

Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen (Projektverlängerung)

New plant production systems with autonomous agricultural machinery (project extension)

FKZ: 14NA004

Projektnehmer:

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig
Tel.: +49 531 391-7192
Fax: +49 531 596-5199
E-Mail: j.schattenberg@tu-braunschweig.de
Internet: <https://www.tu-braunschweig.de/imn>

Autoren:

Minßen, Till-Fabian; Schattenberg, Jan

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 zur Projektverlängerung

Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen



Zuwendungsempfänger

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

Förderkennzeichen

2814NA004

Laufzeit und Berichtszeitraum der Verlängerung

01.11.2017 – 30.06.2018

Projektleiter

Jan Schattenberg

Bearbeiter

Till-Fabian Minßen

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	4
2. Berücksichtigung des Spot-Farmings	5
3. Parameter der Verfahrenssimulation und Einbindung der Shapes	7
4. Klassifizierung der Felder und Maschinenkonfigurationen	10
5. Auswertung der Simulation	13
6. Fazit und Ansätze für den ökologischen Landbau	27
7. Literaturverzeichnis	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausgewählte Region (oben: OpenStreetMaps, unten: Bodenkarte BK 50)	6
Abbildung 2: Elemente eines Shapes	7
Abbildung 3: Reduzierung der Anzahl an Shapepunkten (links: original, rechts: modifiziert)	8
Abbildung 4: Spots (oben) und heutige Feldformen (unten) in der Verfahrenssimulation	9
Abbildung 5: Berechnung der Komplexität der Feldform	10
Abbildung 6: Auswertung der Feldklasse 1	14
Abbildung 7: Auswertung der Feldklasse 2	14
Abbildung 8: Auswertung der Feldklasse 3	15
Abbildung 9: Auswertung der Feldklasse 4	15
Abbildung 10: Auswertung der Feldklasse 5	16
Abbildung 11: Auswertung der Feldklasse 6	16
Abbildung 12: Auswertung der Feldklasse 7	17
Abbildung 13: Auswertung der Feldklasse 8	17
Abbildung 14: Auswertung der Feldklasse 9	18
Abbildung 15: Auswertung der Feldklasse 10	18
Abbildung 16: Auswertung der Feldklasse 11	19
Abbildung 17: Auswertung der Feldklasse 12	19
Abbildung 18: Auswertung der Feldklasse 13	20
Abbildung 19: Auswertung der Feldklasse 14	20
Abbildung 20: Auswertung der Feldklasse 15	21
Abbildung 21: Auswertung der Feldklasse 16	21
Abbildung 22: Auswertung der Feldklasse 17	22
Abbildung 23: Auswertung der Feldklasse 18	22
Abbildung 24: Auswertung der Feldklasse 19	23
Abbildung 25: Auswertung der Feldklasse 20	23
Abbildung 26: Auswertung der Feldklasse 21	24
Abbildung 27: Auswertung der Feldklasse 22	24
Abbildung 28: Auswertung der Feldklasse 23	25
Abbildung 29: Auswertung der Feldklasse 24	25
Abbildung 30: Auswertung der Feldklasse 25	26

1. Einleitung

In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse der Verlängerung des Gemeinschaftsprojektes „Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen“ (FKZ: 2814NA004) vom 1. November 2017 bis zum 30. Juni 2018 beschrieben. Die Verlängerung betraf nur den Projektteil des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) der Technischen Universität Braunschweig.

Im Rahmen dieser Verlängerung wurden die Inhalte des Gemeinschaftsprojektes (siehe gemeinsamen Abschlussbericht vom 30. Oktober 2017 [Schlussbericht ALPS]) durch weitere Untersuchungen bezüglich der Auswirkung unterschiedlicher Maschinengrößen und Feldformen auf die Flächenleistung und die Effizienz des Einsatzes ergänzt. Während im Ausgangsprojekt die Maschinenform und –größe der Roboterkonzepte im Wesentlichen aus den pflanzen- und feldspezifischen Randbedingungen abgeleitet wurde, sollten in der Projektverlängerung die anbauspezifischen Randbedingungen betrachtet werden. Vor allem der entwickelte Ansatz des „Spot-Farmings“ erforderte durch inhomogene Feldformen eine eingehende Betrachtung.

Als Werkzeug stand ein Tool zur Verfahrenssimulation zur Verfügung, das am IMN im Rahmen des „EkoTech“-Projektes entwickelt wurde. Das Simulationsmodell bildet den gesamten Verfahrensablauf, beginnend mit Rüstzeiten auf dem Betriebshof, über den Feldeinsatz mit Hauptarbeits- und Wendezeit sowie die Rückkehr auf den Betriebshof ab. Die Erstellung der Spots für die Betrachtung des „Spot-Farmings“ erfolgte über die Nutzung einer digitalen Bodenkarte und die Ableitung entsprechender Flächen. Es wurden Maschinenschwärme mit bis zu 20 Maschinen mit Arbeitsbreiten von 1 – 20 m untersucht. Die Maschinen führten eine Bodenbearbeitung aus, wobei im Rahmen dieser Untersuchung allein die jeweiligen Arbeits- und Wendezeiten und die entstehenden Flächenleistungen von Belang waren.

Die Simulationen zeigen, dass vor allem bei kleinen Flächen und komplexeren Feldformen Maschinenschwärme mit kleinen Arbeitsbreiten der einzelnen Maschinen Vorteile bzgl. Flächenleistung und Effizienz des Einsatzes vorweisen können.

Im Folgenden werden die verwendeten Datengrundlagen, die notwendigen Anpassungen des Tools und die Ergebnisse erläutert.

2. Berücksichtigung des Spot-Farmings

Die grundsätzliche Idee des Spot-Farming wird im genannten gemeinsamen Abschlussbericht und auch in [Wegener 2017] beschrieben. Kernelement ist der Wegfall heutiger Feldformen und Feldgrenzen und die gezielte Zusammenlegung von Inseln (Spots) mit ähnlichen Eigenschaften bzgl. Sonneneinstrahlung, Hanglage oder Bodenart. Für jede Insel kann dann eine passende Fruchtfolge gefunden werden und damit die Anforderungen der jeweiligen Pflanzen stärker mit den natürlichen Gegebenheiten in Einklang gebracht werden.

Die Bodenart ist dabei einer der wesentlichen Faktoren zur Festlegung der Spots und wurde in diesem Projekt als Eingangsparameter genutzt. Die Datengrundlage bildete die Bodenkarte „BK 50“ des Niedersächsischen Landesamtes für Bergbau und Geographie (LBEG). In dieser Karte sind Informationen zu Bodenart und Bodenhorizont sowie zur Verteilung der beiden Parameter in der x-y-Ebene (Erdoberfläche) im Maßstab 1:50.000 hinterlegt. Die Daten sind online im Nibis-Kartenserver oder als Shape-Datei im ESRI-Format [ESRI] verfügbar. Die Shape-Datei ist kostenpflichtig, das LBEG stellte jedoch eine Testdatei zur Verfügung.

Als Gebiet wurde eine Region zwischen Bad Salzdetfurth und Bockenem ausgewählt, da dort sehr heterogene Bodenverhältnisse in der BK 50 auffielen. Abbildung 1 zeigt die Karte und den entsprechenden Ausschnitt aus der BK 50 für diesen Bereich, gut vergleichbar sind die Bodenarten entlang der Flussläufe. Die unterschiedlichen Farben in der BK 50 stellen unterschiedliche Bodenarten dar. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Betrachtung der Bodenarten dazu geeignet ist, einen ersten Eindruck möglicher Spot-Formen zu gewinnen.

Der Bodentyp und der Bodenhorizont sind in den Daten enthalten, im Rahmen dieser Verlängerung wurden jedoch nur die eigentlichen Shapes, also die Formen der einzelnen Bodenflächen verwendet. Die heutigen Feldformen in dieser Region wurden anhand von Google-Maps Bildern ermittelt.

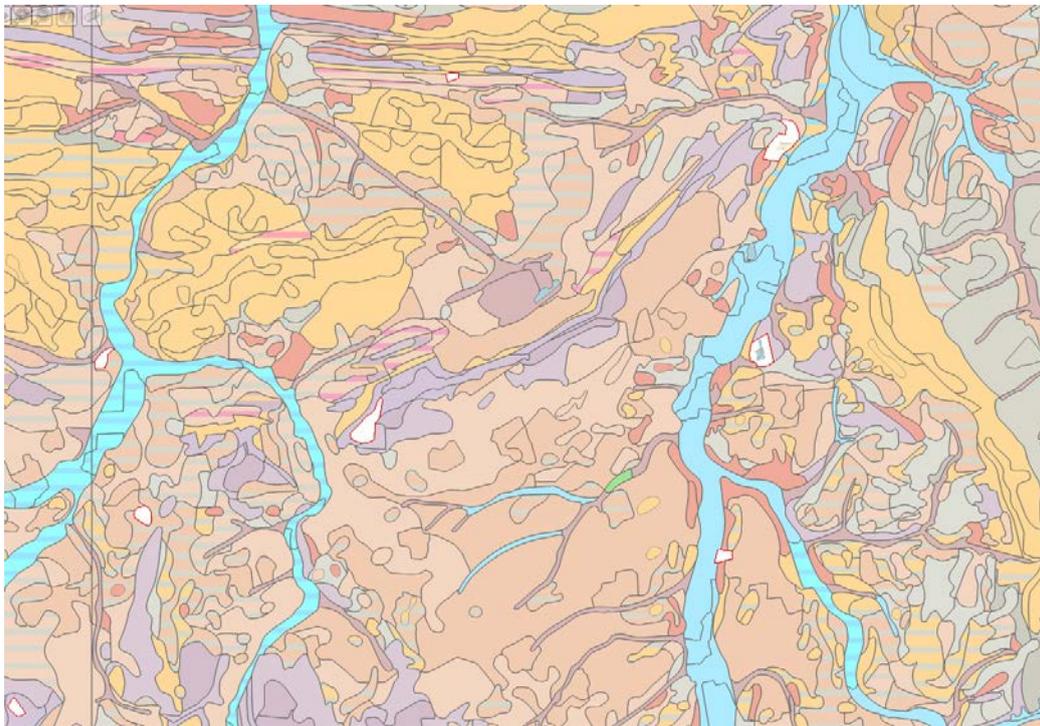
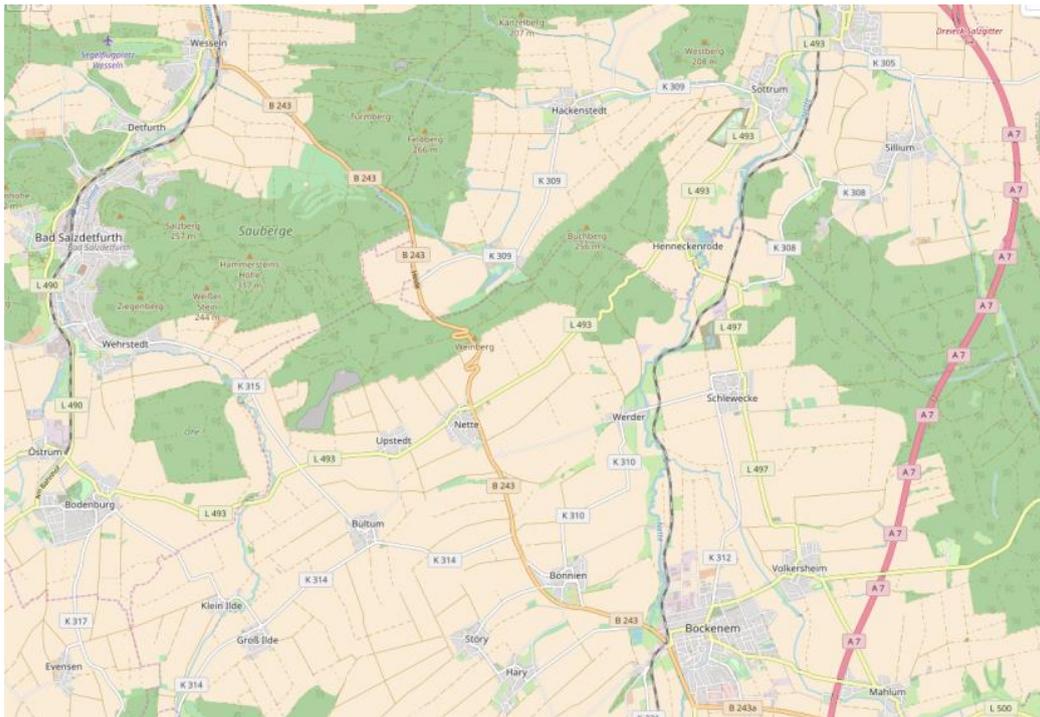


Abbildung 1: Ausgewählte Region (oben: OpenStreetMaps, unten: Bodenkarte BK 50)

3. Parameter der Verfahrenssimulation und Einbindung der Shapes

Der generelle Aufbau und die Funktionalität der Verfahrenssimulation sind in [Frerichs 2017] beschrieben. Für die hier beschriebene Anwendung mussten an Simulationstool, abgesehen von der Integration der Spots, nur geringfügige Änderungen vorgenommen werden.

Es wurden insgesamt 39 Maschinenkonfigurationen mit variierenden Arbeitsbreiten und Maschinenanzahlen untersucht. Als erste Gruppe wurde der Einsatz von Einzelmaschinen mit Arbeitsbreiten von 1 – 20 m auf allen realen Feldern und allen Spots simuliert. In diesen Simulationen bearbeitet eine einzelne Maschine sämtliche Felder. Als zweite Gruppe wurde der Einsatz von Maschinenschwärmen untersucht. Die Arbeitsbreite der einzelnen Maschinen lag dabei bei 1 m, die Maschinenanzahl betrug 2 – 20 Maschinen. Somit ist für jedes Feld ein Vergleich zwischen einer großen Maschine (1 x 20 m Arbeitsbreite) und einem Schwarm aus kleinen Maschinen (20 x 1 m Arbeitsbreite) möglich. Zwischengrößen wie beispielsweise 4 Maschinen mit jeweils 5 m Arbeitsbreite wurden im Rahmen dieser Verlängerung nicht untersucht, sind aber generell möglich.

Unabhängig von der Konfiguration arbeiten die Maschinen mit einer Soll-Geschwindigkeit von 8 km/h und führen am Feldrand Wendemanöver in Form von Dubins-Kurven durch. Als Vereinfachung entsprechen der Wendekreis der Maschinen und die Größe des Vorgewendes der jeweiligen Arbeitsbreite. Im Simulationstool ist ein Algorithmus hinterlegt, der die Felder in optimale Teilfelder einteilt, die jeweils nacheinander von den Maschinen bearbeitet werden. Innerhalb dieser Teilfelder werden gerade Linien (AB-Linien) berechnet und durch die Maschinen abgearbeitet. In der Auswertung wird nur die Zeit auf dem Feld betrachtet, die aufgezeichneten Rüstzeiten am Betriebshof und Straßenfahrten werden nicht ausgewertet.

Die in Form einer Shape-Datei im ESRI-Format vorliegende Bodenkarte BK 50 wurde mit dem Programm Matlab der Firma „TheMathWorks“ eingelesen und verarbeitet. Die Funktion „shaperead“ stellt dafür die entsprechenden Funktionalitäten zur Verfügung. Die Shape-Datei bestand aus 515 Shapes. Jeder Shape wird anhand seines Umrisses beschrieben, der wiederum aus einzelnen Punkten zusammengesetzt ist (Abbildung 2).



Abbildung 2: Elemente eines Shapes

Im Hinblick auf die Verwendung der Shapes in der Verfahrenssimulation wurden aus den einzelnen Shapes einzelne Umrisspunkte entfernt, die nicht wesentlich zur Gestalt beitragen. Hintergrund ist der Rechenbedarf für die Teilfelderstellung in der Simulation. Als Kriterium wurden die Steigungswinkel zwischen drei benachbarten Punkten ausgewertet (Abbildung 3, links). Ist der Winkel α_{23} größer als $0,85 \times \alpha_{12}$ und kleiner als $1,15 \times \alpha_{12}$ wird der Punkt 2 aus dem Umfang des Shapes gelöscht (Abbildung 3, rechts). Die Werte wurden empirisch ermittelt und vereinfachen die Shapes ausreichend, beeinflussen die Form aber nur unwesentlich.

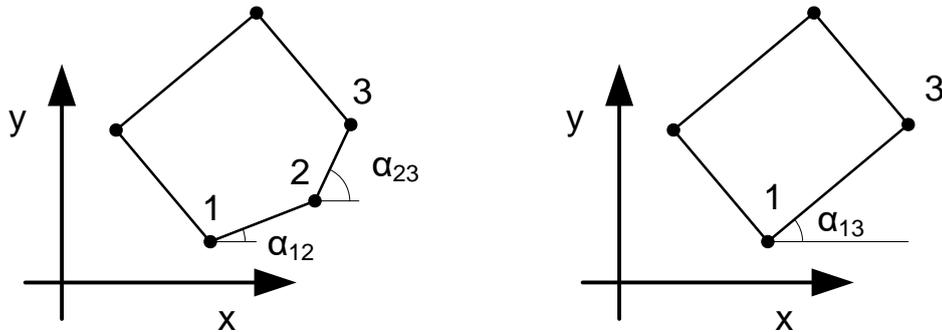


Abbildung 3: Reduzierung der Anzahl an Shapepunkten (links: original, rechts: modifiziert)

Zur Einbindung in die Verfahrenssimulation wurden anschließend nur die Shapes verwendet, die vollständig im Ausschnitt der Probedatei der BK 50 lagen. Dies war notwendig, um „abgeschnittene“ Kanten zu vermeiden, die die Shapeform verfälschen. Insgesamt standen damit 70 reale Felder und 120 Spots zur Verfügung. Abbildung 4 zeigt die so entstandenen Spots in der Verfahrenssimulation und die zum Vergleich herangezogenen originalen Feldformen.

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, wurde nicht berücksichtigt, dass einige Spots über Straßen oder Ortschaften hinweg gehen. Auf die Simulation hat dies keinen Einfluss.

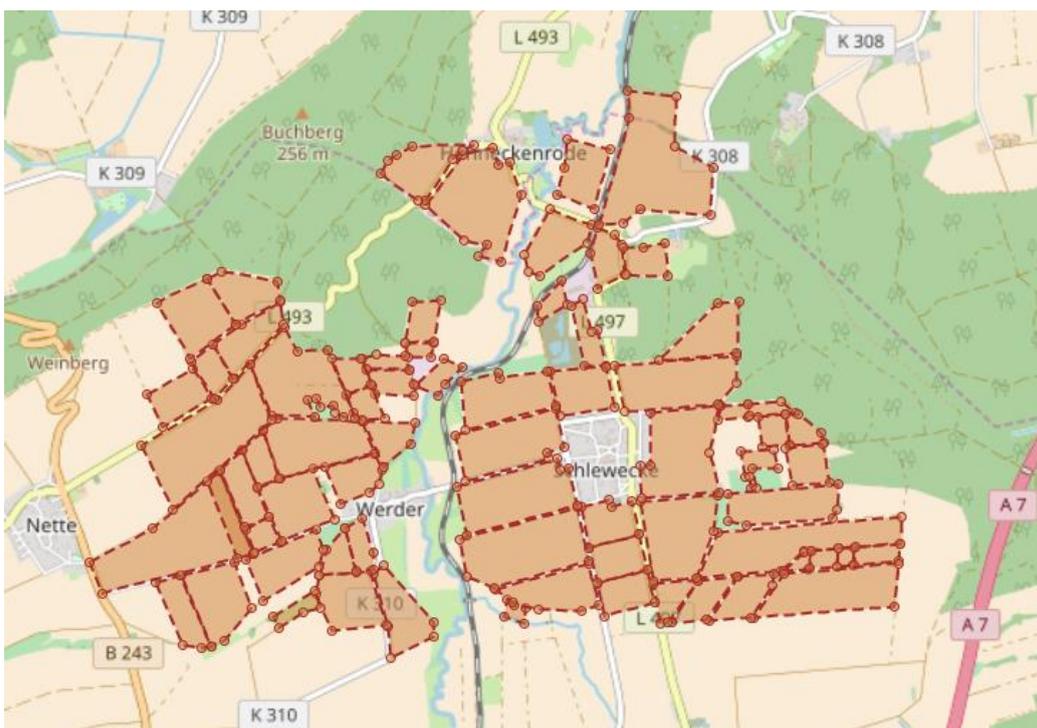
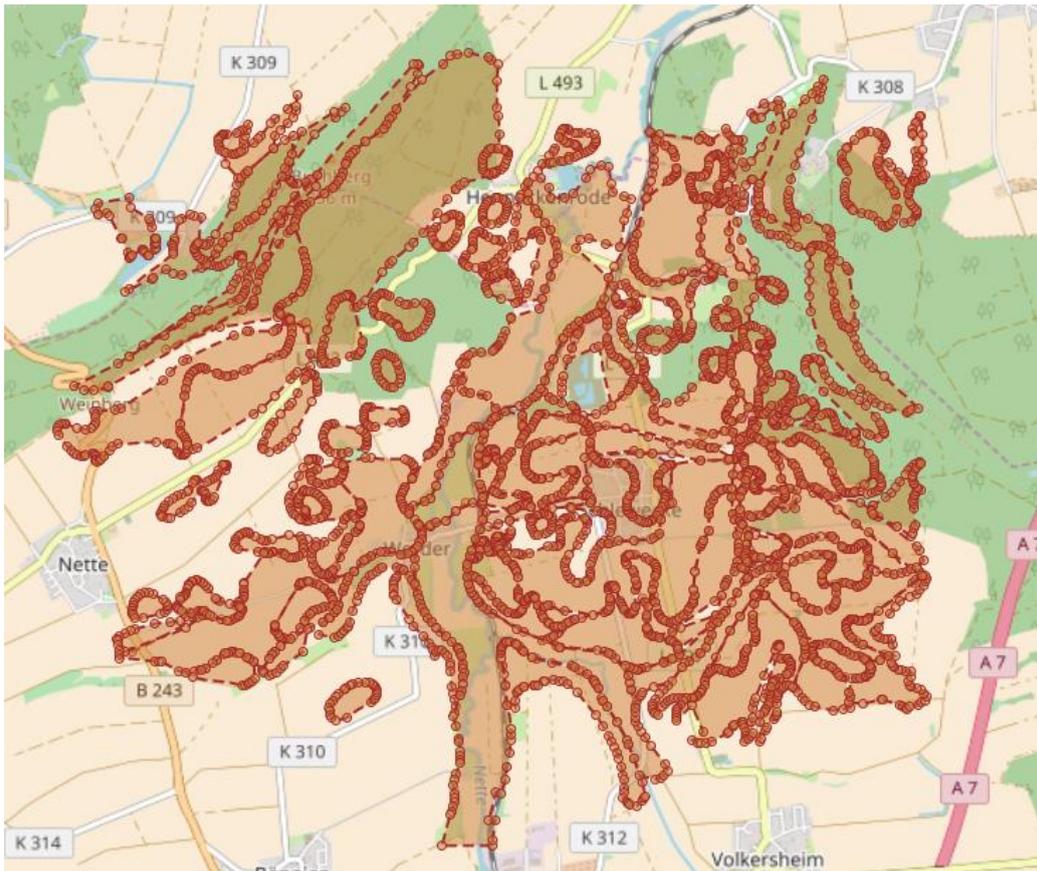


Abbildung 4: Spots (oben) und heutige Feldformen (unten) in der Verfahrenssimulation

4. Klassifizierung der Felder und Maschinenkonfigurationen

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, sind die einzelnen Felder sowohl in der Größe und vor allem die Spots auch in der Form sehr unterschiedlich. Der Bezug der Maschinengröße und der Flächenleistung, bzw. Einsatzeffizienz kann daher in der Auswertung nicht allein auf die Feldgröße erfolgen. Zur weiteren Klassifizierung der Felder wurde daher die Komplexität der Feldform in Form des Kennwertes „Steigungssumme“ betrachtet.

Der Kennwert „Steigungssumme“ berechnet sich aus der Summe der Beträge der Steigungswinkel zwischen sämtlichen Punkten im Umriss des Shapes. Für das in Abbildung 5 dargestellte Beispielfeld ergibt sich die Steigungssumme zu $\alpha_{\text{Gesamt}} = |\alpha_1| + |\alpha_2| + |\alpha_3| + |\alpha_4| = 45^\circ + 45^\circ + 45^\circ + 45^\circ = 180^\circ$. Für komplexere Feldformen, siehe beispielsweise Abbildung 2, ergeben sich entsprechend größere Steigungssummen (beispielsweise 3100° für Feld in Abbildung 2).

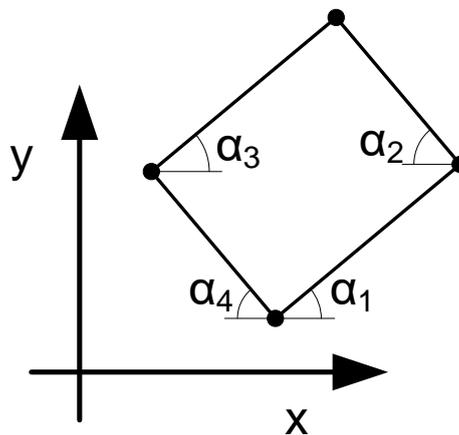


Abbildung 5: Berechnung der Komplexität der Feldform

Auf diese Weise können die Felder sowohl nach Größe als auch nach Komplexität sortiert werden. Zur Auswertung wurde die Gesamtzahl der Felder in fünf Größenklassen mit jeweils fünf Komplexitätsklassen eingeteilt (Tabelle 1). Für jede dieser 25 Feldklassen wurde ein exemplarisches Feld ausgewählt. Im folgenden Kapitel wird die in Bezug auf die Flächenleistung und Einsatzeffizienz optimale Maschinenkonfiguration erläutert.

			Feldkomplexität [°]		Feldklasse [-]
Feldgröße [ha]	sehr klein	1 - 2,79	sehr gering	188 – 246	1
			gering	289 – 1225	2
			mittel	1230 – 1470	3
			hoch	1496 – 1718	4
			sehr hoch	2054 – 2161	5
	klein	2,8 - 5,28	sehr gering	187 – 209	6
			gering	217 – 302	7
			mittel	311 – 1549	8
			hoch	1580 – 1817	9
			sehr hoch	1842 – 4041	10
	mittel	5,29 - 9,8	sehr gering	200 – 209	11
			gering	245 – 309	12
			mittel	318 – 1778	13
			hoch	1889 – 2442	14
			sehr hoch	2478 – 3906	15
	groß	9,9 - 16,8	sehr gering	209 – 236	16
			gering	249 – 602	17
			mittel	1330 – 2555	18
			hoch	2727 – 3578	19
			sehr hoch	3642 – 5670	20
	sehr groß	17,5 - 123	sehr gering	230 – 292	21
			gering	296 – 2674	22
			mittel	3041 – 4996	23
			hoch	5038 – 7157	24
			sehr hoch	7435 - 10888	25

Tabelle 1: Klassifizierung der Felder

Analog zur Einteilung der Felder in Feldklassen wurden auch die Maschinenkonfigurationen in Maschinenklassen eingeteilt.

Arbeitsbreite [m]	Maschinenanzahl [-]	Maschinenklasse [-]
20	1	1
18		2
16		3
14		4
12		5
10		6
8		7
6		8
4		9
2		10
1	20	11
	18	12
	16	13
	14	14
	12	15
	10	16
	8	17
	6	18
	4	19
	2	20
1	21	

Tabelle 2: Klassifizierung der Maschinenkonfigurationen

5. Auswertung der Simulation

Zur Auswertung des Maschineneinsatzes wurden zwei Kennwerte aus den Ergebnissen der Simulationen gebildet: die Flächenleistung und das Verhältnis der Wendezeit zur gesamten Arbeitsverrichtungszeit.

Die Flächenleistung in [ha/h] errechnet sich aus der Feldgröße und der gesamten Einsatzzeit auf dem Feld, die zur Bearbeitung nötig ist. Die gesamte Einsatzzeit wurde aus Hauptarbeitszeiten, Wendezeiten und Leerfahrten auf dem Feld gebildet. Wie oben beschrieben wurden Rüstzeiten auf dem Feld nicht betrachtet. Für die Maschinenkonfigurationen mit mehr als einer Maschine wurden die jeweiligen Zeiten über alle Maschinen gemittelt, die Flächenleistung bezieht sich damit auf dem gesamten Maschinenschwarm. Die Flächenleistung des Maschinenschwarms ist ein Indikator für die Gesamtdauer der jeweiligen Tätigkeit. Je höher die Flächenleistung ist, desto weniger Feldarbeitstage werden benötigt, bzw. desto schneller und damit pflanzenbaulich optimaler kann der Verfahrensschritt ausgeführt werden.

Das Verhältnis der Wendezeit zur Arbeitsverrichtungszeit in [%] ist ein Indikator für die Effizienz des Maschineneinsatzes. Die Arbeitsverrichtungszeit ist die Zeit, die die Maschinen auf dem Feld effektiv ihre Arbeit verrichten. Bei einem sehr hohen Wendezeitanteil arbeitet die Maschine ineffizient, entsprechend steigt die Anzahl der benötigten Maschinen, bzw. sinkt die Flächenleistung.

Im Folgenden werden für die einzelnen Feldklassen die Flächenleistungen und Wendezeitenanteile der verschiedenen Maschinenkonfigurationen dargestellt. Zur übersichtlicheren Darstellung werden nur gerade Arbeitsbreiten, bzw. Maschinenzahlen dargestellt.

Aus den dargestellten Ergebnissen wird deutlich, dass sich Flächenleistung und Wendezeitanteil vor allem in Bezug auf die Feldkomplexität ändern.

Die einzelnen Abbildungen sind wie folgt zu lesen:

Im oberen Teil der Abbildungen ist die Flächenleistung der Einzelmaschine (rot) und des Maschinenschwarms (blau) aufgetragen. Die x-Achse stellt die Anzahl an Maschinen und die Arbeitsbreite dar. Für den roten Graph (für eine Einzelmaschine) stellt die x-Achse die Arbeitsbreite in Meter dar. Für den blauen Graph (für den Maschinenschwarm) stellt die x-Achse die Anzahl an Maschinen dar. Wie oben beschrieben haben die einzelnen Maschinen im Schwarm eine Arbeitsbreite von 1 m. Dadurch wird ein direkter Vergleich der Maschinenkonfigurationen 1 x 20 m Arbeitsbreite vs. 20 x 1 m Arbeitsbreite möglich. Im unteren Teil der Abbildungen ist das Verhältnis von Wendezeit zu Arbeitsverrichtungszeit aufgetragen, die x-Achse bleibt die gleiche. Zur besseren Les- und Vergleichbarkeit ist in allen Abbildungen die gleiche Skalierung verwendet.

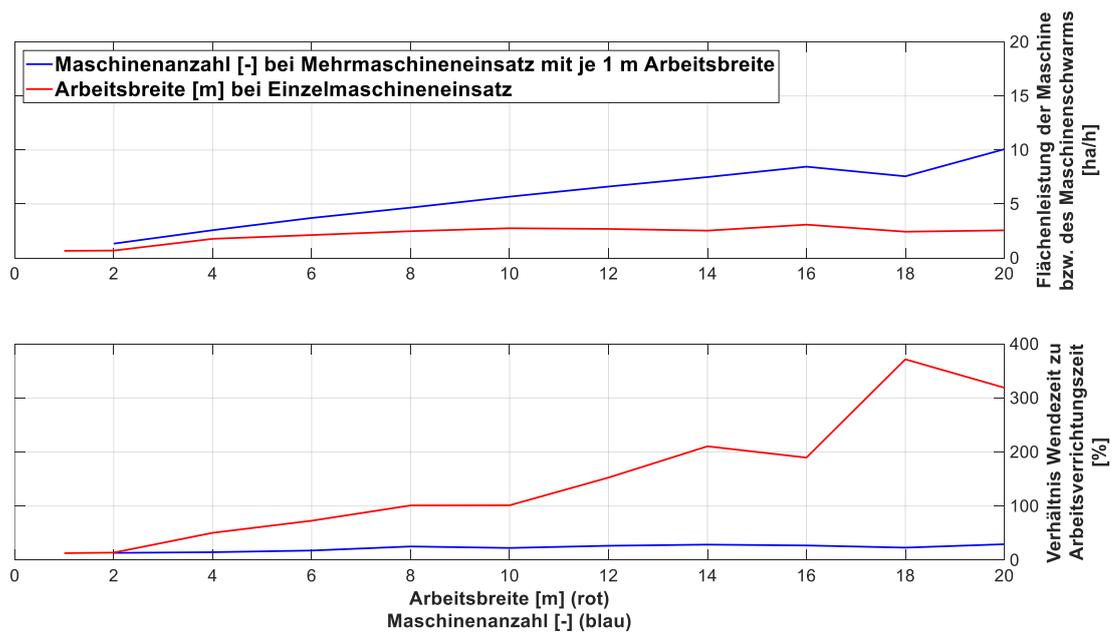


Abbildung 6: Auswertung der Feldklasse 1

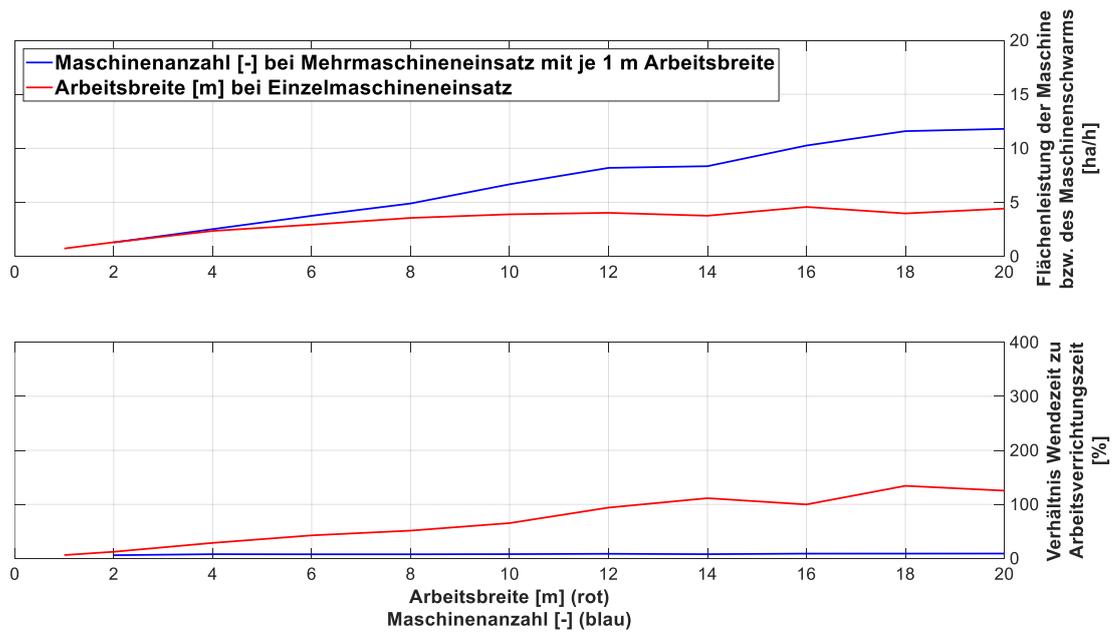


Abbildung 7: Auswertung der Feldklasse 2

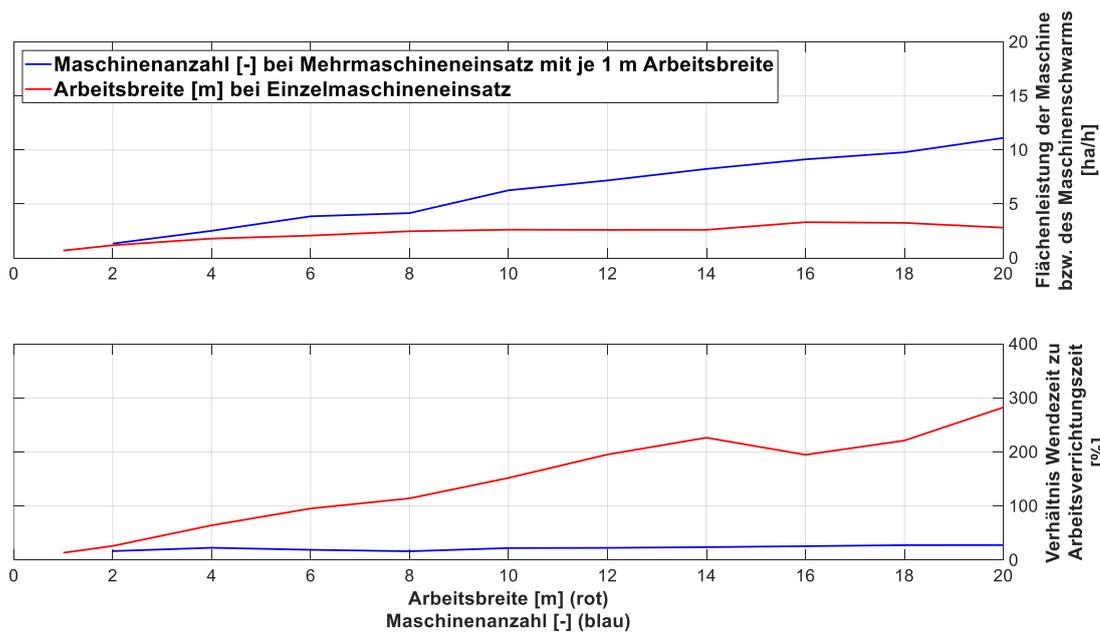


Abbildung 8: Auswertung der Feldklasse 3

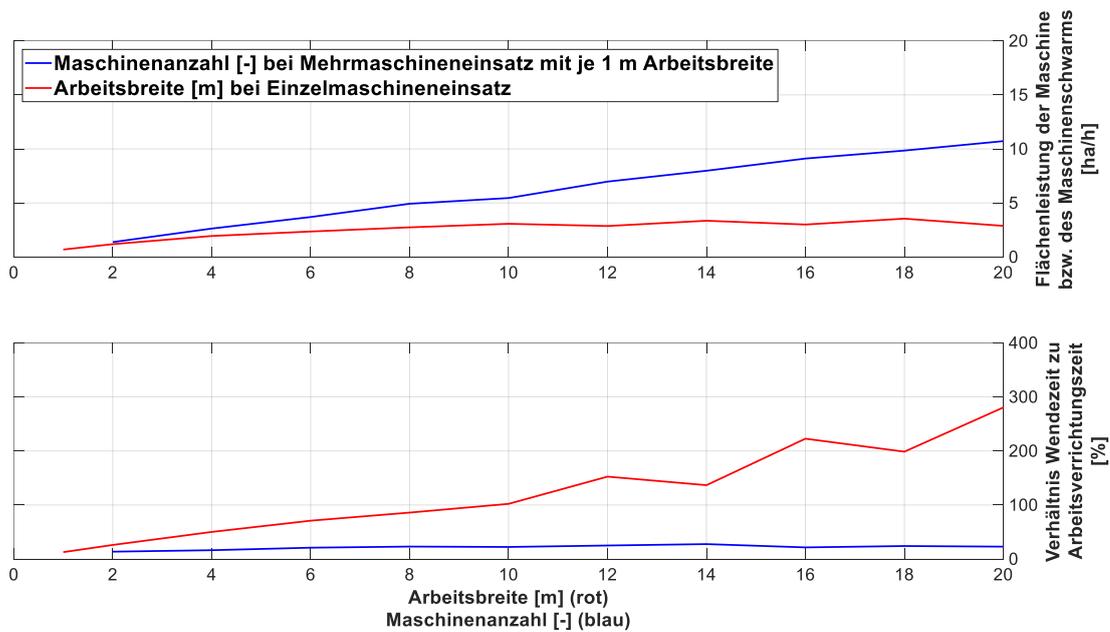


Abbildung 9: Auswertung der Feldklasse 4

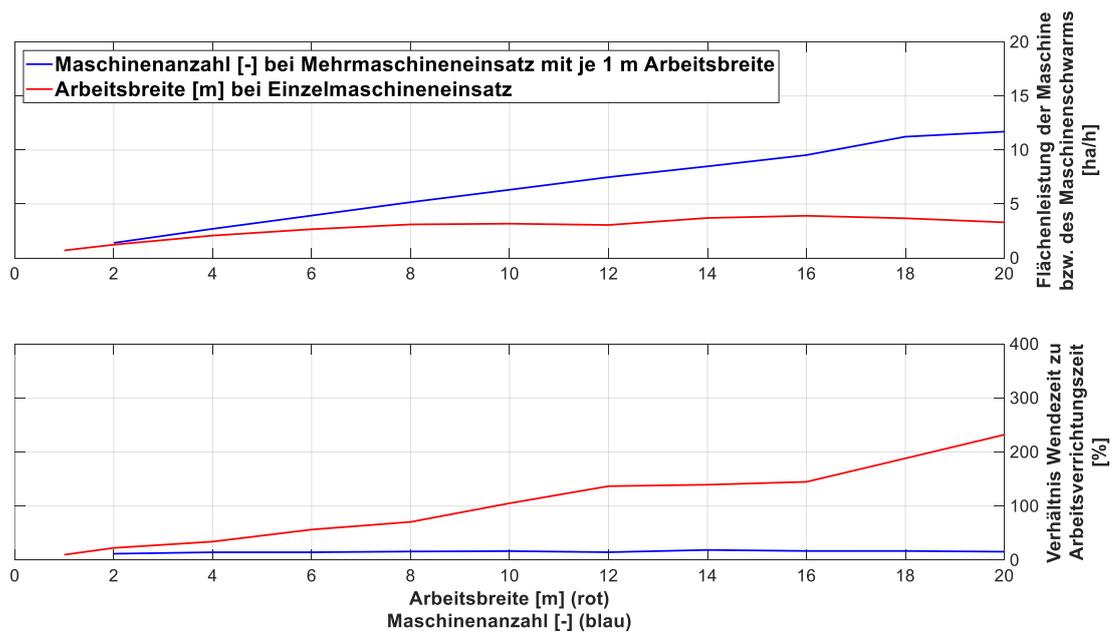


Abbildung 10: Auswertung der Feldklasse 5

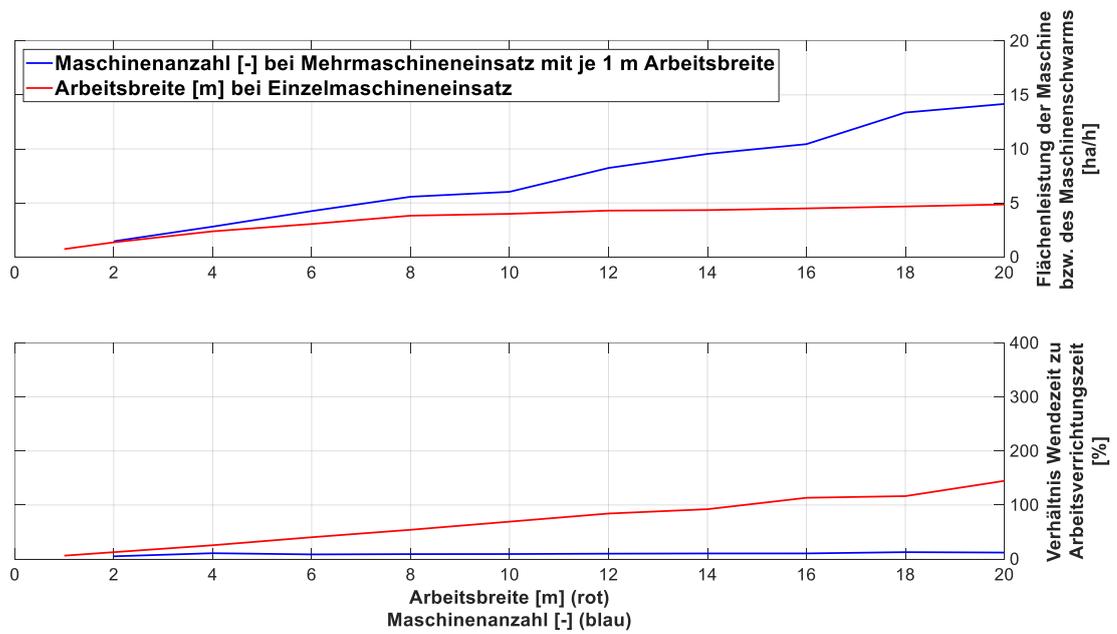


Abbildung 11: Auswertung der Feldklasse 6

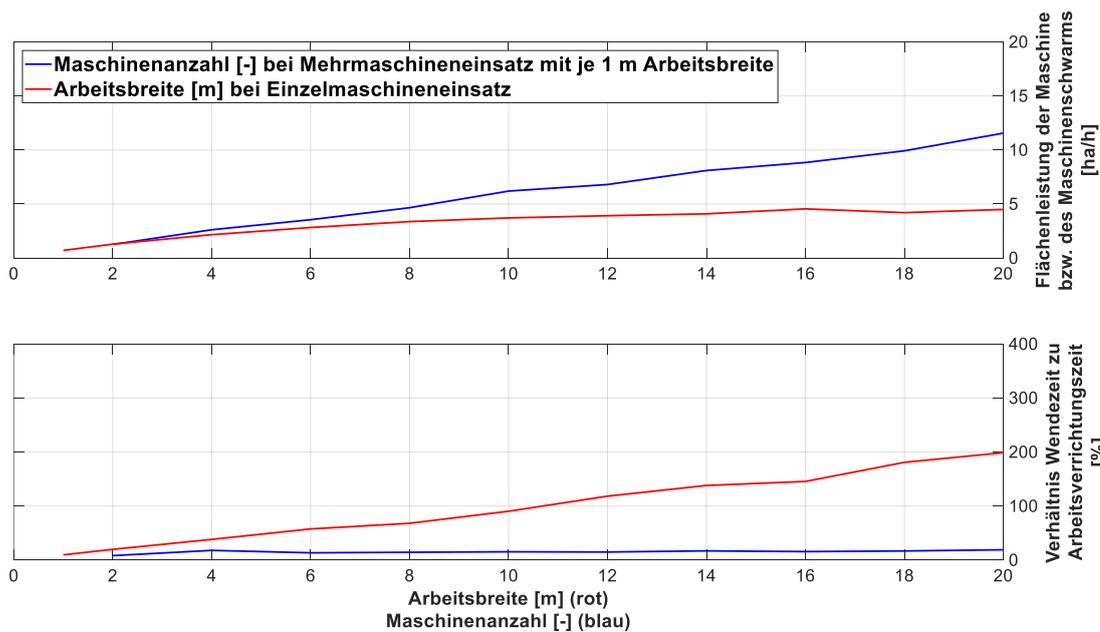


Abbildung 12: Auswertung der Feldklasse 7

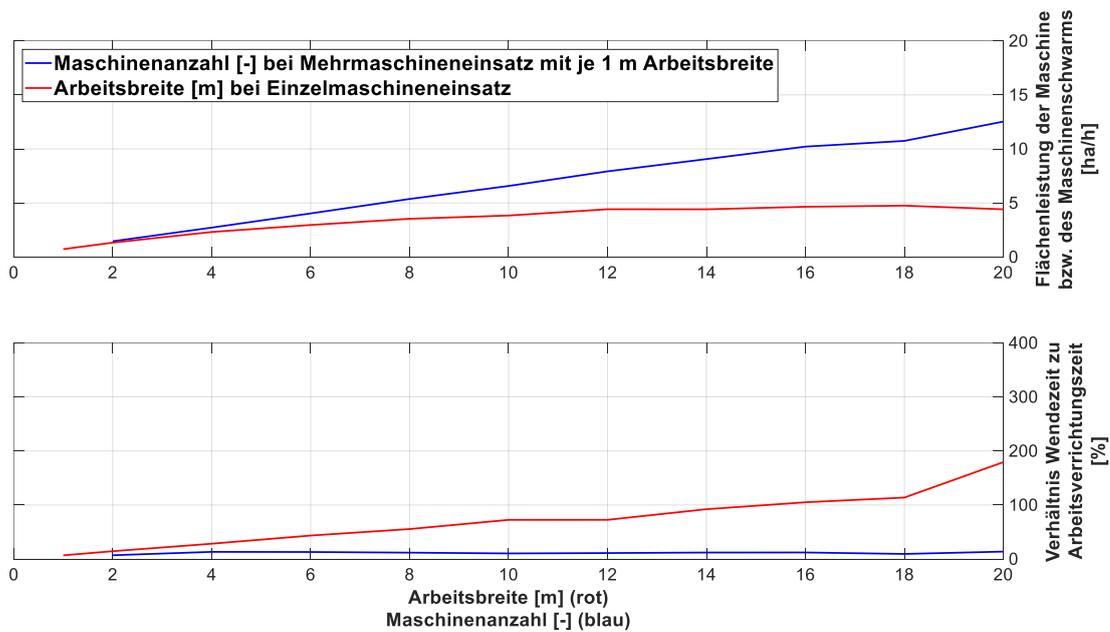


Abbildung 13: Auswertung der Feldklasse 8

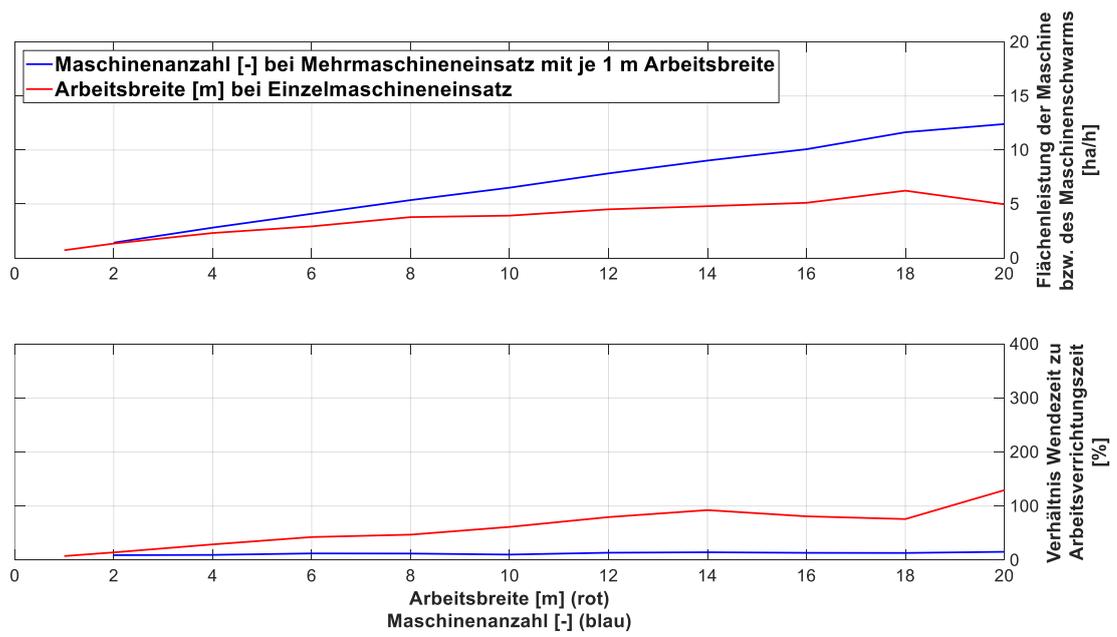


Abbildung 14: Auswertung der Feldklasse 9

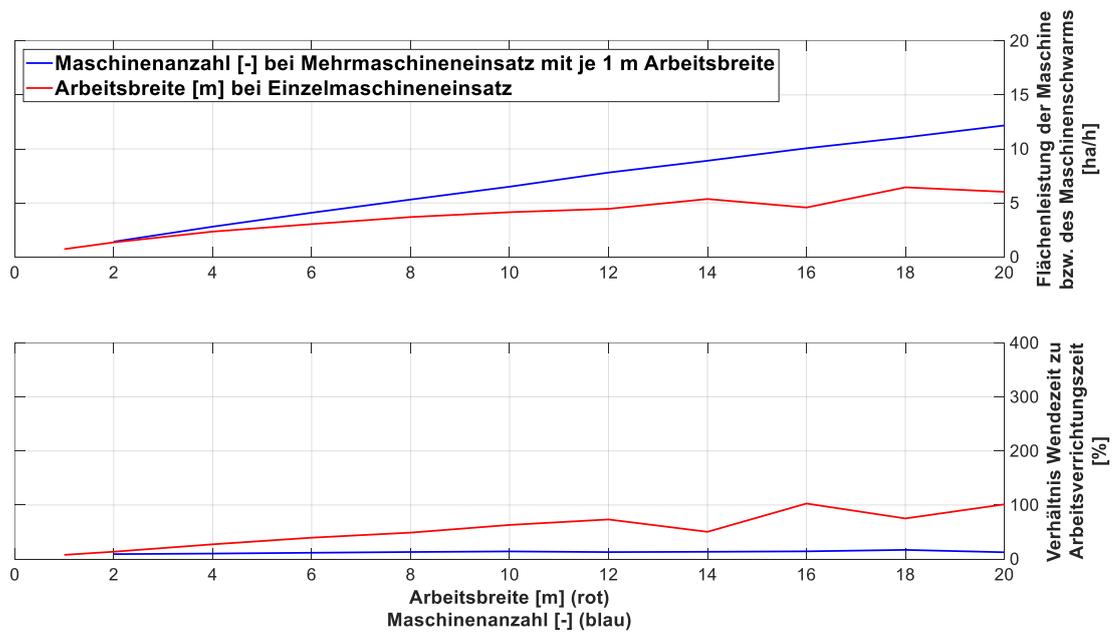


Abbildung 15: Auswertung der Feldklasse 10

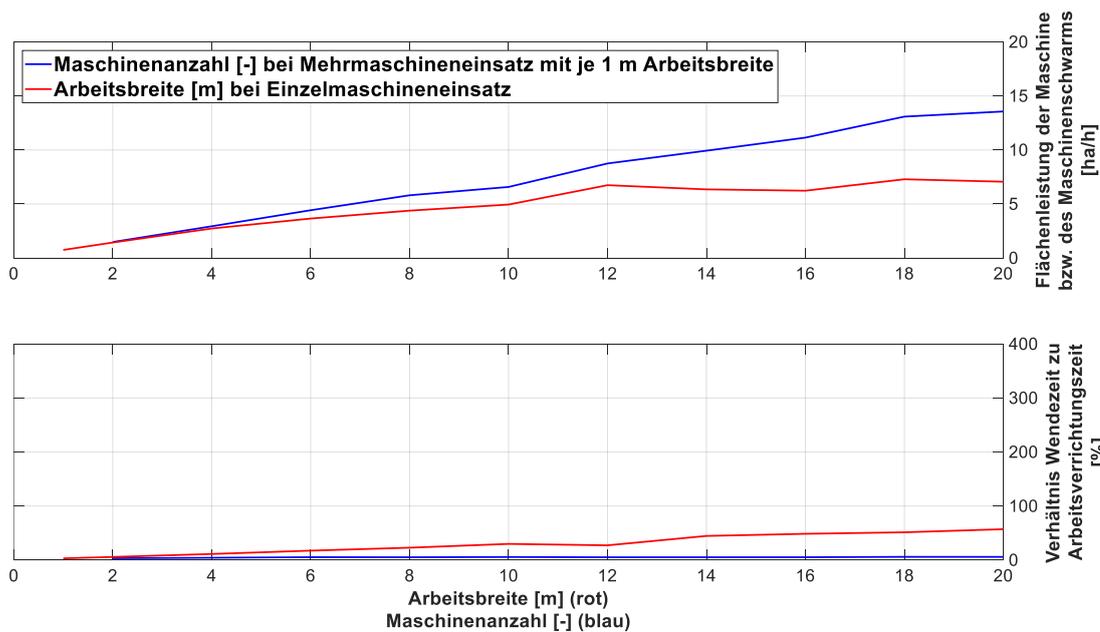


Abbildung 16: Auswertung der Feldklasse 11

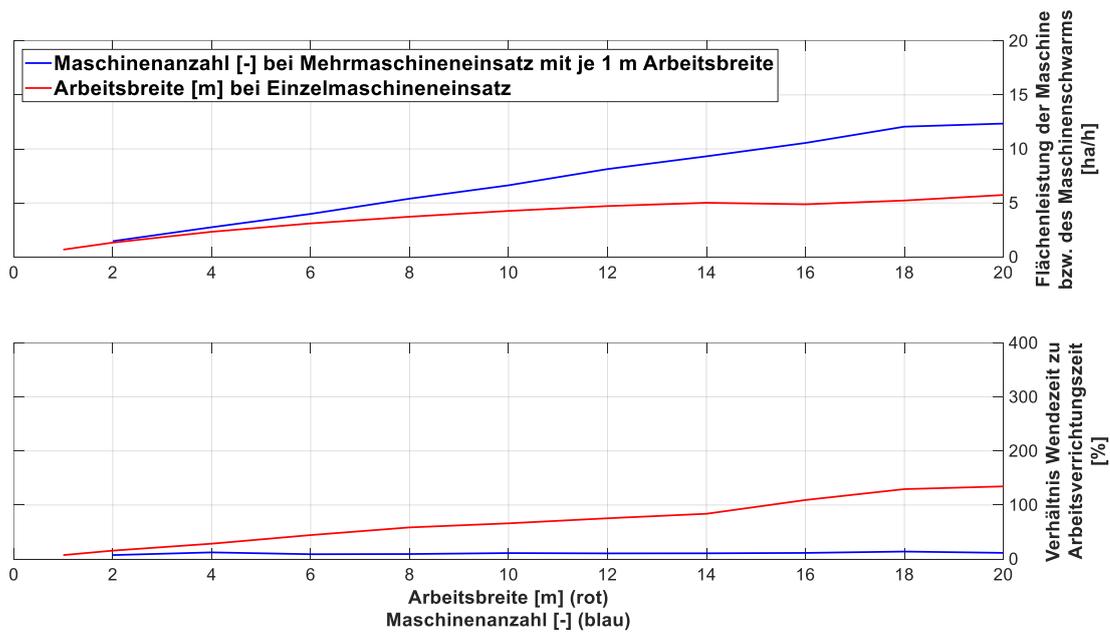


Abbildung 17: Auswertung der Feldklasse 12

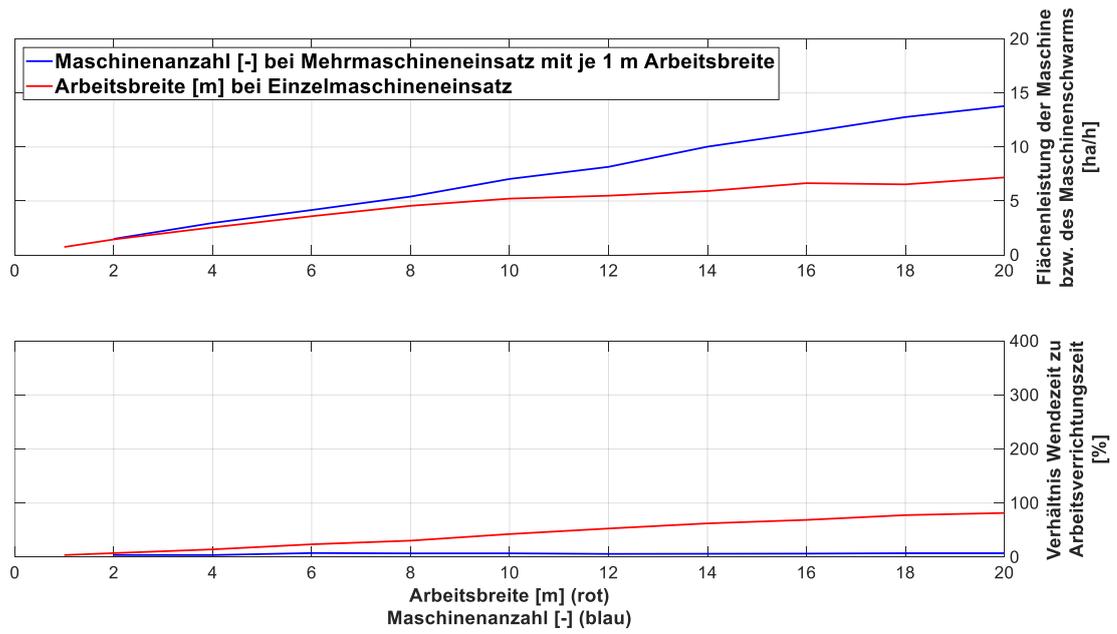


Abbildung 18: Auswertung der Feldklasse 13

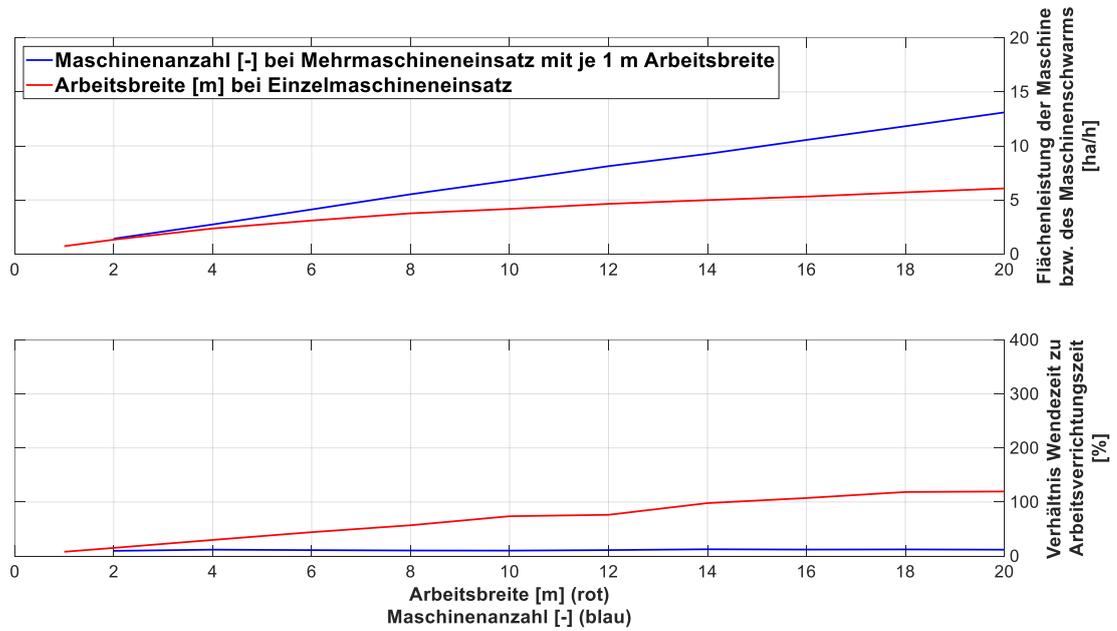


Abbildung 19: Auswertung der Feldklasse 14

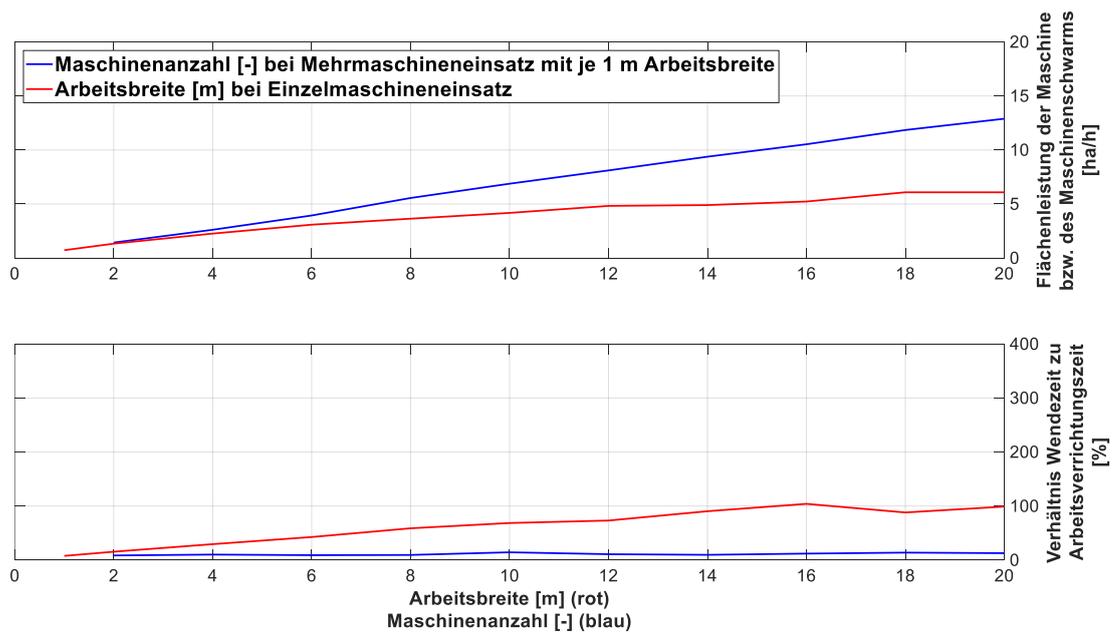


Abbildung 20: Auswertung der Feldklasse 15

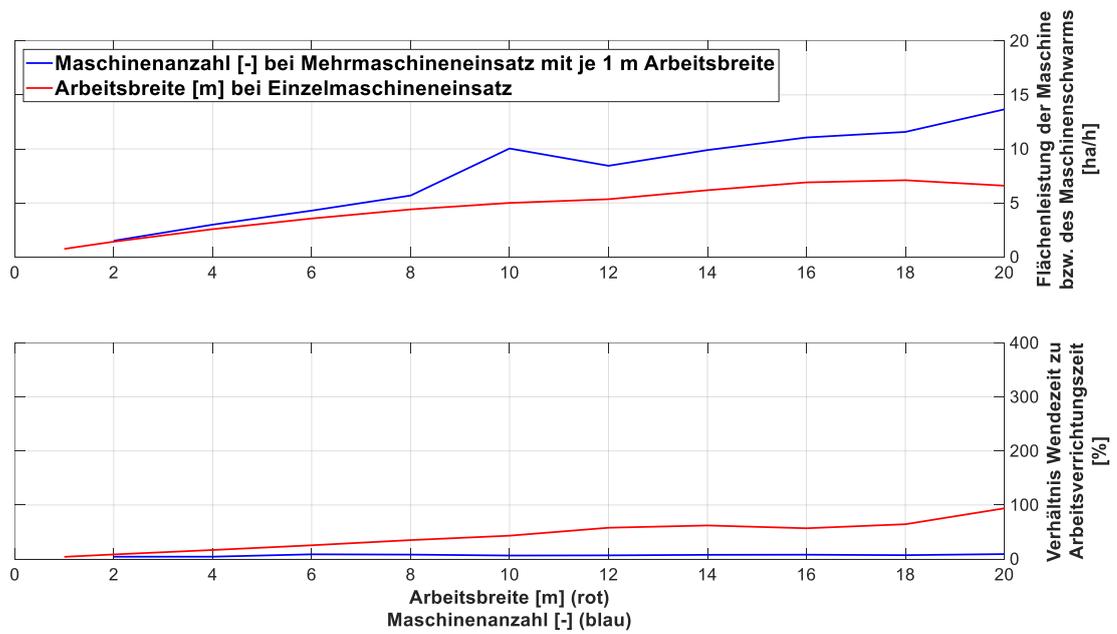


Abbildung 21: Auswertung der Feldklasse 16

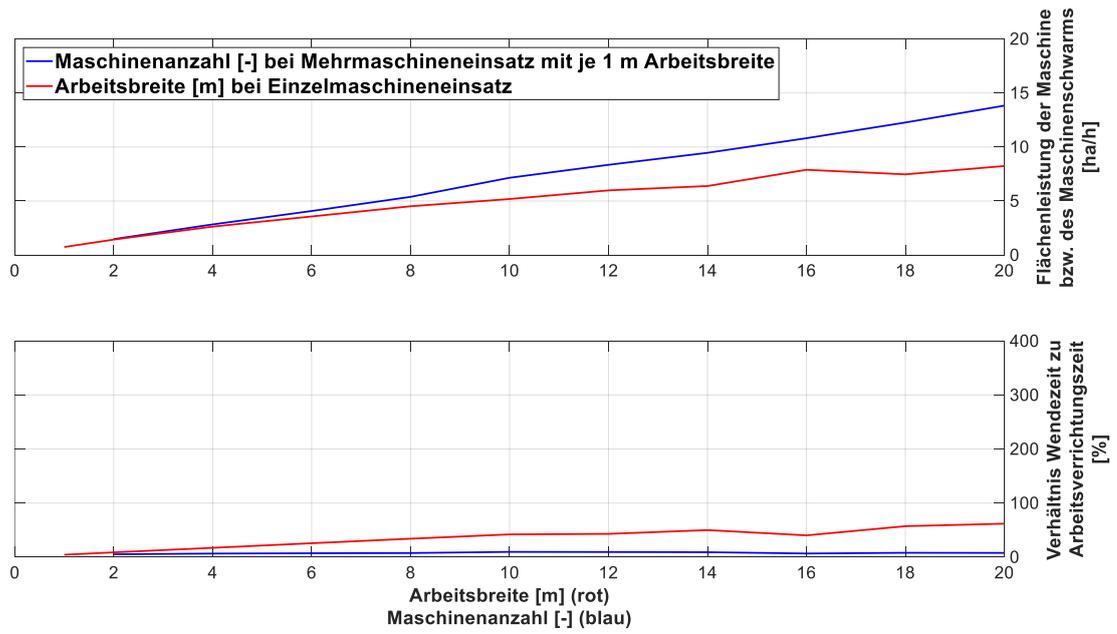


Abbildung 22: Auswertung der Feldklasse 17

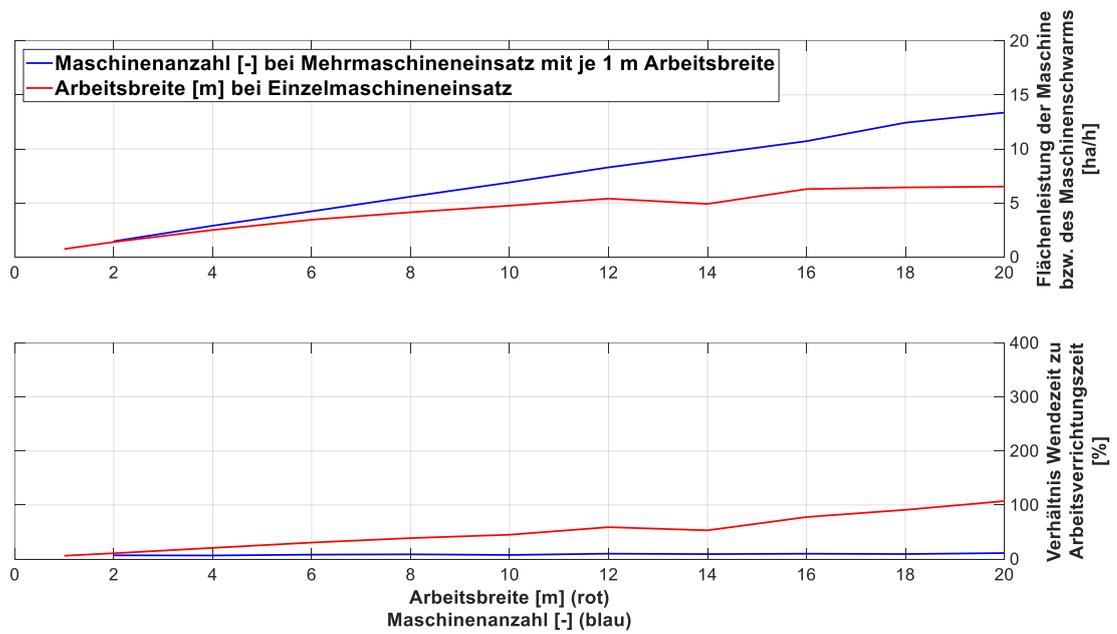


Abbildung 23: Auswertung der Feldklasse 18

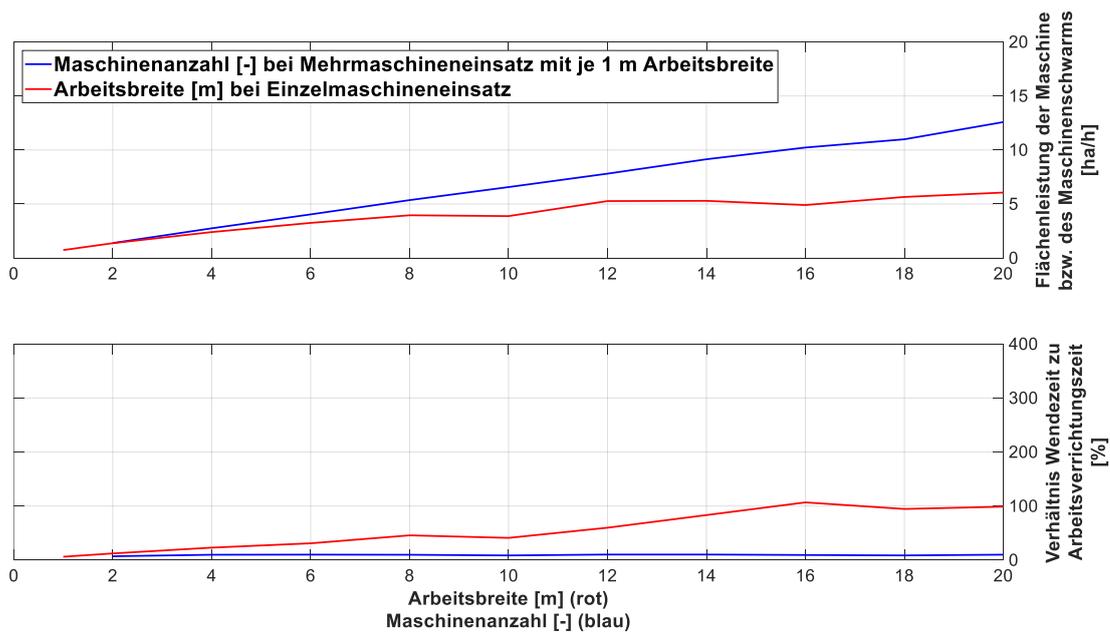


Abbildung 24: Auswertung der Feldklasse 19

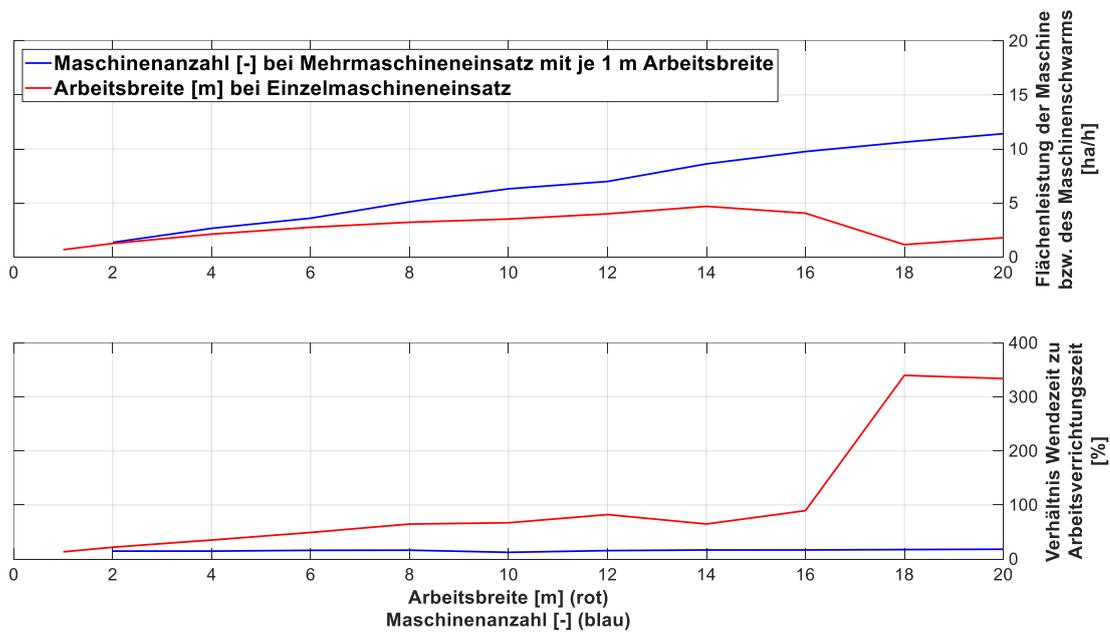


Abbildung 25: Auswertung der Feldklasse 20

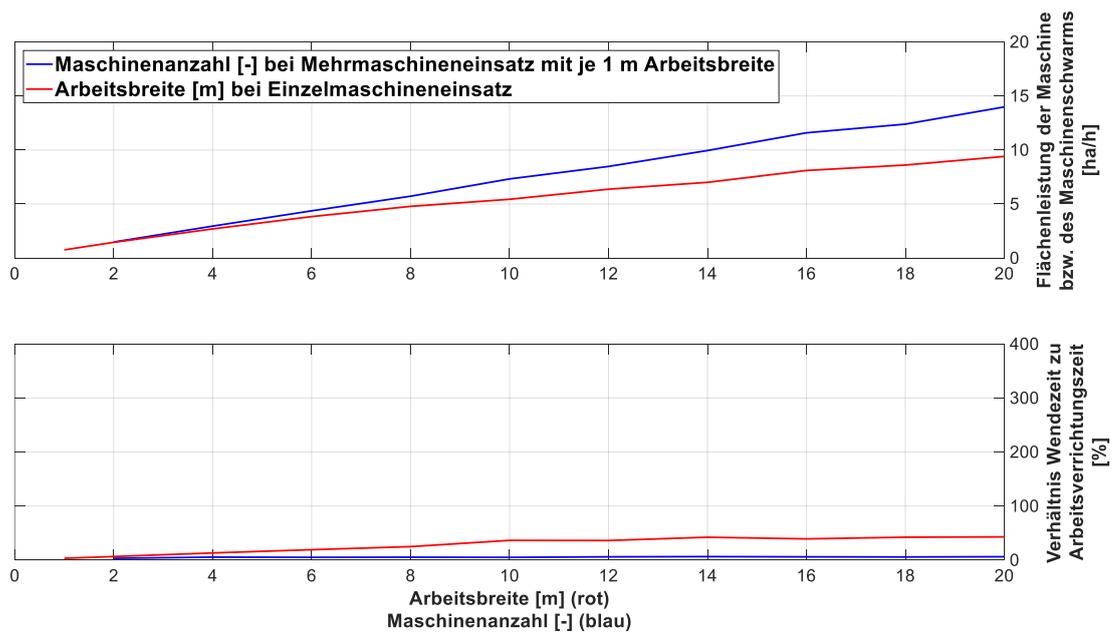


Abbildung 26: Auswertung der Feldklasse 21

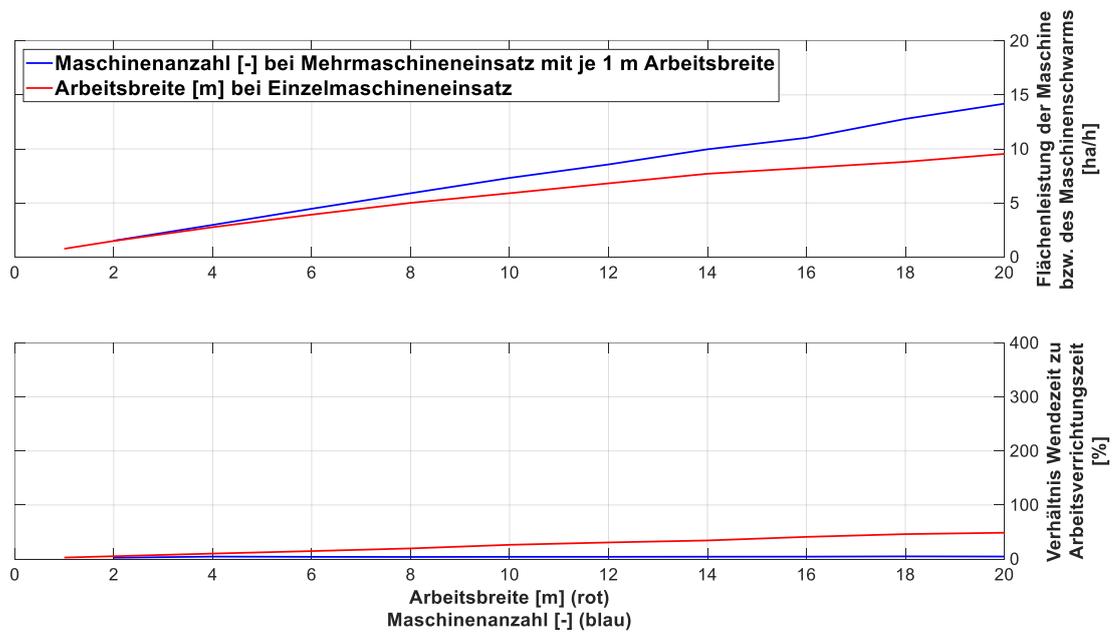


Abbildung 27: Auswertung der Feldklasse 22

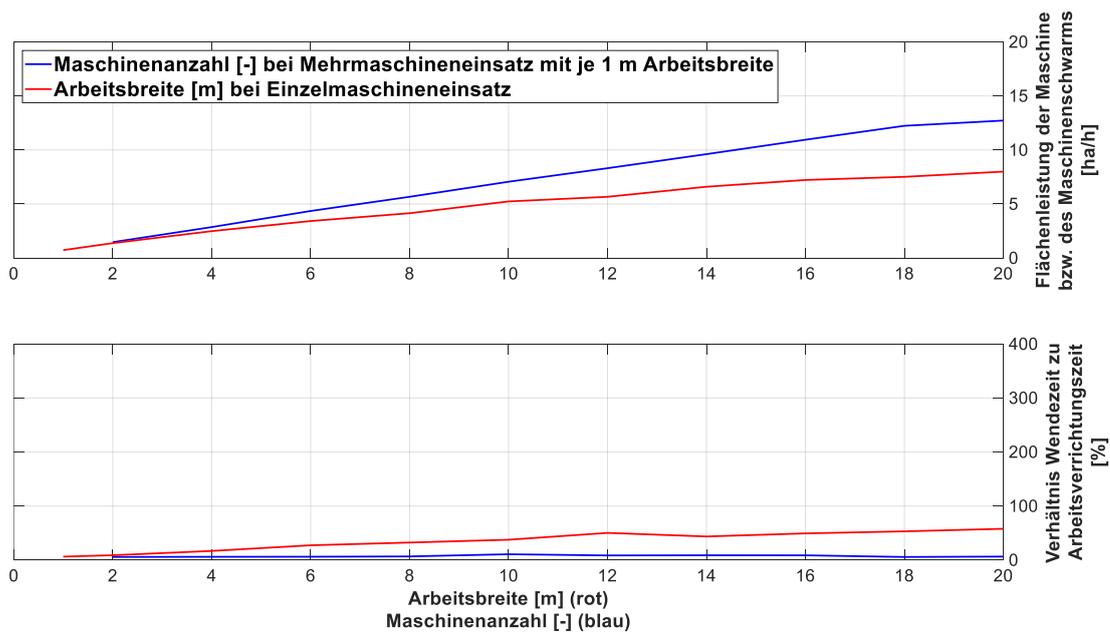


Abbildung 28: Auswertung der Feldklasse 23

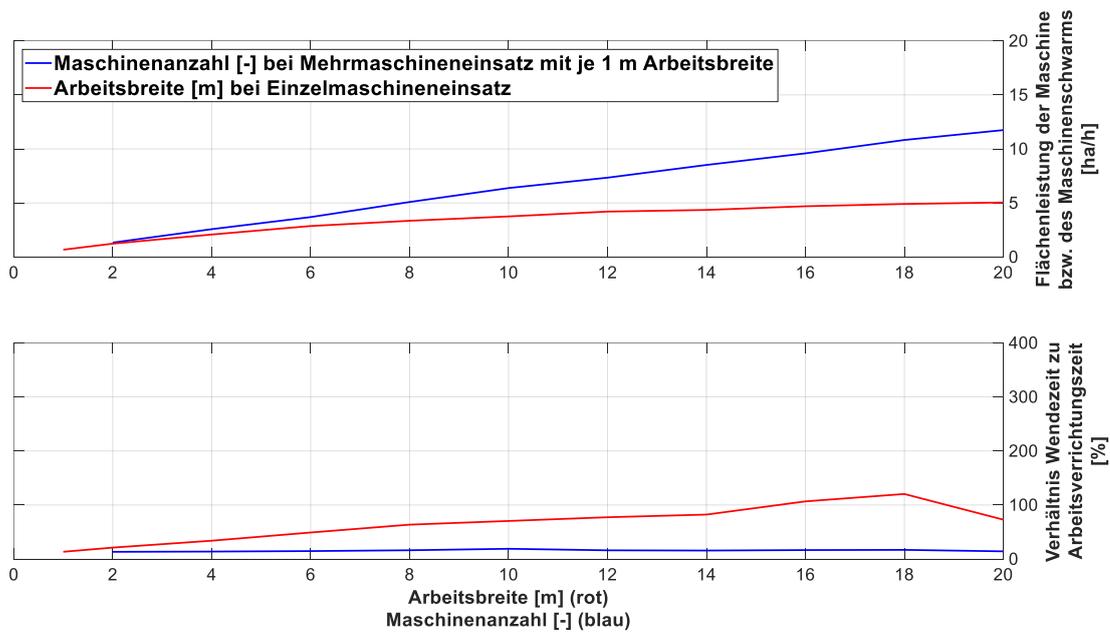


Abbildung 29: Auswertung der Feldklasse 24

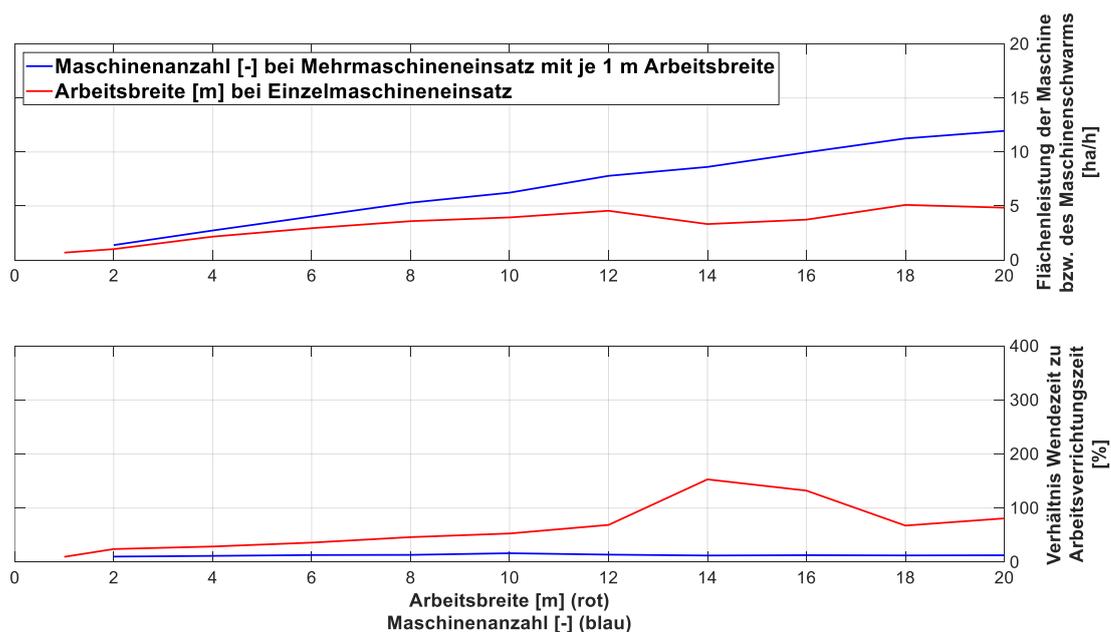


Abbildung 30: Auswertung der Feldklasse 25

Aus den Simulationsergebnissen kann folgendes abgeleitet werden:

- 1) Der Maschinenschwarm hat grundsätzlich und über alle Feldklassen eine höhere Flächenleistung, die ab einer Maschinenanzahl von 4 deutlich gegenüber den steigenden Arbeitsbreiten zunimmt.
- 2) Der Verlauf der Flächenleistungen der Roboterschwärme steigt fast linear an, wobei die Steigung sich bei den maximalen Maschinenzahlen verringert.
- 3) Die maximale Flächenleistung der Roboterschwärme sinkt auch bei kleinen oder komplexen Feldstrukturen nicht unter 10 ha/h, wobei der Einfluss der Feldgröße deutlicher wird als der der Feldkomplexität.
- 4) Der Wendezeitanteil der Maschinenwärme verhält sich über den gesamten untersuchten Bereich gleichförmig und liegt bei ca. 5 – 10 %.
- 5) Die Flächenleistung der Einzelmaschine steigt vor allem auf großen wenig komplexen Flächen ebenfalls linear an und erreicht dabei ebenfalls hohe maximale Flächenleistungen (vgl. Feldklasse 21 in Abbildung 26).
- 6) Auf kleinen und komplexen Flächen flacht der Verlauf der Flächenleistung schnell ab und eine gesteigerte Arbeitsbreite hat keine Auswirkung mehr auf die Flächenleistung (vgl. Feldklassen 1, 5 oder 25 in Abbildung 6, Abbildung 10 und Abbildung 30).
- 7) Vor allem auf kleinen und komplexen Feldern beträgt das Verhältnis von Wendezeit zu Arbeitsverrichtungszeit der breiten Einzelmaschinen teils mehrere 100 %.
- 8) Ungewöhnliche Verläufe von Flächenleistung und Wendezeitverhältnis treten bei den breiten Einzelmaschinen bei kleinen und vor allem bei komplexen Feldern auf (vgl. Feldklassen 4, 20 und 25 in Abbildung 9, Abbildung 25 und Abbildung 30). Der Grund dafür liegt wahrscheinlich in den jeweiligen spezifischen Feldformen, die durch Engstellen besonders auf große Arbeitsbreiten ansprechen.

6. Fazit und Ansätze für den ökologischen Landbau

Anhand der Auswertung konnte gezeigt werden, dass Schwärme von kleinen Maschinen auch auf heutigen Feldformen höhere Flächenleistungen und geringere Wendezeiten erreichen als einzelne große Maschinen mit gleicher effektiver Arbeitsbreite. Sie sind damit effektiver einsetzbar und bieten dem Landwirt die Möglichkeit bestimmte Verfahrensschritte wie die Aussaat, die Düngung oder die Pflanzenschutzbringung pflanzenbaulich optimal zu terminieren. In der Diskussion über die zukünftige Größe von autonomen Landmaschinen entsteht somit, neben dem implizit geringeren Sicherheitsrisiko, ein weiterer Vorteil für kleine Maschinen.

In Bezug auf das Simulationswerkzeug ist in zukünftigen Arbeiten der Einfluss anderer Bearbeitungsstrategien, beispielsweise von Konturfahrten, zu prüfen. Vermutlich werden diese Strategien die Flächenleistung beider Mechanisierungskonzepte steigern, jedoch mehr Vorteile für große Maschinen bringen.

Für den ökologischen Landbau sind diese Ergebnisse interessant, da vor allem die hochgenau mechanische Unkrautbekämpfung mit heutigen Maschinen weder mit großen Arbeitsbreiten noch mit entsprechender Flächenleistung ausführbar ist. Kleine autonome Maschinen bieten hier mehrere Vorteile. Zum einen sind sie aufgrund ihrer geringen Größe und Masse dichter und genauer an die Nutzpflanzen zu führen und ermöglichen damit eine effektivere Unkrautbekämpfung, zum anderen haben die Untersuchungen gezeigt, dass mit Schwärmen kleiner Maschinen hohe Flächenleistungen zu erreichen sind.

In Bezug auf das Spot-Farming konnte gezeigt werden, dass die Flächenleistung auch auf kleinen und komplexen Spots durch den Einsatz kleiner Maschinen gegenüber der Flächenleistung von großen Maschinen auf heutigen Feldformen kaum abnimmt.

7. Literaturverzeichnis

- [ALPS 2017] Schlussbericht „Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzensystemen“, abrufbar bei Organic Eprints unter http://orgprints.org/32438/1/32437_14NA004_011_012_thuenen_institut_de_Witte_Landmaschinen_Pflanzenbau.pdf
- [Wegener 2017] Wegener, J.-K.; Urso, L.-M.; Hörsten, D. von; Minßen, T.-F.; Gaus, C.-C.: [Neue Pflanzensysteme entwickeln – welche innovativen Techniken werden benötigt?](#) LANDTECHNIK Band 72, Nr.2, Seiten 91-100, ISSN 0023-8082
- [Frerichs 2017] Frerichs, L.; Hanke, S.; Steinhaus, S.; Trösken, L.: EKoTech - A holistic approach to reduce CO2 emissions of agricultural machinery in process chains. In: Proceedings - 9th AVL International Commercial Powertrain Conference - May 10th - 11th 2017 - Messe Congress Graz, Austria
- [ESRI] <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>