

Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen

New plant production systems with autonomous agricultural machinery

FKZ: 14NA004, FKZ: 14NA011, FKZ: 14NA012

Projektnehmer:

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Betriebswirtschaft
Bundesallee 63
38116 Braunschweig
Tel.: +49 531 596 5102
Fax: +49 531 596 5199
E-Mail: bw@thuenen.de
Internet: www.thuenen.de/de/bw/

Autoren:

Gaus, Cord-Christian; Minßen, Till-Fabian; Urso, Lisa-Marie; de Witte, Thomas, Wegener, Jens

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Die inhaltliche Verantwortung für den vorliegenden Abschlussbericht inkl. aller erarbeiteten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen liegt beim Autor / der Autorin / dem Autorenteam. Bis zum formellen Abschluss des Projektes in der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft können sich noch Änderungen ergeben.

Schlussbericht

Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen



Zuwendungsempfänger

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume,
Wald und Fischerei
Institut für Betriebswirtschaft
Bundesallee 63
38116 Braunschweig

Technische Universität Braunschweig
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
Langer Kamp 19 a
38106 Braunschweig

Julius Kühn-Institut
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz
Messeweg 11-12
38104 Braunschweig

Förderkennzeichen

2814NA012

2814NA004

2814NA011

Laufzeit und Berichtszeitraum

01.03.2015 – 31.10.2017

Projektleiter

Thomas de Witte

Bearbeiter

Cord-Christian Gaus
Till-Fabian Mißßen
Lisa-Marie Urso

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BÖLN

Bundesprogramm Ökologischer Landbau
und andere Formen nachhaltiger
Landwirtschaft

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.1	Projektziele	2
1.2	Vorgehensweise und Aufbau des Berichtes	2
2	Entwicklung und Bewertung eines Großtechnikszenarios	7
2.1	Stand des Wissens zur autonomen Großtechnik	7
2.1.1	Entwicklungspfade autonomer Großtechnik	7
2.1.2	Verfahrensspezifischer Technik- und Forschungsstand	10
2.1.3	Sicherheit und Haftung für automatisierte Großtechnik	15
2.2	Entwicklung des Großtechnikszenarios	17
2.2.1	Methodik der Szenarioentwicklung	17
2.2.2	Definition der Automatisierung	19
2.2.2.1	Planungsebene Managementsystem	19
2.2.2.2	Umsetzungsebene Betriebsstätte	20
2.2.2.3	Umsetzungsebene Feldbetrieb	20
2.2.2.4	Bereitstellungsebene Infrastruktur	23
2.2.3	Beschreibung der Verfahrenskette	23
2.3	Ökonomische Bewertung des entwickelten Großtechnikszenarios	25
2.4	Zwischenfazit zur Großtechnik	28
3	Entwicklung und Bewertung eines Kleintechnikszenarios	31
3.1	Stand des Wissens zur autonomen Kleintechnik	31
3.1.1	Verfahrensspezifischer Technik- und Forschungsstand	32
3.1.2	Potenzielle Vorteile der Kleintechnik	42
3.2	Entwicklung des Kleintechnikszenarios	45
3.2.1	Hypothesen eines neuen Pflanzenbausystems	45
3.2.2	Technische Konzeptentwicklung des Kleintechnikszenarios	49
3.2.2.1	Bodenbearbeitung und Aussaat	53
3.2.2.2	Düngung	62
3.2.2.3	Pflanzenschutz	70
3.2.2.4	Mechanische Unkrautbekämpfung	73
3.2.2.5	Ernte	76
3.3	Ökonomische Bewertung des entwickelten Kleintechnikszenarios	83
3.4	Zwischenfazit Kleintechnik	92

4	Gesamtfazit und zukünftiger Forschungsbedarf	97
	Literaturverzeichnis	103
	Anhang	A1 - A11

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zukünftige Szenarien der Landtechnik – Autonome Groß- und Kleintechnik	3
Abbildung 2:	Projektorganisation	4
Abbildung 3:	Studie eines autonomen Traktors	8
Abbildung 4:	Elektronische Deichsel bei der Bodenbearbeitung	9
Abbildung 5:	Gantrykonzept "Asalift" bei der Zwiebelerte	10
Abbildung 6:	Funktionsebenen des Produktionssystems	17
Abbildung 7:	Verknüpfung von Aufgabe und Fähigkeiten zu einer Fertigkeit	18
Abbildung 8:	Veränderter Arbeitszeitbedarf für die Feldarbeit eines Modellbetriebs mit autonomer Großtechnik	19
Abbildung 9:	GroßtechnikszENARIO mit autonomer Feldarbeit	24
Abbildung 10:	Unterbrechungsintervalle im GroßtechnikszENARIO	25
Abbildung 11:	Roboter Shakey (links) und Big Dog (rechts)	32
Abbildung 12:	Kongskilde Vibro Crop Robotti	33
Abbildung 13:	Thorvald Robot	34
Abbildung 14:	Fendt Mars Roboter	34
Abbildung 15:	Roboter Bonirob	35
Abbildung 16:	Roboter Ladybird	36
Abbildung 17:	Roboter AgBot II	36
Abbildung 18:	Roboter Naio Oz	37
Abbildung 19:	Roboter PUMAgri	38
Abbildung 20:	Roboter ecoRobotix	38
Abbildung 21:	Labormodell des Roboters zur Schnecken und Mäusebekämpfung	39
Abbildung 22:	Rasenmäherroboter Indego	40
Abbildung 23:	Unkrautroboter Tertill	40
Abbildung 24:	Ertragsverluste durch Schad- und Bodenverdichtung	43
Abbildung 25:	Arbeitserledigungskosten für Bodenbearbeitung in Abhängigkeit der Maschinengröße	43
Abbildung 26:	Beziehung zwischen Ressourceneinsatz für die Pflanzenproduktion und dem damit erzielbaren Ertrag	46

Abbildung 27:	Einfaches Beispiel für Informationsüberlagerung zur Definition von kleinräumigen Unterschieden in Ackerflächen für das Spot Farming	48
Abbildung 28:	Prozess zur Entwicklung der kleintechnischen Konzepte	50
Abbildung 29:	Einflussgrößen auf das Roboterkonzept	51
Abbildung 30:	1: Modulares Roboterkonzept (links) und 2: Kleinstroboter-Konzept (rechts)	52
Abbildung 31:	Bearbeitungshorizonte für Weizenpflanze	55
Abbildung 32:	Abstände zwischen den Pflanzen im Dreiecksverband	55
Abbildung 33:	Teilaufgaben und Wirkprinzip bei der Bodenbearbeitung	57
Abbildung 34:	Erstes Konzept zur tiefen Bearbeitung nach Mais zu Weizen	58
Abbildung 35:	Bodenbearbeitung im modularen Roboterkonzept (links: Gesamtmaschine, Mitte: ohne Schneidscheiben, rechts: Rückansicht)	59
Abbildung 36:	Prozessschritte des möglichen Aussaataggregates	60
Abbildung 37:	Ertragsverlust bei unterschiedlichen Fahrgassenabständen	64
Abbildung 38:	Platzangebot im Bestand	66
Abbildung 39:	Erste Konzeptidee zu kleinen Robotern	67
Abbildung 40:	Nachfüllstation für kleine Roboter	68
Abbildung 41:	Fahrroute der Düngeroboter	69
Abbildung 42:	Pflanzenschutzapplikation mit Feldroboter zwischen den Pflanzen	72
Abbildung 43:	CareRowBot mit Striegel	74
Abbildung 44:	Sequentielle Bearbeitung der einzelnen Fahrspuren	75
Abbildung 45:	Aufteilung des Leistungsbedarfs in einem konventionellen Mähdrescher [%]	77
Abbildung 46:	Gewichtsverteilung in einem konventionellen Mähdrescher [%]	78
Abbildung 47:	Gewichtsverteilung einer Weizenpflanze in [kg/ha]	78
Abbildung 48:	Volumenverteilung einer Weizenpflanze in [m ³ /ha]	79
Abbildung 49:	Untersuchte Konzepte zum Mähdrusch	80
Abbildung 50:	Transportvolumen und -gewichte in den Konzepten	81
Abbildung 51:	Energiebedarf der Mähdruschkonzepte	81
Abbildung 52:	Konzept Weizenernte: Ernteroboter (links) und Transportroboter (rechts)	83

Abbildung 53:	Methodisches Vorgehen zur ökonomischen Bewertung des Kleintechnikszenarios	83
Abbildung 54:	Bedarf an Feldrobotern für die Stickstoffdüngung einer bearbeiteten Fläche von 150 ha	85
Abbildung 55:	Bedarf an Feldrobotern für die Behandlung von 150 ha gegen Fusarien	86
Abbildung 56:	Bedarf an Feldrobotern für die Behandlung von Rost	87
Abbildung 57:	Schätzung eines Preis-Gewichts-Koeffizienten anhand vergleichbarer Technologien	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fruchtfolgen im Modellbetrieb	26
Tabelle 2:	Arbeitszeiterparnis Großtechnikszenario	27
Tabelle 3:	Relevanz von Aufgaben der Bodenbearbeitung für Weizen nach Silomais	54
Tabelle 4:	Pflanzenabstände für Weizen im Dreiecksverband	56
Tabelle 5:	Benötigte Roboter je landwirtschaftliches Verfahren für 150 ha Ackerfläche	87
Tabelle 6:	Berechnung künftiger Verkaufspreise für die entwickelten Roboterkonzepte	90
Tabelle 7:	Arbeits erledigungskosten heute und im Kleintechnikszenario	91

Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Formeln im Anhang

Tabelle A1:	Arbeitspakete	A1
Tabelle A2:	Teilnehmer des erweiterten Projektkreises	A1
Tabelle A3:	Inhalt von Projekttreffen und Fachgesprächen	A2
Tabelle A4:	Teilnehmer Fachbeiräte „Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen“	A3
Tabelle A5:	Besuchte Tagungen und Messen	A4
Tabelle A6:	Veröffentlichungen	A5
Tabelle A7:	Maschinenausstattung des Modellbetriebs	A6
Formel A1:	Berechnung der benötigten Feldroboter je Verfahren	A6
Formel A2:	Berechnung der Arbeitserledigungskosten	A6
Abbildung A1:	Geschätzte Entwicklung der Energiespeicherkosten je kWh im Zeitverlauf	A7
Abbildung A2:	Kostensenkung Stückkosten durch Erfahrungseffekte	A7

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Digitalisierung schreitet in vielen Wirtschaftsbereichen rasant voran und wird künftig Produktionsprozesse und damit die Arbeitswelt verändern. Bereits heute sind erste autonome Autos verfügbar. Somit gilt es nahezu als gesichert, dass sich die autonome Mobilität im Verkehrssektor durchsetzen wird.

Es stellt sich die Frage, inwiefern die Landwirtschaft von diesen Entwicklungen profitieren kann, um mithilfe der neuen Technologien die Herausforderungen der heutigen Produktionssysteme zu lösen.

Beispielsweise wird das Spektrum wirksamer Pflanzenschutzmittel immer enger, sodass landwirtschaftliche Unternehmer zunehmend mit Resistenzfällen konfrontiert werden. Hinzu kommt, dass der Pflanzenschutz insgesamt gesellschaftspolitisch in der Kritik steht und von vielen Seiten eine Senkung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes gefordert wird. Autonome Roboter, die auf dem Feld mechanisch Unkraut bekämpfen oder teilflächenspezifisch Fungizide ausbringen, können einen erheblichen Beitrag leisten, diese Herausforderungen zu meistern. In besonderem Maße würde der Ökolandbau von einer autonomen mechanischen Unkrautbekämpfung profitieren, da er nicht auf den Einsatz von Herbiziden zurückgreifen kann.

Auch die Diskussion um eine abnehmende Biodiversität im ländlichen Raum wird zunehmend intensiver geführt. In diesem Zusammenhang könnten autonome Kleinmaschinen die Chance eröffnen, ohne Nachteile in der Arbeitserledigung, mehrere Kulturen auf dem Acker anzubauen und auf diese Weise die Biodiversität zu erhöhen. Sofern sich Synergieeffekte zwischen unterschiedlichen Pflanzenkombinationen ergeben, könnte der Ackerbau sich diese zu Nutze machen und den Inputeinsatz reduzieren. Auch hiervon würde der ökologische Landbau in besonderer Weise profitieren, da im Ökolandbau keine synthetischen Nährstoffe oder Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden können.

Die bisherige Entwicklung in der Landtechnik hin zu immer größeren Maschinen stößt ebenfalls an ihre Grenzen. Um die Vorgaben der Straßenverkehrsordnung einhalten zu können, sind immer aufwändigere und damit teurere Lösungsansätze erforderlich. Hinzu kommt, dass große Landmaschinen auch hinsichtlich ihrer Bodenverdichtung in der Kritik stehen. Die bisherige Entwicklung wurde vor allem dadurch getrieben, dass mit größeren Maschinen eine höhere Arbeitsproduktivität erreicht werden kann. Bei autonomen Maschinen spielt die Effizienz des „Arbeitskräfteeinsatzes“ hingegen nur noch eine sehr untergeordnete Rolle. Vor diesem Hintergrund könnten autonome Landmaschinen dazu beitragen, den bisherigen Trend zu durchbrechen und deutlich kleinere Maschinenkonzepte ermöglichen.

Allerdings ist noch völlig offen, ob sich die autonome Landtechnik künftig in Richtung Kleinmaschinen entwickelt oder sich autonome Großmaschinen durchsetzen. Vor diesem Hintergrund war es das Ziel des Projektes, die grundsätzlichen Entwicklungslinien vorzudenken und dabei die ökologischen Potenziale abzuschätzen und die ökonomische Machbarkeit zu kalkulieren. Auf diese Weise sollte künftiger Forschungs- und Regelungsbedarf aufgedeckt werden, der es ermöglicht, die künftige Entwicklung frühzeitig in gesellschaftlich gewünschte Bahnen zu lenken.

1.1 Projektziele

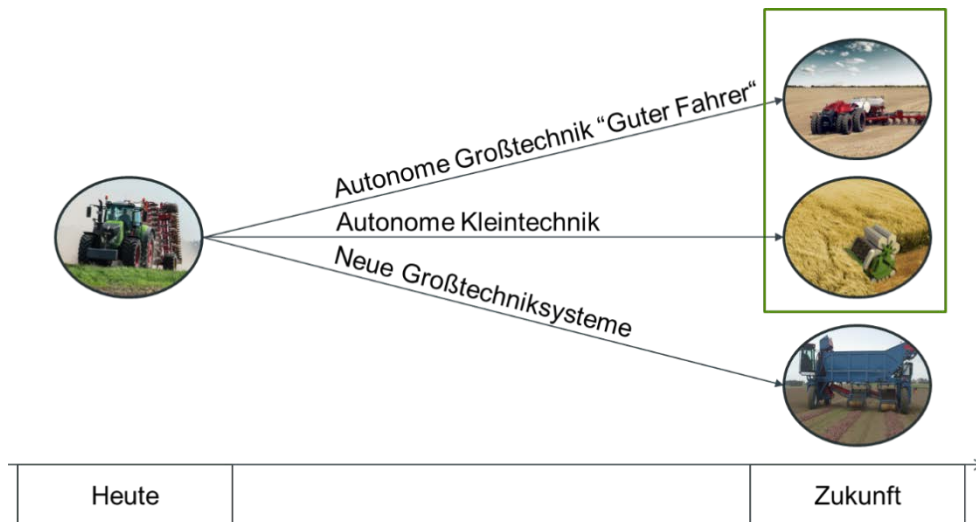
Das Hauptziel dieses Projektes bestand darin, Szenarien für grundlegend verbesserte Pflanzenbausysteme mit autonomen Landmaschinen zu entwickeln und zu bewerten. Zur Einschätzung der Potenziale autonomer Groß- und Kleintechnik waren die wesentlichen Ziele, aus

- pflanzenbaulicher Sicht die Anforderungen sowie die Vor- und Nachteile neuer Anbau- und Bewirtschaftungsmethoden zu ermitteln und entsprechende Anbausysteme anzudenken und zu bewerten;
- technologischer Sicht die Entwicklungspfade für Groß- und Kleintechnik zu beschreiben, die technischen Hürden zu identifizieren und ein erstes durchgängiges Mechanisierungskonzept entsprechend der obigen Anforderungen zu entwerfen;
- ökonomischer Sicht passende Berechnungsmodelle aufzubauen, um die jeweiligen Systeme betriebswirtschaftlich zu bewerten.

Die aufgedeckten Hürden und Wissenslücken in den drei Bereichen sollten in Forschungsfragen münden, um anhand der Arbeitsergebnisse erforderliche Veränderungen der politischen Rahmenbedingungen frühzeitig zu benennen.

1.2 Vorgehensweise und Aufbau des Berichtes

Für die Analyse zukünftiger Pflanzenbausysteme mit autonomer Landtechnik wurden zwei Szenarien entwickelt und untersucht (Abbildung 1): Autonome Großtechnik und autonome Kleintechnik.

Abbildung 1: Zukünftige Szenarien der Landtechnik – Autonome Groß- und Kleintechnik

Quelle: Eigene Darstellung nach Fendt (2017); Case IHC (2017); Pedersen et al. (2013).

Für das Szenario der autonomen Großtechnik wurde untersucht, welche autonomen Fähigkeiten eine Maschine besitzen muss, damit der „gute Fahrer“ ersetzt werden kann. Über einen Abgleich mit dem Stand der Technik und Forschung wurde eine Abschätzung zur jeweiligen Autonomie getroffen. Basierend auf den betriebswirtschaftlichen Daten eines Modellbaubetriebes konnte dann eine ökonomische Analyse des erstellten Szenarios erfolgen.

Für das Szenario der autonomen Kleintechnik wurden pflanzenbauliche Anforderungen und Randbedingungen, wie geforderte Bodenzustände, Düngetermine und Düngemengen, dazu genutzt, passende Maschinenkonzepte zu entwickeln. Es sollten keine Systeme oder Bauteile konstruiert werden, stattdessen sollten die Konzepte dabei helfen, eine Vorstellung für eine mögliche Verfahrenskette mit kleinen Maschinen zu entwickeln.

Die in Abbildung 1 ebenfalls aufgeführten neuartigen Großtechnik- bzw. Mischsysteme zwischen Groß- und Kleintechnik wurden im Projektverlauf bewusst nicht betrachtet. Im hier beschriebenen Pilotprojekt wurden bewusst die beiden Extrema Klein- und Großtechnik betrachtet. In anschließenden Untersuchungen können die festgestellten Stärken und Schwächen der jeweiligen Systeme so kombiniert werden, dass neue Mischsysteme entstehen.

Die Bearbeitung des Projektes orientierte sich an den im Anhang gezeigten und in der Vorhabenbeschreibung beschriebenen Arbeitspakete (Anhang 1: Tabelle A1).

Der Abschlussbericht ist wie folgt aufgebaut: Nach der Einleitung und der Beschreibung der Projektziele wird die Großtechnik erläutert. In diesem Abschnitt werden zu Beginn aktuell bestehende Entwicklungsrichtungen der Großtechnik vorgestellt. Anschließend erfolgt eine kurze Einführung in die sicherheitstechnischen Gegebenheiten. Darauf aufbauend wird das Großtechniksze-

nario entwickelt und die daraus entstandene Verfahrenskette vorgestellt. Darauf aufbauend findet die ökonomische Bewertung statt, die sich an einen ausgewählten Modellbetrieb anlehnt.

Im dritten Abschnitt wird der Stand des Wissens zu alternativen Pflanzenbausystemen und zu aktuellen Entwicklungen im Bereich der Robotik vorgestellt. Basierend darauf wird ein Szenario für ein zukünftiges Pflanzenbausystem erstellt. Das Szenario beschreibt sowohl die oben schon angedeuteten pflanzenbaulichen Ansätze als auch mögliche Maschinenkonzepte. Anschließend erfolgt auch hier eine ökonomische Bewertung.

Der Bericht endet mit einer Darlegung von Forschungsthemen zu offenen oder nur in Ansätzen behandelten Fragestellungen, die während der Erstellung der Szenarien aufgelaufen sind.

Projektorganisation

Aufgrund des interdisziplinären Themas und der Vielzahl an Beteiligten wurde die in Abbildung 2 gezeigte Projektstruktur entworfen.

Abbildung 2: Projektorganisation



Quelle: Eigene Darstellung.

Den Kern stellte das Projektteam mit je einer Mitarbeiterin bzw. einem Mitarbeiter aus den drei beteiligten Instituten dar. Durch eine enge Zusammenarbeit und wechselnde Gruppenarbeitsplätze in den drei Instituten konnte ein stetiger Austausch im Projektteam aber auch mit anderen Mitarbeitern in den drei Instituten erreicht werden.

Im erweiterten Projektkreis wurden in regelmäßigen Abständen die erzielten Ergebnisse diskutiert und die Ausrichtung des Projektteams angepasst. Die Mitglieder des erweiterten Projektkreises sind in im Anhang aufgeführt (Tabelle A2).

Den Begleitkreis stellten weitere wechselnde Mitarbeiter der drei Institutionen dar, die bei speziellen Fragestellungen weiteren Input lieferten. Die Gespräche bzw. Personen werden in Tabelle A3 genannt.

Um die Projektinhalte in regelmäßigen Abständen weiter nach außen zu tragen, wurde ein Fachbeirat mit Vertretern aus Industrie, Beratung, Praxis und Wissenschaft gebildet, in den auch der Projektträger eingebunden war. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Workshops des Fachbeirates organisiert und durchgeführt, die Teilnehmer sind in Tabelle A4 genannt. Auf den Workshops fand ein intensiver Ideen- und Erfahrungsaustausch statt, zudem konnte die Expertise der Teilnehmer in die Projektarbeit eingebunden werden.

Ein weiterer Wissensaustausch fand auf Tagungen und Messen statt, eine Übersicht über die vom Projektteam besuchten Veranstaltungen und die gehaltenen Vorträge gibt Tabelle A5. Zusätzlich sind die Veröffentlichungen zum Projekt in Tabelle A6 aufgelistet.

2 Entwicklung und Bewertung eines Großtechnikszenarios

Nachdem zuvor die Projektziele und das Vorgehen beschrieben wurden, wird nachfolgend ein Szenario für die autonome Großtechnik als Referenzsystem entwickelt und bewertet. Hierfür werden zunächst der Stand des Wissens und abzusehende Entwicklungslinien im Bereich autonome Großtechnik aufbereitet. Darauf aufbauend wird ein Szenario zukünftiger Großtechnik entwickelt und parallel offene Fragestellungen vor allem aus technologischer Sicht beschrieben. Anschließend folgen eine betriebswirtschaftliche Bewertung des Szenarios sowie die Ableitung von Schlussfolgerungen als Zwischenfazit.

2.1 Stand des Wissens zur autonomen Großtechnik

Nachfolgend wird der Stand des Wissens im Bereich autonome Großtechnik beschrieben. Dabei werden zunächst die wichtigsten konzeptionellen Ansätze und Entwicklungslinien der Automatisierung im Ackerbau vorgestellt. Anschließend wird der Stand der Technik sowie weitere Entwicklungen in der Landtechnik beschrieben, die die genannten Entwicklungslinien und die Automatisierung insgesamt fördern. Der Fokus liegt dabei auf Ansätzen zur weiteren Automatisierung der Verfahren, weniger auf Auswirkungen weiterer Entwicklungen im Bereich des Precision Farming. Abschließend werden die wesentlichen rechtlichen Herausforderungen für einen automatisierten Einsatz der Großtechnik erläutert.

2.1.1 Entwicklungspfade autonomer Großtechnik

Im Bereich der Großtechnik werden in der Literatur im Wesentlichen drei Ansätze unterschieden:

- Automatisierung bisheriger Traktorkonzepte mit oder ohne Kabine
- elektronische Deichsel bzw. Master-Slave-Systeme;
- Gantry-Systeme

Nachfolgend werden zunächst die Ansätze im Einzelnen vorgestellt.

Automatisierung bisheriger Traktorkonzepte mit oder ohne Kabine

Entsprechend der Automatisierung im Straßenverkehr ist eine weitergehende Automatisierung der heutigen Technologie einer der nächsten Entwicklungspfade. Forschungsarbeiten zu autonomen Traktoren, beispielsweise in Stentz et al. (2002) und Oksanen (2015) sind mittlerweile in produktnahe Entwicklungen übergegangen. Firmen wie Case IHC (2017) und New Holland (2017) haben in Zusammenarbeit mit der Firma ASI entsprechende Lösungen gezeigt. Die Ansätze gehen von der reinen Autonomisierung bestehender Traktoren bis hin zu Traktoren ohne Kabine (Abbildung 3).

Abbildung 3: Studie eines autonomen Traktors



Quelle: Case IHC (2017).

Die genannten Entwicklungen und Projekte ähneln sich in der Hinsicht, dass vor allem das Fahren des Traktors und das Ein-/Ausheben der Anbaugeräte automatisiert wird. Forschungsaktivitäten im Bereich des Tractor-Implement-Managements (TIM) unterstützen diesen Weg, indem der Traktor durch das Anbaugerät gesteuert wird. Bekannt sind Konzepte, bei denen die Fahrgeschwindigkeit des Traktors in Abhängigkeit der Auslastung von beispielsweise Ladewagen, Güllefässern, Düngerstreuern und Pressen variiert (Ahlers und Nissen 2013; Hoyningen-Huene et al. 2011). Auch moderne Erntemaschinen sind sowohl im Fahr- als auch im Prozessbereich zu großen Teilen bereits automatisiert. Die wesentlichen Herausforderungen zur vollständigen Automatisierung des Traktor-Anbaugerät-Gespans stellen die notwendige vollumfängliche Sensorik sowie die nachgeschalteten Auswertelgorithmen dar. Sämtliche Boden-, Pflanzen- und Prozessparameter, die der heutige Fahrer auch teils intuitiv erfasst und bewertet, müssen aufgenommen und verarbeitet werden.

Elektronische Deichsel bzw. Master-Slave-Systeme

Vor allem aus den oben genannten Gründen der Sensorik, aber auch aufgrund der Sicherheitsbetrachtung, sind Konzepte einer elektronischen Deichsel entwickelt worden. Aus ersten Demonstratoren zu Forschungszwecken (Schattenberg et al. 2010) sind mittlerweile erste produktfähige Lösungen entstanden. Mehrere Großmaschinen arbeiten dabei auf dem Feld, wobei nur eine der Maschinen mit einem Bediener besetzt ist. Dieser Bediener beobachtet auch die unbemannte Maschine und kann damit einen sicheren Betrieb gewährleisten. Die Firma AGCO/Fendt stellte ein entsprechendes Konzept auf der Agritechnica 2011 vor (DLG 2011) (Abbildung 4).

Abbildung 4: Elektronische Deichsel bei der Bodenbearbeitung



Quelle: ACGO (2012).

Die oben genannten Systempfade zukünftiger Großtechnik belassen durch die weitere Nutzung konventioneller Prozessaggregate (Grubber, Sämaschine, Pflanzenschutzspritze etc.) das Pflanzenbausystem in großen Teilen im bisherigen Zustand. Weitere Fortschritte im Bereich des Precision Farming erhöhen zwar beispielsweise Ablagegenauigkeiten von Sämaschinen (Kremmer et al. 2015) oder ermöglichen die selektive Ausbringung von Herbiziden (DLG 2015). Vor allem durch die elektronische Deichsel könnten mehrere kleinere, leichtere und günstigere Maschinen anstelle eines großen und schweren Traktors eingesetzt werden und so die Bodenbeanspruchung reduzieren. Mit diesen Maschinen erscheint jedoch eine Neugestaltung des Pflanzenbausystems in Form von Mischkulturen, engem Streifenanbau oder Agroforstsystemen wenn überhaupt nur eingeschränkt möglich.

Gantry-Systeme

Sogenannte Gantry- oder Brückensysteme erweitern dagegen die Spielräume zur Anpassung der Pflanzenbausysteme. Sie gingen aus den Gedanken des Controlled Traffic Farming (CTF) zur Bewirtschaftung mit minimaler Bodenbeanspruchung hervor. Verschiedene Systeme wurden beispielsweise in Großbritannien und Dänemark entwickelt (Chamen et al. 1994; Pedersen et al. 2013) (Abbildung 5). Ein Überblick über die bisherige Forschung bietet Chamen (2014).

Abbildung 5: Gantrykonzept "Asalift" bei der Zwiebelernte



Quelle: Pedersen et al. (2013).

Aus der Literatur werden als Vorteile der Gantry-Lösungen unter anderem die nicht vorhandene Bodenverdichtung im Arbeitsbereich und damit Ertragssteigerungen und Kraftstoffeinsparungen bei der Bodenbearbeitung beschrieben. Vor allem wenn der CTF-Ansatz über alle Verfahrensschritte beibehalten wird, kommen diese Vorteile zum Tragen. Als weitere Vorteile der Gantry-Lösung wird die Modularität genannt. Da der Gantry die tragende Struktur darstellt, können Anbaugeräte entsprechend günstiger produziert werden. Eine teilflächenspezifische Pflege und Ernte ist durch die gute Erreichbarkeit der Pflanzen ebenfalls möglich. Als Nachteil der Gantry-Lösung gilt vor allem die fehlende Anpassbarkeit an topologische Verhältnisse. Zudem geht durch die notwendigen Fahrgassen produktive Fläche verloren (Gaus et al. 2017). Im Zuge der Diskussion über die zukünftige Energieversorgung elektrisch betriebener Landmaschinen könnten Brückensysteme (evtl. sogar fest installiert) wieder steigende Betrachtung finden (Frerichs und Thielke 2014). Auch Kombinationen aus den genannten Systempfaden sind möglich (Herlitzius et al. 2013).

2.1.2 Verfahrensspezifischer Technik- und Forschungsstand

Im Folgenden werden der Stand der Technik sowie relevante Forschungsarbeiten beschrieben. Die Aufstellung ist nach Verfahrensschritten gegliedert und fokussiert sich auf den Stand der Technik zur Automatisierung. Zur Gliederung innerhalb der Verfahrensschritte sind diese nach den jeweiligen Aufgaben eingeteilt. Entsprechend der oben beschriebenen Herausforderung der Erfassung von Prozessparametern bezieht sich der vorgestellte Stand der Technik im Wesentlichen darauf. Da die Fahraufgabe in den Verfahrensschritten sehr ähnlich ist, wird sie zu Beginn behandelt.

Fahraufgabe

Die überwachte Automatisierung der Fahraufgaben ist mittlerweile durch kommerzielle Systeme wie das John Deere iTec Pro oder den Claas GPSPilot Stand der Technik (siehe auch Reinards et al.

2015). Auch der fahrerlose Betrieb ist aus Forschungsarbeiten (Noguchi et al. 2004; Zhang et al. 2010) in produktnähere Prototypen übergegangen, wie Forschungsarbeiten der Firmen AGCO/Fendt (Jahnke et al. 2013) oder Case/New Holland (CNH) und nicht zuletzt die Arbeiten zum autonomen Fahren auf der Straße zeigen (Winner et al. 2015).

Es kann jedoch nicht direkt von diesen Entwicklungsprojekten und den aktuellen Entwicklungen im Straßenverkehr auf den autonomen Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen geschlossen werden. Die Maschinen haben zwar auf Forschungsniveau entsprechende Sensorik und Auswertalgorithmen, um relevante Umgebungsbedingungen und Maschinenzustände zu messen und Maschinenparameter entsprechend einzustellen. Der Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis erfordert jedoch weitere umfassende Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um eine sichere, betriebsgerechte und gleichzeitig kostengünstige Erfassung und Klassifizierung der Umgebung zu gewährleisten. Einen ersten Ansatz dazu stellt der Normentwurf DIN EN ISO 18497 dar, der ein Prüfobjekt (grüner Körper in Form eines sitzenden Menschen) definiert und damit einen ersten Ansatz für die Klassifizierung gibt. Die Klassifizierung der Umgebung ist Inhalt aktueller Forschungsarbeiten in vielen Bereichen der Robotik (Stiene 2009; Blume et al. 2015; SPARC - The Partnership for Robotics in Europe 2017; Strothmann et al. 2017; José Raúl Ruiz-Sarmiento et al. 2017; Vázquez-Arellano et al. 2016).

Bei einer autonomen Erntemaschine bestehen noch wesentlich höhere Anforderungen an die Klassifizierung von Objekten im Arbeitsbereich der Maschine, da prinzipbedingt ein direkter und dauerhafter Eingriff in die Umgebung stattfindet. Das Schneidwerk eines Mähdeschers „kollidiert“ dauerhaft mit der Umgebung, da er in den Bestand hineinfährt und die Halme abschneidet. Neben der Klassifizierung besteht eine weitere Herausforderung in der extrem kurzen Reaktionszeit bei der Erkennung eines Objektes, welches häufig erst kurz vor dem Schneidvorgang sichtbar wird.

Bodenbearbeitung

Die Aufgaben der Bodenbearbeitung sind: Einebnung, Durchmischung, Lockerung, Krümelung, Zerkleinerung und Rückverdichtung.

In Riegler et al. (2013) wird das Niveau der Bodenoberfläche bzw. deren Gleichmäßigkeit mittels eines Stereo-Kamerasystems mit anschließender Bildauswertung ermittelt. Als Qualitätsparameter werden das Gefälle in Querrichtung, die Mittel- und Medianwerte und Standardabweichungen der Messungen sowie ein „roughness index“ (Colvin et al. 1984) genannt. In Droll (2001) wird zu diesem Zweck ein 2D-Laserscanner verwendet. Beide Systeme stellen recht etablierte Messverfahren dar. Aus dem Straßenverkehr sind zudem Grader-Systeme bekannt, die mit hochgenauen GPS-Systemen ein Oberflächengefälle bis auf wenige Millimeter einstellen können (Trimble).

Die Durchmischung wird zum einen durch die Vermischung von Bodenpartikeln aus unterschiedlichen Tiefen beschrieben, zum anderen durch die Einmischung von organischem Material. Zur

Ermittlung der Bodenbedeckung mit organischem Material vor und nach der Bodenbearbeitung sind ebenfalls vor allem optische Sensoren bekannt. In Pforte (2010) wird eine Schwarz-Weiß-Kamera mit erhöhter Empfindlichkeit im Nah-Infrarot (NIR)-Bereich verwendet. Anhand des Kontrastes zwischen hellem organischem Material und dunklen Bodenpartikeln kann dann der Einmischungsgrad bestimmt werden. Aus der Literatur sind dagegen bisher keine Systeme bekannt, die online die Vermischung der Bodenbestandteile in unterschiedlichen Schichten ermitteln und bewerten.

Ähnlich verhält es sich mit der Ermittlung und Bewertung der Lockerung, Krümelung und Zerkleinerung von Boden- und Pflanzenpartikeln. Auch hier sind keine online-fähigen Systeme bekannt, die die genannten Parameter direkt bestimmen. In Riegler et al. (2014) wird eine indirekte Messung mittels einer Stereo-Kamera beschrieben, die über die Änderung des Volumens auf die Lagerungsdichte bzw. das Porenvolumen schließt. Diese Informationen können dann als Indikator für die Lockerung und Krümelung genutzt werden.

Die Boden- und auch die Rückverdichtung kann mechanisch über Penetrometer bestimmt werden, wie es mittlerweile viele Dienstleister anbieten. Dazu wäre jedoch ein Stillstand des Fahrzeuges oder eine aufwändige Kinematik zur Messung während der Fahrt notwendig. Ein anderes Messsystem basiert auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit mittels einer berührungslosen Induktionsmessung (Geoprospectors GmbH).

Aussaat

Die Aufgaben des Aussaatprozesses sind die Herstellung des Saatbetts sowie die Ablage des Saatkorns (Ablagetiefe, Saatkornabstand in der Reihe, Bedeckung des Korns mit Boden, Rückverfestigung und Andruck des Saatkorns an den Boden).

Ein Messsystem zur Ermittlung der Ablagetiefe heutiger Sägeräte wurde unter anderem in Shari-pov et al. (2016) entwickelt und untersucht. Dazu wurde die Position eines Messrahmens am Sägerät unter anderem mittels einer Totalstation und Lasertracking vermessen und die Messwerte in Relation zu gemessenen mechanischen Belastungen des Messrahmens gesetzt. Auf Basis dieser Ergebnisse könnte in Zukunft eine kostengünstige kontinuierliche Messung der Ablagetiefe durch die Messung der mechanischen Belastungen erfolgen. In Kremmer et al. (2015) wird ein System vorgestellt, bei dem der pneumatisch erzeugte Anpressdruck eines Säaggregats gleichzeitig zur Ermittlung der Ablagetiefe genutzt wird.

Die Ermittlung und Einstellung des Saatkornabstands ist mittlerweile bei Einzelkornsämaschinen für Mais und Rüben Stand der Technik und konnte bei dem oben genannten Aggregat durch eine definierte Förderung des Saatkorns durch ein Bürstenband noch gesteigert werden. In Griepentrog et al. (2005) und Griepentrog und Blackmore (2007) werden die Ablagegenauigkeit und die entsprechende Kartenerstellung einer mit einem RTK-GPS ausgerüsteten Einzelkornsämaschine als ausreichend genau für die spätere Fahrzeugführung und Einzelpflanzenbehandlung beschrieben. Die Vereinzelung von Getreidesaatgut stellte lange eine Herausforderung dar (Mülle

und Heege 1980). Teils wurden Geräte aus dem Gemüseanbau genutzt, die jedoch nur mit sehr geringen Arbeitsgeschwindigkeiten betrieben werden konnten (Baumecker et al. 2016). Mittlerweile sind jedoch Vereinzlungssysteme für Getreide ebenfalls Stand der Technik (Meinel 2016; Funk 2013). Zwar ist die einwandfreie Funktion der bestehenden Systeme in der Praxis nicht immer gegeben, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei entsprechender Nachfrage verbesserte Systeme entwickelt werden.

Die Aufgaben „Bedeckung des Korns im Boden“ und „Rückverfestigung und Andruck des Saatkorns an den Boden“ entsprechen in großem Umfang den bei der Bodenbearbeitung beschriebenen Aufgaben „Rückverdichtung“ und „Einebnung“.

Mineraldünger- und Pflanzenschutzausbringung

Zur korrekten Ausbringung von Mineraldünger oder Pflanzenschutzmitteln müssen folgende Parameter betrachtet werden: Streubild bzw. Spritzbild, Arbeitsbreite durch Wurfgeometrie/Grenzstreueinrichtungen bzw. Düsensaltungen, Lage des Streuers bzw. des Gestänges, Überprüfung der ausgebrachten Menge.

Das Streubild und die Arbeitsbreite der heute vor allem angewendeten Mineraldüngerstreuer werden durch die Drehzahl der Streuscheiben, die Lage der Streuschaufeln sowie des Auftreffpunktes des Düngers auf die Streuscheibe bestimmt und eingestellt. Zur Messung des Streubildes (und damit der Arbeitsbreite) werden heute vor allem Radarsensoren eingesetzt, die sich direkt an den Streuscheiben befinden und den Weg der herausgeschleuderten Düngeköerner bestimmen (Hartmann et al. 2014; Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG 2017b). Aus der Flugbahn und der Geschwindigkeit der Düngerkörner lässt sich dann die Arbeitsbreite ermitteln. Mit elektrisch betriebenen Düngerstreuern lässt sich zudem die Scheibendrehzahl unabhängig vom Traktor variieren (Rauch Landmaschinenfabrik GmbH 2017a). Das Streubild wird jedoch auch durch Windeinflüsse, die nach den beschriebenen Radarsensoren auftreten, beeinflusst. In Rahe und Scheufler (2013) wird ein Messsystem zur Windmessung und die daraus abgeleiteten Maschineneinstellungen zur Windkompensation vorgestellt. Elektrisch oder hydraulisch zuschaltbare Grenzstreueinrichtungen sind mittlerweile Stand der Technik.

Das Spritzbild einzelner Düsen wird heute durch den Fahrer beurteilt, für Nachteinsätze sind entsprechende Beleuchtungen verfügbar. Es ist gut vorstellbar, das Spritzbild mittels einer oder mehrerer günstiger Kameras und anschließender Bildauswertung automatisiert zu überwachen. Die Einstellung der Arbeitsbreite durch die Schaltung einzelner Düsen ist mittlerweile ebenfalls Stand der Technik (Herbst 2016).

Die Lage des Streuers ist über die Dreipunktaufnahme einstell- und messbar. Zur Regelung der Lage des Spritzgestänges um die x-Achse sind aktive und passive Systeme Stand der Technik. Zudem sind seit einigen Jahren Systeme auf dem Markt, die den Abstand zum Bestand erfassen und entsprechend regeln (Herbst 2016).

Die Messung der Ausbringmenge erfolgt bei Düngerstreuern entweder durch eine Wiegeeinrichtung am Streuer (Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG 2017c) oder über die Messung des Drehmomentes der Streuscheiben und entsprechende Kalibrierungen (Rauch Landmaschinenfabrik GmbH 2017b). Die Ausbringmenge von Pflanzenschutzspritzen wird über das Fördervolumen der Pumpe eingestellt.

Mechanische Unkrautbekämpfung

Die mechanische Unkrautbekämpfung bietet ein hohes Potenzial zur Automatisierung. Beispielsweise kann schon bei der Aussaat die Position der Saatkörner (und späteren Pflanzen) erfasst und kartiert werden (Griepentrog et al. 2005). Die anschließende Unkrautbekämpfung kann durch Striegel oder Hacken erfolgen, die zum einen durch den Traktor entlang der angelegten Saatreihen geführt werden. Zum anderen kann eine Unterstützung durch kamerabasierte Systeme erfolgen, die Pflanzen von Unkräutern unterscheiden und den Traktor oder das Gerät selber über einen Verschieberahmen steuern. Zudem ist damit auch eine Bekämpfung innerhalb der Reihen möglich (Landwirtschaftsverlag GmbH 2005; Garford Farm Machinery Ltd 2017).

Ernte

Die Aufgaben eines Mähdreschers lassen sich in „Schneiden und Aufnehmen“, „Dreschen und Abscheiden“, „Reinigen und Sammeln“ und „Stroh häckseln und verteilen“ zusammenfassen.

Das Schneiden erfolgt durch einen Messerbalken, anschließend werden die Pflanzen über die Einzugsschnecke oder Förderbänder und den Schrägförderer dem Dreschorgan zugeführt. Die Erfassung des Gutstroms ist in jedem Förderorgan der Maschine notwendig. Die Überwachung des Gutstroms in der Einzugsschnecke und dem Schrägförderer ist auf heutigen Maschinen zum einen als Überlastsicherung, zum anderen als Durchsatzmessung ausgeführt. Über Rutschkupplungen oder Lastmessungen (Drehmoment oder Drehzahl) werden die Förderorgane überwacht und bei Überschreiten entsprechender Grenzwerte abgeschaltet, um eine Verstopfung der Maschine zu vermeiden. Zur Durchsatzmessung werden häufig ebenfalls Lastmessungen an den Förderorganen vorgenommen und über Look-Up-Tables entsprechende Rückschlüsse auf die geförderten Massen gezogen. Beispielsweise wird die Leistung an den Messerbalken des Schneidwerkes aufgenommen oder die Förderhöhe im Schrägförderer wird gemessen und daraus auf den Durchsatz an Pflanzenmaterial geschlossen. Diese Systeme werden auch heute schon als ein Eingang in eine Durchsatzregelung genutzt.

Nach der Förderung des Materials in das Dreschorgan muss hier eine sensorische Erfassung des Dreschvorganges erfolgen. Aufgrund der Umgebungsbedingungen im Dreschorgan lässt sich der Dreschprozess selber kaum sensorisch erfassen, sehr wohl aber seine Auswirkungen, vor allem in Bezug auf den Kornzustand. Ähnliches gilt für die Vorgänge in den Reinigungsorganen, wobei hier vor allem der Nicht-Korn-Bestandteil (NKB) im Kornbunker sowie die ermittelten Verluste als Sensorgröße dienen. Die Verluste werden über Verlustsensoren gemessen, der NKB und die Kornbeschädigung über Kamerasysteme am Kornelevator (Echer und Krause 2014). Die entsprechenden verarbeitenden und ausführenden Fertigkeiten sind mittlerweile in Form von Assistenzsystemen

Stand der Technik (Bormann und Middelberg 2015; Terörde und Neu 2014). In weiteren Forschungsprojekten wird zudem untersucht, ob ein Sensor (beispielsweise ein Radarsensor) im früheren Prozessverlauf, beispielsweise in der Reinigung solcher Systeme, noch weiter unterstützen kann (Beckmann et al. 2015).

Die Überprüfung des Durchsatzes im Häckselaggregat kann wie oben beschrieben ebenfalls durch eine Leistungsmessung an den Antriebselementen erfolgen. Die sensorische Erfassung der Verteilung ist dagegen aufgrund der Umweltbedingungen kaum zu erfassen. Bekannt sind Systeme, die die aktuelle Windgeschwindigkeit und die Neigung der Maschine um die x-Achse messen und diese Informationen in Form einer Steuerung zur Einstellung der Strohverteileinrichtungen nutzen (Terörde et al. 2013).

Feldlogistik

Die Feldlogistik hat zur Aufgabe, die geernteten Pflanzenbestandteile vom Feld zum Hof oder zu anderen Lagern zu transportieren. Die Fahraufgaben entsprechen den oben genannten Fahraufgaben zur Bodenbearbeitung und sind damit sehr gut autonom vorstellbar. Die Koordination und die Routenplanung für einen Ernte- und Abfahrprozess wurde beispielsweise im Forschungsprojekt Marion gezeigt (DFKI GmbH 2013).

2.1.3 Sicherheit und Haftung für automatisierte Großtechnik

Eine große Herausforderung für diese liegt darin, die Haftungsfragen zur „Betriebssicherheit“ auszuräumen. Auch im Straßenverkehr stellt dies eine der wesentlichen Hürden dar (Maurer et al. 2015). Im Gegensatz zu den Bedingungen des autonomen Straßenverkehrs sind die Umgebungsbedingungen im Ackerbau wesentlich unstrukturierter. Vor allem im Bereich der Umfelderkennung und -interpretation gibt es noch erheblichen Forschungsbedarf. Zum Verständnis der Zusammenhänge der Sicherheitsbetrachtungen wird im Folgenden ein kurzer Einblick in relevante Gesetze und Richtlinien zur Risikoanalyse und zur Maschinensicherheit gegeben. Diese Betrachtungen liefern die Grundlage für die Abschätzung der Autonomie im Großtechnikszenario aus Sicht der Maschinensicherheit.

Risikoanalyse

Eine Grundlage für die Betrachtung der Sicherheit und der Vorgehensweise zur Entwicklung sicherer Maschinen bieten EG-Richtlinien zur Risikoanalyse. Im Rahmen der Risikoanalyse werden zukünftige Betriebszustände beschrieben und die jeweilige Gefährdung klassifiziert. Die Risikoanalyse bildet damit die Basis für die sicherheitstechnische Ausgestaltung der Maschinen. Für den Bereich der Landmaschinen gelten die EU-Richtlinien 2003/37/EG und 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie). Die Maschinenrichtlinie beschreibt grundlegende Voraussetzungen und entwicklungsmethodische Vorgaben, die der Hersteller berücksichtigen muss, damit er seine Maschine auf den Markt bringen darf. Unter anderem enthält sie eine Liste harmonisierter Normen, auch

zur Maschinensicherheit. Berücksichtigt der Hersteller während des Entwicklungsprozesses nachweisbar diese harmonisierten Normen, so ist er im Falle eines Schadens nicht haftbar. In Bezug auf die Sicherheit und die Gefährdungsanalyse ist unter anderem die Norm ISO 25119 gelistet. Sie beschreibt Methoden zur Gefährdungsanalyse und zur Ermittlung des Risikos, welches von den Funktionen einer Maschine ausgeht. Es wird daher auch vom Begriff der funktionalen Sicherheit gesprochen. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Durchführung einer Risikoanalyse. Im Rahmen dieser Risikoanalyse werden Betriebszustände bzw. Funktionen der Maschine nach den Parametern Eintrittswahrscheinlichkeit, Verletzungsschwere und Beherrschbarkeit beschrieben und bewertet. Die Aussage dieser Risikoanalyse ist eine Klassifizierung der Sicherheitsanforderungen für einzelne Betriebszustände. Anhand dieser Klassifizierung werden dem Entwickler Vorgehensweisen und Vorgaben (Richtlinien, Normen) für die technische Ausgestaltung der Sicherheitssysteme und der Maschine gegeben. Das Vorgehen bei der Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge ist sehr ähnlich, die entsprechende Norm ist die ISO 26262.

Normen und Richtlinien für automatisierte Maschinen und Fahrzeuge

Die Vorgaben zur technischen Ausgestaltung von Automatisierungs- und Sensoriksystemen finden sich in Vorschriften und Normen für hochautomatisierte und autonome Funktionen. Wie oben beschrieben ist die Existenz solcher Regelwerke Voraussetzung für den rechtlich geregelten Einsatz autonomer Maschinen. Für den Bereich der mobilen Maschinen existieren entsprechende Normen oder Vorschriften bisher nur im Entwurfsstadium (DIN EN ISO 18497). Der oben beschriebene Prüfkörper bzw. die Testbedingungen, die in diesem Entwurf beschrieben werden, decken jedoch nur einen sehr geringen Teil der Einsatzumgebungen automatisierter Großmaschinen ab. Aus diesem Grund wurde die Betrachtung auf verwandte Bereiche wie den Straßenverkehr, die Servicerobotik oder die fahrerlosen Transportsysteme ausgedehnt.

Für den Straßenverkehr sind für adaptive Geschwindigkeitsregelanlagen (ACC) in der Norm ISO 15622 genaue Funktionsumfänge und Testabläufe beschrieben. Ein Hersteller eines solchen Systems, der sich bei der Entwicklung an die Vorgaben in der ISO 26262 und der ISO 15622 hält, ist damit im Grundsatz frei von Haftungsansprüchen, falls es im Betrieb zu einem Schaden kommt. Wie oben schon angedeutet, sind die möglichen Betriebszustände eines autonomen Traktors wesentlich vielfältiger als die eines PKW auf einer Autobahn. Es ist daher fraglich, ob sämtliche Zustände im Vorhinein beschrieben werden können. Eine ähnliche Situation besteht bei persönlichen Assistenzrobotern, beispielsweise in Krankenhäusern oder Pflegeeinrichtungen. In der Servicerobotik wurden daher in der Norm DIN EN ISO 13482 bestimmte Sicherheitsbereiche um einen Serviceroboter definiert. Ist ein Objekt oder eine Situation in seiner Umgebung von ihm nicht klar zu klassifizieren, greifen verschiedene Sicherheitsregeln von Ausweichmanövern über Warn-töne bis hin zum aktiven Stillstand. Eine solche Vorgehensweise ist auch für autonome Landmaschinen denkbar. Entsprechend der thematischen Herkunft der Normen und Richtlinien beziehen diese sich vor allem ausschließlich auf die automatisierte oder autonome Fortbewegung bzw. die Fahraufgabe. Die Betrachtung von Arbeitsaufgaben findet bisher nur im Umfeld von Industrierobotern statt.

In Bezug auf das Großtechnikszenario wurde die autonome Straßenfahrt aus den Betrachtungen ausgeklammert und nur der autonome Betrieb auf dem Feld analysiert. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein automatisierter Betrieb ohne Fahrer auf dem Feld möglich ist. Zur weiteren Untersuchung wurden die Randbedingungen in den jeweiligen Verfahren entsprechend der oben genannten Normen und Richtlinien analysiert und eine Abschätzung zum Grad der Autonomie gegeben.

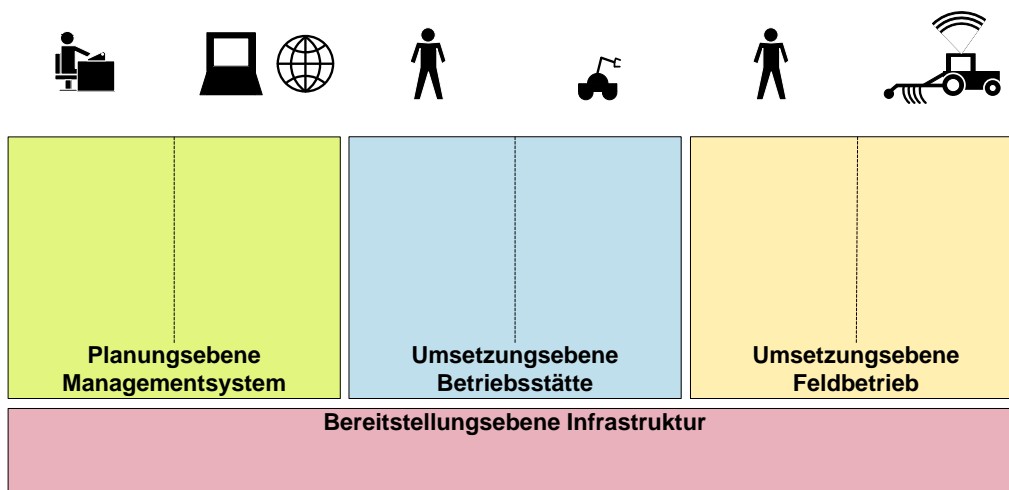
2.2 Entwicklung des Großtechnikszenarios

Im Folgenden wird die Methodik zur Ableitung des Großtechnikszenarios erläutert. Anschließend wird das Szenario schrittweise durch die Beschreibung der zukünftigen Automatisierung in den einzelnen Verfahrensschritten aufgebaut.

2.2.1 Methodik der Szenarioentwicklung

Im ersten Schritt wird das Produktionssystem in verschiedene Arbeitsbereiche bzw. Funktionsebenen eingeteilt. Die Einteilung orientiert sich an den typischen Arbeitsbereichen auf einem Ackerbaubetrieb und ist in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Funktionsebenen des Produktionssystems



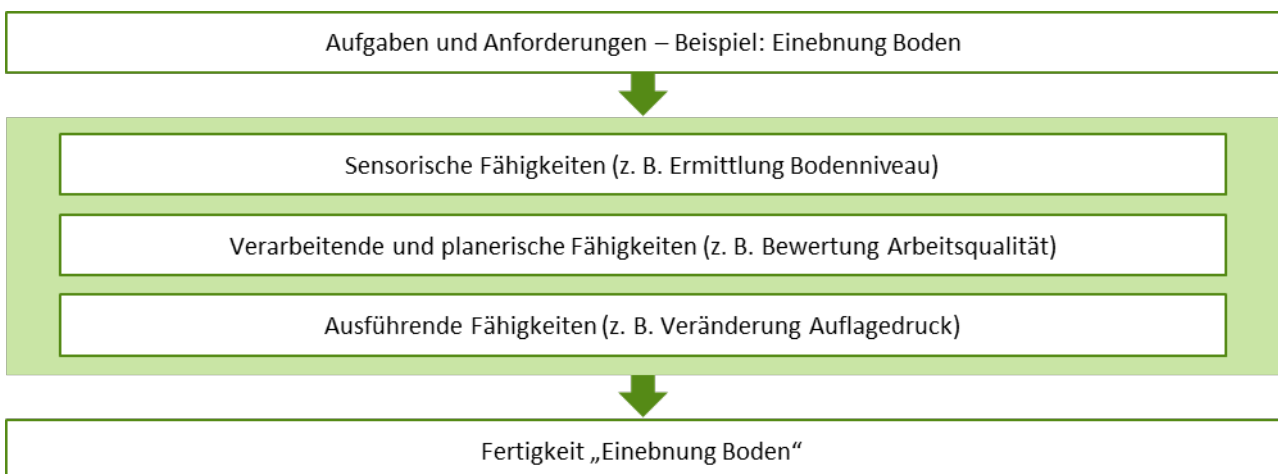
Quelle: Eigene Darstellung.

Unter der Planungsebene Management wird die Planung der einzelnen Arbeiten verstanden. Hierfür benötigt der Betriebsleiter pflanzenbauliche und organisatorische Fähigkeiten. Er legt fest, wann und wie (mit welcher Maschineneinstellung) welche Arbeiten in welchen Kulturen durchgeführt werden. Unter der Umsetzungsebene Betriebsstätte werden die vorbereitenden Arbeiten auf dem Hof verstanden. Dazu gehören das Vorbereiten und Überprüfen der Maschinen

sowie die Befüllung mit Betriebsmitteln. Unter der Umsetzungsebene Feldbetrieb werden die Arbeiten auf dem Feld verstanden, die der Bediener oder die Maschine auszuführen haben. Die Bereitstellungsebene Infrastruktur fasst die notwendige Infrastruktur zusammen, auf die die restlichen Ebenen aufbauen. Dazu gehören beispielsweise Mobilfunkverbindungen vom Hof (Planungsebene Management) auf das Feld (Umsetzungsebene Feldbetrieb). Im Kern fokussiert sich das Projekt auf die Durchführungsebene Feldbetrieb, also auf die Arbeiten auf dem Feld. Hierfür erfolgt im Kapitel 0 wie zuvor beschrieben für jedes Arbeitsverfahren eine Szenariodefinition. Die übrigen Funktionsebenen wurden im Rahmen des Projektes nur am Rande betrachtet.

Im zweiten Schritt werden anschließend die notwendigen Tätigkeiten, die heute durch den Maschinenbediener ausgeübt werden, in den jeweiligen Funktionsebenen gesammelt und auf die mögliche Automatisierung hin untersucht. In Anlehnung an Forschungsarbeiten im Bereich der Fahrerassistenzsysteme im Straßenverkehr werden die Tätigkeiten in Aufgaben, Fähigkeiten und Fertigkeiten eingeteilt (Reschka et al. 2015). Die gesammelten Aufgaben (Schritt 1) können auf diese Weise den bestehenden oder abzusehenden Fähigkeiten aus dem Stand des Wissens zugeordnet werden. Zur besseren Abschätzung, wofür auch in Zukunft ein Bediener nötig sein wird, wurden die Fähigkeiten in drei Kategorien eingeteilt. Sensorische Fähigkeiten beschreiben die Erfassung von Informationen aus der Umwelt, verarbeitende und planerische Fähigkeiten generieren aus diesen Informationen Handlungsempfehlungen, die durch ausführende Fähigkeiten umgesetzt werden. Aus der Kombination der einzelnen Fähigkeiten ergibt sich die Fertigkeit, eine Aufgabe automatisiert auszuüben. Eine entsprechende Verknüpfung ist beispielhaft in Abbildung 7 zu sehen.

Abbildung 7: Verknüpfung von Aufgabe und Fähigkeiten zu einer Fertigkeit



Quelle: Eigene Darstellung.

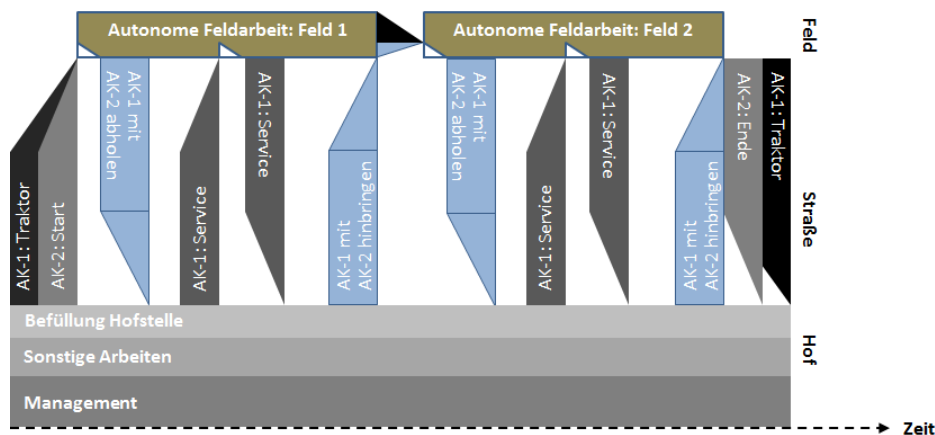
2.2.2 Definition der Automatisierung

Nachdem zuvor die Methodik der Szenarioentwicklung beschrieben wurde, werden nachfolgend die Annahmen für die einzelnen Funktionsebenen, insbesondere für den Feldbetrieb, definiert. Die folgenden Kapitel beschreiben also ein Szenario eines zukünftigen Produktionssystems, ausgehend vom heutigen Stand des Wissens.

2.2.2.1 Planungsebene Managementsystem

Wie beschrieben, umfasst diese Ebene die Planung der einzelnen Arbeiten auf dem Feld. In den letzten Jahren gab es zahlreiche Entwicklungen im Bereich des Farm-Managements zur Unterstützung des Betriebsleiters, beispielsweise durch Online-Tools zur Planung der Düngemengen oder zur effizienten Planung von Fahrspuren auf dem Feld. Auch die weitere Verknüpfung von Datenquellen und die Weiterentwicklung zu umfassenderen Expertensystemen ist Inhalt aktueller Forschungsarbeiten (Sørensen et al. 2010). Somit ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Farm-Management-Software dem Betriebsleiter in Zukunft neben pflanzenbaulicher Expertise auch in Bezug auf die Einsatzplanung weiter unterstützen wird. Im Rahmen dieses Projektes wurde daher die Planung des Personaleinsatzes zum Management der automatisierten Feldarbeit in der Planungsebene betrachtet (Abbildung 8).

Abbildung 8: Veränderter Arbeitszeitbedarf für die Feldarbeit eines Modellbetriebs mit autonomer Großtechnik



Quelle: Minßen et al. (2016).

Der Abbildung 8 folgend muss für den Start des autonomen Feldbetriebs die Maschine zunächst zum Feld gebracht werden. Daneben ist eine zusätzliche Arbeitskraft (AK) erforderlich, um mit einem Personenkraftwagen den Traktorfahrer wieder vom Feld abzuholen. Allerdings kann dies mit der praxisüblichen Arbeits- bzw. Prozesskontrolle, oben jeweils abgebildet als weißes Dreieck, verknüpft werden. Diese Arbeitszeiten können somit beim autonomen Feldbetrieb nicht als Ar-

beitszeitersparnis geltend gemacht werden. Auf der anderen Seite würden die Möglichkeit eines autonomen Straßentransportes sowie arrondierte Betriebsstrukturen positive Auswirkungen auf die notwendige Organisation und den Arbeitszeitbedarf eines solchen Produktionssystems haben.

2.2.2.2 Umsetzungsebene Betriebsstätte

Auch auf der Betriebsstätte kann eine weitergehende Automatisierung stattfinden. Aus der Forschung (Blume et al. 2015), aber auch von verschiedenen Herstellern sind mittlerweile Systeme zum automatischen Ankuppeln von Anbaugeräten bekannt. Entsprechend dem Stand der Technik bei automatisierten Fütterungssystemen wird auch die Befüllung von Streuern, Transportanhängern oder Pflanzenschutzspritzen in Zukunft weitestgehend automatisiert ablaufen.

2.2.2.3 Umsetzungsebene Feldbetrieb

Wie oben beschrieben, stellt dieses Kapitel den Hauptteil der Betrachtungen zum GroßtechnikszENARIO dar. Dabei werden jeweils die Bodenbearbeitung, die Aussaat, die Pflege, die Ernte und die Feldlogistik separat betrachtet. Jedes Verfahren wird zunächst in seine Teilaufgaben zerlegt. Darauf aufbauend werden für jede Teilaufgabe aus dem Stand des Wissens entsprechende maschinelle Fähigkeiten gesucht. Auf diese Weise wird festgelegt, ob die Aufgabe im Szenario autonom durchgeführt werden kann. Die Fahraufgabe wurde oben schon beschrieben, sie ist mittlerweile Stand der Technik und kann daher durchgängig als autonom angenommen werden. Die jeweilige Sicherheitsbetrachtung erfolgt ebenfalls für jedes Verfahren getrennt.

Bodenbearbeitung

Die in Kapitel 2.1.2 definierten Aufgaben der Bodenbearbeitung sind Einebnung, Durchmischung, Lockerung, Krümelung, Zerkleinerung und Rückverdichtung.

Die sensorischen Fähigkeiten zur Einebnung der Bodenoberfläche werden mit den beschriebenen Sensorsystemen als gegeben eingeschätzt. Die relativ einfachen kinematischen Verhältnisse zwischen Bodenbearbeitungsgerät, Traktor und Boden lassen sich durch kinematische Modelle beschreiben, die wiederum die verarbeitenden Fähigkeiten gut abbilden können. Die ausführenden Fähigkeiten sind heute durch hydraulische Verstellung der Arbeitstiefe, der Walzen oder des Aufgedruckes schon Stand der Technik. Die Fertigkeit, die Einebnung autonom auszuführen, wird daher als gegeben angenommen.

Die sensorischen Fähigkeiten zur Bestimmung der Einmischung werden ebenfalls als gegeben eingeschätzt. Es erscheint zudem möglich, von der Qualität der Einmischung auf die Qualität der Vermischung zu schließen. Zusätzlich können bzw. werden die verwendeten Bodenbearbeitungswerkzeuge per Simulation auf ihre Mischungseffekte hin optimiert. Daher wird für das

GroßtechnikszENARIO angenommen, dass für beide Aufgaben die sensorische Fähigkeit gegeben ist. Die Steigerung des Durchmischungsgrades ist dann maschinenspezifisch einzustellen, beispielsweise durch Variierung der Arbeitstiefe, der Fahrgeschwindigkeit oder sogar der Werkzeuge. Auch wenn dazu weiterer Entwicklungsbedarf in Form von maschinenverständlichen Expertensystemen notwendig ist, kann aber davon ausgegangen werden, dass diese Problemstellung lösbar ist. Die notwendigen und zur Verfügung stehenden ausführenden Fähigkeiten wie Änderung der Fahrgeschwindigkeit oder Arbeitstiefe stehen zu Verfügung. Die Fertigkeit, die Ein- und Durchmischung autonom auszuführen, wird daher als gegeben angenommen.

Für die Aufgaben Lockerung, Krümelung und Zerkleinerung von Boden- und Pflanzenpartikeln sind wie beschrieben keine direkten Messsysteme bekannt. Wie beschrieben, kann jedoch über die Messung des Volumens eine indirekte Aussage getroffen werden. Die verarbeitenden Fähigkeiten in Form von Expertensystemen liegen noch nicht vor, durch Einbindung von Maschinenherstellern sowie Anwendern in Forschungsarbeiten sollte die Erstellung entsprechender Datenbanken jedoch möglich sein.

Die zur Messung der Rückverdichtung nötigen sensorischen Fähigkeiten sind durch die beschriebene Induktionsmessung grundsätzlich gegeben. Die Rückverdichtung wird heute vor allem über die Regelung der Gewichtsverteilung zwischen Traktor und Anbaugerät bzw. über die Regelung des Auflagedruckes der Walzen vorgenommen, die ausführenden Fähigkeiten sind also gegeben. Die Beschreibung der Bodenmechanik in einer verarbeitenden Fähigkeit ist dagegen noch Inhalt von Forschungsprojekten. Jedoch könnte mit einer Online-Messung die Wirkung der Walzen direkt gemessen und so die Maschine eingestellt werden. Daher wird auch die Fertigkeit zur Rückverdichtung als gegeben angenommen.

Zusammenfassend wird daher angenommen, dass die Bodenbearbeitung aus technischer Sicht autonom ausgeführt werden kann. Die Messung, Verarbeitung und Einstellung der relevanten Parameter scheint grundsätzlich machbar, zudem wird auch in der heute üblichen Praxis das Bodenbearbeitungsgerät nicht kontinuierlich eingestellt. Für eine automatisierte Lösung könnte daher die regelmäßige Kontrolle ausreichen. Aus sicherheitstechnischer Sicht sind die Umgebungsbedingungen während der Bodenbearbeitung durch heutige Systeme beherrschbar. Auf dem abgeernteten Feld bewegt sich die Maschine durch eine relativ gleichmäßige Umgebung. Trotzdem muss die Umgebung ständig überwacht werden und unbekannte Objekte müssen sicher klassifiziert werden.

Aussaat

Die zur Regelung der Ablagetiefe notwendigen sensorischen Fähigkeiten sind, wie oben beschrieben, gegeben. Die Ablagetiefe kann dann über den Anpressdruck des Säaggregates eingestellt werden, was heute auch Stand der Technik ist. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass hier künftig eine autonome Anpassung der Ablagetiefe möglich ist. Die Fähigkeiten zur Einstellung des Saatkornabstandes in der Reihe sind, wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, grundsätzlich gegeben. Die

Fähigkeiten zur gleichmäßigen Kornbedeckung und zur Rückverfestigung sind denen der Bodenbearbeitung sehr ähnlich.

Zusammenfassend wird daher angenommen, dass auch die Aussaat aus technischer und sicherheitstechnischer Sicht autonom ausgeführt wird.

Mineraldünger- und Pflanzenschutzausbringung

Wie auch bei der Aussaat entsprechen die Randbedingungen zur Automatisierung der Fahraufgaben im Wesentlichen denen der Bodenbearbeitung. Ein Unterschied ergibt sich durch die großen Arbeits- bzw. Gerätebreiten, vor allem in der Pflanzenschutzausbringung. Jedoch wurde schon auf der Agritechnica 2015 eine laserbasierte Lösung zur Überwachung des Spritzgestänges gezeigt (Blume et al. 2016).

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, sind für die autonome Ausführung der Mineraldünger- und Pflanzenschutzausbringung sämtliche Fähigkeiten mittlerweile Stand der Technik. Auch unter agronomischen und organisatorischen Gesichtspunkten ist ein autonomer Betrieb möglich. Auf der Agritechnica 2015 wurde mit dem „Connected Crop Protection mit Pflanzenschutz-Anwendungs-Manager“ ein System zur Mittelauswahl und entsprechenden Festlegung von Abstandsauflagen vorgestellt (ZEPP 2015). Mithilfe eines solchen Tools können die agronomischen Vorgaben für eine spätere autonome Ausführung erstellt werden.

Zusammenfassend wird daher angenommen, dass auch die Mineraldünger- und Pflanzenschutzausbringung aus technischer und sicherheitstechnischer Sicht autonom ausgeführt wird.

Mechanische Unkrautbekämpfung

Die mechanische Unkrautbekämpfung war eines der ersten Anwendungsfelder für eine Automatisierung in der Landwirtschaft. Entsprechend sind sämtliche Fähigkeiten gegeben, so dass eine autonome Ausführung angenommen wird.

Ernte

Die autonome Fahraufgabe einer Erntemaschine muss im Gegensatz zu den oben beschriebenen Verfahren grundlegend anders bewertet werden. Im Gegensatz zu den vorherigen Verfahren findet bei der Ernte ein direkter und dauerhafter Eingriff in die Umgebung statt. Das Schneidwerk des Mähdreschers „kollidiert“ dauerhaft mit der Umgebung, indem er in den Bestand hineinfährt und die Halme abschneidet. Im Rahmen der Umfelderkennung bestehen hier wesentlich höhere Anforderungen an die Klassifizierung von Objekten im Arbeitsbereich der Maschine. Wie oben beschrieben, definiert der Normentwurf DIN EN ISO 18497 ein Prüfobjekt (grüner Körper in Form eines sitzenden Menschen) und gibt damit einen ersten Ansatz für die Klassifizierung. Dieses Problemfeld ist Inhalt aktueller Forschungsarbeiten in vielen Bereichen der Robotik (Stiene 2009; Blume et al. 2015; SPARC - The Partnership for Robotics in Europe 2017).

Die Fähigkeiten zur Bewältigung der Prozessaufgaben sind mittlerweile Stand der Technik. Sowohl der Dreschprozess als auch die Fahraufgaben werden auf modernen Maschinen schon zum Großteil automatisch ausgeführt, der Bediener hat vor allem eine überwachende und vorausschauende Rolle.

Aus den genannten sicherheitstechnischen Gründen ist ein unbeobachteter vollautonomer Betrieb allerdings auch in Zukunft nur schwer vorstellbar.

Feldlogistik

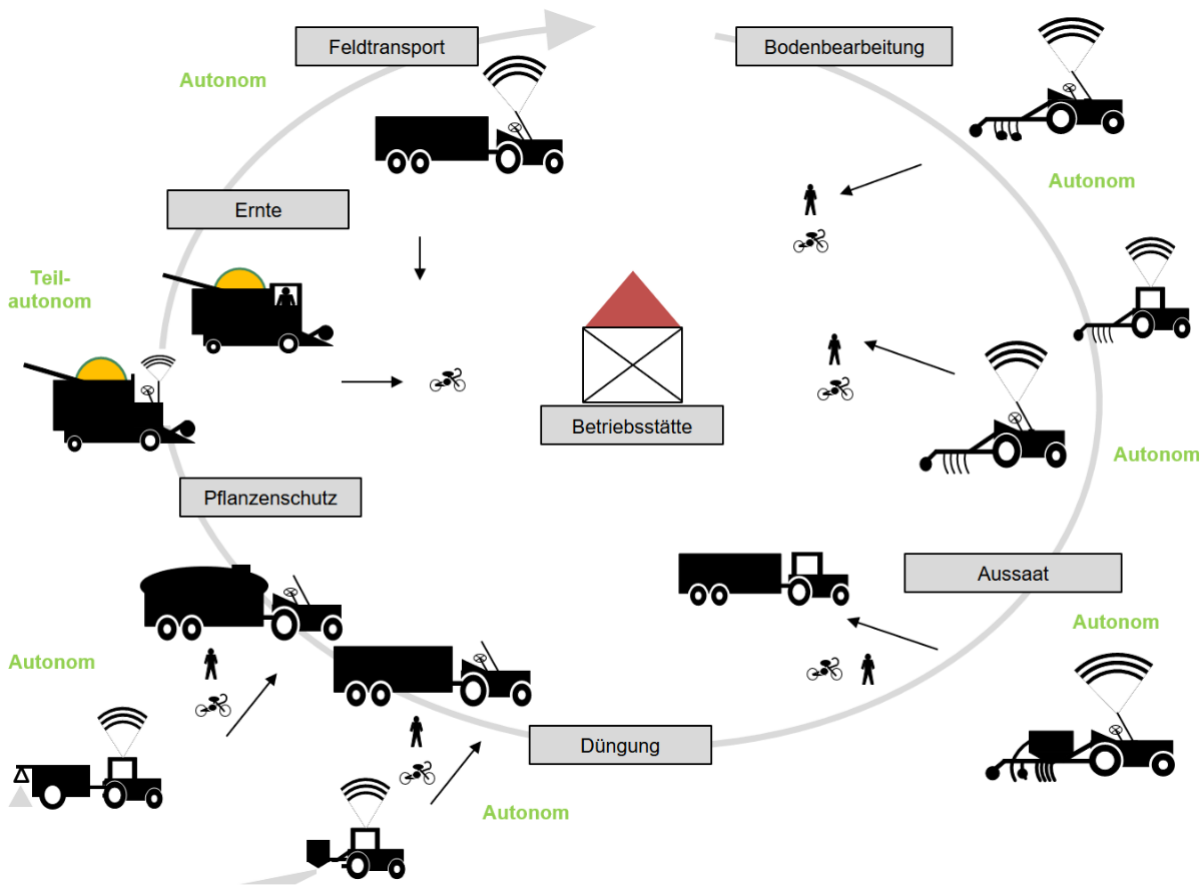
Die Feldlogistik, also Befüllvorgänge auf dem Feld oder Parallelfahrten beim Abbunkern, wird als vollständig autonom angenommen.

2.2.2.4 Bereitstellungsebene Infrastruktur

Um die oben genannten Aufgaben und Tätigkeiten autonom ausführen zu können, ist eine umfassende Infrastruktur notwendig. Im Bereich des Datenaustausches und der Datennutzung ist beispielsweise eine durchgängige und ausfallsichere Kommunikation nötig, die heute noch nicht gegeben ist. Zusätzlich müssen Möglichkeiten geschaffen werden, um die in großem Maße anfallenden Daten effizient zu sichern, zu nutzen und weiterzugeben. Sowohl die durchgängige und unterbrechungsfreie Kommunikation als auch die Methoden zum Datenaustausch zwischen verschiedenen Beteiligten in der Verfahrenskette ist Inhalt aktueller Forschungsarbeiten unter Führung der Landtechnikindustrie (Rusch et al. 2016; Möller und Sonnen 2016). Daher kann davon ausgegangen werden, dass entsprechende Systeme in Zukunft vorhanden sind.

2.2.3 Beschreibung der Verfahrenskette

Die einzelnen Verfahren des landwirtschaftlichen Produktionssystems sind in den vorangegangenen Abschnitten sicherheitstechnisch bewertet worden, ob sie sich für einen autonomen oder teilautonomen Betrieb zukünftig eignen. Die Verfahren der Bodenbearbeitung, Aussaat und Pflege sind entsprechend dieser Ausführungen zur technischen Machbarkeit für die Kalkulationen zum Großtechnikszenario ganz ohne Fahrer angenommen worden. Die Ernte mit autonomen Großmaschinen ließe sich in naher Zukunft aufgrund der hohen Anforderungen bei der Umfelderkennung nur mit sehr kostenintensivem technischen Aufwand ermöglichen. Daher ist mittelfristig eine Teilautonomie für die Ernte unterstellt worden, wonach einem Führungsfahrzeug eine unbemannte Erntemaschine folgt (elektronische Deichsel). Insgesamt ist das Großtechnikszenario mittels der Verfahrenskette von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte in Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 9: Großtechnikszenario mit autonomer Feldarbeit

Quelle: Eigene Darstellung.

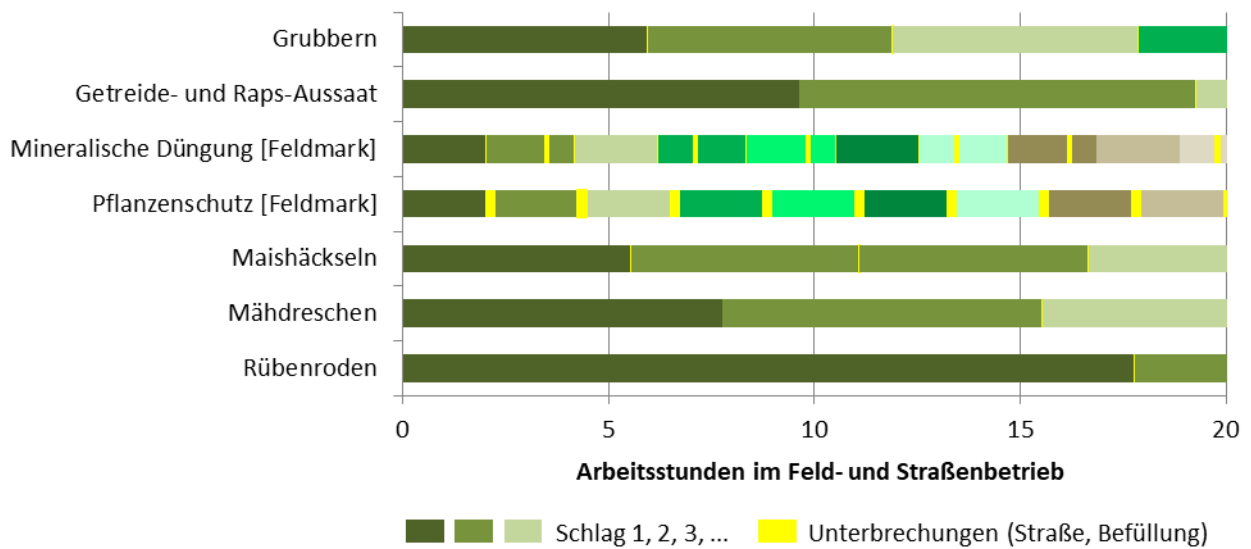
Mit der Grundannahme, dass der Straßenverkehr in naher Zukunft nicht autonom ablaufen wird, ist für das Großtechnikszenario angenommen worden, dass die Maschinen von einer Person zum Feld gefahren werden. Am Feld angekommen, kontrolliert die gleiche Person den Systemstart zur autonomen Feldarbeit und verlässt danach das Feld.

Der Fahrer könnte durch eine zweite Arbeitskraft mit einem Auto abgeholt werden (vgl. Kap. 2.2.2.1). Gegen die Nutzung eines Autos spricht, dass eine weitere Arbeitskraft verfügbar sein müsste und die potenzielle Kostenreduktion der autonomen Feldarbeit durch höhere Lohn- und Maschinenkosten reduziert werden würde. Ein Quad könnte alternativ mit entsprechender Transportvorrichtung in der Fronthydraulik des Traktors mitgeführt werden. Erntemaschinen haben aber bislang keine entsprechenden Transportmöglichkeiten.

Für die folgende Bewertung des Großtechnikszenarios ist die Nutzung eines Elektro-Fahrrads unterstellt worden, weil dieses Fortbewegungsmittel auf jeder Landmaschine relativ leicht mitgeführt werden kann, keine weitere Arbeitskraft bindet und sich bei den angenommenen Entfernungen von Hof-zu-Feld (5 km) und Feld-zu-Feld (0,5 km) rechtfertigen lässt.

Darüber hinaus bestimmt die durchschnittliche Feldgröße den Aufwand, Maschinen von Feld-zu-Feld umzusetzen. In Abhängigkeit der Feldgröße und den Flächenleistungen der autonomen Landmaschinen existieren unterschiedliche Unterbrechungsintervalle der Feldarbeit durch Straßenfahrt und Befüllung (Abbildung 10).

Abbildung 10: Unterbrechungsintervalle im GroßtechnikszENARIO



Quelle: Eigene Darstellung.

Die benötigte Zeit, die die Maschinen auf einem Schlag arbeiten, fällt je Verfahren unterschiedlich lang aus. Im Vergleich zu den anderen Verfahren gibt es viele Unterbrechungen bei Düngung und Pflanzenschutz durch die hohe Schlagkraft. Bei der Aussaat und beim Rübenroden gibt es aufgrund der geringen Flächenleistung weniger Feldwechsel pro Tag. Für die Berechnung der in Abbildung 10 und Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse wurde eine durchschnittliche Schlaggröße von 30 ha unterstellt.

2.3 Ökonomische Bewertung des entwickelten Großtechnikszenarios

Nachdem zuvor auf Basis des derzeitigen Entwicklungsstandes sowie sicherheitsrelevanter Erwägungen das GroßtechnikszENARIO abgeleitet wurde, wird nachfolgend analysiert, wie sich ein derartiges auf die Rentabilität eines Modellbetriebes auswirkt.

Hierfür wird ein Modellbetrieb in der Magdeburger Börde konstruiert. Auf dem Betrieb existieren zwei Fruchtfolgen, die die Ackerkulturen der Region widerspiegeln: Zuckerrüben sind mit 8 % der Ackerfläche erfasst, Winterweizen mit 50 %, Silomais mit 16 % und Winterraps mit 25 % (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Fruchtfolgen im Modellbetrieb

Fruchtfolge 1	Fruchtfolge 2
Zuckerrüben	Winterraps
Winterweizen	Winterweizen
Silomais	Silomais
Winterweizen	Winterweizen

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Maschinenausstattung, die Einsatzbereiche, die Betriebsstunden sowie der Investitionsbedarf für die Schlüsselmaschinen ist in Tabelle A7 aufgeführt.

Folgende Überlegungen leiten die ökonomische Bewertung des autonomen Großtechnikszenarios:

- Durch die autonom durchgeführten Feldarbeiten wird Arbeitszeit auf dem Feld eingespart. Damit stellt sich die Frage, wie sich die Arbeitszeiteinsparung auf den Gewinn des Betriebes auswirkt.
- Bei autonom durchgeführten Arbeiten wird kein Fahrer mehr auf dem Schlepper benötigt. In der Folge kann die Kabine weggelassen bzw. mit deutlich weniger Komfort ausgestattet werden. Daher ist zu prüfen, wie sich die einfachere Ausstattung auf den Investitionsbedarf auswirkt.
- Bei näherer Betrachtung der bisherigen Maschinenausstattung und des Einsatzprofils der Maschinen wird deutlich, dass große Schlepper (320 PS) vergleichsweise geringe Einsatzzeiten haben können. Dabei stellt sich die Frage, ob in einem autonomen Großtechnikszenario die Bodenbearbeitung nicht durch zwei kleine Pflegeschlepper erfüllt werden können. Nach Zhang et al. (2010) könnte die sogenannte elektronische Deichsel ein erster Schritt in Richtung autonome Landmaschinen darstellen.

Arbeitszeiterparnis

Die Effekte der Arbeitszeiteinsparung sind in Tabelle 2 dargestellt. Dabei ist unterstellt, dass sämtliche Arbeiten der Bodenbearbeitung, Aussaat, Pflege und Feldlogistik autonom erfolgen. Im Großtechnikszenario können je nach Kulturtyp zwischen 30 bis 60 % der gesamten Feldarbeitszeit gegenüber der Referenz eingespart werden, indem alle Feldarbeiten außer Ernte, Feldkontrolle und „Schosser-Ziehen“ als autonom angenommen worden sind.

Tabelle 2: Arbeitszeitersparnis GroßtechnikszENARIO

		Zucker- rüben	Rüben- weizen	Raps	Raps- weizen	Silo- mais	Mais- weizen
Referenz	[h/ha]	5,4	2,9	3,2	3,5	3,2	3,2
Autonome Großtechnik	[h/ha]	3,3	1,4	1,1	1,5	1,1	1,4
Zeitaufwand Umsetzen	[h/ha]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3
Einsparung	[h/ha]	1,8	1,2	1,8	1,7	1,9	1,5
Anbaufläche pro Jahr	[ha]	120 ha	120 ha	250 ha	250 ha	370 ha	370 ha
Zeitersparnis pro Jahr	[h]	216 h	144 h	450 h	425 h	703 h	555 h
Insgesamt		2.493 h/Jahr, 1,7 h/ha *17 €/h = 29 €/ha, 42.381 €/Jahr					

Quelle: Eigene Berechnung.

Für den Modellbetrieb mit einer Betriebsfläche von 1.500 ha ließe sich somit mehr als eine Arbeitskraft (1,4) kompensieren, wenn alle Zeiteinsparungen der verschiedenen Kulturen zusammengefasst werden. Bei einem Stundenlohn von 17 € beläuft sich die Lohnkostensparnis auf 29 €/ha/Jahr bzw. rund 42.000 € für den Gesamtbetrieb. Im Vergleich zu den Gesamtkosten liegt die Ersparnis bei 2 % und ist damit vergleichsweise überschaubar.

Einfachere Kabine

Durch den Verzicht der Traktor-Kabine und speziellen Ausstattungen wie beispielsweise der Klimaanlage ließe sich eine Kosteneinsparung von 7 bis 8 % erzielen, wie im Austausch mit der Landtechnikindustrie herausgestellt werden konnte (Engel 2016). Beim Mähdrescher ist der Anteil der Kabine am Gesamtfahrzeug geringer als beim Traktor, entsprechend liegt die Kosteneinsparung hier nur bei 5 %. Damit wären dieser Traktor und Mähdrescher nur noch mit den einfachsten Bedienungselementen ausgestattet, um auf öffentlichen Straßen von Feld zu Feld gefahren zu werden. Für den Modellbetrieb käme die Einsparung dieser Bauteile einer Kosteneinsparung bei den Maschinenkosten von rund 3 €/ha gleich.

Einsparung eines Traktors (Elektronische Deichsel)

In der Bodenbearbeitung ließe sich der große Traktor mit Grubber ersetzen durch die höhere Auslastung zweier kleinerer Traktoren, die bereits auf dem Betrieb vorhanden sind. Die Berechnungen zeigen, dass aufgrund der höheren Auslastung die Reparaturkosten der Pflegeschlepper steigen. Im Gegenzug sinken jedoch die Kapitalkosten aufgrund des eingesparten 235-Kw-Schleppers (320 PS) deutlich stärker. Insgesamt reduzieren sich die Maschinenkosten für den vorgestellten Modellbetrieb um rund 7.700 € pro Jahr. Die zusätzlichen Fahrtkosten, um die zweite Maschinenkombination umzusetzen, müssen gegengerechnet werden. Diese zusätzlichen Fahrdienste würden für den Modellbetrieb, mit einer durchschnittlichen Schlaggröße von 30 ha und einer durchschnittlichen „Feld zu Hof Entfernung“ von 5 Km, jährlich weniger als 500 € bedeuten.

Damit beziffert sich die Einsparung des Großschleppers im GroßtechnikszENARIO auf 7.200 € pro Jahr.

Insgesamt könne bei dem unterstellten GroßtechnikszENARIO Kosten von 54.000 €/ha/Jahr eingespart werden. Für den Gesamtbetrieb bedeutet dies eine Einsparung von 37 € bzw. 3 % im Vergleich zu den Gesamtkosten.

Diesen Kosteneinsparungen sind allerdings die Kosten der Autonomie gegenüber zu stellen. Laut Hersteller (Nielsen 2016) kosten Systeme, die Großtechnik völlig autonom über den Acker fahren lassen und Hindernissen ausweichen können rund 100.000 € pro Maschine. Mit drei Systemen ließe sich das aufgezeigte GroßtechnikszENARIO automatisieren, indem zwei Traktoren bzw. Erntemaschinen je nach Bedarf ausgestattet werden. Bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren beziffern sich die anzusetzenden Kapitalkosten somit auf rund 33.000 €/Jahr bzw. 22 €/ha.

Insgesamt scheint die autonome Großtechnik somit möglich. Der ökonomische Nutzen ist allerdings mit 15 €/ha entsprechend der Gegenüberstellung von Kosten (22 €/ha) und Einsparungen (37 €/ha) vergleichsweise gering. Momentan spiegelt der hohe Preis der autonomen Systeme noch die hohen Entwicklungskosten wider. Zukünftig könnten solche Systeme günstiger werden, wodurch die Vorzüglichkeit dieser Techniken steigt.

2.4 Zwischenfazit zur Großtechnik

Nachdem das GroßtechnikszENARIO als ReferenzszENARIO abgeleitet sowie ökonomisch bewertet wurde, werden nachfolgend die daraus resultierenden Schlussfolgerungen gezogen.

Bezüglich der Haftungsfragen für autonome Großmaschinen bestehen noch erhebliche Unsicherheiten, die eine weitere Entwicklung auf Seiten der Hersteller hemmen dürften, autonome Großmaschinen besonders in dichtbesiedelten Agrarregionen einzusetzen. Vor diesem Hintergrund erscheint es notwendig, dass die Politik einen Prozess initiiert, um diese Unsicherheiten abzubauen. Ein Ansatz ist die Schaffung zusätzlicher Normen durch entsprechende Arbeitskreise, wie beispielsweise das ISO TC 299. In diesen Arbeitskreisen, aber auch in der Gesetzgebung, müssen die besonderen Randbedingungen autonomer Landmaschinen stärker eingebracht werden. In der aktuellen Diskussion über das automatisierte Fahren im Straßenverkehr wird häufig vom Fahrer als letzte Rückfallebene gesprochen. In dem hier beschriebenen Szenario befindet sich hingegen kein Fahrer mehr auf der Maschine. Entsprechende Forschungsstellen, beispielsweise die Forschungsstelle RobotRecht an der Universität Würzburg oder die neu gegründete Forschungsstelle Mobilitätsrecht an der TU Braunschweig sollten über entsprechende Forschungsprogramme in die Automatisierungsdiskussion in der Landtechnik eingebracht werden.

Hoher Forschungsbedarf besteht vor allem im Bereich der Automatisierung der Prozesse. Häufig fehlen hier Prozessmodelle, oder -beschreibungen, mit deren Hilfe Automatisierungsalgorithmen

Handlungsanweisungen für die Maschine ableiten könnten. Beispielsweise sind die Vorgänge zwischen Boden und Werkzeug bei der Bodenbearbeitung sehr komplex. Theoretische (physikalische) Modelle zur Simulation der Vorgänge sind daher nur mit sehr viel Aufwand aufzubauen. In Zukunft könnten jedoch erfahrungsbasierte Methoden (Expertensystem) oder die automatische Identifikation von Prozessmerkmalen und anschließende Verarbeitung in „Black-Box“-Systemen diese Vorgänge beschreiben. Ein Ansatz zur weiteren Entwicklung solcher Systeme wären Forschungsprogramme, die explizit die Verknüpfung von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) mit den Anwendungsfeldern im Ackerbau fördern.

Da die Maschineneinstellungen bereits heute elektronisch vom Traktor getätigt werden können, fehlt zum vollständigen Regelkreis häufig nur noch die Erfassung der relevanten Prozessparameter. Hier ist weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf Sensorik festzustellen, die den landtechnischen Anforderungen gewachsen sind. Optische Sensoren aus anderen Bereichen, beispielsweise dem PKW-Bereich, können in der Landwirtschaft aufgrund der Umgebungsbedingungen häufig nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden.

Die genannten Bedarfe finden sich in allen Verfahrensschritten, vor allem jedoch in der Bodenbearbeitung. Die autonome Fahrzeugführung ist dagegen bereits Stand der Technik, hier sollten sich Forschungsgelder vor allem auf die Klärung der oben angesprochenen Haftungsfrage und auf die Erfassung und Interpretation der Umwelt konzentrieren. Die angesprochenen Forschungsfelder beziehen sich jedoch nicht allein auf die Großtechnik, sowohl die Haftungsfragen als auch das Prozessverständnis und die Umgebungserfassung sind für die Kleintechnik genauso notwendig.

Bezüglich der Produktionskosten ist der ökonomische Anreiz, autonome Maschinen einzusetzen, sehr überschaubar. Die Auswirkungen des Großtechnikszenarios auf die Rentabilität eines typischen Betriebs in der Magdeburger Börde ergeben lediglich Kosteneinsparungen im Bereich von 3 %. Werden die zusätzlich erforderlichen Investitionen für die Automatisierung berücksichtigt, beträgt der Anteil der Einsparung an den betrieblichen Gesamtkosten nur noch 1 %. Daran wird deutlich, dass autonome Landtechnik sich nur durchsetzen dürfte, wenn zusätzliche Effekte zum Tragen kommen. Hierzu zählen vor allem deutliche Betriebsmitteleinsparungen oder Ertragssteigerungen. Hierfür wird es im Bereich des Precision Farming weitere Entwicklungen geben. Diese Vorteile sind jedoch nicht der Entwicklung der Autonomie zuzuschreiben.

Weiterhin ist Veränderungspotenzial der autonomen Großtechnik auf den Pflanzenbau insgesamt eher gering. Sollte sich die Autonomie in Form der bisherigen Großtechnik durchsetzen, ist von keinen umwälzenden Veränderungen im Pflanzenbausystem auszugehen. Durch die Weiterentwicklung der Technologien im Bereich Precision Farming (vgl. Kapitel 2.1.1) sind langfristig Betriebsmitteleinsparungen in der Größenordnung von 8 bis 30 % für Pflanzenschutzmittel und 5 bis 20 % für Nährstoffe möglich (Bauer und Breunig 2017a). Hinzu kommt, dass die Erträge durch den geringeren Pflanzenschutzmitteleinsatz um 2 bis 10 % gesteigert werden können. Es ist jedoch anzuzweifeln, ob die gesellschaftlichen Problemfelder (mangelnde Biodiversität, Insektensterben,

hoher Bodendruck) hierüber gelöst werden können. Wie in Kapitel 3.1.2 noch zu zeigen sein wird, ist das Potenzial hierfür bei der autonomen Kleintechnik deutlich größer.

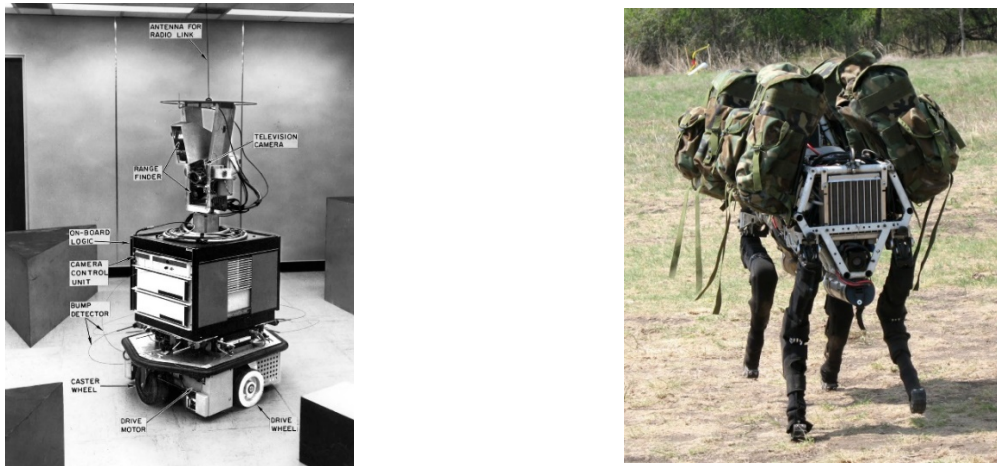
3 Entwicklung und Bewertung eines Kleintechnikszenarios

In diesem Kapitel wird zunächst der Stand des Wissens zur autonomen Kleintechnik verfahrensspezifisch erläutert. Daneben sind potenzielle Vorteile der Feldroboter gegenüber autonomer Großtechnik aufgezeigt. Danach wird ein Szenario autonomer Kleintechnik für alle die landwirtschaftlichen Verfahren von der Aussaat bis zur Ernte konzeptioniert. Die Grundlage der Szenarioentwicklung bilden Hypothesen zur nachhaltigen Intensivierung des Pflanzenbaus. Danach folgt die betriebswirtschaftliche Bewertung des umfassenden Kleintechnikszenarios sowie die Ableitung von Schlussfolgerungen als Zwischenfazit.

3.1 Stand des Wissens zur autonomen Kleintechnik

Das Forschungsfeld Robotik stellt eine Schnittmenge aus vielen Forschungsbereichen dar, die sich mit jeweils unterschiedlichen Motivationen und Herangehensweisen mit dem Themengebiet beschäftigen. Die mobile Robotik hat sich seit den 1960er Jahren als Teilgebiet der Robotik etabliert und von den Handhabungsrobotern, beispielsweise in Fertigungsanlagen, abgegrenzt (Nilsson 1984). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass sich mobile Roboter in ihrer Umgebung frei bewegen können und diese Umgebung selber nicht kontrollierbar oder im Vorhinein bekannt ist. Forschungsthemen der mobilen Robotik beschäftigen sich daher mit Lokalisierung anhand verschiedener Sensoren, wobei die Sensorik selbst auch ständig weiterentwickelt wird. Erfolgte die Lokalisierung in den Anfangsjahren vor allem über reine Abstandssensoren wie Laserscanner oder Ultraschallsensoren, sind mittlerweile Sensoren zur dreidimensionalen Bildgebung Stand der Technik. Unterstützt wurde diese Entwicklung dadurch, dass entsprechende Sensoren aus dem Consumer-Bereich, z. B. durch Spielekonsolen, weite Verbreitung fanden und damit zu vergleichsweise geringen Kosten eingesetzt werden können (Oliver et al. 2012).

Ein weiteres Forschungsgebiet beschäftigt sich mit der Frage, wie Roboter ihre Umgebung besser erfassen und interpretieren können. Diese Arbeiten überschneiden sich teilweise mit dem Forschungsgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI). Beispielsweise wird erforscht, inwiefern neuronale Netze dazu geeignet sind, die Umgebung zu klassifizieren oder die Bewegungseigenschaften des Roboters anzupassen (Heess et al. 2017). Weitere Informationen zur Steuerung autonomer Roboter finden sich bei Hertzberg et al. (2012).

Abbildung 11: Roboter Shakey (links) und Big Dog (rechts)

Quelle: Nilsson (1984) und Boston Dynamics (2017).

Neben diesen, auf die Generierung des Roboterhaltens abzielenden Gebieten, ist die Umsetzung der Planungen in der Umgebung ebenfalls ein großes Forschungsgebiet. Fortbewegungsmethoden wie das Gehen oder Kriechen sind mittlerweile so funktionsfähig, dass sie bereits für militärische Anwendungen erprobt wurden (Boston Dynamics 2017; Raibert et al. 2008).

3.1.1 Verfahrensspezifischer Technik- und Forschungsstand

Da die Robotik im Wesentlichen aus der Informatik entstanden ist, sind die Anwendungsfelder - vor allem in der Forschung – teils nicht an die späteren Umweltbedingungen oder Einsätze angepasst, sondern beziehen sich häufig auf reine Explorationsaufgaben, in denen das Verhalten der Roboter entwickelt und untersucht wird. Dennoch sind eine ganze Reihe von Robotern für den Bereich der Feld- bzw. Agrarroboter entwickelt worden. Beispielsweise messen sich die Roboterkonzepte unterschiedlicher Forschungsinstitute auf dem jährlich stattfindenden Field-Robot-Event. Nachfolgend sollen aber vor allem Konzepte vorgestellt werden, die konkretere Anwendungsfälle darstellen und bereits realisiert oder nahe an der Markteinführung sind.

Roboter zur Bodenbearbeitung und Aussaat

Die dänische Firma Kongskilde stellte zur Agritechnica 2013 das *VIBRO CROP ROBOTTI* Roboterkonzept vor, welches zusammen mit der University of Southern Denmark entwickelt wurde.

Abbildung 12: Kongskilde Vibro Crop Robotti

Quelle: Kompleks Robotech (2013).

Der Roboter wird durch zwei elektrisch angetriebene Laufbänder fortbewegt, in der Mitte können Geräte zur Aussaat oder zur mechanischen Unkrautbekämpfung angebaut werden. Der Roboter hat ein Leergewicht von ca. 400 kg und ist ca. 1,5 m breit. Jedes Laufband wird von einem 5-Kw-Antriebsmotor angetrieben, die Energieversorgung erfolgt über Blei-Akkus. Die Navigation erfolgt mittels GPS, die Erkennung von Pflanzenreihen mittels eines 3D-Sensors (Jakobsen 2015).

Einen ähnlich modularen Ansatz wird mit dem Roboter *Thorvald* verfolgt, einer vierrädrigen Plattform mit einem Anbauraum für verschiedene Geräte, die von der Norwegian University of Life Sciences entwickelt wurde (Grimstad et al. 2015). Jedes Rad wird von einem 600-W-Elektromotor angetrieben, das Leergewicht beträgt 150 kg, die Zuladung maximal 200 kg. Die Energieversorgung erfolgt bei diesem Roboter über LiFePO₄-Akkus. Bisher sind Anbaugeräte zur Aussaat und zum Phenotyping in Betrieb, verschiedene Systeme zur Unkrautbekämpfung sind als Konzept beschrieben. Der Roboter wird auch an anderen Universitäten zur Forschung eingesetzt, mittlerweile wird das Konzept durch die Firma Saga Robotics kommerzialisiert (Saga Robotics 2017).

Abbildung 13: Thorvald Robot

Quelle: Grimstad et al. (2015).

Abbildung 14: Fendt Mars Roboter

Quelle: AGCO/Fendt (2017).

Die Firma AGCO/Fendt entwickelte zusammen mit der Hochschule Ulm das Roboterkonzept *MARS (Mobile Agricultural Robot Swarms)* zur Aussaat von Mais (AGCO/Fendt 2017). Die Roboter sind ca. 0,5 m breit und haben ein Gewicht von ca. 60 kg. Sie verfügen über einen Vierradantrieb mit je einem E-Motor je Rad. Die Aussaat erfolgt über eine neu entwickelte Stempeleinheit. Eine Weiterentwicklung des Konzeptes wird auf der Agritechnica als kommerzielles Produkt unter dem Namen Fendt Xaver vorgestellt.

Roboter zur Bonitur

Roboter zur Pflanzenbonitur stellen das erste Anwendungsfeld für Roboter im Ackerbau dar. Der Grund dafür war, dass zur Bonitur kein Eingriff in die Umgebung erfolgen muss und sich der Anwendungsfall damit den oben beschriebenen Explorationsaufgaben ähnelt. Weiterhin sind die Personalkosten für Bonituren im landwirtschaftlichen Versuchswesen sehr hoch, so dass hier gute Realisierungschancen gesehen wurden.

Abbildung 15: Roboter Bonirob



Quelle: Frese et al. (2015).

Der Roboter *Bonirob*, der durch die Hochschule Osnabrück in Zusammenarbeit mit den Firmen Bosch und Amazone entwickelt wurde, stellt ein sehr flexibles Konzept dar, das aufgrund der vielen Freiheitsgrade im Fahrwerk leicht auf unterschiedliche pflanzenbauliche Anbauformen angepasst werden kann (Ruckelshausen et al. 2009). So lässt sich die Spurweite von 750 bis 2000 mm stufenlos verstellen, die Überfahrthöhe von 400 bis 800 mm. Der Roboter wird von vier 500-W-Elektro-Motoren angetrieben, das Maximalgewicht beträgt ca. 400 kg. Neben verschiedenen Ausbaustufen des Grundfahrzeugs wurden eine Reihe von Werkzeugen (Apps) zur Phänotypisierung, zur mechanischen Unkrautbekämpfung oder zur gezielten Pflanzenschutzabgabe entwickelt (Bangert et al. 2013; Frese et al. 2015). Mittlerweile hat die Firma Robert Bosch, mit einem eigenen Start-up unter dem Namen Bosch Deepfield Robotics, die weitere Entwicklung des Bonirops übernommen. Dabei wurde der Roboter im Vergleich zum Forschungsroboter deutlich einfacher ausgerüstet. Ziel ist es, auf diese Weise ein am Markt wettbewerbsfähiges Konzept zu entwickeln.

Der Roboter *Ladybird* der Universität Sydney ist neben einer umfassenden Phänotyping-Sensorik mit einem Roboterarm ausgestattet, der beispielsweise mechanische Unkrautbekämpfung oder

präzises Besprühen von Pflanzen erlaubt. Das Fahrwerk des *Ladybird* besteht aus vier Rädern mit jeweils einem Elektromotor zum Fahrantrieb. Die Räder sind einzeln lenkbar, sodass im Wesentlichen zwei Spurweiten (1500 mm und 2000 mm) einstellbar sind. Das Gehäuse des Roboters ist mit Solarzellen bestückt, die die LiFePO₄-Akkus aufladen. Bei langsamer Fahrt über ebenes Terrain kann der Roboter mittels der Solarzellen energieautark betrieben werden (Underwood et al. 2017).

Abbildung 16: Roboter Ladybird



Quelle: Underwood et al. (2017).

Abbildung 17: Roboter AgBot II



Quelle: QUT (2017)

Einen ähnlichen Einsatzzweck verfolgt der Roboter *AgBot II* der Queensland University of Technology. Der Antrieb und die Lenkung erfolgt über Radnabenmotoren in den Hinterrädern, die Vor-

derräder sind nicht angetrieben und drehend aufgehängt. In der Mitte befindet sich ein Anbau-
raum für Phenotyping- und Unkrautbekämpfungseinheiten.

Roboter zur Pflege

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Roboter zur Bonitur können über entsprechende Apps (Bonirob) oder Werkzeuge (Ladybird) ebenfalls Pflegeaufgaben ausführen, jedoch gibt die Bonituraufgabe wesentliche Randbedingungen zur Gestaltung der Roboter. Daher werden im Folgenden Roboterkonzepte vorgestellt, die ausschließlich Pflegeaufgaben erfüllen.

Die Firma Nao Technologies bietet mit dem Roboter Oz kommerziell einen Roboter zur Unkrautbekämpfung zwischen und in Pflanzenreihen an. Der Roboter ist 40 cm breit und wiegt inklusive Batterien und Werkzeugen 150 kg. Die Energieversorgung kann mittels Blei- oder Li-Ion-Akkus erfolgen. Jedes der vier Räder ist mit einem 110-W-Elektro-Motor ausgestattet. Zur Unkrautbekämpfung sind verschiedene Schare und Striegel einsetzbar. Die Navigation erfolgt durch ein Kamerasystem und die Identifikation von Pflanzenreihen (Nao Technologies 2016).

Abbildung 18: Roboter Nao Oz



Quelle: Nao Technologies (2016).

Abbildung 19: Roboter PUMAgri

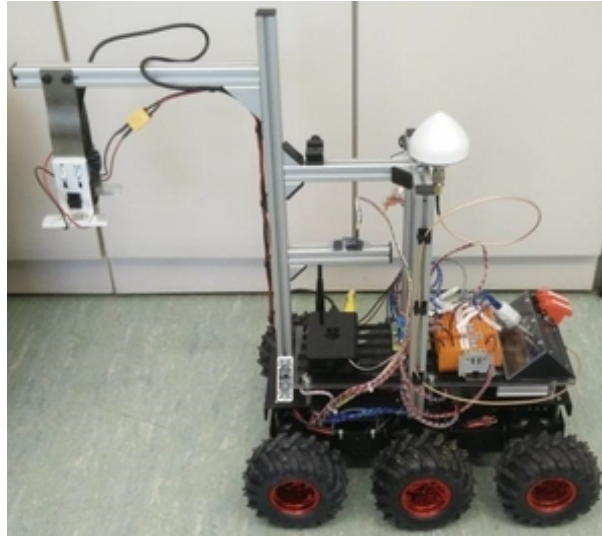
Quelle: SITIA (2017).

Der Roboter *PUMAgri* des französischen Forschungsinstituts SITIA stellt eine etwas größere Version des Najo Oz dar und kann mit konventionellen Anbaugeräten zur Unkrautbekämpfung ausgestattet werden. Der Antrieb erfolgt über die Hinterräder, die Vorderräder sind lenkbar ausgeführt.

Die Firma ecoRobotix plant die Markteinführung eines Roboters zur selektiven Herbizidausbringung in 2018. Der mit einem Gewicht von 130 kg und einer Arbeitsbreite von 2 m sehr leicht gebaute Roboter erkennt über eine Kamera Unkräuter (bisher in Raps und Rüben) und besprüht diese dann selektiv mit einem Herbizid. Die Sprüheinrichtung ist an einem Roboterarm angebracht. Die Spurweite ist von 35 bis 70 cm verstellbar. Die Maschine wird durch Solarzellen und eine Batterie mit Energie versorgt, dadurch ist ein energieautarker Betrieb möglich (ecoRobotix AG 2017).

Abbildung 20: Roboter ecoRobotix

Quelle: ecoRobotix AG (2017).

Abbildung 21: Labormodell des Roboters zur Schnecken und Mäusebekämpfung

Quelle: Universität Kassel (2016).

In einem Kooperationsprojekt der Firma KommTek, der Universität Kassel und dem Julius Kühn-Institut wird ein Roboter zur autonomen Schnecken- und Mäusebekämpfung entwickelt. Über ein Kamerasystem werden die Schnecken und Mäuse erkannt, klassifiziert, kartiert und anschließend mechanisch unschädlich gemacht. Der Roboter kann auf dem Acker mittels eines RTK-GPS autonom navigieren (Universität Kassel 2016).

Verschiedene Firmen bieten mittlerweile kleine Roboter für die Rasenpflege an. Obwohl sie nicht direkt im landwirtschaftlichen Umfeld eingesetzt werden können, sollen sie kurz erläutert werden. Die Geräte mähen den Rasen mit einer Messerscheibe mit mehreren aufgesetzten Messern. Der Arbeitsbereich wird mittels einer in der Erde liegenden Signalleitung abgesteckt. Einfache Systeme bewegen sich nach dem Zufallsprinzip, d. h. wenn sie die Signalleitung oder ein Hindernis erreichen, ändern sie ihre Richtung um einen vorgegebenen Wert. Über einen gewissen Zeitraum wird so die gesamte Fläche bearbeitet. Aufwändigere Systeme sind mit einem GPS-Empfänger ausgestattet und können damit gezielt Stellen mit mehr Rasenwachstum öfter anfahren.

Abbildung 22: Rasenmäroboter Indego



Quelle: Bosch (2017).

Abbildung 23: Unkrautroboter Tertill



Quelle: Franklin Robotics (2017).

Eine Roboterlösung zur Unkrautbekämpfung in Blumen- oder Gemüsebeeten wurde von der Firma Franklin Robotics vorgestellt. Der Roboter *Tertill* bewegt sich ebenfalls im Zufallsprinzip durch das Beet und erkennt über eine Kamera Unkräuter und bekämpft sie mit einem rotierenden Schneiddraht. Kleine Nutzpflanzen müssen mit einem Drahtgestell geschützt werden, da keine Unterscheidung zwischen Unkraut- und Nutzpflanze stattfindet.

Roboter zur Ernte

Vor allem in der Obst- und Gemüseernte wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl an Robotern konzipiert und entwickelt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei weniger auf dem Roboterkonzept oder dem Fahrwerk, sondern vor allem auf der Erkennung reifer Früchte, der Führung eines Roboterarms zu diesen Früchten sowie auf dem korrekten Greifen der Früchte. Einen sehr umfassenden Überblick über die bisherigen Entwicklungen im Bereich der Ernte für Obst und Gemüse

bietet Bac et al. (2014). Vier wesentliche Herausforderungen werden für die weitere Entwicklung genannt:

- Vereinfachung der Ernteaufgabe durch angepasste Anbaumethoden
- Verbesserung der Genauigkeit der Roboter
- Definition und Messung von Qualitätsmerkmalen
- Veränderung von Rahmenbedingungen für den Einsatz von Robotern

Eine Übertragung auf die hier untersuchten klassischen Feldfrüchte ist nur sehr eingeschränkt möglich, da sich vor allem die Randbedingungen auf dem Feld wesentlich unterscheiden. Beispielsweise müssen bei der Obsternte einzelne Früchte identifiziert und abgetrennt werden, während bei der Getreideernte die ganze Pflanze geerntet bzw. verarbeitet wird. Kleintechnische Roboterkonzepte zur Ernte von Feldfrüchten wurden bisher nicht verfolgt.

Verfahrensübergreifende Arbeiten

Neben den vorgestellten Lösungen für einzelne Aufgaben wurden bestehende Kleintraktoren automatisiert, die damit theoretisch auch verfahrensübergreifend eingesetzt werden können.

Eine Vorarbeit zum grundlegenden Gedankenkonzept einer Bewirtschaftung mit Robotern wurde in Blackmore et al. (2004a) vorgestellt. Als wesentliche Anforderungen an kleine Fahrzeuge werden die folgenden genannt:

- kleine Größe
- leichtes Gewicht
- sicherer Betrieb
- Möglichkeit der Koordination mit anderen Maschinen

Die Automatisierung eines Kleintraktors wird in Blackmore et al. (2004b) beschrieben. Durch zusätzliche Sensorik wie Laserscanner, GPS oder Kamerasysteme ist eine autonome Ausführung der Fahraufgaben möglich. Eine Möglichkeit zur automatisierten Aussaat mittels eines entsprechenden Anbaugerätes wird in Griepentrog und Blackmore (2007) gezeigt.

Ein ähnlicher Ansatz wurde im Forschungsprojekt RHEA verfolgt (European Commission 2014). Dort wurden mehrere Kleintraktoren zur autonomen Ausführung von Pflegearbeiten wie Sprühen oder Unkrauthacken ausgerüstet.

Zusammenfassung und Besonderheiten für mobile Roboter im Agrarbereich

Die Aufstellung macht deutlich, dass die bisherige Entwicklung der Agrarroboter vor allem davon geprägt ist, dass einzelne Roboter gezielt für ihren jeweiligen Einsatzzweck konzipiert wurden. Erste Ansätze eines modularen Gedankens zeigen die Roboter zur Bodenbearbeitung *Vibro Crop Robotti* und *Thorvald* sowie der *Bonirob*. Die Roboter sind dabei jedoch entweder sehr flexibel in

Bezug auf ihre Spurweiten (und damit schwer und teuer) oder sehr eingeschränkt in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeiten. In dem folgenden Szenario zur Kleintechnik muss dieser Gedanke daher aufgenommen und auf alle Verfahrensschritte erweitert werden.

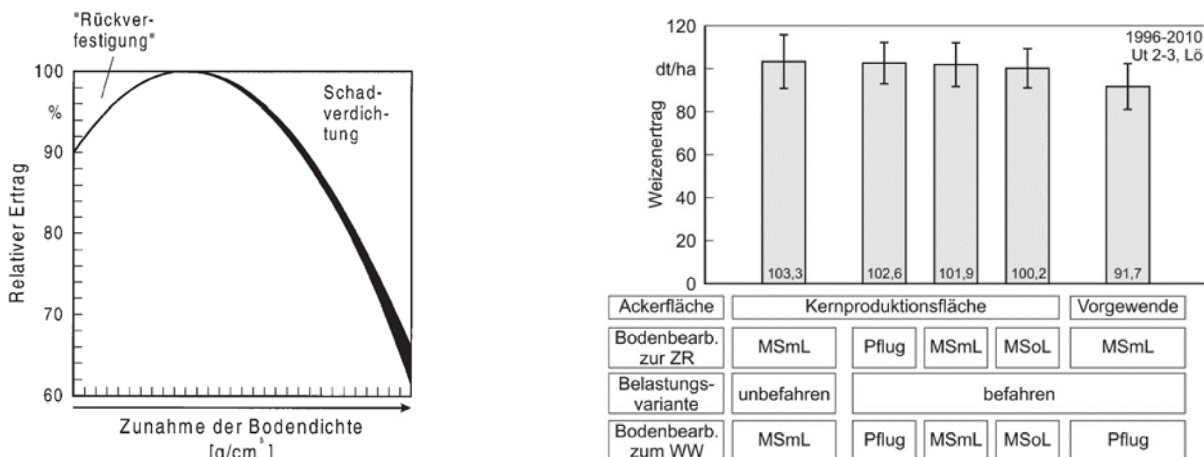
Weiterhin wird deutlich, dass bisher überwiegend Teillösungen für einzelne Aufgaben gesucht wurden. Ein umfassendes System, in dem der gesamte Pflanzenbau über Kleinroboter gesteuert wird, wurde bisher nicht verfolgt. Dies wäre jedoch Voraussetzung, wenn die im Folgenden aufgezeigten Potenziale eines veränderten Pflanzenbaus tatsächlich gehoben werden sollen. Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend ein Szenario entwickelt, in dem das gesamte Anbauverfahren von autonomen Kleinmaschinen gesteuert wird.

3.1.2 Potenzielle Vorteile der Kleintechnik

In der Vergangenheit sind Landmaschinen immer größer dimensioniert worden, um die Arbeitskraft mit einer hohen Schlagkraft optimal auszulasten. Entsprechend sind auch die landwirtschaftlichen Flächen durch Flurbereinigungen vergrößert worden, um die Maschinen effizient einsetzen zu können. Mittlerweile kommt die Großtechnik mit den großen Abmessungen und den hohen Gewichten aber im Straßenverkehr und auf dem Acker an Grenzen.

Der Pflanzenertrag, kann durch Bodenverdichtung verursacht, durch schwere Maschinen signifikant reduziert werden, wenn eine bestimmte Bodendichte überschritten wird (Raghavan et al. 1979; Arvidsson und Håkansson 2014) (Abbildung 24). Besonders führen die häufigen Überfahrten mit hohen Lasten am Vorgewende zu Ertragsdefiziten, die im Weizen auf 10 % Minderertrag quantifiziert worden sind (Brunotte et al. 2011, S. 67). Autonome Kleinmaschinen haben geringere Maschinengewichte und können den Unterboden daher nicht so verdichten wie schwere Großtechnik, daher könnten Ertragsdefizite zukünftig verringert werden. Dazu gilt es allerdings, auch die Effekte auf den Oberboden in zukünftigen Feldversuchen genauer zu analysieren.

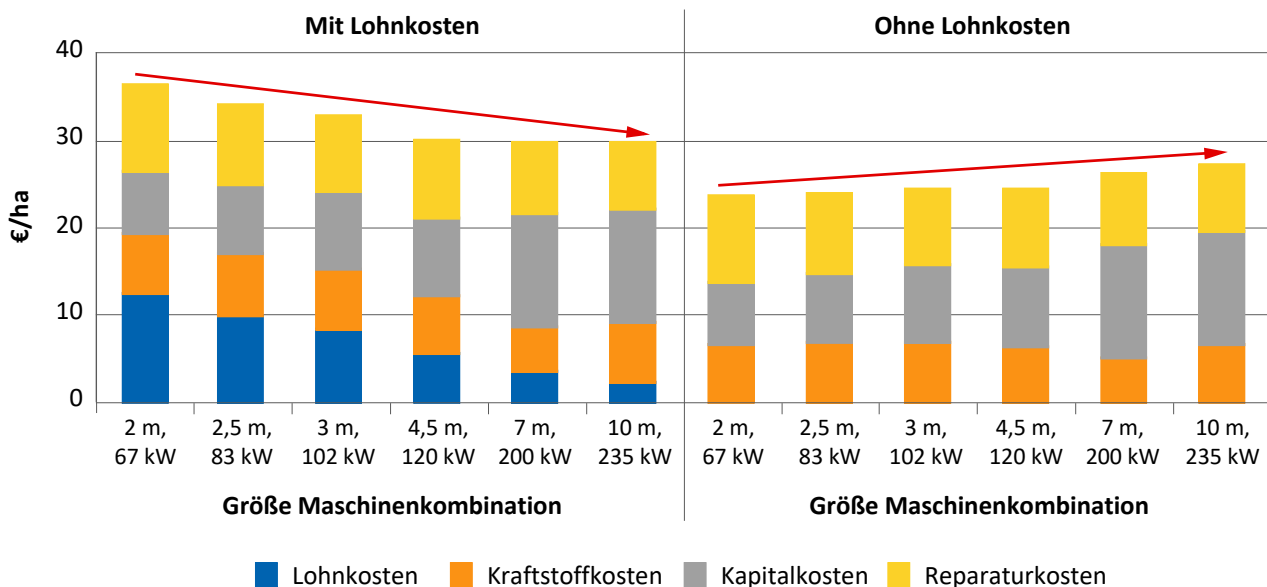
Abbildung 24: Ertragsverluste durch Schad- und Bodenverdichtung



Quelle: Sommer et al. (2001); Brunotte et al. (2011).

Neben der Bodenverdichtung ist der Fach- bzw. Arbeitskräftemangel global wie national ein Problem in der Landwirtschaft, hier bieten Feldroboter eine Möglichkeit, dem entgegenzusteuern. Zum einen könnte der Wegfall von Arbeitskräften kompensiert werden, zum anderen bieten die neuen Technologien auch das Potenzial, junge Leute für die Landwirtschaft zu begeistern.

Abbildung 25: Arbeitserledigungskosten für Bodenbearbeitung in Abhängigkeit der Maschinengröße



Quelle: Eigene Darstellung nach KTBL (2017).

Daneben zeigt das Beispiel der Arbeitserledigungskosten in der Bodenbearbeitung (Abbildung 25), dass heutige große Maschinenkombinationen pro Hektar theoretisch teurer sind als kleine, wenn die Lohnkosten wegfallen würden. Bei der Bodenbearbeitung hat der Lohnkosten-

anteil noch einen relativ hohen Anteil an den Arbeitserledigungskosten, was diesen Effekt erklärt. Bei kapitalintensiven Verfahren wie der Ernte haben Lohnkosten allerdings nur einen relativ kleinen Anteil und beeinflussen damit weniger die Gesamtwirtschaftlichkeit des Verfahrens (KTBL 2017).

Daher galt es hier, die bekannten Maschinensysteme genauer zu hinterfragen, um potenzielle Kosteneinsparungen zu ermitteln. Beim Einsatz mehrerer kleinerer Feldroboter anstatt einer großen Maschine könnten die Arbeiten zuverlässiger ausgeführt werden, indem das Risiko einer völligen Arbeitsunterbrechung vorgebeugt wird. Besonders bei der landwirtschaftlichen Ernte ist eine fristgerechte Durchführung entscheidend, damit die vorgegebenen Erntequalitäten eingehalten werden können.

Zur Wirtschaftlichkeit von autonomen Landmaschinen bzw. kleinen Feldrobotern existieren nicht für alle landwirtschaftlichen Verfahren wissenschaftliche Studien (Pedersen et al. 2008, 2007, 2006, 2005, Have 2004; Gaus 2017b). Laut Goense (2003) könnte eine reihenspezifische Bodenbearbeitung zukünftig wirtschaftlich werden aufgrund steigender Lohnkosten und abnehmender Preise für Navigationssysteme sowie für kleine Roboter. Have (2004) zeigt, dass die Maschinengrößen in autonomen Traktor-Gerät-Kombinationen viel kleiner sind als in konventionellen Systemen, wenn für den autonomen Traktor doppelt so viele Arbeitsstunden angenommen werden können. Pedersen et al. (2005) entwickelte wirtschaftliche Robotersysteme, um Feldfrüchte zu detektieren und um Pflanzenschutzmittel zu applizieren. Besonders für verschiedene Ernteverfahren fehlen ökonomische Analysen, daher ist für die vorliegende Untersuchung ein umfassendes KleintechnikszENARIO von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte entwickelt worden.

Darüber hinaus haben Feldroboter auch das Potenzial, durch kleine Maschinenmaße vielfältigere Pflanzenbausysteme wie Streifenanbau (Intercropping; vgl. Meyer 2005) oder Spot-Farming (Wenger et al. 2017) zu bewirtschaften. Pflanzenbauliche Feldversuche zeigen, dass Weizen im Streifenanbau durch eine höhere Anzahl an Trieben auch höhere Erträge erzielen kann (Knörzer et al. 2010). Durch den Anbau von verschiedenen Kulturkombinationen auf einem Feld wird zudem die Biodiversität erhöht, die wiederum einen positiven Effekt auf Erträge der Kulturpflanzen haben kann (Letourneau et al. 2011), besonders auch durch höheres Insektenaufkommen (Garibaldi et al. 2013). Solche positiven Synergieeffekte sind bisher wenig nachgewiesen, als belastbar gilt der positive Zusammenhang zwischen Heterogenität und Bienenaufkommen (Kennedy et al. 2013). Mehr Bienen bedeuten beim Raps höhere Erträge (Mandl 2007). Für andere Kulturen bedarf es weitere Forschungsarbeiten und Feldversuche, um Ertragseffekte genauer zu beziffern. Darüber hinaus könnten sogenannte Push-and-Pull-Systeme durch eine Auswahl spezieller Kulturkombinationen dazu beitragen, phytosanitäre Probleme im Feld biologisch zu lösen, um den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren (vgl. Altieri und Letourneau 1982). In Afrika werden bereits solche Systeme genutzt, indem Napier- oder Elefantengras um die Maisfelder gepflanzt wird, was den Stängelbohrer anzieht und vom Mais fernhält (vgl. Gröhn-Wittern 2017). Solche nachhaltigen Intensivierungsansätze sind in Deutschland nicht verbreitet, solche Mischkultur-Systeme befinden sich oft auf weniger produktiven Standorten, wo sie der Ertragsstabilität dienen (Malézieux

et al. 2009). Bei der Auswahl verschiedener Kulturkombinationen gilt es, die richtigen Feldkulturen zu kombinieren, um keine „negativen Synergieeffekte“ zu verursachen (vgl. Gurr et al. 2004). Anhand der Untersuchungen ist in diesem Bereich „neuer Kulturkombinationen“ großer Forschungsbedarf identifiziert worden.

3.2 Entwicklung des Kleintechnikszenarios

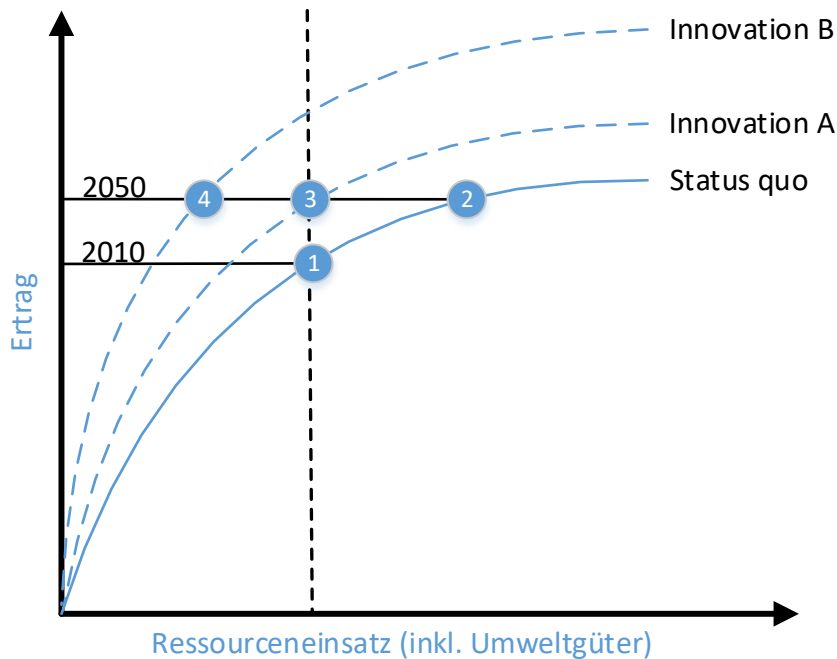
Im folgenden Abschnitt wird die Entwicklung des Kleintechnikszenarios beschrieben. Zu Beginn werden die Vorgehensweise zur Szenarioentwicklung und bestehende Abhängigkeiten aufgezeigt. Anschließend werden Hypothesen für ein neues Pflanzenbausystem entwickelt. Danach erfolgt für jeden Verfahrensschritt die Konzeptionierung der Maschinen basierend auf den pflanzenbaulichen Anforderungen. Abschließend wird das vorgestellte Szenario ökonomisch bewertet.

3.2.1 Hypothesen eines neuen Pflanzenbausystems

Während bei der Entwicklung des Großtechnikszenarios an heute üblichen Pflanzenbausystemen festgehalten wurde, ist beim KleintechnikszENARIO ein anderer Ansatz gewählt worden. Hier wurde zunächst die Frage gestellt, wie das pflanzenbauliche System an sich optimiert werden kann, damit im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung mehr Output bei weniger Input produziert werden kann und zusätzlich Systemdienstleistungen verbessert werden können. Erst dann ist die Frage zu stellen, mit welchen Techniken, unter den sich aus dem Einsatz der Digitalisierung und von autonomen Kleinmaschinen abzeichnenden Möglichkeiten, diese neuen Pflanzenbausysteme bewirtschaftet werden können.

Die DFG Senatskommission für Agrarökosystemforschung hat sich 2014 in einem Grundsatzpapier zum Thema der nachhaltigen und ressourceneffizienten Erhöhung der Flächenproduktivität geäußert (Wolters et al. 2014). Es wurde die These formuliert, dass eine nachhaltige Intensivierung des Pflanzenbaus nur durch Innovationen zu erreichen ist, da der Grenznutzen eines zunehmenden Ressourceneinsatzes zur weiteren Ertragssteigerung mit etablierten Verfahren immer weiter abnimmt (Abbildung 26). Die Kommission kommt u. a. zu dem Schluss, dass die nachhaltige Steigerung der Pflanzenproduktion nur im Landschaftskontext sinnvoll ist und macht dieses als einen zukünftigen interdisziplinären Forschungsschwerpunkt aus. In den weiteren Ausführungen zu diesem Schwerpunkt werden die kleinräumige und zeitliche Diversifikation von Anbausystemen sowie die Einbeziehung von Randstrukturen und Habitaten als ein Element dieser Strategie benannt. Offen blieb die Frage, mit welchen praxisnahen Instrumenten sich Agrarlandschaften so gestalten lassen, dass sich die Ziele des Biodiversitätsschutzes und der nachhaltigen Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion zur Deckung bringen lassen.

Abbildung 26: Beziehung zwischen Ressourceneinsatz für die Pflanzenproduktion und dem damit erzielbaren Ertrag



Quelle: Wolters et al. (2014): Wenn das Belastungslimit bereits erreicht ist (1), ist eine Steigerung der Flächenproduktivität mit etablierten Verfahren (2) keine Option. Der hier beispielhaft für 2050 prognostizierte Bedarf lässt sich bei gleicher (3) oder reduzierter Umweltbelastung (4) nur durch Innovationen erreichen.

Vor dem Hintergrund neuer technologischen Entwicklungen, wie sie z. B. aus der Digitalisierung der Landwirtschaft hervorgehen, oder der Option des Einsatzes autonomer Maschinen, besteht zukünftig die Chance, dass die Technik an die optimalen pflanzenbaulichen Erfordernisse angepasst werden kann und gleichzeitig die Landschaftsebene in die Gestaltung von nachhaltigen Produktionssystemen mit einbezogen wird. Daraus resultiert die Frage, welche Anforderungen an ein optimales Pflanzenbausystem im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung zu stellen sind.

Anforderungen an ein alternatives Pflanzenbausystem

Die Kulturpflanze stellt bestimmte Anforderungen an ein optimales Wachstum. Diese werden zum einen in ihren Grundansprüchen deutlich, weiterhin gibt es Anforderungen und Restriktionen, die auf das Wachstum wirken und berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden diese näher dargelegt.

Grundansprüche von Kulturpflanzen lassen sich auf einige wenige Parameter reduzieren:

- ausreichend Licht
- ausreichend Standraum (ober- und unterirdisch) und möglichst wenig Konkurrenz
- ausreichende und termingerechte Wasserversorgung
- ausreichende Bodengüte, -beschaffenheit und -fauna

- ausreichende und termingerechte Nährstoffversorgung
- gesunde Fruchtfolgen
- im Bedarfsfall Pflanzenschutz

Im Rahmen der Entwicklung eines neuen Pflanzenbausystems gilt es, die Grundansprüche der Kulturpflanzen zu befriedigen, um optimales Wachstum zu gewährleisten und um Wachstumsfaktoren effizient auszunutzen (Mitscherlich 1922). Sowohl das Design des Pflanzenbausystems, als auch die darauf angepasste Verfahrenstechnik, sollten die genannten Parameter soweit möglich fördern.

Darüber hinaus gibt es weitere Anforderungen und Restriktionen, die beim Anbau von Kulturpflanzen im Sinne einer natur- und umweltgerechten Gestaltung der landwirtschaftlichen Produktionssysteme auf Schlagebene Berücksichtigung finden sollten. Dazu gehören z. B.

- die generelle Reduzierung des Einsatzes von chemischen Pflanzenschutzmitteln auf das notwendige Maß;
- die Vermeidung der Verbreitung von chemischen Pflanzenschutzmitteln bei der Applikation auf Nicht-Zielflächen;
- ein verstärkter Bodenschutz durch Vermeidung von (Mehrfach-) Überfahrten, insbesondere bei schweren Radlasten;
- eine stärkere Berücksichtigung von Wettereinflüssen (z. B. Wind, Regen, Sonneneinstrahlung) und weiteren zeitlich abhängigen, in der Natur vorkommenden Ereignissen (z. B. Bienenflug) bei der Bewirtschaftung der Produktionsflächen.

Darüber hinaus gibt es aber auch strukturelle Anforderungen und Restriktionen hinsichtlich einer natur- und umweltgerechten Gestaltung, die sich auf einer größeren Skalenebene ergeben. Dazu gehören z. B. die

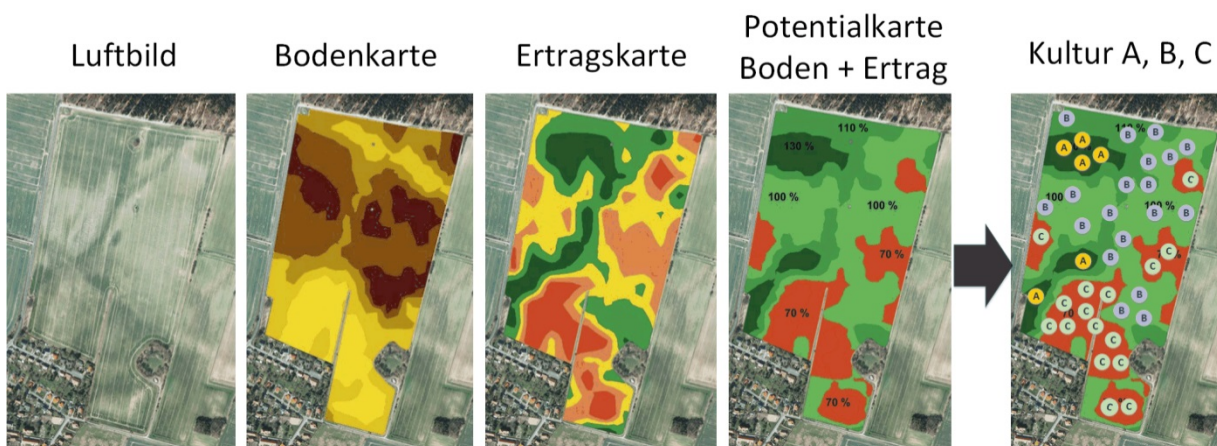
- Entwicklung von Strukturen, die auf die natürlichen geografischen und klimatischen Bedingungen abgestimmt sind (z. B. Berücksichtigung von lokal sich ändernden Bodenqualitäten, intelligente Verwendung von Flächen hoher und geringer Produktivität);
- Schaffung von Strukturen, die der Wind- und Bodenerosion sowie der Stoffverlagerung auch unter sich wandelnden klimatischen Bedingungen (z. B. Starkregenereignisse) Einhalt gebieten (Orientierung der Kulturreihen, Neuanlage bzw. Rekultivierung von alten Gräben oder Landschaftselementen wie Hecken);
- Schaffung von Refugien und Pufferzonen, die zu einer Vernetzung von Biotopen sowie Stärkung der Biodiversität und der Ökosystemdienstleistungen in der Agrarlandschaft führen;
- positive Beeinflussung des Landschaftsbildes durch kleinere Strukturen.

Die genannten Strukturparameter gilt es sowohl auf Schlag- als auch auf Landschaftsebene zu fördern und in Einklang zu bringen (Christen 2009). Die meisten landwirtschaftlichen Produkti-

onsflächen sind in ihren Eigenschaften nicht homogen. Sie weisen in der Fläche z. B. unterschiedliche Bodenarten auf, die einen Einfluss auf das Ertragsniveau und die Wasserversorgung haben. Ein zukünftiges Pflanzenbausystem sollte im Zuge der Produktionsmaximierung auf solche und andere schlagspezifische Unterschiede (z. B. Höhenprofile, Flächen mit Erosionspotenzial, geografische Ausrichtung etc.) Rücksicht nehmen. Eine grundlegende Möglichkeit zur Berücksichtigung von kleinräumigen Unterschieden stellt "Spot Farming" dar. Die Idee dabei ist, den einzelnen Schlag in eigenständige Spots mit in sich weitgehend homogenen Eigenschaften aufzuteilen und diese je nach spezifischen Eigenschaften mit unterschiedlichen Kultivierungsmethoden oder gar unterschiedlichen Kulturpflanzen und Fruchtfolgen zu bewirtschaften.

Zur Definition solcher Spots können verschiedene Informationen verschnitten werden. Im einfachsten Fall z. B. eine Bodenkarte mit den erzielten teilflächenspezifischen Erträgen. Aus der Schnittmenge dieser (und weiterer Daten) können Teilflächen unterschiedlicher Qualitäten in einem Ackerschlag identifiziert werden (Abbildung 27). Auf Spots mit hoher Produktivität bzw. guter Bodenstruktur kann dann z. B. eine standortspezifische Fruchtfolge (z. B. Zuckerrübe-Winterweizen-Mais-Winterweizen), auf Spots mit geringerer Produktivität eine andere standortspezifische Fruchtfolge (z. B. Raps-Roggen-Mais-Roggen) realisiert werden. Spots mit sehr geringer Produktivität könnten bewusst als Refugien oder Pufferzonen z. B. mit Blühpflanzen oder auch, wo sinnvoll, zum Schutz vor Erosion, gezielt mit Landschaftselementen bestellt werden.

Abbildung 27: Einfaches Beispiel für Informationsüberlagerung zur Definition von kleinräumigen Unterschieden in Ackerflächen für das Spot Farming



Quelle: Eigene Darstellung nach Claas (2016).

Um in diesem Ansatz zu einer effizienteren Ressourcennutzung zu kommen und auch, um Erträge zu maximieren, sind im Rahmen des Spot Farming zwei wesentliche Elemente zu berücksichtigen. Zum einen sollte der Standraum der Einzelpflanze durch eine Gleichstandsamt im Dreiecksverband ober- und unterirdisch maximiert werden. Hier sind entsprechende Sätechniken notwendig, die das in hinreichender Genauigkeit, auch in Bezug auf die gewünschte Ablagetiefe, georeferenziert erledigen können. Zum anderen sollten Pflegemaßnahmen perspektivisch auf Ebene der

Einzelpflanze stattfinden. Dazu sind Sensortechniken notwendig, die in der Lage sind, die aktuellen Bedürfnisse der Pflanze zu erkennen und völlig neue Maschinenkonzepte, um diese unter den Bedingungen des Spot Farming zu befriedigen.

3.2.2 Technische Konzeptentwicklung des Kleintechnikszenarios

Die Entwicklung kleintechnischer Lösungen für die Verfahrensschritte im Ackerbau ist ein komplexer und iterativer Prozess, bei dem verschiedenste Abhängigkeiten aus Pflanzenbau, Technologie und Ökonomie betrachtet werden müssen. Für die Szenarienentwicklung und -bewertung wurde das in Abbildung 28 dargestellte dreistufige Verfahren angewendet, das folgende Arbeitsschritte umfasst:

Phase 1: Definition eines Pflanzenbausystems

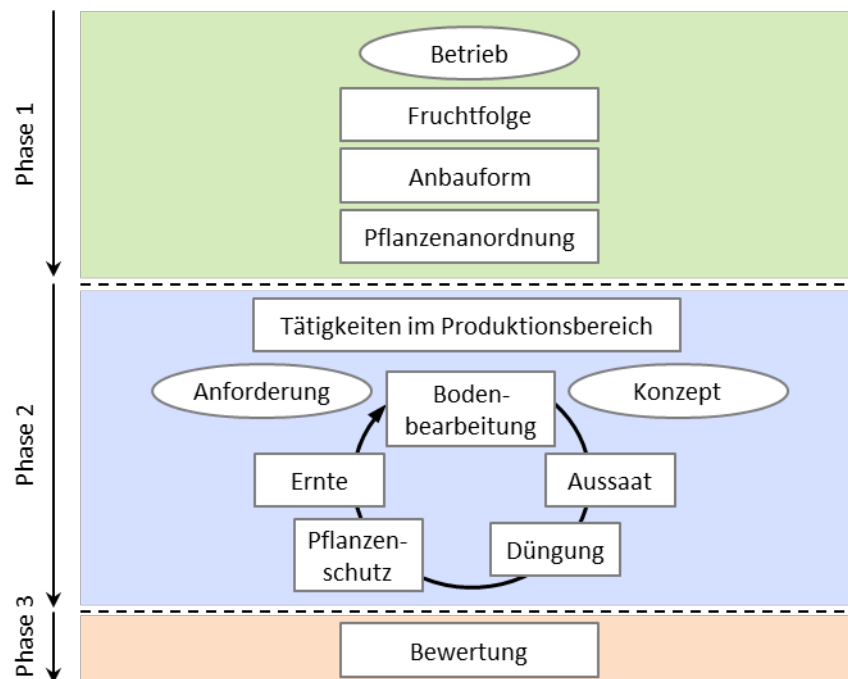
In der ersten Phase werden die pflanzenbaulichen Randbedingungen für ein neues Pflanzenbausystem beschrieben. Beispielsweise werden hier die Kulturauswahl, Anbauform und die Pflanzenanordnung festgelegt. Die Schnittstellen zur zweiten Phase sind beispielsweise die Wachstumsverläufe, Nährstoff- und Pflanzenschutzbedarfe der einzelnen Kulturen.

Phase 2: Anforderungen für die Maschinen festlegen

Die zweite Phase überführt die oben genannten Parameter in genaue Anforderungen und Zielsetzungen für jedes Verfahren. Basierend auf diesen Infos werden dann Maschinenkonzepte entwickelt und Parameter wie Energieverbrauch, Flächenleistung oder Maschinenkosten abgeschätzt.

Phase 3: Bewertung des Systems

In der dritten Phase wird anhand dieser Abschätzungen eine ökonomische Bewertung des Pflanzenbausystems vorgenommen.

Abbildung 28: Prozess zur Entwicklung der kleintechnischen Konzepte

Quelle: Eigene Darstellung.

Zwischen den Schnittstellen der einzelnen Phasen ergeben sich Abhängigkeiten zwischen den Bereichen Pflanzenbau, Technologie und Ökonomie.

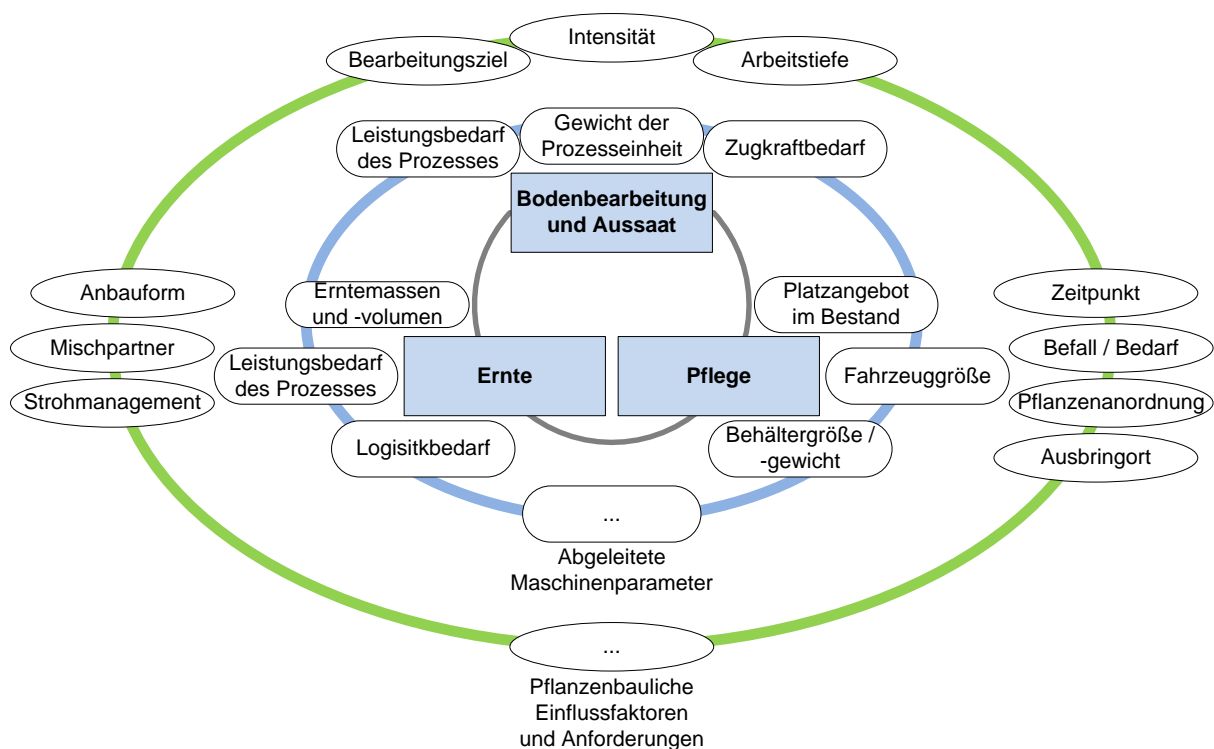
Wesentliche Beispiele dieser Abhängigkeiten werden nachfolgend beschrieben:

- Aus dem optimalen Standraum der Pflanzen und des Pflanzenwachstums ergibt sich für Getreide und Raps beispielsweise eine maximale Fahrwerksbreite bzw. Fahrzeuggröße von etwa 10 cm, wenn Fahrgassen vermieden werden sollen.¹ Mit dieser Breite ist die Ausführung von Pflegearbeiten in Raps, Mais und Rübe noch möglich, ohne die Pflanzen zu beschädigen und ohne Fahrgassen anzulegen.
- Die Länge der Fahrwerke ergibt sich wiederum aus dem Antriebskonzept und der geforderten Manövrierbarkeit sowie über die Aufstandsfläche aus dem zu tragenden Gewicht. Als Richtwert für einen zulässigen Bodendruck wurden 50 kPa bzw. 0,5 bar angenommen, etwa die Hälfte des heute als „gut“ angenommenen Bodendrucks (Lorenz et al. 2016).
- Die Gewichte der Maschinen ergeben sich vor allem aus dem geforderten Leistungsbedarf und entsprechend erforderlichen Antriebsmotoren. Die Bodenbearbeitung erfordert den höchsten Leistungsbedarf, vor allem bestimmt durch die Art der Bearbeitung und der Arbeitstiefe und -breite.

¹ Die Vermeidung von Fahrgassen erscheint notwendig, weil die Ertragsverluste bei Fahrgassen bis zu 8 % betragen können (Abbildung 37).

- Die Arbeitstiefe und die Intensität der Bearbeitung orientieren sich wiederum an pflanzenbaulichen Vorgaben. Aus dem Leistungsbedarf ergibt sich über die Leistungsdichte der Elektroantriebe (VDMA 2015) ein grobes Gewicht der Maschinen. Dieses Gewicht muss über die Fahrwerke auf dem Boden abgestützt werden, bei gegebener Breite von 10 cm ergibt sich entsprechend die Länge der Fahrwerke. Ist stattdessen die Länge der Fahrwerke vorgegeben, beispielsweise durch Anforderungen zum Wendekreis am Vorgewende, kann über diese Beziehung das Maschinengewicht bzw. die verfügbare Leistung und letztendlich die Arbeitsbreite festgelegt werden. Abbildung 29 zeigt beispielhaft einige der Abhängigkeiten und Verknüpfungen.

Abbildung 29: Einflussgrößen auf das Roboterkonzept



Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Abhängigkeiten beeinflussen auch eine der wesentlichsten Fragestellungen bei der Konzeptionierung der Kleintechnik: „Was ist klein?“ bzw. „Wie groß ist die Kleintechnik?“. Eine konkrete Antwort auf diese Frage ist nicht direkt möglich, daher wurden in rekursiven Bearbeitungsschritten die pflanzenbaulichen, ökonomischen, technologischen und organisatorischen Gesichtspunkte einer „Maschinen-Größenordnung“ betrachtet und in die Konzeption einbezogen.

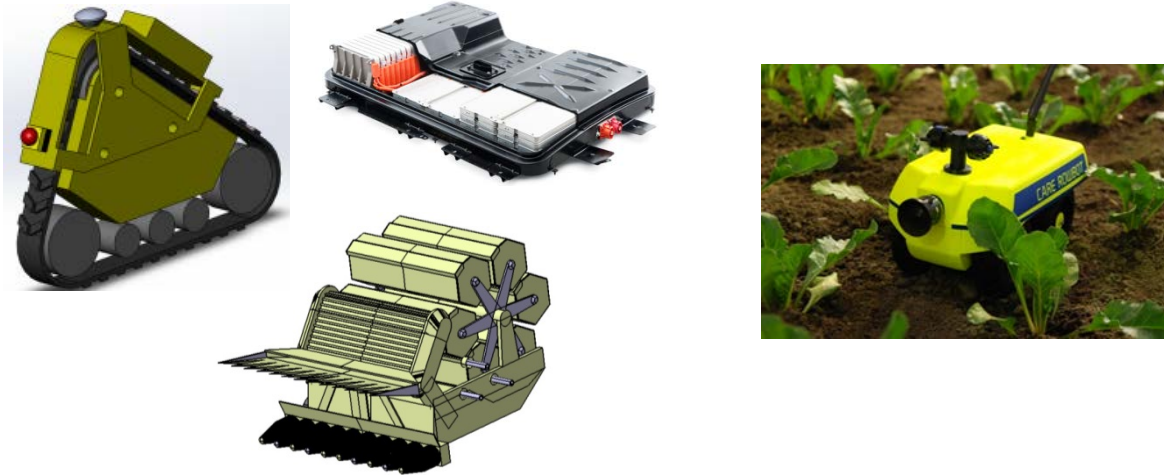
Im Zuge dieser Überlegungen wurden im Projektverlauf im Wesentlichen zwei Arten von Maschinenkonzepten entworfen und untersucht (Abbildung 30):

- Das **modulare Roboterkonzept** beschreibt einen modularen Ansatz einer Mechanisierung mit dem Ziel, möglichst viele Komponenten in möglichst vielen Verfahrensschritten zu nut-

zen, um die Auslastung der Maschinen zu maximieren. Es ist aufgeteilt in Fahrwerke, Prozesseinheiten und Energieversorgungseinheiten.

- (2) Das **Kleinstroboter-Konzept** beschreibt dagegen sehr kleine Roboter für Pflegearbeiten in Getreidebeständen, für die das modulare Konzept zu groß ist.

Abbildung 30: 1: Modulares Roboterkonzept (links) und 2: Kleinstroboter-Konzept (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Vielfalt möglicher Varianten und die Vermengung von Klein- und Großtechnik wird anhand des modularen Roboterkonzeptes deutlich: Der Übergang von einer „kleinen“, 1 m breiten Maschine, auf eine „große“, 10 m breite Maschine ist nur eine Frage der Dimensionierung und der Anzahl an Fahrwerken / Prozesseinheiten. Zur Bewertung der Konzepte muss daher die Einhaltung der pflanzenbaulichen Anforderungen sowie operative Parameter wie die Anpassung an topologische Verhältnisse oder der Aufwand für Rüstzeiten betrachtet werden.

Das Gewicht bzw. die Kapazität der Energieversorgungseinheit ist grundsätzlich variabel und abhängig vom Leistungsbedarf (und damit von der Maschinenbreite) und von der geforderten oder benötigten Flächenleistung. Im Zuge der Modularität und vor allem des geringen Bauraums der Antriebseinheiten ist eine zentrale Energieversorgung notwendig, um die an verschiedenen Positionen auf der Maschine befindlichen Aktoren zu versorgen. Aus Gründen der guten Regelbarkeit, der Modularität und des lokal emissionsfreien Betriebes wurden elektrische Aktoren an den Maschinen vorgesehen. Die geschätzten Leistungsdaten der Maschinenkonzepte beziehen sich daher auch immer auf einen elektrischen Antrieb mit Wirkungsgraden von ca. 90 %.

Die Energieversorgungseinheit kann grundsätzlich als elektrischer Energiespeicher (Batterie), als Verbrennungsmotor mit Generator, als Brennstoffzelle oder bei geringem Energiebedarf auch als Solarzelle ausgeführt sein. In der Konzeptionierung wurde als erster Schritt die Energieversorgungseinheit als elektrischer Energiespeicher betrachtet. Die Batterie wird zur Konzeptionierung vor allem durch die gravimetrische sowie die volumetrische Energiedichte [Wh/kg bzw. Wh/l]

beschrieben. Die Abhängigkeit der Energiedichte von der geforderten Flächenleistung ergibt sich aus den notwendigen Lade- oder Tauschzeiten für die Energieversorgungseinheiten. Im Zuge der Konzeptionierung der Maschinen sind nur sehr grobe Annahmen und Auslegungen möglich, da die genaue Bauart und –form der Motoren, die Batterietechnologie, das Spannungsniveau und auch Packaging-Fragen, beispielsweise zur Kühlung in dieser frühen Phase nicht beantwortet werden können. Im Zuge der Konzeptionierung der Maschinen bzw. der Energieversorgung wurde daher sofern möglich mit der elektrischen Leistung [kW] bzw. der elektrischen Energie [kWh] gearbeitet und weniger mit der Kapazität [Ah] und dem Spannungsniveau [V]. Wo dies nicht möglich war, wurden Beispiele aus der Landtechnik (Kegel und Tarasinski 2016) und vor allem aus der Automobiltechnik zur Abschätzung von Kapazitäten und Spannungsniveaus herangezogen. Zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklungen im Bereich der Batterietechnologie wurde unter anderem ein Gespräch mit Mitarbeitern des Instituts für Energie- und Systemverfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig geführt. Die Abschätzung zu künftigen Technologien fällt zwar schwer, jedoch gehen die Kollegen davon aus, dass im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) durch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten die Kapazität sowie auch die Entladeströme weiter steigen werden und die Li-Ionen-Batterien dadurch in den nächsten zehn Jahren die beherrschende Technologie sein wird. Für die Abschätzungen in Bezug auf die Maschinenkonzepte wurde daher im Folgenden von Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien (LiFe-Po) als Energiespeicher ausgegangen (Rahimzei et al. 2015). Als Kennwerte für die Konzeptionierung der Maschinen werden im Folgenden als volumetrische Energiedichte 250 Wh/l und als gravimetrische Energiedichte 150 Wh/kg angenommen.

Im Folgenden werden die entwickelten Kleintechnikkonzepte für die einzelnen Verfahrensschritte beschrieben. Der Abschnitt ist in Verfahrensschritte gegliedert. Es werden jeweils die bestimmenden pflanzenbaulichen Vorgaben beschrieben, anschließend werden die Gedanken zur Konzepterstellung erläutert. Wie schon bei der Großtechnik ist das Kapitel zur Bodenbearbeitung und Aussaat etwas ausführlicher, da auch auf die Vorgehensweise eingegangen wird und Bestandteile des modularen Roboterkonzeptes genauer erläutert werden.

3.2.2.1 Bodenbearbeitung und Aussaat

Wie oben beschrieben, verdichten kleine und leichte Maschinen den Boden grundsätzlich weniger als heutige Großmaschinen. Diese Verdichtungen müssen also durch die Bodenbearbeitung nicht wieder gelöst werden. Jedoch kann nicht auf eine Bodenbearbeitung verzichtet werden, wie vor allem die Gruppenarbeiten auf dem zweiten Fachbeirat zeigten. So muss die Bodenbearbeitung als Teil der Pflanzenschutzstrategie gesehen werden. Das bedeutet, dass beispielsweise durch die Zerkleinerung und Einarbeitung von organischem Material die Ausbreitung von Pilzkrankheiten unterbunden wird. Die Einmischung des Materials muss so tief in den Boden erfolgen, dass eine ausreichende Mischung mit Bodenpartikeln erfolgt. Dadurch wird sichergestellt, dass eine Verrottung stattfindet. Die notwendigen Arbeitstiefen sind den heutigen sehr ähnlich.

Im Folgenden werden die für die betrachtete Kulturfolge relevanten pflanzenbaulichen Vorgaben betrachtet, die in die Konzeptionierung der Maschinen eingingen.

Pflanzenbauliche Ansätze und Vorgaben bei der Bodenbearbeitung und Aussaat

Die heutigen Bodenbearbeitungsgeräte werden kulturübergreifend eingesetzt. Alternative Bearbeitungsverfahren durch Kleinmaschinen könnten jedoch dazu geeignet sein, spezieller auf einzelne Anforderungen von Kulturen einzugehen. Für eine erste Abschätzung wurde die Relevanz der in Abschnitt 2.1.2 genannten Aufgaben der Bodenbearbeitung für die einzelnen Kulturfolgen in der Fruchtfolge bewertet. Tabelle 3 zeigt die Wichtigkeit der einzelnen Aufgaben für die Bodenbearbeitung nach Silomais zu Weizen und gibt einen groben Überblick über die pflanzenbaulich angestrebten Struktureigenschaften. Dabei ist zu beachten, dass die Relevanz aus Praxissicht nach heutigen Gesichtspunkten bewertet wurde. Wie oben schon beschrieben, findet mit leichten Maschinen kaum Verdichtung statt, so dass sich die Hauptaufgabe insgesamt auf die Durchmischung von Boden und Pflanzenresten konzentriert.

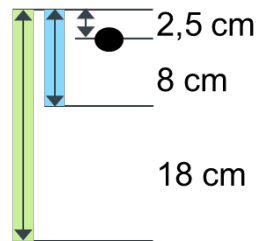
Tabelle 3: Relevanz von Aufgaben der Bodenbearbeitung für Weizen nach Silomais

Bearbeitungshorizont	Flach	Tief
Lockerung	+	++
Durchmischung	++	+
Zerkrümelung	+	+
Zerkleinerung	++	o
Einebnung	o	o
Rückverdichtung	+	++

Skala: ++ (sehr wichtig) bis – (unwichtig)

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 31: Bearbeitungshorizonte für Weizenpflanze

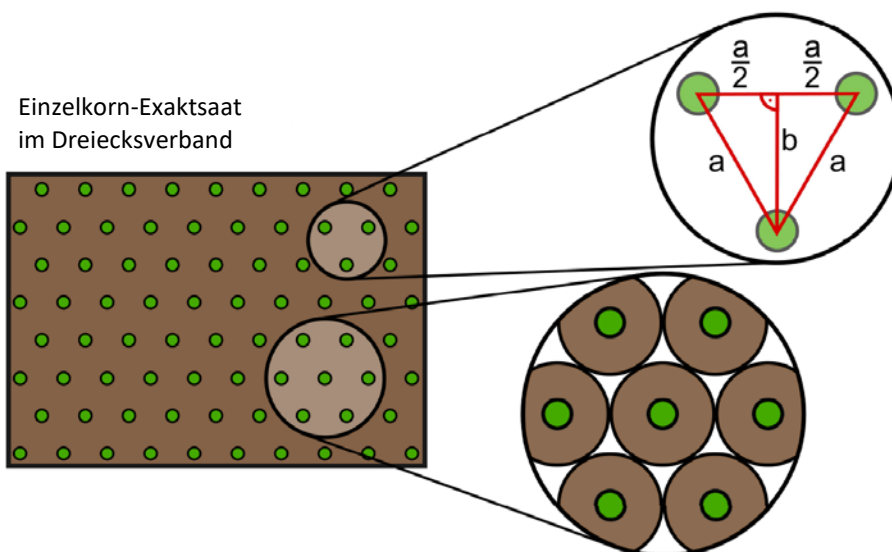


Quelle: Eigene Darstellung.

Die Bearbeitungshorizonte sind in Abbildung 31 dargestellt. Im grünen Bearbeitungshorizont (18 cm) ist vor allem die Zertrennung und grobe Vermischung der Maiswurzeln und der Wurzelgänge gefordert. Auf diese Weise wird verhindert, dass die Wurzeln in den alten Wurzelgängen wachsen und hier bodenbürtige Krankheiten übertragen werden. Im blauen Bearbeitungshorizont (8 cm) muss eine intensive Zerkleinerung der Rückstände und anschließende Durchmischung stattfinden. Dies ist notwendig, damit die Feinwurzeln in direktem Kontakt mit Bodenpartikeln gelangen (Bauer und Breunig 2017b).

Bei der Aussaat besteht die wesentliche Anforderung in der optimalen Verteilung der Pflanzen. Diese ist abhängig von der Aussaatstärke, die zwischen 150 und 220 Körnern pro m² liegt. Die ideale geometrische Verteilung ist der Dreiecksverband, in dem jede Pflanze den gleichen Abstand zu ihren Nachbarn hat (Abbildung 32).

Abbildung 32: Abstände zwischen den Pflanzen im Dreiecksverband



Quelle: Schievers (2017).

In der Literaturlauswertung und den Expertengesprächen hat sich gezeigt, dass für Weizen die Umsetzung der Gleichstandssaat nicht für alle Aussaatstärken zu optimalen Bedingungen führen

würde. Tabelle 4 zeigt die Abstände zwischen den Pflanzen (a) und den Abstand zwischen zwei Reihen (b) im Dreiecksverband für verschiedene Aussaatstärken. Bei einem Abstand zwischen Weizenpflanzen von mehr als 4 bis 4,5 cm neigt die Pflanze zu starker Bestockung, da sie keine Konkurrenz anderer Weizenpflanzen spürt. Im späteren Verlauf würden somit zu viele Ähren mit unterschiedlichen Reifegraden entstehen. Bei einer Aussaatstärke von 185 Pflanzen pro m² und einem Abstand a von 4 cm entsteht dagegen ein Abstand b von 12 cm.

Tabelle 4: Pflanzenabstände für Weizen im Dreiecksverband

Pflanzen pro m ²	Saatkornabstand a [cm]	Reihenabstand b [cm]
150	8,8	7,6
185	7,9	6,8
220	7,2	6,3

Quelle: Eigene Darstellung.

Für das weitere Vorgehen wurde eine maximale Breite von 7 cm für das kleine Roboterkonzept zur Pflege festgelegt. Mit dieser Randbedingung sollten die Maschinen grundsätzlich sowohl im Dreiecksverband als auch in Beständen mit einer Reihensaat eingesetzt werden. Ausgehend von diesen Anforderungen erfolgt im nächsten Schritt die Konzepterstellung.

Vorüberlegungen zur Konzepterstellung

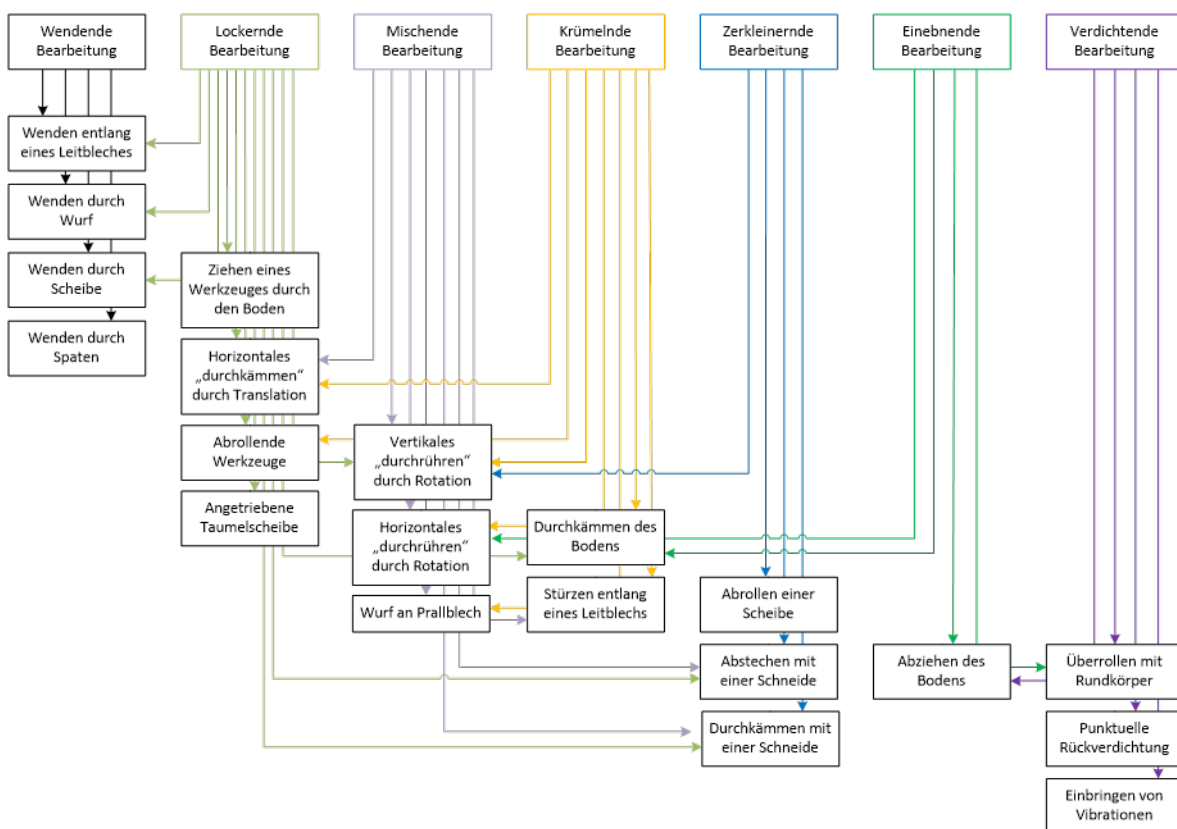
Heutige passive Bodenbearbeitungswerkzeuge wie Grubber oder Pflug ziehen Werkzeuge (Grubberschar, Pflugschar, ...) durch den Boden. Durch die Form und Anzahl der Werkzeuge sowie die Fahrgeschwindigkeit kann der Boden unterschiedlich intensiv bearbeitet werden. In Abhängigkeit der Arbeitstiefe und Arbeitsgeschwindigkeit sowie von Boden- und Werkzeugparametern verändert sich der Zugkraftbedarf (ASAE Standard). Grundsätzlich könnten zur Konzeptionierung kleiner Maschinen für die Bodenbearbeitung heutige Werkzeuge kleiner skaliert werden. Der skalierbare Faktor ist die Arbeitsbreite, da die Arbeitstiefe wie bei den pflanzenbaulichen Anforderungen beschrieben, weniger durch die Bodenverdichtung vorgegeben wird. Vielmehr besteht das Ziel darin, die bestehenden Wurzelgänge zu zerstören, um eine Übertragung von Erregern zu vermeiden.

Das Verhältnis zwischen aufzubringender Zugkraft und dem dafür notwendigen Maschinengewicht ergibt sich aus dem Triebkraftbeiwert κ . Unter optimalen Bedingungen kann ein 1.000 kg schwerer Roboter eine Zugkraft von ca. 6.000 N bei 60 % Schlupf aufbringen. Diese Zugkraft entspricht etwa einem 40 cm breiten Pflug bei einer Arbeitstiefe von 20 cm. Daraus wird deutlich, dass theoretisch auch eine Skalierung heutiger passiver Geräte auf die Randbedingungen „kleiner“ Maschinen möglich wäre. Dem stehen jedoch entgegen, dass zum einen der Einsatz in Bezug auf das Arbeitsergebnis relativ unflexibel ist, d. h. das Arbeitsergebnis ist nur in engen Grenzen anpassbar. Zum anderen bestehen aus energetischer Sicht hauptsächlich lineare Verhältnisse.

Der Zugkraftbedarf für Bodenbearbeitungsgeräte steigt nach (ASAE Standard) linear mit der Arbeitsbreite. Auch der Energiebedarf verhält sich linear, da der bestimmende Rollwiderstand von der Radlast bzw. dem Maschinengewicht unabhängig ist (Schreiber 2006, S. 30). Damit ist es aus energetischer Sicht gleichbedeutend ob bei gleichen Bedingungen ein 40 cm breiter Pflug von einem 1.000 kg schweren Traktor oder ein 200 cm breiter Pflug von einem 5.000 kg schweren Traktor gezogen wird. Des Weiteren reduzieren sich die übertragbaren Zugkräfte und damit die möglichen Arbeitsbreiten bei nicht-optimalen Bedingungen nochmals.

Zur Konzeptionierung der Kleinmaschinen zur Bodenbearbeitung wurde daher ein anderer Ansatz gewählt: Die Wirkprinzipie heutiger aktiver Bodenbearbeitungsgeräte (Kreiselegge, Kreiselgrubber) wurden in Verbindung mit den Aufgaben der Bodenbearbeitung gebracht. Die so erstellten Verknüpfungen wurden anschließend mit weiteren möglichen Wirkprinzipien und Lösungsmöglichkeiten ergänzt. Basierend darauf konnten dann Geräte konzipiert werden, die gezielt den oben genannten und gewichteten Aufgaben entsprechen und deren Wirkprinzipie in heutigen Geräten erprobt sind (Abbildung 33).

Abbildung 33: Teilaufgaben und Wirkprinzipie bei der Bodenbearbeitung



Quelle: Bartels (2016).

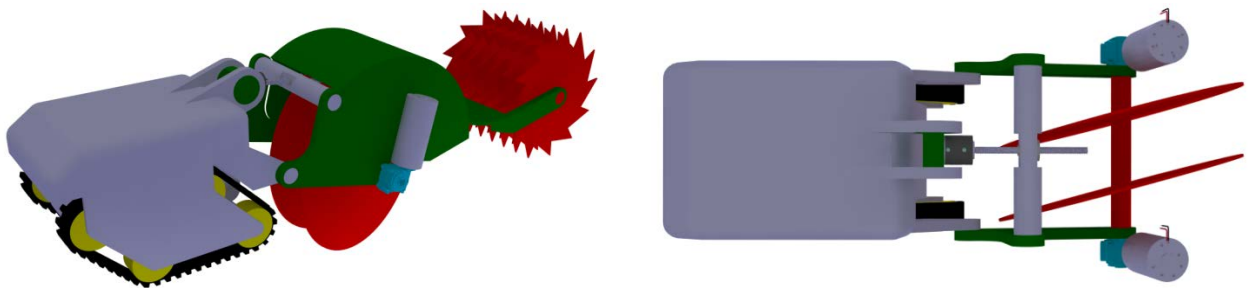
Wie oben beschrieben, soll für die Bodenbearbeitung nach Mais zu Weizen im tieferen Bearbeitungshorizont vor allem eine Bearbeitung stattfinden, die die alten Wurzelgänge zerstört. Dies

kann durch „Abrollen einer Scheibe“, durch „Abstechen“ oder durch „Durchkämmen mit einer Schneide“ geschehen. Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen zur aufzubringenden Zugkraft fällt das „Durchkämmen“ heraus. Auch das „Abstechen“ erfordert einen hohen Kraftaufwand und ein hohes Maschinengewicht zur Abstützung der Stechkräfte in z-Richtung. Das „Abrollen einer Scheibe“ erfordert für den Fall, dass die Scheiben angetrieben sind jedoch kaum Zugkräfte. Entsprechend wurde dieses Wirkprinzip für den tiefen Bearbeitungshorizont weiterverfolgt. Die Durchmischung kann durch vertikales oder horizontales Durchrühren des Bodens erfolgen.

Konzepterstellung

Abbildung 34 zeigt dazu ein erstes Konzept mit einer Arbeitsbreite von 30 cm. Die Antriebseinheit, jeweils links in grau dargestellt, führt ein Bodenbearbeitungsgerät, das mit zwei taumelnden Scheiben ausgestattet ist. Diese Scheiben sollen zum einen den Boden schneiden und dadurch Rückstände zerkleinern, zum anderen soll durch die taumelnde Bewegung eine Lockerung des Bodens erreicht werden. Die Scheiben werden durch Elektromotoren angetrieben, wodurch die notwendige Zugleistung der Antriebseinheit reduziert wird.

Abbildung 34: Erstes Konzept zur tiefen Bearbeitung nach Mais zu Weizen



Quelle: Eigene Darstellung.

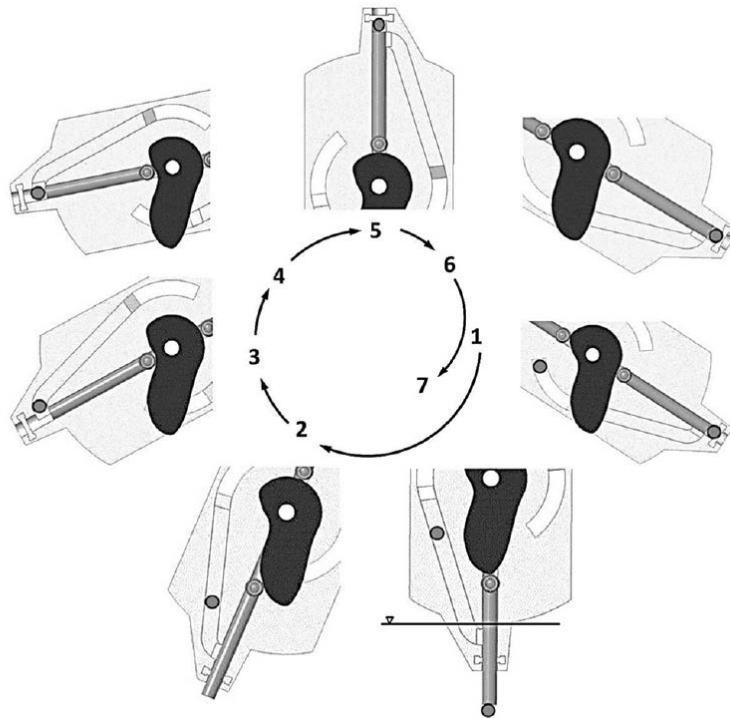
In der weiteren Konzeptionierung wurde auf die taumelnde Wirkung der Scheiben verzichtet, da in den tiefen Schichten bei der Bewirtschaftung mit kleinen Maschinen die Lockerung kaum nötig sein wird. Die Zerkleinerung der Pflanzenrückstände und zur intensiven Durchmischung im oberen Bearbeitungshorizont geschieht im dargestellten Konzept bisher nur unzureichend. Aus Abbildung 33 wurde dazu das „Horizontale Durchrühren durch Rotation“ ausgewählt, da sich mit entsprechend geformten Werkzeugen gleichzeitig eine Zerkleinerung erreichen lässt. Diese angetriebenen Rotorwalzen folgenden Schneidscheiben und bereiten den Boden auf die Aussaat vor. Abbildung 35 zeigt die Übertragung der Schneidscheiben und der Rotorwalzen auf das oben erläuterte modulare Roboterkonzept.

Abbildung 35: Bodenbearbeitung im modularen Roboterkonzept
(links: Gesamtmaschine, Mitte: ohne Schneidscheiben, rechts: Rückansicht)



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Aussaat erfolgt in diesem Konzept direkt nach der Bodenbearbeitung durch ein Aussaatmodul, welches in der Rückverdichtungswalze integriert ist und während der Rotation der Walze Saatkörner in den Boden einbringt. Ein entsprechendes Konzept zur stempelnden Aussaat von Mais mittels kleiner Roboter der Firma AGCO/Fendt (AGCO/Fendt 2017; Utz und Buchner 2016) befindet sich in der Entwicklung und könnte gut in die Rückverdichtungswalze eingepasst werden, da das Funktionsprinzip ebenfalls auf der Rotation um die y-Achse basiert. Auch die Übertragung auf eine Getreideaussaat ist grundsätzlich denkbar. Mittels einer solchen saatkornspezifischen Aussaat lässt sich die oben angesprochene Gleichstandssaat umsetzen. Allerdings sind sowohl die Abstände in der Reihe als auch die Abstände zwischen den Reihen durch die feste geometrische Anordnung ebenfalls festgelegt. Abbildung 36 zeigt die Prozessschritte des oben genannten Aussaataggregates. In Schritt 7 erfolgt die Einbringung des Saatkorns in den Boden.

Abbildung 36: Prozessschritte des möglichen Aussaataggregates

Quelle: Utz und Buchner (2016).

Abschätzung des Leistungsbedarfs

Wie zuvor beschrieben bildet die notwendige Antriebsleistung die Basis für die weitere Konzeptionierung der Maschinen. Zum einen bestimmt die Antriebsleistung über das Leistungsgewicht der Motoren und das oben festgelegte Gewichtslimit der Maschine die Arbeitsbreite der Maschine. Aus diesem Grund sind die unten angegebenen Leistungen zunächst in Kilowatt pro Meter Arbeitsbreite (mAB) angegeben. Zum anderen wird auf Basis der Antriebsleistung der Energiebedarf des Verfahrens bestimmt.

Die Antriebsleistung für die Aussaateinheit und die Bodenbearbeitungseinheit wurde nach ASAE Standard geschätzt (vgl. Anhang 3) und ergibt für eine Arbeitsgeschwindigkeit von 5 km/h sich zu

- ca. 11 kW/mAB für die Schneidrollen;
- ca. 18 kW/mAB für die Rotorwalzen;
- ca. 1 kW für die Aussaateinheiten.

Die Antriebsleistung für die Antriebseinheiten wurde nach Schreiber (2006) auf ca. 1 kW geschätzt.

Der Gesamtleistungsbedarf ergibt sich damit zu 29 kW/mAB + 2 kW. Die Energie wird von einer 15 kWh-Batterie bereitgestellt.

Abschätzung des Maschinengewichts und der Maschinengröße

Die Maschinengröße wurde im Rahmen des Projektes vor allem aus dem maximalen Maschinengewicht und dem maximalen Bodendruck abgeleitet. Die Aufstandsfläche eines Fahrwerks des modularen Roboterkonzeptes beträgt $0,08 \text{ m}^2$ (Länge: 80 cm, Breite 10 cm). Die Breite des Fahrwerks wurde für die Nutzung in Rüben-, Raps- und Maisbeständen auf 10 cm begrenzt. Die Länge wurde auf 80 cm begrenzt, um noch relativ oberflächenschonende Wendemanöver mit den Kettenlaufwerken ausführen zu können. Mit diesen Randbedingungen und dem festgelegten Bodendruck von 0,5 bar ergibt sich ein maximales Maschinengewicht von ca. 800 kg.

Das Gewicht der Maschine wurde bei einer Arbeitsbreite von 0,6 m auf ca. 800 kg geschätzt und setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- Antriebsmotoren und Getriebe für die Schneidrollen und Rotorwalzen: 180 kg
- Mechanische Bauteile für die Schneidrollen und Rotorwalzen: 170 kg
- Aussaateinheit: 100 kg
- Batterie: 100 kg
- 2 Fahrwerke: 2 x 100 kg

Die Berechnungsmethode und die Annahmen für die Ableitung des Gewichts der einzelnen Bauteile finden sich im Anhang 4.

Abschätzung der Flächenleistung und des Energiebedarfs

Auf Basis des zuvor beschriebenen Leistungsbedarfs ergibt sich ein Gesamtleistungsbedarf von 20 kW für den 60 cm breiten Roboter. Bei einem Wirkungsgrad von ca. 90 % für E-Motoren ergibt sich ein Leistungsbedarf von ca. 23 kW. Die Flächenleistung berechnet sich überschlägig ohne die Berücksichtigung von Wende- oder Batteriewechselzeiten aus der Arbeitsbreite und der Arbeitsgeschwindigkeit zu 0,3 ha/h. Der Energiebedarf je Hektar beträgt damit ca. 77 kWh/ha.

Ein Vergleich von Gewicht, Energieverbrauch und vor allem Arbeitsqualität mit heutigen Geräten ist nur qualitativ sinnvoll. Der Grund dafür ist, dass für das oben vorgestellte Konzept kein direkter Vergleichspartner zur Verfügung steht und die obigen Werte zudem nur erste Schätzungen sind.

- Bei der Gewichtsbeurteilung muss zwischen den mechanischen Bauteilen und der Antriebstechnik unterschieden werden. Das Gewicht pro Meter Arbeitsbreite der mechanischen Bauteile sollte in etwa gleich bleiben. Heutige aktive Geräte mit einer Arbeitsbreite von mehr als drei Metern müssen klappbar ausgeführt sein, wodurch zusätzliches Gewicht für den Klappmechanismus anfällt. Bei kleineren Geräten fällt dieser Punkt jedoch weg, sodass grundsätzlich von linearen Verhältnissen auszugehen ist. Dagegen wird das Gewicht der Bodenbearbeitungseinheit durch die elektrische Antriebstechnik steigen, da das Leistungsgewicht (kW/kg) elektrischer Antriebe generell eher schlechter ausfällt als bei anderen Antrieben.

- Bei der Energiebetrachtung ist zwischen dem Leistungs- bzw. dem Energiebedarf der Bodenbearbeitungseinheit und dem Energieverbrauch der Maschine zu unterscheiden. Der Energiebedarf steht in einem linearen Verhältnis zur Arbeitsbreite, da sich die Wirkprinzipien und damit auch die Berechnungsgrundlage an heutigen Geräten orientieren. Das vorgestellte Konzept hat einen relativ hohen Energiebedarf, da es eine heutige Scheibenegge mit einer heutigen Kreiselegge kombiniert. Wie oben angesprochen liegt bei kleinen Maschinen das Hauptziel bei der guten Durchmischung. Hier wäre es grundsätzlich möglich, dass neue Prozesse, die weniger das Lockern als das Durchmischen als Ziel haben, den Energiebedarf in kleinen Bereichen senken könnten. Der Energieverbrauch der Gesamtmaschine ist aufgrund des besseren Wirkungsgrades von elektrischen Antrieben gegenüber Verbrennungsmaschinen ($\eta_{\text{Elektromotor}} > 90\%$, $\eta_{\text{Dieselmotor}} \approx 30 - 40\%$), jedoch ist dieser Vorteil nicht der Kleintechnik zuzuordnen.
- Die Arbeitsqualität ist das wesentliche Unterscheidungsmerkmal, da durch die kleinere Arbeitsbreite kleinräumiger die Arbeitsintensität und die Arbeitstiefe eingestellt werden kann.

Insgesamt verdeutlicht der Vergleich, dass das hier vorgestellte Konzept nur geringe Verbesserungspotenziale gegenüber der heutigen Technologie ergibt. Dies ist insofern aber auch nicht erstaunlich, da wesentliche Randbedingungen nicht verändert wurden. Werden beispielsweise die Randbedingungen einer gleichbleibenden Arbeitstiefe oder einer ganzflächigen Bearbeitung gelockert, ergeben sich für kleintechnische Ansätze neue Potenziale. Mit kleineren Maschinen könnte beispielsweise die Arbeitstiefe kleinräumiger eingestellt werden. Die heutige Streifenbearbeitung (Strip-Till) könnte beispielsweise auf eine einzelpflanzenspezifische Bodenarbeit erweitert werden. Insgesamt stellt sich daher die Frage, ob bei veränderten Pflanzenbausystemen nicht doch eine extensivere Bodenbearbeitung im Rahmen der oben angesprochenen Bodenbearbeitung als Teil der Pflanzenschutzstrategie möglich wäre.

3.2.2.2 Düngung

Unter Düngung fallen im Ackerbau die Einarbeitung der Vorfrucht (Gründüngung) sowie die Ausbringung von organischen oder mineralischen Düngemitteln. Das geringe Masse/Nährstoff-Verhältnis sowie die schwankenden Eigenschaften bezüglich der Nährstoffgehalte, der Viskosität und des Feststoffgehalts von organischen Düngern erschweren die Konzeption von autonomen Kleinmaschinen für diesen Zweck. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Projektes für autonome Kleinmaschinen vor allem die mineralische Düngung betrachtet. Für die Ausbringung organischer Dünger wurde lediglich eine erste Prozesseinheit für das modulare Konzept entworfen (siehe Anhang 5). Im Folgenden werden aus den oben beschriebenen Hypothesen eines neuen Pflanzenbausystems die Ansätze für eine Ausführung mittels Kleintechnik abgeleitet sowie ein entsprechendes Maschinenkonzept vorgestellt.

Pflanzenbauliche Ansätze und Vorgaben bei der Düngung

In Deutschland wird die N-Düngung im Weizen meist mit 2 bis 3 Gaben zwischen Frühjahr und Ernte ausgebracht. Dabei wird der Dünger in der Regel gleichmäßig auf der Fläche verteilt. Ansatzpunkte für die Entwicklung eines neuen Pflanzenbausystems waren die Fragestellungen, ob eine Ausweitung der Teilgaben und Applikationszeiträume und eine genauere Ablage des Düngers eine nachhaltige Intensivierung fördern können.

Die Düngergaben müssen unter Berücksichtigung der Witterungsbedingungen über den gesamten Vegetationsverlauf entsprechend dem spezifischen Bedarf der Kulturart bzw. Einzelpflanze ausgebracht werden. Die Applikationstechnik muss den Dünger so platzieren, dass dieser möglichst vollständig von den Pflanzen aufgenommen wird und somit so wenig wie möglich auf anderem Wege (Grundwasser, Oberflächenabfluss, etc.) verloren geht (Taube et al. 2013). Solche Nährstoffe, die von den Pflanzen vorwiegend über Diffusion aufgenommen werden (P, K), sollten neben den Reihen abgelegt werden. Alle anderen über den Massenfluss aufgenommenen Nährstoffe (v. a. N) sollten so gezielt im Boden positioniert werden, dass das Wurzelwachstum der Kulturpflanzen, deren Wachstum zum Nährstoff verläuft, positiv beeinflusst wird, z. B. im Hinblick auf Standfestigkeit und Wasserversorgung. Im Folgenden werden die wesentlichen Annahmen für die Düngerausbringung im Weizen dargelegt, sie konzentrieren sich dabei aufgrund der Relevanz für das Pflanzenwachstum auf die Stickstoffdüngung.

In Deutschland wird die N-Düngung im Weizen meist mit 2 bis 3 Gaben zwischen Frühjahr und Ernte ausgebracht. Der Ansatz einer kontinuierlichen Düngung für den gesamten Vegetationsverlauf der Weizenpflanze ist für das vorliegende Szenario aus mehreren Gründen ausgeschlossen worden. Zum einen ist eine Mindest-Stickstoff-Konzentration im Boden für den Start des Wachstums notwendig (z. B. 50 bis 60 ppm N bei einer nutzbaren Feldkapazität von 270 mm). Zum anderen würde ein dauerhaft gleiches Stickstoffangebot zu Mindererträgen führen, da das Wurzelwachstum aufgrund des Luxusangebots unzureichend ist und ein wichtiges Hormon zur Anlage der Ertragsorgane nicht ausreichend gebildet wird (Bauer und Breunig 2017b). Die kontinuierliche Düngung bietet Potenzial für spätere Stickstoffgaben, wenn dort die Wetterbedingungen bekannt sind. Wird dann nur gedüngt, wenn genügend Feuchtigkeit vorhanden ist, kann die Pflanze den Dünger mit ausreichend Licht und Wasser auch zur Ertragsbildung nutzen. Zudem wird die Effizienz der Düngeausbringung gesteigert und das Risiko minimiert, dass zum falschen Zeitpunkt ausgebrachter Dünger nicht verwertet und ausgewaschen wird. Mit Bewässerung oder Fertigation (Bewässerung inklusive Düngung), wäre eine wöchentliche Düngung möglich. Nach bisherigem Stand kann jedoch auf eine Startgabe für landwirtschaftliche Flächen in Deutschland nicht verzichtet werden. Stattdessen wurden folgende Anforderungen an die Ausbringung gestellt und im Folgenden untersucht:

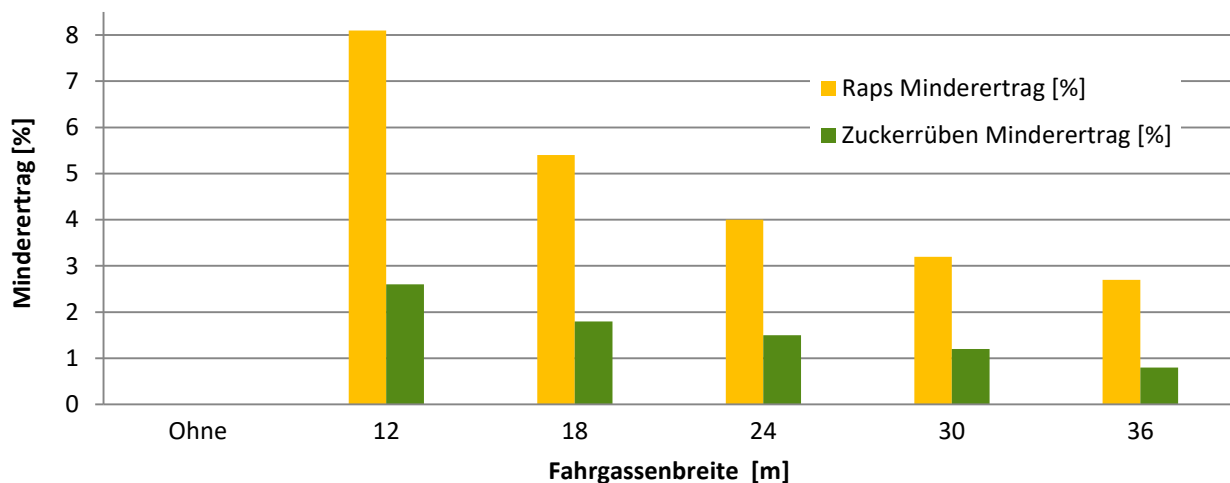
- Auf Basis heutiger Ausbringungsstrategien mit drei Ausbringungszeitpunkten wurde eine maximal erforderliche Ausbringkapazität von 130 kg Harnstoff/ha/d unterstellt.

- Für eine bedarfsgerechte Düngung wurde angenommen, dass die letzte Düngegabe nicht an einem Tag ausgebracht werden muss, sondern sich die Ausbringung über zehn Tage erstrecken kann.

Randbedingungen für die Konzepterstellung

Dieses Anforderungsprofil und die Randbedingungen aus dem Spot-Farming mit möglicherweise sehr kleinen Spots geben die Grundlage für die Konzeptionierung eines Robotersystems. Im Gegensatz zu den Kulturen Mais, Raps und Rübe ist der Einsatz des oben beschriebenen modularen Roboterkonzeptes aufgrund der geringen Pflanzenabstände nicht ohne angepasste Pflanzenabstände möglich. Zudem sollte aufgrund des Flächen- und Ertragsverlustes auf Fahrgassen verzichtet werden (Abbildung 30).

Abbildung 37: Ertragsverlust bei unterschiedlichen Fahrgassenabständen



Quelle: Eigene Darstellung nach BISZ (2016); Sauermann (2011).

Um den Ansatz der Konzeptentwicklung mit Fokus auf die Pflanzenbedürfnisse nicht zu verletzen, ist zur pflanzenspezifischen Pflege daher ein Roboterkonzept notwendig, das entweder den Bestand von oben behandelt oder so klein ist, dass es durch die Pflanzenreihen hindurchfahren kann.

Grundsätzlich kommen dazu Drohnen oder sehr kleine Bodenfahrzeuge in Frage. Eine Ausbringung von chemischen oder biologischen Pflanzenschutzmitteln durch Drohnen ist Inhalt aktueller Forschungsprojekte und in Asien teils auch schon Stand der Technik (DJI 2017; Kämpfer und Wegener 2017). Für eine erste Einschätzung, welches Konzept aus energetischer Sicht besser ist, wird nachfolgend der Energiebedarf für Drohnen und kleine Bodenfahrzeuge abgeschätzt.

Der Energiebedarf einer 10 kg schweren Drohne wird überschlägig mit folgenden Annahmen berechnet:

- (1) Der Leistungsbedarf für den Schwebeflug beträgt nach Bittner (2014) ca. 700 W (siehe Anhang 2).
- (2) Die Arbeitsbreite von Drohnen, die zur Pflanzenschutzausbringung eingesetzt werden, beträgt ca. 2 m.
- (3) Die Drohnen werden mit einer Fluggeschwindigkeit von ca. 2 m/s betrieben (Keicher 2017).

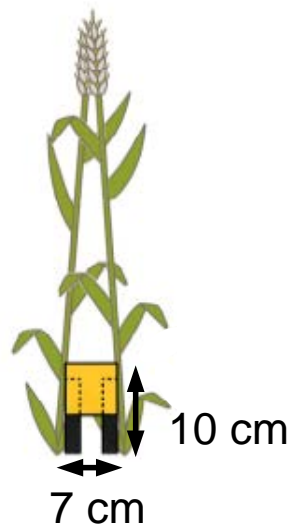
Daraus ergibt sich ein überschlägiger Energiebedarf von ca. 340 Wh/ha für die Pflanzenschutzausbringung mittels einer Drohne.

Für ein 10 kg schweres Bodenfahrzeug ist der Energiebedarf hingegen mit ca. 33 Wh/ha deutlich geringer und setzt sich wie folgt zusammen:

- (1) Der Rollwiderstand auf einem Acker in der Ebene beträgt ca. 6 Watt.
- (2) Die Geschwindigkeit wurde mit 0,5 m/s genauso wie die Arbeitsbreite mit 1 m sehr klein angenommen.

Dadurch wird deutlich, dass der Einsatz von Multikoptern aus energetischen Gesichtspunkten nur in Sonderfällen betrachtet werden sollte, beispielsweise wenn eine sehr schnelle Behandlung notwendig ist.

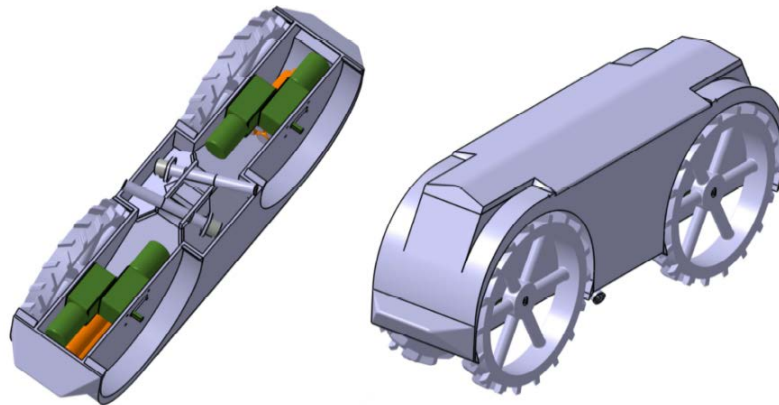
Aufgrund des erheblich geringeren Energiebedarfs werden daher im weiteren Verlauf bodengebundene Fahrzeuge betrachtet. Die wesentlichen Randbedingungen zur Fahrzeuggröße werden durch das Platzangebot im Bestand in y- und z-Richtung festgelegt (Abbildung 38) (siehe Abschnitt 3.2.3.1). Ab einer gewissen Höhe stützen sich die Pflanzen gegenseitig ab und das Blattwerk verzweigt. Die mögliche Höhe des Fahrzeuges wird dadurch begrenzt.

Abbildung 38: Platzangebot im Bestand

Quelle: Eigene Darstellung nach Schwiers (2017).

Neben der Düngung sollen die kleinen Roboter auch in anderen Tätigkeiten der Pflege wie der Unkrautbekämpfung und der Pflanzenschutzausbringung eingesetzt werden. Die Tätigkeiten sind teilweise gleichzeitig aber auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten notwendig. Aus diesem Grund bietet sich auch für diese sehr kleinen Fahrzeuge ein modularer Ansatz an, bei dem bestimmte Maschinenbauteile verfahrensübergreifend eingesetzt werden können. Beispielsweise ist eine Aufteilung in Antriebseinheiten und Prozesseinheiten denkbar, wobei die Energieversorgung aufgrund der hohen Packaging-Anforderungen² bereits in den Antriebseinheiten integriert ist. Abbildung 39 zeigt eine erste Version des Roboterkonzeptes. In grün und orange sind die Antriebsmotoren und die Batterien zu sehen. Zur Steigerung der Flächenleistung wurde im Folgenden von einem Batteriewechselsystem ausgegangen, Ladezeiten entfallen somit. In Zukunft kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch Schnellladesysteme die Batterien so schnell geladen werden, dass kein Austausch mehr stattfinden muss (Tempel und Minßen 2017).

² Packaging beschreibt die Anordnung der verschiedenen Bauteile im Bauraum.

Abbildung 39: Erste Konzeptidee zu kleinen Robotern

Quelle: Schwiers (2017).

In der Konzeptionierung wurde der Fokus zunächst auf die kleinräumige Applikation bis hin zur Einzelpflanze und auf die beschriebene Ausweitung der Teilgaben und Applikationszeiträume gelegt.

Konzepterstellung

Die Konzepterstellung gliedert sich in Überlegungen zum Fahrwerk, zum notwendigen Düngespeicher und zur Ausbringeinrichtung. Grundsätzlich sind verschiedene Fahrwerkskonfigurationen wie ein Vierrad-Allradantrieb, Laufbänder, Dreirad-Fahrwerke oder Schlittenfahrwerke möglich. Die Auswahlkriterien sind zum einen technische, wie beispielsweise der Bauraum, die Manövrierbarkeit oder die Verschmutzungsanfälligkeit, zum anderen kommen aber bedingt durch die hohe Anzahl benötigter Roboter auch ökonomische Kriterien wesentlich zum Tragen. Im Rahmen des Projektes lag die genaue Auswahl und Auslegung des Fahrwerks jedoch nicht im Vordergrund. In den Berechnungen zu den Maschinenkosten wurde daher das in Abbildung 35 dargestellte Konzept mit 4 Motoren weiterverfolgt. In den Abbildungen der folgenden Abschnitte sind teilweise alternative Fahrwerke berücksichtigt, die jedoch auch durch das in Abbildung 35 gezeigte Fahrwerk ausgetauscht werden könnten. Die Frage nach dem optimalen Roboterfahrwerk wurde als offene Forschungsfrage identifiziert (Kapitel 4). Die Energieversorgung erfolgt auch hier mittels einer Batterie mit einer Energiemenge von ca. 60 Wh.

Zur ersten Abschätzung zu Speichermöglichkeiten auf den Robotern wurden die heute ausgebrachten Düngemengen auf die betrachteten Ausbringzeiträume übertragen. In einem ersten Schritt ist dazu die Ermittlung der auszubringenden Menge an Dünger je Fahrt nötig. Dazu wurde ein rechteckiger 30 ha großer Schlag (390 m breit, 780 m lang) betrachtet, der für den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Standort typisch ist. Aufgrund der geringen Maschinengröße können die Roboter nur geringe Mengen an Betriebsmitteln mitführen und müssen entsprechend häufig nachgefüllt werden. Dafür müssen an bestimmten Positionen am oder im Schlag Nachfüllstatio-

nen installiert oder aufgestellt werden (Abbildung 40). An diesen Nachfüllstationen werden die Batterien geladen und die Betriebsmittel nachgefüllt. Zur Vermeidung unnötiger Leerfahrten der Roboter können die Nachfüllstationen ebenfalls mobil sein und sich entlang der Feldgrenze bewegen. Da dafür aber ein gewisser Fahrstreifen am Feldrand notwendig ist, wurde dieser Fall im Folgenden nicht weiter betrachtet und die Nachfüllstationen als stationär angenommen.

Abbildung 40: Nachfüllstation für kleine Roboter



Quelle: Eigene Darstellung.

Bei einer Bestandsdichte von 185 Pflanzen/m^2 und einer Ausbringungsmenge von $130 \text{ kg Harnstoff/ha}$ müssen pro Pflanze ca. 70 mg Harnstoff ausgebracht werden. Für den Fall, dass nur an einer Feldseite eine Nachfüllstation steht, muss der Roboter mindestens durch zwei Reihen (oder vielfache davon) fahren und Dünger ausbringen, um sich anschließend wieder mit Dünger zu befüllen. Im einfachsten Fall muss der Roboter also durch zwei Reihen fahren und düngt dabei vier Pflanzenreihen (Abbildung 41). In jeder Pflanzenreihe stehen mit den Werten aus Tabelle 4 bei 185 Pflanzen/m^2 ca. 9.900 Pflanzen . Für 4 Reihen sind demnach $2,7 \text{ kg}$ bzw. $3,4 \text{ l Harnstoff}$ nötig.

Abbildung 40: Fahrroute der Düngerroboter

Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die gegebenen Randbedingungen in Höhe (max. 10 cm) und Breite (max. 7 cm) müsste der Roboter mindestens 60 cm lang sein, um diese Menge an Dünger transportieren zu können. Mit dieser Länge könnte er aber kaum am Vorgewende wenden oder es wären aufwändige Knickgelenke im Roboter nötig. Aus diesem Grund wurde die Länge des Roboters im Folgenden auf 30 cm begrenzt. Inklusiv der Fahrmotoren und Batterien ist damit ein Düngerspeicher von ca. 1,8 l möglich.

Als Dosiereinrichtung für den Dünger bieten sich Förderschnecken an, die sowohl die Dosierung als auch die Förderung des Düngers aus dem Düngebehälter über Schläuche direkt an die Pflanze übernehmen können. Der Dünger wird durch die bodennahe Ablage schnell in Bodenlösung übergehen und den Pflanzen zur Verfügung stehen.

Die Roboter fahren im Feld mit einer relativ kleinen Geschwindigkeit von 2,5 km/h. Dies ist nötig, da sie in direktem Kontakt der Pflanzen fahren, durch das geringe Gewicht eine hohe Dynamik besitzen und somit bei schnellerer Fahrt schnell aus der Bahn geworfen und Pflanzen verletzen könnten.

Das Grundfahrzeug hat ein Gewicht von ca. 5 kg, abgeschätzt aus den Gewichten der Motoren, Getriebe und dem Rahmen.

Abschätzung des Leistungsbedarfs

Der Leistungsbedarf ergibt sich aus der notwendigen Antriebsleistung und der notwendigen Leistung für die Dosierschnecken. Die Antriebsleistung für das Fahrwerk wurde unter Berücksichtigung von Wirkungsgraden der Elektromotoren auf ca. 18 W abgeschätzt. Die beiden Dosier-

schnecken für den Dünger haben einen Leistungsbedarf von je 1 W. Daraus ergibt sich ein Gesamtleistungsbedarf von ca. 20 W.

Abschätzung der Flächenleistung und des Energiebedarfs

Die Flächenleistung eines Roboters für die erste Stickstoffgabe von 130 kg Harnstoff /ha wurde über ein Excel-Modell abgeschätzt. Dabei wurden auf jeder Seite des Schlages eine Nachfüllstation unterstellt. Der Roboter wird also nach jeder Reihe mit ca. 1,4 kg Dünger befüllt. Die Befüllzeit an den Nachfüllstationen wurde mit ca. 15 Sekunden abgeschätzt, die Fahrzeit zu den Befüllstationen wurde mit der Fahrgeschwindigkeit berechnet. Mit diesen Randbedingungen ergibt sich eine Flächenleistung von 0,03 ha/h je Roboter. Der Energiebedarf berechnet sich entsprechend zu 0,66 kWh/ha.

3.2.2.3 Pflanzenschutz

Die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln erfolgt heute meist großflächig und nach der Überschreitung von Schadschwellen für spezifische Krankheiten oder Schädlinge. Dabei entstehen zwei Arten von Verlusten: a) Applikationsverluste, d. h., das Mittel trifft nicht die Pflanze, sondern den Boden; b) Abdriftverluste, d. h., das Mittel wird durch Wind von den Pflanzen weggetrieben. Zudem werden häufig auch Pflanzen behandelt, die nicht befallen sind. Zielsetzung für eine Pflanzenschutzausbringung mit kleinen Robotern ist daher eine sehr kleinräumige Applikation bis hin zur Einzelpflanzenbehandlung, die ausschließlich nach Bedarf gesteuert wird. Sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht hat eine Reduzierung der Aufwandmengen Priorität bei der Konzeptionierung des Robotersystems bzw. der Ausbringeinrichtung. Hintergrund ist, dass Pflanzenschutzmittel ebenfalls die Nutzpflanze schädigen und Mehrerträge erzielt werden können, wenn weniger Mittel ausgebracht werden können. Laut Bauer und Breunig (2017a) reichen „Ertragsverluste“ aufgrund der Herbizideinwirkung bis zu 16 % für Wirkstoffe gegen einkeimblättrige Pflanzen und bis 6 % für Wirkstoffe gegen zweikeimblättrige Unkräuter. Die Herbizidanwendung soll im neuen Pflanzenbausystem vollständig durch eine mechanische Unkrautbekämpfung ersetzt werden. Durch ein besseres Timing bei Fungiziden sind 1 bis 6 % höhere Erträge möglich. Durch eine präzisere Insektizidenausbringung könnten Ertragssteigerungen von 1 bis 8 % erreicht werden (Bauer und Breunig 2017a).

Pflanzenbauliche Ansätze und Vorgaben bei der Pflanzenschutzausbringung

Aus den oben beschriebenen Randbedingungen wurden drei wesentliche Ansätze zur Pflanzenschutzausbringung abgeleitet, die im Folgenden erläutert werden:

- Es soll möglich sein, einzelne Pflanzen gezielt zu behandeln.
- Die systemische Wirkung der Fungizide soll gezielt ausgenutzt werden.
- Die Insektizide sollen gezielt in die Laufwege der Insekten ausgebracht werden.

Durch die gezielte Ausbringung kann auf erkrankte Pflanzen sowohl die Aufwandmenge gesenkt, als auch der Ertrag der gesunden Pflanzen gesteigert werden. Dazu ist eine entsprechende Sensorik notwendig, die an Bodenfahrzeugen oder an Drohnen angebracht, den gesamten Bestand kontinuierlich überwacht. Wie beschrieben, liegt der Fokus in dieser Konzeptionierung auf den Ausbringeinheiten.

Neben der gezielten Ausbringung auf erkrankte Pflanzen ist die Ausnutzung der systemischen Wirkung der Pflanzenschutzmittel, vor allem bei Fungiziden, ein weiterer Ansatzpunkt. Durch den Saftstrom der Pflanze wird der Wirkstoff in den Leitbahnen verteilt, der Wirkstoff braucht daher nur in einem günstigen Bereich aufgebracht werden und verteilt sich in der gesamten Pflanze. In jungen Stadien ist die effektivste Behandlung eine Applikation eines großen Tropfens in die Rosette der Pflanze, das Mittel wandert dann an allen Blättern nach außen. In späteren Stadien kann der Stängel über den kompletten Umfang behandelt werden, durch die Transpiration wandern die Mittel in die Blätter. Zur Ährenbehandlung sollte direkt in die Ähre appliziert werden, da diese aber noch geschlossen ist, sollten die Spelzen benetzt werden. Die Geschwindigkeit der Transpiration ist von der Wasser- bzw. Fettlöslichkeit der Mittel abhängig. Wasserlösliche Mittel verteilen sich innerhalb weniger Stunden in den Blättern, während bei fettlöslichen Mitteln mehrere Tage bis Wochen dafür nötig sind. Die in der Praxis angewandten Mittel sind daher Kombinationen dieser Mittel (Bauer und Breunig 2017b).

Für die Berechnungen wurde angenommen, dass die Aufwandmengen auf ca. 30 bis 40 % der heutigen Mengen gesenkt werden können. Diese Annahme basiert auf geschätzten Applikationsverlusten (d. h., das Mittel trifft nicht die Pflanze, sondern den Boden) heutiger Technik von 40 bis 50 %. Zudem entstehen an den Feldgrenzen zusätzliche Abdriftverluste. Zudem kann bei systemisch wirkenden Mitteln die Aufwandmenge weiter gesenkt werden, da mit der heutigen Ausbringtechnik die Wirkstoffe auch auf den Enden der Blätter ausgebracht werden, dort aber kaum ihre systemische Wirkung entfalten (nicht mit dem Saftstrom verteilt werden).

Für die spätere Ableitung der notwendigen Flächenleistung sind die Art des Auftretens (Nest, ganzflächig, an bestimmten Punkten) sowie die Ausbreitengeschwindigkeit entscheidend. Es wurden die zwei Pilzarten Rost und Fusarien exemplarisch weiter untersucht, die jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften die Mehrzahl der Pilzkrankungen widerspiegeln.

Rost tritt in Nestern durch Sporenflug auf und hat eine Latenzzeit von 90 Gradtagen (Summe der Tagesdurchschnittstemperaturen). Nach dieser Latenzzeit, die ca. 6 Tage beträgt, lebt die nächste Generation der Pilze und der Ausbreitungsraum wird entsprechend größer. Die Bekämpfungsschwelle für Braunrost liegt in der Literatur bei 30 %, d. h., eine Behandlung des Bestandes sollte erfolgen, wenn mehr als 30 % der Pflanzen befallen sind (Dörfler 1992). Für das KleintechnikszENARIO wurde aufgrund der kontinuierlichen Beobachtung des Bestandes festgelegt, dass schon bei 3 % (1/10 der bisherigen Schwelle) befallener Pflanzen eine Behandlung innerhalb der ersten Latenzzeit (6 Tage) erfolgen soll.

Im Gegensatz zu Rost treten Fusarien durch die Thermik verteilt ganzflächig auf, sodass auch eine ganzflächige Behandlung notwendig ist. In der heutigen Praxis wird häufig prophylaktisch der gesamte Bestand behandelt, wenn das Infektionsrisiko hoch ist. In einem neuen Pflanzenbausystem sollte jedoch auf eine prophylaktische Behandlung nach Möglichkeit verzichtet werden. Da keine Literatur- und Erfahrungswerte zur befallsabhängigen Behandlung gegen Fusarien ermittelt werden konnten, wurden als Zeitvorgabe Bearbeitungszeiträume von 1 bis 10 Tagen vorgegeben.

Insektizide sind meist Kontaktmittel, die zur Wirkung mit den Insekten in Berührung kommen müssen. Auch hier kann das Mittel als Barriere in den Laufwegen der Insekten auf der Pflanze aufgebracht werden. Die Behandlung richtet sich nach dem Befall und ist daher grundsätzlich mit dem oben beschriebenen Vorgehen identisch.

Konzepterstellung

Die Fahrwerke der Roboter sind mit denen im Abschnitt zur Düngeausbringung identisch. Auch die Speichervorrichtung kann identisch dimensioniert werden. Die Ausbringmengen bei heutigen Pflanzenschutzanwendungen liegen bei ca. 200 l/ha, mit der oben angesprochenen Reduzierung der Aufwandmengen bei ca. 70 l/h. Die Ausbringeinheit könnte aus Düsen bestehen, die gezielt die Halme besprühen, oder wie in Abbildung 39 dargestellt, aus einem Pinsel, der durch eine integrierte Pumpe ständig mit Pflanzenschutzmitteln benetzt wird. Der Pinsel bringt das Pflanzenschutzmittel auf den Stängeln der Pflanzen auf. Da der Stängel über den gesamten Umfang benetzt werden muss, ist eine Fahrt durch jede Reihe notwendig.

Abbildung 41: Pflanzenschutzapplikation mit Feldroboter zwischen den Pflanzen



Quelle: Eigene Darstellung.

Abschätzung des Leistungsbedarfs

Der Leistungsbedarf von 20 W ist identisch zu dem der Düngung.

Abschätzung der Flächenleistung und des Energiebedarfs

Die Anzahl der benötigten Roboter wurde ebenfalls über ein Excel-Modell abgeschätzt. Dabei wurde der bei der Düngeausbringung beschriebene Schlag betrachtet.

Für die Bekämpfung von Fusarien reicht aufgrund der geringen Ausbringmenge eine Roboterfüllung für zwei Fahrten durch den Bestand, d. h., es ist nur eine Nachfüllstation auf einer Seite notwendig und die Anzahl der Befüllvorgänge halbiert sich. Da jedoch durch jede Reihe gefahren werden muss, reduziert sich die Flächenleistung auf ca. 0,017 ha/h je Roboter.

Für die Bekämpfung der Rostnester wurde angenommen, dass sich die beschriebene Fläche von 0,9 ha (3 % von 30 ha) mitten im Schlag befindet. Die Roboter müssen für die Befüllvorgänge entsprechend viele Leerfahrten zur Nachfüllstation am Feldrand durchführen. Bezogen auf die behandelte Fläche von 0,9 ha reduziert sich die Flächenleistung daher nochmal auf 0,014 ha/h je Roboter. Wird die Flächenleistung jedoch auf die Gesamtfläche von 30 ha bezogen, beträgt sie 0,48 ha/h je Roboter. Für die ganzflächige Behandlung entsteht damit ein Energiebedarf von 1,2 kWh/ha.

3.2.2.4 Mechanische Unkrautbekämpfung

Da auf eine Herbizidanwendung verzichtet werden soll, muss die Unkrautbekämpfung mechanisch erfolgen. Im Folgenden werden dazu verschiedene Mechanismen zur Unkrautbekämpfung betrachtet und anschließend die Unkrautbekämpfung in das Konzept der kleinen Roboter überführt.

Pflanzenbauliche Ansätze und Vorgaben bei der Pflanzenschutzausbringung

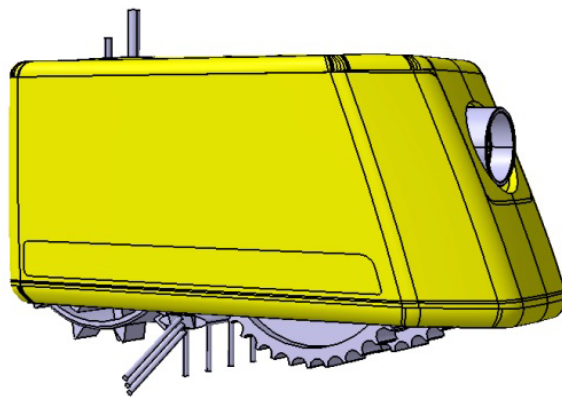
Die Unkrautbekämpfung ist wesentlicher Bestandteil der Pflegeaktivitäten und stellt eine angemessene Konkurrenzsituation zwischen Nutzpflanze und Unkräutern her. Im konventionellen Ackerbau findet eine chemische und im ökologischen Ackerbau eine mechanische Unkrautbekämpfung statt. Präzise arbeitende Kleinroboter bieten die Chance, Ansätze aus dem Ökolandbau in den konventionellen Ackerbau zu integrieren, weshalb im Projekt der Ansatz verfolgt wurde, mit Kleinrobotern eine mechanische Unkrautbekämpfung durchzuführen. Die mechanische Bekämpfung kann durch Bedecken mit Bodenmaterial, durch Herausziehen, durch Abschneiden, durch in den Boden drücken oder durch die mechanische Zerstörung durchgeführt werden. Die Wirksamkeit der einzelnen Methoden ist für verschiedene Unkrautarten sehr unterschiedlich (Verschwele 2017a). Persischer Ehrenpreis und Ackervergissmeinnicht sind beispielsweise unempfindlich gegen Herausziehen, während Vogelsternmiere und Schwarzer Nachtschatten unempfindlich gegenüber Verschütten sind.

In bisherigen Ansätzen zur mechanischen Unkrautbekämpfung mit Robotern bewegen sich die Roboter über den Bestand und greifen von oben in den Bestand ein (vgl. Kapitel 3.1). Sie können daher nur eingesetzt werden, solange die Pflanzen die Bewegung des Bearbeitungsgerätes nicht behindern. Im Rahmen des Projektes wurde jedoch ein Verfahren angestrebt, dass es ermöglicht, auch kurz vor dem Reihenschluss durch den Bestand zu fahren und das Unkraut zu bekämpfen, ohne die Nutzpflanze zu beschädigen.

Konzepterstellung

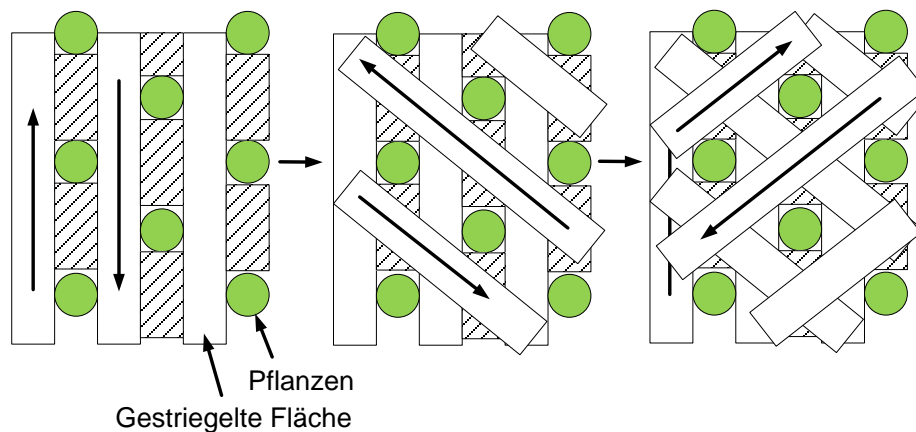
Um die mechanische Unkrautbekämpfung mit sehr kleinen Robotern durchzuführen, wurde ein sehr einfacher Ansatz der Unkrautbekämpfung verfolgt (vgl. Abbildung 43). Aufgrund des begrenzten Bauraums ist sehr wenig Platz für Aktorik zur gezielten Bekämpfung einzelner Unkräuter vorhanden. Die Roboter fahren daher zwischen den einzelnen Pflanzen hindurch und bekämpfen das Unkraut „großflächig“ mit einem Striegel. Aufgrund des Dreiecksverbands (vgl. Kapitel 3.2.3.1) können sie in allen Richtungen durch den Bestand fahren. Der Striegel ist mit feststehenden Zinken in der Reihe und flexiblen Bürsten an den Rändern ausgestattet, was einer Arbeitsbreite von rund 7 cm entspricht. Durch die Zinken wird das Unkraut zwischen den Reihen herausgezogen, in den Reihen wird Erde aufgehäufelt und dadurch das Wachstum behindert.

Abbildung 42: CareRowBot mit Striegel



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Roboter wechseln sequentiell die Bearbeitungsrichtung, dadurch werden die Bereiche abwechselnd gestriegelt oder aufgehäufelt (Abbildung 44).

Abbildung 43: Sequentielle Bearbeitung der einzelnen Fahrspuren

Quelle: Eigene Darstellung.

Durch das ständige Striegeln werden jedoch Unkrautsamen kontinuierlich zum Keimen angeregt, gleichzeitig führt es durch die gesteigerte Mineralisierung der organischen Bestandteile zu Humusverlust. Eine andere einfache Methode zeigt der Roboter Tertill in Kapitel 3.1. Durch den Einsatz einer Vielzahl kleiner Roboter könnte die Art der Bekämpfung (Striegeln, Schneiden) in Zukunft leichter an die schlagspezifischen Anforderungen angepasst werden.

Abschätzung des Leistungsbedarfs

Die Unkrautbekämpfung stellt die höchsten Anforderungen in Bezug auf die aufzubringende Zugkraft an die Antriebseinheiten. Für eine erste Abschätzung des Zugkraftbedarfs wurde mit den Parametern für eine „Coil Tine Harrow“ nach (ASAE Standard) gerechnet. Danach ergibt sich ein Zugkraftbedarf von 35 N für einen 7 cm breiten Striegel. In welchen Maßstäben die genannte Berechnungsvorschrift und das Ergebnis von großen Maschinen auf sehr kleine Maschinen übertragbar sind, muss, genauso wie die Wirksamkeit kleiner Striegel, in weiteren Versuchen validiert werden.

Die Fahrgeschwindigkeit der Roboter muss sich in erster Linie am Prozess orientieren. Heutige Geräte zur mechanischen Unkrautbekämpfung erfordern eine Fahrgeschwindigkeit von 5 bis 10 km/h, wobei mit steigender Geschwindigkeit zwar die Wirkung steigt, geringere Geschwindigkeiten jedoch schonender für die Kulturpflanzen sind. Für den Einsatz kleiner Roboter muss zusätzlich noch die Manövrierbarkeit im Bestand beachtet werden, die mit steigender Geschwindigkeit ebenfalls abnimmt. Aus diesem Grund wurde für den ersten Ansatz eine Arbeitsgeschwindigkeit von 2 km/h unterstellt.

Die benötigte Zugleistung ergibt sich damit zu ca. 20 W. Die Leistung zur Überwindung der Fahrwiderstände entspricht den Werten für die Düngung und den Pflanzenschutz (ca. 18 W). Der Gesamtleistungsbedarf beträgt damit ca. 40 W.

Abschätzung der Flächenleistung und des Energiebedarfs

Die Flächenleistung ergibt sich aus dem Reihenabstand (Tabelle 4) und der Fahrgeschwindigkeit von 2 km/h zu 0,014 ha/h. Der Energiebedarf beträgt dabei ca. 2,9 kWh/ha.

3.2.2.5 Ernte

Nachfolgend wird ein erstes Konzept für die Getreideernte mit autonomen Kleinmaschinen vorgestellt. Sofern die in Kapitel 3.2.2 dargelegten pflanzenbaulichen Potenziale langfristig realisiert werden sollen, ist eine Ernte mit Kleinmaschinen notwendig. Nur wenn kleine Ernteroboter zur Verfügung stehen, wird es künftig möglich sein, unterschiedliche Kulturen auf einem Feld anzubauen und die potenziellen positiven Effekte einer höheren Biodiversität auf dem Acker zu realisieren. Für die Erstellung des Konzepts werden nachfolgend zunächst die Anforderungen der Pflanzen bezüglich der Ernte beschrieben. Anschließend werden relevante Vorüberlegungen für die Erstellung des Konzepts erläutert und abschließend das entwickelte Maschinenkonzept vorgestellt.

Pflanzenbauliche Ansätze und Vorgaben bei der Ernte

Grundlegendes Ziel der Weizenernte ist die Gewinnung der Getreidekörner. Das Ausdreschen soll möglichst sanft erfolgen, um Bruchkorn zu vermeiden. Die Ähren sollten vor dem Dreschen möglichst nicht auf dem Boden abgelegt werden, um Verunreinigungen beim Aufsammeln zu vermeiden. Zudem könnte ein häufiges Ablegen und Überladen dazu führen, dass sich Körner aus den Ähren lösen und als Verlust auf dem Feld verbleiben.

Die restlichen Pflanzenbestandteile, wie der Halm, die Spelzen, das Spreu sowie weitere Nicht-Korn-Bestandteile sollen in einen Zustand gebracht werden, der für die nachfolgenden Verfahrensschritte möglichst optimal ist. Dazu gehören eine optimale Strohverteilung sowie eine gute Zerkleinerung um die Strohrotte in Gang zu bringen.

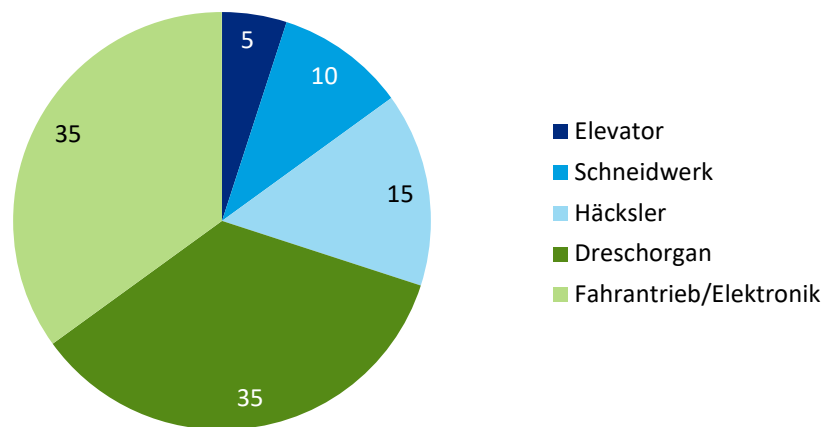
Ausgedroschene Unkrautsamen oder die im Reinigungsprozess nicht separierten Körner sollten zudem nicht wieder auf dem Feld verteilt werden, um nachfolgenden Unkrautdruck zu minimieren.

Vorüberlegungen zur Konzepterstellung

In modernen Mähdreschern finden die Prozesse „Ernten und Ausdreschen der Ähre“, „Stroh abscheiden“, „Stroh aufbereiten (Häckseln)“ und „Stroh verteilen“ in einer Maschine statt. Dadurch hat die Maschine einen hohen Leistungsbedarf und ein entsprechend hohes Gewicht. Für die Ernte mit kleinen Robotern ist ein besonders hoher Leistungsbedarf auf dem Feld kritisch, da dieser bei elektrischen Antrieben eine große Batterie und entsprechend schwere Elektromotoren bedingt. Zudem sind die Prozesse sequentiell angeordnet und voneinander abhängig, d. h. wenn ein Prozessorgan ausfällt, steht die gesamte Maschine.

Ein Ansatz für die Ernte mittels kleiner Roboter ist daher, diejenigen Prozesse an den Feldrand zu verlagern, die entweder einen hohen Leistungsbedarf oder einen hohen Anteil am Gesamtgewicht des Mähdreschers haben. In den Vorüberlegungen wurde daher in einem ersten Schritt die Leistungsaufteilung in einem modernen Mähdrescher untersucht (Abbildung 45).

Abbildung 44: Aufteilung des Leistungsbedarfs in einem konventionellen Mähdrescher [%]



Quelle: Eigene Darstellung nach Freye und Heidjann (1984).

Folgende Aussagen lassen sich aus der Abbildung ableiten:

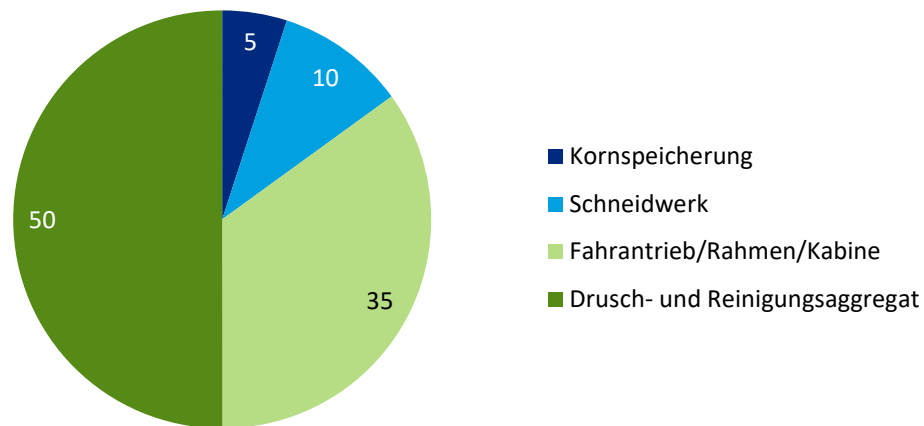
- Den größten Anteil am Gesamtleistungsbedarf hat mit 35 % das Dreschorgan. Der Leistungsbedarf der Maschine auf dem Feld könnte somit um mehr als 35 % gesenkt werden, wenn der Dreschprozess am Feldrand oder auf dem Hof durchgeführt wird. Derartige Konzepte sind aus den Anfängen der Dreschmaschine bekannt und wurden auch in der Forschung wieder aufgegriffen (siehe Kapitel 3.1)
- Weitere 35 % des Leistungsbedarfs entfallen auf den Fahrtrieb. Dieser setzt sich vor allem aus dem Rollwiderstand und damit aus dem Fahrzeuggewicht zusammen. Der wesentliche Ansatzhebel, um die benötigte Antriebsleistung zu verringern, ist eine Reduzierung des Maschinengewichtes oder der Fahrgeschwindigkeit.
- Mit 15 % am Leistungsbedarf ist der Energiebedarf für das Häckseln des Stroh ebenfalls relativ hoch.

Um die Einsparpotenziale im Fahrtrieb weiter aufzuschlüsseln, wurden im nächsten Schritt die Gewichtsanteile der Teilprozesse an der Gesamtmaschine näher betrachtet. Da keine Literaturwerte vorlagen, wurde die Verteilung aus Datenblättern von Mähdreschern und Motoren abgeleitet und abgeschätzt (Abbildung 46).

Daraus lässt sich ableiten, dass die Baugruppen „Dresch- und Reinigungsorgan“ sowie der Fahrtrieb zu 85 % des Gesamtgewichts beitragen. Um den Leistungsbedarf zur Überwindung des Rollwiderstandes zu verringern, scheint es daher sinnvoll, das schwere Dresch- und Reinigungsor-

gan an den Feldrand oder den Hof auszulagern. Auf diese Weise kann der Leistungsbedarf für den Fahrtrieb sowie das Gewicht für den Fahrtrieb verringert werden.

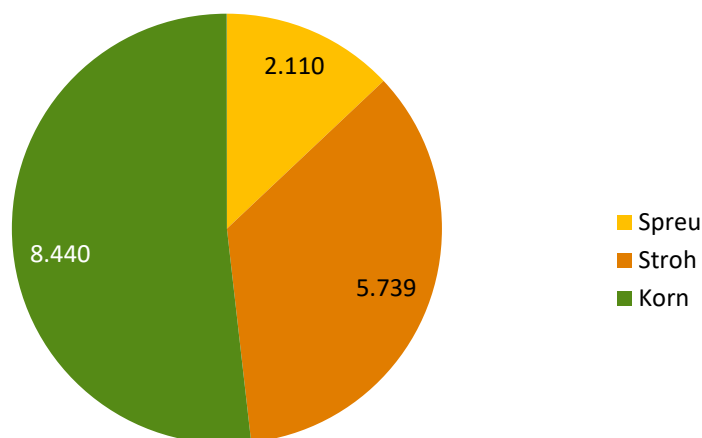
Abbildung 45: Gewichtsverteilung in einem konventionellen Mähdrescher [%]



Quelle: Eigene Darstellung nach Freye und Heidjann (1984).

Werden jedoch das Dresch- und Reinigungsorgan ausgelagert, müssen die Pflanzen dorthin transportiert werden. Zur Abschätzung des Logistikaufwands wurden in einem ersten Schritt die Gewichts- und Volumenverhältnisse der Weizenpflanze untersucht. In Abbildung 47 sind die Gewichtsanteile von Spreu, Stroh und Korn einer Weizenpflanze dargestellt. Bei einem Gesamtertrag von ca. 16 t/ha entfallen lediglich 8,4 t/ha auf die Körner. Stroh hat mit 5,7 t/ha ebenfalls einen hohen Anteil am Gesamtgewicht. Die Spreu hat mit 2,1 t/ha hingegen eine deutlich geringere Bedeutung.

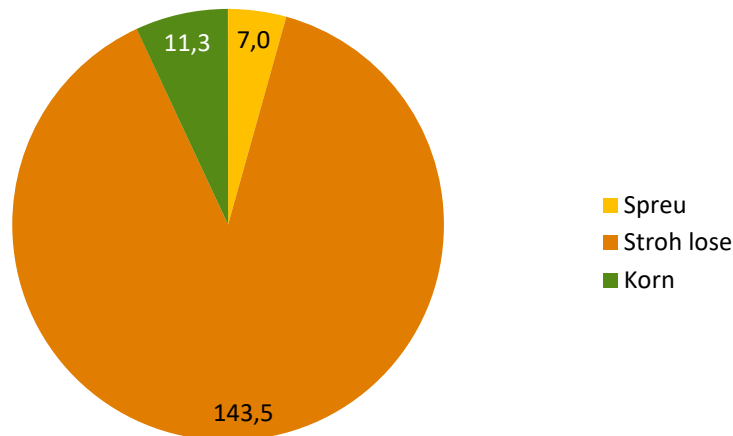
Abbildung 46: Gewichtsverteilung einer Weizenpflanze in [kg/ha]



Quelle: Eigene Darstellung nach Segler und Freye (1977).

Abbildung 48 zeigt die Volumenverhältnisse für loses komprimiertes Stroh. Aus der Abbildung lässt sich ebenfalls ableiten, dass bei einer Verlagerung des Dreschprozesses an den Feldrand das Stroh auf dem Feld verbleiben sollte, da sonst erhebliche Mengen transportiert werden müssten.

Abbildung 47: Volumenverteilung einer Weizenpflanze in [m³/ha]



Quelle: Eigene Darstellung.

Aus den Vorüberlegungen wird deutlich, dass die Auslagerung des Dresch- und Reinigungsorgans hohe Potenziale für leichtere und weniger energieintensive Erntemaschinen bietet. In der weiteren Konzeptionierung ist jedoch der erhöhte Logistikaufwand zum Transport der Pflanzen zu betrachten.

Konzepterstellung

Zu Beginn der Konzeptionierung wurden drei Ansätze abgeleitet und bezüglich der Transportvolumina und -massen sowie des Energiebedarfs betrachtet und mit einem konventionellen Mäh-drescher verglichen. In Abbildung 49 werden die Ansätze kurz vorgestellt. Die erforderlichen Transportvolumina und -massen werden in Abbildung 50 genannt und der erforderliche Energiebedarf folgt in Abbildung 51. Die Angabe für den Rollwiderstand bezieht sich allein auf den oben angesprochenen Leistungsbedarf zur Überwindung des Rollwiderstandes. Zur Berechnung wurden das Maschinengewicht (Summe der Komponentengewichte) sowie die zu transportierenden Massen zugrunde gelegt (Abbildung 50). Der Abtransport des Erntegutes ist damit überschlägig auch betrachtet. Unter der Annahme, dass am Feldrand oder am Hof genügend Energie, beispielsweise in elektrischer Form vorhanden ist, wurden nur die auf dem Feld benötigten Energiemengen betrachtet. Entsprechend hilft diese Betrachtung, den Energiebedarf auf der mobilen Maschine zu bewerten. In den späteren Betrachtungen muss dieser für die Konzepte a), b) und c) mit dem Energiebedarf für den Drusch erweitert werden.

Abbildung 48: Untersuchte Konzepte zum Mähdrusch


	Prozesse auf dem Feld	Transport auf dem Feld / Straße	Prozesse am Feldrand / Hof
a) Hochschnitt und Transport Ähre	Schneiden – Häckseln	Ähre und Anteil Stroh	Dreschen – Reinigen
b) Strippen und Transport Ähre	Strippen – Häckseln	Körner und Anteil Ähre	Dreschen – Reinigen
c) Tiefschnitt und Transport Stroh	Schneiden	Ähre und Stroh	Dreschen – Reinigen – Häckseln
d) Konventioneller Mähdrusch	Mähdrusch	Korn	

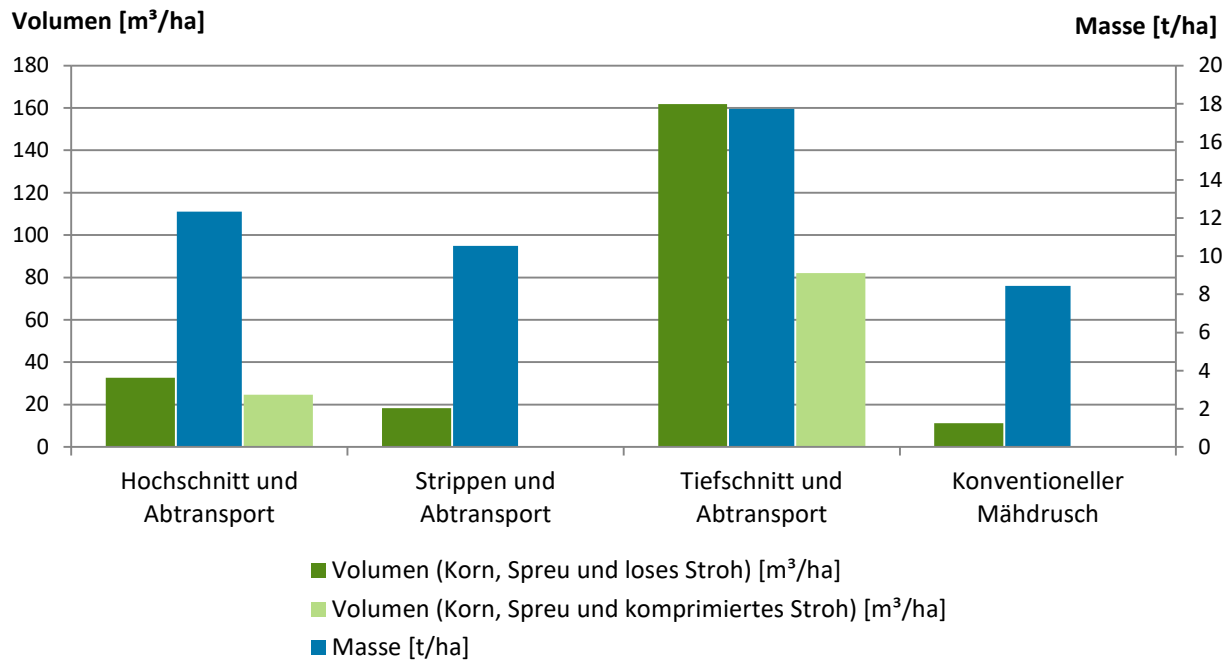
Quelle: Eigene Darstellung.

Folgende Aussagen lassen sich aus der Gesamtschau der Abbildungen ableiten:

- (1) Konzept a: Die Ähre wird kurz unterhalb ihres Ansatzes abgetrennt, zwischengelagert und anschließend an den Feldrand transportiert. Der Halm wird direkt am Standort gehäckselt. Durch den Strohanteil an der Ähre ist sowohl die zu transportierende Masse als auch das Volumen gegenüber dem konventionellen Mähdrusch stark erhöht. Jedoch kann durch eine leichte Komprimierung des Strohs in der Lagereinheit dieser Nachteil zum Teil wieder ausgeglichen werden. Als Schneidwerk kann eine stark verkleinerte Version heutiger Schneidwerke angenommen werden.
- (2) Konzept b: Die Ähre wird nicht abgeschnitten, sondern mittels eines Strip-Aggregates (Shelbourne Reynolds Engineering Ltd. 2017) vom Halm getrennt, zwischengelagert und anschließend an den Feldrand transportiert. Der Halm wird direkt am Standort gehäckselt. Dieses Konzept hat zwar den geringsten Transportbedarf, jedoch funktionieren Strip-Aggregate vor allem durch eine hohe Drehzahl der Strip-Finger, sodass hier Beschädigungen des Kornes auftreten könnten.
- (3) Konzept c: Der Halm wird kurz über der Bodenoberfläche abgeschnitten, sodass nur ein Stoppel auf dem Feld verbleibt. Die Restpflanze wird dann zwischengelagert und an den Feldrand transportiert. Das Konzept erfordert dementsprechend den höchsten Transportbedarf, hat aber durch den Wegfall des Häckselorgans den geringsten Leistungsbedarf. Allerdings erscheinen die zu transportierenden Volumina nicht händelbar.
- (4) Konzept d: Stellt als Vergleichsgrundlage einen konventionellen Mähdrusch dar.

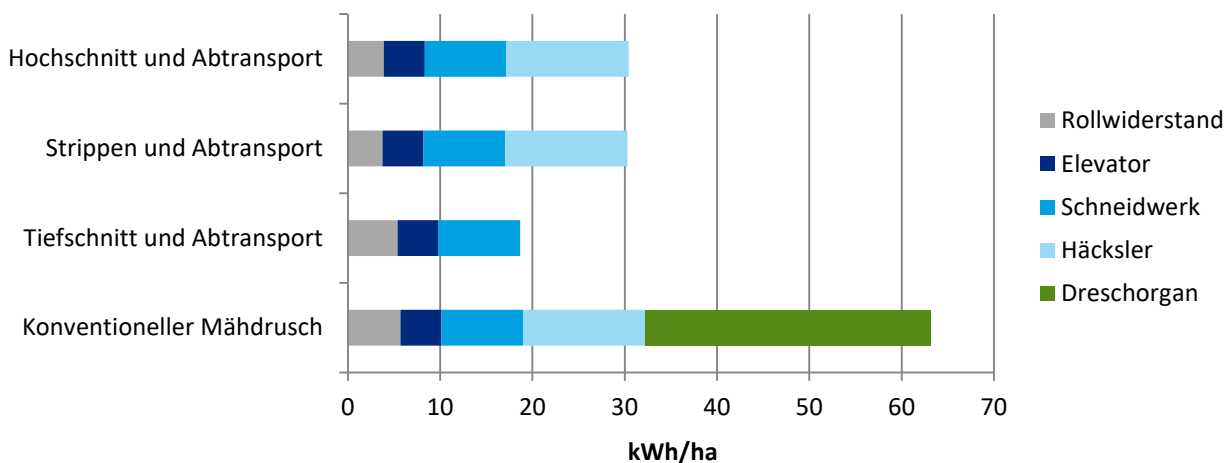
Die Konzepte a) und b) erfordern im Vergleich zum konventionellen Mähdrusch zwar ebenfalls den Transport höherer Massen und Volumina, allerdings scheinen diese Konzepte durchaus realistisch. Im Folgenden wird daher eine Kombination aus den Konzepten a) und b) weiterverfolgt.

Abbildung 49: Transportvolumen und -gewichte in den Konzepten



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 50: Energiebedarf der Mähdruschkonzepte



Quelle: Eigene Darstellung.

Einen ersten Ernteroboter nach Konzept a) und b) zeigt Abbildung 52. Der Ernteroboter schneidet die Ähren von den Halmen und fördert sie in Transportboxen. Die Halme werden direkt am jeweiligen Standort durch kleine Häckselrollen zerkleinert. Die Transportboxen haben ein Volumen von

je 120 l und sind entsprechend in knapp 50 s gefüllt. Wenn eine Transportbox vollständig mit Ähren gefüllt ist, wird sie auf dem Feld abgelegt und aus dem Magazin des Roboters wird eine neue Box in die Befüllposition gebracht. Transportroboter sammeln die abgelegten Kisten ein und befördern sie zum Feldrand. Die Ähren werden dann entweder am Feldrand gedroschen oder werden zu einer Hofstelle transportiert und dort ausgedroschen. Die Massen und Volumina des zu transportierenden Materials sind beim Hofdrusch um ca. 46 % (Masse) bzw. 190 % (Volumen) höher als beim konventionellen Drusch, bei dem nur das Korn abgefahren werden muss (Abbildung 47). Der Vorteil des Hofdrusches liegt darin, dass das Dreschorgan sehr klein und auf die halbe Flächenleistung der Feldroboter hin dimensioniert werden kann. An der Hofstelle können die Ähren über den Tag gelagert werden (Flächenleistung der Ernteroboter übersteigt die Kapazität des Dreschorgans), in der Nacht kann dieser Vorrat dann abgearbeitet werden (Ernteroboter können aufgrund der Feuchtigkeit nachts nicht ernten).

Abschätzung des Leistungsbedarfs

Der Leistungsbedarf der Ernteroboter liegt bei ca. 10 kW für Schneidwerk und Häckselrollen und wurde aus dem skalierten Leistungsbedarf heutiger Mähdrescher abgeschätzt. Zudem wurde in Teilbereichen der Leistungsbedarf durch weitere Forschungsergebnisse angepasst. Beispielsweise können die Häckselrollen das Material im „Exaktschnitt“ zerkleinern, was gegenüber dem freien Schnitt eine Leistungsreduzierung von ca. 30 bis 40 % ermöglicht (Wiedermann 2011).

Der Leistungsbedarf für die Fahrwerke wurde wie der Bodenbearbeitung zu ca. 2 kW geschätzt. Der Gesamtleistungsbedarf der Ernteroboter liegt damit bei ca. 12 kW. Die Transportroboter haben nur einen Leistungsbedarf in den Fahrwerken, der ebenfalls bei ca. 2 kW liegt.

Abschätzung der Flächenleistung und des Energiebedarfs

Die Maschinenbreite liegt bei 1 m und wurde aus den Einzelgewichten der Komponenten hergeleitet. Mit einer Fahrgeschwindigkeit von rund 6 km/h ergibt sich damit eine Flächenleistung der Ernteroboter von 0,57 ha/h. Aus den dargestellten Volumen- und Gewichtsverteilungen der Getreidepflanze ergibt sich ein „Ährenertrag“ von ca. 11,1 t/ha bzw. 1,5 kg/s oder 2,44 l/s.

Die optimale Anzahl der Transportroboter wurde mittels einer Verfahrenssimulation ermittelt, hängt jedoch auch von der Schlaggröße und -form ab. Eine erste Betrachtung ergab, dass je Ernteroboter ein Transportroboter notwendig ist, damit der Ernteroboter möglichst gut ausgelastet wird.

Der Energiebedarf beträgt ca. 23 kWh/ha, ohne Betrachtung des Drusches am Feldrand oder auf dem Hof.

Abbildung 51: Konzept Weizenernte: Ernteroboter (links) und Transportroboter (rechts)

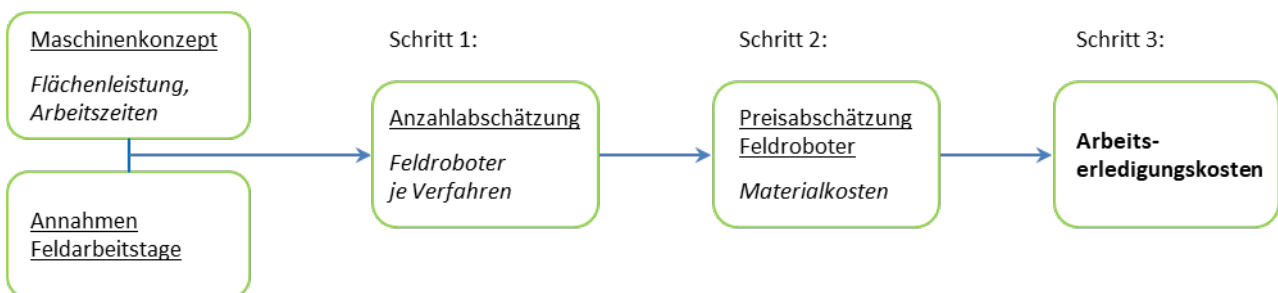


Quelle: Eigene Darstellung.

3.3 Ökonomische Bewertung des entwickelten Kleintechnikszenarios

Nachdem zuvor die im Rahmen des Projektes entwickelten Konzepte erläutert wurden, werden die Konzepte in diesem Kapitel ökonomisch bewertet. Hierfür werden die Arbeitserledigungskosten der erläuterten Maschinenkonzepte für die Verfahren Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, mechanische Unkrautbekämpfung, chemischer Pflanzenschutz und Ernte abgeschätzt. Das Vorgehen für die ökonomische Bewertung ist in Abbildung 53 dargestellt und wird nachfolgend erläutert:

Abbildung 52: Methodisches Vorgehen zur ökonomischen Bewertung des Kleintechnikszenarios



Quelle: Eigene Darstellung.

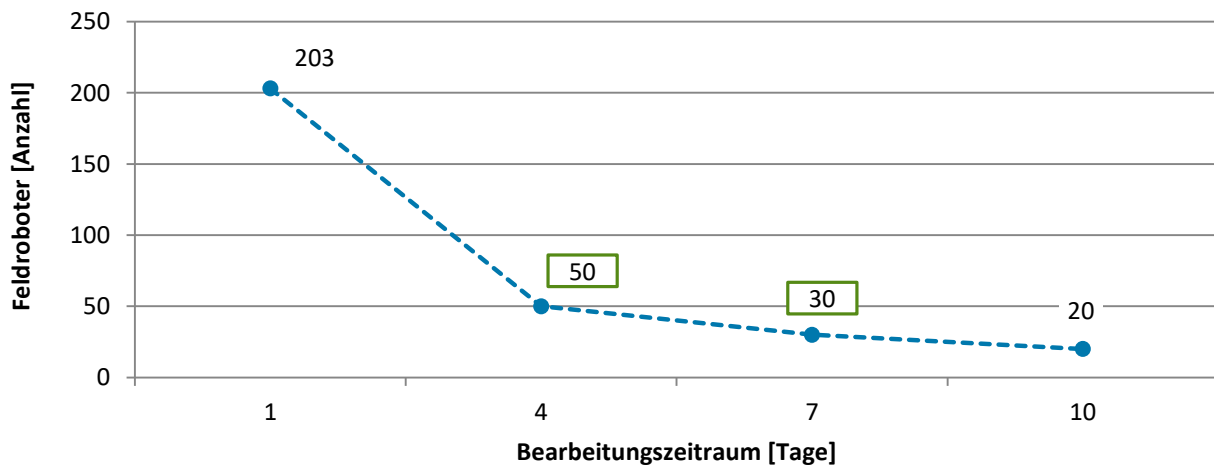
Schritt 1: Abschätzung der Anzahl benötigter Roboter

In Abbildung 54 ist die Anzahl der benötigten Roboter für die Bewirtschaftung einer Fläche von 150 ha Weizen dargestellt. Die bewirtschaftete Fläche sowie die Anzahl benötigter Roboter wurde wie folgt abgeleitet:

- Zunächst sind auf Basis der in Kapitel 3.2 unterstellten Fahrgeschwindigkeiten und Arbeitsbreiten der jeweiligen Roboterkonzepte die Flächenleistungen abgeleitet worden.
- Anschließend sind die ermittelten Flächenleistungen den verfügbaren Feldarbeitstagen gegenübergestellt und für jedes Roboterkonzept die maximal zu bewirtschaftende Fläche für einen Roboter ermittelt worden.
- Die insgesamt zu bewirtschaftende Fläche ist aufgrund der Unteilbarkeit von Maschinen nach dem Roboter mit der höchsten Flächenleistung ausgewählt worden. Wie in Tabelle 5 dargestellt, ergibt sich aus der Flächenleistung des Bodenbearbeitungsroboters eine insgesamt zu bewirtschaftende Fläche von 150 ha.
- Anschließend wird in gleicher Weise für die anderen Roboterkonzepte die Anzahl benötigter Roboter für eine 150 ha Fläche ermittelt.³
- Für die Bodenbearbeitung und Aussaat sowie Ernte werden die verfügbaren Feldarbeitstage für den exemplarisch betrachteten Standort Magdeburger Börde aus KTBL (2016) abgeleitet. Für die Bodenbearbeitung wird dabei ein Mittelwert aus der Anspruchsstufe 2 (Saatbettbereitung, Aussaat) und der Anspruchsstufe 3 (Stoppelbearbeitung) gebildet. Hiermit wird vereinfachend dem Umstand Rechnung getragen, dass leichtere Feldroboter aufgrund ihres geringeren Bodendruckes auch bei höheren Bodenfeuchtegehalten fahren können.
- Für die Düngung sowie dem chemischen Pflanzenschutz werden hinsichtlich der verfügbaren Feldarbeitstage hingegen zwei Szenarien unterstellt, um den Einfluss der erforderlichen Schlagkraft auf die Arbeitserledigungskosten darzustellen. Außerdem wären Feldversuche mit Feldrobotern nötig, um die tatsächlichen Feldarbeitstage genau zu bestimmen. Die Größe des Düngefensters hat einen entscheidenden Einfluss auf die benötigten Roboter. Sollen wie heute mit einer hohen Flächenleistung alle Pflanzen an einem Tag gedüngt werden, sind entsprechend viele Roboter notwendig (Abbildung 54). Die Anzahl der Roboter ist für Stickstoffgaben von bis zu 130 kg Harnstoff/ha kalkuliert worden.

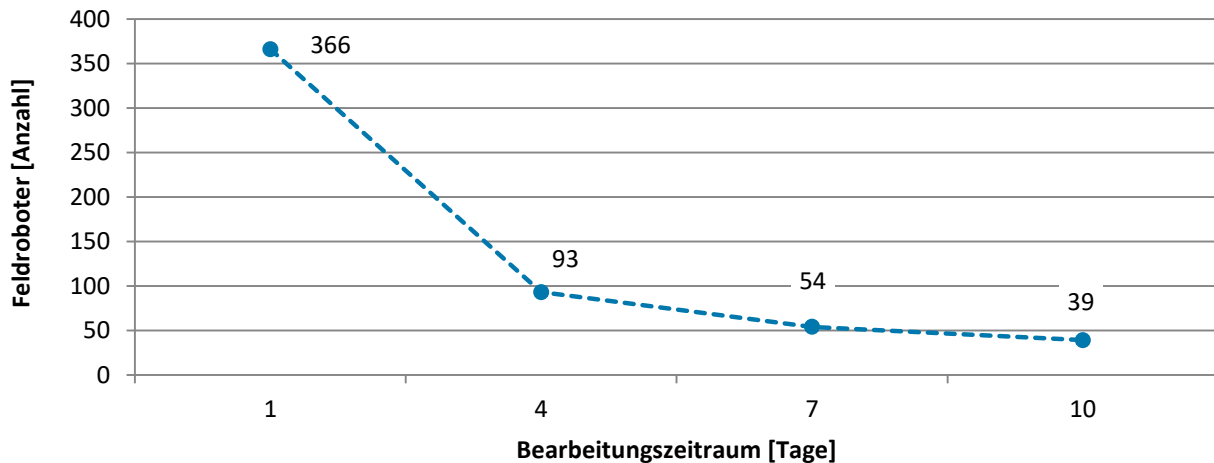
³ Die Formel für die Berechnung Anzahl benötigter Roboter findet sich im Formel A1.

Abbildung 53: Bedarf an Feldrobotern für die Stickstoffdüngung einer bearbeiteten Fläche von 150 ha



Quelle: Eigene Darstellung.

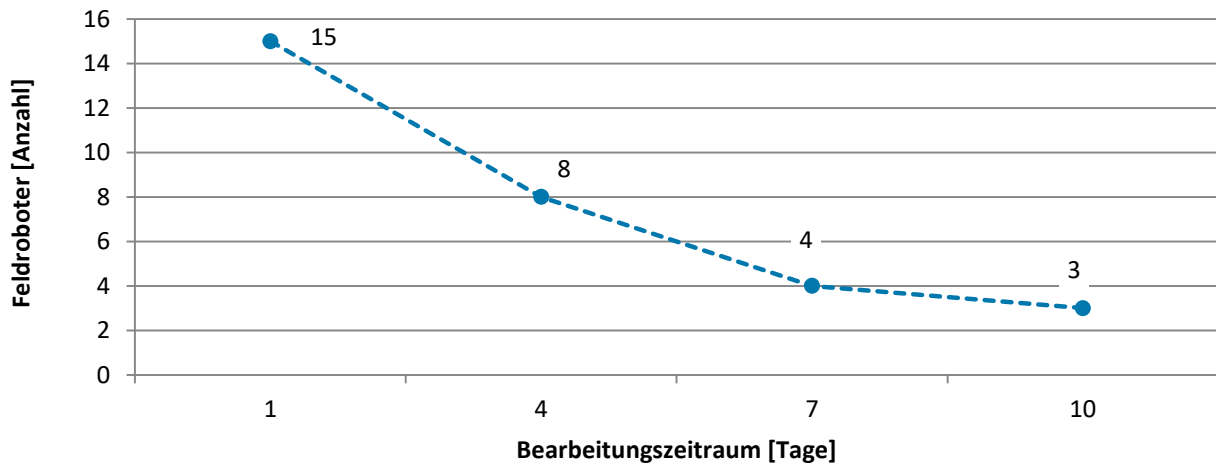
- Theoretisch können kleine und leichte Feldroboter aber länger bei feuchten Bodenbedingungen fahren als heutige Traktor-Maschinen-Kombinationen und sind auch wahrscheinlich nicht so windanfällig bei der Düngerausbringung, weil die Applikation geschützt im Pflanzenbestand stattfinden kann. Wird nicht von einem Tag, sondern von sieben verfügbaren Feldarbeitstagen ausgegangen, sinkt der Bedarf von rund 200 auf 30 Roboter für eine insgesamt bearbeitete Fläche von 150 ha. Aus pflanzenbaulichen und ökonomischen Erwägungen wird ein Zeitfenster von vier bzw. sieben Tagen unterstellt. Die Spanne wird nicht länger als eine Woche gewählt, damit eine Mindest-Stickstoff-Konzentration im Boden für die Pflanzenentwicklung gegeben ist (Bauer und Breunig 2017b; Gaus 2017a) (vgl. Kapitel 3.2.2.2).
- Müsste eine Fungizid-Behandlung an einem Tag auf 150 ha durchgeführt werden, wären dafür über 300 Roboter der vorgestellten Bauweise nötig (Abbildung 55). Dagegen wären weniger als 40 Roboter nötig, wenn für den gesamten Behandlungszeitraum 10 Tage angenommen werden könnten. Im Idealfall müsste die Anzahl erforderlicher Roboter aus der Verbreitungsgeschwindigkeit der Krankheitserreger abgeleitet werden. Allerdings unterscheiden diese sich sehr stark und sind je nach Witterungsbedingungen sehr unterschiedlich (vgl. pflanzenbauliche Anforderungen). Daher wurde für eine erste Abschätzung davon ausgegangen, dass in etwa die gleiche Schlagkraft wie mit heutigen Maschinen gewährleistet sein muss. Hierfür wurde unterstellt, dass in sieben Tagen eine Fläche von 150 ha bearbeitet werden soll.

Abbildung 54: Bedarf an Feldrobotern für die Behandlung von 150 ha gegen Fusarien

Quelle: Eigene Darstellung.

- Je früher und kleinräumiger die Technik zukünftig die Befallsherde erkennen kann, umso eher lässt sich auch eine teilflächenspezifische Behandlung realisieren, womit tendenziell weniger Roboter benötigt werden würden. Das konzipierte KleintechnikszENARIO sieht vor, dass der Pflanzenbestand zukünftig besser überwacht wird als heute, weil die Maschinen 24 Stunden im Einsatz sein könnten. Rost und Septoria sind zwei weitere bedeutende Befallstypen, die im Gegensatz zu Fusarien in bestimmten Nestern oder wie im Fall Septoria in Bereichen mit Ernteresten auftreten. Rost hat eine Latenzzeit von 90 Gradtagen (ca. 6 Tage), die bei Septoria mit 240 Gradtagen (ca. 14 Tage) mehr als doppelt so lang ist. Ein Roboterschwarm, deren Roboteranzahl ausreicht, Rost zu bekämpfen, könnte bezüglich der Latenzzeiten auch Septoria bekämpfen. In Abbildung 56 sind die benötigten Roboterzahlen abgebildet, um befallene 3 % der Getreidefläche von 150 ha zu behandeln. Für die chemische Pflanzenschutzbehandlung wird angenommen, dass diese 3 % der Gesamtfläche mit Rost befallen sind und innerhalb eines bzw. sechs Tagen zu behandeln sind. Diese Annahme basiert auf Schadschwellen bei Rost (Hamer et al. 2017) (vgl. Kapitel 3.2.2.2).






Abbildung 55: Bedarf an Feldrobotern für die Behandlung von Rost



Quelle: Eigene Darstellung.

- Für die mechanische Unkrautbekämpfung ist angenommen worden, dass drei Überfahrten im Herbst und zwei Überfahrten im Frühjahr stattfinden, jeweils im Abstand von sieben Tagen. Diese Annahme basiert auf bisherigen Erfahrungen im ökologischen Landbau, damit Unkräuter noch mit dem Striegel bekämpft werden können (Verschwele 2017b).

Tabelle 5: Benötigte Roboter je landwirtschaftliches Verfahren für 150 ha Ackerfläche

150 ha		Bodenbearbeitung/ Aussaat	Ernte und Logistik	Düngung	Chem. Pflanzenschutz	Unkrautbekämpfung
						
Arbeitsbreite	[m]	0,6	1	0,14 *	0,07 *	0,07
Fahrgeschwindigkeit	[km/h]	5	5,7	2,5	2,5	2
Flächenleistung	[ha/h]	0,3	0,6	0,03	0,02	0,02
Feldarbeitstage (nach Werner et. al. 2016)	[d]	22	22	4 - 7	1 - 6	35
Anzahl		1	je 1 Roboter	30 - 50	3 - 15	64

* Die angegebenen Arbeitsbreiten sollen helfen, eine Vorstellung über die unterschiedlichen Größenverhältnisse der abgebildeten Konzepte zu bekommen. Für die Kalkulation der aufgezeigten Flächenleistungen bei Düngung und Pflanzenschutz sind neben der Arbeitsbreite und Fahrgeschwindigkeit zusätzlich Befüllungszeiten berücksichtigt worden. Außerdem ist bei der Düngung die Arbeitsbreite doppelt so hoch wie beim chemischen Pflanzenschutz, weil der Roboter bei einer Durchfahrt zwei Pflanzenreihen düngen kann. Für die Applikation der Pflanzenschutzmittel ist angenommen worden, dass jede Reihe befahren werden muss, um die Pflanzen von beiden Seiten der Pflanzen zu benetzen (vgl. Kap 3.2.2.3).

Quelle: Eigene Darstellung.

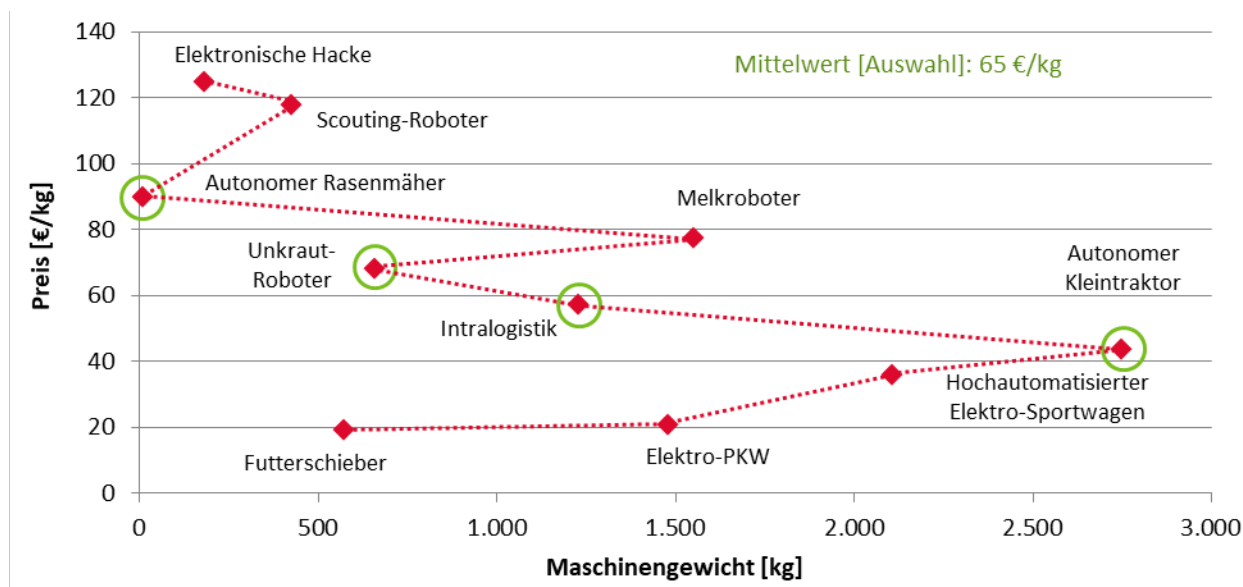
Die Anzahl Roboter ist je Verfahren kalkuliert worden, um sicherzustellen, dass die Tätigkeiten getrennt voneinander durchgeführt werden können. Die benötigten Roboter ließen sich reduzieren, indem Roboter in anderen Verfahren ausgelastet werden könnten oder die konzipierten Roboter verschiedene Arbeiten gleichzeitig ausführen könnten. Hierzu lassen sich zukünftig weitere Modellrechnungen durchführen, um Einsparpotenziale aufzuzeigen.

Schritt 2: Abschätzung künftiger Roboterpreise

Nachdem die Anzahl der benötigten Roboter für die erforderliche Schlagkraft abgeleitet wurde, ist es für die Kalkulation der Arbeitserledigungskosten notwendig, eine erste Einschätzung zu den künftigen Herstellungskosten bzw. Anschaffungspreise der Roboterkonzepte zu entwickeln. Hierfür wurden unterschiedliche Konzepte erprobt:

Zunächst wurde versucht, anhand von heute verfügbaren Robotern bzw. innovativen Technologien das Verhältnis aus Preis und Gewicht zu ermitteln und auf die zuvor beschriebenen Konzepte zu übertragen (Abbildung 57).

Abbildung 56: Schätzung eines Preis-Gewichts-Koeffizienten anhand vergleichbarer Technologien









Quelle: Eigene Darstellung nach Robert Bosch GmbH (2017); Duffer (2016); Lely (2016); Naïo Technologies (2016); Tesla (2016); Volkswagen (2016a); Volkswagen (2016b); Precision Makers (2015); Universität Hohenheim (2012).

Wie der Abbildung 57 zu entnehmen ist, schwanken die spezifischen Preise je kg jedoch erheblich und reichen von 20 €/kg bis 130 €/kg. Der Mittelwert von marktfähigen Robotern (grün eingekreist) ergibt einen spezifischen Preis von 65 €/kg. Daraus leitet sich ein Preis für den Bodenbearbeitungsroboter von 52.000 € ab, was für eine derartige Maschine als zu hoch eingeschätzt worden ist. Daher wurde ein zweiter Ansatz entwickelt, in dem wie folgt vorgegangen wurde:

- Aus der Konzeption der Roboter (vgl. Kapitel 3.2.2) sind zunächst die wesentlichen Bauteile erfasst und heutige Preise für Einzelbestellungen ermittelt worden, die in Summe die heutigen Materialkosten abbilden (Tabelle 6).
- Anschließend wurden auf Basis einer Literaturanalyse zukünftig zu erwartende Preisdegressionen einzelner Bauteile angenommen. Für Akkus wurde eine Kostendegression von 60 % unterstellt (Nykvist und Nilsson 2015; Thielmann et al. 2015). Für die übrigen Bauteile wurde eine Kostendegression von 20 % unterstellt, auf Basis von Skalen- und Lernkosteneffekten (Kirchgeorg 2017) (Abbildung A2).
- Um Fertigungskosten zu berücksichtigen und aus den abgeschätzten künftigen Materialkosten Bruttolistenpreise abzuleiten, sind die Materialkosten nach bisherigen Erfahrungswerten aus der Landtechnikindustrie (Frerichs 2017) um den Faktor zwei erhöht worden und ein Rabatt von 40 % unterstellt.

Mit dem beschriebenen Verfahren variieren die Schätzungen zu den künftigen Verkaufspreisen von Robotern zwischen 23.000 € für einen 800 kg schweren Bodenbearbeitungsroboter und 900 € für den 5 kg leichten Unkrautroboter. Insgesamt ist die Abschätzung der künftigen Roboterpreise mit erheblichen Unsicherheiten verbunden und sehr spekulativ. Dennoch wurde das gewählte Verfahren vom Fachbeirat als geeignetes Vorgehen eingeschätzt, um die verschiedenen Roboterkonzepte untereinander zu vergleichen.

Tabelle 6: Berechnung künftiger Verkaufspreise für die entwickelten Roboterkonzepte

Roboterteile	Bodenb./ Aussaat	Ernte und Logistik		Düngung	Chem. Pflanzen- schutz	Unkraut- bekämpf.
						
Antriebsmotoren	2	2	2	4	4	4
Prozessmotoren	4	2	2	2	0	0
Recheneinheit	1	1	1	1	1	1
GPS Sensor	1	1	1	1	1	1
Batterie	2	2	1	2	2	2
Getriebe	1	2	2	4	4	4
Laufbänder; Reifen	2	2	2	4	4	4
Antriebselemente	2	2	2	0	0	0
Ultraschallsensoren	0	0	0	4	4	4
Schnecke; Pumpe	0	0	0	2	2	0
Rahmen, Magazin	1	1	1	0	0	0
Boxen; Tank	0	5	5	1	1	0
Werkzeuge	2	2	0	1	1	1
Häckselrollen	0	14	0	0	0	0
Gehäuse	0	0	0	1	1	1
Heutige Materialkosten [€]	30.993	22.980	15.432	1.024	1.280	978
<i>Annahmen</i>	a) Ausgangssituation: Heutige Materialkosten					
<i>a) Kostendegressionen für Bauteile durch Skalen- und Lernkosteneffekte</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Akkukosten (-60 %) (nach Nykvist und Nilsson 2015; Thielmann et al. 2015) • Andere Bauteilkosten (-20 %) (nach Kirchgeorg 2017) = Künftige Materialkosten					
<i>b) Fertigungskosten</i>	b) Künftige Materialkosten * Faktor 2 = Material- und Fertigungskosten künftiger Roboter					
<i>c) Rabatt</i>	c) Rabatt 40 % = Geschätzte Roboterpreise					
Geschätzte Roboterpreise [€]	23.000	17.000	12.000	1.000	1.200	900

Datengrundlage heutiger Bauteilpreise: BayWa (2017); BMT (2017); Contorion (2017); Dunkermotoren (2017); Ebay (2017); Getriebebau Nord (2017); JS-Technik (2017); Lissmac (2017); Memoplast (2017); Nanotec (2017); Papenheim (2017); Pelz (2017); RadundRolle (2017); Rahimzei et al. (2017); Reichelt (2017); RS Components GmbH (2017); Huamaoji (2016)

Schritt 3: Kalkulation der Arbeiterledigungskosten

Auf Basis der zuvor abgeleiteten Roboteranzahlen und –preise konnten die Kapitalkosten für die Verfahren Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Unkrautbekämpfung, chemischer Pflanzenschutz und Ernte quantifiziert werden (Tabelle 7). Im letzten Schritt wurden mittels der Kapital-, Reparatur- und Energiekosten jeweils die Arbeiterledigungskosten berechnet (Formel A2). Dabei resultierten die Energiekosten aus in Kapitel 3.3.2 ermittelten Energieverbräuchen. Für die Reparaturkosten sind Standardwerte unterstellt worden (vgl. Universität Hohenheim 2016; Edwards 2015). Zukünftig sind Feldversuche nötig, um belastbare Annahmen treffen zu können, ob und wie sehr sich Reparaturen von Robotern gegenüber heutiger Technik unterscheiden.

Insgesamt zeigt sich anhand der ökonomischen Analysen, dass autonome Feldroboter ein hohes Potenzial haben, zukünftig wirtschaftlich in der Landwirtschaft für alle Verfahren eingesetzt zu werden (Tabelle 7).

Verglichen zu heutigen Verfahren der Großtechnik (KTBL 2017) ergeben sich mit dem vorgestellten KleintechnikszENARIO die größten Einsparpotenziale bei der Ernte. Der Vorteil des kleintechnischen Ernteverfahrens ist, dass die Ähren 24 Stunden lang ausgedroschen werden können. Die schweren Prozesseinheiten für das Ausdreschen müssen nicht wie sonst üblich über den Acker transportiert werden, weil sie am Feldrand oder auf der Hofstelle positioniert sein können. Die stationäre Drescheinheit kann somit 24 Stunden ausgelastet werden, was die Gesamtkosten reduziert. Zudem kann die Kleintechnik für den Feldeinsatz umso kleiner dimensioniert werden (Motorleistung, Rahmen), weil die Prozesseinheit zum Dreschen nicht über den Acker transportiert werden muss.

Tabelle 7: Arbeiterledigungskosten heute und im KleintechnikszENARIO

Arbeits- erledigungskosten	Boden- bearbeitung und Aussaat	Ernte und Logistik	Düngung 7 - 4 Tage	Chem. Pflanzen- schutz 6 - 1 Tage, 3 % Fläche	Unkraut- bekämpfung
Anzahl Roboter	1	1 Ernteroboter 1 Logistikroboter 1 Dreschstation	30 - 50	3 - 15	64
Preis Roboter [€]	23.300	17.300 12.400 22.300	1.000	1.200	900
Kapitalkosten [€/ha]	12	27	15 - 26	2 - 11	30
Reparaturkosten [€/ha]	3	7	4 - 7	0,5 - 3	8
Energiekosten [€/ha]	11	18	1	0,5	2
Summe [€/ha]	26	52	20 - 34	3 - 15	40
Heute (KTBL 2017) [€/ha]	28; 36	107	25	7	55

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Wirtschaftlichkeit der Kleintechnik hängt stark von der benötigten Maschinenanzahl ab. Wenn Maschinen in mehreren Verfahren eingesetzt werden können, können die Auslastung erhöht und die Kosten gesenkt werden. Weitere ökonomische Vorteile für landwirtschaftliche Betriebe mit autonomer Kleintechnik könnten sich bei den Direktkosten (Pflanzenschutzmittel, Düngermittel) ergeben. Ließe sich durch die vorgestellte mechanische Unkrautbekämpfung tatsächlich auf sämtliche Herbizid-Anwendungen beim Weizen verzichten, würden sich rund 50 €/ha Herbizidkosten einsparen lassen. Allerdings gilt es die Effektivität autonomer Feldroboter in Feldversuchen zu untersuchen, um genauere Annahmen zu treffen.

Das ausgewählte KleintechnikszENARIO bezieht sich auf Weizen mit geringem Pflanzenabstand, Reihenkulturen ließen sich durch höhere Reihenabstände leichter automatisieren lassen. Das hohe Einsparpotenzial von rund 250 €/ha Herbizidkosten bei Zuckerrüben spricht für eine dortige Anwendung von autonomen Kleinmaschinen zur mechanischen Unkrautbekämpfung. Dabei ließen sich die Maschinen noch effizienter einsetzen, wenn nur bestimmte Teilflächen bearbeitet werden könnten (z. B. Unkrautnester). Ein frühes Monitoring des gesamten Pflanzenbestandes wird für einen wirtschaftlichen Betrieb autonomer Kleintechnik zukünftig wichtig sein. Sobald für die Pflegemaßnahmen in kurzer Zeit viel Fläche bearbeitet werden müsste, wäre die Kleintechnik schnell unwirtschaftlich. Daneben muss über alternative Anbauformen und Kulturkombinationen nachgedacht werden, die die Pflanzenbestände von sich aus (Züchtung, Pflanzenabstand, Micro-Klima, biologischer Pflanzenschutz) widerstandsfähiger machen könnten.

3.4 Zwischenfazit Kleintechnik

Nachfolgend werden Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Analysen zum KleintechnikszENARIO gezogen.

Es hat sich gezeigt, dass autonome Kleinmaschinen grundsätzlich das Potenzial haben, die bisherigen Pflanzenbausysteme völlig zu verändern. Dabei bietet sich die Chance, ein Ackerbausystem mit weniger negativen Einflüssen auf die Umwelt zu etablieren. Die Chancen liegen weniger darin, Lohnkosten einzusparen (vgl. GroßtechnikszENARIO), sondern in der Möglichkeit, Pflanzen kleinräumig zu variieren und miteinander zu kombinieren. In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise zu den ökologischen Vorteilen einer höheren Biodiversität auf dem Acker. Hierzu zählen insbesondere

- ein geringerer PSM-Bedarf (Malézieux et al. 2009),
- eine bessere Ausnutzung des Nährstoffangebots,
- eine bessere Ausnutzung des Sonnenlichts,
- eine Verringerung der Anfälligkeit für Winderosion (Mirck et al. 2016),
- ein höheres Insektenaufkommen im Bestand (Garibaldi et al. 2013) und
- eine höhere Ertragsfähigkeit (Knörzer et al. 2010).

Allerdings finden sich in diesem Zusammenhang nur wenige Arbeiten, in denen auf Basis von Versuchen konkrete Aussagen zu ackerbaulichen Vorteilen und Ertragseffekten gemacht werden. Hinzu kommt, dass die durchgeführten Versuche in der Regel mit eher exotischen Kulturen gemacht wurden und nicht mit den Hauptackerkulturen. Im Rahmen des Begleitkreises wurde von Seiten der Praxis kritisch angemerkt, dass auch negative Effekte auftreten können, wenn Pflanzen miteinander kombiniert werden. Hierzu zählen beispielsweise grüne Brücken für die Krankheitserreger oder Schädlinge.

Vor diesem Hintergrund ist es eine der wesentlichen Voraussetzungen, zusätzliches Wissen hinsichtlich alternativer Pflanzenbausysteme / Pflanzenkombinationen für den Ackerbau zu erschließen. Hier sollten vor allem folgende Fragen im Vordergrund stehen:

- Welche Nutzpflanzen lassen sich miteinander kombinieren?
- Wie sollten die Pflanzen ideal auf dem Feld angeordnet sein?
- Welche Synergieeffekte ergeben sich aus der Kombination von Nutzpflanzen und wie lassen sich diese quantifizieren?
- Wie kleinräumig müssen Pflanzen kombiniert werden, um diese Effekte zu erreichen?

Der ökologische Landbau würde in besonderem Maße profitieren, wenn Synergieeffekte aus Pflanzenkombinationen genutzt werden könnten, da er ohne den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und synthetischen Düngemitteln auskommen muss und diese natürlichen Synergien die daraus resultierenden Nachteile verringern könnten. Weiterhin würden auf diese Weise die Ansätze aus dem ökologischen Landbau in den konventionellen Landbau übertragen.

Bezüglich der technischen Machbarkeit ist festzustellen, dass in zahlreichen Forschungsprojekten Konzepte für autonome Kleinmaschinen entwickelt werden. Erste kommerzielle Markteinführungen sind innerhalb der nächsten fünf Jahre geplant. Ein wesentliches Motiv von Landtechnikunternehmen für ihre bisherigen Entwicklungstätigkeiten im Bereich autonomer Kleinmaschinen dürfte darin liegen, dass für autonome Maschinen bis 100 kg das Haftungsrisiko tragbar scheint, während es bei schwereren Maschinen auch künftig starke Bedenken geben wird. Ursache hierfür ist, dass von Großmaschinen aufgrund ihres Gewichts per se ein höheres Gefährdungspotenzial ausgeht. Selbst wenn künftig sehr zuverlässige Sensoren für die Umfelderkennung verfügbar sein werden und damit die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalls sehr gering wird, ändert sich das Gefährdungspotenzial nicht. In der Folge wird das Haftungsrisiko im Vergleich zu Kleinmaschinen immer deutlich höher sein.

Allerdings handelt es sich bei den bisherigen Entwicklungen überwiegend um Insellösungen, in denen lediglich einzelne Verfahrensschritte durch Kleinmaschinen ersetzt werden. Die meisten Aktivitäten laufen dabei für die Aussaat und mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen.

Um die genannten pflanzenbaulichen Potenziale der Kleintechnik realisieren zu können, wird es aber notwendig sein, dass annähernd alle Arbeitsgänge von Kleinmaschinen durchgeführt werden, insbesondere die Ernte. Es konnte gezeigt werden, dass dies grundsätzlich möglich ist, indem bisher zusammengefasste Prozesse aufgelöst und andere Maschinenkonzepte entwickelt werden. Mit dem vorgestellten Erntekonzept konnte dabei gezeigt werden, dass der zusätzliche Logistikaufwand, der entsteht, wenn nicht mehr auf dem Feld gedroschen wird, auch mit kleinen Maschinen zu bewerkstelligen ist. Insgesamt konnten im Rahmen des Projektes für alle Verfahren Konzeptansätze entwickelt werden. Allerdings ist zu befürchten, dass einige dieser Konzeptansätze nicht praxistauglich sind. Hierunter fallen insbesondere folgende Ansätze:

Bodenbearbeitung

Aufgrund des hohen Zugkraftbedarfs ist die Bodenbearbeitung mit Kleinmaschinen nur mithilfe von aktiven Werkzeugen zu lösen. Dabei lassen die bisherigen Analysen keine wesentliche Energieeinsparung gegenüber heutigen Verfahren erwarten. Somit ist zu prüfen, ob

- die Bodenbearbeitung ggf. weiterhin von Großmaschinen durchgeführt werden kann oder ob die Bodenbearbeitung von Teilflächen mit Kleinmaschinen sinnvoll sein kann. Ein möglicher Ansatz für eine punktuelle Bodenbearbeitung findet sich im Anhang;
- sich die Prioritäten der Bodenbearbeitung verschieben, wenn nur noch Kleinmaschinen auf dem Acker fahren. Sofern kein Lockerungsbedarf mehr bestehen sollte, reicht womöglich eine vertikale Durchmischung des Bodens mit Kleinmaschinen.

Pflegemaßnahmen in Getreide

Insbesondere für die entwickelten Pflegeroboter ist fraglich, ob sie Hindernisse im Feld überwinden können. Die Zweifel zur Machbarkeit der kleinen Maschinen wurden im Rahmen des Projektes bewusst hinten angestellt, um die generelle Möglichkeit einer kontinuierlichen Nährstoff- und Pflanzenschutzversorgung der Pflanzen zu diskutieren. Für Stickstoff zeigen bisherige Versuchsergebnisse, dass dieser Ansatz nicht sinnvoll ist (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Für die anderen Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel, insbesondere Fungizide sind hingegen Einspareffekte zu erwarten. Für eine konkrete Weiterentwicklung der Konzepte werden folgende Ansätze gesehen:

- Für die Grundnährstoffe P_2O_5 und K_2O sowie für Fungizide ist zu klären, welche Anforderungen bezüglich Ausbringzeiträumen und Verteilgenauigkeiten gefordert sind, bzw. welche Einsparpotenziale sich bei einer kontinuierlichen, teilflächenspezifischen Ausbringung ergeben. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass weniger Input benötigt wird, wenn die Maschinen ständig auf dem Feld verbleiben und bedarfsgerecht Pflanzenschutzmittel und Dünger ausbringen. Hinzu kommt, dass ein geringerer Inputbedarf für Pflanzenschutzmittel mit Ertragssteigerungen einhergehen dürfte, weil auch Nutzpflanzen durch Pflanzenschutzmittel in der Entwicklung gehemmt werden. Erste Schätzungen lassen Ertragssteigerungen im Bereich von 2 bis 8 % erwarten (Bauer und Breunig 2017a).
- Es ist anzuzweifeln, ob die entwickelten Konzepte zuverlässig und stabil arbeiten (Gefahr des Umkippens; mangelnde Fähigkeit, Hindernisse zu überwinden). Vor diesem Hintergrund sind

weitere Antriebs- und Roboterkonzepte zu prüfen. Hier sind auch völlig neue Ansätze, wie beispielsweise der in Kapitel 3.1 aufgeführte Laufroboter denkbar.

- Ein anderer Ansatz könnte darin bestehen, die Pflanzen so abzuordnen, dass kleinere Roboter zwischen den Reihen fahren können. Denkbar wäre es z. B., dass zwischen einzelnen Reihen etwas größere Abstände gewählt werden und durch Kompensationseffekte dadurch entstehende Ertragsverluste ausgeglichen werden können. Alternativ ist zu prüfen, ob Getreide mit Reihenkulturen im Streifenanbau kombiniert werden könnten, um dann von den Reihenkulturen aus in die Getreidebestände eingreifen zu können.
- Aus bisherigen Pflanzenbauversuchen wird deutlich, dass die Düngerausbringung auf der Bodenoberfläche vergleichsweise ineffizient ist (vgl. Kapitel 3.2.2.2). Vor diesem Hintergrund sind Konzepte zu entwickeln, die den Dünger unmittelbar in den Boden einbringen.

Organische Düngerausbringung

Die Ausbringung organischer Dünger mit Kleinmaschinen wurde im Rahmen dieses Projektes ausgeklammert und ist bisher auch nicht in anderen Untersuchungen behandelt worden. Für die organische Düngung steigen die Anforderungen für Kleinmaschinen nochmals erheblich an, weil organische Dünger in ihren Eigenschaften sehr heterogen sind (unterschiedliche Nährstoff- und Feststoffgehalte). Zwei erste in Anhang 5 abgebildete Ansätze würden eine Vorbehandlung des organischen Düngers erfordern.

Die Bewertung der entwickelten Konzepte hinsichtlich des Energiebedarfs hat keine relevanten Vorteile gegenüber der Großtechnik ergeben. Dieses Ergebnis ist jedoch zu hinterfragen, da nach den Naturgesetzen das Volumen und bei gleichbleibenden Materialien auch das Gewicht von Körpern in der dritten Potenz wächst, die Aufstandsfläche hingegen lediglich in der zweiten Potenz. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass kleinere Maschinen eine überproportional größere Aufstandsfläche haben, was den Bodendruck verringert und zu weniger Rollwiderstand führen müsste. Ursache für die im Rahmen dieser Studie ermittelten geringen Energieeinsparungen von Kleinmaschinen dürfte darin liegen, dass für die Berechnung des Rollwiderstandes nach Schreiber (2006) unabhängig vom Maschinengewicht konstante Rollwiderstandsbeiwerte unterstellt wurden. In der Realität sollten kleinere Maschinen jedoch weniger Verdichtungsarbeit auf dem Boden verrichten müssen, so dass sich ein geringerer Rollwiderstandsbeiwert ergibt. In umfangreicheren Berechnungsverfahren wird dies heute berücksichtigt und ergibt einen 20 bis 30 % geringeren Energiebedarf.

Mit Blick auf die betriebswirtschaftlichen Berechnungen hat sich gezeigt, dass eine Mechanisierung mit autonomer Kleintechnik im Bereich der Wettbewerbsfähigkeit von heutigen Verfahren liegen kann. Die höchsten Hürden für die Wirtschaftlichkeit liegen derzeit in den Kosten für die exakte Navigation (RTK-Lizenzen, Sensor) sowie für die Kommunikation und Batterietechnik. Für die exakte Navigation wird bereits mittelfristig mit deutlichen Kostensenkungspotenzialen gerechnet. Die im Rahmen der Kalkulationen unterstellten Kostendegressionen für die Batterietechnologie sind hingegen als langfristige Perspektive zu interpretieren. Mittelfristig werden die

Kosten hier deutlich höher bleiben, da das technologische Know-how in wenigen führenden Unternehmen gebündelt ist. Nur wenn im Rahmen der E-Mobilität die Batterieforschung global ausgebaut wird, erscheinen die unterstellten Kostendegressionen erreichbar.

Im Rahmen des Projektes wurde die gesamte Verfahrenskette des Weizenanbaus mit Kleintechnik konzipiert und ökonomisch bewertet. Sofern es gelingt, über eine modulare Bauweise einzelne Komponenten, wie z. B. Antriebsaggregate oder Energiespeicher auch in den Verfahrensketten der anderen Kulturen einzusetzen, dürfte sich auf betrieblicher Ebene ein weiteres Kostensenkungspotenzial ergeben. Daher sollte in künftigen Arbeiten überprüft werden, inwiefern derartige modulare Ansätze realisiert werden können.

Insgesamt sind die durchgeführten Kostenabschätzungen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, so dass eine Weiterentwicklung des Verfahrens notwendig ist. Dabei ist zu prüfen, inwiefern Erfahrungen zu Kostendegressionen aus anderen Bereichen, wie beispielsweise der IT-Branche auf autonome Kleinmaschinen übertragbar sind. Darüber hinaus wird es in zukünftigen Projekten wichtig sein, auch die pflanzenbaulichen Vorteile der Kleintechnik ökonomisch zu quantifizieren. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass eindeutigere Ergebnisse und Einschätzungen zu den pflanzenbaulichen Effekten gewonnen werden.

4 Gesamtfazit und zukünftiger Forschungsbedarf

Abschließend werden die wesentlichen sich aus dem Projekt ergebenden Schlussfolgerungen abgeleitet und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

Beim Vergleich der Szenarien von autonomer Groß- und Kleintechnik wurde deutlich, dass die Vorteile für eine autonome Großtechnik vergleichsweise gering sind. Aufgrund der einzusparenden Lohnkosten sinken die Gesamtkosten lediglich um 3 %. Hinzu kommt, dass bei einer elektronischen Deichsel kleinere Pflegeschlepper mit schmalere Geräten in der Bodenbearbeitung eingesetzt werden könnten und hier die größeren Schlepper ersetzen könnten. Auf diese Weise würde die Auslastung der Schlepper steigen. Auch die Herstellungskosten der Maschinen können aufgrund einfacherer Kabinenausführungen um etwa 8 % gesenkt werden. Ein erheblicher Nachteil für autonome Großmaschinen besteht in dem höheren Haftungsrisiko. Dieser Nachteil wird auch bestehen bleiben, wenn künftig bessere Sensoren für die Umfelderkennung verfügbar sind. Ursache ist, dass Großmaschinen aufgrund ihres Gewichtes unabhängig der Eintrittswahrscheinlichkeit ein hohes Gefährdungspotenzial haben.

Die Kleintechnik hat dagegen das Potenzial, Ackerbausysteme mit weniger negativen Umweltauswirkungen und einer nachhaltigen Steigerung der Erträge zu ermöglichen (vgl. Kapitel 3.4). Hiervon würde der ökologische Landbau in besonderem Maße profitieren, da er weder Pflanzenschutzmittel noch synthetische Düngemittel einsetzen kann. Hinzu kommt, dass mit der Kleintechnik viele Ansätze des ökologischen Landbaus (mechanische Unkrautbekämpfung, Kombination von Pflanzen) in den konventionellen Landbau übertragen werden. Damit besteht die Chance, einen Ackerbau mit weniger Auswirkungen auf die Umwelt zu etablieren.

Darüber hinaus wurden weitere systematische Vorteile der autonomen Kleintechnik im Rahmen des Projektes identifiziert:

- geringerer Energiebedarf aufgrund eines geringeren Rollwiderstandes;
- geringere Bodenverdichtung aufgrund einer größeren Aufstandsfläche im Vergleich zum Gewicht;
- geringeres Ausfallrisiko, da die übrigen Roboter weiterarbeiten, wenn eine Maschine ausfällt;
- Möglichkeit zur optimalen Anpassung der Maschinenanzahl an die Betriebsgröße;
- bessere Möglichkeiten, die Elektrifizierung in der Landtechnik zu realisieren, weil die hohen Energiebedarfe insbesondere für die Ernte und Bodenbearbeitung auf mehrere Maschinen verteilt werden können.

Viele im Rahmen des Projektes angeführte pflanzenbauliche Vorteile der Kleintechnik, die sich aus einer höheren Präzision in der Aussaat und Pflege ergeben (optimaler Standraum, Precision Farming), können grundsätzlich auch mit der Großtechnik erreicht werden. Der systematische Vorteil der Kleintechnik liegt vor allem darin, dass kleinräumig eine höhere Biodiversität auf dem

Acker möglich wird. Dieser Umstand verdeutlicht, wie entscheidend es für künftige Investitionen in die Kleintechnik sein wird, pflanzenbaulich zu klären, in welcher Form die Pflanzen optimal auf dem Acker angeordnet werden sollten und welche konkreten Vorteile sich aus einer höheren Biodiversität auf dem Acker ergeben.

Bisher konzentriert sich die Forschung im Bereich autonomer Kleinmaschinen auf Einzellösungen, die nicht ausreichen werden, um die zuvor genannten ökologischen Vorteile zu realisieren. Hierfür ist künftig auf eine stärkere Vernetzung der Insellösungen zu achten und die gesamte Verfahrenskette zu berücksichtigen.

Eines der Kernziele des Projektes lag darin, Forschungsfragen für die künftige Gestaltung des Forschungsfeldes abzuleiten. Es konnten zahlreiche Fragestellungen identifiziert werden, die im Rahmen des Projektes nicht beantwortet werden konnten, aber für die künftige Weiterentwicklung der Forschung im Bereich autonomer Kleinmaschinen bedeutend sind. Nachfolgend werden diese Fragen aufgeführt. Dabei wird zwischen Fragen mit technologischem, pflanzenbaulichem sowie ökonomischem Schwerpunkt unterschieden.

Pflanzenbauliche Fragestellungen

(1) Optimaler Standraum

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass ein optimierter Standraum von Pflanzen in ein höheres Ertragspotenzial mündet. Nach einigen Versuchen werden Ertragssteigerungen von etwa 5 % erwartet (Demmel et al. 2000). Erfahrungen aus dem Maisanbau in der Praxis konnten diese Erwartungen jedoch nur zum Teil bestätigen. Das theoretische Potenzial des optimalen Standraums kann oftmals nicht ausgenutzt werden, da in der Züchtung auf Basis des bisherigen Reihenabstandes selektiert wurde. In der Folge haben sich Sorten durchgesetzt, die aufgrund ihrer Blattstellung optimale Erträge bei den heute üblichen Reihenabständen erzielen. Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, inwiefern an optimale Standräume angepasste Sorten gezüchtet werden können, um die potenziellen Vorteile des optimalen Standraums besser nutzen zu können.

(2) Ideale Pflanzenkombinationen

Der wesentliche Vorteil von Kleinmaschinen liegt darin, dass sie es grundsätzlich ermöglichen, Pflanzen anders anzuordnen, kleinräumig zu variieren und miteinander zu kombinieren. Zwar finden sich in der Literatur zahlreiche Hinweise auf die ökologischen Vorteile einer höheren Biodiversität auf dem Acker. Hierzu zählen ein höheres Insektenaufkommen, eine höhere Ertragsstabilität sowie eine bessere Ausnutzung der Nährstoffe und der Sonneneinstrahlung. Allerdings gibt es kaum Untersuchungen, in denen die ackerbaulichen Vorteile anhand der Hauptackerkulturen quantifiziert werden. Im Rahmen des Begleitkreises wurde von Seiten der Praxis kritisch angemerkt, dass auch negative Effekte auftreten können, wenn Pflanzen miteinander kombiniert werden. Vor diesem Hintergrund sind die Synergieeffekte einer höheren Biodiversität an Ackerkulturen zu quantifizieren und die idealen Kombinationspartner zu identifizieren. Dabei ist zu

prüfen, inwiefern neben den klassischen Ackerkulturen auch andere Pflanzen, wie Bäume zur Beschattung und zum Erosionsschutz, eingesetzt werden können.

(3) Vegetationsperiode besser ausnutzen?

In heutigen Anbauverfahren werden die meisten Kulturen im August geerntet. Danach werden zum Teil noch Zwischenfrüchte für die Gründüngung angebaut. Insgesamt wird die im Herbst einstrahlende Sonnenergie jedoch kaum in nutzbaren Ertrag umgesetzt. Daher stellt sich die Frage, ob mit autonomen Kleinrobotern die Vegetationsperiode bis Anfang November besser ausgenutzt werden kann.

(4) Pflanzgut aus dem Anzucht-Beet?

In den Produktionssystemen Asiens werden oftmals Pflanzen wie Raps, Mais oder Reis in kleinen Beeten vorgezogen und dann ins Feld umgepflanzt. Auf diese Weise kann die Vegetationsperiode auf der vorhandenen Fläche besser ausgenutzt werden. Es stellt sich die Frage, inwiefern derartige Ansätze auf autonome Kleinmaschinen übertragen werden können, wenn die Lohnkosten für die Arbeit keine Rolle mehr spielen.

(5) Krankheiten im Keim ersticken

Wenn Krankheiten frühzeitig erkannt und lokal gekämpft werden, kann der Pflanzenschutzmitteleinsatz deutlich reduziert werden, was wiederum positive Ertragseffekte mit sich bringt, weil die Kulturpflanze ebenfalls weniger gehemmt wird. Um die erforderliche Schlagkraft autonomer Kleinmaschinen bzw. die Anzahl erforderlicher Roboter abzuschätzen, wäre es hilfreich, die Verbreitungsdynamik verschiedener Krankheitserreger in unterschiedlichen Kulturen zu simulieren. Weiterhin sind Verfahren zu entwickeln, mit denen das Aufkommen von Krankheitserregern im gesamten Feld überwacht werden kann.

Technologische Fragestellungen

(1) Was ist die richtige Maschinengröße (2 kg, 50 kg oder 500 kg)?

Die Frage zur richtigen Maschinengröße hat das Projekt bis zum Ende begleitet und konnte nicht-allgemeingültig beantwortet werden. Im Rahmen des Projektes wurde die Maschinengröße vorrangig aus den pflanzenbaulichen Anforderungen abgeleitet (vgl. Kapitel 3.2.2). Für einige der entwickelten Konzepte, insbesondere der Pflege in Getreide bestehen aber Zweifel hinsichtlich der Praxistauglichkeit. Für die Weiterentwicklung der Systeme ist eine enge Kooperation mit dem Pflanzenbau notwendig, um zu klären, ob Pflanzen auch anders angeordnet werden können, so dass etwas größere Maschinen eingesetzt werden können.

(2) Geräteträger oder Alleskönner?

Auf einzelbetrieblicher Ebene können die Kosten der Systeme verringert werden, wenn einzelne Bauteile (Batterien, Antriebe, Laufwerke) in verschiedenen Verfahren eingesetzt werden können. Hierfür wurde ein modulares Konzept entwickelt (vgl. Kapitel 3.2). Darunter leidet jedoch die spezifische Eignung der Maschine für bestimmte Tätigkeiten. Wenn die Antriebseinheiten nach den

Anforderungen der Bodenbearbeitung und Ernte ausgerichtet werden, sind sie für den Einsatz in der Pflege völlig überdimensioniert. Inwiefern modulare Teile in verschiedenen Verfahren eingesetzt werden können, könnte künftig im Rahmen von Simulationen analysiert werden.

(3) Wie sehen Übergangsszenarien aus?

Die Fragestellung zu möglichen Übergangsszenarien schließt an die zuvor aufgeführten Fragestellungen an. Da es vermutlich keine disruptive Umwandlung des Pflanzenbausystems geben wird, hängt die Verbreitung von autonomen Kleinmaschinen wesentlich davon ab, wie sie sich in bestehende Pflanzenbausysteme integrieren können. Die bisherigen Forschungsaktivitäten deuten darauf hin, dass die ersten Einführungen im Bereich Aussaat und mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen erfolgen werden. Es ist aber offen, wie sich diese Konzepte auf Kulturen mit geringerem Reihenabstand übertragen lassen. Hierfür ist pflanzenbaulich zu prüfen, inwiefern unter Berücksichtigung des optimalen Standraums heute in Drillsaat ausgesäte Kulturen anders angeordnet werden können. Diese Informationen wären sowohl für große Hersteller von Landmaschinen, als auch für kleinere Unternehmen für die Aufstellung von Geschäftsmodellen interessant.

(4) Wie kann eine präzise Ortung erfolgen und umgesetzt werden?

Die präzise Ortung mittels RTK-GPS stellt auch heute schon einen wesentlichen Baustein von Assistenzsystemen in der Landtechnik dar. Wenn in Zukunft kleine Maschinen noch enger an den Pflanzen arbeiten sollen, ist eine präzise Ortung die Grundvoraussetzung. Dem stehen jedoch zum einen die hohen Kosten derzeit verfügbarer Ortungssysteme gegenüber. Weiterhin ist grundsätzlich fraglich, inwiefern die heutigen Korrektursignale auch bei der Arbeit von kleinen Robotern im Bestand noch zuverlässig zur Verfügung stehen. Daher ist zu prüfen, welche zusätzliche Sensorik auf dem Feld zur Sensordatenfusion genutzt werden kann. Weiterhin muss die Präzision auch durch Fahrzeuge und Werkzeuge an den Pflanzen oder im Bestand umgesetzt werden. In diesem Punkt grenzen sich Agrarroboter von der Vielzahl anderer Serviceroboter ab. Während bei Agrarrobotern in erster Linie der Arbeitsprozess im Vordergrund steht und das Fahren eher Mittel zum Zweck ist, steht bei anderen Anwendungen (Social Robotics, Exploration in Katastrophenszenarien) vor allem das Fahren im Vordergrund.

(5) Welche infrastrukturellen Voraussetzungen müssen geschaffen werden?

Es ist davon auszugehen, dass sich die künftig erwartete Elektrifizierung der Mobilität auch auf die Landwirtschaft auswirken wird. Heute können durch die hohe Energiedichte des Dieselmotors auch leistungsstarke Maschinen die erforderliche Energiemenge für einen Arbeitstag mit sich führen. Für elektrische Antriebe energieintensiver Prozesse, wie der Ernte, ist jedoch eine Stromversorgung in der Nähe des Feldes erforderlich. Dazu sind infrastrukturelle Voraussetzungen für den Energietransport zum Feld und für den Transfer zur Maschine zu schaffen. Während für eine Direktversorgung der Maschine völlig neuartige Konzepte zu entwickeln sind, kann für die indirekte Versorgung mit Batterien an die aktuellen Projekte der Elektromobilität im Individualverkehr angeknüpft werden.

(6) Welche Rechtsvorschriften für Sicherheit und Haftung müssen geschaffen werden?

Wie schon in Kapitel 2.4 beschrieben, besteht wesentlicher Forschungsbedarf in der Sicherheits- und Haftungsfrage für die Entwicklung praxisrelevanter Regelwerke. Dazu sollten Forschungsstellen, die sich mit der Schnittstelle zwischen Recht und autonomer Technik beschäftigen, in diese Entwicklung einbezogen werden. Kleine Maschinen (< 100 kg) werden in der Praxis zwar auch nach aktuellen Regelwerken unkritisch gesehen. Jedoch wurde in der Konzeptionierung der Kleintechnik deutlich, dass wesentlich schwerere Maschinen entstehen, sobald höhere Leistungen notwendig werden.

(7) Wie sehen bodenschonende Fahrwerke für die Kleintechnik aus?

Für die konzipierten Kleinmaschinen ist der Bodendruck deutlich geringer, da sich das Verhältnis zwischen Aufstandsfläche und Maschinengewicht vergrößert. Dafür wird aber, vor allem bei den kleinen Pflegerobotern ein wesentlich größerer Anteil des Bodens überrollt. Es stellt sich die Frage, wie sich die häufigeren Überrollungen mit weniger Bodendruck auf das Bodengefüge auswirken und wie die Fahrwerke konzipiert werden müssen, um negative Effekte möglichst auszuklammern.

(8) Wie können Daten und Algorithmen für autonome Kleinmaschinen genutzt werden?

Es ist zu prüfen, inwiefern die derzeitigen Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung für die Optimierung der Robotersysteme genutzt werden können. Hierunter fällt zum Beispiel eine Optimierung der Zusammenarbeit von verschiedenen Robotern (Routenoptimierung, Fahrplanung) als auch die Überwachung der Pflanzenbestände. Hierfür sind Konzepte der Datenstruktur, der Datenablage und der Datenübertragung zu entwickeln, die an die Größe der Maschinen und den Umweltbedingungen auf dem Acker angepasst sind.

Ökonomische Fragestellungen

(1) Wie sind die vorherigen Fragen betriebswirtschaftlich zu bewerten?

Die zuvor aufgeworfenen Fragestellungen sollten betriebswirtschaftlich begleitet werden. Dabei ist es nicht zielführend, jeden Entwicklungsansatz direkt hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit zu heutigen Verfahren zu überprüfen. Dies würde die für die technologische Entwicklung erforderliche Kreativität zu sehr einschränken. Vielmehr steht im Vordergrund, die für die Wirtschaftlichkeit entscheidenden Stellschrauben zu identifizieren, um für die Weiterentwicklung der Konzepte die richtigen Weichenstellungen vorzunehmen. Eine weitere Hauptaufgabe der Betriebswirtschaft besteht darin, den gesamtbetrieblichen Kontext zu wahren und zu prüfen, inwiefern die technologischen Entwicklungen in den Betriebsablauf integriert werden können.

(2) Was kostet die Kleintechnik?

Im Rahmen des Projektes wurden die Kosten künftiger Maschinen in einem ersten Ansatz abgeschätzt. Allerdings sind die durchgeführten Kostenabschätzungen mit erheblichen Unsicherheiten aufgrund weitreichender Annahmen verbunden. Daher ist die Kostenabschätzung für autonome Kleinmaschinen künftig weiterzuentwickeln. Hierbei ist zu prüfen, inwiefern Kostensenkungspo-

tenziale hinsichtlich der Materialkosten gegenüber Großmaschinen durch die Verwendung einfacherer Materialien erreicht werden können. Weiterhin ist zu prüfen, welche Kostendegressionen für heute kritische Komponenten (Navigation, Batterie, Kommunikation) zu erwarten sind und welche Betriebsmitteleinsparungen (v.a. Energie) sich gegenüber der Großtechnik ergeben.

(3) Wie verändern sich die Feldarbeitszeiten für autonome Kleinroboter?

Für die Wirtschaftlichkeit der Maschinen ist die erforderliche Schlagkraft eine entscheidende Einflussgröße, weil sie die Anzahl erforderlicher Maschinen vorgibt. Die erforderliche Schlagkraft wird wiederum wesentlich durch die verfügbaren Feldarbeitstage bestimmt. Es besteht jedoch Unsicherheit, wie sich die verfügbaren Feldarbeitstage beim Einsatz von Kleinmaschinen verändern. Für mehr Feldarbeitstage spricht, dass die Maschinen deutlich leichter sind und weniger Bodendruck erzeugen. Dem steht jedoch gegenüber, dass die Maschinen deutlich häufiger über das Feld fahren müssen und es zu Verdichtungen im Oberboden kommen kann. Somit sind Versuchskonzepte erforderlich, mit denen die verfügbaren Feldarbeitstage für Kleinmaschinen besser abgeschätzt werden können.

(4) Wie viele Maschinen sind für verschiedene Fruchtarten-Kombinationen erforderlich?

Auf einzelbetrieblicher Ebene ergibt sich ein erhebliches Kosteneinsparpotenzial, wenn die Maschinen oder einzelne Komponenten der Maschinen in verschiedenen Verfahren und Kulturen eingesetzt werden können. Daher stellt sich die Frage, bei welchen Kulturkombinationen sich die beste Auslastung der Maschinen bzw. der einzelnen Module ergeben.

(5) Wie sieht der künftige Bauernhof aus?

Wenn sich autonome Kleinmaschinen etablieren sollten, verändern sich die Anforderungen an die Infrastruktur sowie an das Betriebsmanagement. Daher ist frühzeitig zu prüfen, welche infrastrukturellen Voraussetzungen notwendig sind und wie diese kostengünstig zu erreichen sind. Für das Betriebsmanagement ist vor allem die Frage zu klären, wie die Kleinmaschinen koordiniert werden können und wie die Einsatzplanung erfolgen kann. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die bisher üblichen Geschäftsmodelle auch für autonome Kleinmaschinen geeignet sind. Statt wie bisher eine Maschine zu kaufen, sind auch andere Organisationsformen, wie der Einkauf der Dienstleistung denkbar.

(6) Wie ist die Akzeptanz für Kleinmaschinen bei Landwirten und in der Gesellschaft?

Trotz aller potenziellen Vorteile der autonomen Kleintechnik ist die Akzeptanz der Landwirte und der Gesellschaft eine entscheidende Voraussetzung, dass sich derartige Systeme etablieren können. Daher sind neben betriebswirtschaftlichen Analysen (Arbeitserledigungskosten, Gewinn) sozialwissenschaftliche Bewertungsansätze gefordert, um frühzeitig Hürden für die künftige Akzeptanz zu identifizieren.

Literaturverzeichnis

- AGCO/Fendt (Hrsg.) (2011) one Gold Medal, two Silver Medals at Agritechnica 2011. Online verfügbar unter <http://blog.agcocorp.com/2011/11/fendt-one-gold-medal-two-silver-medals-at-agritechnica-2011/>, zuletzt geprüft am 03.08.2017
- AGCO/Fendt (Hrsg.) (2017) Projekt MARS: Forschung im Bereich Agrarrobotik. Online verfügbar unter <http://www.fendt.com/de/15195.html>, zuletzt aktualisiert am 07.08.2017
- Ahlers F, Nissen H J (2013) AEF ISOBUS Automation. In: Land-Technik, AgEng 2013 - components and systems for better solutions. Conference: Agricultural Engineering, Hannover 8. und 9. November 2013. Conference Agricultural Engineering; Tagung Land-Technik AgEng; AgEng. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2193, Buch)
- Altieri M A, Letourneau D K (1982) Vegetation management and biological control in agroecosystems. In: *Crop Protection* 1 (4)
- Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2017a) Technische Daten KE, KX, KG. Online verfügbar unter <http://info.amazone.de/DisplayImage.aspx?x=1200&y=1600&id=31713&format=&vergroessern=&thumb=1&page=last>, zuletzt geprüft am 07.08.2017
- Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2017b) ZA-TS mit Argus Twin. Online verfügbar unter <http://www.amazone.de/4764.asp>, zuletzt geprüft am 21.08.2017
- Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2017c) Zentrifugalstreuer ZA-M Profis. Online verfügbar unter <http://www.amazone.de/26.asp>, zuletzt geprüft am 22.08.2017
- Arvidsson J, Håkansson I (2014) Response of different crops to soil compaction – Short-term effects in Swedish field experiments. In: *Soil & Tillage Research* (138), S. 56–63
- ASAE Standard, Februar 2003: ASAE D497.4 FEB03 - Agricultural Machinery Management Data
- Bac C W, van Henten E J, Hemming J, Edan Y (2014) Harvesting Robots for High-value Crops. State-of-the-art Review and Challenges Ahead. In: *J. Field Robotics* 31 (6), S. 888–911. DOI: 10.1002/rob.21525
- Bangert W, Kielhorn A, Rahe F, Albert A, Biber P, Grzonka S et al. (2013) Field-Robot-Based Agriculture: "RemoteFarming.1" and "BoniRob-Apps". In: Land-Technik, AgEng 2013 - components and systems for better solutions. Conference: Agricultural Engineering, Hannover 8. und 9. November 2013. Conference Agricultural Engineering; Tagung Land-Technik AgEng; AgEng. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2193, Buch)
- Bartels F (2016) Konzeptionierung kleiner mobiler Roboter für die Bodenbearbeitung. Masterarbeit. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
- Bauer B, Breunig P (2017a) Current developments in digital agriculture. agri benchmark Cash Crop Conference 2017. global networks, Berlin
- Bauer B, Breunig P (2017b) Pflanzenbauliche Ansätze für neue Produktionssysteme. Unter Mitarbeit von Thomas de Witte, Cord-Christian Gaus und Till-Fabian Minßen, Triesdorf
- BayWa (2017) Düsenpreis. Online verfügbar unter https://www.baywa.de/shop/produkte/gartenlandschaftsbau/pflanzenschutz/ersatzteile-zubehoer/duesen/birchmeier-flachstrahlduese-xr-8002-vs-p2614888/birchmeier-flachstrahlduese-xr-8002-vs-2614889?gclid=CjwKEAjw5_vHBRcBtt2NqqCDjiESJABD5rCJ68zqqyFD711PzpjClXrK-EMsfFaxYim-PQsAMRSBhBoCTHDw_wcB, zuletzt geprüft am 18.10.2017

- Beratung und Information für den süddeutschen Zuckerrübenbau (BISZ) (2016) Minderertrag durch Fahrgassen – Zuckerrüben. Online verfügbar unter <https://bisz.suedzucker.de/anbau/fahrgassen-im-zuckerruebenanbau/>, zuletzt geprüft am 13.10.2017
- Bethlehem S (2017) Entwicklung eines elektromechanischen Fahrwerks für ein modulares Roboterkonzept. Masterarbeit. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
- Bittner W (2014) Flugmechanik der Hubschrauber. Technologie, das flugdynamische System Hubschrauber, Flugstabilitäten, Steuerbarkeit, 4. Auflage, Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch)
- Blackmore S, Fountas S, Have H (2004a) System Requirements For a Small Autonomous Tractor. In: CIGR (Hrsg.): Agricultural Engineering International: CIGR Journal (Volume VI)
- Blackmore S, Griepentrog H W, Nielsen H, Nørremark M, Resting-Jepesen J (2004b) Development of a Deterministic Autonomous Tractor. CIGR International Conference, Beijing, China
- Blume T, Hanke S, Minßen T F, Kemper S, Schattenberg J, Schmiemann J et al. (2016) Innovationen und Highlights der Agritechnica 2015. In: *Mobile Maschinen* 01 und 02
- Blume T, Schattenberg J, Frerichs L (2015) Innovative Assistance Systems based on a Backward-Looking 3D-Time of Flight Camera. In: Land-Technik AgEng 2015. 73rd International Conference on Agricultural Engineering, 06.-07. November 2015, Hannover ; innovations in agricultural engineering for efficient farming. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Wissensforum, 2251, CD-ROM)
- Bosch (Hrsg.) (2017) Bosch Indego. Online verfügbar unter <https://www.bosch-garden.com/de/de/bosch-gartengerate/indego-help.jsp>, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Boston Dynamics (Hrsg.) (2017) BigDog. Online verfügbar unter <https://www.bostondynamics.com/bigdog>, zuletzt geprüft am 2017
- Brunotte J, Vorderbrügge T, Nolting K, Sommer C (2011) Teil IV: Ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. In: *Landbauforschung* (61), S. 51–70. Online verfügbar unter http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dn048091.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2017
- Case IHC (Hrsg.) (2017) Case IH Reveals New Tagline, New Focus and a New Autonomous Concept Vehicle. Online verfügbar unter https://www.caseih.com/northamerica/en-us/News/Pages/Case_IH_News_Release_Case_IH_Reveals_New_Tagline_New_Focus_and_a_New_Autonomous_Concept_Vehicle.aspx, zuletzt geprüft am 31.07.2017
- Chamen W C T (2014) Controlled Traffic Farming – from research to adoption in northern Europe and its future prospects. In: EurAgEng (Hrsg.): Proceedings International Conference of Agricultural Engineering 2014
- Chamen W C T, Dowler D, Leede P R, Longstaff D J (1994) Design, Operation and Performance of a Gantry System. Experience in Arable Cropping. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* 59 (1), S. 45–60. DOI: 10.1006/jaer.1994.1063
- Compleks Robotech (Hrsg.) (2013) NEW AUTOMATED AGRICULTURAL PLATFORM – KONGSKILDE VIBRO CROP ROBOTTI. Online verfügbar unter <http://conpleks.com/robotech/new-automated-agricultural-platform-kongskilde-vibro-crop-robotti/?lang=en>, zuletzt geprüft am 23.08.2017
- Demmel M, Hahnenkamm O, Kormann G, Peterreins M (2000) Gleichstandsamt bei Silomais. Ergebnisse aus zwei Versuchsjahren. In: *Landtechnik* 55 (3), 210–211, zuletzt geprüft am 20.10.2017
- DFKI GmbH (Hrsg.) (2013) marion - Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten. Online verfügbar unter <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/marion.html>, zuletzt geprüft am 22.08.2017

- DJI (Hrsg.) (2017) Agras MG-1S. Online verfügbar unter <http://www.dji.com/de/mg-1s>, zuletzt geprüft am 25.08.2017
- DLG (Hrsg.) (2011) Agritechnica 2011: Zwei Goldmedaillen und 39 Silbermedaillen für Neuheiten. Online verfügbar unter http://www.dlg.org/aktuell_landwirtschaft.html?&wb=%2FpublicArtikelDetail.do&artikelId=4585&kategorieId=1&spracheId=1&sub=2015dlg, zuletzt geprüft am 03.08.2017
- DLG (Hrsg.) (2015) Goldmedaillen Agritechnica 2015 - AmaSpot. Online verfügbar unter <https://www.agritechnica.com/de/innovation-award/neuheiten-2015/>, zuletzt geprüft am 03.08.2017
- Dörfler J (1992) Die Landwirtschaft. Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen. 10., neubearb. Aufl. München: BLV [u.a.]
- Duffer R (2016) Electric Vehicles. Online verfügbar unter <http://www.chicagotribune.com/classified/auto/motive/fuefficient/ct-electric-vehicles-competition-model-3-20160401-story.html>, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- ecoRobotix AG (Hrsg.) (2017) Gezielter Herbizideinsatz mit einem autonomen Roboter. Online verfügbar unter https://www.ecorobotix.com/wp-content/uploads/2017/02/ALL_ECOX_FlyerPres-2.pdf, zuletzt geprüft am 25.08.2017
- Edwards W (2015) Estimating Farm Machinery Costs. Online verfügbar unter <https://www.extension.iastate.edu/agdm/crops/pdf/a3-29.pdf>, zuletzt geprüft am 29.09.2017
- Engel T (2016) Kosteneinsparung durch den Verzicht der Kabine. Expertengespräch mit Thomas Engel, John Deere
- European Commission (Hrsg.) (2014) Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management. Online verfügbar unter <http://www.rhea-project.eu/index.php>, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Fendt (2017) Bildergalerie: Fendt 900 Vario. Online verfügbar unter <http://www.fendt.com/de/15162.html>, zuletzt geprüft am 27.10.2017
- Franklin Robotics (Hrsg.) (2017) Tertill Robot. Online verfügbar unter <http://www.franklinrobotics.com/>, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Frerichs L (2017) Produktpreisabschätzung Feldroboter. Braunschweig, an Erweiterter Projektkreis –Neue Pflanzenbausysteme mit autonomen Landmaschinen
- Frerichs L, Thielke L (2014) Neue Konzepte der Energieversorgung landtechnischer Systeme. In: Conference Agricultural Engineering. Land.Technik 2014; Agrartechnik im Dialog mit Politik und Gesellschaft. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2226)
- Frese C, Frey C, Meßmer F, Pfeiffer K, Sander S, Di Marco D et al. (2015) AgriApps – An App-based Solution for Field-Robot-Based Agriculture. In: Land-Technik AgEng 2015. 73rd International Conference on Agricultural Engineering, 06.-07. November 2015, Hannover ; innovations in agricultural engineering for efficient farming. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Wissensforum, 2251, CD-ROM)
- Freye T, Heidjann F (1984) Gebrauchswertverbesserung an Mähdreschern. In: CIGR (Hrsg.): Proceedings of the 10th CIGR Congress. Budapest
- Garibaldi L A, Steffan-Dewenter I, Winfree R, Aizen M A, Bommarco R, Cunningham S A et al. (2013) Wild Pollinators Enhance Fruit Set of Crops Regardless of Honey Bee Abundance. In: *Science* 339, S. 1608–1611, zuletzt geprüft am 18.10.2017

- Gaus C C, Minßen T F, Urso L M (2017) Ergebnisprotokoll des 2.Fachbeirat "Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen". Braunschweig
- Gaus C C (2017a) Zeitfenster für heutige Düngefenster. Interview mit Christoph Schulze-Lammers
- Gaus C C (2017b) Economics of mechanical weeding by a swarm of small field robots. 57. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften e. V.: Agrar- und Ernährungswirtschaft zwischen Ressourceneffizienz und gesellschaftlichen Erwartungen. Freising, 14.09.2017
- Geoprospectors GmbH (Hrsg.) TOPSOIL MAPPER - Allgemeines Funktionsprinzip. Online verfügbar unter http://www.geoprospectors.com/de/produkte-leistungen/landwirtschaft/index.php?rex_media_type=gp_download&rex_media_file=wp1_allg_funktionsprinzip.pdf, zuletzt geprüft am 04.10.2017
- Goense D (2003) The economics of autonomous vehicles. In: VDI-Max-Eyth-Gesellschaft (Hrsg.): Tagung Landtechnik 2003. Agricultural Engineering, Hannover, 07.-08. November 2003, Düsseldorf: VDI Verlag, S. 283–290
- Griepentrog H W, Blackmore B S (2007) Autonomous Crop Establishment and Control System. In: Agricultural Engineering. Conference, Hannover, November 09-10, 2007. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI Berichte, 2001)
- Grimstad L, Phan H T, Pham C D, From P J (2015) Initial field-testing of Thorvald, a versatile robotic platform for agricultural applications. In: G. W. Kootstra, Yael Edan, E. J. van Henten und M. Bergerman (Hrsg.): Proceedings of the IEEE workshop on agri-food robotics, Wageningen
- Gröhn-Wittern U (2017) Das ist moderne Landwirtschaft! 1001 Möglichkeiten, 9 Milliarden Menschen zu ernähren, zuletzt geprüft am 17.10.2017
- Gurr G M, Wratten S D, Altieri A A (2004) Ecological Engineering for Pest Management. Colingwood
- Hamer W B, Verreet J A, Duttmann R (2017) Wissenschaft reformiert Schaderregerdiagnostik. Echter Mehltau und Braunrost nun sicher vorhersagbar? In: *Bauernblatt Schleswig-Holstein und Hamburg* 71 (17), S. 36, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Hartmann K, Schattenberg J, Kemper S, Thielke L, Vollmer T, Untch J et al. (2014) Beobachtungen zur Agri-technica 2013, Neuheiten der Messe bezüglich Gesamtmaschinen Prozesstechnik Assistenzsystemen. In: *Mobile Maschinen*
- Have H (2004) Effects of automation on sizes and costs of field machinery. In: Technological Intitute (Hrsg.): Engineering the future. Book of Abstract. AgEng 2004 Conference, 12.-16. September 2004. Leuven (1), S. 366–367
- Heess N, Dhruva T B, Sriram S, Lemmon J, Merel J, Wayne G et al. (2017) Emergence of Locomotion Behaviours in Rich Environments. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1707.02286v2>
- Herbst A (2016) Elektronische Systeme bei Pflanzenschutzgeräten. In: Ludger Frerichs (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2016, Braunschweig
- Herlitzius T, Grosa A, Henke M, Krzywinski J, Pahner F, Klingner M (2013) Concept Study of a Modular and Scalable Self -Propelled Implement System. In: Land-Technik, AgEng 2013 - components and systems for better solutions. Conference: Agricultural Engineering, Hannover 8. und 9. November 2013. Conference Agricultural Engineering; Tagung Land-Technik AgEng; AgEng. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2193, Buch)
- Hertzberg J, Lingemann K, Nüchter A (2012) Mobile Roboter. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

- Hoyningen-Huene M von, Rogge C B E, Hahn K (2011) Customer Benefits of Tractor Implement Automation and Electrification. In: Land, Technik, AgEng 2011 - Solutions for intelligent and sustainable farming. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2124, Buch)
- Huamaoji (2016) Angebot für Gummilaufbänder, an TU Braunschweig/Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
- Jakobsen A B (2015) Crop row navigation for autonomous field robot. Technical University of Denmark, Lyngby. Online verfügbar unter http://aut.elektro.dtu.dk/mobotware/doc/robotti/Robotti_row_follow_Aske_Bay_Jakobsen.pdf
- Jensen K, Nielsen S H, Jørgensen R N, Bøgild A, Jacobsen N J, Jørgensen O J, Jaeger-Hansen C L (2012) A low cost, modular robotics tool carrier for precision agriculture research. In: International Society of Precision Agriculture (Hrsg.): Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture. ICPA - International Conference on Precision Agriculture. Indianapolis, Indiana - USA
- Kämpfer C, Wegener J K (2017) Fachgespräch: Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen zur Applikation von Pflanzenschutzmitteln im Steillagenweinbau sowie im Wald. In: *Journal für Kulturpflanzen* 69/2017
- Kegel V, Tarasinski N (2016) Battery Electric Tractor (Energy consumption and efficiency). In: K. Berns, K. Dreßler, P. Fleischmann, R. Ilsen, B. Jörg, R. Kalmar et al. (Hrsg.): Commercial Vehicle Technology 2016. Proceedings of the 4th Commercial Vehicle Technology Symposium (CVT 2016)
- Keicher R (2017) Präsentation im Rahmen der Veranstaltung "Fachgespräch - Drohnen in der Landwirtschaft" am 2. und 3. Februar 2017 am JKI Braunschweig
- Kennedy C M, Lonsdorf E, Neel M C, Williams N M, Taylor H R, Winfree R et al. (2013) A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. In: *Ecological Letters* (16), S. 584–599. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ele.12082/epdf>, zuletzt geprüft am 17.10.2017
- Kirchgeorg M (2017) Erfahrungskurve. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9291/erfahrungskurve-v9.html>, zuletzt aktualisiert am 18.09.2017
- Knörzer H, Müller B U, Guo B, Graff-Hönninger S, Piepho H P, Wang P, Claupein W (2010) Extension and Evaluation of Intercropping Field Trials Using Spatial Models. In: *Agronomy Journal* 102 (3), S. 1023-1031
- Kremmer M, Gresch V, Braunhardt K (2015) ExactEmerge™ – Integrated High Performance Corn Planting Solution. In: Land-Technik AgEng 2015. 73rd International Conference on Agricultural Engineering, 06.-07. November 2015, Hannover ; innovations in agricultural engineering for efficient farming. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Wissensforum, 2251, CD-ROM)
- Lely (2016) Preise – Automatischer Futterschieber, Autonomer Melkstand
- Letourneau D K, Armbrrecht I, Rivera B S, Lerma J M, Carmona E J, Daza M C et al. (2011) Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. In: *Ecological Applications* 21 (1), S. 9–21. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/09-2026.1/abstract>, zuletzt ge-prüft am 27.10.2017

- Lorenz M, Brunotte J, Vorderbrügge T, Brandhuber R, Koch H J, Senger M et al. (2016) Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland. In: Thünen-Institut (Hg.): Landbauforschung Applied Agricultural and Forestry Research, 2 2016 (66), S.101-144. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/landbauforschung/Landbauforschung_Vol66_2.pdf, zuletzt geprüft am 27.10.2017
- Malézieux E Y, Crozat Y, Dupraz C, Laurans M, Makowski D, Ozier-Lafontaine H, Rapidel B, Tourdonne de S (2009) Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* (29), S. 43–62
- Mandl Stefan (2007) Honigbienen und Bestäubung bei Raps. Online verfügbar unter http://www.freunde-fachzentrum-bienen.de/help_you/Fachartikel/07-12_S07-09%2007-394%2007-369.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2017
- Maurer M, Gerdes J C, Lenz B, Winner H (2015) Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin: Springer Vieweg
- Meyer R (2005) Alternative Kulturpflanzen und Anbauverfahren. Online verfügbar unter https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/zusammenfassungen/TAB-Arbeitsbericht-ab103_Z.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2017
- Minßen T F, Gaus C C, Urso L M (2016) Systematische Anforderungen an ein autonomes Großtechnikszenario als zukünftiges Pflanzenbausystem. In: Arno Ruckelshausen, Andreas Meyer-Aurich, Thomas Rath, Guido Recke und Brigitte Theuvsen (Hrsg.): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Intelligente Systeme - Stand der Technik und neue Möglichkeiten : Referate der 36. GIL-Jahrestagung, 22.-23. Februar 2016, in Osnabrück, Germany. Bonn: Gesellschaft für Informatik (GI-Edition Lecture Notes in Informatics Proceedings, P-253)
- Mirck J, Kanzler M, Boehm C (2016) Ertragsleistung eines Energieholz-Alley-Cropping-System. 5. Forum Agroforstsysteme, Senftenberg
- Möller J, Sonnen J (2016) Data-Hub: Eine herstellerübergreifende webbasierte Datenaustausch Plattform für die Landwirtschaft und Landtechnik. In: Land-Technik 2016. Conference: Agricultural Engineering : Köln, 22. und 23. November 2016 : das Forum für agrartechnische Innovationen : mit CD-ROM. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2273)
- Naïo Technologies (Hrsg.) (2016) OZ WEEDING ROBOT. Online verfügbar unter <http://www.naio-technologies.com/en/agricultural-equipment/weeding-robot-oz/>, zuletzt geprüft am 25.08.2017
- Naïo Technologies (2016) Produktpreis und -gewicht Unkrautroboter. Unter Mitarbeit von Cord-Christian Gaus. Haßfurt
- New Holland (Hrsg.) (2017) The New Holland NHDrive concept autonomous tractor shows a vision into the future of agriculture. Online verfügbar unter <http://agriculture1.newholland.com/nar/en-us/about-us/whats-up/news-events/2016/new-holland-nh-drive-new-concept-autonomous-tractor>, zuletzt aktualisiert am 31.07.2017
- Nielsen M (2016) Preisabschätzung autonomer Großtechniksysteme, an Cord-Christian Gaus
- Nilsson N J (Hrsg.) (1984) SHAKEY THE ROBOT. SRI International Technical Report 323
- Nykvist B, Nilsson M (2015) Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles (5), S. 329–332. Online verfügbar unter <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n4/abs/nclimate2564.html?foxtrotcallback=true>, zuletzt geprüft am 18.09.2017

- Oksanen T (2015) Accuracy and Performance Experiences of Four Wheel Steered Autonomous Agricultural Tractor in Sowing Operation. In: Luis Mejias, Peter Corke und Jonathan Roberts (Hrsg.): Field and Service Robotics, Bd. 105. Cham: Springer International Publishing (Springer Tracts in Advanced Robotics), S. 425–438
- Oliver A, Kang S, Wünsche B C, MacDonald B (2012) Using the Kinect as a navigation sensor for mobile robotics. In: Brendan McCane, Steven Mills und Jeremiah Deng (Hrsg.): Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zealand - IVCNZ '12. the 27th Conference. Dunedin, New Zealand, 26.11.2012 - 28.11.2012. New York, New York, USA: ACM Press, S. 509–514
- Pedersen H H, Sørensen C G, Oudshoorn F W, Meyer R, Kjeldahl J K, Chamen W (2013) A Wide Span Tractor concept developed for efficient and. In: Land-Technik, AgEng 2013 - components and systems for better solutions. Conference: Agricultural Engineering, Hannover 8. und 9. November 2013. Conference Agricultural Engineering; Tagung Land-Technik AgEng; AgEng. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2193, Buch)
- Pedersen S M, Fountas S, Blackmore S (2007) Economic potential of robots for high value crops and landscape treatment. In: *Precision Agriculture*, S. 457–464
- Pedersen S M, Fountas S, Blackmore S (2008) Agricultural Robots – Applications and Economic Perspectives. In: Yoshihiko Takahashi (Hrsg.): Service Robot Applications. Rijeka, Shanghai: Intech, S. 369–382
- Pedersen S M, Fountas S, Have H, Blackmore S (2005) Agricultural robots: an economic feasibility study. In: *Precision Agriculture*, S. 589–596
- Pedersen S M, Fountas S, Have H, Blackmore S (2006) Agricultural robots – system analysis and economic feasibility. In: *Precision Agriculture*, S. 295–308
- Precision Makers (2015): Preis – Greenbot. Agritechnica Hannover
- QUT (Hrsg.) (2017) AgBot II Robotic Site-specific Crop and Weed Management Tool. Online verfügbar unter <https://research.qut.edu.au/digital-agriculture/projects/robot-platform-design-agbot-ii-a-new-generation-tool-for-robotic-site-specific-crop-and-weed-management/>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2017
- RadundRolle: Preise Roboterreifen. Online verfügbar unter <http://www.radundrolle.de/seiten/Felgen/Felgen.htm>, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Raghavan G S V, McKyes E, Taylor F, Richard P, Watson A (1979) The Relationship Between Machinery Traffic and Corn Yield Reductions in Successive Years. In: *Transactions of the ASAE* 22 (6), S. 1256–1259
- Rahe F, Scheufler B (2013) Optimization results from simulation and field tests for the lateral distribution of fertilizer spreader under influence of wind and stability analysis of lateral fertilizer distributions. In: Land-Technik, AgEng 2013 - components and systems for better solutions. Conference: Agricultural Engineering, Hannover 8. und 9. November 2013. Conference Agricultural Engineering; Tagung Land-Technik AgEng; AgEng. Nichtred. Ms.-Dr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2193, Buch)
- Rahimzei E, Sann K, Vogel M (2015) Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Hg. v. VDE Verband der Elektrotechnik
- Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, Playter R (2008) BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. In: *IFAC Proceedings Volumes* 41 (2), S. 10822–10825. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833

- Rauch Landmaschinenfabrik GmbH (Hrsg.) (2017a) AXIS-E 50.1 EMC+W. Online verfügbar unter <http://rauch.de/deutsch/dngerstreuer/axis-e/axis-e-50.1-emc-w/index.html>, zuletzt geprüft am 21.08.2017
- Rauch Landmaschinenfabrik GmbH (Hrsg.) (2017b) EMC: innovative Dosierelektronik für alle die mehr wollen. Online verfügbar unter <http://rauch.de/deutsch/dngerstreuer/axis-e/emc-dosier-technik.html>, zuletzt geprüft am 22.08.2017
- Reichelt (2017) Preise Roboterbauteile – Recheneinheit, Ultraschallsensoren, GPS-Sensor. Online verfügbar unter https://www.reichelt.de/?PROVID=2788&gclid=EAlaIQobChMI_Jaqtc_61gIVSJPtCh0dPAsrEAAYASAAEgLDO_D_BwE, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Reschka A, Bagschik G, Ulbrich S, Nolte M, Maurer M (2015) Ability and skill graphs for system modeling, online monitoring, and decision support for vehicle guidance systems. In: 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Seoul, South Korea, 28.06.2015 - 01.07.2015: IEEE, S. 933–939
- Robert Bosch GmbH (2017) Gartengeräte – Autonomer Rasenmäher. Online verfügbar unter <https://www.bosch-garden.com/de/de/bosch-gartengerate/indego-home.jsp>, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- RS Components GmbH (Hrsg.) (2017) SKF Elektrischer Linearantrieb mit Kugelgewindespindel 4500N, 24Vdc, 14 → 19mm/s, Hub 305mm. Motor für Höhenverstellung Aggregat. Online verfügbar unter <http://de.rs-online.com/web/p/linearantrieb/8855325/>, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- Ruckelshausen A, Biber P, Dorna M, Gremmes H, Klose R, Linz A et al. (2009) BoniRob – an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping. In: E. J. van Henten (Hrsg.): Precision agriculture '09. Papers presented at the 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen, The Netherlands, 6-8 July 2009. Wageningen: Wageningen Academic Publishers
- Rusch C, Pier M, Kolz D, Moser B (2016) Herstellerübergreifende Softwareplattform für den Maschinenservice. In: Land-Technik 2016. Conference: Agricultural Engineering : Köln, 22. und 23. November 2016 : das Forum für agrartechnische Innovationen : mit CD-ROM. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2273)
- Saga Robotics (Hrsg.) (2017) Saga Robotics Webpage. Online verfügbar unter <https://sagarobotics.com/>, zuletzt geprüft am 24.08.2017
- Sauermann W (2011) Ertragsverluste durch Fahrgassen. Winterraps: Konventionelle Hybriden und Halb-zwerghybriden im Vergleich. Online verfügbar unter http://www.lksh.de/fileadmin/user_upload/Presse/Archiv_2011/BB_2011_21.05.2011/29-33_Sauermann.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2017
- Schattenberg J, Happich G, Lang T, Götting H H (2010) Konvoi - sichere automatische Fahrzeugführung auf der Basis von Umfeldsensorik. 252–255 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 65, Nr. 4 (2010). DOI: 10.15150/lt.2010.494
- Schreiber M (2006) Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO₂-Emissionen. Dissertation. Universität Hohenheim, Hohenheim. Fakultät Agrarwissenschaften
- Schwiers G (2017) Konzeptionierung mobiler Roboter zur Dünger- und Pflanzenschutzausbringung. Masterarbeit. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
- Segler G, Freye T (1977) Vibro-pneumatische Trennung von Stroh, Korn und Spreu im Mähdrescher. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Grundlagen der Landtechnik: VDI Verlag GmbH

- Shelbourne Reynolds Engineering Ltd. (Hrsg.) (2017) Stripper Header. Online verfügbar unter http://www.shelbourne.com/3/products/1/harvesting/31_stripper-header, zuletzt geprüft am 15.08.2017
- SITIA (Hrsg.) (2017) PUMAgri, the Universal Mobile platform for Agriculture. Online verfügbar unter <http://www.sitia.fr/en/solution-innovation-en/systems-innovative/platform-pumagri/>, zuletzt geprüft am 18.10.2017
- Sommer C, Brandhuber R, Brunotte J, Buchner W (2001) 3. Vorsorge gegen Bodenverdichtungen. In: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (Hrsg.): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion. Bonn, 14-41
- Sørensen C G, Fountas S, Nash E, Pesonen L, Bochtis D, Pedersen S M et al. (2010) Conceptual model of a future farm management information system. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 72 (1), S. 37–47. DOI: 10.1016/j.compag.2010.02.003
- SPARC - The Partnership for Robotics in Europe (Hrsg.) (2017) European Robotics Forum - Workshop Digest. Online verfügbar unter <http://www.erf2017.eu/wp-content/uploads/2017/03/erf2017-digest.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2017
- Stentz A, Dima C, Wellington C, Herman H, Stager D (2002) A System for Semi-Autonomous Tractor Operations. In: *Autonomous Robots* 13 (1), S. 87–104. DOI: 10.1023/A:1015634322857
- Stiene S (2009) Multisensorfusion zur semantisch gestützten Navigation eines autonomen Assistenzroboters. Dissertation: Universität Osnabrück
- Taube F, Balmann A, Bauhus J, Birner R, Bokelmann W, Christen O et al. (2013) Novellierung der Düngeverordnung. Nährstoffüberschüsse wirksam begrenzen. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Sonderheft 219, September 2013. DOI: 10.12767/buel.v0i219.28
- Tempel B, Minßen T F (2017) Fachgespräch am Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik der TU Braunschweig zum Thema Batterietechnologie. Interview mit Fabian Röder, Braunschweig, 13.01.2017
- Tesla (2016) Preis Model S. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_DE/models/design, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- Thielmann A, Sauer A, Wietschel M (2015) Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/GRM-ESEM.pdf>, zuletzt geprüft am 18.09.2017
- Underwood J, Wendel A, Schofield B, McMurray L, Kimber R (2017) Efficient in-field plant phenomics for row-crops with an autonomous ground vehicle. In: *J. Field Robotics* 34 (6), S. 1061–1083. DOI: 10.1002/rob.21728
- Universität Hohenheim (2012) Armadillo Scout. Online verfügbar unter <https://mpt.uni-hohenheim.de/armadillo>, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- Universität Hohenheim (2016) Maschinenkosten Kalkulation. Online verfügbar unter <https://www.uni-hohenheim.de/i410a/etloes.def/makost.htm>, zuletzt geprüft am 29.09.2017
- Universität Kassel (Hrsg.) (2016) Entwicklung einer Robotik-Lösung zur Schneckenbekämpfung in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.uni-kassel.de/fb11agrар/fachgebiete-einrichtungen/agrartechnik/forschung/2016-msr-bot.html>, zuletzt geprüft am 25.08.2017
- Utz J, Buchner T (2016) Einzelkornsateinheit für mobile Agrarroboter. In: Land-Technik 2016. Conference: Agricultural Engineering : Köln, 22. und 23. November 2016 : das Forum für agrartechnische Innovationen : mit CD-ROM. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2273)

- VDMA (Hrsg.) (2015) Entwicklung von Technologien für energiesparende Antriebe Mobiler Arbeitsmaschinen. Abschlusspräsentation des Forschungsprojektes TEAM
- Verschwele A (2017a) Ausreisen, abschneiden, verschütten. In: *DLZ Agrarmagazin*, 2017 (März 2017)
- Verschwele A (2017b) Fristen für die mechanische Unkrautbekämpfung. Fachgespräch am Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland
- Volkswagen (2016a) Fahrzeugpreis – up! Online verfügbar unter https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0ahUKEwj855v2yZjOAhUrIMAKHUYMCLkQFgg8MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.volkswagen.de%2Fcontent%2Fmedialib%2Fvwd4%2Fde%2Fdialog%2Fpdf%2Fup-%2Fe-up-preisliste%2F_jcr_content%2Frenditions%2Frendition.download_attachment.file%2Fe-up_preisliste.pdf&usq=AFQjCNGBMQpR2hLdNHUTTc8uT53bYN9FHA&cad=rja, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- Volkswagen (2016b) Fahrzeugpreise Golf. Online verfügbar unter http://www.volkswagen.de/de/models/golf_7/brochure/catalogue.html, zuletzt geprüft am 19.10.2017
- Wegener J K, Urso L M, Hörsten D von, Minßen T F, Gaus C C (2017) Neue Pflanzenbausysteme entwickeln – welche innovativen Techniken werden benötigt? *LANDTECHNIK – Agricultural Engineering*, Bd. 72, Nr. 2. DOI: 10.15150/lt.2017.3156
- Werner A, Eurich-Menden B, Eckel H, Frisch J, Fritzsche S, Fröba N et al. (2016) Betriebsplanung Landwirtschaft. 2016/17. 25. Aufl. Niestetal: Silber Druck oHG
- Wiedermann A (2011) Exaktschnitt im Mährescherhäcksler. Aachen: Shaker (Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik)
- ZEPP (Hrsg.) (2015) Abstandsaufgaben sicher einhalten - automatisiert und einfach! Planen. Durchführen. Dokumentieren. Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz. Online verfügbar unter <http://www.zepp.info/projekte/36-aktuelle-projekte/188-pam-pesticide-application-manager-entscheidungsunterstuetzung-im-pflanzenschutz-auf-basis-von-gelaende-maschinen-hersteller-und-behoerendendaten>, zuletzt geprüft am 22.08.2017

Anhang

- | | |
|-----------------|--|
| Anhang 1 | Tabellen, Abbildungen und Formeln |
| Anhang 2 | Abschätzung des Energiebedarfs einer Drohne |
| Anhang 3 | Abschätzung der Antriebsleistung für einen Roboter zur Bodenbearbeitung |
| Anhang 4 | Abschätzung des Gewichts und der Größe eines Bodenbearbeitungsroboters |
| Anhang 5 | Entwurf einer Prozesseinheit für die Ausbringung organischer Dünger |

Anhang 1

Tabelle A1: Arbeitspakete

Arbeitspakete	2015			2016			2017		
	Mär-Apr	Mai-Aug	Sep-Dez	Jan-Apr	Mai-Aug	Sep-Dez	Jan-Apr	Mai-Aug	Sep-Okt
AP 1: Auswahl Produktionssystem und Standort									
AP 2: Entwicklung und Bewertung Referenzsystem									
AP 3: Entwicklung und Bewertung Autonome Großmaschinen									
AP 4: Entwicklung und Bewertung Autonome Kleinmaschinen									
AP 5: Vergleichende Bewertung, Übertragbarkeit und Diskussion									
AP 6: Forschungsbedarf und Schlussfolgerungen für den politischen Rahmen									

Tabelle A2: Teilnehmer des erweiterten Projektkreises

Name	Institution
Folkhard Isermeyer	Thünen-Institut
Joachim Brunotte	Thünen-Institut
Thomas de Witte	Thünen-Institut
Georg F. Backhaus	Julius Kühn-Institut
Jens Karl Wegener	Julius Kühn-Institut
Dieter von Hörsten	Julius Kühn-Institut
Ludger Frerichs	Technische Universität Braunschweig
Jan Schattenberg	Technische Universität Braunschweig

Tabelle A3: Inhalt von Projekttreffen und Fachgesprächen

Datum	Titel, Ort	Inhalt
29.05.2015	1. Treffen des erweiterten Projektkreises am JKI in Braunschweig	Vorstellungsrunde, Projektstruktur, Produktionssystem, Standortauswahl, Bewertungskriterien
05.08.2015	Fachgespräch mit Herrn Claus, (Landwirt) in Osterweddingen	Fruchtfolge, Silomais-Anbau, Mähdrescher-Ausstattung, Autonome Technikanwendung
08.09.2015	2. Treffen des erweiterten Projektkreises am TI	Bewertung Referenzsystem, Kommunikation des Projektes
02.11.2015	3. Treffen des erweiterten Projektkreises am IMN	Erweiterung der Bewertungsbasis, Methodik zur Szenariobeschreibung
10.11.2015	Fachgespräche auf der Agritechnica <ul style="list-style-type: none"> • Bosch Deepfield Robotics • Vista Geo 	Erhebung des Stands der Technik zu autonomen Techniken in der Landwirtschaft, Abschätzung der zukünftigen
14.12.2015	Fachgespräch mit Herrn Stefan Ernst (TU BS – Institut für Fabrikplanung und Unternehmensforschung)	Chancen und Risiken der Autonomisierung, Organisation
16.12.2015	Fachgespräch mit Herrn Joachim Brunotte (TI – Institut für Agrartechnologie)	Chancen und Risiken der Autonomisierung, Wirkung auf Boden und Ertrag
07.03.2016	4. Treffen des erweiterten Projektkreises am JKI	Bewertung autonome Großmaschinen, Ansätze Szenarioentwicklung Kleinmaschinen
07.04.2016	5. Treffen des erweiterten Projektkreises am TI	Planung und Inhalte des Fachbeirates
21.- 22.04.2016	1. Workshop des Fachbeirates am TI	Ergebnisse autonome Großmaschinen, Ansätze autonome Kleinmaschinen
08.06.2016	6. Treffen des erweiterten Projektkreises, IMN	Zusammenfassung des 1. Fachbeirates, Ansätze für weiteres Vorgehen
13.09.2016	7. Treffen des erweiterten Projektkreises, JKI	Anpassungen GroßtechnikszENARIO, KleintechnikszENARIO, Standkonzept Grüne Woche 2017
14.11.2016	8. Treffen des erweiterten Projektkreises, TI	Agrarsysteme der Zukunft, Projekt-Poster und -Flyer Grüne Woche, Aktueller Stand Kleintechnik
09.01.2017	9. Treffen des erweiterten Projektkreises, TI	BMEL-Antrag, Anpassungen Standkonzept Grüne Woche
13.01.2017	Fachgespräch am Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik der TU Braunschweig	Abschätzungen zu technologischen Entwicklungen der Batterietechnologie
30.01.2017	10. Treffen des erweiterten Projektkreises, TI	Projektskizze Begleitforschung zu Big Data in der Landwirtschaft
04.04.2017	11. Treffen des erweiterten Projektkreises, JKI	Verfahrensbetrachtung Kleintechnik und Methodik der ökonomischen Bewertung
24.04.2017	12. Treffen des erweiterten Projektkreises, IMN	Vorstellung Vortrag Projektteam für den 2. Fachbeirat
28.04.2017	Fachgespräch mit Herrn Bauer und Herrn Breunig, HSWT Triesdorf	Neue Pflanzenbausysteme: Betriebsmitteleinsparungen, Verfahrensabläufe
15.- 16.05.2017	2. Workshop des Fachbeirates am TI	Ergebnisse autonome Kleinmaschinen, Ansätze neue Pflanzenkombinationen
16.05.2017	Fachgespräch mit Herrn Buchner und Herrn Utz; Braunschweig	Feldroboter zur Aussaat, Roboterschwärme
10.-11.10.2017	Fachgespräch mit Herrn Buchner und Herrn Utz, Marktoberdorf	Preisabschätzung Feldroboter zur Aussaat, Verkaufsargumente Roboterschwärme

Tabelle A4: Teilnehmer Fachbeiräte „Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen“

Teilnehmer 1. Fachbeirat		Institution
Industrie	Manuel Fischer	SICK AG
	Dr. Benno Pichlmaier	AGCO GmbH
	Dr. Thomas Engel	John Deere GmbH & Co. KG
Wissenschaft	Prof. Dr. Joachim Hertzberg	Universität Osnabrück / DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH)
	Prof. Dr. Thore Toews	Fachhochschule Bingen
	Prof. Dr. Arno Ruckelshausen	Hochschule Osnabrück
	Prof. Dr. Oliver Hensel	Universität Kassel, FG Agrartechnik
Praxis und Beratung	Hendrik Meine	Meine und Claus GbR
	Carl-Ferdinand Albrecht	Eigenrode Agrar KG
	Wolfgang Träger-Farny	Landwirtschaftlicher Betrieb
	Gerrit Hogrefe	N.U. Agrar GmbH Schackenthal
Förderung	Monika Fischer	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Teilnehmer 2. Fachbeirat		Institution
Industrie	Thomas Engel	John Deere
	Thiemo Buchner	AGCO
	Johannes Utz	AGCO
	Amos Albert	Deepfield Robotics
Wissenschaft	Hans W. Griepentrog	Universität Hohenheim
	Oliver Hensel	Universität Kassel
	Stephan Scheuren	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
	Emily A. Poppenborg Martin	Universität Würzburg
	Sarah Redlich	Universität Würzburg
	Jörg Michael Greef	Julius Kühn-Institut
Lorenz Kottmann	Julius Kühn-Institut	
Praxis und Beratung	Hendrik Meine	Meine und Claus GbR
	Harmen Gehrke	Naturland
	Jochim Brunotte	Thünen-Institut
Förderung	Monika Fischer	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

Tabelle A5: Besuchte Tagungen und Messen

Datum	Titel, Ort	Inhalt
14.- 16.09.2015	BMBF-Workshop Agrarsysteme der Zukunft in Potsdam	Visionen für nachhaltige und ressourceneffiziente Agrarsysteme
02.10.2015	Tagung IROS in Hamburg	Workshop zum Thema „Agri-Food Robotics“, aktuelle Ansätze zum Thema Robotik
19.-20.10.2015	Climate Change – Land Use Strategies, CC-LandStraD in Braunschweig, Thünen-Institut	Verursachung von Klimagasen, Landnutzungsstrategien
27.10.2015	Big Data, Landwirtschaft 4.0 & Precision Farming in Berlin	Stand der Technik 4.0, zukünftige Entwicklungen
06.- 07.11.2015	Tagung LAND.TECHNIK in Hannover	Stand der Landtechnik, zukünftige Entwicklungen
08.-14.11.2015	Agritechnica 2015 in Hannover	Projektbezogener Vortrag, Stand der Technik zur Automatisierung, Fachleute zur Robotertechnik gesprochen
11.- 12.12.2015	Tagung Roboterrecht in Würzburg	Rechtliche Betrachtung der Autonomie von Fahrzeugen und Maschinen
18.02.2016	Digitalisierung in der Landwirtschaft in Berlin	Stand der Technik, aktuelle Entwicklungen und Einsatzmöglichkeiten
22.- 23.02.2016	Tagung GIL Jahrestagung in Osnabrück	Projektbezogener Vortrag, Stand der Technik bezüglich Autonomie, zukünftige Entwicklungen
14.-16.06.2016	Field Robot Event in Haßfurt	Übersicht über aktuelle Entwicklungen der Robotik, Diskussionen mit Kollegen im Bereich Agrarrobotik
14.-16.06.2016	DLG Feldtage in Haßfurt	Breite Fruchtfolgen, Ökolandbau, Drohnen
30.11.-01.12.2016	5. Forum Agroforstsysteme, Senftenberg	Kulturkombinationen auf einem Feld, Synergieeffekte
20.-29.01.2017	Internationale Grüne Woche in Berlin	Wissenstransfer, Konzeptentwicklung
02.02.2017	Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen zur Applikation von Pflanzenschutzmitteln im Steillagenweinbau sowie im Wald, Braunschweig, JKI	Zulassung Drohnen, Zukünftige Einsatzgebiete
03.03.2017	Yara-Besuch, Dülmen	Düngereinsatz, Düngerformen, Einsparung von Treibhausgas-Emissionen
22.-24.03.2017	European Robotics Forum in Edinburgh, UK	Workshops und Diskussionen zu verschiedenen Themen im Bereich Robotik
03.-08.04.2017	Silicon Valley Forum: The seeds of our future – AgTech & the Connected World, San Francisco, USA	Stand des Wissens – International (Autonomie, Roboter, Drohnen, Plattformen), Zukünftiger Einsatz autonomer Landmaschinen (Ökonomische Einschätzung)
24.-28.04.2017	Hannover-Messe in Hannover	Informationen, Diskussionen und Vorträge zu Themen Robotik, Industrie 4.0 und 5.0
11.-17.06.2017	Cash-Crop-Conference in Berlin, agri benchmark	Kleine Feldroboter – Perspektiven für fundamentale Innovationen intensiver Pflanzenproduktion
13.-15.09.2017	GEWISOLA-Tagung in Freising, Agrar-ökonomische Konferenz	Agrarökonomische Konferenz, Agrar- und Ernährungswirtschaft zwischen Ressourceneffizienz und gesellschaftlichen Erwartungen

Tabelle A6: Veröffentlichungen

Titel (Jahr)	Medium	Autoren
Economics of mechanical weeding by a swarm of small field robots (2017)	GEWISOLA 2017: Agrar- und Ernährungswirtschaft zwischen Ressourceneffizienz und gesellschaftlichen Erwartungen, Freising	Gaus, C.-C.; Urso, L.-M.; Minßen, T.-F.; de Witte, T.
Robots for Plant-Specific Care Operations in Arable Farming – Concept and Technological Requirements for the Operation of Robot Swarms for Plant Care Tasks (2017)	EFITA WCCA Congress	Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C.; Urso, L.-M.; Hanke, S.; Schattenberg, J.; Frerichs
Crop Production of the future – possible with a new approach? (2017)	Advances in Animal Biosciences, July 2017, pp. 734-737	Urso, L.-M.; Wegener, J.-K.; Hörsten, D. von; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C
Der Pflanzenbau der Zukunft - Ist ein Neudenken erforderlich? (2017)	Referate der 37. GIL-Jahrestagung in Dresden - Digitale Transformation - Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft, Gesellschaft für Informatik e.V., ISBN: 978-3-88579-662-6	Urso, L.-M.; Wegener, J.-K.; Hörsten, D. von; Kottmann, L.; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C
Neue Pflanzenbausysteme entwickeln – welche innovativen Techniken werden benötigt? (2017)	Landtechnik 72 (2): 91-100	Wegener, J.-K.; Urso, L.-M.; Hörsten, D. von; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C
Developing new cropping systems - which informative techniques are required? (2017)	Landtechnik 72 (2): 91-100, ISSN 0023-8082	Wegener, J.-K.; Urso, L.-M.; Hörsten, D. von; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C.
Systematische Anforderungen an ein autonomes GroßtechnikszENARIO als zukünftiges Pflanzenbausystem (2016)	Referate der 36. GIL-Jahrestagung in Osnabrück – Intelligente Systeme - Stand der Technik und neue Möglichkeiten 22. und 23. Februar 2016, ; Proceedings. Weihenstephan: GIL, pp 129-132	Minßen T.-F.; Gaus C.-C.; Urso L.-M.
Agrarsysteme der Zukunft: Neue Pflanzenbausysteme mit autonomen Landmaschinen (2015)	Beitrag zum BMBF-Workshop "Agrarsysteme der Zukunft", Potsdam, 14.-16.9.2015	Gaus, C.-C.; Minßen, T.-F.; Urso, L.-M.; Frerichs, L.; von Hörsten, D.; Nieberg, H.; Schattenberg, J.; Wegener, J. K.; de Witte, T.
New plant production systems with autonomous agricultural machinery (2015)	JKI Nachwuchswissenschaftlerforum – Young Scientists Meeting, Quedlinburg	Urso, L.-M.; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C.; Wegener, J. K.
Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen (2015)	ATZoffhighway 03/2015 , Springer-Verlag, ISSN: 2192-8819	Minßen, T.-F.; Urso, L.-M.; Gaus, C.-C.; Frerichs, L.
Autonomous agricultural machinery for new plant production systems (2015)	73. Tagung LAND.TECHNIK, VDI Verlag, ISBN 978-3-18-092251-5	Minßen, T.-F.; Urso, L.-M.; Gaus, C.-C.; Frerichs, L., Backhaus, G. F.; Isermeyer, F.
Agrarsysteme der Zukunft: Neue Pflanzenbausysteme mit autonomen Landmaschinen (2015)	BMBF Wettbewerb der Visionen; Workshop, Potsdam, 14.-16.9.2015.	Gaus, C.-C.; Minßen, T.-F.; Urso, L.-M.; Frerichs, L.; Hörsten, D. von; Nieberg, H.; Schattenberg, J., Wegener, J. K.; Witte, T. de

Tabelle A7: Maschinenausstattung des Modellbetriebs

Verfahren	Maschinen	Jährliche Nutzung [h, ha]	Wiederbeschaffungs- wert [€]	Restwert [€]
Boden- bearbeitung	Traktor, 185 PS	1.300 h	102.500	32.500
	Zuckerrüben-Einzelkornsähmaschine	120 ha	25.000	600
Aussaat	Düngerstreuer, 30 m	5.800 ha	18.000	3.500
	Pflanzenschutzspritze, 30 m	6.800 ha	110.000	3.800
Düngung	Traktor, 240 PS	1.400 h	132.500	40.000
	Scheibenegge, 8 m	1.100 ha	35.000	6.500
Pflanzen- schutz	Sämaschine, 6 m	990 ha	90.000	16.000
	Traktor, 320 PS	350 h	200.000	110.000
	Grubber Tiger, 6 m	1480 ha	61.000	4.000
Ernte	Mähdrescher 9 m	250 h	230.000	65.000
	Rübenroder 30 qm ²	500 h (Überbetrieblich)	400.000	110.000
	Häcksler, 460 PS	300 h (Überbetrieblich)	250.000	66.000

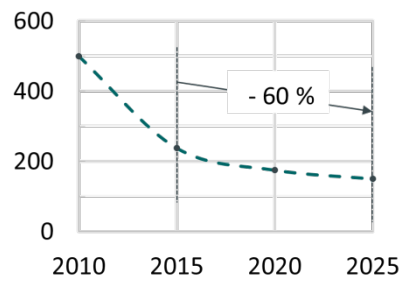
Formel A1: Berechnung der benötigten Feldroboter je Verfahren

$$Feldroboter \left[\frac{\text{Anzahl}}{150 \text{ ha}} \right] = \frac{\left(\frac{(\text{Arbeitsbreite [m]} * \text{Arbeitsgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right])}{10000 \text{ [m}^2\text{]}} \right) * 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right] * \text{Feldarbeitstage [d]}}{\text{Ackerfläche [150 ha]}}$$

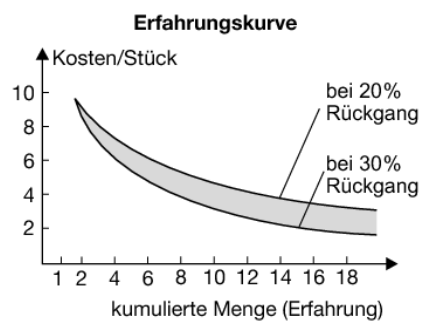
Formel A2: Berechnung der Arbeitserledigungskosten

$$\text{Arbeitserledi-} \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right] = \frac{\text{Anzahl Feldroboter} * \left(\frac{\text{Produktpreis [€]} - \text{Restwert [€]}}{\text{Nutzungsdauer [y]}} + \left(\frac{\text{Produkt preis [€]} + \text{Restwert [€]}}{2} + \text{Produktpreis [€]} \right) * 0,02 + \text{Arbeitsstunden} \left[\frac{\text{h}}{\text{y}} \right] * \text{Energieverbrauch} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{h}} \right] * \text{Strompreis} \left[\frac{\text{€}}{\text{Wh}} \right] \right)}{\text{Ackerfläche [ha]}}$$

Quelle: Eigene Darstellung nach Werner et al. (2016), Universität Hohenheim (2016), Edwards (2015).

Abbildung A1: Geschätzte Entwicklung der Energiespeicherkosten je kWh im Zeitverlauf

Quelle: Thielmann et al. (2015).

Abbildung A2: Kostensenkung Stückkosten durch Erfahrungseffekte

Quelle: Kirchgeorg (2017).

Anhang 2

Abschätzung des Energiebedarfs einer Drohne

Der Leistungsbedarf um einen Multikopter im Schwebeflug zu halten kann überschlägig mit folgender Formel berechnet werden (Bittner 2014):

$$N_{Ro,0} = G \cdot \sqrt{\frac{G}{2 \cdot \rho \cdot F}}$$

$N_{Ro,0}$ bezeichnet den Leistungsbedarf, G die Gewichtskraft des Multikopters (Hubschraubers), F die Rotorkreisfläche und ρ die Luftdichte. Der Quotient G/F wird in der Literatur mit überschlägigen Werten von 100 bis 500 N/m² angegeben. Im günstigsten Fall ergibt sich damit der Leistungsbedarf für den stationären Schwebeflug eines 10 kg schweren Multikopters zu ca. 700 W. Der Leistungsbedarf zur Fortbewegung ist darin noch nicht enthalten.

Anhang 3

Abschätzung der Antriebsleistung für einen Roboter zur Bodenbearbeitung

Die Abschätzung Antriebsleistung erfolgt auf Grundlage der Berechnungsvorschrift ASAE Standard, ergänzt durch (Schreiber 2006). Der Gesamtleistungsbedarf setzt sich zusammen aus:

- dem Leistungsbedarf für die Schneidscheiben
- dem Leistungsbedarf zum Antrieb der Rotorwalzen
- dem Leistungsbedarf für das Säaggregat
- dem Leistungsbedarf der Fahrwerke

Der Zugleistungsbedarf lässt sich annähernd wie der einer Scheibenegge berechnen, der entsprechende Literaturwert gibt einen Zugkraftbedarf von $400 \text{ N/m}_{\text{AB}} \cdot \text{cm}_{\text{AT}}$ (400 N/m Arbeitsbreite \cdot cm Arbeitstiefe) an. Bei einer Arbeitstiefe von ca. 20 cm sowie einer Arbeitsgeschwindigkeit von 5 km/h ergibt sich damit ein Zugleistungsbedarf von ca. $11 \text{ kW/m}_{\text{AB}}$. Da die Schneidscheiben jedoch angetrieben werden, ist dieser Wert zu großen Teilen der notwendigen Prozessleistung zuzurechnen.

Der Leistungsbedarf der Rotorwalzen lässt sich annähernd wie der einer Kreiselegge berechnen. Aus dem Literaturwert $1.750 \text{ W/m}_{\text{AB}} \cdot \text{cm}_{\text{AT}}$ ergibt sich bei einer Arbeitstiefe von ca. 10 cm ein Leistungsbedarf von ca. $18 \text{ kW/m}_{\text{AB}}$.

Der Leistungsbedarf für den Fahrtrieb setzt sich entsprechend der Fahrwiderstandsgleichung aus dem Rollwiderstand, dem Steigungswiderstand, dem Luftwiderstand und dem Beschleunigungswiderstand zusammen. Für die abstrakte Betrachtung im Rahmen dieses Projektes ist eine Betrachtung des Leistungsbedarfs zur Überwindung des Rollwiderstands ausreichend. Der Luftwiderstand und der Beschleunigungswiderstand sind bei geringen Geschwindigkeiten/Beschleunigungen vernachlässigbar und der Steigungswiderstand ergibt in der Gesamtbilanz eines Schlages null. Der Rollwiderstand F_R setzt sich aus dem Maschinengewicht F_N und dem Rollwiderstandsbeiwert ρ zusammen:

$$F_R = F_N \cdot \rho$$

Der Rollwiderstandsbeiwert ρ ergibt sich aus Eigenschaften des Reifens und des Bodens, überschlägig kann für einen trockenen Stoppelacker ein Rollwiderstandsbeiwert von 0,08 angenommen werden (Schreiber 2006). Aus den oben angesprochenen Zielwerten zum Bodendruck ergibt sich damit ein theoretisches Maximalgewicht von ca. 815 kg bei der Verwendung von zwei Laufwerken, der Leistungsbedarf für eine Geschwindigkeit von 5 km/h ergibt sich entsprechend überschlägig ohne direkte Berücksichtigung von Wirkungsgraden im Antriebsstrang zu 1 kW. Der Gesamtleistungsbedarf beläuft sich damit auf ca. $29 \text{ kW/m}_{\text{AB}} + 2 \text{ kW}$ für die Antriebseinheiten und das Aussaatmodul ohne Berücksichtigung von Wirkungsgraden in den Antriebselementen.

Anhang 4

Abschätzung des Gewichts und der Größe eines Bodenbearbeitungsroboters

Die Maschinengröße wird vor allem durch das mögliche Gewicht der Maschine festgelegt. Das Gewicht der Antriebseinheiten wurde in einem ersten Schritt auf je ca. 150 kg geschätzt, basierend auf den in (Jensen et al. 2012) entwickelten Laufbändern. Die Ausarbeitung einer konstruktiven Lösung im Rahmen einer studentischen Arbeit hat ergeben, dass diese Schätzung etwas zu hoch war und stattdessen von einem Gewicht von knapp 100 kg je Fahrwerk auszugehen ist (Bethlehem 2017).

Daraus ergibt sich ein Maximalgewicht für die Prozesseinheit und die Energieversorgungseinheit von ca. 615 kg (Das Maximalgewicht von 815 kg – 2 * 100 kg für die Antriebseinheiten). Wie oben angesprochen, sollen die Roboter elektrisch betrieben werden. Das Leistungsgewicht von Elektromotoren liegt bei ca. ca. 0,1 - 0,2 kW/kg, je nach Bauart (VDMA 2015). Für 30 kW/m_{AB} Prozessleistung ist entsprechend ein Gewicht der Antriebsmotoren von ca. 150 – 300 kg/m_{AB} erforderlich. Die Gewichte der mechanischen Bauteile, also der Rahmen, die Übertragungsglieder und die Schneidscheiben und Rotorwalzen liegt in einem ähnlichen Bereich bei ca. 280 kg/m_{AB}, ausgehend von den Gewichten heutiger Bodenbearbeitungsgeräte mit ähnlicher Intensität (Amazonen-Werke H.Dreyer GmbH & Co. KG 2017a).

Das Gewicht der Saateinheit inkl. der Rückverdichtungswalze wird ausgehend vom oben beschriebenen Roboter der Firma AGCO/Fendt auf ca. 12,5 kg je Saatreihe für das Säaggregat und 12,5 kg insgesamt für die Vereinzellung geschätzt. Das Gewicht der Walze zur Rückverdichtung sowie die Antriebstechnik sind darin bereits integriert. Bei einem Reihenabstand von 9 cm berechnet sich das Gewicht entsprechend zu ca. 140 kg/m_{AB} + 12,5 kg.

Das Gewicht der Energieversorgungseinheit wurde in einem ersten Schritt mit 100 kg basierend auf den beschriebenen Annahmen zur Batterietechnologie angenommen. Daraus ergibt sich eine gespeicherte Energiemenge von 15 kWh, die selbst bei Beschränkungen in Bezug auf die Entladbarkeit eine gewisse Laufzeit (> 0,5 h, in Abhängigkeit der Arbeitsbreite) der Maschine sicherstellt. Gleichzeitig ergibt sich ein Volumen von 60 l, so dass die Batterie auch bei Robotern mit geringer Arbeitsbreite (< 0,5 m) noch Anwendung finden kann.

Anhand dieser Gewichtsabschätzungen und unter der Berücksichtigung des zulässigen Bodendruckes kann nun die Maschinenbreite abgeschätzt werden und ergibt sich zu ca. 0,6 m für ein Maximalgewicht von 815 kg.

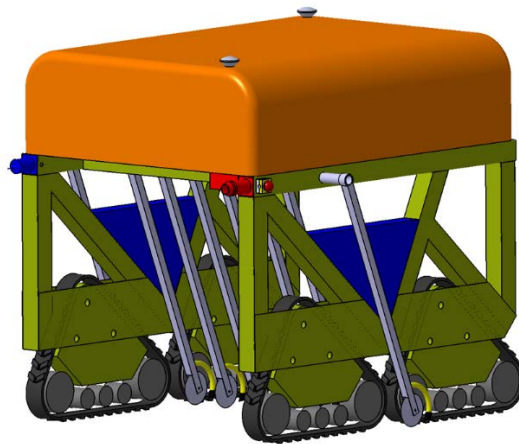
Der Gesamtleistungsbedarf berechnet sich entsprechend zu ca. 20 kW für 0,6 m_{AB}. Unter Berücksichtigung eines angenommenen Wirkungsgrades von 90 % in den Antriebselementen entsteht ein Leistungsbedarf von ca. 23 kW.

Anhang 5

Entwurf einer Prozesseinheit für die Ausbringung organischer Dünger

Abbildung A3 zeigt eine erste Konzeption eines Roboters zur Gülleausbringung mit Antriebseinheiten aus dem modularen Konzept. Der Gülle wird mithilfe von Scheiben eingeschlitzt. Die Maschine ist ca. 2 m breit und hat ein Ladevolumen von ca. 1,4 m³. Durch den stelzenartigen Aufbau kann sie auch in stehende Bestände fahren und dort Gülle ausbringen.

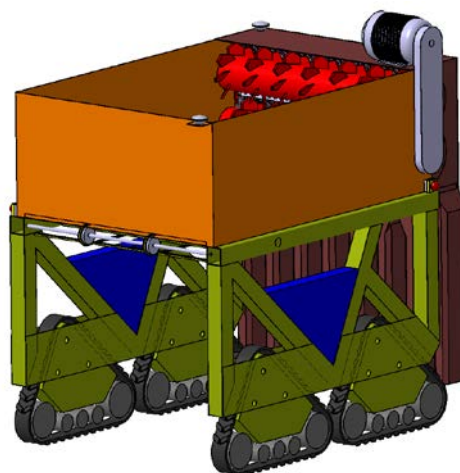
Abbildung A3: Entwurf eines Roboters zur Gülleausbringung



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung A4 zeigt einen Roboter zur Festmist-Ausbringung mit dem gleichen Fahrwerk. Der Mist wird an den rot dargestellten Walzen zerkleinert und fällt anschließend durch die Fallrohre auf den Boden. Eine direkte Einarbeitung findet hier nicht statt. Das Ladevolumen beträgt ca. 2 m³.

Abbildung A4: Entwurf eines Roboters zu Mistausbringung



Quelle: Eigene Darstellung.