Fazit	10

1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten entwickelte sich durch das steigende Bevölkerungswachstum ein weltweiter Mangel an Ressourcen, vor allem an Nahrungsmitteln.

!!!!!!QUELLE FINDEN - AM BESTEN GRAFIK!!!!!!

Die Folge hiervon sind Massentierhaltung, Monokulturen und Gewächshausplantagen. Der Trend geht zur Perfektion der Erträge, bei möglichst geringem Aufwand.

Auch in anderen Bereichen ist die Frage nach schnellen, zuverlässigen Massenproduktionen bereits seit mehreren Jahrzehnten diskutiert.

Vor allem die Automobilindustrie hat bereits früh begonnen sich mit Automatisierung zu beschäftigen. Erste Ansätze gab es hier bereits 1913 durch Henry Ford, welcher die ersten Autos auf dem Fließband zusammenbauen ließ. Dieses System wurde über die Jahrzehnte soweit ausgebaut, dass heutzutage bereits viele Industrieroboter die Bandarbeit nahezu komplett autonom erledigen.

Jedoch gibt es auch in der Landwirtschaft bereits Ansätze, um die Arbeit zu industrialisieren.

In der folgenden Arbeit werden die fundamentalen Grundlagen für eine effiziente Nutzung von sensorbasierten Robotersystemen erläutert. Dabei wird auf bereits existierende Systeme aufgezeigt, die benötigte Sensorik erläutert, sowie auf gesellschaftliche und technische Herausforderungen eingegangen.

2 Hauptteil

In der Landwirtschaft gibt es viele Prozesse, die immer gleich sind. Solche Aufgaben sind perfekt dafür geeignet, um mithilfe von sensorbasierter Robotik automatisiert zu werden. Zudem hat man bei Feldern, Äckern, etc. immer feste Ortspunkte und kann somit sehr gut mit den globalen GPS Koordinaten arbeiten. Im Folgenden wird auf die Grundlagen der benötigten Sensoren, sowie deren Flächenabdeckungsmöglichkeiten eingegangen. Zudem werde ich einige bereits existierende Robotersysteme vorstellen und einen Ausblick geben, wie diese auf Industriegröße skaliert werden können und wo sie bereits Anwendung finden. Im weiteren Verlauf wird dann noch der immer weitverbreitetere Aspekt der künstlichen Intelligenz aufgegriffen und der Bezug zur Landwirtschaft hergestellt. Das Ende der Arbeit fasst die gesammelten Erkenntnisse zusammen und gibt eine Zukunftsprognose zum Thema Automatisierung der Landwirtschaft durch sensorbasierte Robotik.

3 Systeme

3.1 Drohnen

In der Landwirtschaft geht es häufig darum, Sachen (Flüssigkeiten, Samen, etc.) auf dem Feld auszubringen. Auf die herkömmliche Art macht das ein Bauer, mithilfe eines Traktors. Je nach Aufgabe und Feldgröße benötigt ein Landwirt hierfür mehrere kostbare Stunden. Die Ausbringung von Flüssigkeiten wäre ein typischer Anwendungsfall für eine Drohne.



Abbildung 3.1: Sprühdrohne beim Aufbringen von Pestiziden

Die Drohne kann hierbei aus geringer Höhe die entsprechenden Flüssigkeiten über eine Düse ausbringen. Das kann durch Routenplanung komplett automatisiert passieren. Lediglich ein Flüssigkeitstank ist hier benötigt, welcher jedoch innerhalb weniger Minuten vom Landwirt an einer fest vorgegebenen Stelle platziert werden kann. Somit hat die Drohne einen festen Bezugspunkt für das Auffüllen der Flüssigkeit, ähnlich einer Ladestation eines Rasenmähers.

Ein zusätzliches weit verbreitetes Einsatzgebiet von Drohnen im Allgemeinen ist die Überwachung. Auf den Feldern wird dies häufig in Kombination mit Wärmebildkameras dazu verwendet, Tiere in den Feldern aufzuspüren. Durch die Möglichkeit, das Feld aus großen Höhen zu beobachten ermöglicht es dem Farmer, Rehe, Wildschweine und andere Schädlinge schnell und effektiv in seinem Feld aufzuspüren.

3.2 Schienensysteme

Unter Landwirtschaft zählen jedoch nicht nur klassische wie Äcker, Maisfelder, Getreidefelder, sondern unter anderem auch Gewächshäuser. Auch in Gewächshäusern gibt es viele Aufgaben, welche durch Sensoren ersetzt, bzw. sogar verbessert werden können. Der große Vorteil in Gewächshäusern ist die statische Umgebung. Gemeint ist hiermit die festen Punkte, an welchen die Pflanzen wachsen. Dies ermöglicht dem Robotersystem eine ähnliche Arbeitsumgebung wie in einem Warenhaus in welchem die Systeme bestimmte Positionen und Höhen anzufahren. Durch diese festen Bewegungspunkte ergibt sich die Möglichkeit eines Schienensystems, welches bereits in den vorher erwähnten Warenhäusern seinen Einsatz findet. Hier gibt es bereits ein bekanntes Beispiel aus der Heimbeet-Szene:



Abbildung 3.2: Farmbot

Der Farmbot ist ein Schienensystem, was von der Mechanik stark an einen 3D-Drucker erinnert. Verkauft wird hierbei von dem Unternehmen nur die Hardware, sprich Schienen, Motoren, Adapter, Verkabelung und ein Raspberry Pi für die Software.

Die Software ist open-source, also frei im Internet für alle zugänglich, was mehrere Vorteile mit sich bringt: Die Software wird von jedem User gedownloaded und eventuell umgeschrieben. Das bedeutet die Software wird kontinuierlich Probe gelesen. Außerdem können User die Software verändern und anpassen, etwaige Fehler beheben oder Performance-Verbesserungen vornehmen.

3.3 Roboterfahrzeuge

Ein weiteres weit verbreitetes Konzept sind Roboterfahrzeuge mit Reifen- oder Rollenantrieb. Diese werden hauptsächlich bei niedrig wachsenden Sorten zur Erkennung von Schädlingen oder beschädigten Pflanzen genutzt. Dies geschieht durch hochauflösende Kamerasyteme und der Verarbeitung der Ergebnisse, zum Teil mithilfe von künstlicher Intelligenz.



Abbildung 3.3: Farmdroid FD20

Der Farmdroid FD20 arbeitet hierbei komplett autonom und klimaneutral durch Solarpanels. Diese Solarpanels können bei guter Sonneneinstrahlung mehr als genug Energie für den Roboter liefern. Durch zwei zusätzliche Lithium-Ionen Akkus ist es möglich, dass der Farmdroid auch nach Sonnenuntergang autark weiterarbeitet, was einen Dauerbetrieb ermöglicht und damit extrem effizient ist.[1]

Die Aufgabe des modernsten Agrarroboters der Welt[2] ist die Saat und die Unkrautvernichtung. Laut Hersteller hat sich der Farmdroid bereits nach bis zu 1,5 Jahren ammonisiert und arbeitet ab diesem Zeitpunkt aufgrund der Solarpanels mit extrem niedrigen Unterhaltskosten. Zudem ist der Roboter aufgrund der zwei GNSS Empfänger und eines RTK Korrektursignals, welches in der Basisstation sehr genau.[1]

4 Sensorik

4.1 Temperatursensor

Wichtig für das Wachstum von Pflanzen ist natürlich die Temperatur. Je nach Herkunft benötigen Pflanzen unterschiedliche Temperaturen. Um die das Absterben von Pflanzen durch falsche Temperaturen zu verhindern, benötigen Roboter zur Überprüfung Temperatursensoren. Es gibt verschiedene Arten von Temperatursensoren:

Temperatursensoren:

- *IR*

Eine der besten Möglichkeiten, Temperaturen zu messen, ist die Infrarottechnik. Sie bietet einige erhebliche Vorteile, durch die Fähigkeit zur berührungslosen Temperaturmessung. Zum einen wird der zu messende Gegenstand in keinerlei Weise beeinflusst, was zum Beispiel die Gefahr der physischen Zerstörung, durch Berühren empfindlicher Gegenstände, wie Blätter verhindert. Die Entfernung zum Messpunkt ermöglicht auch, sehr hohe Temperaturen zu messen, ohne die Infrarotsensorik durch zu hohe Temperaturen zu gefährden.

Funktionsweise von Infrarotthermographie:

Messgegenstände mit einer Temperatur von $\zeta 900\text{K}$ strahlen Energie ab, der in mithilfe von Wärmebildtechnik sichtbar gemacht werden kann und so als Bild, für den Menschen sichtbar dargestellt werden kann. Hierzu werden die Spektralbereiche Nahinfrarot(NIR), mittleres Infrarot (MIR) und langes Infrarot (LIR) betrachtet. Diese Spektren teilen sich in drei Teile im Bereich von 780 bis 14000nm auf. [3]

- *Thermistoren*

Thermistoren sind Bauteile, welche ihren Widerstand bei steigender Temperatur verringern. Sie bestehen aus Keramik oder Polymeren und die Temperatur wird hierbei sehr genau und schnell ausgegeben. Der Standardwiderstand bezieht sich bei Thermistoren immer auf 25°C . Man unterscheidet zwischen NTC und PTC, wobei sich die Buchstaben hier auf das Verhalten des Widerstands bei Wärmeänderung beziehen. Bei einem NTC sinkt der Widerstand bei steigender Temperatur, bei einem PTC wird er höher. Meist werden NTC für Temperaturmessungen verwendet.[4]

- *Thermoelemente*

Ein weiterer Sensor, welcher für die Bodentemperaturmessung verwendet wird, sind Thermoelemente. Grundlage dieses Sensors ist eine Verbindung zweier Drähte unterschiedlicher Materialien. Die Funktionsweise des Sensors basiert auf thermoelektrischen Effekten. Der sogenannte Peltier-Effekt besagt hierbei, dass bei einer Verbindung von zwei, unter Strom stehenden Drähten aus unterschiedlichen Materialien ein Wärmestrom fließt. Dieser wird an der Verbindungsstelle absorbiert, was dort zu einer Temperaturveränderung des Materials führt. Der Seebeck-Effekt geht auf den Stromfluss bei einer Temperaturänderung ein. Bei der Verbindung der zwei Leiter kommt es zu einem Stromfluss, wenn an beiden Verbindungsstellen unterschiedliche Temperaturen anliegen. [5]

4.2 Bodenfeuchtigkeitssensor

Pflanzen brauchen Wasser. Je nach Sorte mehr oder weniger, nicht zu viel und nicht zu wenig. Um zu wissen, ob bewässert werden soll, benötigt der Roboter Bodenfeuchtigkeitssensoren.

Feuchtigkeitssensoren:

- *kapazitive Sensoren*

Kapazitive Feuchtigkeitssensoren bestehen aus zwei Elektroden und einem Dielektrikum, in welches bei porösen Elektroden Wassermoleküle diffundieren. Dieser Prozess ist abhängig von der relativen Feuchte. Da die Permittivität von Wasser hoch ist steigt die Kapazität des Sensors, was, mithilfe eines Oszillators in eine Frequenz umgewandelt, gemessen werden kann. Kapazitive Sensoren können gut durch bestimmte salzhaltige Lösungen kontrolliert, und bei Fehlern korrigiert werden und sollte auch bei längerem Einsatz gemacht werden.[6]

- *Leitfähigkeitssensoren*

Wie die Meisten bereits wissen, leitet Wasser Strom. Natürlich lässt sich somit über die Leitfähigkeit der Gehalt an Wasser im Boden feststellen.

Das heißt, man leitet sich wie bei Thermistoren und RTDs die Größe über den Widerstand her. Das ist auch der Grund, weshalb es viele Sensoren gibt, die Feuchtigkeit und Temperatur gleichzeitig ermitteln können.

4.3 Nahinfrarotspektroskopie

Nahinfrarotspektroskopie(NIR) verwendet Wellenlängen zwischen 780 und 2500nm, was sich zwischen dem mittleren Infrarotbereich und dem sichtbaren Spektralbereich befindet. Die Besonderheit bei NIR ist, dass dort die Oberton- und Kombinationsschwingungen von Molekülen betrachtet werden. [7] Durch die Reaktion der Moleküle auf NIR-Strahlung, kann man viele Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung von Materialien ziehen. Bei einer Wellenlänge von 880nm kann man zum Beispiel im dritten Oberton eine Reaktion von Fett in der Milch erkennen. [8] Diese Technologie wird in der Landwirtschaft zum Beispiel zum Überwachen von Futtermischverhältnissen verwendet, da man mithilfe von NIR, wie bereits erwähnt, den Anteil an Fett, sowie den Anteil an Proteinen bestimmen kann, ohne das Futter zu beschädigen. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Getreideernte, wobei hier der NIR-Sensor meist am Korntankrohr des Mähdreschers verbaut ist. (Abb. 4.1)



Abbildung 4.1: NIR-Sensor am Mähdrescher

Er dient in diesem Fall der Überwachung der Feuchtigkeit des Saatguts, um dieses vor Schimmel zu schützen.

5 Anwendungen in der Landwirtschaft

5.1 Saat und Ernte

Den meisten Teil des Tages verbringt der Bauer immer noch auf dem Feld. Die einfachste Art hierfür wäre eine Automatisierung der Fahrzeuge. Das heißt ein mobiler Roboter mit Ketten- oder Reifenantrieb, würde durch fest übergebene GPS-Daten Bahnen im Feld abfahren und ernten, bzw. sähen.

Ein wichtiger für das Sähen benötigter Sensor ist ein Ultraschallsensor, zum Messen der Bodenentfernung. Damit können die Samen auf die exakte Tiefe in den Boden eingebracht werden.

Beim Ernten kommt es vor allem auf die Sorte an. Hierbei kommt es weniger auf die Sensorik, als auf die Aktorik an. Das liegt daran, dass alle Pflanzen bei der Ernte ziemlich gleich groß sind, innerhalb ihrer Sorte, welche im Vornherein bekannt ist. Dabei werden die Pflanzen komplett abgeschnitten". Man könnte jedoch bereits beim Erntevorgang durch eine Bildverarbeitung beschädigte, kaputte Ernte aussortieren. Hierfür wäre vor allem ein sehr gutes Kamerasystem nötig, wobei man jedoch Kosten-Nutzen hierbei beachten sollte, da ein komplexes Kamerasystem schnell sehr teuer werden kann.

5.2 Tierpflege

Der Großteil, neben der Feldarbeit, dreht sich bei der Landwirtschaft um den Viehbetrieb. Hier gibt es bereits einige Automatisierungen, wie zum Beispiel Melkstraßen, wo Kühe mithilfe von Melkrobotern nacheinander vollautomatisch gemolken werden. Was zudem sehr leicht zu automatisieren ist, ist die Ernährung jeglicher Tierarten.

Man benötigt lediglich ein System, das Futter von großen Lagerbehältern zu den Ställen/Gehegen bringt. Das kann je nach Bauernhof unterschiedlich aussehen. Die einfachste Umsetzung wäre hierbei meiner Hinsicht nach ein höher gelegenes Schienensystem. Damit gibt es keine Behinderung der sonstigen Arbeit, und man kann das komplette System mittels eines Mikrocontrollers, wie zum Beispiel eines Raspberries, steuern. Die herkömmlichsten Roboter gleichen jedoch herkömmlichen Futtermischwägen, welche vollautomatisiert durch die Ställe fahren. (Abb. 5.1)



Abbildung 5.1: Futterroboter in Kuhstall

5.3 Bodenpflege

Zur Bodenpflege gehören die Analyse von Mineralstoffen, Bodendichte und Bodenbeschaffenheit. Wie der Name schon sagt, wird bei dieser Arbeit ein Mineralwertsensor benötigt.

5.4 Bewässerung

Eine weitere Anwendung, welche in der Landwirtschaft in Kombination mit Sensorik viel Einsatz findet ist Bewässerung. Vorallem durch das immer weniger werdende Grundwasser, sind Pflanzen auf eine externe Bewässerung angewiesen. [9] Bewässerung kann auf unterschiedliche Arten realisiert werden. Man unterscheidet zwischen Flächenbewässerung und punktueller Bewässerung. Flächenbewässerung wird meist mit Sprenkeln realisiert die mittig aufgestellt werden und so die Pflanzen von oben mit Wasser versorgen. Vorallem in sehr heißen Gebieten ist das recht ineffizient, da ein Großteil des Wassers auf der Pflanze verdunstet, bevor es aufgenommen werden kann. Ein sehr viel besseres System für die Freiflächenanwendung sind Schläuche, welche in Bodennähe verlegt werden. Mit vereinzelten Löchern wird durch den Schlauch Wasser abgegeben, welches direkt vom Boden aufgenommen werden kann und unter dem Pflanzen, geschützt vor der Sonne, nicht verdunstet. Der Nachteil an Schläuchen im Freien ist die Anfälligkeit gegenüber Zerstörung durch Tiere, besonders Marder neigen dazu, Schläuche aufzubeißen, womit eine Verluststelle im System besteht, die nur schwer bemerkt und lokalisiert werden kann. Einen weiteren Aspekt, den es zu beachten gilt, wenn Felder in freier Umgebung bewässert werden sollen, ist die dauerhafte Überwachung der Bodenfeuchtigkeit. Wenn es regnet, neigt ein bewässertes System schnell zur Überwässerung. Durch Bodenfeuchtigkeitssensoren (Kapitel 4.2) kann mithilfe eines Mikrocontrollers ein Feuchtigkeitsthreshold eingestellt werden, welcher sicherstellt, dass die Pflanzen genau die richtige Menge an Wasser bekommen. Außerdem gibt es Ansätze, zur passiven Versorgung mit Wasser, wobei man versucht, das Optimum aus Niederschlag und Grundwasser zu nutzen. Ein Beispiel hierfür beschäftigt sich mit der Idee ein T-Stück im Boden einzusetzen. Der obere Teil des T-Stücks soll das schnelle Versickern des Niederschlags verhindern, womit die Pflanzen mehr Zeit haben diesen mithilfe der Wurzeln zu verwenden. Der untere Teil des Teils reicht bis zum Grundwasser. Wie bereits vorher erwähnt, ist der Grundwasserspiegel inzwischen zu niedrig, um von den Pflanzen erreicht zu werden. Mithilfe von kleinen Röhren wird die Kapillarkraft verwendet, um Grundwasser von unten, nach oben zu den Pflanzen zu transportieren, wobei das vollkommen autonom und ohne jegliche Ansteuerung funktioniert. [9]

5.5 Schädlingsbekämpfung

Meist werden Schädlinge, wie Parasiten und Unkraut mithilfe von Pestiziden bekämpft. Diese werden meist unter Zuhilfenahme von Traktoren auf dem Feld ausgebracht. Ein neuerer Ansatz ist die Verteilung mit Drohnen, die wie bereits erwähnt die Flüssigkeit aus der Höhe weitflächig auf den Feldern verteilen könnten. Jedoch ist aufgrund der Gefahr von Verwehung die maximale Flughöhe auf 2m über den Pflanzen, sowie die Geschwindigkeit auf 13km/h beschränkt.[10] Somit erübrigts sich dieser Vorteil, was jedoch bleibt ist die fehlende Bodenzerstörung durch Reifen, welche bei einer traktorbasierten Ausbringung der Fall wäre. Auch in der Atemluft lagern sich Pestizide ab, was bereits 2019 in einer Studie nachgewiesen wurde, in welcher Baumrinde untersucht wurde, wobei man in 47 Proben 104 verschiedene Pestizide finden konnte.[11]

6 Künstliche Intelligenz

Wie auch in allen Bereichen, ist auch in der Landwirtschaft gerade eine sehr starke Entwicklung von künstlicher Intelligenz zu erkennen. Künstliche Intelligenz wird dabei verwendet, um große Datenmengen von Sensoren in der Landwirtschaft zu nutzen, um neuronale Netze zu trainieren. Meist findet KI ihren Einsatz im Bereich der Schädlingsbekämpfung oder im Ausbringen von Saat.[12] Algorithmen zur künstlichen Intelligenz werden zum Beispiel verwendet, um den Lebenszyklus einer Pflanze zu überwachen. Kontrolliert werden kann dieser Prozess über viele verschiedene Arten, zum Beispiel Drohnen, Satelliten oder Ultraleichtflugzeuge. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Start-up Taranis. Taranis benutzt Drohnen, welche mit bis zu 200km/h extrem hochauflösende Aufnahmen von Feldern machen können. In Verbindung mithilfe von Satelliten und Flugzeugen überwachen sie so 80.000 Quadratkilometer Agrarfläche in mehreren Ländern. Diese Pflanzen werden überwacht, und der Landwirt wird sofort informiert, sobald eine Pflanze beschädigt wird. Somit kann dieser die Pflanze im Frühstadium sofort entfernen und noch zur richtigen Zeit eine Neue anpflanzen. Zudem können die Drohnenbilder mithilfe der von Tensorflow unterstützen KI durch ihre hohe Auflösung sogar Insekten und andere Schädling erkennen, bevor die Pflanzen von diesen zerstört werden. Diese Technologie wird in Zukunft noch an Bedeutung zunehmen, da bereits jetzt 20-40 Prozent der Pflanzen durch Unkraut und ähnliches absterben. Zudem wird die Wettervorhersage immer mehr durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz verbessert. Durch die Vielzahl an Satelliten steht eine extreme Menge an Wetterdaten zur Verfügung, die regelmäßig geupdated wird. Da die Ernte sehr anfällig gegenüber Gewitter, speziell Hagel ist, haben mehrere Projekte, wie zum Beispiel das US National Oceanic and Atmospheric Administration bereits begonnen, sich mit dem regionen- und zeitabhängigen Wetterprognosen zu befassen.[13]

7 Fazit

Zusammenfassend kann man davon sprechen, dass auch die Landwirtschaft von dem Umschwung in die Automatisierung von Prozessen betroffen ist. Vor allem in dieser Branche gibt es viele gute Möglichkeiten, Systeme mithilfe von Sensoren zu überwachen und zu beeinflussen. Auch mit dem Hintergrund des Bevölkerungswachstums und der damit einhergehenden Steigerung des Mangel an Lebensmitteln ist es besonders wichtig, jede Chance zu nutzen, die Landwirtschaft so effizient wie möglich zu gestalten. Auch den Aspekt, der Zerstörung des fruchtbaren Boden muss man beachten, beim Gedanken an die Ernährung der immer größer werdenden Menschheit.[14] Systeme wie der Farmbot helfen, jeden freien Platz sinnvoll zu nutzen und animieren die Menschen, auch Zuhause Pflanzen selbst zu züchten. Jedoch muss dies in einem für die Umwelt möglichst ertraglichen Rahmen geschehen. Hierfür sind die Roboter eine große Hilfe, die zum Großteil, im Gegensatz zu den alten dieselbetriebenen Landmaschinen, durch elektrische Antriebe bewegt werden. Durch Solarmodule können diese immer weiter nahezu autark und emissionsfrei arbeiten, was eine hohe Entlastung für die Umwelt darstellt. Dass die konservative Landwirtschaft immer mehr Technik einsetzt, zeigt sich bereits an einigen Umfragen.

Literatur

- [1] Moritz Jungwirth und Franz Handler. „Arbeitszeitbedarf und Arbeitserledigungskosten eines teilautonomen Feldroboters für die Saat und das Hacken von Biozuckerrüben“. In: *Arbeit unter einem DA-CH: Der Landwirt im 4.0-Modus* (2022), S. 147.
- [2] „Roboter auf dem Feld“. In: *Donaukurier* (2022). URL: <https://www.donaukurier.de/archiv/roboter-auf-dem-feld-6203116> (besucht am 28.03.2023).
- [3] Norbert Schuster und Valentin G Kolobrodov. *Infrarotthermographie*. John Wiley & Sons, 2004.
- [4] Ekbert Hering und Gert Schönfelder. „Temperaturmesstechnik“. In: *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete* (2018), S. 393–419.
- [5] Frank Bernhard. „Thermoelemente“. In: *Handbuch der Technischen Temperaturmessung* (2014), S. 831–1047.
- [6] M Koch und S Tenbohlen. „Ein neues Verfahren zur Online-Feuchtemessung in Leistungstransformatoren“. In: *ETG Fachtagung „Diagnostik elektrotechnischer Betriebsmittel“, Fachbericht 104* (2006).
- [7] John S Shenk, Jerome J Workman und Mark O Westerhaus. „Application of NIR spectroscopy to agricultural products“. In: *Practical Spectroscopy Series 27* (2001), S. 419–474.
- [8] Haiyan Cen und Yong He. „Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality“. In: *Trends in Food Science & Technology* 18.2 (2007), S. 72–83.
- [9] Qiang Liu, Noriyuki Yasufuku und Kiyoshi Omura. „Self-watering system for arid area: a method to combat desertification“. In: *Soils and foundations* 58.4 (2018), S. 838–852.
- [10] „Genehmigung von Pflanzenschutzmitteln für die Anwendung mit Drohnen in Weinbau-Steillagen“. In: *Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* (2021). URL: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Fachmeldungen/04_pflanzenschutzmittel/2021/2021_05_26_Fa_Drohnen.html (besucht am 11.06.2023).
- [11] Peter Clausing. „Baumrinden-Monitoring der Pestizid-Belastung über die Luft: Eine toxikologische Bewertung“. In: (2020).
- [12] Svenja Mohr und Rainer Kühl. „Künstliche Intelligenz in der Landwirtschaft“. In: *40. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier*. Hrsg. von Markus Gandorfer u. a. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., 2020, S. 193–198.
- [13] Phil Wennker und Phil Wennker. „Künstliche Intelligenz in der Landwirtschaft“. In: *Künstliche Intelligenz in der Praxis: Anwendung in Unternehmen und Branchen: KI wettbewerbs- und zukunftsorientiert einsetzen* (2020), S. 141–149.
- [14] Bettina Rainer. „Der Diskurs der Überbevölkerung: zu Metaphorik und Funktion einer in Aussicht gestellten globalen Katastrophe“. Diss. 2003.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Sprühdrohne	3
3.2	Farmbot	4
3.3	Farmdroid FD20	4
4.1	Sprühdrohne	6
5.1	Sprühdrohne	7