

Optimierung des Anbaus von Sojabohnen: Bestimmung des Vorfruchtwertes und der N₂-Fixierungsleistung sowie Reduzierung der Bodenbearbeitung

Optimization of the cultivation of soybeans - Determination of the preceding crop effect and the nitrogen fixation as well as the reduction of the soil tillage

FKZ 14EPS019 und FKZ 14EPS020

Koordination des Verbundvorhabens:

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg

Kutschenweg 20, 76287 Rheinstetten

Tel.: +49 721 9815-211

Fax: +49 721 9815-202

E-Mail: andreas.butz@ltz.bwl.de

Internet: <https://www.ltz-augustenberg.de>

Autoren:

Butz, Andreas; Paeßens, Benedikt, Urbatzka, Peer

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen der Eiweißpflanzenstrategie.

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 Eiweißpflanzenstrategien können sich noch Änderungen ergeben.

„Optimierung des Anbaus von Sojabohnen
– Bestimmung des Vorfruchtwertes und
der N₂-Fixierungsleistung sowie Reduzierung der
Bodenbearbeitung –“

FixVorSaat Soja

Schlussbericht

09.03.2015 – 31.12.2018

Antragsteller:

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ)

Dr. Andreas Butz

Neßlerstraße 25

76227 Karlsruhe

Förderkennzeichen: 2814EPS019

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Dr. Peer Urbatzka

Lange Point 12

85356 Freising

Förderkennzeichen: 2814EPS020

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Berichterstattende Personen:

Dr. Andreas F. Butz, Benedikt Paeßens

LTZ Augustenberg

Kutschenweg 20

76287 Rheinstetten

Dr. Peer Urbatzka

LfL Bayern

Lange Point 12

85356 Freising

Kurzfassung

*„Optimierung des Anbaus von Sojabohnen
– Bestimmung des Vorfruchtwertes und der N₂-Fixierungsleistung sowie Reduzierung
der Bodenbearbeitung –“*

Dr. Andreas Butz, Benedikt Paeßens, *LTZ Augustenberg, Kutschenweg 20, 76287
Rheinstetten, andreas.butz@ltz.bwl.de*

Dr. Peer Urbatzka, *LfL Bayern, Lange Point 12, 85356 Freising, Peer.Urbatzka@lfl.bayern.de*

Bisher sind die N₂-Fixierung aus der Luft, die N-Salden (N₂-Fixierung minus N-Abfuhr) und die Vorfruchtwirkung von Soja für Deutschland nicht beschrieben. Diese wurde in Feldversuchen auf einem konventionell und zwei ökologisch bewirtschafteten Standorten im Vergleich zu Körnererbsen untersucht. Die N₂-Fixierung von Soja fiel um knapp 100 (ökologisch) und 40 (konventionell) kg ha⁻¹ höher aus als die der Erbsen. Die N-Bilanz war zwischen Soja und Erbsen vergleichbar. Die Vorfruchtwirkung von Erbsen ist aufgrund eines höheren Ertrages in der Nachfrucht Weizen im ökologischen Landbau höher als die von Soja einzuschätzen. Im konventionellen Anbau unterschied sich dagegen die Leistung des nachfolgenden Weizens nicht. Soja passt auch aufgrund einer hohen Wirtschaftlichkeit sehr gut in die Fruchtfolgen. Im ökologischen Anbau erwirtschaftet sie im Fruchtfolgeausschnitt Körnerleguminose – Weizen einen um etwa ein Drittel höheren Deckungsbeitrag als Erbsen, im konventionellen konnte sie mit der Leistung von Körnermais mithalten.

In einem dreijährigen Exaktversuch und in On-Farmversuchen wurde die Eignung von reduzierter Bodenbearbeitung im konventionellen Sojaanbau geprüft. Mit Mulchsaat und Strip-Till konnte Soja agronomisch und ökonomisch erfolgreich angebaut werden. Hingegen war die Direktsaat in gewalzten bzw. abgefahren Grünroggen mit 14,4 dt ha⁻¹ im Ertrag niedriger und hatte einen erheblichen wirtschaftlichen Nachteil. Ferner konnte in Mulchsaat und Strip-Till auf die Applikation von Glyphosat vor der Saat ohne Ertragseinbußen oder einen höheren Unkrautbesatz verzichtet werden.

Abstract

„Optimization of the cultivation of soybeans - Determination of the preceding crop effect and the nitrogen fixation as well as the reduction of the soil tillage“

Dr. Andreas Butz, Benedikt Paeßens, *LTZ Augustenberg, Kutschenweg 20, 76287 Rheinstetten, andreas.butz@ltz.bwl.de*

Dr. Peer Urbatzka, *LfL Bayern, Lange Point 12, 85356 Freising, Peer.Urbatzka@lfl.bayern.de*

Fixation of atmospheric nitrogen, N balance (N₂-fixation minus N-removal) and the effects on succeeding crop have not been quantified for soybeans growing in Germany. This was addressed in field trials on a conventional and two organic sites and compared to grain peas. N₂-fixation of soybean exceeded N₂-fixation of pea by almost 100 (organic) and 40 (conventional) kg ha⁻¹, while the N balance of soybean and grain peas was comparable. In organic farming the effects on succeeding crops of pea is estimated to be higher than of soybean due to the higher yield of its succeeding crop wheat. In contrast, there was no difference in yield of the preceding wheat under conventional cultivation. Soybean is highly suitable within crop rotation due to its high economic benefit. Organically grown soybean generated a contribution margin in the segment of grain legumes and wheat within the crop rotation that is about one third higher than that of peas, while conventionally grown contribution margin were similar to grain maize. The suitability of reduced tillage in conventional soybean cultivation was tested in a three-year field trial and on-farm trials. Soybeans were grown agronomic and economic successfully using mulch sowing and strip-till. When directly sown in rolled or removed green rye, however, yield was reduced by 14.4 dt ha⁻¹ and resulted in an economic disadvantage. Furthermore, the application of glyphosate before sowing could be renounced without yield reduction or higher weed pressure using the mulch sowing or strip-till method.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Kurzfassung | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| Inhaltsverzeichnis..... | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 8 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 10 |
| Tabellenverzeichnis..... | 14 |
| 1. Einführung | 16 |
| 1.1. Gegenstand des Vorhabens..... | 16 |
| 1.2. Ziele und Aufgabenstellung des Projektes | 16 |
| 1.2.1. Ziele und Aufgabenstellung..... | 16 |
| 1.2.2. Bezug des Projektes zu den einschlägigen Zielen der Eiweißpflanzenstrategie .. | 18 |
| 1.2.3. Planung und Ablauf des Projektes | 18 |
| 2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde | 20 |
| 3. Material und Methoden | 23 |
| 3.1. Witterung..... | 23 |
| 3.1.1. Rheinstetten-Forchheim..... | 23 |
| 3.1.2. Forchheim am Kaiserstuhl | 24 |
| 3.1.3. Hohenkammer..... | 26 |
| 3.1.4. Stifterhof (Östringen)..... | 27 |
| 3.2. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen Anbau | 28 |
| 3.3. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau | 30 |
| 3.4. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Sojaanbau..... | 31 |
| 3.4.1. Versuche..... | 31 |
| 3.4.2. Interviewstudie | 32 |
| 3.5. Schätzung der N ₂ -Fixierungsleistung und N-Bilanzierung..... | 33 |
| 3.6. Ökonomische Leistung des Sojaanbaus | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.7. Statistische Auswertung | 35 |
| 4. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse | 36 |
| 4.1. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen Anbau | 36 |
| 4.1.1. Rheinstetten | 36 |
| 4.1.2. Nachfrucht Winterweizen am Standort Rheinstetten | 39 |
| 4.2. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau | 44 |
| 4.2.1. Standort Forchheim am Kaiserstuhl | 44 |
| 4.2.2. Winterweizen am Standort Forchheim am Kaiserstuhl | 48 |
| 4.2.3. Standort Hohenkammer | 52 |
| 4.2.4. Winterweizen am Standort Hohenkammer | 56 |
| 4.3. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau | 60 |
| 4.3.1. Standort Stifterhof | 60 |
| 4.3.2. Standort Eppingen | 63 |
| 4.3.3. Standort Riedlingen | 64 |
| 4.3.4. Standort Zaisenhausen | 65 |
| 4.3.5. Interviewstudie | 66 |
| 4.4. Ökonomie | 68 |
| 4.4.1. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen Anbau | 68 |
| 4.4.2. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau | 69 |
| 4.4.3. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Sojaanbau | 78 |
| 5. Diskussion der Ergebnisse | 80 |
| 5.1. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen | 80 |
| 5.2. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau | 84 |
| 6. Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse ... | 94 |
| 6.1. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen | 94 |
| 6.2. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau | 94 |
| 7. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weitere Fragestellungen | 95 |
| 8. Zusammenfassung | 97 |

| | |
|--|-----|
| 8.1. Vorfruchtwirkung und N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen | 97 |
| 8.2. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau..... | 99 |
| 9. Referenzen | 102 |
| 10. Veröffentlichungen..... | 107 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| AP | Arbeitspaket |
| BÖLN | Bundesprogramm ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft |
| BVL | Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit |
| BW | Baden-Württemberg |
| bzw. | beziehungsweise |
| DAL | direkt- und arbeitskostenfreie Leistungen |
| dt | Dezitonne |
| EOZF | Erbsen ohne Zwischenfrüchte |
| EPS | Eiweißpflanzenstrategie |
| et al. | et alii |
| EZF | Erbsen mit Zwischenfrüchten |
| FAKT | Förderprogramm Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl |
| FKZ | Förderkennzeichen |
| GMO | genetically modified organism |
| ha | Hektar |
| KRZ | Kraichgau Raiffeisen Zentrum eG |
| LfL | Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft |
| LTZ | Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg |
| mH | mit Herbizid |
| mTH | mit Totalherbizid |
| N | Stickstoff |
| N ₂ | molekularer Stickstoff |
| NIRS | Nahinfrarotspektroskopie |
| N _{min} | mineralischer Stickstoff |
| oH | ohne Herbizid |
| oTH | ohne Totalherbizid |
| r | Korrelationskoeffizient |
| R ² | Bestimmtheitsmaß |
| s.o. | siehe oben |
| USA | Vereinigten Staaten von Amerika |
| VDLUFA | Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten |

| | |
|-------|--------------|
| Veg | Vegetation |
| vrgl. | vergleiche |
| WDH | Wiederholung |
| WW | Winterweizen |
| z.B. | zum Beispiel |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Rheinstetten-Forchheim. | 23 |
| Abbildung 2: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 (links) und im Jahr 2018 (rechts) am Standort Rheinstetten-Forchheim. | 24 |
| Abbildung 3: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl. | 24 |
| Abbildung 4: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 (links) und im Jahr 2018 (rechts) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl. | 25 |
| Abbildung 5: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Hohenkammer. | 26 |
| Abbildung 6: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 (links) und im Jahr 2018 (rechts) am Standort Hohenkammer. | 27 |
| Abbildung 7: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Stifterhof in Östringen. | 27 |
| Abbildung 8: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 am Standort Stifterhof in Östringen. | 28 |
| Abbildung 9: Blattfallkasten | 29 |
| Abbildung 10: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbse ohne und mit Zwischenfrucht (ZF) und Soja) gemittelt über die Sorten (Erbse: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim | 36 |
| Abbildung 11: Kornerträge (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹ : Körnermais und Sommergerste) und Biomasseerträge (bei 100 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹ : Silomais) von verschiedenen Kulturen und Sorten (Körnermais: <i>Ferarixx</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim | 37 |
| Abbildung 12: N ₂ -Fixierungsleistung (kg ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbse ohne Zwischenfrucht und Soja) mit den Sorten (Erbse: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim | 38 |
| Abbildung 13: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) zum Vegetationsende des Winterweizens (<i>Ambello</i>) jeweils nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht, Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Körnermais: <i>Ferarixx</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim | 40 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 14: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) zu Vegetationsbeginn des Winterweizens (Ambello) jeweils im Folgejahr nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht, Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Körnermais: <i>Ferarixx</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim..... | 41 |
| Abbildung 15: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) des Winterweizens (Ambello) jeweils im Folgejahr nach Anbau der verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht, Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Körnermais: <i>Ferarixx</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim..... | 42 |
| Abbildung 16: Rohproteingehalt (% in der Trockenmasse) von Winterweizen (Ambello) jeweils im Folgejahr nach Anbau der verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) gemittelt über die Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Körnermais: <i>Ferarixx</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Rheinstetten-Forchheim | 43 |
| Abbildung 17: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl..... | 44 |
| Abbildung 18: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹ : Sommergerste (SG), und bei 100 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹ : Silomais (SM)) von verschiedenen Kulturen (Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Forchheim | 45 |
| Abbildung 19: N ₂ -Fixierungsleistung (kg ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl | 46 |
| Abbildung 20: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) zum Vegetationsende nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl . | 48 |
| Abbildung 21: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) zum Vegetationsbeginn nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl . | 49 |
| Abbildung 22: Kornerträge (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl . | 50 |
| Abbildung 23: Rohproteingehalt (% in der Trockenmasse) von Winterweizen (<i>Florian</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl . | 51 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 24: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i>) am Standort Hohenkammer | 52 |
| Abbildung 25: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹ : Hafer und bei 100 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹ : Silomais) von verschiedenen Kulturen (Hafer und Silomais) mit den Sorten (Hafer: <i>Aragon</i> (2015), <i>Max</i> (2016-2017), Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Hohenkammer | 53 |
| Abbildung 26: N ₂ -Fixierungsleistung (kg ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i>) am Standort Hohenkammer..... | 54 |
| Abbildung 27: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) zum Vegetationsende nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Hafer: <i>Aragon</i> (2015), <i>Max</i> (2016-2017), Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Hohenkammer | 56 |
| Abbildung 28: N _{min} -Gehalte (kg ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) zum Vegetationsbeginn nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Hafer: <i>Aragon</i> (2015), <i>Max</i> (2016-2017), Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Hohenkammer | 57 |
| Abbildung 29: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Hafer: <i>Aragon</i> (2015), <i>Max</i> (2016-2017), Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Hohenkammer | 58 |
| Abbildung 30: Rohproteingehalt (% in der Trockenmasse) von Winterweizen (<i>Florian</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) am Standort Hohenkammer..... | 59 |
| Abbildung 31: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) der Sojabohnensorte <i>Sultana</i> in Abhängigkeit des Anbausystems | 60 |
| Abbildung 32: Unkrautdeckungsgrad in Parzellen mit der Sojabohnensorte <i>Sultana</i> in Abhängigkeit des Anbausystems mit verschiedenen Herbizidstrategien (Direktsaat: Anwendung von Voraufbauherbiziden nach der Saat (mH) und keine Anwendung eines Herbizides (oH), Mulchsaat und Strip-Till: Anwendung von Glyphosat vor der Saat (mTH) oder Verzicht auf Glyphosat vor der Saat (oTH) und jeweils Einsatz von Voraufbauherbiziden nach der Saat) am Standort Stifterhof (Östringen) über zwei Jahre (2015 und 2017) jeweils im Juli..... | 61 |
| Abbildung 33: Unkrautdeckungsgrad in Parzellen mit der Sojabohnensorte <i>Sultana</i> in Abhängigkeit des Anbausystems mit verschiedenen Herbizidstrategien (Direktsaat: Anwendung von Voraufbauherbiziden nach der Saat (mH) und keine Anwendung eines Herbizides (oH), Mulchsaat und Strip-Till: Anwendung von Glyphosat vor der Saat (mTH) oder Verzicht auf Glyphosat vor der Saat (oTH) und jeweils Einsatz von Voraufbauherbiziden nach der Saat) am Standort Stifterhof (Östringen) über zwei Jahre (2015 und 2017) jeweils zur Ernte | 62 |
| Abbildung 34: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) der Sojabohnensorte <i>Sultana</i> am Standort Eppingen in Abhängigkeit des Anbausystems..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 35: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha ⁻¹) der Sojabohnensorte <i>Sultana</i> am Standort Riedlingen in Abhängigkeit des Anbausystems..... | 64 |
| Abbildung 36: Kornertrag (dt ha ⁻¹) der Sojabohnensorte <i>Sultana</i> am Standort Zaisenhausen in Abhängigkeit des Anbausystems | 65 |
| Abbildung 37: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, und Körnermais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Körnermais: <i>Ferarixx</i>) am Standort Rheinstetten..... | 68 |
| Abbildung 38: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Ambello</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Silomais, Sommergerste und Körnermais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Körnermais: <i>Ferarixx</i>) am Standort Rheinstetten ... | 69 |
| Abbildung 39: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Saludo</i> und <i>Ronaldinio</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl | 70 |
| Abbildung 40: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Hafer: <i>Max</i> , Silomais: <i>Saludo</i> und <i>Ronaldinio</i>) am Standort Hohenkammer | 71 |
| Abbildung 41: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Sommergerste: <i>Grace</i> , Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl..... | 72 |
| Abbildung 42: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) von Winterweizen (<i>Florian</i>) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> , Soja: <i>ES Mentor</i> und <i>Merlin</i> , Hafer: <i>Aragon</i> (2015), <i>Max</i> (2016-2017), Silomais: <i>Ronaldinio</i> und <i>Saludo</i>) am Standort Hohenkammer | 73 |
| Abbildung 43: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) als Summe über zwei Jahre von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) im ersten Jahr und von Winterweizen (<i>Florian</i>) im zweiten Jahr am Standort Forchheim am Kaiserstuhl..... | 76 |
| Abbildung 44: Deckungsbeiträge (€ ha ⁻¹) als Summe über zwei Jahre von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) im ersten Jahr und von Winterweizen (<i>Florian</i>) im zweiten Jahr am Standort Hohenkammer. | 77 |
| Abbildung 45: Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistungen (€ ha ⁻¹) von Soja (<i>Sultana</i>) in Abhängigkeit des Anbausystems | 79 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Standörtliche Gegebenheiten..... | 30 |
| Tabelle 2: Aussaat- und Erntetermine am Standort Stifterhof in Östringen..... | 32 |
| Tabelle 3: N-Menge in den Ernterückständen, im Korn sowie die N-Bilanz der Sojasorten <i>Merlin</i> und <i>ES Mentor</i> sowie der Erbsensorten <i>Alvesta</i> und <i>Respect</i> am Standort Rheinstetten | 38 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 in Rheinstetten-Forchheim..... | 39 |
| Tabelle 5: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2016 bis 2018 in Rheinstetten-Forchheim..... | 43 |
| Tabelle 6: N-Menge in Ernterückstände, in den Körnern und N-Bilanz am Standort Forchheim am Kaiserstuhl für die Sojabohnensorten <i>Merlin</i> und <i>ES Mentor</i> und die Erbsensorten ohne Zwischenfrucht <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> | 46 |
| Tabelle 7: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 in Forchheim am Kaiserstuhl..... | 47 |
| Tabelle 8: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Nachfrucht-Versuche mit Winterweizen in den Jahren 2016 bis 2018 in Forchheim am Kaiserstuhl | 51 |
| Tabelle 9: N-Menge in Ernterückstände, im Korn und N-Bilanz der Leguminosensorten <i>Merlin</i> und <i>ES Mentor</i> (Soja) sowie <i>Alvesta</i> und <i>Salamanca</i> (Erbsen ohne Zwischenfrucht) am Standort Hohenkammer | 55 |
| Tabelle 10: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 in Hohenkammer | 55 |
| Tabelle 11: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Winterweizen-Versuche in den Jahren 2016 bis 2018 in Hohenkammer..... | 59 |
| Tabelle 12: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 am Stifterhof..... | 63 |
| Tabelle 13: Ergebnisse der Varianzanalyse zu den Kornerträgen für die Versuche in den Jahren 2016 und 2017 in Eppingen, Riedlingen und Zaisenhausen..... | 65 |
| Tabelle 14: P-Werte der Deckungsbeiträge verschiedener Kulturen an den drei Standorten Rheinstetten, Forchheim am Kaiserstuhl und Hohenkammer..... | 71 |
| Tabelle 15: P-Werte der Deckungsbeiträge des Winterweizens..... | 74 |
| Tabelle 16: Vergleich der Deckungsbeiträge von Winterweizen (<i>Florian</i>) mit den Leguminosensorten als Vorfrucht zu Silomais und Sommergerste als Vorfrucht am Standort Forchheim am Kaiserstuhl..... | 74 |
| Tabelle 17: Vergleich der Deckungsbeiträge von Winterweizen (<i>Florian</i>) mit den Leguminosensorten als Vorfrucht zu Silomais und Hafer als Vorfrucht am Standort Hohenkammer | 75 |
| Tabelle 18: P-Werte der Vergleiche der Deckungsbeiträge des Winterweizens nach Erbsen und Sojabohnen zu den Deckungsbeiträgen des Winterweizens nach Silomais und nach Sommergerste oder Hafer (Hohenkammer)..... | 76 |
| Tabelle 19: P-Werte der Deckungsbeitragssumme über zwei Jahre der jeweiligen Vorkulturen und des Winterweizens | 78 |
| Tabelle 20: P-Werte der direkt- und arbeitserledigungskostenfreien Leistungen | 79 |
| Tabelle 21: wissenschaftliche Publikationen und Fachartikel | 107 |
| Tabelle 22 Presseberichte..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 23: Veranstaltungen mit Beteiligung des Projektes FixVorSaat Soja | 110 |
| Tabelle 24 Tagungs- und Konferenzteilnahmen | 111 |

1. Einführung

1.1. Gegenstand des Vorhabens

Der Sojabohnenanbau nimmt in Deutschland seit einigen Jahren stetig zu. Im Jahr 2018 betrug die Anbaufläche über 23.000 Hektar. Ursprünglich stammt die Sojabohne (*Glycine max* (L.) Merr.) aus China, Japan und Südostasien. Sie gehört zur Familie der Hülsenfrüchtler, wie Erbsen oder Ackerbohnen auch. Genauso wie diese kann die Sojabohne eine Symbiose mit stickstofffixierenden Bakterien (Bradyrhizobien) eingehen und somit den Stickstoff aus der Luft für Wachstum und Ertragsbildung nutzen. Sowohl diese Fähigkeit als auch die Auflockerung der Fruchtfolge macht die Sojabohne für den Anbau in Deutschland aus ökologischer Sicht interessant. Allerdings ist der Anbauumfang (s. o.) in Deutschland aus vielen Gründen noch relativ niedrig, doch wurde die Vorteilhaftigkeit des Anbaus von Leguminosen in Fruchtfolgen erkannt. Daher wurde die Eiweißpflanzenstrategie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft ins Leben gerufen. Die Länder und die Europäische Union führten weitere Maßnahmen zur Steigerung des Anbaus von Leguminosen ein. Im Zentrum dieser Maßnahmen steht der Wunsch die Ökosystemleistungen der Leguminosen zu nutzen und die Importe von eiweißreichen Futtermitteln zu vermindern. Insbesondere bei Sojabohnen, die eine große Bedeutung bei der Fütterung von Nutztieren in Deutschland haben, ist eine Gentechnikfreiheit von importierten Sojabohnen aus Übersee nicht zwangsläufig gewährleistet. Da die Akzeptanz von gentechnisch veränderten Pflanzen und daraus hergestellten Produkten in Deutschland allerdings gering ist, nimmt der Anbau von heimischen Eiweißträgern, insbesondere der Sojabohne, eine wichtigere Rolle in Deutschland ein.

1.2. Ziele und Aufgabenstellung des Projektes

1.2.1. Ziele und Aufgabenstellung

Das Projekt wurde vom Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg gemeinsam mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in einem Verbundprojekt bearbeitet. Das Hauptziel des Projektes ist es einen Beitrag zur Optimierung des Sojabohnenanbaus und der Wettbewerbsfähigkeit von Sojabohnen in Deutschland zu leisten. Dazu sollen insbesondere Wissens- und Erfahrungslücken in

den Bereichen Vorfruchtleistung, N₂-Fixierung und zur reduzierten Bodenbearbeitung im Sojaanbau geschlossen werden.

Die Anbauentscheidung vieler Landwirtinnen und Landwirte richtet sich nach ökonomischen Gesichtspunkten. Um den Anbauumfang von Sojabohnen zu steigern kann die Ökonomie daher ein Ansatzpunkt sein. In diesem Projekt wurden daher ebenfalls ökonomische Aspekte des Sojabohnenanbaus berücksichtigt.

Zu den Ökosystemleistungen, die Sojabohnen bereitstellen, gehört die Fixierung von Luftstickstoff durch die Symbiose mit Bradyrhizobien. Die Höhe der N₂-Fixierungsleistung ist hier eine wesentliche Messgröße. Da Untersuchungen zu diesem Bereich oft aus Übersee stammen, war es ein Ziel die N₂-Fixierungsleistung unter süddeutschen Bedingungen zu schätzen. Die N₂-Fixierungsleistung ist von vielen Faktoren abhängig, wie etwa Niederschlagsverteilung, Niederschlagsmenge, Temperatur, Nährstoffversorgung und Bodenart. Diese Gegebenheiten unterscheiden sich zwischen Standorten in Amerika und Europa, weswegen es von Wichtigkeit ist, die Untersuchungen in den Hauptanbauländern in Süddeutschland durchzuführen. Die Schätzung der N₂-Fixierungsleistung soll im Vergleich zu Erbsen vorgenommen werden. Die potenzielle Bereitstellung von Stickstoff für eine nachfolgende Kultur könnte einen großen Anteil an der Vorfruchtwirkung von Sojabohnen ausmachen. Daher ist es ein weiteres Ziel die Vorfruchtwirkung von Sojabohnen auf die Nachfrucht Winterweizen zu untersuchen. Dies soll ebenfalls im Vergleich zu Erbsen geschehen. Da diese jedoch einige Monate vor den Sojabohnen geerntet werden, gibt es ebenfalls eine Variante mit einer Zwischenfrucht (Gelbsenf), die potenziell Stickstoff aus der N₂-Fixierung der Erbsen an die Nachfrucht Winterweizen weitergeben könnte. Da Sojabohnen potenziell eine Vorfruchtwirkung auf den Winterweizen haben, wäre ein möglicher Mehrerlös beim Winterweizen der Sojabohne zuzurechnen, wodurch diese gegebenenfalls aus monetärer Sicht für den Anbau interessanter werden könnte. Daher war es ein weiteres Ziel die ökonomische Bewertung des Sojabohnenanbaus unter Berücksichtigung der Vorfruchtwirkung vorzunehmen. Die Schätzung der N₂-Fixierungsleistung, die Untersuchung der Vorfruchtwirkung und die ökonomische Bewertung wurden sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Anbau vorgenommen.

Durch die Ausdehnung des Sojaanbaus kommen auch zunehmend erosionsgefährdete Lagen hierfür in Betracht. Die auf diesen Flächen angewandten Anbaumethoden wie Mulchsaat, Strip-Till oder Direktsaat haben eine langsamere Erwärmung des Bodens

zur Folge, wodurch die Jugendentwicklung der Sojabohnen verzögert werden könnte. Daher ist ein weiteres Ziel, die oben genannten Anbaumethoden auf ihre Eignung für den Sojabohnenanbau zu testen. Bei der Direktsaatmethode in diesem Projekt soll es sich um eine Direktsaat nach dem Anbau von Grünroggen handeln. Dieser wird bei der Aussaat entweder gewalzt oder abgefahren. Diese Methode soll eine gute Unkrautunterdrückung und einen wirksamen Erosionsschutz bieten. Bei den oben genannten Anbaumethoden erfolgt in der Praxis oft der Einsatz des Totalherbizides Glyphosat. Dieses ist seit längerer Zeit in der Diskussion und im Sinne der Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln wird in diesem Projekt ebenfalls getestet, ob ein Verzicht auf das Totalherbizid beim Anbau von Sojabohnen bei der Verwendung von Mulchsaat oder Strip-Till als Anbaumethoden möglich ist. Die verschiedenen Verfahren sollen ebenfalls einer ökonomischen Bewertung unterzogen werden.

1.2.2. Bezug des Projektes zu den einschlägigen Zielen der Eiweißpflanzenstrategie

Durch die oben genannten Ziele des Projektes soll die Vorzüglichkeit des Sojaanbaus gezeigt und so der Anbauumfang der Sojabohnen in Deutschland gesteigert werden. Hierdurch könnte die heimische Eiweißversorgung gestärkt werden. Sowohl die Untersuchungen zur N₂-Fixierungsleistung als auch zur Vorfruchtwirkung von Sojabohnen und Erbsen verbessern unser Verständnis über die Ökosystemleistungen, die durch Leguminosen erbracht werden.

Die Versuche zur Reduzierten Bodenbearbeitung und den Verzicht auf das Totalherbizid Glyphosat stehen im Einklang mit den Zielen der Eiweißpflanzenstrategie der Verbesserung des Umweltschutzes, der Artenvielfalt und der Ressourcenschonung.

1.2.3. Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt wurde in mehrere Teile aufgeteilt, hier Arbeitspakete genannt. Das Arbeitspaket 1 umfasst den Versuch zur N₂-Fixierungsleistung und zur Vorfruchtwirkung von Sojabohnen und Erbsen unter konventionellen Anbaubedingungen. Im Arbeitspaket 2 sind die Versuche zur N₂-Fixierungsleistung und zur Vorfruchtwirkung von Sojabohnen und Erbsen unter ökologischen Anbaubedingungen zusammengefasst. Die Versuche zur reduzierten Bodenbearbeitung finden sich im Arbeitspaket 3 wieder. Das Arbeitspaket 4 befasst sich mit der ökonomischen Bewertung der Ergebnisse aus den

drei vorgenannten Arbeitspaketen. Im Arbeitspaket 5 sind schließlich alle Wissenstransfermaßnahmen zusammengefasst.

Im Arbeitspaket 1 wurden über drei Jahre von 2015 bis 2017 die Versuche zur Bestimmung der N₂-Fixierungsleistung am Standort Rheinstetten unter konventionellen und bewässerbaren Bedingungen durchgeführt. Jeweils nach Abschluss der Versuche folgte auf der gleichen Fläche des vorhergehenden Versuchs die Aussaat des Winterweizens zur Bestimmung der Vorfruchtleistung der Sojabohnen. Die letzte Ernte des Winterweizens erfolgte demnach im Jahr 2018.

Die Versuche im Arbeitspaket 2 zur N₂-Fixierungsleistung und zum Vorfruchtwert wurden an den Standorten Forchheim am Kaiserstuhl und Hohenkammer über drei Jahre von 2015 bis 2017 durchgeführt. Die abschließende Ernte des Winterweizens erfolgte ebenfalls 2018. Der Standort Hohenkammer wird von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft betreut. Beide Standorte werden ökologisch bewirtschaftet.

Im Arbeitspaket 3 wurden die Versuche am Stifterhof in Östringen über drei Jahre von 2015 bis 2017 durchgeführt. Zusätzlich war es geplant eine Befragung von Landwirtinnen und Landwirten zum Thema reduzierte Bodenbearbeitung im Sojaanbau und gegebenenfalls auftretenden Problemen durchzuführen. Diese Befragung wurde im Winter 2015/2016 in Form von offenen Interviews vorgenommen. Aus dieser Befragung entstanden Kontakte zu verschiedenen Landwirten, die sich bereit erklärten Flächen für die Durchführung von On-Farm-Versuchen bereitzustellen. Ferner zeigte sich, dass auch das Thema Totalherbizideinsatz für die Landwirtinnen und Landwirte interessant war. Daher wurden als Varianten für den Versuch die klassische Mulchsaat mit und ohne Totalherbizideinsatz ausgewählt. Dazu kam an zwei Versuchsstandorten ein Pflugeinsatz und an einem weiteren der Einsatz von Direktsaat. Die On-Farm-Versuche fanden an den Standorten Eppingen (Landkreis Heilbronn, Baden-Württemberg), Riedlingen (Landkreis Biberach, Baden-Württemberg) und Zaisenhausen (Landkreis Karlsruhe, Baden-Württemberg) statt.

Die ökonomische Bewertung des Anbaus von Sojabohnen aus den ersten drei Arbeitspaketen wurde nach Vorlage aller Ergebnisse durch die Berechnung von Deckungsbeiträgen mit dem Programm „Kalkulationsdaten Marktfrüchte“ der Landesanstalt für Landwirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum aus Baden-Württemberg mit Teilnutzung von Daten aus dem Programm „Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten“ der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt. Für

das Arbeitspaket 3 bot sich die Berechnung von arbeits- und direktkostenfreien Leistungen an.

Im Rahmen von Arbeitspaket 5 sind zahlreiche Veröffentlichungen, die Durchführung von Feldtagen und einer großen Informationsveranstaltung erfolgt. Die Ergebnisse sind vielfach veröffentlicht worden und es wurde im Jahr 2017 eine bundesweite Sojatagung gemeinsam mit dem Sojanetzwerk in Rastatt durchgeführt.

Detailliertere Angaben zu den einzelnen Arbeitsabläufen finden sich in Kapitel 3.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bei Körnerleguminosen leistet die Vorfruchtwirkung innerhalb der Fruchtfolge - neben dem Markterlös - einen wichtigen Beitrag für die Anbauwürdigkeit (von Richthofen 2005; Alpmann & Schäfer 2014). Ein Teil der positiven Vorfruchtwirkung von Leguminosen beruht auf der Bindung von Luftstickstoff. Bei Sojabohnen wurde eine geringere mittlere Fixierungsleistung und ein geringerer Anteil an Luftstickstoff am Gesamtstickstoff bei großen Spannweiten im Vergleich zu anderen Körnerleguminosen unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus festgestellt (Mayer & Heß 1997; Kolbe *et al.* 2002). Bei Erbsen in Reinsaat besteht nach dem Drusch eine Auswaschungsgefahr vom Stickstoff im folgenden Winter. Diese kann durch den Anbau von nichtlegumen Zwischenfrüchten deutlich reduziert werden (Möller & Reents 1999; Urbatzka *et al.* 2009). Zuvor wurden in Deutschland die N₂-Fixierungsleistung und der Vorfruchtwert von Sojabohnen mit anderen Körnerleguminosen nicht verglichen. Die Übertragung der Ergebnisse von anderen Klimazonen ist nur sehr eingeschränkt möglich, da die Fixierungsleistung von Soja stark von klimatischen Einflussgrößen, wie Bodenfeuchte, insbesondere bei Trockenheit (Serraj *et al.* 1999; Purcell *et al.* 2004) und Bodentemperatur (Liu *et al.* 2011) sowie von den Anbausystemen (Schweiger *et al.* 2012), den verwendeten Rhizobienstämmen (Zhang *et al.* 2003) und der N-Verfügbarkeit (Salvagiotti *et al.* 2008) abhängig ist.

Die N₂-Fixierungsleistung ist ein wichtiger Parameter zur Quantifizierung des Vorfruchtwertes. Jede heute verfügbare Methode zur Schätzung der Fixierungsleistung hat ihre Grenzen (Hauser 1992). In den hier vorgestellten Untersuchungen wurde die Fixierungsleistung nach der erweiterten Differenzmethode (Stülpnagel 1982; verändert nach Hauser 1987) geschätzt, wobei der Bestandesabfall und der N_{min}-Gehalt der Böden berücksichtigt wurde. Im Vergleich dazu wäre der analytische und

versuchstechnische Aufwand bei der ^{15}N -Verdünnungsmethode und bei zusätzlicher Erfassung der unterirdischen Pflanzenteile, die eine erhebliche methodisch bedingte Streuung aufweist, unverhältnismäßig hoch (Hauser 1987).

Ein weiterer Aspekt des Vorfruchtwertes, vor allem bei Soja, dürfte neben der N_2 -Fixierungsleistung die sich unter dem Mulch der abgefallenen Blätter entwickelnde krümelige Bodenstruktur sein, die eine Aussaat der nachfolgenden Winterung mit flacher Mulchsaat oder Direktsaat nahelegt.

Der Bodenschutz und der Schutz von Oberflächengewässer vor Eintragungen sind von zentraler Bedeutung für eine umweltschonende Landbewirtschaftung. In Bayern wird Soja in der landwirtschaftlichen Praxis des ökologischen Landbaus bei etwa 70 % der sojaanbauenden Betriebe mit einem Reihenabstand größer oder gleich 35 cm ausgesät (Jobst *et al.* 2013). Auch in der konventionellen Landwirtschaft werden im Anbau von Soja weitere Reihenabstände insbesondere bei Verschlammungsgefahr empfohlen (Imgraben & Recknagel 2014). Daher besteht beim Anbau von Soja – ähnlich wie beim Mais – aufgrund der langsamen Jugendentwicklung und des späten Bestandesschlusses in Hanglagen ein erhöhter Anspruch an den Erosionsschutz und die Vermeidung von Nährstoff- und Pflanzenschutzmittelausträgen.

Die Erfahrungen außerhalb Deutschlands mit reduzierter Bodenbearbeitung und Direktsaat von Soja sind oft, aber nicht immer positiv. Auf gut drainierten Böden in Iowa (USA) beispielsweise zeigte Soja unter Direktsaat im Schnitt mehrerer Untersuchungen weniger als 5 % Ertragsrückgang bei gleich hohem oder höherem ökonomischen Erfolg im Vergleich zu anderen Bearbeitungssystemen (Yin & Al-Kaisi 2004). Auf einem schlecht drainierten schluffigen Lehm in Pisa (Italien) zeigte Soja in 12 von 16 Versuchsjahren nur geringe, nicht signifikante Ertragsunterschiede zwischen Direktsaat und konventioneller Bearbeitung (Mazzoncini *et al.* 2008). Mindererträge durch Direktsaat traten aber offenbar häufiger auf, denn im Mittel der 16 Jahre erreichte Soja unter Direktsaat signifikant niedrigere Erträge, 26 statt 31 dt ha⁻¹. Ergebnisse anderer Länder lassen sich jedoch nur bedingt auf die Anbaugebiete in Deutschland übertragen, da bei uns andere klimatische Verhältnisse bestehen und andere Anbausysteme praktiziert werden. In der außereuropäischen konventionellen Landwirtschaft beruht zudem der Stand der Technik zumeist auf dem häufigen Einsatz von glyphosathaltigen Herbiziden in Verbindung mit glyphosatoleranten, gentechnisch veränderten Sojasorten (Vivian *et al.* 2013). Die aktuell in Deutschland eingesetzten Verfahren zur Unkrautkontrolle bestehen im konventionellen Anbau aus Herbiziden mit einem hohen

Wirkungsanteil über den Boden (Gehring *et al.* 2014). In wieweit eine Anpassung des Herbizidmanagements bei reduzierter Bodenbearbeitung notwendig und möglich ist, ist nicht bekannt. In Deutschland werden Sojabohnen überwiegend nach einer Pflugfurche angebaut; allerdings bauen in Bayern und Österreich auch etwa 25 % der befragten Landwirte im ökologischen Landbau Soja pfluglos an (Jobst *et al.* 2014). In einem früheren Projekt (BÖLN FKZ 2841NA001 bis 008) wurden auf drei Betrieben Tastversuche über zwei Jahre mit jeweils verschiedener Aussaat- und Anbautechnik sowie ein Versuch auf einem Hochschulbetrieb durchgeführt, von dem allerdings nur ein Jahr auswertbar war. Hoher Unkrautdruck und Durchwuchs der Vorfrucht waren verbreitete Probleme. Dennoch kam man zu dem Schluss, dass die Soja-Direktsaat ein großes Potenzial besitzt; es sind allerdings noch weitere Versuchsjahre erforderlich, um die Details zu klären (Asam *et al.* 2013). In den genannten Versuchen wurde beispielsweise Soja direkt in gemähten oder gewalzten Grün-Roggen eingesät. Dabei war ein Problem, dass der Roggen wieder anwachsen und die Soja-Entwicklung behindern konnte. Oder der wieder austreibende Roggen behinderte am Ende den Mähdrusch von Soja.

Soja besitzt während der zögerlichen Jugendentwicklung nur eine geringe Konkurrenzkraft gegenüber Unkräutern. Eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung während dieser kritischen Periode (Van Acker *et al.* 1993; Oerke 2006; Gehring *et al.* 2014) ist daher für die Etablierung der Kultur und die Absicherung des Ertragspotenzials unverzichtbar. Neben den Möglichkeiten einer mechanischen Unkrautregulierung (Gunsolus 1990) hat im konventionellen Anbau der Einsatz von geeigneten Herbiziden aus arbeitswirtschaftlichen und ökonomischen Aspekten eine hohe Bedeutung (Gehring *et al.* 2014). Soja reagiert auf unverträglichen oder nicht angepassten Herbizideinsatz wesentlich empfindlicher als andere Kulturen. Mindererträge und Reifeverzögerungen sind oft die Folge (Imgraben & Recknagel 2019). Für die Entwicklung des Sojaanbaus sind daher an die spezifischen Anbaubedingungen angepasste, konventionelle Verfahren der chemischen Unkrautkontrolle notwendig. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2009 ein mehrjähriges Versuchsprogramm zum Herbizideinsatz in Sojabohnen begonnen. Im Zeitraum 2009 bis 2013 wurden in Baden-Württemberg 16 Feldversuche an unterschiedlichen Standorten zur Überprüfung der Wirksamkeit und Kulturverträglichkeit von Herbizidbehandlungen im Sojaanbau durchgeführt (Gehring *et al.* 2014). Gegenüber den eingesetzten Wirkstoffen bzw. Wirkstoffkombinationen (sieben Varianten) zeigten sich Klettenlabkraut und Windenknöterich als schwer

bekämpfbar. Anwendungen mit dem Wirkstoff Pendimethalin bewirkten eine nachhaltige Kulturschädigung durch Ausdünnung bzw. Pflanzenverluste. Die Autoren empfahlen eine Optimierung des Herbizideinsatzes durch die Anpassung der Herbizidauswahl, der Präparatekombination und der Aufwandmengengestaltung entsprechend der standortspezifischen Unkrautflora, der Unkrautbesatzdichte und der Anwendungsbedingungen.

3. Material und Methoden

3.1. Witterung

3.1.1. Rheinstetten-Forchheim

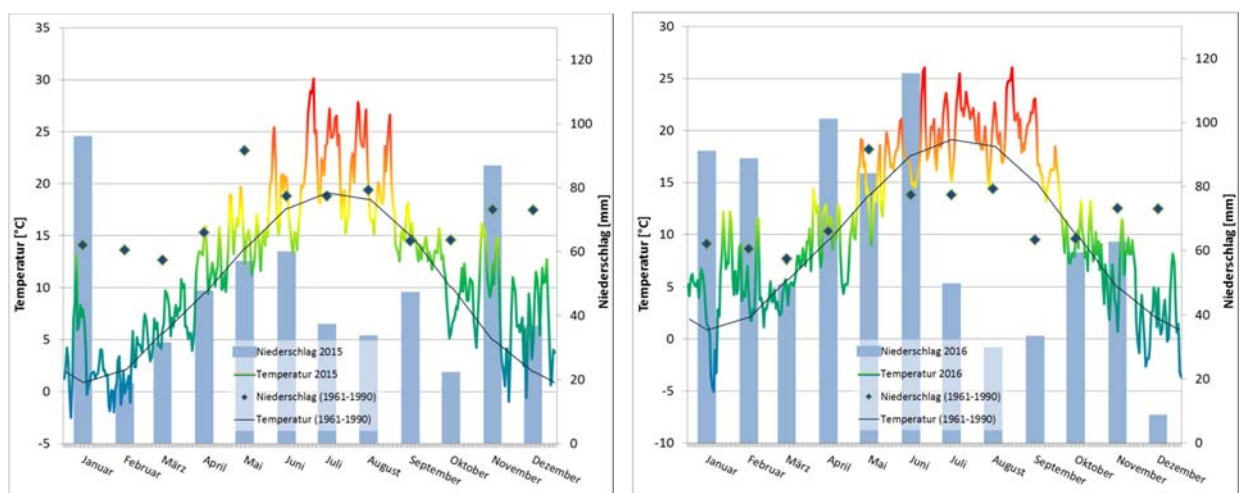


Abbildung 1: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Rheinstetten-Forchheim. Die Wetter- und Klimadaten stammen von der Wetterstation Rheinstetten.

Die Temperaturen in Rheinstetten-Forchheim lagen sowohl 2015 als auch 2016 gerade in den Sommermonaten über dem vieljährigen Mittel (Abbildung 1). In 2015 zeigt sich ab dem Februar bis zum Oktober eine ausgesprochene Trockenheitsphase mit Niederschlägen deutlich unter dem vieljährigen Mittel. Im Jahr 2016 dagegen lagen die Niederschläge von Januar bis Juni im Bereich des vieljährigen Mittels oder darüber. Ab Juli trat dann eine Sommertrockenheit mit deutlich unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen auf. Der Winter 2016/2017 war relativ niederschlagsarm.

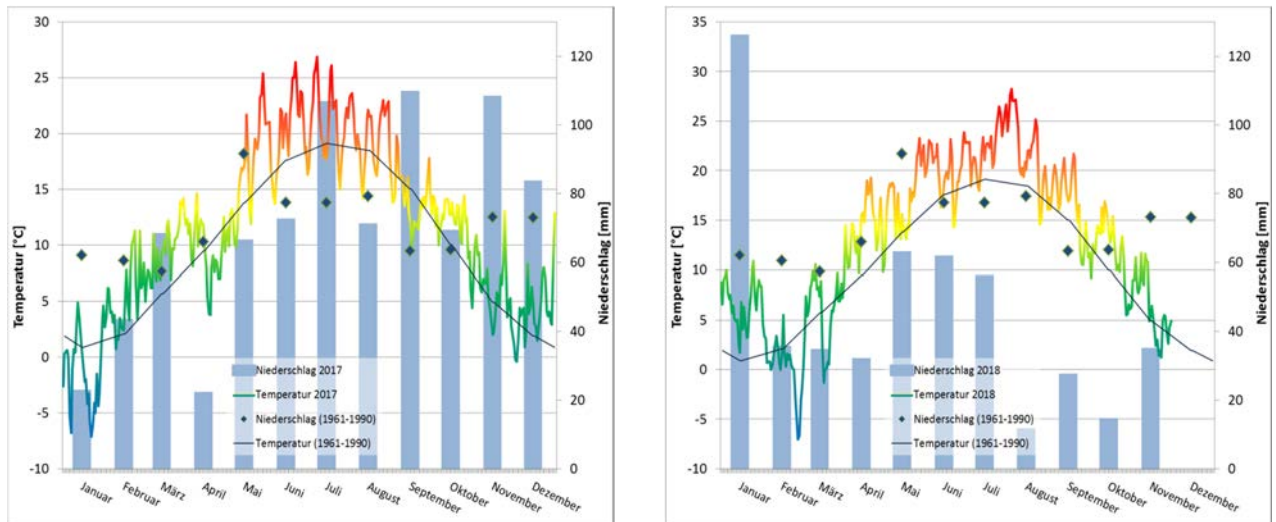


Abbildung 2: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 (links) und im Jahr 2018 (rechts) am Standort Rheinstetten-Forchheim. Die Wetter- und Klimadaten stammen von der Wetterstation Rheinstetten

Das Jahr 2017 in Rheinstetten-Forchheim zeichnet sich zwar fast durchgehend durch im Mittel höhere Niederschläge aus. Die Niederschlagsmenge lag in vielen Monaten im Bereich des vieljährigen Mittels oder darüber, so dass sich insbesondere in der Vegetationsphase eine günstige Niederschlagsverteilung und -menge ergab (Abbildung 2). Im Jahr 2018 dagegen lagen die Niederschläge in beinahe allen Monaten (bis auf den Januar) deutlich unter dem vieljährigen Mittel, während die Temperaturen teils deutlich darüber lagen.

3.1.2. Forchheim am Kaiserstuhl

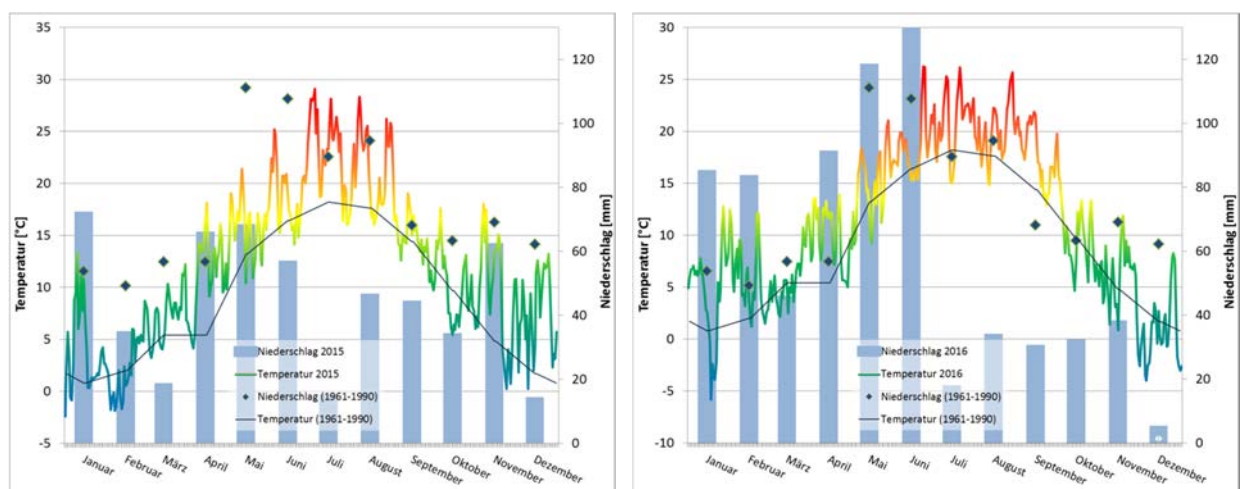


Abbildung 3: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Königschaffhausen und die Klimadaten von der Wetterstation Emmendingen-Mundingen.

Am Standort Forchheim am Kaiserstuhl war das Wetter im Jahr 2015 insgesamt zu warm, besonders von April bis August (Abbildung 3). Die Niederschlagsmengen lagen ab Mai bis zum Ende des Jahres stets unter dem vieljährigen Mittel, so dass es zu einer starken Sommertrockenheit kam. Dagegen waren die Niederschlagsmengen im Jahr 2016 bis zum Juni stets im Bereich des vieljährigen Mittels oder höher. Ab Juli lagen die Niederschlagsmengen stets deutlich unter dem vieljährigen Mittel. Insbesondere der Winter 2016/2017 war im Vergleich zu trocken. Die Temperaturen waren besonders zu Beginn des Jahres 2016 und in den Sommermonaten höher als im vieljährigen Mittel.

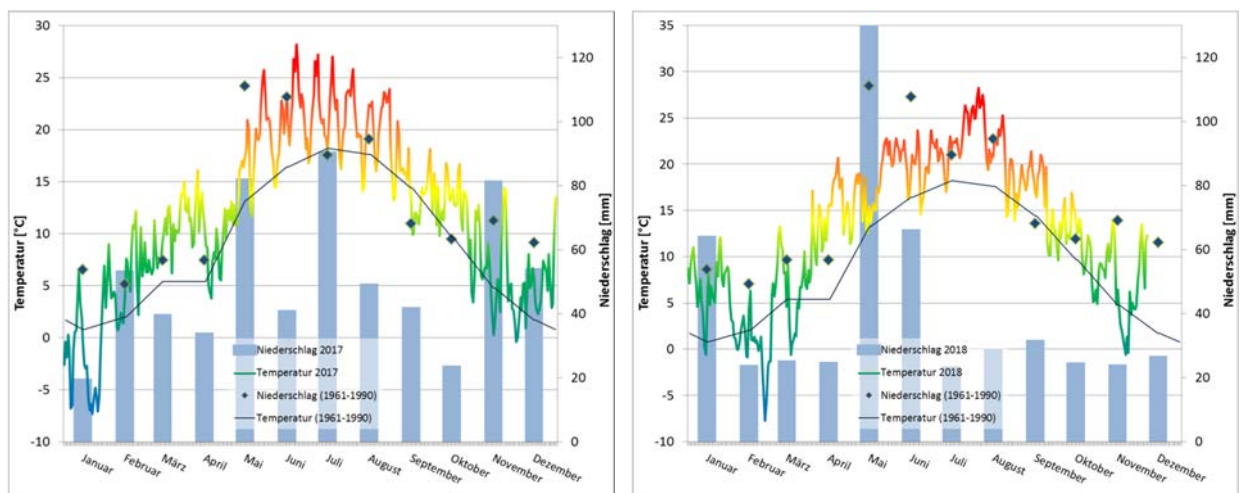


Abbildung 4: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 (links) und im Jahr 2018 (rechts) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Königshausen und die Klimadaten von der Wetterstation Emmendingen-Mündingen.

Im Jahr 2017 waren die Temperaturen besonders in den Sommermonaten höher als im vieljährigen Mittel. Die Niederschlagsmengen lagen von März bis Oktober fast in jedem Monat unter dem langjährigen Mittel, jedoch gab es im Juli mit über 80 mm Niederschläge in der Höhe des vieljährigen Mittels (Abbildung 4). Das Jahr 2018 zeichnet sich insbesondere durch eine Vielzahl von Monaten mit zu hoher Temperatur im Vergleich zum vieljährigen Mittel aus. Ebenso waren die Niederschlagsmengen mit Ausnahme des Januar und des Mai stets erheblich unter dem vieljährigen Mittel, sodass es im Jahr 2018 eine ausgeprägte Trockenheit gab.

3.1.3. Hohenkammer

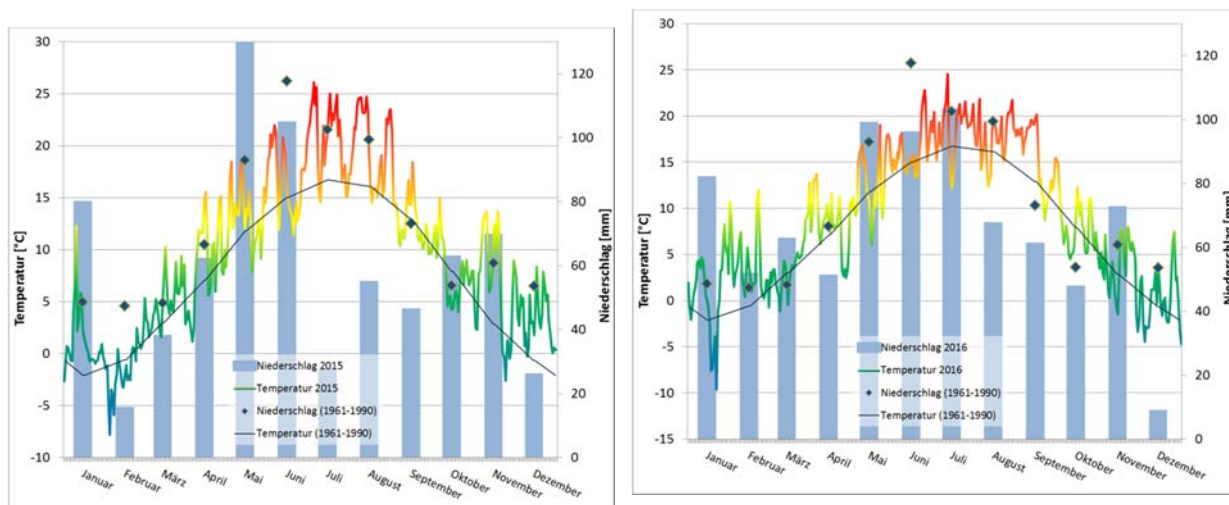


Abbildung 5: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Hohenkammer. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Jetzendorf und die Klimadaten von der Wetterstation Altomünster-Maisbrunn.

In Hohenkammer war die Niederschlagsmenge im Jahr 2015 mit Ausnahme der Sommermonate fast immer im Bereich des vieljährigen Mittels (Abbildung 5). Im Sommer waren die Temperaturen höher als im vieljährigen Mittel. Im Jahr 2016 ergab sich eine Niederschlagsverteilung, die fast in jedem Monat in der Nähe des vieljährigen Mittels lag. Eine deutliche Abweichung ergibt sich für den Monat Dezember. Die Temperaturen waren im Sommer etwas höher als im vieljährigen Mittel.

Auch im Jahr 2017 zeigten sich Niederschlagsmengen, die fast im gesamten Jahr im Bereich des langjährigen Mittels lagen (Abbildung 6). Auch in diesem Jahr waren die Temperaturen insbesondere im Sommer höher, als im vieljährigen Mittel. Im Jahr 2018 ergab sich keine so starke Sommertrockenheit, wie an den Standorten Rheinstetten-Forchheim und Forchheim am Kaiserstuhl. Bis auf den Monat April fielen in fast allen Monaten ähnlich hohe Niederschläge wie im vieljährigen Mittel. Allerdings waren in diesem Jahr die Temperaturen wiederum im Sommer über dem vieljährigen Mittel.

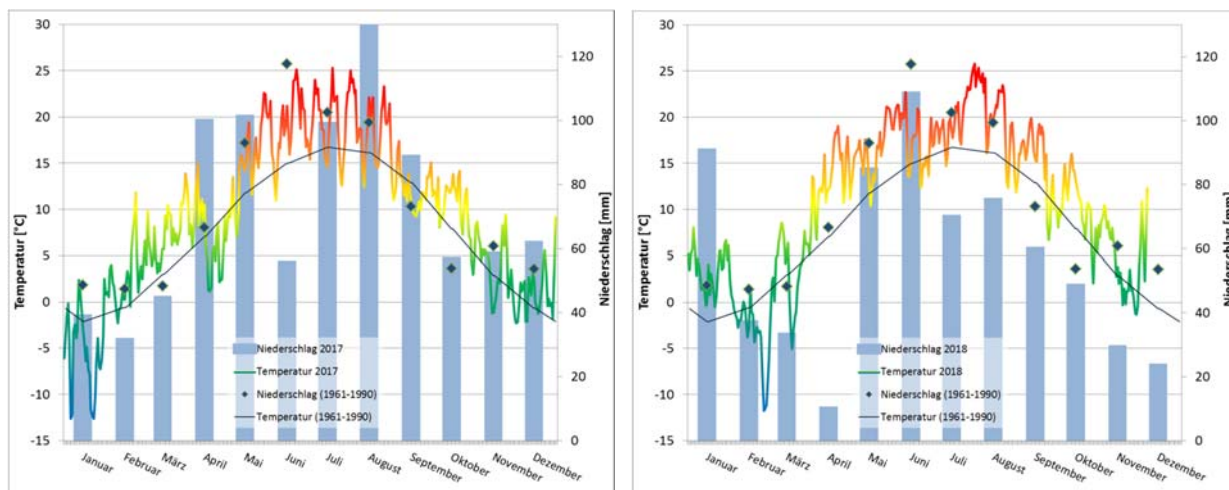


Abbildung 6: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 (links) und im Jahr 2018 (rechts) am Standort Hohenkammer. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Jetzendorf und die Klimadaten von der Wetterstation Altomünster-Maisbrunn.

3.1.4. Stifterhof (Östringen)

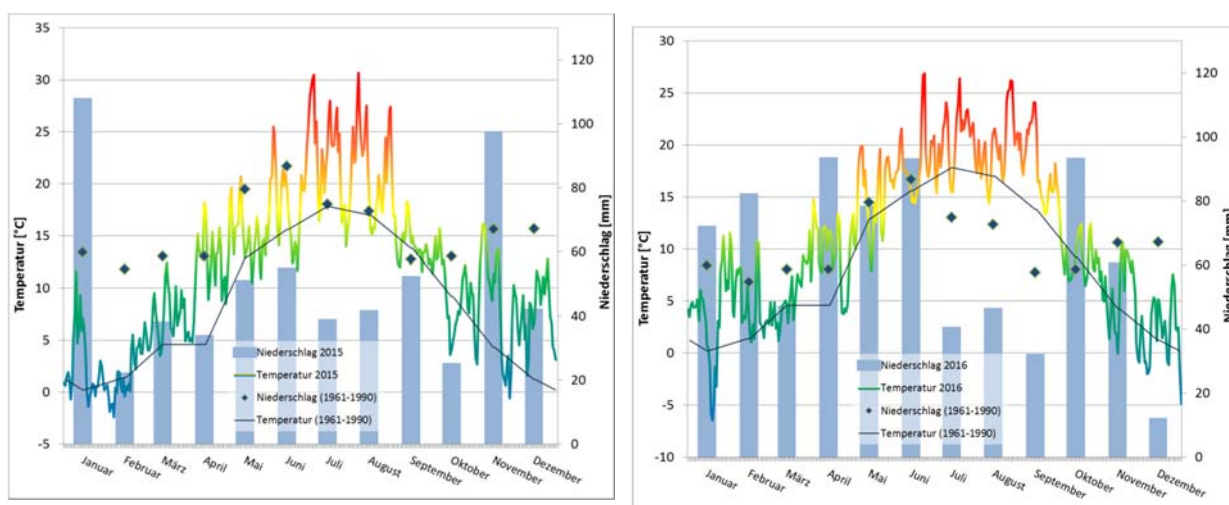


Abbildung 7: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2015 (links) und im Jahr 2016 (rechts) am Standort Stifterhof in Östringen. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Stifterhof und die Klimadaten von der Wetterstation Eppingen-Elsenz.

Die Niederschlagsmengen lagen am Standort Stifterhof im Jahr 2015 von Februar bis Oktober fast jeden Monat deutlich unter dem vieljährigen Mittel und die Temperaturen waren im Sommer höher als im vieljährigen Mittel, so dass sich eine ausgeprägte Sommertrockenheit ergab (Abbildung 7). Auch im Jahr 2016 waren die Temperaturen insbesondere im Sommer höher, als im vieljährigen Mittel. Von Juli bis September traten niedrigere Niederschlagsmengen als im vieljährigen Mittel auf, während die

Mengen im restlichen Jahr fast jeden Monat höher lagen. Die Wintermonate 2016/2017 waren wiederum trocken.

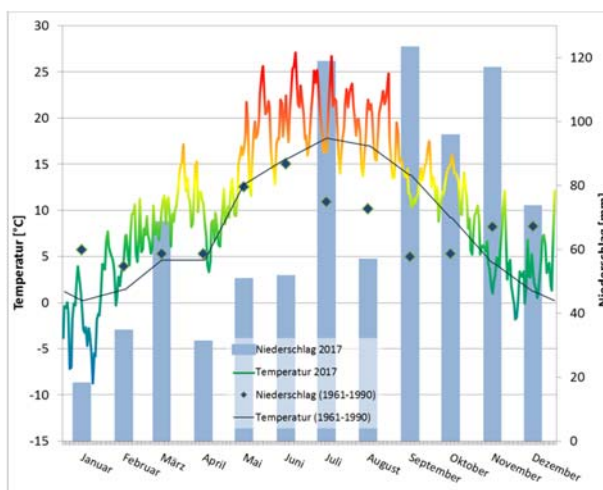


Abbildung 8: Witterungsparameter (Temperatur in °C und Niederschlag in mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) im Jahr 2017 am Standort Stifterhof in Östringen. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Stifterhof und die Klimadaten von der Wetterstation Eppingen-Elsenz.

Das Jahr 2017 am Standort Stifterhof war zu Beginn des Jahres trocken. In vielen Monaten insbesondere von April bis Juni gab es im Vergleich zum vieljährigen Mittel zu niedrige Niederschlagsmengen. Wiederum lagen die Temperaturen im Sommer im Vergleich zum vieljährigen Mittel deutlich höher.

3.2. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen Anbau

Der Versuch wurde in den Jahren 2015 bis 2017 am Standort Rheinstetten jeweils als Split-Plot-Anlage vierfach wiederholt angelegt (zu den Standortangaben: Tabelle 1). Als Varianten wurden zwei Erbsensorten (*Alvesta* und *Respect*) jeweils mit und ohne Zwischenfrucht (Gelbsenf) angebaut. Die Zwischenfrucht wurde nach der Ernte der Erbsen eingesät. Weitere Varianten waren zwei Sojabohnensorten mit unterschiedlicher Reifegruppe (*Merlin* (000) und *ES Mentor* (00)), sowie die Sommergerstensorte *Grace*, die Körnermaissorte *Ferarixx* und die Silomaissorten *Saludo* (S210) und *Ronadinio* (S240). Die Körnermaissorte wurde als ökonomische Vergleichssorte mit angebaut (siehe Kapitel 3.6 und 4.4), während die Sommergerstensorte und die Silomaissorte als

Referenzfrüchte für die Schätzung der N₂-Fixierungsleistung dienen (Kapitel 3.5). Die Kulturen Erbsen mit Zwischenfrüchten (EZF) und ohne Zwischenfrüchten (EOZF), sowie die Sojabohnen und der Silomais wurden jeweils als Großteilstück aufgefasst, während die jeweils zugehörigen Sorten als Kleinteilstücke berücksichtigt wurden. Die Kulturen Sommergerste und der Körnermais wurden zusammen als ein Großteilstück angelegt, während die jeweiligen Sorten die Kleinteilstücke darstellten. Jede Parzelle hatte eine Länge von zwölf Metern und eine Breite von sechs Metern, so dass Randeffekte minimiert wurden. Zur Schätzung der N₂-Fixierungsleistung wurden bei der Ernte die Kornerträge und Stroherträge erhoben. Beim Silomais wurde der Gesamtpflanzenenertrag gemessen. Es fand jeweils ein Kerndrusch statt. Da Sojabohnen ihre Blätter in der Abreife, verlieren wurden diese in Blattfallkästen aufgefangen und so die Blattmasse erhoben. In den jeweiligen Fraktionen wurde der N-Gehalt nach Dumas bestimmt. Das Stroh der Erbsen, der Sojabohne, des Körnermais und der Sommergerste verblieb auf dem Feld.



Abbildung 9: Blattfallkasten

Zu Beginn des Versuches wurde der N_{min}-Gehalt in einer Mischprobe und zur Ernte parzellengenau bestimmt.

Nach der Ernte aller Kulturen wurde die gesamte Versuchsfläche umgebrochen. Im Anschluss fand die Aussaat des Winterweizens (*Ambello*) statt. Zum Vegetationsende, zum Vegetationsanfang und zur Ernte des Winterweizens wurde der N_{min}-Gehalt

parzellengenau bestimmt. Die N-Düngung erfolgte in drei Gaben. Insgesamt wurde unter Berücksichtigung des parzellengenauen N_{\min} -Gehaltes zum Vegetationsanfang die N-Düngung auf 180 kg N je Hektar bei einem erwarteten mittleren Ertrag von 80 dt ha⁻¹ festgesetzt. Zur Ernte wurde der Kornertrag gemessen und der N-Gehalt in den Körnern nach Dumas bestimmt.

Die Versuche wurden bewässert (2015: 217 mm, 2016: 90 mm, 2017: 90 mm; WW: 2016: 60 mm, 2017: 90 mm, 2018: 30 mm). Der Bewässerungsbedarf wurde mit dem Bewässerungsmodell „Agrowetter“ (Janssen 2009) bestimmt.

Tabelle 1: Standörtliche Gegebenheiten

| Kriterium | Rheinstetten | Forchheim am Kaiserstuhl | Hohenkammer | Östringen |
|---------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Mittlere Jahrestemperatur | 10,1 °C | 11,2 °C | 7,8 °C | 10,3 °C |
| Mittlerer Jahresniederschlag | 742 mm | 630 mm | 816 mm | 720 mm |
| Bodentyp | Parabraunerde | Pararendzina | Braunerde | Parabraunerde |
| Bodenart | Lehmiger Sand | Lehm | Sandiger Lehm | Sandiger Lehm |

3.3. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau

Die Vorfruchtwirkung und die N₂-Fixierungsleistung im ökologischen Anbau wurden an zwei Standorten über drei Jahre von 2015 bis 2017 untersucht. Die Versuche an den Standorten Forchheim am Kaiserstuhl und Hohenkammer waren beide als Split-plot Anlage mit vierfacher Wiederholung angelegt. Die Varianten waren an diesen Standorten ebenfalls die Sojabohnensorten *Merlin* (000) und *ES Mentor* (00). Bei den Erbsen wurden die Sorten *Alvesta* und *Salamanca* gewählt. Bei den Erbsen gab es jeweils eine Variante mit Zwischenfrüchten (Gelbsenf) und ohne. Der Gelbsenf wurde nach der Ernte der Erbsen eingesät. Als Referenzfrüchte (Kapitel 3.5) kamen die Silomaisorten *Saludo* und *Ronaldinio*, sowie die Sommergerstensorte *Grace* am Standort Forchheim am Kaiserstuhl und die Hafersorten *Aragon* (2015) und *Max* (2016-2017) am Standort Hohenkammer zum Einsatz. Die Kulturen waren jeweils das Großteilstück, während die Sorten das Kleinteilstück darstellten. Am Standort

Forchheim am Kaiserstuhl waren die Parzellen jeweils neun Meter breit und zehn Meter lang, so dass bei dem durchgeführten Kerndrusch die Randeffekte minimiert waren. Auch in Hohenkammer waren die Kulturen durch zusätzliche Randparzellen aus diesem Grund getrennt. An den Standorten wurden ebenfalls Blattfallkästen (Kapitel 3.2) eingesetzt. Es wurde der Kornertrag, der Strohertrag und der Blattfallertrag zu den Erntezeitpunkten erhoben. Bei den Silomaisorten wurde der Gesamtpflanzenenertrag erfasst. Bei jeder Fraktion wurde der N-Gehalt nach Dumas (Forchheim am Kaiserstuhl) oder Kjeldahl (Hohenkammer) bestimmt. Zur Ernte wurde der N_{\min} -Gehalt parzellengenau erfasst.

Nach der Beerntung aller Varianten wurde nach einer Bodenbearbeitung die Winterweizensorte *Florian* eingesät. Hier wurde zum Vegetationsende, zum Vegetationsbeginn und zur Ernte der N_{\min} -Gehalt parzellengenau bestimmt. Der Kornertrag wurde erhoben und der N-Gehalt in den Körnern nach Dumas (Forchheim am Kaiserstuhl) bestimmt oder der Rohproteingehalt mit NIRS (Hohenkammer) geschätzt. Bei den Varianten mit Sojabohnen, Erbsen, Sommergerste und Hafer verblieb das Stroh auf den jeweiligen Parzellen.

3.4. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Sojaanbau

3.4.1. Versuche

Am Standort Stifterhof in Östringen wurde in den Jahren 2015 bis 2017 ein vierfach wiederholter Split-plot Versuch angelegt. Als Varianten wurde Strip-Till mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, Mulchsaat mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, sowie Direktsaat in Grünroggen mit Abfuhr mit und ohne Herbizide und Direktsaat in Grünroggen mit Walzung mit und ohne Herbizide eingesetzt. Die ausgesäte Sojabohnensorte war *Sultana*. Im Herbst vor der Aussaat der Sojabohnen wurden bei den Strip-Till und Mulchsaatvarianten Phacelia als Zwischenfrucht ausgesät. Bei den Direktsaatvarianten wurde der massenwüchsige Grünroggen *Protector* ausgesät. Die Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten wurden zur ortsüblichen Zeit ausgesät (Tabelle 2). Es erfolgte etwa eine Woche vor der Saat eine Bearbeitung mit einer Scheibenegge. Bei den Varianten mit Totalherbizid wurde dieses wenige Wochen vor der Aussaat eingesetzt. Die Einsatzmenge lag bei 3,5 L Glyphosat je Hektar. Sämtliche Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten erhielten jedes Jahr die Voraufbauherbizidkombination Spectrum (0,65 L ha⁻¹ 468 g ha⁻¹ Dimethenamid-P), Centium 36 CS (0,25 L ha⁻¹,

90 g ha⁻¹ Clomazone) und Sencor WG (0,4 L ha⁻¹, 240 g ha⁻¹ Metribuzin). Diese Kombination wurde auch bei den Grünroggenvarianten mit Herbizid eingesetzt. Die Varianten ohne Herbizid erhielten kein Herbizid und auch keine mechanische Unkrautregulierung. Die Aussaat bei den Mulchsaatvarianten erfolgte mit einer Kreiseleggensäkombination. Bei den Strip-Till-Varianten wurden zunächst Streifen zur Aussaat gezogen und dann in einem zweiten Schritt in diese Streifen mit einer Einzelkornsämaschine mit Sojabohnenscheiben ausgesät.

Die Abfuhr und die Walzung des Grünroggens fanden jeweils zur Vollblüte des Roggens statt. Hierdurch sollte ein Wiederaustrieb und das Wiederaufstehen des Roggens vermieden werden. Nach der Abfuhr fand die Aussaat der Sojabohnen mit einer Direktsaatmaschine statt. Die gewalzten Varianten wurden in einem Schritt mit einer vorgebauten Messerwalze gewalzt und mit der Direktsaatmaschine eingesät.

Bei allen Varianten wurde der Kornertrag erhoben sowie regelmäßig der Unkrautdeckungsgrad mit dem Göttinger Schätzrahmen bonitiert.

Tabelle 2: Aussaat- und Erntetermine am Standort Stifterhof in Östringen

| | 2015 | 2016 | 2017 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|
| Aussaat Mulchsaat und Strip-Till | 23.04. | 09.05. | 17.05. |
| Aussaat Grünroggenvarianten | 15.05. | 27.05. | 26.05. |
| Ernte | 06.10. | 07.10. | 17.10. |

An drei weiteren Standorten (Eppingen, Riedlingen und Zaisenhausen) wurden in den Jahren 2016 und 2017 sogenannte On-Farm-Versuche durchgeführt. Bei allen gab es mindestens die Varianten Mulchsaat mit und ohne Totalherbizid bei ansonsten üblichem Herbizideinsatz. Zusätzlich gab es an den Standorten Eppingen und Riedlingen eine Pflugvariante, am Standort Zaisenhausen eine Direktsaatvariante. An allen Standorten wurde der Kornertrag erhoben.

3.4.2. Interviewstudie

Die Interviewstudie hatte das Ziel zu klären, welche Erfahrungen, Probleme und Problemlösungsansätze in der praktischen Landwirtschaft mit reduzierter Bodenbearbeitung im Sojaanbau gemacht wurden. Vor der Befragung der Landwirtinnen und Landwirte sowie der Beraterinnen und Berater wurde ein Interviewleitfaden erstellt, der vor allem offene Fragen enthielt wie beispielsweise

„Welche Erfahrungen haben Sie mit dem in Ihrem Betrieb verwendeten reduzierten Bodenbearbeitungssystem im Sojaanbau gemacht?“. Ergänzend zu den offenen Fragen gab es weitere Fragen, die den Gesprächsfluss aufrechterhalten sollten und die auf die oben genannten Ziele fokussierten. Weiterhin sind deduktiv Kategorien festgelegt worden, die aus unserer Sicht angesprochen werden sollten, wie zum Beispiel der Bereich Pflanzenschutz. Hiermit war es möglich, dass jede interviewte Person Erfahrungen zu bestimmten Themen äußern konnte, daneben aber auch die Freiheit hatte, Themen anzusprechen, die nicht im Vorhinein festgelegt waren. Die Interviews wurden digital aufgezeichnet und mit dem Programm F4transcript transkribiert. Im Anschluss daran wurden die verschriftlichten Interviews mit Hilfe des Computerprogramms F4analyse in die bereits erwähnten deduktiven Kategorien eingeteilt und weitere Kategorien wurden induktiv anhand des Interviewmaterials hinzugefügt. Neun Interviews wurden mit Landwirtinnen und Landwirten, zwei mit Beraterinnen und Beratern sowie eins mit einer Person, die sowohl Landwirt als auch Berater ist, im Winter 2015/16 geführt.

3.5. Schätzung der N₂-Fixierungsleistung und N-Bilanzierung

Die N₂-Fixierungsleistung wurde mit Hilfe der erweiterten Differenzmethode nach Stülpnagel (1982) mit der Erweiterung III um den Blattfall nach Hauser (1987) geschätzt.

Bei dieser Methode wird die Summe der gesamten N-Menge in der Leguminose und des N_{min}-Gehaltes zur Ernte gebildet. Von dieser Summe wird der auf gleiche Weise berechnete Wert einer Referenzfrucht subtrahiert.

$$\begin{aligned} \text{N}_2\text{-Fixierungsleistung} &= (\text{N}_{\text{Korn}} + \text{N}_{\text{Spross}} + \text{N}_{\text{Blattfall}} + \text{N}_{\text{min}})_{\text{Leguminose}} \\ &\quad - (\text{N}_{\text{Korn}} + \text{N}_{\text{Spross}} + \text{N}_{\text{Blattfall}} + \text{N}_{\text{min}})_{\text{Referenzfrucht}} \end{aligned}$$

Die nicht-legumen Referenzfrüchte, die nicht mit Stickstoff gedüngt wurden, sind in unseren Versuchen die Silomaisorten *Saludo* und *Ronaldinio* für die Sojasorten, sowie für die Erbsen die Sommergerstensorte *Grace* am Standort Forchheim am Kaiserstuhl oder die Hafersorten *Aragon* (2015) und *Max* (2016-2017) am Standort Hohenkammer. Die N-Rhizodeposition sowie die N-Menge in den Wurzeln wurden nicht erhoben, finden

jedoch eine gewisse Berücksichtigung durch das Einfließen des N_{\min} -Gehaltes in die Formel zur Berechnung der N_2 -Fixierungsleistung.

Die N-Bilanz wurde durch Subtraktion der N-Menge in den Körnern (N-Abfuhr) von der N_2 -Fixierungsleistung berechnet.

3.6. Ökonomische Leistung des Sojaanbaus

Für die Versuche zur N_2 -Fixierungsleistung wurden die Deckungsbeiträge der Sorten berechnet. Hierbei lag der Fokus auf der Nachfrucht, dem Winterweizen. Hier wurden die Deckungsbeiträge des Winterweizens mit den Leguminosen als Vorfrüchten mit den Deckungsbeiträgen des Winterweizens nach Anbau der Sommergerste oder des Hafers sowie mit denen nach Anbau der Silomaisensorten verglichen. Bei dem Vergleich der Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung und unterschiedlicher Herbizidstrategien wurden die direkt- und arbeitskostenfreien Leistungen (DAL) berechnet. Zur Berechnung der Deckungsbeiträge kam das Programm Kalkulationsdaten Marktfrüchte der Landesanstalt für Landwirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum aus Baden-Württemberg zum Einsatz. Die Erzeugerpreise, sowie die Reinnährstoffkosten wurden aus dem Programm Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft entnommen. Dabei wurde für die jeweilige Kultur der Erzeugerpreis der letzten fünf Jahre (2013-2017) als Mittelwert angesetzt. Weiterhin wurden die Reinnährstoffkosten von 2018 für die nach Entzug berechnete Düngung angesetzt. Bei beiden ökologisch bewirtschafteten Standorten wurden die Reinnährstoffkosten für Stickstoff jeweils nicht berücksichtigt, da Stickstoff ein wesentlicher Faktor bei der Betrachtung des Vorfruchtwertes ist. Prämien wurden jeweils nicht einbezogen. Die Berechnung des Deckungsbeitrages und der DAL erfolgte jeweils mit dem parzellengenauen Ertrag, damit eine statistische Auswertung erfolgen konnte. Dabei wurden beim Winterweizen die unterschiedlichen Erzeugerpreise je nach Einstufung in unterschiedliche Qualitätsstufen berücksichtigt. Bei allen Auswertungen wurde ein mittlerer, typischer Einsatz von Bearbeitungsgängen angenommen. Die Kosten der Zwischenfrucht bei den Erbsen wurden dem folgenden Winterweizen zugerechnet. Bei der Berechnung der Deckungsbeiträge für den Silomais wurde ein Verkauf ab Feld ohne Rückführung von Gärresten angenommen. Für die Jahre 2015-2016, 2016-2017 und 2017-2018 wurde jeweils eine Deckungsbeitragssumme aus den Vorfrüchten (Erbse, Sojabohne, Sommergerste,

Hafer und Silomais) und der Nachfrucht (Winterweizen) bei den ökologisch bewirtschafteten Versuchen berechnet.

3.7. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte als Varianzanalyse über ein gemischtes, hierarchisches Modell mit SAS proc mixed.

Beispielhaftes Modell:

$Y = \text{Jahr Kultur Kultur*Sorte Jahr*Kultur Jahr*Kultur*Sorte WDH}$

Da es sich um ein hierarchisches Modell handelt, ist mit Kultur*Sorte der Sorteneffekt gemeint. Die Mittelwertvergleiche erfolgten mit dem Tukey-Test nach einem signifikanten F-Test.

4. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

4.1. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen Anbau

4.1.1. Rheinstetten

Kornertrag Erbse und Soja

Am Standort Rheinstetten hatten die Erbsen außer im Jahr 2017 stets für das Einzeljahr gesehen einen statistisch signifikant höheren Ertrag als die Sojabohnen. Der Ertrag der Erbsen lag in allen Jahren statistisch gesehen auf dem gleichen Niveau, obwohl im Jahr 2016 die Erträge etwas geringere waren. Bei den Sojabohnen ist der im Verhältnis niedrige Ertrag im Jahr 2016 auffällig. Grund dafür ist wahrscheinlich das schlechte Auflaufen der Sojabohnen bedingt durch einen Kälteeinbruch (Abbildung 1, April-Mai).

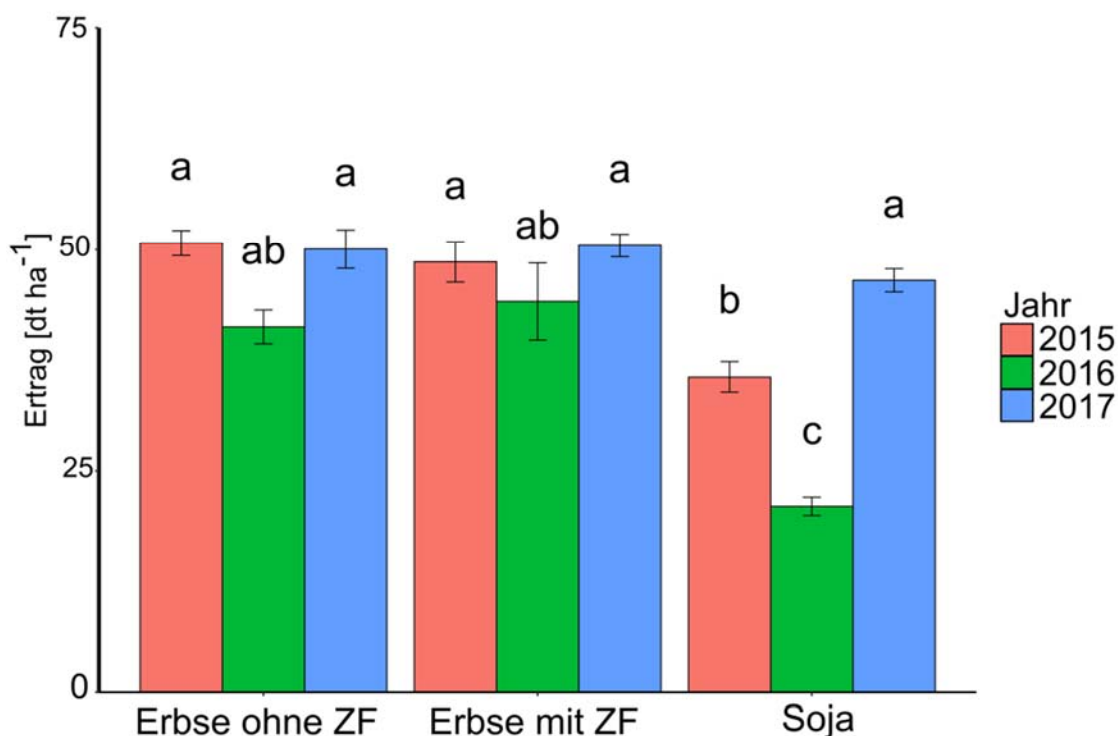


Abbildung 10: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbse ohne und mit Zwischenfrucht (ZF) und Soja) gemittelt über die Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*) am Standort Rheinstetten-Forchheim über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Der in Tabelle 4 aufgeführte Sorteneffekt ist mit dem stets höheren Ertrag der Erbsensorten im Vergleich zu den Sojasorten zu erklären. Zusätzlich war der Ertrag von der Erbsensorte *Alvesta* mit Zwischenfrucht höher als von *Respect* mit Zwischenfrucht, während die anderen Erbsensorten ein gleiches Niveau erzielten.

Ertrag Körnermais, Sommergerste und Silomais

Die Erträge der anderen, nicht-legumen Kulturen am Standort Rheinstetten-Forchheim verhielten sich ähnlich, wie die Leguminosen mit dem höchsten Ertrag im Jahr 2017, während das Jahr 2015 eine mittlere Position einnimmt und im Jahr 2016 die niedrigsten Erträgen erzielt wurden (Abbildung 11).

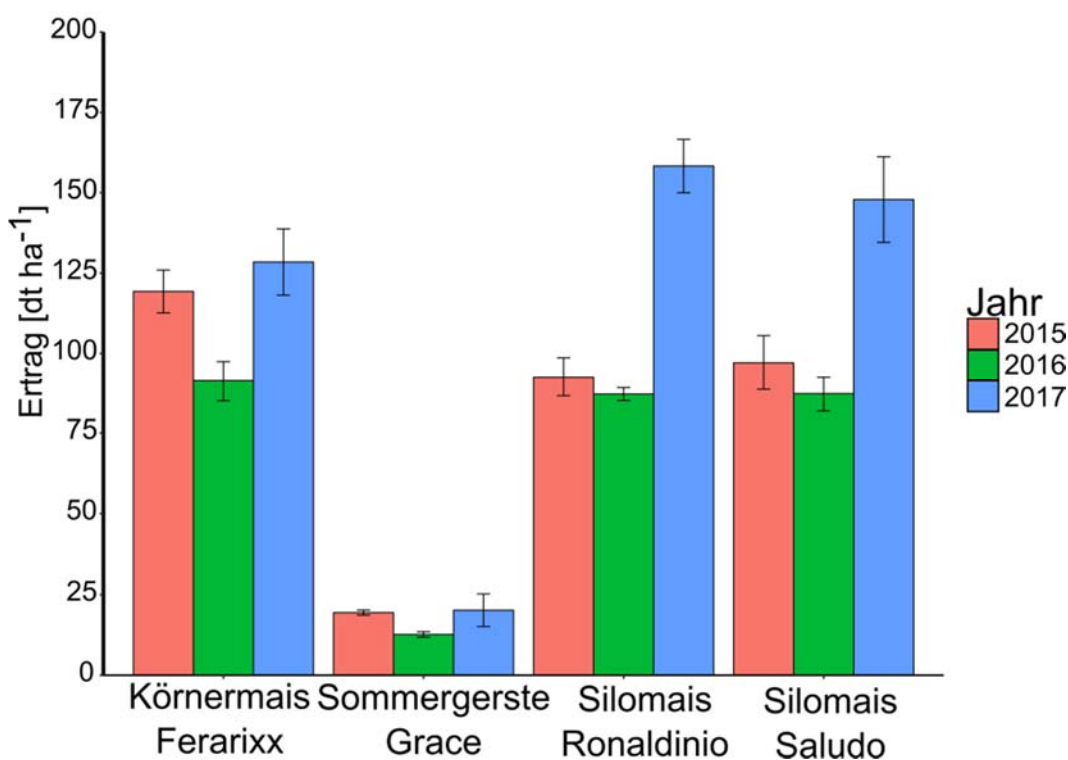


Abbildung 11: Kornerträge (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹: Körnermais und Sommergerste) und Biomasseerträge (bei 100 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹: Silomais) von verschiedenen Kulturen und Sorten (Körnermais: *Ferarixx*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Rheinstetten-Forchheim über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

N₂-Fixierungsleistung

Die Sojabohnen hatten in den Jahren 2015 und 2017 eine höhere N₂-Fixierungsleistung als die Erbsen, während diese im Jahr 2016 bei beiden Kulturen auf dem gleichen Niveau lag (Abbildung 12, Tabelle 4). Zusätzlich gab es einen Sorteneffekt, der zeigt,

dass die Sojabohnensorte *ES Mentor* eine höhere N₂-Fixierungsleistung erzielte als alle anderen Sorten, die auf dem gleichen Niveau lagen.

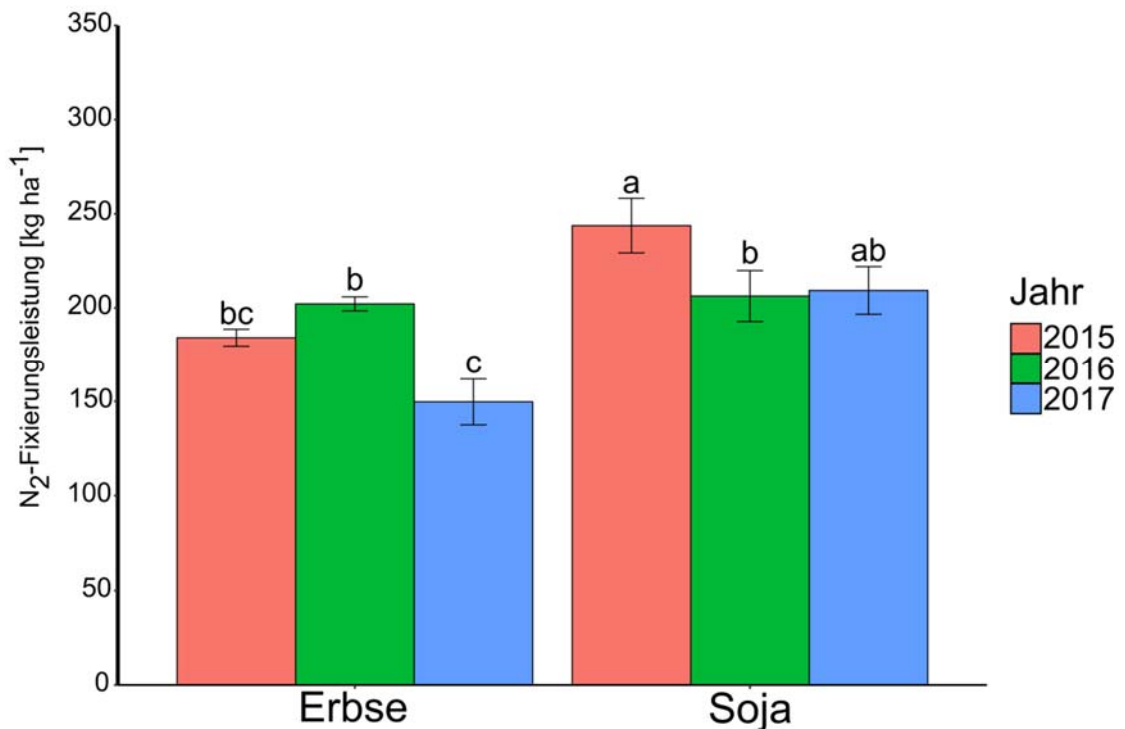


Abbildung 12: N₂-Fixierungsleistung (kg ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbse ohne Zwischenfrucht und Soja) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*) am Standort Rheinstetten-Forchheim über drei Jahre (2015, 2016, 2017) gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

N-Menge im Korn und in den Ernterückständen sowie N-Bilanz

Tabelle 3: N-Menge in den Ernterückständen, im Korn sowie die N-Bilanz der Sojasorten *Merlin* und *ES Mentor* sowie der Erbsensorten *Alvesta* und *Respect* am Standort Rheinstetten

| | N-Menge in den Ernterückstände kg ha ⁻¹ | | | N-Menge im Korn kg ha ⁻¹ | | | N-Bilanz kg ha ⁻¹ | | |
|------------------|--|------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2015 | 2016 | 2017 | 2015 | 2016 | 2017 |
| <i>Merlin</i> | 68 ^B | 74 ^A | 61 ^B | 195 ^B | 131 ^{CD} | 254 ^A | +16 ^B | +47 ^A | -73 ^D |
| <i>ES Mentor</i> | 79 ^B | 124 ^A | 90 ^B | 235 ^B | 137 ^{CD} | 278 ^A | +41 ^B | +98 ^A | -41 ^D |
| <i>Alvesta</i> | 37 ^C | 34 ^C | 26 ^C | 154 ^{CD} | 127 ^D | 153 ^C | +30 ^B | +69 ^A | -18 ^C |
| <i>Respect</i> | 43 ^C | 40 ^C | 39 ^C | 150 ^{CD} | 130 ^D | 171 ^C | +34 ^B | +76 ^A | -6 ^C |

Die N-Menge in den Ernterückständen lag in allen Jahren bei den Sojabohnen signifikant höher als bei den Erbsen. Bei der N-Menge im Korn ergab sich in den Jahren 2015 und 2017 ein höherer Wert bei den Sojabohnen als bei den Erbsen, während im Jahr 2016 ein vergleichbarer Wert gemessen wurde. Die Berechnung der N-Bilanz ergibt in den Jahren 2015 und 2016 bei Erbsen und Sojabohnen jeweils einen positiven Wert, während im Jahr 2017 ein negativer Wert ermittelt wird. Dabei ist die N-Bilanz der Sojabohnen in 2017 signifikant negativer als die der Erbsen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 in Rheinstetten-Forchheim

| P-Werte | Leguminosen- ertrag | N₂- Fixierungs- leistung | N-Menge Ernterückstände | N-Menge im Korn | N- Bilanz |
|-------------------|--------------------------------|--|------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Jahr | 0,0011 | 0,0574 | 0,0461 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,0206 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0256 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur | 0,0002 | 0,0021 | 0,0152 | 0,0001 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,2847 | 0,6697 | 0,0592 | 0,4630 | 0,2887 |
| Block | 0,7047 | 0,6963 | 0,8938 | 0,5996 | 0,5427 |

4.1.2. Nachfrucht Winterweizen am Standort Rheinstetten

N_{min}-Gehalt zum Vegetationsende des Winterweizens

Zum Vegetationsende zeigte die Varianzanalyse für den N_{min}-Gehalt am Standort Rheinstetten (Abbildung 13) eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 5). Im Jahr 2015 unterschieden sich die Kulturen nicht statistisch signifikant. Die Erbsen ohne Zwischenfrucht und die Sojabohnen hatten 2016 einen signifikant höheren N_{min}-Gehalt als der Silomais. Die N_{min}-Werte im Jahr 2017 unterschieden sich dann wieder nicht statistisch signifikant zwischen den Kulturen.

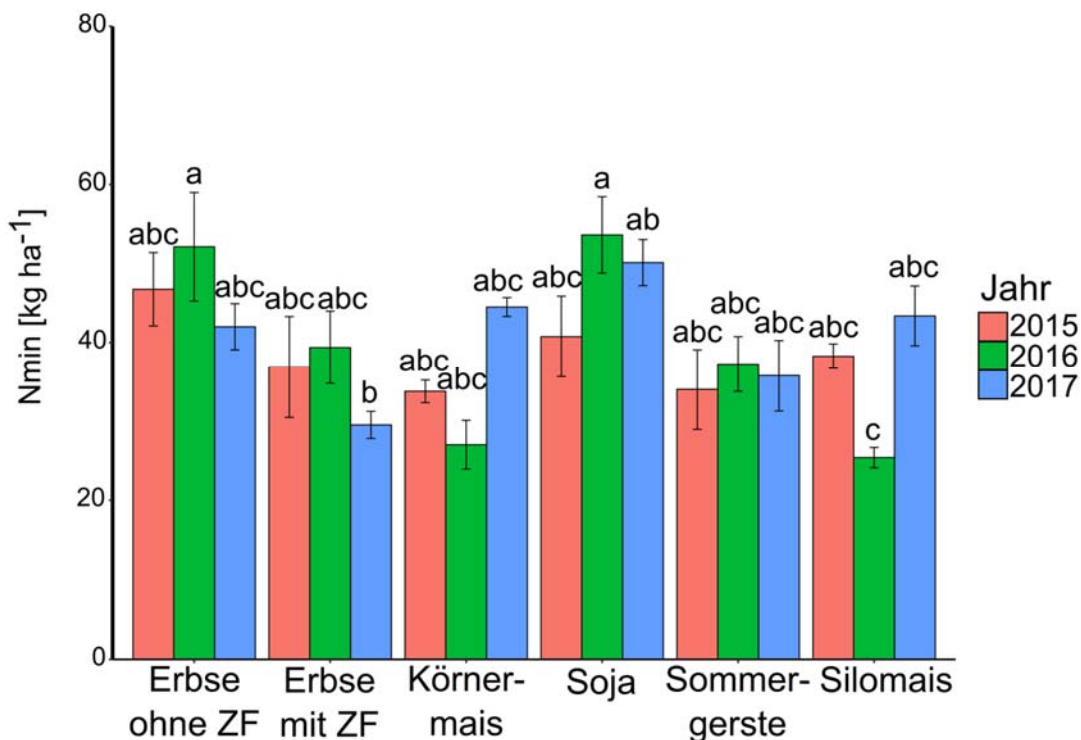


Abbildung 13: N_{min}-Gehalte (kg ha⁻¹) zum Vegetationsende des Winterweizens (*Ambello*) jeweils nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht, Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Körnermais: *Ferarixx*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Rheinstetten-Forchheim im Mittel über drei Jahre (2016, 2017, 2018) gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

N_{min}-Gehalt zum Vegetationsbeginn des Winterweizens

Nach der Varianzanalyse der N_{min}-Gehalte, jeweils zum Vegetationsbeginn der Jahre nach Anbau der Vorfrüchte, bestand ein Jahr:Sorteneffekt (Tabelle 5). Es fällt auf, dass zum Vegetationsbeginn 2017 bei allen Kulturen die höchsten N_{min}-Werte gemessen wurden (Abbildung 14). Der Grund hierfür sind vermutlich die geringen Niederschläge in den Wintermonaten 2016/2017 (Abbildungen 1 und 2). Die N_{min}-Werte nach Anbau der Leguminosensorten sind statistisch gesehen in den Jahren 2016 und 2018 nicht höher als die der anderen Sorten. Lediglich im Jahr 2017 haben die Winterweizenparzellen nach Anbau von *Respect* ohne Zwischenfrucht und *Merlin* einen signifikant höheren N_{min}-Wert.

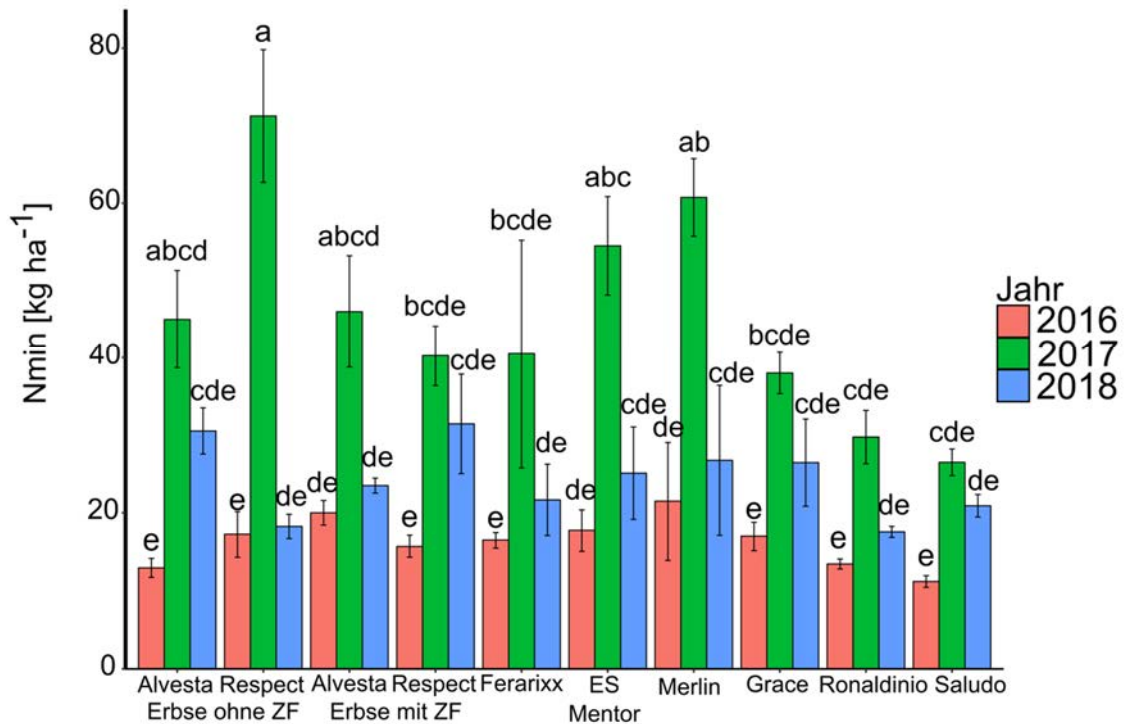


Abbildung 14: N_{min}-Gehalte (kg ha⁻¹) zu Vegetationsbeginn des Winterweizens (*Ambello*) jeweils im Folgejahr nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht, Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Körnermais: *Ferarixx*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Rheinstetten-Forchheim über drei Jahre (2016, 2017, 2018). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Kornertrag des Winterweizens

Beim Kornertrag des Winterweizens am Standort Rheinstetten zeigte die Varianzanalyse einen Jahreseffekt (Abbildung 15, Tabelle 5). Im Jahr 2016 wurde gefolgt vom Jahr 2017 und dann vom Jahr 2018 der höchste Ertrag erzielt. Da der Winterweizen unter Berücksichtigung des N_{min}-Wertes zum Vegetationsbeginn für alle Vorkulturen parzellengenau mit Stickstoff gedüngt wurde, war kein anderer Effekt zu erwarten. Der geringere Ertrag in 2018 ist vermutlich auf die relativ heiße und trockene Witterung zurückzuführen, die auch durch die Bewässerung nicht komplett ausgeglichen werden konnte (Abbildung 2).

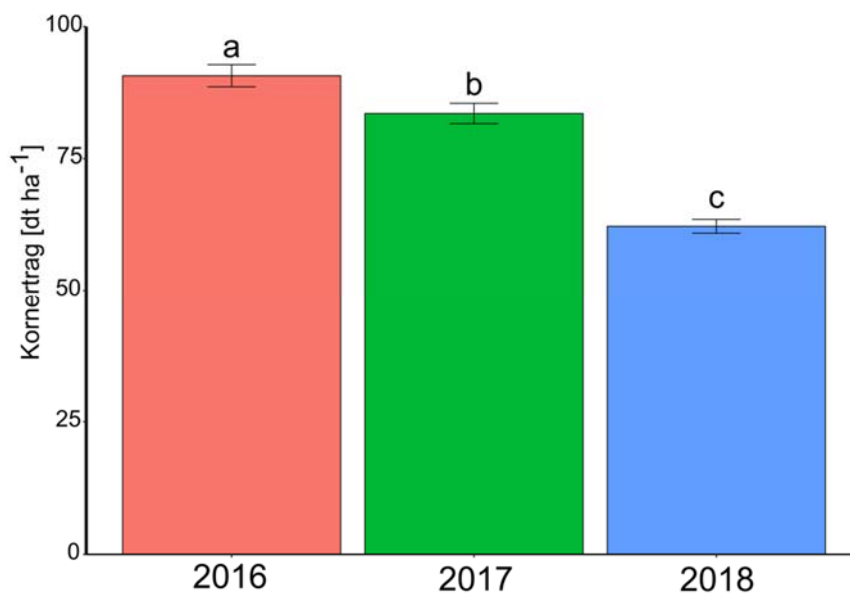


Abbildung 15: Korntrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) des Winterweizens (Ambello) jeweils im Folgejahr nach Anbau der verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht, Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Körnermais: *Ferarixx*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Rheinstetten-Forchheim über drei Jahre (2016, 2017, 2018) gemittelt über Kulturen und Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Rohproteingehalt des Winterweizens

Der Rohproteingehalt beim Winterweizen am Standort Rheinstetten zeigte einen Jahr:Kultureffekt und Sorteneffekt (Abbildung 16, Tabelle 5). Der Rohproteingehalt war im Jahr 2018 bedingt durch den geringeren Ertrag (Abbildung 15) und die warme Witterung (Abbildung 2) am höchsten. Die Rohproteingehalte unterschieden sich in den Jahren 2016 und 2017 zwischen den Kulturen jeweils nicht. 2018 hatte der Weizen nach der Sommergerste einen höheren Rohproteingehalt als nach Silomais.

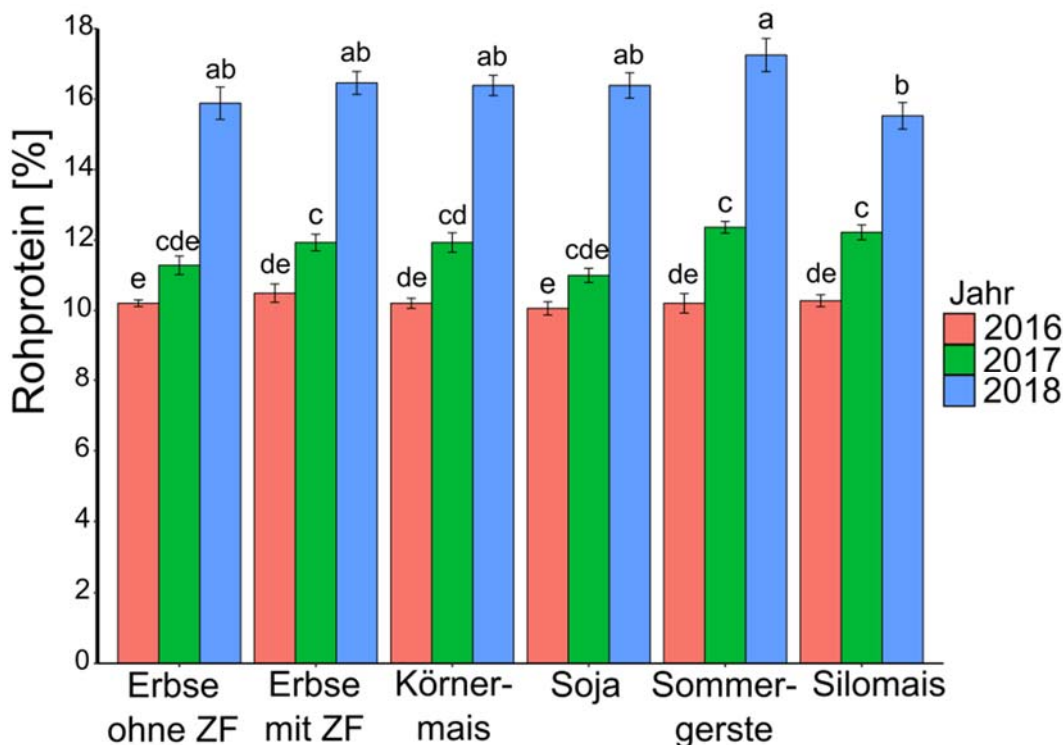


Abbildung 16: Rohproteingehalt (% in der Trockenmasse) von Winterweizen (Ambello) jeweils im Folgejahr nach Anbau der verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Körnermais, Sommergerste und Silomais) gemittelt über die Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Körnermais: *Ferarixx*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Rheinstetten-Forchheim über drei Jahre (2016, 2017, 2018). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Tabelle 5: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2016 bis 2018 in Rheinstetten-Forchheim

| P-Werte | Winterweizen- ertrag | Rohprotein- gehalt | N _{min} -Gehalt Veg.-Beginn | zu N _{min} -Gehalt zu Veg.-Ende |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|---|--|
| Jahr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,7796 |
| Kultur | 0,2493 | 0,0154 | 0,0002 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,5241 | 0,0378 | 0,5419 | 0,9860 |
| Jahr*Kultur | 0,6808 | 0,0302 | 0,0117 | 0,0088 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,2696 | 0,9299 | 0,0443 | 0,6291 |
| Block | 0,9021 | 0,4588 | 0,6074 | 0,6578 |

4.2. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau

4.2.1. Standort Forchheim am Kaiserstuhl

Kornertrag von Erbse und Soja

Beim Kornertrag am Standort Forchheim am Kaiserstuhl bestand ein signifikanter Sorteneffekt (Tabelle 7). Gemittelt über die Jahre lagen die Erbsensorten beim Kornertrag stets signifikant höher als die Sojabohnensorten.

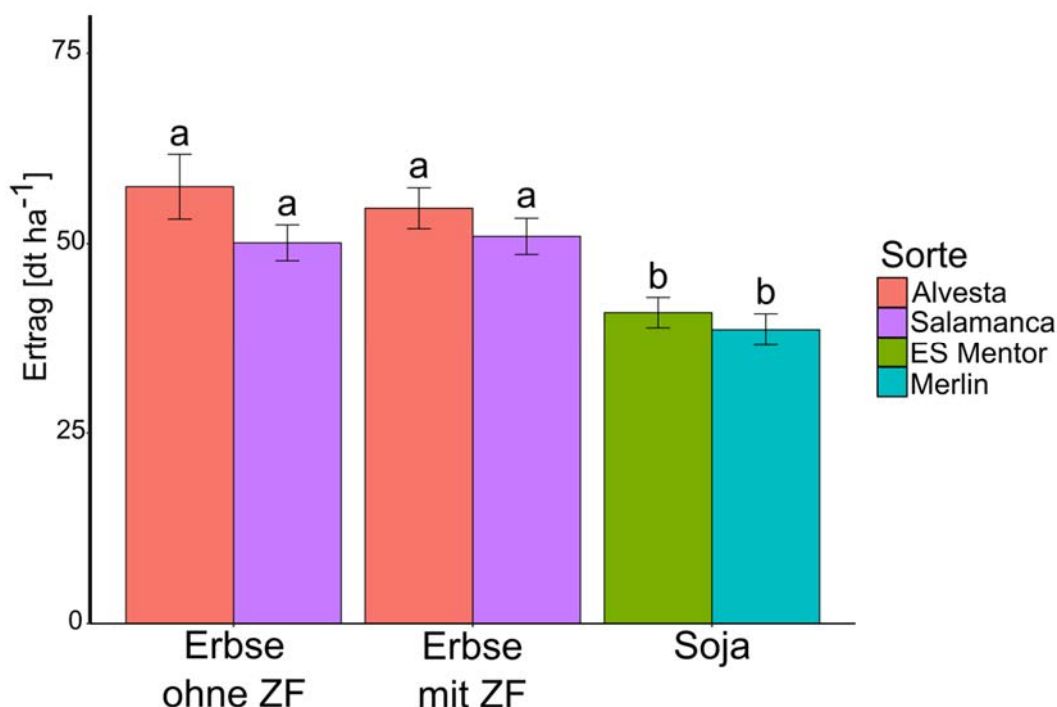


Abbildung 17: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl gemittelt über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Erträge von Sommergerste und Silomais

In Abbildung 18 sind die Kornerträge und die Biomasseerträge von Sommergerste und Silomais am Standort Forchheim am Kaiserstuhl zu sehen. Der Ertrag der Sommergerste unterlag relativ großen Schwankungen mit dem niedrigsten Ertrag im Jahr 2016, einem mittleren Ertrag im Jahr 2015 und dem höchsten Ertrag im Jahr 2017.

Die Erträge der Silomaisorten nahmen von 2015 bis 2017 zu, wobei *Ronaldinio* einen höheren Ertrag aufwies als *Saludo*.

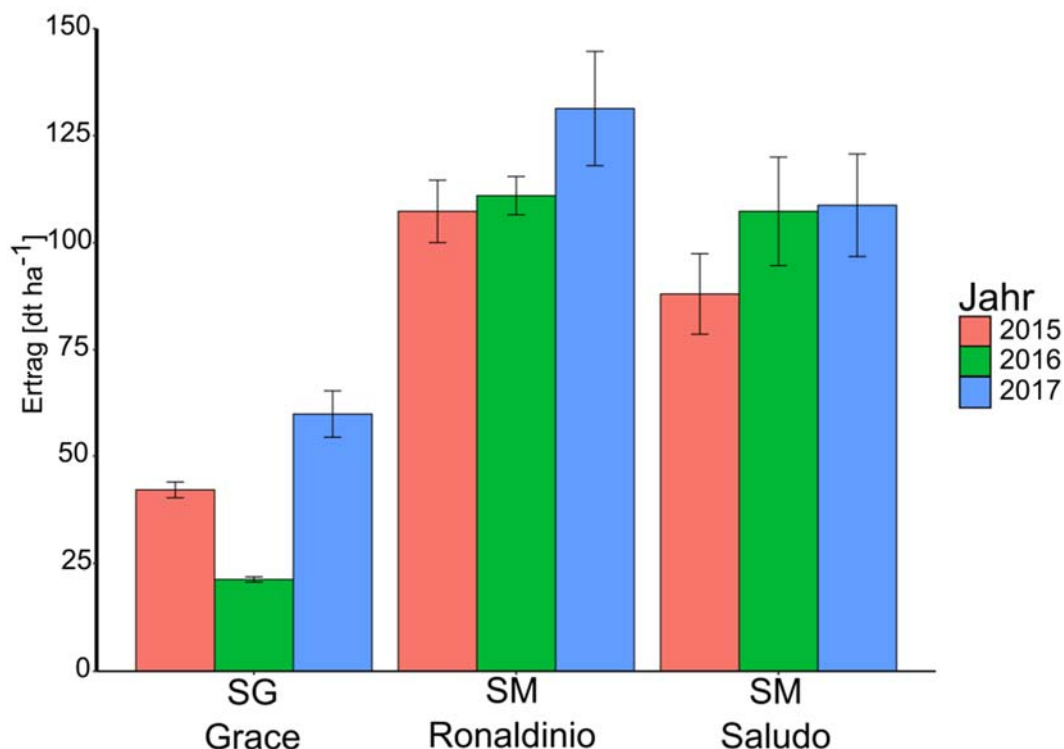


Abbildung 18: Kornenertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹: Sommergerste (SG), und bei 100 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹: Silomais (SM)) von verschiedenen Kulturen (Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

N₂-Fixierungsleistung

Aus Tabelle 7 geht hervor, dass für die N₂-Fixierungsleistung am Standort Forchheim am Kaiserstuhl eine Jahr:Kultur-Interaktion vorliegt. Die N₂-Fixierungsleistung nimmt bei den Sojabohnen von 2015 bis 2017 jedes Jahr zu, während sie bei den Erbsen stagniert. Betrachtet man die einzelnen Jahre, so fällt auf, dass die N₂-Fixierungsleistung der Sojabohne stets über der der Erbse liegt.

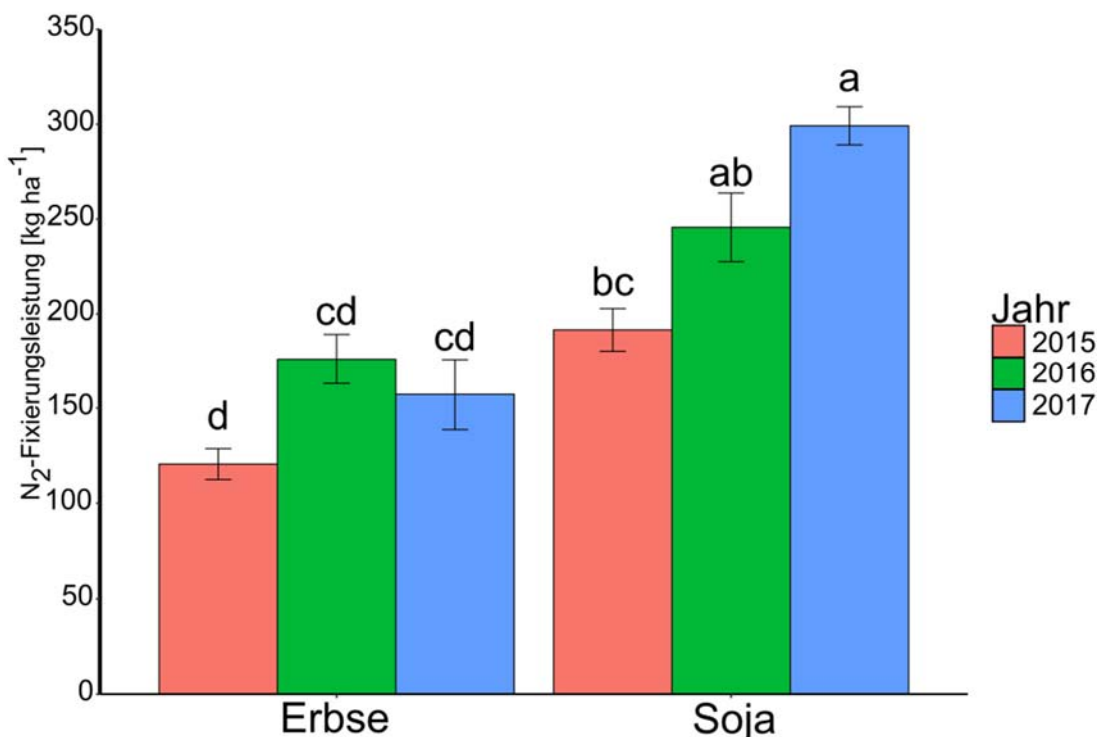


Abbildung 19: N₂-Fixierungsleistung (kg ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2015, 2016, 2017), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

N-Menge im Korn und in den Ernterückständen sowie N-Bilanz

Tabelle 6: N-Menge in Ernterückstände, in den Körnern und N-Bilanz am Standort Forchheim am Kaiserstuhl für die Sojabohnensorten *Merlin* und *ES Mentor* und die Erbsensorten ohne Zwischenfrucht *Alvesta* und *Salamanca*

| | N-Menge in Ernterückständen (kg ha ⁻¹) | | | N-Menge im Korn (kg ha ⁻¹) | | | N-Bilanz (kg ha ⁻¹) | | |
|------------------|--|------------------|-----------------|--|------------------|------------------|---------------------------------|------------------|------------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2015 | 2016 | 2017 | 2015 | 2016 | 2017 |
| <i>Merlin</i> | 60 ^B | 67 ^{AB} | 88 ^A | 208 ^A | 248 ^A | 316 ^A | -25 ^{AB} | -21 ^A | -6 ^A |
| <i>ES Mentor</i> | 56 ^B | 79 ^{AB} | 90 ^A | 249 ^A | 273 ^A | 314 ^A | -50 ^{AB} | -8 ^A | -26 ^A |
| <i>Alvesta</i> | 20 ^C | 61 ^B | 25 ^C | 167 ^B | 189 ^B | 248 ^B | -52 ^B | -13 ^A | -62 ^B |
| <i>Salamanca</i> | 21 ^C | 63 ^B | 23 ^C | 167 ^B | 181 ^B | 190 ^B | -41 ^B | -5 ^A | -61 ^B |

Bei der N-Menge in den Ernterückständen trat eine Jahr:Kultur-Interaktion auf (Tabellen 6 und 7). In den Jahren 2015 und 2017 war die N-Menge in den Ernterückständen bei den Erbsen stets niedriger als bei den Sojabohnen. Im Jahr 2016 lagen diese auf

gleichem Niveau. Bei der N-Menge im Korn bestand es eine Kultur und einen Jahreseffekt. Die N-Menge im Korn nahm von 2015 bis 2017 zu. Sie war bei den Sojabohnen stets höher als bei den Erbsen. Durch die Abfuhr über die Körner ergibt sich, mit der N₂-Fixierungsleistung verrechnet stets eine negative N-Bilanz (Tabelle 6). Bei dieser tritt eine Jahr:Kultur-Interaktion auf. Im Jahr 2017 fällt die N-Bilanz bei den Erbsen negativer aus als bei den Sojabohnen, während sie in den anderen beiden Jahren statistisch gesehen gleich ist.

Tabelle 7: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 in Forchheim am Kaiserstuhl.

| P-Werte | Leguminosen- ertrag | N₂- Fixierungs- leistung | N-Menge Ernte- rückstände | N-Menge im Korn | N-Bilanz |
|-------------------|--------------------------------|--|--|----------------------------|-----------------|
| Jahr | 0,0068 | 0,0048 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0128 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0013 |
| Kultur*Sorte | 0,0480 | 0,4385 | 0,7903 | 0,0649 | 0,1301 |
| Jahr*Kultur | 0,9406 | 0,0093 | 0,0001 | 0,2981 | 0,0002 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,1746 | 0,1371 | 0,8398 | 0,2004 | 0,1430 |
| Block | 0,4086 | 0,3527 | 0,9340 | 0,1002 | 0,9393 |

4.2.2. Winterweizen am Standort Forchheim am Kaiserstuhl

N_{\min} -Gehalt zum Vegetationsende des Winterweizens

Bei dem N_{\min} -Gehalt des Winterweizens am Standort Forchheim am Kaiserstuhl ergab sich zum Vegetationsende (Abbildung 20) eine Jahr:Kultur-Interaktion. Im Jahr 2015 hatte der Winterweizen nach Anbau der Erbse ohne Zwischenfrucht einen höheren N_{\min} -Gehalt als die anderen Varianten. Für das Jahr 2016 lag der N_{\min} -Gehalt des Winterweizens nach den Leguminosen höher als nach Sommergerste und Silomais. Schließlich im Jahr 2017 lag der N_{\min} -Gehalt des Winterweizens nach Soja und Sommergerste über dem der Erbse mit Zwischenfrucht, während alle anderen Varianten statistisch gesehen auf einem Niveau lagen.

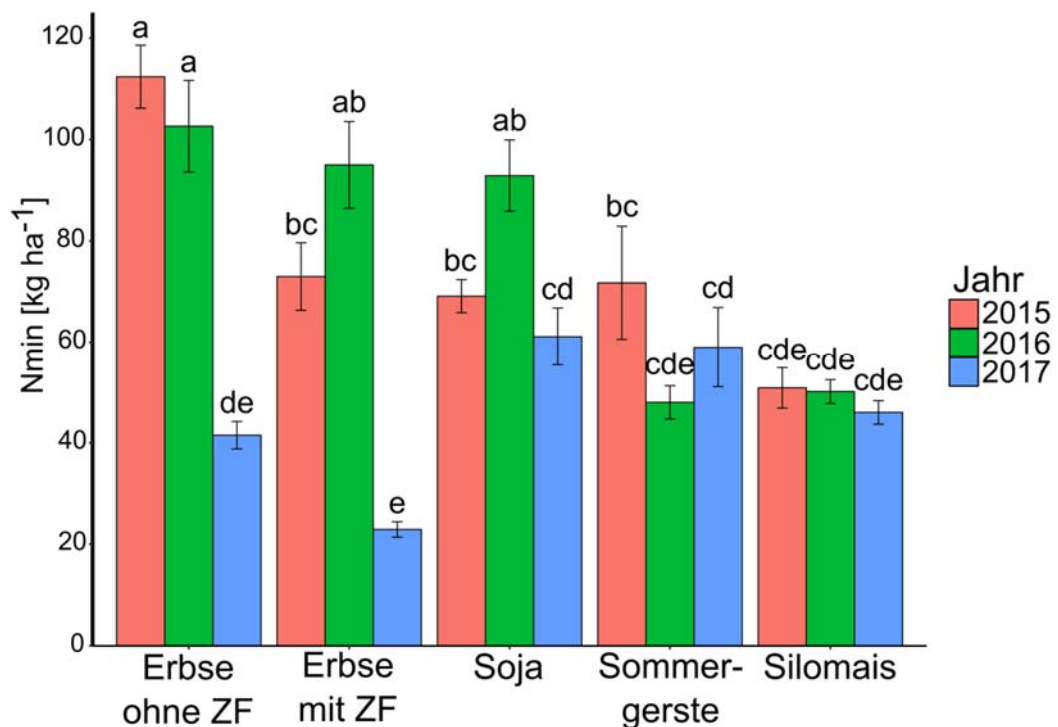


Abbildung 20: N_{\min} -Gehalte (kg ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) zum Vegetationsende nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2015, 2016, 2017), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

N_{min}-Gehalt nach Vegetationsbeginn des Winterweizens

Bei den N_{min}-Werten zu Vegetationsbeginn des jeweiligen Jahres bestand eine Jahr:Kultur-Interaktion. In den Jahren 2016 und 2018 unterschieden sich die N_{min}-Werte zu Vegetationsbeginn zwischen den Kulturen nicht. Im Jahr 2017 war der N_{min}-Gehalt des Winterweizens nach Anbau von Soja niedriger als nach Anbau von Silomais. Alle anderen Varianten lagen statistisch gesehen auf einem Niveau.

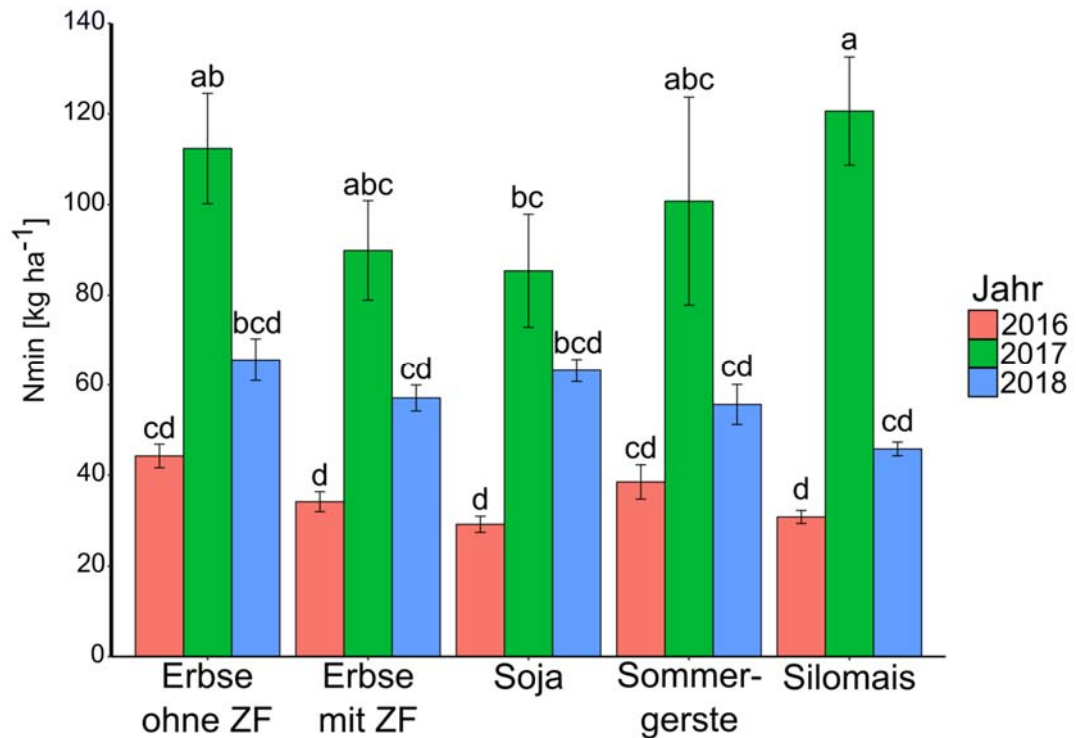


Abbildung 21: N_{min}-Gehalte (kg ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) zum Vegetationsbeginn nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2016, 2017, 2018), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Kornertrag des Winterweizens

Bei den Kornerträgen des Winterweizens ergab sich wiederum eine Jahr:Kultur-Interaktion bei der sich zeigte, dass die Erträge im Jahr 2016 nach Anbau von Erbsen ohne Zwischenfrucht höher waren, als nach Anbau von Sommergerste und Silomais (Abbildung 22, Tabelle 8). Im Jahr 2017 war der Ertrag nach Anbau der Leguminosen höher als nach Anbau von Sommergerste und Silomais. Schließlich unterschied sich der Ertrag nach Anbau von Silomais von allen anderen Kulturen im Jahr 2018. Nach Soja und Erbse bestanden in keinem Jahr signifikante Unterschiede.

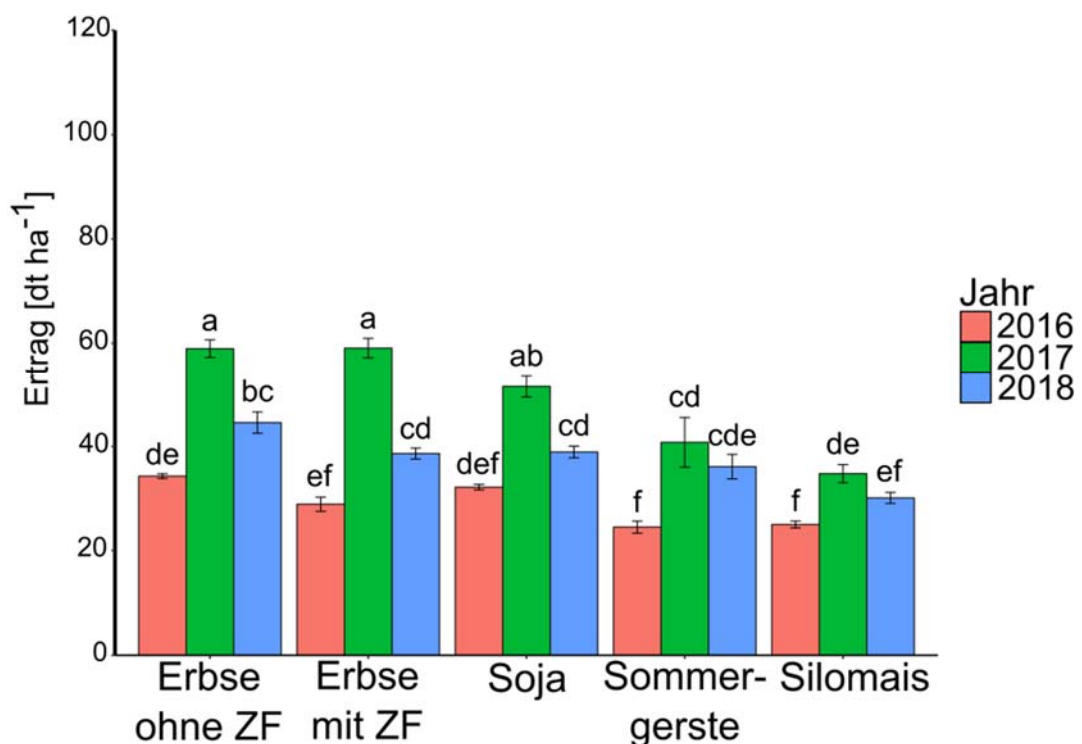


Abbildung 22: Kornerträge (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2016, 2017, 2018), gemittelt über die Sorten. Der Fehlerbalken zeigt den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Rohproteingehalt des Winterweizens

Beim Rohproteingehalt des Winterweizens am Standort Forchheim am Kaiserstuhl gab es ebenfalls eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 8). In den Jahren 2016 und 2018 hatte der Winterweizen nach Anbau aller Kulturen statistisch gesehen Rohproteingehalte, die sich nicht unterschieden. Im Jahr 2017 hingegen, hatte der Winterweizen nach Anbau

der Erbsen einen höheren Proteingehalt als der Winterweizen nach Anbau von Sommergerste und Silomais. Der Winterweizen als Nachfrucht der Sojabohne hatte im Jahr 2017 einen höheren Rohproteingehalt als die Sommergerste.

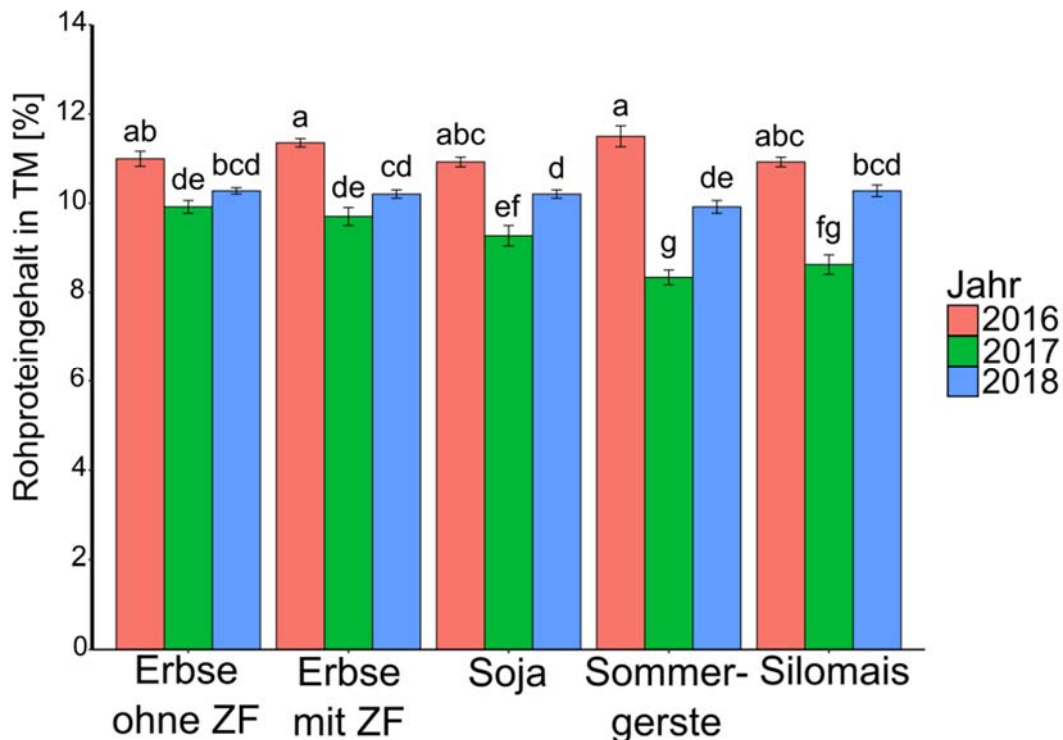


Abbildung 23: Rohproteingehalt (% in der Trockenmasse) von Winterweizen (*Florian*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2016, 2017, 2018), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Tabelle 8: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Nachfrucht-Versuche mit Winterweizen in den Jahren 2016 bis 2018 in Forchheim am Kaiserstuhl

| P-Werte | Winterweizen- ertrag | Rohprotein- gehalt | N _{min} -Gehalt zu Veg.-Beginn | N _{min} -Gehalt zu Veg.-Ende |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|--|--|
| Jahr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0344 | 0,0003 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0537 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,9715 | 0,4682 | 0,8285 | 0,9519 |
| Jahr*Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0320 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,8107 | 0,5724 | 0,9270 | 0,6271 |
| Block | 0,4052 | 0,5331 | 0,5757 | 0,8443 |

4.2.3. Standort Hohenkammer

Kornertrag von Erbse und Soja

Beim Kornertrag der Leguminosen bestand eine Sorte:Jahr-Interaktion (Tabelle 10), so war der Ertrag von *Alvesta* höher als bei *Salamanca* und *ES Mentor*, war aber nicht unterschiedlich zu *Merlin*. Im Jahr 2016 hatte *Merlin* einen signifikant niedrigeren Ertrag als die anderen Sorten. In 2017 wies *ES Mentor* den höchsten Ertrag auf, gefolgt von *Merlin*. Beide Sojasorten hatten signifikant höhere Erträge als die Erbsen.

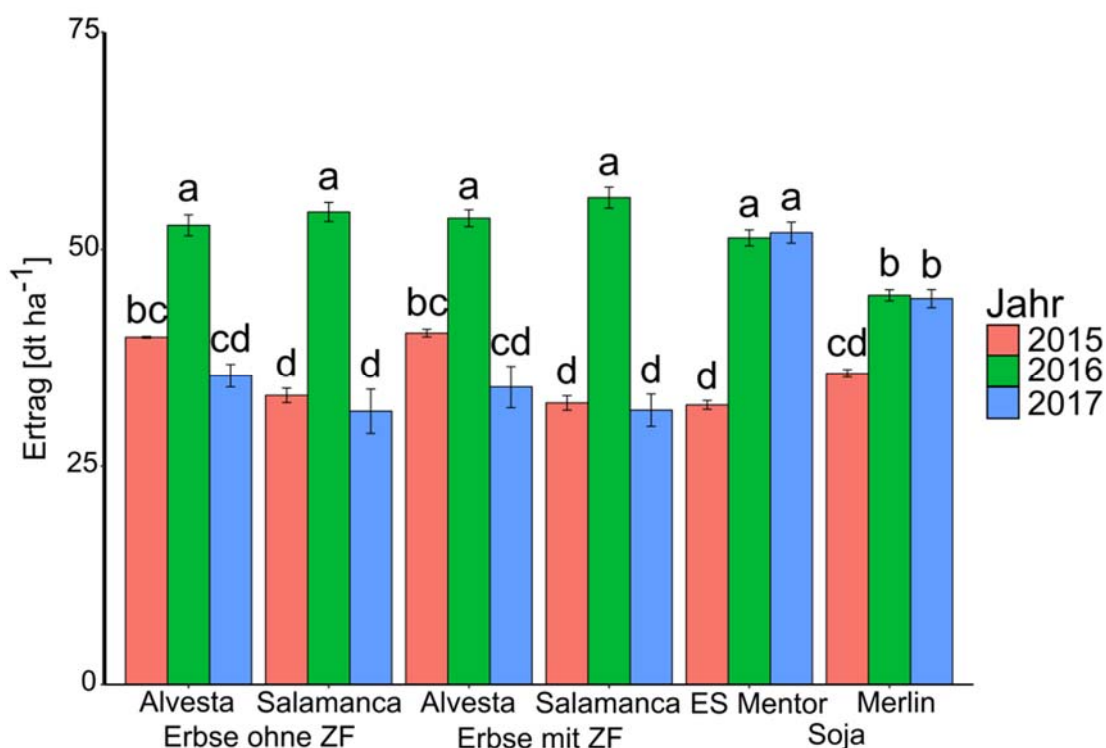


Abbildung 24: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Erträge von Hafer und Silomais

Der Hafer hatte im Jahr 2016 die höchsten Erträge, beim Silomais war es *Ronaldinio*. Er hatte auch relativ stabile Erträge, während beim Silomais *Saludo* von 2015 bis 2017 eine Steigerung des jährlichen Ertrages festzustellen war.

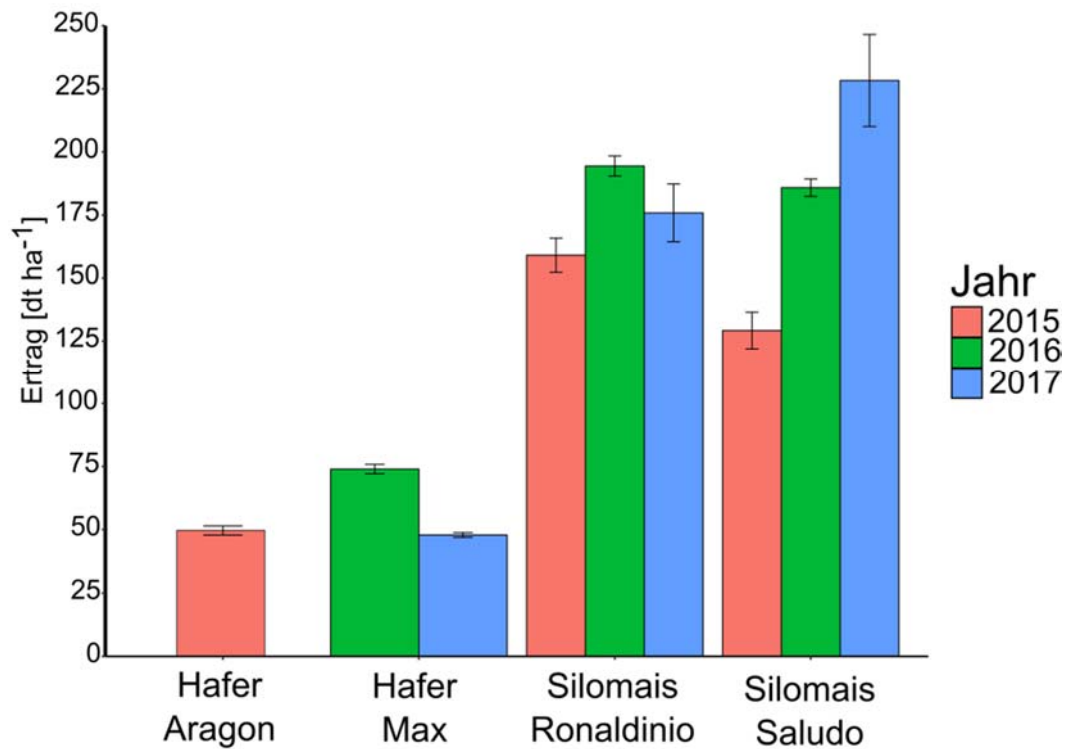


Abbildung 25: Kornenertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹: Hafer und bei 100 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹: Silomais) von verschiedenen Kulturen (Hafer und Silomais) mit den Sorten (Hafer: *Aragon* (2015), *Max* (2016-2017), Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

N₂-Fixierungsleistung

Bei der N₂-Fixierungsleistung am Standort Hohenkammer wurde bei der Varianzanalyse eine Jahr:Sorten-Interaktion festgestellt. So hatte in 2016 und 2017 die Sojasorte *ES Mentor* die höchste N₂-Fixierungsleistung, während die Erbsen mit ihrer N₂-Fixierungsleistung statistisch gesehen niedriger lagen. Dies galt auch für die Sojasorte *Merlin*, diese hatte jedoch im Jahr 2017 eine N₂-Fixierungsleistung auf dem gleichen Niveau wie die Erbsen.

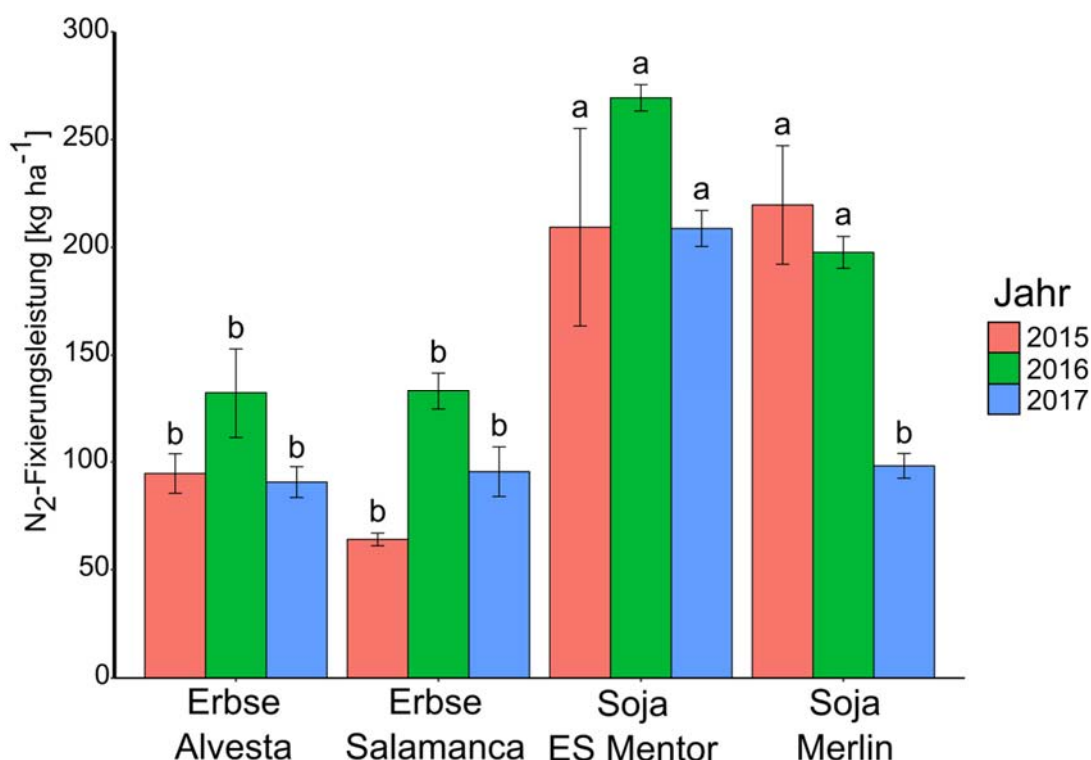


Abbildung 26: N₂-Fixierungsleistung (kg ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen ohne Zwischenfrucht (ZF) und Soja) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

N-Menge im Korn und in den Ernterückständen sowie N-Bilanz

Bei den N-Mengen in den Ernterückständen ergab sich eine Jahr:Sorte-Interaktion (Tabelle 10). Im Jahr 2015 hatte *ES Mentor* eine höhere N-Menge in den Ernterückständen als die Erbsen, unterschied sich jedoch nicht signifikant von *Merlin*. Im folgenden Jahr 2016 hatte *ES Mentor*, dann eine signifikant höhere N-Menge in den Ernterückständen als die anderen Leguminosensorten, die statistisch gesehen auf dem gleichen Niveau lagen. Für das Jahr 2017 unterscheiden sich die Sorten statistisch gesehen nicht.

Bei der N-Menge im Korn bestand ebenfalls eine Jahr:Sorte-Interaktion (Tabelle 10). Diese war bei den Sojasorten in allen drei Jahren höher als bei den Erbsensorten. In den Jahren 2016 und 2017 hatte *ES Mentor* zusätzlich noch eine höhere N-Menge im Korn als *Merlin*.

Tabelle 9: N-Menge in Ernterückstände, im Korn und N-Bilanz der Leguminosensorten *Merlin* und *ES Mentor* (Soja) sowie *Alvesta* und *Salamanca* (Erbsen ohne Zwischenfrucht) am Standort Hohenkammer

| | N-Menge in Ernte- residuen (kg ha ⁻¹) | | | N- Menge im Korn (kg ha ⁻¹) | | | N-Bilanz (kg ha ⁻¹) | | |
|------------------|--|-------------------|------------------|--|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2015 | 2016 | 2017 | 2015 | 2016 | 2017 |
| <i>Merlin</i> | 67 ^{bcd} | 71 ^{bc} | 56 ^{cd} | 206 ^c | 247 ^b | 251 ^b | -10 ^{ab} | -49 ^b | -153 ^d |
| <i>ES Mentor</i> | 82 ^{ab} | 108 ^a | 62 ^{cd} | 196 ^{cd} | 300 ^a | 309 ^a | -31 ^{ab} | -30 ^a | -100 ^c |
| <i>Alvesta</i> | 43 ^{cd} | 63 ^{bcd} | 35 ^d | 126 ^f | 165 ^e | 106 ^{fg} | -32 ^{ab} | -33 ^{ab} | -15 ^{ab} |
| <i>Salamanca</i> | 40 ^{cd} | 55 ^{cd} | 54 ^{cd} | 103 ^{fg} | 177 ^{de} | 97 ^g | -39 ^{ab} | -44 ^{ab} | -2 ^a |

Die berechnete N-Bilanz fiel für alle Sorten in jedem Jahr negativ aus. Auch hier bestand eine Jahr:Sorteninteraktion (Tabelle 10). Im Jahr 2015 unterschied sich die N-Bilanz zwischen den Sorten nicht, während die N-Bilanz von *ES Mentor* im Jahr 2016 höher lag als die von *Merlin*. Im Jahr 2017 wiesen die Erbsen eine höhere N-Bilanz auf als die Sojabohnen und bei diesen war die N-Bilanz von *ES Mentor* höher als die von *Merlin*.

Tabelle 10: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 in Hohenkammer

| P-Werte | Leguminosen- ertrag | N ₂ - Fixierungs- leistung | N-Menge Ernterückstände | N-Menge im Korn | N- Bilanz |
|-------------------|------------------------|---|----------------------------|--------------------|--------------|
| Jahr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0102 | 0,0001 | 0,0763 |
| Kultur | 0,0033 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,0001 | 0,0002 | 0,0005 | 0,0001 | 0,0310 |
| Jahr*Kultur | 0,0001 | 0,0044 | 0,0379 | 0,0001 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,0001 | 0,0036 | 0,0483 | 0,0001 | 0,0020 |
| Block | 0,5799 | 0,0012 | 0,1124 | 0,2243 | 0,8692 |

4.2.4. Winterweizen am Standort Hohenkammer

N_{\min} -Gehalte des Winterweizens zum Vegetationsende

Bei den N_{\min} -Gehalten des Winterweizens zum Vegetationsende am Standort Hohenkammer (Abbildung 27) bestand eine Jahr:Kultur-Interaktion. Die N_{\min} -Gehalte des Winterweizens nach Erbse ohne Zwischenfrucht und Soja waren im Jahr 2015 statistisch höher als die nach Erbse mit Zwischenfrucht, Hafer und Silomais. Im Jahr 2016 war der N_{\min} -Gehalt des Winterweizens nach Erbse ohne Zwischenfrucht höher als die nach Anbau aller anderen Kulturen. Nach Anbau von Erbse mit Zwischenfrucht und Soja war der N_{\min} -Gehalt höher als nach Silomais. Im Jahr 2017 war der N_{\min} -Gehalt des Winterweizens nach Erbse ohne Zwischenfrucht höher als von Erbse mit Zwischenfrucht, Hafer und Silomais. Die anderen Kulturen lagen statistisch gesehen auf einem Niveau.

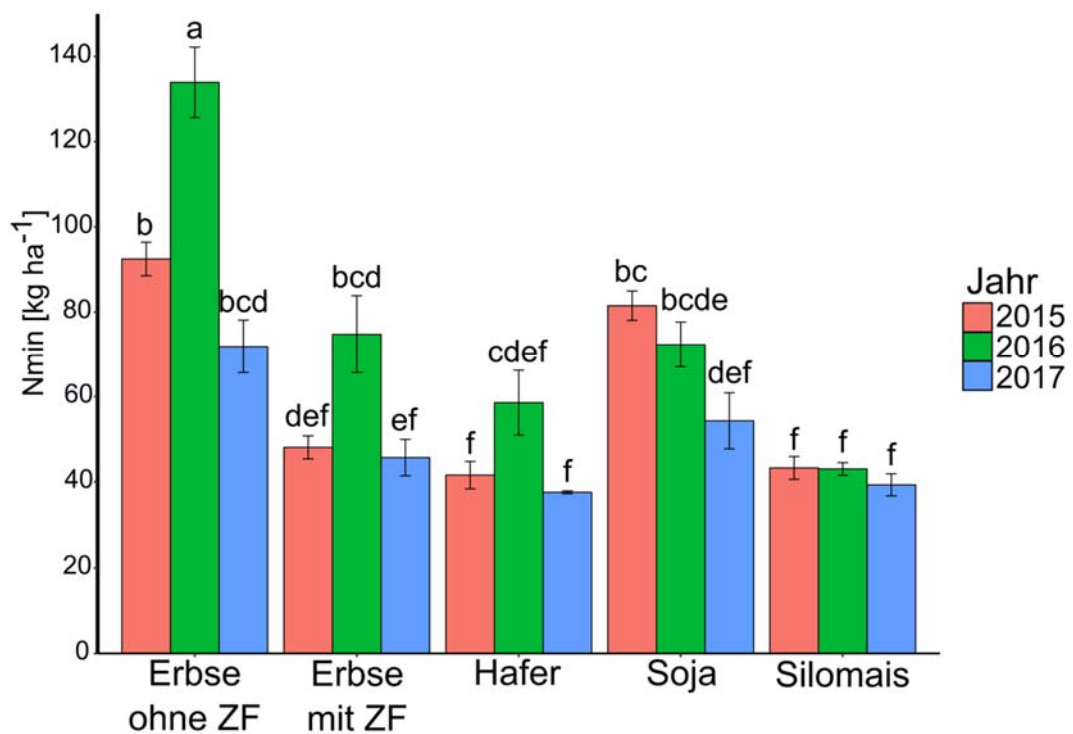


Abbildung 27: N_{\min} -Gehalte (kg ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) zum Vegetationsende nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Hafer: *Aragon* (2015), *Max* (2016-2017), Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2015, 2016, 2017), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

N_{min}-Gehalt des Winterweizens zum Vegetationsbeginn

Für die N_{min}-Gehalte beim Winterweizen am Standort Hohenkammer zu Vegetationsbeginn eines jeden Jahres bestand eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 11). So waren die N_{min}-Gehalte in den Jahren 2016 und 2018 für alle Kulturen auf dem gleichen Niveau. Im Jahr 2017 hatte allerdings der Winterweizen nach Anbau der Erbsen ohne Zwischenfrucht einen höheren N_{min}-Wert als der Winterweizen als Nachfrucht von allen anderen Kulturen. Hier hatte der Winterweizen nach Silomais noch einmal niedrigere N_{min}-Werte als die anderen Kulturen.

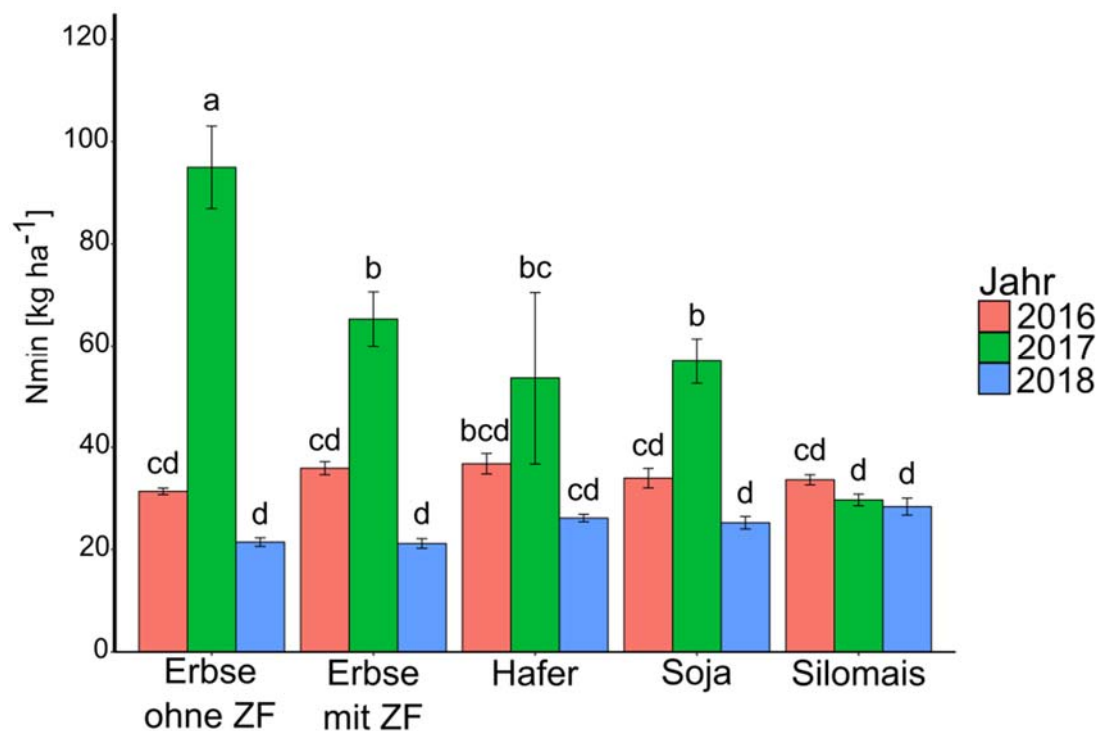


Abbildung 28: N_{min}-Gehalte (kg ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) zum Vegetationsbeginn nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Hafer: *Aragon* (2015), *Max* (2016-2017), Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2016, 2017, 2018), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Kornertrag des Winterweizens

Beim Ertrag des Winterweizens am Standort Hohenkammer (Abbildung 29) bestand eine Jahr:Sorte-Interaktion. Im Jahr 2016 war der Kornertrag des Winterweizens nach allen Leguminosensorten höher, als bei den Hafer und Silomaisarten. Für das Jahr 2017 wurde ein höherer Ertrag nach Anbau der Erbsen ohne Zwischenfrucht als nach Anbau der Erbsen mit Zwischenfrucht und den Sojasorten gemessen. Der Ertrag nach Anbau der Leguminosen war höher als nach den Hafer- und Silomaisarten. Der Weizenertrag nach Hafer- und Silomaisarten war im Jahr 2018 wiederum statistisch signifikant niedriger als bei den Leguminosensorten. Auch in 2018 war der Weizenertrag nach einer Erbsensorte ohne Zwischenfrucht höher als mit Zwischenfrucht.

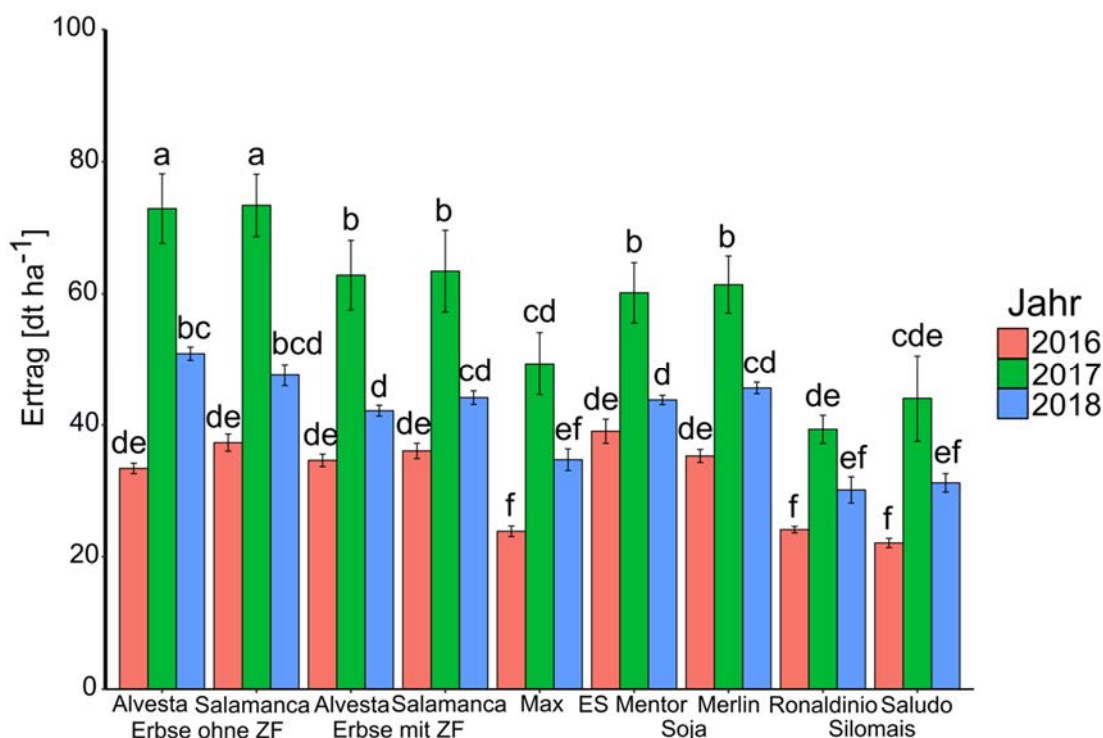


Abbildung 29: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Hafer: *Aragon* (2015), *Max* (2016-2017), Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2016, 2017, 2018), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Rohproteingehalt des Winterweizens

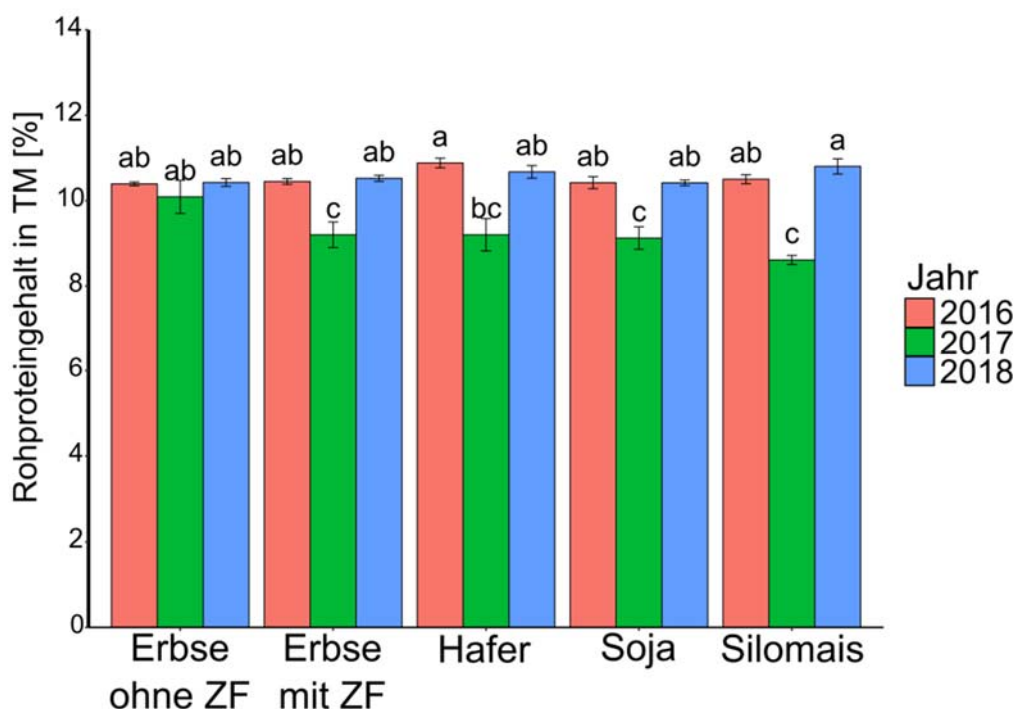


Abbildung 30: Rohproteingehalt (% in der Trockenmasse) von Winterweizen (*Florian*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2016, 2017, 2018), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Für den Rohproteingehalt des Winterweizens lag ebenfalls eine Jahr:Kulturinteraktion vor (Tabelle 11). In den Jahren 2016 und 2018 wurden zwischen allen Kulturen keine statistischen Unterschiede gemessen. Im Jahr 2017 dagegen wies der Winterweizen nach den Erbsen ohne Zwischenfrucht einen höheren Rohproteingehalt auf als der Winterweizen nach Erbsen mit Zwischenfrucht, Soja und Silomais.

Tabelle 11: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Winterweizen-Versuche in den Jahren 2016 bis 2018 in Hohenkammer.

| P-Werte | Winterweizen- ertrag | Rohprotein- gehalt Winterweizen | N _{min} -Gehalt zu Veg.-Beginn | N _{min} -Gehalt zu Veg.-Ende |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|---|
| Jahr | 0,0017 | 0,0006 | 0,0001 | 0,0086 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0115 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,5259 | 0,8610 | 0,9451 | 0,1259 |
| Jahr*Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,0150 | 0,2149 | 0,7201 | 0,8430 |
| Block | 0,5196 | 0,0022 | 0,2024 | 0,1459 |

4.3. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau

4.3.1. Standort Stifterhof

Kornertrag

Bei dem Kornertrag der Sojabohnen am Standort Stifterhof bestand eine Jahr:Saatchmethode-Interaktion. In den Jahren 2015 und 2016 waren die Erträge bei den Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten höher als bei den Direktsaatvarianten. Im Jahr 2017 hatte die Strip-Till-Variante einen höheren Ertrag als die Direktsaatvarianten. Die Direktsaat mit Nutzung des Grünroggens war statistisch gesehen auf dem gleichen Niveau wie die Mulchsaatvariante, die wiederum einen höheren Ertrag hatte als die Direktsaatvariante mit Walzung des Grünroggens. Es wurde keinen Herbizideffekt festgestellt.

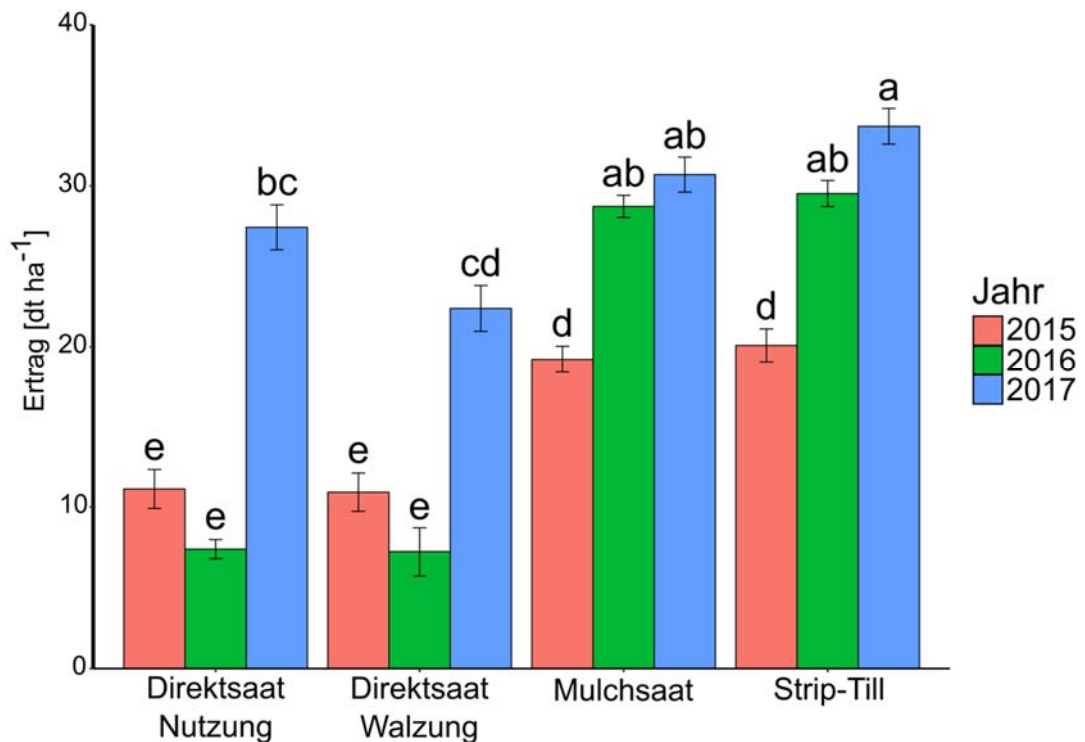


Abbildung 31: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) der Sojabohnensorte *Sultana* in Abhängigkeit des Anbausystems am Standort Stifterhof (Östringen) über drei Jahre (2015 bis 2017) gemittelt über die Herbizidvarianten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Unkrautdeckungsgrad Juli

Beim Unkrautdeckungsgrad im Juli der Jahre 2015 und 2017 bestand eine Jahr:Aussaatmethode:Herbizid-Interaktion (Tabelle 12). Im Jahr 2015 wies die Direktsaatvariante mit Nutzung des Grünroggens ohne Herbizid den höchsten Unkrautdeckungsgrad auf, während alle anderen Varianten auf dem gleichen Niveau lagen. Im Jahr 2017 hatte die Direktsaatvariante mit Walzung des Grünroggens ohne Herbizide einen höheren Unkrautdeckungsgrad als die Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten. Alle anderen Varianten lagen statistisch gesehen auf dem gleichen Niveau. Im Jahr 2016 konnte unabhängig von dem Bodenbearbeitungssystem, sowie auch vom Vorsaateinsatz des Totalherbizids, keine erfolgreiche Unkrautbekämpfung durch die Voraufherbizide erreicht werden. In allen Varianten lagen Unkrautdeckungsgrade über 86 % zur Ernte vor, so dass eine Auswertung der Unkrautbonituren für 2016 nicht möglich war. Eine Herbizidresistenz des Hauptunkrautes Weißer Gänsefuß wurde anhand eines Sensibilitätstests ausgeschlossen.

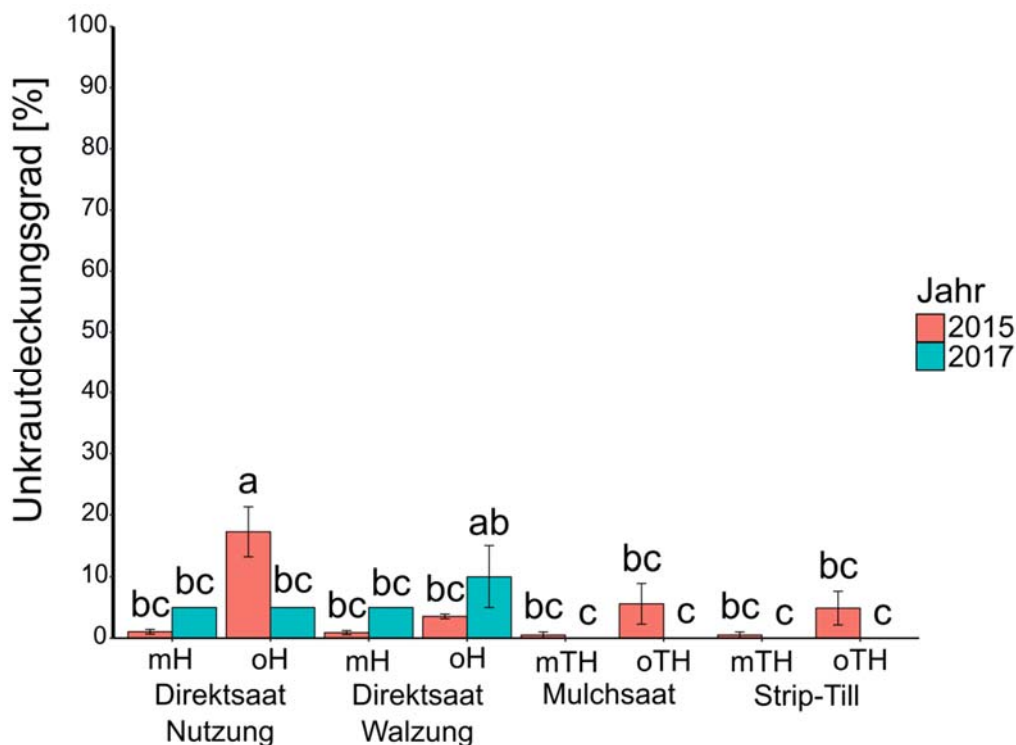


Abbildung 32: Unkrautdeckungsgrad in Parzellen mit der Sojabohnensorte *Sultana* in Abhängigkeit des Anbausystems mit verschiedenen Herbizidstrategien (Direktsaat: Anwendung von Voraufherbiziden nach der Saat (mH) und keine Anwendung eines Herbizides (oH), Mulchsaat und Strip-Till: Anwendung von Glyphosat vor der Saat (mTH) oder Verzicht auf Glyphosat vor der Saat (oTH) und jeweils Einsatz von Voraufherbiziden nach der Saat) am Standort Stifterhof (Östringen) über zwei Jahre (2015 und 2017) jeweils im Juli. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Unkrautdeckungsgrad Ernte

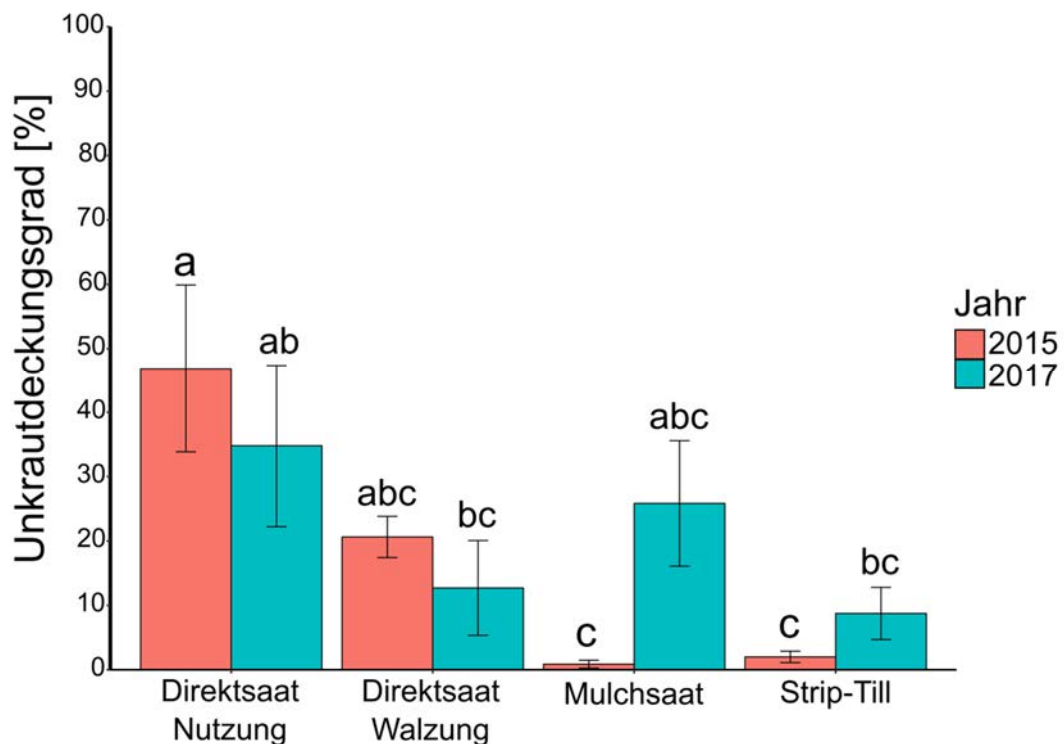


Abbildung 33: Unkrautdeckungsgrad in Parzellen mit der Sojabohnensorte *Sultana* in Abhängigkeit des Anbausystems mit verschiedenen Herbizidstrategien (Direktsaat: Anwendung von Voraufbauherbiziden nach der Saat (mH) und keine Anwendung eines Herbizides (oH), Mulchsaat und Strip-Till: Anwendung von Glyphosat vor der Saat (mTH) oder Verzicht auf Glyphosat vor der Saat (oTH) und jeweils Einsatz von Voraufbauherbiziden nach der Saat) am Standort Stifterhof (Östringen) über zwei Jahre (2015 und 2017) jeweils zur Ernte gemittelt über die Herbizidvarianten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Für den Unkrautdeckungsgrad zur Ernte wurde eine Jahr:Aussaatsmethode-Interaktion festgestellt (Tabelle 12). Im Jahr 2015 war der Unkrautdeckungsgrad bei den Direktsaatvarianten höher als bei den Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten. Im Jahr 2017 wurden keine statistischen Unterschiede zwischen den Varianten gemessen. Der auftretende Herbizideffekt (Tabelle 12) ist so zu erklären, dass die Direktsaatvariante mit Nutzung des Grünroggens einen höheren Unkrautdeckungsgrad aufwies als alle anderen Varianten, die statistisch gesehen alle auf dem gleichen Niveau lagen.

Tabelle 12: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Versuche in den Jahren 2015 bis 2017 am Stifterhof

| P-Werte | Kornertrag | Unkrautdeckungsgrad | |
|--------------------|------------|---------------------|--------|
| | | Juli | Ernte |
| Jahr | 0,0001 | 0,1895 | 0,6193 |
| Saat | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Saat*Herbizid | 0,2212 | 0,0004 | 0,0003 |
| Jahr*Saat | 0,0001 | 0,0042 | 0,0184 |
| Jahr*Saat*Herbizid | 0,6061 | 0,0013 | 0,1347 |
| Block | 0,6378 | 0,1813 | 0,4501 |

4.3.2. Standort Eppingen

Beim Kornertrag am Standort Eppingen (Abbildung 34) bestand ein Jahreseffekt (Tabelle 13). Der Ertrag im Jahr 2017 war höher als im Jahr 2016. Ansonsten wurden keine Effekte festgestellt, so dass alle Varianten statistisch gesehen auf dem gleichen Niveau lagen.

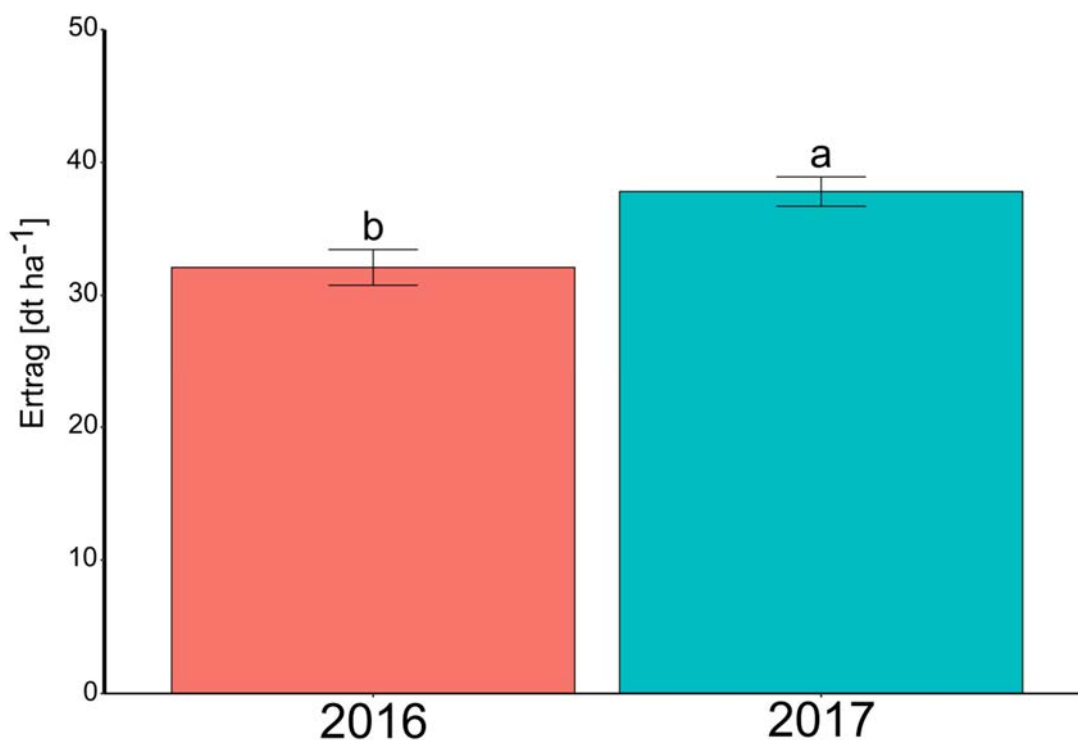


Abbildung 34: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) der Sojabohnensorte *Sultana* am Standort Eppingen in Abhängigkeit des Anbausystems (Mulchsaat mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, Pflug) über zwei Jahre (2016 und 2017) gemittelt über das Anbausystem. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

4.3.3. Standort Riedlingen

Am Standort Riedlingen wurde eine Jahr:Anbausystem-Interaktion festgestellt. Im Jahr 2016 wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt, während im Jahr 2017 die Pflugvariante den höchsten Ertrag erzielte, gefolgt von der Mulchsaat ohne Totalherbizid und der Mulchsaat mit Totalherbizid.

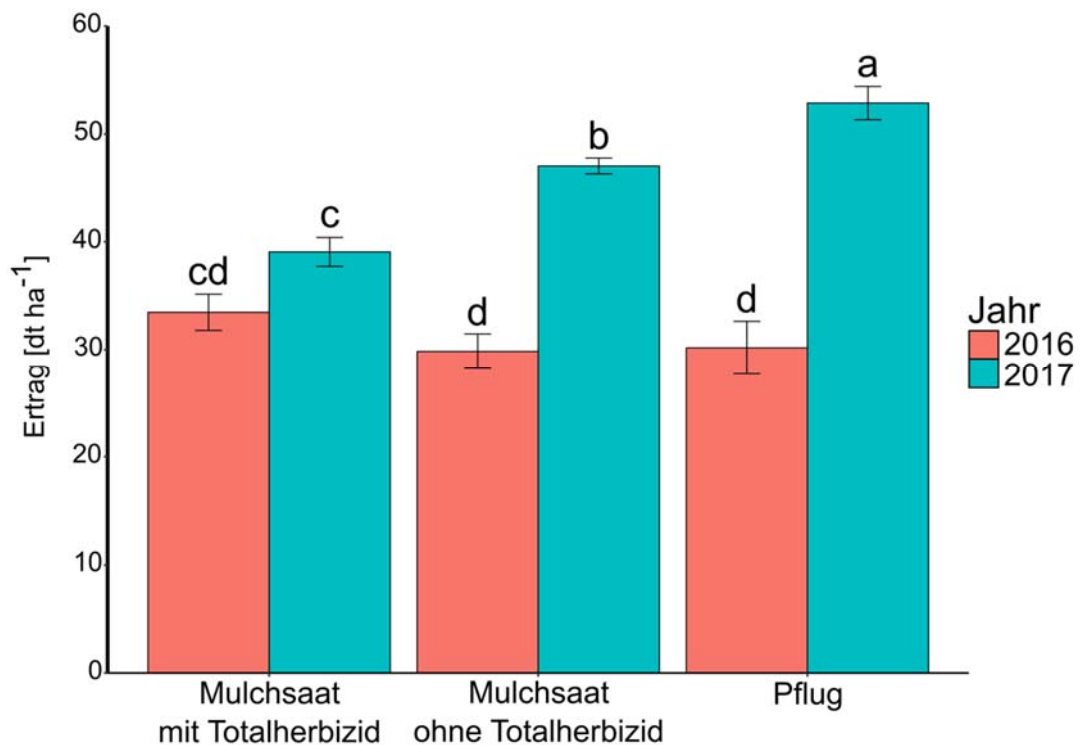


Abbildung 35: Kornertrag (bei 86 % Trockensubstanz in dt ha⁻¹) der Sojabohnensorte *Sultana* am Standort Riedlingen in Abhängigkeit des Anbausystems (Mulchsaat mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, Pflug) über zwei Jahre (2016 und 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

4.3.4. Standort Zaisenhausen

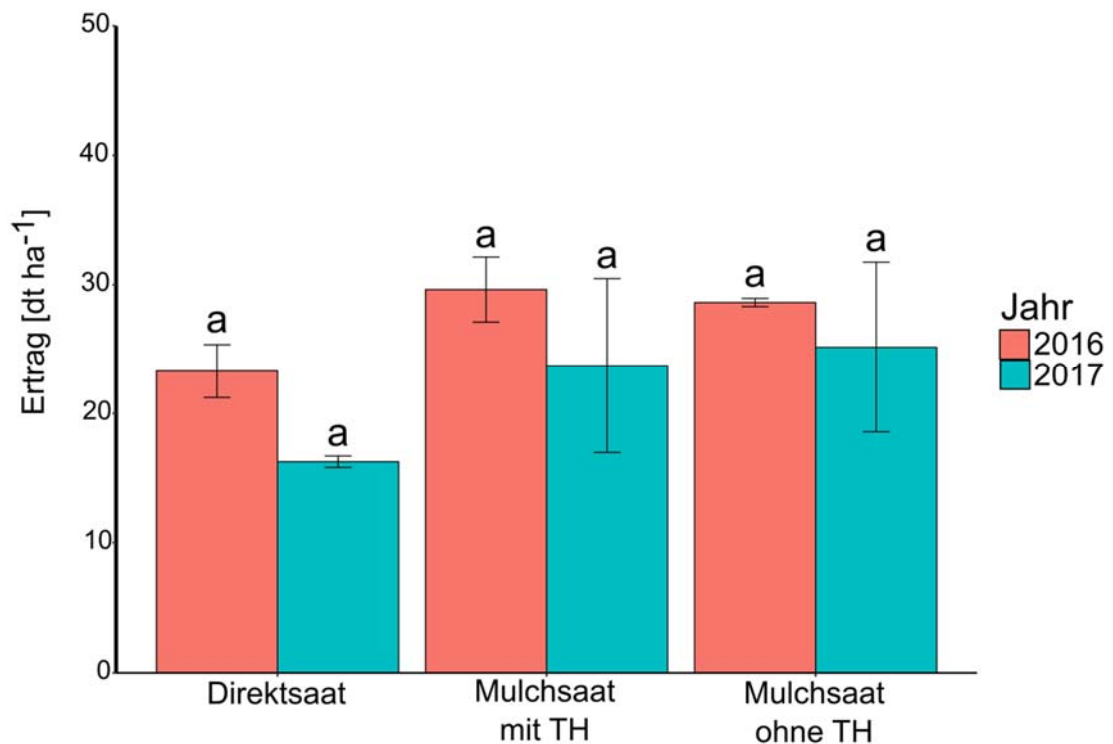


Abbildung 36: Kornenertrag (dt ha⁻¹) der Sojabohnensorte *Sultana* am Standort Zaisenhausen in Abhängigkeit des Anbausystems (Mulchsaat mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, Direktsaat) über zwei Jahre (2016 und 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Am Standort Zaisenhausen wurde kein Effekt festgestellt, daher liegen alle Varianten auf dem gleichen Niveau.

Tabelle 13: Ergebnisse der Varianzanalyse zu den Kornträgen für die Versuche in den Jahren 2016 und 2017 in Eppingen, Riedlingen und Zaisenhausen

| P-Werte | Eppingen | Riedlingen | Zaisenhausen |
|-------------|----------|------------|--------------|
| Jahr | 0,0089 | 0,0001 | 0,1878 |
| System | 0,1843 | 0,0036 | 0,1110 |
| Jahr*System | 0,8218 | 0,0001 | 0,8643 |
| Block | 0,5911 | 0,0119 | 0,2099 |

4.3.5. Interviewstudie

Die befragten Landwirtinnen und Landwirte wirtschaften konventionell und bauen hauptsächlich deswegen Soja an, weil er im Rahmen des Förderprogrammes Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl (FAKT) in der fünfgliedrigen Fruchtfolge förderwürdig ist. Viele Landwirtinnen und Landwirte meinen, dass der Anbau von Soja trotz der Förderung nicht wirtschaftlich sei und machen sich Sorgen wegen des aktuell sinkenden Sojaverkaufspreises, so wie Landwirt 3:

„Gut, wie die preisliche Entwicklung beim, bei der Soja dann sich gestaltet, das müssen wir jetzt dann mal sehen. 400 Euro sollten es halt schon sein, dass man da auf die Jahre sinnvoll was machen kann.“

Berater 3 rechnete damit, dass im Jahr 2016 der Sojaanbau aufgrund der niedrigen Marktpreise zurückgegangen wäre, wenn nicht viele Landwirtinnen und Landwirte bereits Vorkontrakte mit akzeptablen Preisen unterzeichnet hätten.

Der Sojaanbau an sich wird als unkompliziert dargestellt, da kaum eine Bestandesführung möglich ist. Jedoch gibt es diverse Problemfelder, die immer wieder von den Landwirtinnen und Landwirten sowie den Beraterinnen und Beratern angesprochen wurden. Im deduktiv festgelegten Bereich des Pflanzenschutzes wurden Probleme mit Unkräutern, insbesondere Winde, Distel und Quecke angesprochen. Im Jahr 2015 galt dies insbesondere für die Melde. Einige Landwirtinnen und Landwirte haben allerdings erkannt, dass Flächen mit einer Unkrautproblematik nicht unbedingt für den Sojaanbau geeignet sind oder, dass die Unkrautproblematik im Vorhinein in der Fruchtfolge gelöst werden muss. Berater 1 stellt dies wie folgt dar:

„Die Winde- und Distelproblematik, die haben wir und da sind wir auch in der Beratung einfach dran, auch, dass auf diese Fläche keine Sojabohne kommt. Das ist ganz wichtig oder die Fläche halt im Vorfeld zu sanieren.“

Im Bereich Pflanzenschutz wurden außerdem noch vereinzelte Fälle mit Mäusebefall, Wildschaden und Distelfalterbefall beschrieben.

Die Maschinenteknik wurde zwischenzeitlich für den Sojaanbau optimiert. Als wichtig wird die Verwendung eines flexiblen Schneidwerkes am Mähdrescher angesehen, um die Ernteverluste zu minimieren.

Als Vorteil des Sojaanbaus wird die Erweiterung der Fruchtfolge mit ihren positiven Begleiterscheinungen genannt. Weiterhin wird die außerordentlich gute Bodengare nach dem Anbau von Sojabohnen erwähnt, die eine Aussaat der Folgekultur, wie Winterweizen, meist ohne einen weiteren Bodenbearbeitungsgang zulasse. Außerdem

wird als positiv empfunden, dass durch den Sojaanbau die üblichen Arbeitsspitzen entzerrt werden.

Ein weiterer Themenkomplex, der in fast jedem Interview angesprochen wurde, ist die Anwendung von Stickstoffdünger im Sojaanbau. Viele Landwirtinnen und Landwirte verwenden trotz der Fähigkeit der Sojabohne, Stickstoff zu fixieren, Stickstoff-Mineraldünger. Die Anwendungshöhe schwankt zwischen 30 und 80, teilweise bis zu 100 kg N ha⁻¹. Dabei steht die Düngung zur Saat im Vordergrund, teilweise erfolgt auch eine Düngergabe zur Blüte oder geteilt zur Saat und zur Blüte. Der Einsatz des Düngers wird von einigen Landwirtinnen und Landwirten mit der Hoffnung auf eine beschleunigte Jugendentwicklung oder einem höheren Ertrag begründet. Landwirtin 1 äußerte sich diesbezüglich so:

„Also zum Beispiel das Problem von der langsamen Jugendentwicklung haben wir ja insofern gelöst, dass man oder versucht, dass man dem Optimum näher kommt, dass wir halt eine Startgabe [mit N-Dünger] gemacht haben.“

Um über den Einsatz von Stickstoffdüngern zu entscheiden, wird zum Teil der Knöllchenansatz vor der Düngergabe begutachtet und nur bei zu geringem Knöllchenansatz wird gedüngt. Ein Berater empfiehlt, bei zu geringem Knöllchenansatz Stickstoff zu düngen und hält dies für wirtschaftlich und ertragswirksam. Den mangelnden Knöllchenansatz führt er aufgrund von Ergebnissen aus eigenen Impfvorsuchen auf eine mangelnde Impfwirkung zurück.

Nichtsdestotrotz ist einigen Landwirtinnen und Landwirten bewusst, dass ein Einsatz von Stickstoffdüngern nicht immer sinnvoll ist. So beobachtete Landwirtin 1 einen Rückgang der Knöllchen bei Einsatz von Stickstoffdünger:

„Ja die Frage ist, also, was ich, was mir aufgefallen ist, ist halt auch, wo man keinen Stickstoff draufgeschmissen haben, dass mehr Knöllchen vorhanden waren. Also ich hatte den Eindruck, aber das ist eine rein subjektive Sache, dass der vielleicht auch ein bisschen faul wird, wenn wir den volllegen.“

Aus der Interviewstudie mit Landwirten und Berater konnten drei zentrale Themenfelder im Sojaanbau mit reduzierter Bodenbearbeitung identifiziert werden:

- Preisentwicklung und Wirtschaftlichkeit (in 83 % der Interviews)
- Fruchtfolgegestaltung im Sojaanbau: Unkrautbekämpfung (in 100 % der Interviews da deduktive Kategorie) und Vorfruchteffekte (in 58 % der Interviews)
- Stickstoffdüngung in Soja (in 42 % der Interviews)

4.4. Ökonomie

4.4.1. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen Anbau

Deckungsbeiträge Standort Rheinstetten

Am Standort Rheinstetten bestand eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 14). Die Erbsen wiesen mit Ausnahme des Jahres 2016 stets einen signifikant geringeren Deckungsbeitrag auf als der Körnermais. Mit Soja wurde im Jahr 2017 einen signifikant höheren Deckungsbeitrag als mit den Erbsen erreicht. In den Jahren 2015 und 2016 bestand kein signifikanter Unterschied. Zwischen Körnermais und Soja bestand im jeweiligen Jahr kein statistischer Unterschied.

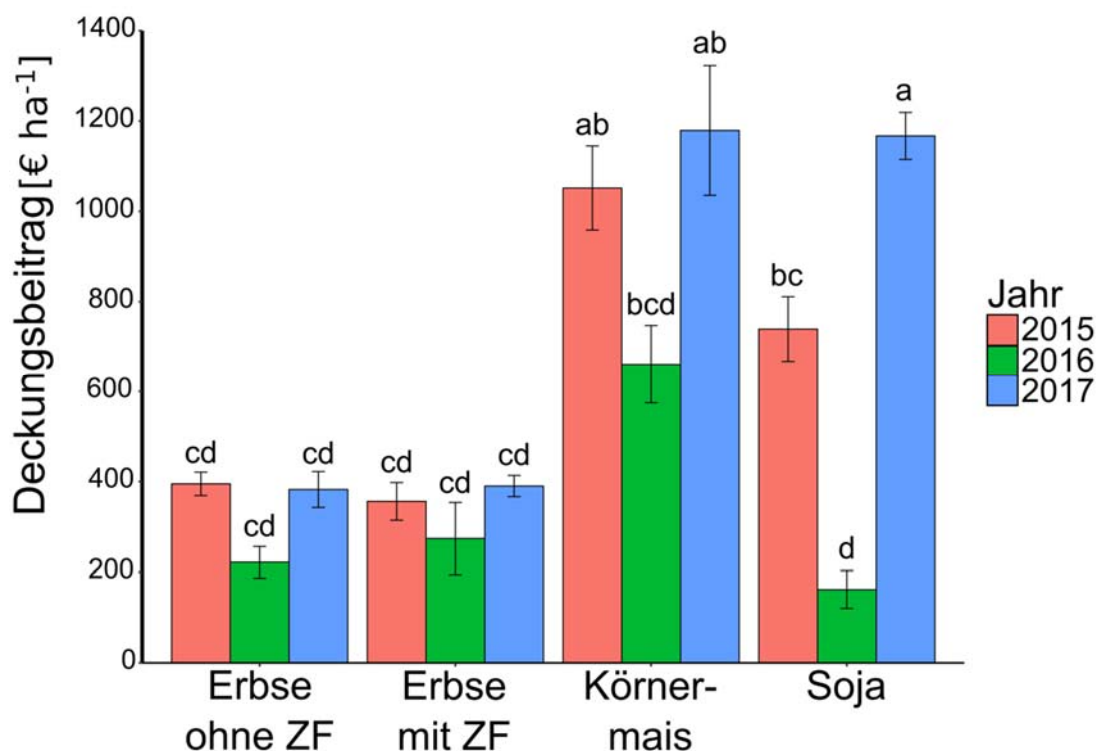


Abbildung 37: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, und Körnermais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Körnermais: *Ferarixx*) am Standort Rheinstetten über drei Jahre (2015, 2016, 2017), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Deckungsbeitrag Winterweizen am Standort Rheinstetten

In Abbildung 38 sind die Deckungsbeiträge des Winterweizens am Standort Rheinstetten gezeigt. Hier bestand einen Jahreseffekt (Tabelle 15). Durch die einheitliche Düngung erzielte der Winterweizen nach jeder Kultur den gleichen Ertrag. Im Jahr 2018 war der erzielte Deckungsbeitrag am geringsten.

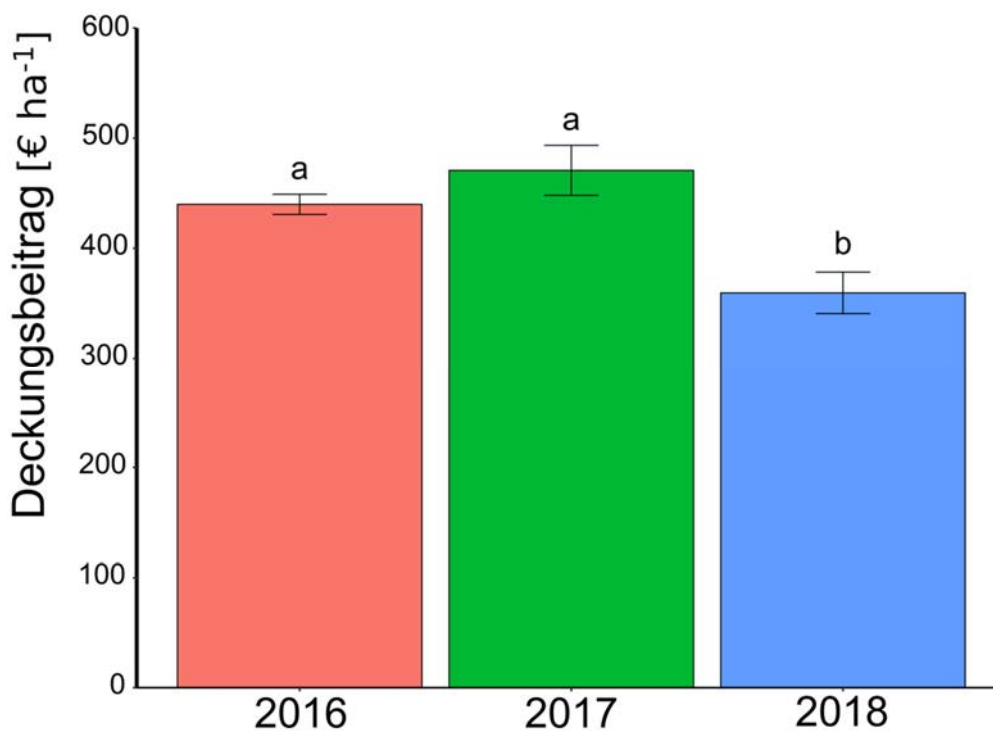


Abbildung 38: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) von Winterweizen (*Ambello*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Silomais, Sommergerste und Körnermais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Respect*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*, Sommergerste: *Grace*, Körnermais: *Ferarixx*) am Standort Rheinstetten über drei Jahre (2016, 2017, 2018) gemittelt über Kulturen und Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

4.4.2. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau

Deckungsbeiträge der Kulturen am Standort Forchheim am Kaiserstuhl

Am Standort Forchheim am Kaiserstuhl bestand eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 14). Mit den Leguminosen wurde groß teils bzw. immer einen höheren Deckungsbeitrag als Sommergerste bzw. Silomais erreicht. In 2016 und 2017 konnte mit den Sojabohnen einen höheren Deckungsbeitrag als mit den Erbsen erzielt werden. Die Kombination

von eher niedrigem Ertragsniveau und einen mittleren Preis von 3,06 € dt⁻¹ TM führte beim Silomais in allen Jahren zu dem signifikant niedrigsten Deckungsbeitrag.

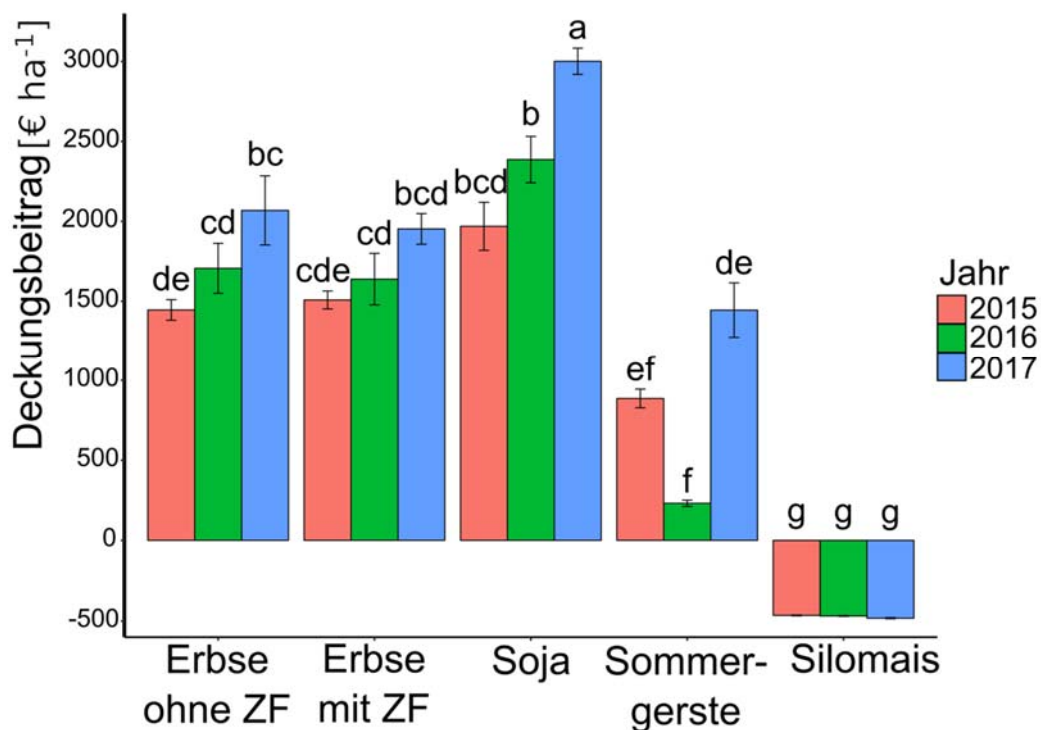


Abbildung 39: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbsen: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Saludo* und *Ronaldinio*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2015, 2016, 2017), gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Deckungsbeiträge der Kulturen am Standort Hohenkammer

Bei den Deckungsbeiträgen am Standort Hohenkammer bestand eine Jahr:Sorten-Interaktion. Im Jahr 2015 lag der Deckungsbeitrag von *Merlin* über dem von *ES Mentor*, in 2016 und 2017 war es umgekehrt. Mit beide Sojasorten wurden höhere Deckungsbeiträge als alle anderen Varianten erzielt. Bei den Erbsen hatte die Sorte *Alvesta* in 2015, aber nicht in den anderen Jahren, einen höheren Deckungsbeitrag als die Sorte *Salamanca* jeweils mit und ohne Zwischenfrucht. Der Deckungsbeitrag der Erbsen war in 2015 (nur *Alvesta*) und in 2016 (beide Sorten) höher als beim Hafer und in allen Jahren höher als der von den beiden Silomaisorten.

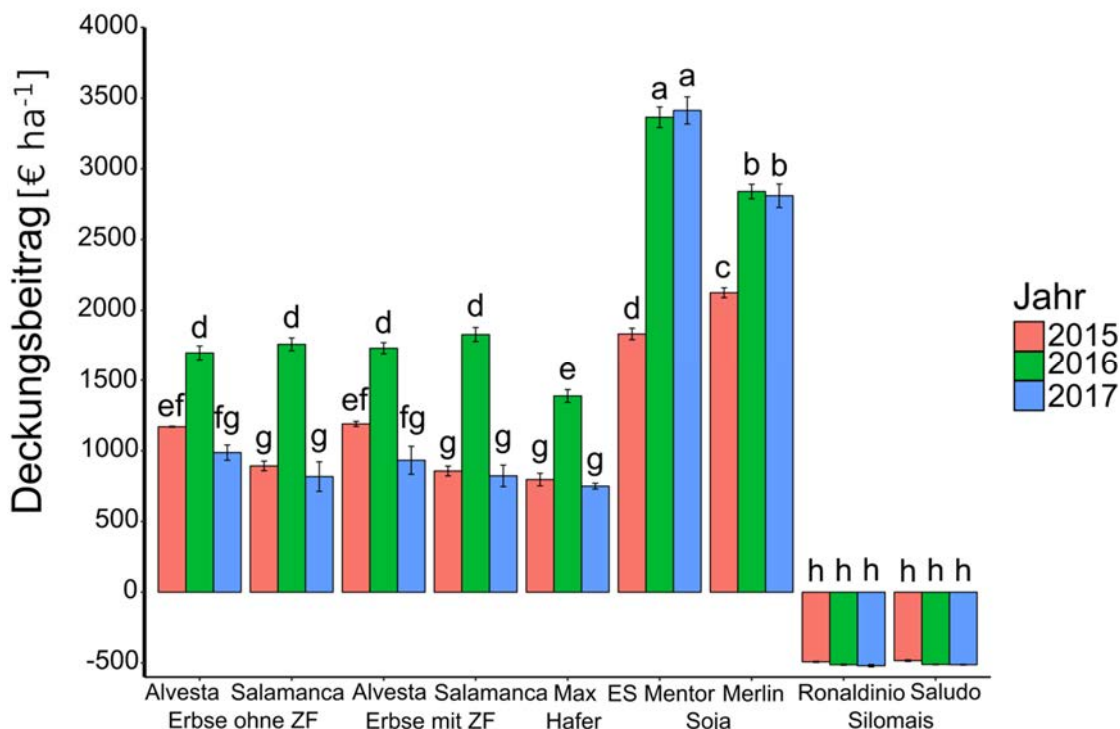


Abbildung 40: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Hafer: *Max*, Silomais: *Saludo* und *Ronaldinio*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2015, 2016, 2017). Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Tabelle 14: P-Werte der Deckungsbeiträge verschiedener Kulturen an den drei Standorten Rheinstetten, Forchheim am Kaiserstuhl und Hohenkammer.

Deckungsbeitrag verschiedenen Kulturen

| P-Werte | Rheinstetten | Forchheim am Kaiserstuhl | Hohenkammer |
|-------------------|--------------|-----------------------------|-------------|
| Jahr | 0,0082 | 0,0024 | 0,0001 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,1163 | 0,0594 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,2898 | 0,2847 | 0,0001 |
| Block | 0,9981 | 0,5729 | 0,5312 |

Deckungsbeiträge Winterweizen am Standort Forchheim am Kaiserstuhl

Es trat eine Jahr:Kultur-Interaktion auf (Tabelle 15). Im Jahr 2016 konnte der Winterweizen nach den Erbsen ohne Zwischenfrucht einen höheren Deckungsbeitrag als der Winterweizen nach Sommergerste und Silomais erzielen, während der Weizen nach der Erbse mit Zwischenfrucht und der Soja auf einem Niveau mit dem Weizen nach Sommergerste und Silomais lag (Abbildung 41). Im Jahr 2017 war der Deckungsbeitrag des Weizens nach den Erbsen und der Sojabohne höher als nach Sommergerste oder Silomais. Dagegen waren die Deckungsbeiträge für den Weizen nach den Leguminosen im Jahr 2018 zwar höher als zum Weizen nach Silomais, nicht jedoch zum Weizen nach Sommergerste.

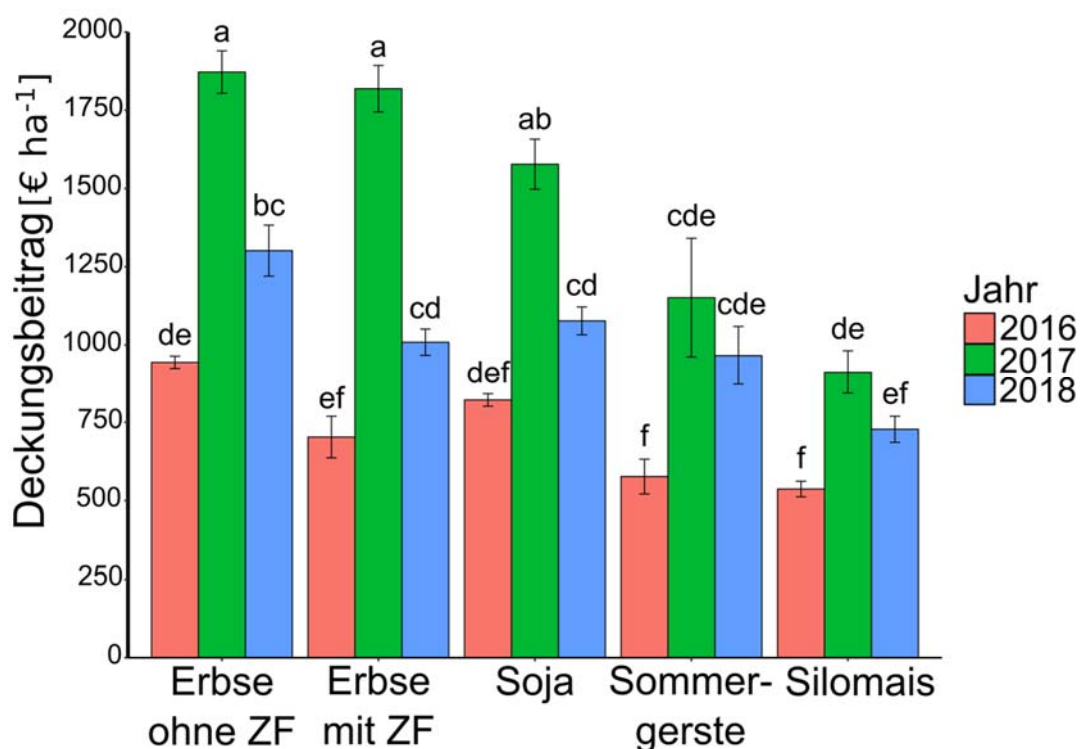


Abbildung 41: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Sommergerste: *Grace*, Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Forchheim am Kaiserstuhl über drei Jahre (2016, 2017, 2018) gemittelt über die Sorten. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Deckungsbeiträge Winterweizen am Standort Hohenkammer

Am Standort Hohenkammer bestand eine Jahr:Sorten-Interaktion (Tabelle 15). Im Jahr 2016 waren die Deckungsbeiträge des Winterweizens nach Anbau der Erbsen höher als nach Anbau von Hafer und Silomais. Die Deckungsbeiträge nach Anbau von Soja war höher als nach Anbau von Silomais. Im Jahr 2017 war der Deckungsbeitrag nach Anbau der Erbsen ohne Zwischenfrucht höher als nach Anbau von Erbsen mit Zwischenfrucht und Soja. Nach Anbau von Leguminosen waren die Deckungsbeiträge wiederum höher als nach Hafer und Silomais. Im Jahr 2018 war wiederum die Deckungsbeiträge nach Anbau der Leguminosen mit einer Ausnahme höher als nach dem Anbau von Hafer und Silomais.

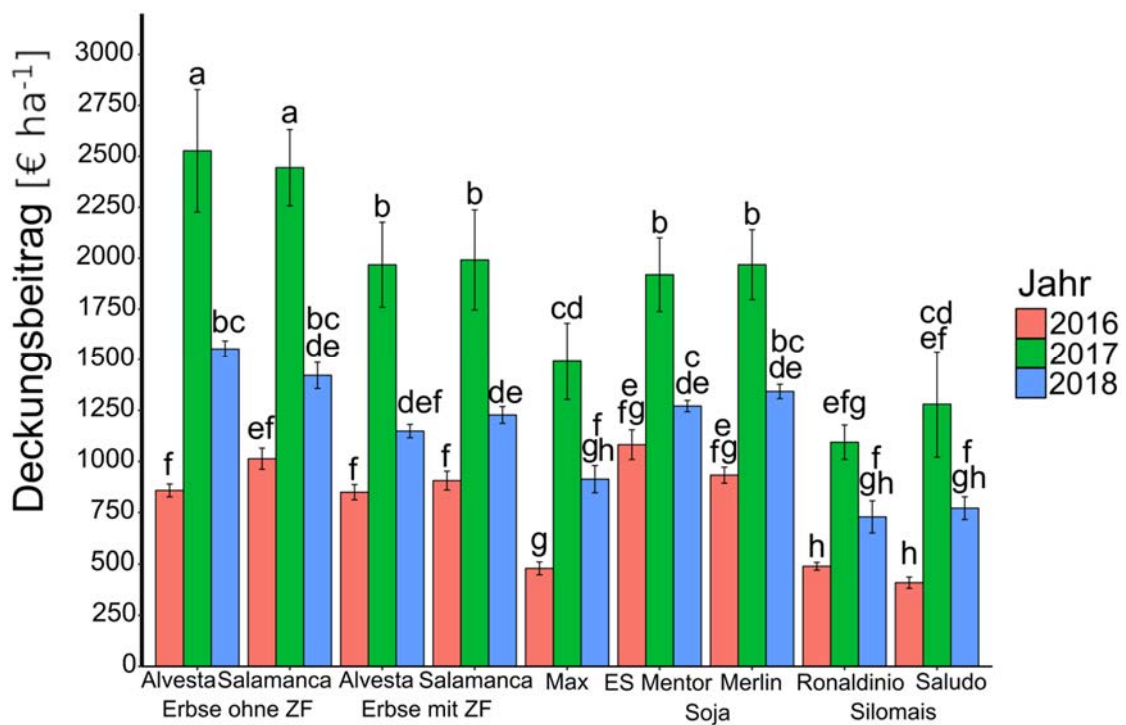


Abbildung 42: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) von Winterweizen (*Florian*) nach Anbau von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) mit den Sorten (Erbse: *Alvesta* und *Salamanca*, Soja: *ES Mentor* und *Merlin*, Hafer: *Aragon* (2015), *Max* (2016-2017), Silomais: *Ronaldinio* und *Saludo*) am Standort Hohenkammer über drei Jahre (2016, 2017, 2018) gemittelt über die Sorten. Der Fehlerbalken zeigt den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Tabelle 15: P-Werte der Deckungsbeiträge des Winterweizens

| P-Werte | Deckungsbeitrag Winterweizen | | |
|-------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|
| | Rheinstetten | Forchheim am Kaiserstuhl | Hohenkammer |
| Jahr | 0,0001 | 0,0001 | 0,0020 |
| Kultur | 0,0640 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,4749 | 0,9228 | 0,5931 |
| Jahr*Kultur | 0,1165 | 0,0001 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,8362 | 0,8143 | 0,0291 |
| Block | 0,3214 | 0,4489 | 0,5143 |

Tabelle 16: Vergleich der Deckungsbeiträge von Winterweizen (*Florian*) mit den Leguminosensorten als Vorfrucht zu Silomais und Sommergerste als Vorfrucht am Standort Forchheim am Kaiserstuhl

| Jeweils als Vorfrucht | in € ha ⁻¹ | Vergleich zu Silomais als Vorfrucht | | | Vergleich zu Sommergerste als Vorfrucht | | |
|------------------------------|-----------------------|--|-------------------|--------------------|---|-------------------|-------------------|
| | | 2016 | 2017 | 2018 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Sojabohne | <i>ES Mentor</i> | 281 ^{DE} | 739 ^{BC} | 348 ^{DE} | 241 ^{CD} | 500 ^{BC} | 110 ^D |
| | <i>Merlin</i> | 288 ^{DE} | 592 ^{BC} | 351 ^{DE} | 249 ^{CD} | 353 ^{BC} | 113 ^D |
| Erbse mit Zwischenfrucht | <i>Salamanca</i> | 225 ^E | 952 ^{AB} | 220 ^E | 185 ^{CD} | 713 ^{AB} | -19 ^D |
| Erbse ohne Zwischenfrucht | <i>Alvesta</i> | 107 ^E | 861 ^{AB} | 343 ^E | 68 ^{CD} | 622 ^{AB} | 105 ^D |
| | <i>Salamanca</i> | 390 ^{CDE} | 987 ^A | 569 ^{BCD} | 350 ^{BC} | 749 ^A | 331 ^{BC} |
| | <i>Alvesta</i> | 426 ^{CDE} | 932 ^A | 578 ^{BCD} | 386 ^{BC} | 693 ^A | 340 ^{BC} |

Mit einer Ausnahme wurde durch die Leguminosen als Vorfrucht ein höherer Deckungsbeitrag erzielt als bei Silomais oder Sommergerste als Vorfrucht (Tabelle 16). Bei den Vergleichen Silomais bzw. Sommergerste als Vorfrucht gab es jeweils eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 18). Im Jahr 2016 unterschieden sich die Deckungsbeitragsunterschiede zwischen den Kulturen nicht. Jedoch erzielten im Jahr 2017 die Erbsen ohne Zwischenfrucht als Vorfrucht einen höheren Deckungsbeitragsunterschied als die Sojabohnen als Vorfrucht. Für das Jahr 2018 wurde dann ein erhöhter Deckungsbeitragsunterschied von den Erbsen ohne Zwischenfrucht als Vorfrucht im Vergleich zu nach Erbse mit Zwischenfrucht bei Silomais und zu nach den anderen beiden Kulturen bei Sommergerste erzielt.

Tabelle 17: Vergleich der Deckungsbeiträge von Winterweizen (*Florian*) mit den Leguminosensorten als Vorfrucht zu Silomais und Hafer als Vorfrucht am Standort Hohenkammer

| Jeweils als Vorfrucht | In € ha ⁻¹ | Vergleich zu Silomais als Vorfrucht | | | Vergleich zu Hafer als Vorfrucht | | |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|
| | | 2016 | 2017 | 2018 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Sojabohne | <i>ES Mentor</i> | 632 ^B | 733 ^B | 521 ^B | 602 ^{abc} | 428 ^{bc} | 358 ^{bc} |
| | <i>Merlin</i> | 483 ^B | 782 ^B | 593 ^B | 453 ^{bc} | 477 ^{bc} | 430 ^{bc} |
| Erbse mit Zwischenfrucht | <i>Salamanca</i> | 456 ^B | 805 ^B | 477 ^B | 426 ^{bc} | 500 ^{bc} | 314 ^c |
| Erbse ohne Zwischenfrucht | <i>Alvesta</i> | 399 ^B | 781 ^B | 398 ^B | 370 ^{bc} | 476 ^{bc} | 235 ^c |
| Erbse ohne Zwischenfrucht | <i>Salamanca</i> | 563 ^{AB} | 1258 ^A | 672 ^{AB} | 533 ^{abc} | 953 ^a | 509 ^{abc} |
| Erbse ohne Zwischenfrucht | <i>Alvesta</i> | 408 ^{AB} | 1340 ^A | 804 ^{AB} | 378 ^{bc} | 1035 ^a | 641 ^{ab} |

Wie in Forchheim a.K. wurden nach den Leguminosen höhere Deckungsbeiträge als nach Silomais und nach Hafer erzielt. Die Deckungsbeitragsunterschiede im Vergleich zu Silomais als Vorfrucht zeigen eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 18). Die Deckungsbeiträge aller Leguminosen lagen in allen Jahren bis auf 2017 auf einem Niveau. In diesem Jahr erreichte der Winterweizen mit den Erbsen ohne Zwischenfrucht als Vorfrucht einen höheren Deckungsbeitragsunterschied als die Sojabohnen und die Erbse mit Zwischenfrucht. Bei dem Vergleich der Deckungsbeitragsunterschiede zum Hafer trat eine Jahr:Sorte-Interaktion auf (Tabelle 18). Im Jahr 2016 unterschied sich der Deckungsbeitrag des Winterweizens nach Anbau der Leguminosen im Vergleich zum Hafer statistisch nicht. Die Erbsen ohne Zwischenfrucht als Vorfrucht erreichten im Jahr 2017 einen höheren Deckungsbeitragsunterschied im Vergleich zum Hafer als die anderen Varianten. Im Jahr 2018 schließlich war der Deckungsbeitragsunterschied nach der Sorte *Alvesta* bei den Erbsen ohne Zwischenfrucht höher als nach den beiden Erbsensorten mit Zwischenfrucht.

Tabelle 18: P-Werte der Vergleiche der Deckungsbeiträge des Winterweizens nach Erbsen und Sojabohnen zu den Deckungsbeiträgen des Winterweizens nach Silomais und nach Sommergerste oder Hafer (Hohenkammer)

| P-Werte | Deckungsbeitrag Winterweizen Vergleich Silomais | | Deckungsbeitrag Winterweizen Vergleich Sommergerste/Hafer | |
|-------------------|--|-------------|--|-------------|
| | Forchheim am Kaiserstuhl | Hohenkammer | Forchheim am Kaiserstuhl | Hohenkammer |
| Jahr | 0,0007 | 0,0967 | 0,0025 | 0,4149 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,8556 | 0,00545 | 0,8556 | 0,4930 |
| Jahr*Kultur | 0,0170 | 0,0014 | 0,0170 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,5726 | 0,0629 | 0,5726 | 0,0118 |
| Block | 0,2914 | 0,2313 | 0,2914 | 0,7039 |

Deckungsbeitragssumme über zwei Jahre am Standort Forchheim am Kaiserstuhl

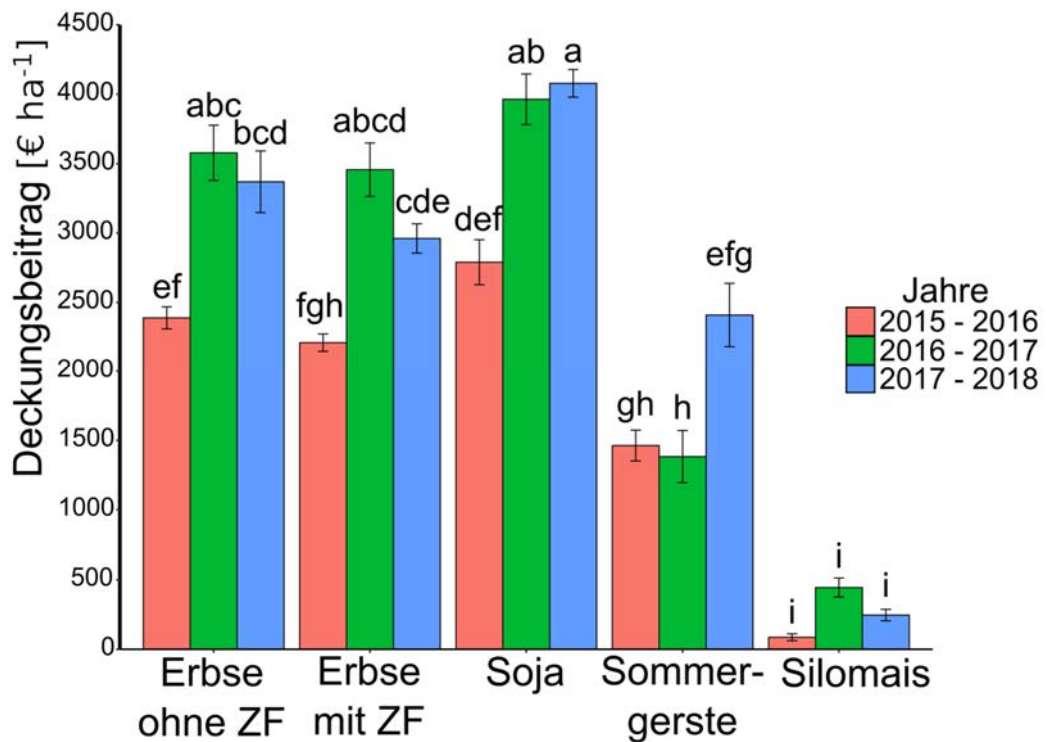


Abbildung 43: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) als Summe über zwei Jahre von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Sommergerste und Silomais) im ersten Jahr und von Winterweizen (*Florian*) im zweiten Jahr am Standort Forchheim am Kaiserstuhl. Das angegebene Jahr gibt das Jahr der Ernte des Winterweizens an. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Bei den zweijährigen Deckungsbeiträgen am Standort Forchheim am Kaiserstuhl bestand eine Jahr:Kultur-Interaktion (Tabelle 19). Die Summe der Deckungsbeiträge

war bei den Leguminosen in allen Jahren mit Ausnahme von Erbse mit Zwischenfrucht in 2016-2017 höher als bei Sommergerste und Silomais. Beim Silomais führte das eher niedrigen Ertragsniveau und der mittleren Preis von 3,06 € dt⁻¹ TM in allen Jahren zu dem signifikant niedrigsten Deckungsbeitrag. In 2017-2018 erzielte Soja die höchste Deckungsbeitragssumme.

Deckungsbeitragssumme über zwei Jahre am Standort Hohenkammer

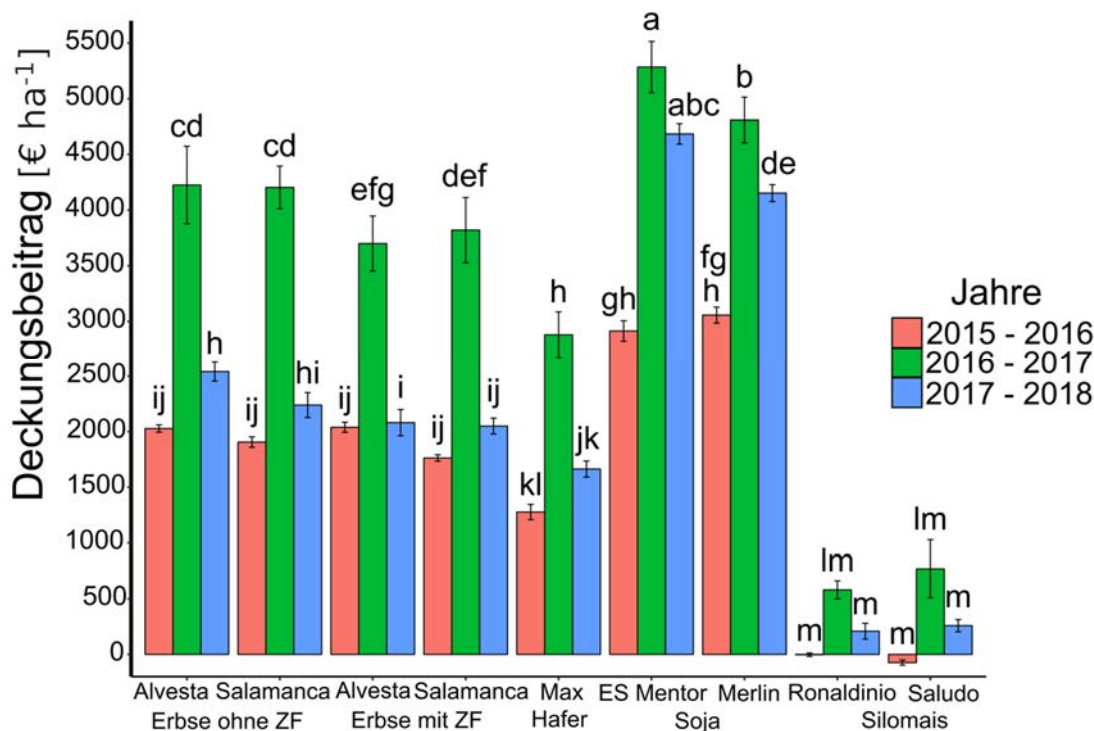


Abbildung 44: Deckungsbeiträge (€ ha⁻¹) als Summe über zwei Jahre von verschiedenen Kulturen (Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht (ZF), Soja, Hafer und Silomais) im ersten Jahr und von Winterweizen (*Florian*) im zweiten Jahr am Standort Hohenkammer. Das angegebene Jahr gibt das Jahr der Ernte des Winterweizens an. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Bei den Deckungsbeitragssummen am Standort Hohenkammer bestand eine Jahr:Sorte-Interaktion (Tabelle 19). Die Deckungsbeitragssumme lag bei den Sojabohnensorten immer höher als bei allen anderen Varianten. Mit den Erbsen wurde mit einer Ausnahme (*Salamanca* mit Zwischenfrucht in 2017-2018) eine höhere Deckungsbeitragssumme als bei Hafer und Silomais erreicht. Hafer erreichte immer eine höhere Summe als Silomais. Die Deckungsbeitragssumme von *ES Mentor* war in zwei der drei Anbauperioden höher als bei *Mentor*. *Alvesta* ohne Zwischenfrucht lag über *Alvesta* mit Zwischenfrucht in 2016-2017 und 2017-2018.

Tabelle 19: P-Werte der Deckungsbeitragssumme über zwei Jahre der jeweiligen Vorkulturen und des Winterweizens

| P-Werte | Deckungsbeitragssumme über zwei Jahre | |
|-------------------|---------------------------------------|-------------|
| | Forchheim am Kaiserstuhl | Hohenkammer |
| Jahr | 0,0012 | 0,0003 |
| Kultur | 0,0001 | 0,0001 |
| Kultur*Sorte | 0,1555 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur | 0,0001 | 0,0001 |
| Jahr*Kultur*Sorte | 0,4692 | 0,0001 |
| Block | 0,9473 | 0,5087 |

4.4.3. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Sojaanbau

Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistungen

Bei den direkt- und arbeitserledigungskostenfreien Leistungen (Abbildung 45) bestand eine Jahr:Saathmethode-Interaktion (Tabelle 20). Mit einer Ausnahme in 2017 waren die direkt- und arbeitserledigungskostenfreien Leistungen bei Mulchsaat und Strip-Till höher als bei den Direktsaatvarianten. Die beiden geprüften Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung Mulchsaat und Strip-Till konnten in zwei von drei Jahren positive DAL erzielen. Hierbei waren beide Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung gleich wirtschaftlich erfolgreich und hatten gleichgerichtete Jahresschwankungen. Bei den beiden Direktsaatvarianten lag kein Unterschied bei den DAL vor.

Die in den Roggendirektsaatverfahren in einer Variante eingesetzten Voraufbauherbizide führten zu keiner signifikanten Verbesserung der DAL. Vielmehr weisen die Ergebnisse darauf hin, dass bei dem in den Versuchen beobachtet geringere Ertragsleistungen des System, ein Herbizideinsatz noch zu einer weiteren Verringerung der Wirtschaftlichkeit führen kann. So lag die zwar statistisch nicht abgesicherte Differenz des DAL für die Jahre 2015 bis 2017 zwischen Herbizidanwendung und Herbizidverzicht bei -133 € ha^{-1} bei Abfuhr des Roggens und bei -46 € ha^{-1} bei gewalzten Roggen.

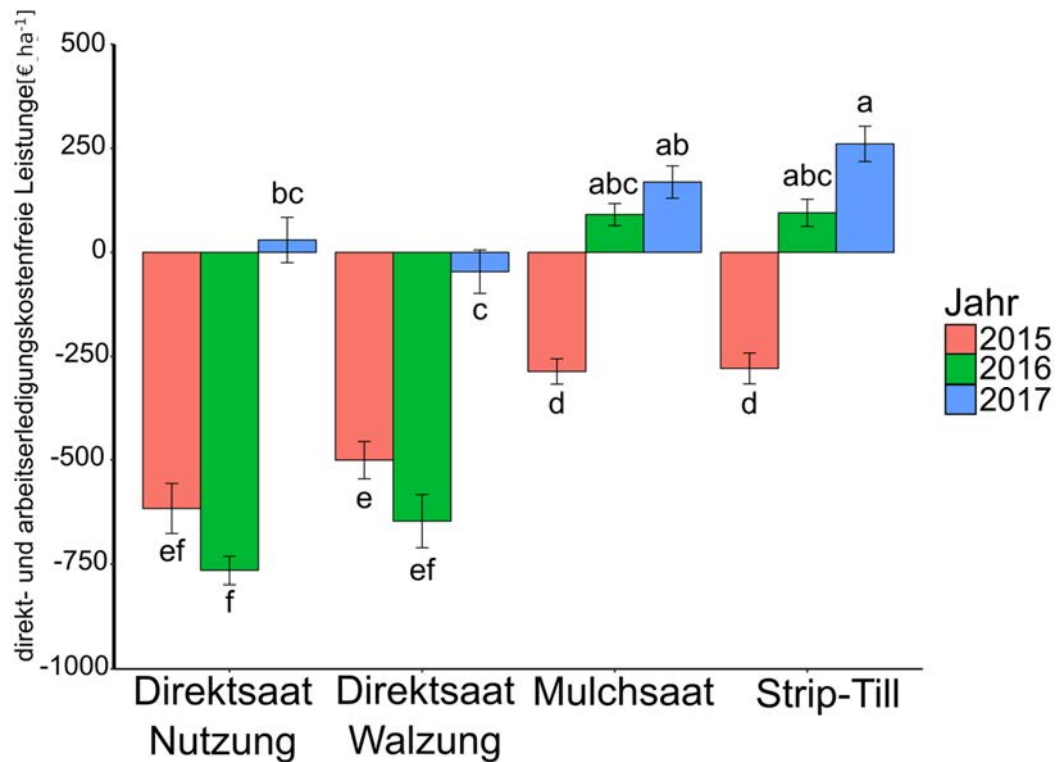


Abbildung 45: Direkt- und arbeits erledigungskostenfreie Leistungen (€ ha⁻¹) von Soja (*Sultana*) in Abhängigkeit des Anbausystems am Standort Stifterhof (Östringen) über drei Jahre (2015 bis 2017) gemittelt über die Herbizidvarianten Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha \leq 0,05$; Tukey).

Tabelle 20: P-Werte der direkt- und arbeits erledigungskostenfreien Leistungen

| P-Werte | Direkt- und arbeits erledigungskostenfreie Leistungen |
|---------------------------|---|
| Jahr | 0,0001 |
| Saatmethode | 0,0001 |
| Saat*Herbizid | 0,0778 |
| Jahr*Saatmethode | 0,0001 |
| Jahr*Saatmethode*Herbizid | 0,6070 |
| Block | 0,6367 |

5. Diskussion der Ergebnisse

5.1. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen

Die in unseren Versuchen geschätzte N₂-Fixierungsleistung der Sojabohnen liegt im mittleren bis oberen Bereich, der in einem Review von Salvagiotti et al. (2008) genannt wird und befinden sich in einer vergleichbaren Spannweite wie die Ergebnisse von Oberson et al. (2007) für einen Standort in der Schweiz. In der Literatur wurde beim Anbau von Sommerkörnererbsen in Mitteleuropa die StickstoffFixierungsleistung in einer großen Spannbreite von 40 bis 240 kg ha⁻¹ festgestellt (Jensen 1987, 1996; Jost 2003; Wichmann 2003; Corre-Hellou *et al.* 2006; Urbatzka 2010). Demnach lagen die in dieser Untersuchung abgeleiteten Werte auch für Erbsen im mittleren bis oberen Bereich.

Im Widerspruch zu Freyer et al. (2005) fiel die N₂-Fixierungsleistung bei Soja höher aus als bei Erbsen. Im Vergleich fällt die mittlere N-Aufnahme aus der Luft (N₂-Fixierung) bei Soja mit 78 % auf den konventionellen und mit 62 bis 71 % auf den ökologischen Versuchsstandorten gleich bis höher aus als mit 58 % in Versuchen ohne N-Düngung aus dem Review von Salvagiotti et al. (2008) bzw. 40 bis 52 % und 67 % in Versuchen mit ökologischer Bewirtschaftung (Schweiger *et al.* 2012; Reckling *et al.* 2017). Hauptunterschied zu Salvagiotti et al. (2008) ist die Bewirtschaftungsweise mit konventioneller und ökologischer Landwirtschaft.

Beide Kulturarten fixieren zwar relativ hohe N-Mengen, allerdings werden über die Körner erhebliche Mengen an Stickstoff aus dem System genommen. Wie in einem Großteil der Literaturübersicht von Mayer und Heß (1997) fiel die einfache N-Bilanz von Erbsen und Sojabohnen in unseren ökologischen Versuchen leicht bis deutlich negativ aus. In den konventionellen Versuchen unterlag die N-Bilanz erheblichen Jahresschwankungen von deutlich negativ (2017) bis deutlich positiv (2016). Dabei waren die N-Bilanzen zwischen Erbsen und Soja überwiegend vergleichbar und resultierten bei höherer N₂-Fixierung der Sojabohnen aus einer vergleichsweise höheren N-Abfuhr der Körner bei Soja.

Die N-Bilanz gibt jedoch nur eine bedingte Aussagekraft für den Vorfruchtwert. Entscheidender könnten die N-Menge aus den ober- und unterirdischen Ernterückständen, die N_{min}-Gehalte und der Erntezeitpunkt sein. Jost (2003) und

Wichmann (2003) stellten bei Erbsen eine zehnfach bzw. sechsfach so hohe N-Menge in den oberirdischen Ernterückständen als in den Wurzeln fest. Da auch Sojabohnen über eine vergleichsweise geringe Wurzelmasse wie Erbsen verfügen, ist dies vermutlich übertragbar. In unserer Untersuchung lag die N-Menge in den oberirdischen Ernterückständen bei Soja in sieben der neun Umwelten bzw. im Durchschnitt um 114 % höher als bei den Erbsen. Diese N-Mengen können gut von einer nachfolgenden Frucht genutzt werden.

Höhere N_{\min} -Werte nach der Ernte von Erbsen im Vergleich zu Nicht-Leguminosen insbesondere im Unterboden sind bekannt und wurden in der Literatur beschrieben (z. B. Urbatzka 2010). Diese sind auf die Stickstofffixierungsleistung und damit einhergehend eine geringere Aufnahme des mineralischen Stickstoffs aus dem Boden (Senaratne & Hardarson 1988; Evans *et al.* 1991), sowie der N-Rhizodeposition (Wichern *et al.* 2007) und damit einhergehende „Priming-Effekte“ (Jenkinson *et al.* 1985) zurückzuführen. Auch in den vorgestellten Untersuchungen lagen in den Versuchen im ökologischen Anbau nach der Ernte und zum Vegetationsende die N_{\min} -Gehalte im Boden nach Erbse ohne nachfolgenden Anbau einer Zwischenfrucht mit der Ausnahme einer Umwelt signifikant höhere N_{\min} -Gehalte im Mittel von $+54 \text{ kg N ha}^{-1}$ im Vergleich zu den nichtlegumen Kulturen vor. Bei der Sojabohne hingegen war nur in zwei der sechs Umwelten ein höherer N_{\min} -Gehalt im Mittel von $+29 \text{ kg N ha}^{-1}$ zum Vegetationsende zu beobachten. Die N_{\min} -Werte zum Vegetationsende und damit auch die N-Auswaschungsgefahr sind zumeist nach Erbse ohne Zwischenfrucht höher als nach Soja. Vermutlich ist ein größerer Teil des Stickstoffs bei entsprechender Witterung aus den Ernterückständen bei den Erbsen bereits mineralisiert. Allerdings wurden auch nach Sojabohne und auf dem Standort Forchheim am Kaiserstuhl nach Sommergerste kritische N_{\min} -Gehalte zum Vegetationsende von über $50 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ (vgl. Eckert 1997; SchALVO 2001) festgestellt. Auch Reckling *et al.* (2017) bestimmten vor Winter nach dem Anbau von Soja N_{\min} -Werte in Höhe von 50 bis 55 kg/ha. Nach Erbsen reduzierte in unseren Versuchen in Übereinstimmung zu Urbatzka *et al.* (2009) sowie Möller und Reents (1999) eine nichtlegume Zwischenfrucht die N_{\min} -Werte im Boden deutlich und verringerte die N-Auswaschungsgefahr deutlich. Nach Sojabohnen ist aufgrund des späten Erntetermins der Anbau einer abfrierenden Zwischenfrucht nicht mehr sinnvoll. Die höheren pflanzenverfügbaren Mengen an Stickstoff im Boden nach Soja im Vergleich nach Mais sind damit über Winter auswaschungsgefährdet, da Getreide nur geringe N-Mengen vor Winter aufnehmen (Thomsen *et al.* 2001).

Der Kornertrag der Nachfrucht Winterweizen im ökologischen Anbau fiel in diesem Projekt nach den Körnerleguminosen Soja und Erbsen in vier bzw. fünf der sechs Umwelten im Vergleich zum Sommergetreide bzw. Mais höher aus. Ursache für den höheren Kornertrag war neben den unterschiedlichen Mengen an mineralischem Stickstoff im Boden zum Drusch und vor Winter vermutlich eine unterschiedlich schnelle Umsetzung und Mineralisation der organischen Stickstoffverbindungen aus den Ernterückständen, da das C/N-Verhältnis bei Körnerleguminosen geringer als bei Getreide ausfällt. Dieser Vorfruchteffekt ist für Erbsen im Vergleich zu Nichtleguminosen gut in der Literatur für Deutschland und Luxemburg beschrieben (Paffrath 2003; Wichmann 2003; Urbatzka *et al.* 2009; Urbatzka & Heiles 2015; Zimmer *et al.* 2015). Dagegen stellten Reckling *et al.* (2017) und Zimmer *et al.* (2015) nach Soja im Vergleich zu einer Nichtleguminose keinen bzw. in einem von zwei Jahren einen höheren Ertrag im nachfolgenden Getreide fest. Dieser Unterschied in der Vorfruchtwirkung bei Soja im Vergleich zur Literatur ist vermutlich auf unterschiedliche günstige Standorte für Soja mit dem vergleichsweise hohen Ansprüchen an die Temperatur zurückzuführen.

Die höhere N-Menge der oberirdischen Ernterückstände bei Soja im Vergleich zu Erbsen ohne Zwischenfruchtanbau (s.o.) führte in unseren Feldversuchen im ökologischen Anbau nicht zu höheren Kornerträgen der Nachfrucht Winterweizen. Im Gegenteil: in vier der sechs Umwelten erzielte der Weizen nach Erbsen höhere Erträge. Ursache sind nach einer multiplen Regressionsanalyse ($R^2 = 0,26$; $p < 0,0001$) höhere N_{\min} -Werte nach Erbsen ohne Zwischenfrucht vor und nach Winter, da hier wie oben ausgeführt vermutlich ein Teil der Ernterückstände aufgrund der früheren Ernte bereits mineralisiert wurden. Auch Zimmer *et al.* (2015) stellten nach Sommererbsen einen höheren Kornertrag der Nachfrucht Winterweizen im Vergleich zu Soja in einem von zwei Jahren fest.

Der Ertrag der Nachfrucht Winterweizen nach Erbsen mit Zwischenfrucht fiel weitestgehend vergleichbar zu dem nach Soja aus. Der Weizenertrag lag nach Erbsen ohne Zwischenfrucht in vier der sechs Umwelten höher. Ursache sind auch hier nach einer multiplen Regressionsanalyse ($R^2 = 0,16$; $p < 0,0001$) erhöhte N_{\min} -Gehalte im Boden nach Winter beim Anbau mit Zwischenfrucht. Der Anbau einer nicht legumen Zwischenfrucht führte vermutlich zu einer verzögerten N-Mineralisation mit der Folge einer verringerten Auswaschungsgefahr über Winter, aber auch teils von Mindererträgen beim nachfolgenden Weizen.

Im konventionell bewirtschafteten Versuch, unterschieden sich die N_{\min} -Gehalte nach Vegetationsende beim Winterweizen hingegen nur in einem der drei Versuchsjahre mit signifikant höheren Gehalten der Leguminosen im Vergleich zum Silomais. Durch den stark auswaschungsgefährdeten sandigen Standort wurden im Frühling keine signifikanten unterschiedlichen N_{\min} -Gehalte mit Ausnahme im Frühjahr 2017 gemessen. Der Grund hierfür waren die geringen Niederschläge in den Wintermonaten 2016/2017. Die Problematik der hohen N-Auswaschungsgefahr von Sandböden ist bekannt. Unsere Untersuchung bestätigt die Ergebnisse von Bundy et. al. (1993), der auf Sandböden fand, dass die Vorfruchtwirkung von Soja auf den Körnermaisertrag, im Vergleich zu anderen Böden, deutlich bis hin zu keinen Effekt zurück ging.

Der Anbau einer nicht-legumen Zwischenfrucht führte auch im konventionellen Anbau zu einer Reduktion der N_{\min} -Gehalte im Herbst. Diese war jedoch nicht so deutlich ausgeprägt wie in den Versuchen im ökologischen Anbau. Der fehlende Unterschied im Ertrag und Proteingehalt zeigen, dass der Ausgleich der N_{\min} -Gehaltsdifferenzen im Frühjahr durch die parzellengenaue N-Düngung, den N-Bedarf des Winterweizens komplett erfüllte. Die geringen bis keine Unterschiede in der N-Düngung, keine Qualitäts- und Ertragsunterschiede beim Winterweizen erklären auch die Vergleichbarkeit im Deckungsbeitrag des Winterweizens nach verschiedenen Vorfrüchten. Bei Berücksichtigung des Fruchtfolgeausschnittes zeigt sich jedoch in zwei von drei Versuchsjahren ein vergleichbarer Deckungsbeitrag zwischen Soja – Winterweizen und Körnermais – Winterweizen. Hierbei weist die Fruchtfolge Soja - Winterweizen zusätzlich einige phytopathologische Vorteile wie z.B. ein geringeres Risiko von Fusariosen, gegenüber der Fruchtfolge Körnermais - Winterweizen auf (Dill-Macky & Jones 2000; Spolti et al. 2015). Die Fruchtfolge Erbse mit und ohne Zwischenfrucht - Winterweizen bietet diesbezüglich vergleichbare Vorteile, konnte jedoch nur in einem der drei Jahr vergleichbare Deckungsbeiträge erzielen.

Auch beim Vergleich der Deckungsbeiträge im ökologischen Anbau zeigte sich die hohe Anbauwürdigkeit von Soja. Auch wenn die Erbse ohne Zwischenfruchtanbau bei der Nachfrucht Winterweizen teils höhere Deckungsbeiträge als Soja erzielte, war beim Vergleich über den zweijährigen Fruchtfolgeausschnitt Soja aufgrund der hohen Marktpreise deutlich überlegen. Die teils etwas niedrigeren Weizenerträge nach Erbse mit Zwischenfrucht und die Kosten für den Anbau der Zwischenfrucht führten teils zu geringeren Deckungsbeiträgen als nach Erbse ohne Zwischenfrucht.

5.2. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau

Zwischen den beiden Bodenbearbeitungsverfahren Strip-Till und Mulchsaat wurden keine Ertragsunterschiede in den Versuchen beobachtet. Langjährige Versuche in den USA zeigen für den Erfolg dieser Verfahren einen erheblichen Einfluss des Standortes: so wurden zum einen signifikant höhere Erträge bei Mulchsaat an zwei Standorten, zum andern wiederum auch an einem Standort keine Ertragsunterschiede in einer Beobachtungsperiode von 8 bis 15 Jahren beobachtet (Yin & Al-Kaisi 2004). Unter Mulchsaat und Strip-Till werden aber teils sehr unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Intensitäten verstanden. So fand Cociu et.al. (2010) signifikante Unterschiede in Abhängigkeit der verwendeten Bodenbearbeitungsverfahren zur Mulchsaat bei Soja. Je nach Verfahren konnten bessere (Scheibenegge) oder vergleichbare Erträge (Grubber) gegenüber der Bodenbearbeitung mit Strip-Till erzielt werden.

Ein Vergleich zum Pflug mit der Mulchsaat fand in unserer Untersuchung nur in den On-Farm Versuchen statt. Der Pflug war nur in einer von vier Umwelten (Jahr x Ort) dem Mulchsaatsystem überlegen. In Versuchen in den USA (Hussain *et al.* 1999; Yin & Al-Kaisi 2004; Nouri *et al.* 2018) sowie in der rumänischen Donauebene (Cociu 2016) mit Direktsaat, Mulchsaat und Pflug wurden auch keine bzw. nur in Einzeljahren (Hussain *et al.* 1999; Nouri *et al.* 2018) Ertragsunterschiede zwischen dem Pflug und der Mulchsaat bei Soja festgestellt.

In unserer Studie wurde nur an einem On-Farm-Versuchstandort (Standort: Zaisenhausen) eine Direktsaat durchgeführt, bei der keine signifikanten Ertragsunterschiede zur Mulchsaat auftraten. Da es sich nur um zwei Umwelten (ein Ort x zwei Jahre) handelt, ist dieses Ergebnis mit Vorsicht zu bewerten. Ergebnisse aus Dauerversuchen aus den USA und Rumänien bestätigen Großteils das Ergebnis, wobei jedoch auf einigen Standorten in wenigen Einzeljahren Unterschiede zur Mulchsaat gefunden wurden (Yin & Al-Kaisi 2004; Cociu 2016; Nouri *et al.* 2018). Insbesondere in den USA fand zudem ein Anbausystemwechsel im Sojaanbau hin zu gentechnisch herbizidtoleranten (Glyphosat Resistenz) Sojasorten mit einer damit verbundenen Herbizidstrategie statt (Vivian *et al.* 2013). Dies war z.B. auch bei Hussain (1999) der Fall, der Ertragsvorteile der Direktsaat gegenüber der Mulchsaat fand. In der Europäischen Union hingegen sind keine gentechnisch veränderten Sojasorten für den Anbau zugelassen (The European GMO database, Stand: 23.09.2019). Daneben ist zu

beachten, dass unsere Untersuchung auf Standorten stattfand, die nicht langfristig mit dem jeweiligen Bodenbearbeitungssystem bewirtschaftet wurden. So fand Pittelkow *et al.* (2015) in einer Metastudie eine Tendenz, dass bei Leguminosen der Ertragsrückgang gegenüber der Bodenbearbeitung mit dem Pflug über die Zeit geringer wird.

Im Exaktversuch auf dem Stifterhof wurde als alternatives Direktsaatverfahren die Sojabohne in einen gewalzten oder abgemähten Winterroggen gesät. Die geringeren Erträge beim gewalzten Roggen im Vergleich zur reduzierten Bodenbearbeitung bestätigen Ergebnisse aus dem Ökolandbau und aus herbizidfreien Versuchsvarianten (Davis 2010; Bernstein *et al.* 2011; Forcella 2013; Urbatzka *et al.* 2017; Weber *et al.* 2017; Halwani *et al.* 2019). Im Projekt wurden in der Roggendirektsaat als Varianten auch Voraufbauherbizide eingesetzt, die jedoch zu keinen signifikanten Ertragsunterschieden im Vergleich zur herbizid-freien Varianten führte. Bei Direktsaat von konventionellen Soja in mit Glyphosat abgetöteten Roggen (Liebl *et al.* 1992) und auch bei glyphosat-resistenten Sojabohnen wurde auch kein zusätzlicher Ertragszuwachs durch die Herbizidbehandlung (Davis 2010) beobachtet.

Die Verfahren der Roggenbehandlung vor der Saat, Messerwalze oder Mahd, unterschieden sich statistisch nicht. Beide Verfahren zeigten jedoch einen Jahreseffekt auf den Ertrag. Bei der Direktsaat in den abgemähten Roggen fanden sich 2017 keine Unterschiede zur Mulchsaat, in den anderen beiden Jahren war das Verfahren jedoch unterlegen. Grundsätzlich waren die Erträge der Direktsaatverfahren 2017 signifikant höher als in den anderen beiden Versuchsjahren.

Eine Ursache der schlechten Erträge in Direktsaatvarianten von Soja in Winterroggen könnte die spätere Saat im Vergleich zu den Varianten mit Bodenbearbeitung sein. Um das Risiko des Wiederaustriebs des Roggens zu begrenzen, erfolgte diese erst zur Roggenblüte. Bei früherer Behandlung mit der Messerwalze besteht jedoch ein erhöhtes Risiko von Roggendurchwuchs (Mirsky *et al.* 2009). Saatzeitversuche von Soja zeigen, dass Spätsaaten häufig deutliche Ertragsverluste aufweisen (Bastidas *et al.* 2008; Hu & Wiatrak 2012; Asam *et al.* 2013; Urbatzka *et al.* 2019). In anderen Versuchen erzielte Soja nach Roggen mit Abtötung durch Herbizide zur ortüblichen Saatzeit einen vergleichbaren Ertrag zur Drillsaat nach Pflug (Halwani *et al.* 2019). Wie die Untersuchungen von Froschmeir *et al.* (2017) zeigt, führt allerdings eine Mulchschicht zu einem geringeren Feldaufgang der Sojabohnen. Durch den Roggenbewuchs und nach Saat durch die Mulchauflage wurde eine verlangsamten

Erwärmung des Bodens beobachtet (Wagner-Riddle *et al.* 1994; Wilkins & Bellinder 1996; Arora *et al.* 2011). Bernstein *et al.* (2011) fand um den Saatzeitpunkt und daher für die Keimung und die Jugendentwicklung geringere Bodenwassergehalte in der Roggendirektsaat, im Vergleich zur bearbeiteten Varianten. Je nach Witterungsverlauf kann jedoch die Mulchschicht auch von Vorteil sein. So fand Bernstein *et al.* (2011) im Laufe der Vegetation unter der Mulchschicht zu späteren Zeitpunkten höhere Bodenwassergehalte. Diese Effekte der Direktsaat in Roggen auf den Bodenwassergehalt erklären die Unterschiede zwischen den Versuchsjahren in unseren untersuchten Direktsaatvarianten. So konnten wahrscheinlich in den Jahren mit geringen Erträgen in der Direktsaat die Bodenwasserdefizite zur den Bodenbearbeitungsvarianten nicht mehr ausgeglichen werden, da es nur geringe Niederschläge in den Sommermonaten gab. Im Jahr 2017 gab es im Juli erhebliche Niederschläge um die Sojablüte: hier kamen wahrscheinlich die positiven Effekte der Mulchauflage bzw. Stoppelaufgabe auf den Bodenwasserhaushalt zugute. Der Bodenwassergehalt hat einen erheblichen Einfluss auf den Ertrag in diesem System, so wurde von Davis (2010) eine Korrelation $r = 0,70$ bei Direktsaat in Roggen und nur von $r = 0,28$ bei Blanksaat ermittelt. Darüber hinaus stellt die Roggendirektsaat, insbesondere in gewalzten Roggen durch die dauerhaft hohe Bodenbedeckung von über 90 %, ein effektiver Erosionsschutz dar und reduziert die Oberflächenabflüsse.

Aus Sicht der sojaanbauenden Landwirte (siehe durchgeführte Interview Studie Kap. 4.3.5), sowie aus Studien zur Bedeutung der Unkrautregulierung bei Soja (Van Acker *et al.* 1993; Oerke 2006; Gehring *et al.* 2014; Weber *et al.* 2016) ist es wichtig, die geprüften reduzierten Bodenbearbeitungsverfahren und Herbizidstrategien auf ihre Wirkung auf die Verunkrautung zu bewerten.

In den Jahren 2015 und 2017, in denen die verwendeten Voraufbauherbizide erfolgreich eingesetzt werden konnten, wurden im Juli keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten mit Voraufbauherbizideinsatz festgestellt. Dies bestätigt die Untersuchung von Kapusta (1979), der beim Vergleich der Herbizidwirkung in den Bodenbearbeitungssysteme Pflug, Reduziert und Direktsaat bei Metribuzin keine reduzierte Wirkung mit Ausnahme bei Hirsearten fand. Das die von Kapusta (1979) beobachtete geringere Hirsewirkung bei der Direktsaat in den Versuchen nicht auftrat, beruht in der verwendeten Herbizidkombination mit Dimethinamid-P, einen Wirkstoff mit guter Wirkung gegen Hirsen.

Zum Zeitpunkt der Ernte zeigten 2015 die Direktsaatverfahren mit Nutzung jedoch eine höhere Verunkrautung als die Verfahren mit reduzierter Bodenbearbeitung unabhängig von der Herbizidstrategie. Zudem zeigte das Versuchsjahr 2016, mit seiner nicht erfolgreichen Unkrautbekämpfung durch die Herbizide, die Schwäche einer Herbizidstrategie die maßgeblich auf Voraufbauherbizide beruht. Gehring et al. (2014) beobachteten in Herbizidversuchen bei Soja in Bayern und Baden-Württemberg auch erhebliche Abweichungen in der Herbizidwirkung zwischen den Jahren und Standorten. Hierbei beobachten Gehring et al. (2014) beim Weißen Gänsefuß, der 2016 das Leitunkraut im Versuch war, eine erhebliche durch die Standortbedingungen wie z. B. die Witterung, schwankenden Bekämpfungserfolg. Diese Problematik wurde von den Pflanzenschutzmittelherstellern erkannt. Seit 2018 stehen zusätzlich die beiden Wirkstoffe Quinmerac und Imazamox als Nachaufbauherbizid in Soja als zusätzliche Bausteine in einer Herbizidstrategie zur Verfügung (BVL 2019).

Bei einem mittleren Unkrautdruck wie im Jahr 2015 konnte durch das Walzen des Roggens und der damit verbunden Mulchauflage im Vergleich zum genutzten und damit abgefahrenen Roggen ein Unkrautbekämpfungserfolg von 71 % im Juli bzw. von 68 % zum Zeitpunkt der Ernte in den Varianten ohne Herbizideinsatz in den Direktsaatvarianten erzielt werden. Die unkrautregulierende Wirkung von gewalztem Roggen im Vergleich zu genutztem Roggen bei Soja in Direktsaat wurden auch von Bernstein e. al. (2014) in einen von zwei Jahren und von Smith et al. (2011) in einer von vier Umwelten beobachtet. Dem entgegen wurden von Weber et al. (2017) keine Unterschiede in der Unkrautdichte zwischen abgefahrenen und gewalztem Roggen nach der Sojasaat in vier Umwelten gefunden. Wie Ryan et al. (2011) ausführten, ist für einen Erfolg der Unkrautreduktion durch die Mulchschicht, die Menge der Biomasse des Roggens von entscheidender Bedeutung.

Obwohl in den Direktsaatvarianten mit Voraufbauherbizid im Jahr 2015 (Direktsaat Roggen gewalzt: 26 % zu Direktsaat Roggen genutzt: 81 % Wirkungsgrad Voraufbauherbizide zur Ernte), jedoch nicht 2017 (Direktsaat Roggen gewalzt: 95 % zu Direktsaat Roggen genutzt: 96 % Wirkungsgrad zur Ernte), ein geringerer Wirkungsgrad der Voraufbauherbizide in dem gewalzten Roggen im Vergleich zum genutzten Roggen beobachtet wurde, konnten diese Wirkungsverluste der Herbizide durch den Effekt der Mulchauflage kompensiert werden. Der geringere Wirkungsgrad der Herbizide bei gewalzten Roggen ist durch den Spritzschatten verursacht durch die Mulchauflage bedingt. Folglich kommen vorhandene Unkrautpflanzen, sowie teils der Boden und

damit die zukünftig keimenden Unkräuter, nicht mit dem Herbizid in Kontakt. Diese Herabsetzung des Langzeiteffektes der Herbizidbehandlung führt zur beobachteten, erhöhten Spätverunkrautung zur Ernte.

Der Einsatz von Glyphosat als Totalherbizid führte weder in der Mulchsaat noch bei der Strip-Till Saat zu einem signifikant niedrigeren Unkrautdeckungsgrad. Selbst im Jahr 2016 in denen keine erfolgreiche Unkrautbekämpfung durch die Voraufherbizide erzielt werden konnte, führte der Einsatz des Totalherbizides zu keiner Reduktion des Unkrautdeckungsgrad ab der Saat der Soja bis zur Ernte. Die Ergebnisse unterstreichen den möglichen Verzicht eines Einsatzes von Totalherbiziden in Soja mit reduzierter Bodenbearbeitung. Eine Ausnahme könnten davon Flächen mit erheblicher Altverunkrautung sein, da diese von den derzeitig zugelassen Sojagerbiziden unzureichend bzw. nicht erfasst werden (Imgraben & Recknagel 2019).

Die Saatverfahren hatten einen deutlichen Einfluss auf den ökonomischen Erfolg des Sojaanbaus. Die direkten und arbeitskostenfreien Leistungen (DAL) zeigen einen erheblichen wirtschaftlichen Nachteil der beiden geprüften Direktsaatverfahren gegenüber den Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung Mulch- und Strip-Till. Den von Yin und Al-Kaisi (2004) gefunden Vorteil von herkömmlichen Direktsaatsystemen konnte bei den geprüften Direktsaatsystemen in Grünroggen nicht bestätigt werden. Vielmehr werden die ökonomischen Nachteile der Direktsaatsysteme in Grünroggen von konventioneller Soja auch in anderen Untersuchungen bestätigt (Halwani *et al.* 2019). Unter Bedingungen des Ökolandbaus in den USA bestätigt Bernstein (2011) zum einen die vorliegenden Ergebnisse, er fand eine geringere Entlohnung pro ha, zum andern zeigt er jedoch, dass das Verfahren dort zu einer verbesserten Entlohnung pro Stunde führte. Dieser angeführte ökonomische Vorteil einer verbesserten Entlohnung pro Stunde relativiert sich jedoch im konventionellen Anbau da keine zeitintensive mechanische Unkrautbekämpfung erfolgt.

Die in den Roggendirektsaatverfahren in einer Variante eingesetzten Voraufherbizide führten zu keiner signifikanten Verbesserung der DAL. Vielmehr weisen die Ergebnisse darauf hin, dass bei dem in den Versuchen beobachteten geringere Ertragsleistungen des System, ein Herbizideinsatz noch zu einer weiteren Verringerung der Wirtschaftlichkeit führen kann. Die beiden geprüften Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung Mulchsaat und Strip-Till konnten in zwei von drei Jahren positive DAL erzielen. Hierbei waren beide Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung

gleich wirtschaftlich erfolgreich und hatten gleichgerichtete Jahresschwankungen. Der wirtschaftliche Erfolg der reduzierenden Bodenbearbeitungsverfahren wurde nicht signifikant durch den Einsatz der Totalherbizide beeinflusst. Ursache hierfür ist, dass in den vorliegenden Versuchen der Totalherbizideinsatz keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungen (Ertrag) bei den geprüften Varianten hatte. Für die geprüften Bodenbearbeitungsverfahren und unter den vorliegenden Standortbedingungen konnte für Soja daher gezeigt werden, dass im Gegensatz zu den in dem Review von Schulte und Theuvsen (2015) dargestellten Thesen, ein Verzicht auf Glyphosat auch bei reduzierter Bodenbearbeitung keinen wirtschaftlichen Nachteil darstellt.

Interviewstudie

Die in der Interviewstudie geäußerte eher negative Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des Sojaanbaus war stark geprägt von den schlechten ökonomischen Ergebnissen im Jahr 2015. Das Jahr 2015 war jedoch ein „ökonomisches Problemjahr“ wie Weiher et al. (2018) anhand der agronomischen und ökonomischen Analyse der Daten aus den Jahren 2014 – 2017 von bis zu 118 Betrieben in Deutschland darlegt. Wie von den interviewten Landwirten befürchtet, sank der Sojapreis für die konventionelle Landwirtschaft auf unter 40 € dt⁻¹ in den folgenden Jahren (Schätzl et al. 2019).

Jedoch hatte dies keine negative Auswirkung auf den Umfang der Anbaufläche von Soja in Süddeutschland. So stieg der Sojaanbau in Baden-Württemberg von 5.866 ha im Jahr 2015 auf 7.256 ha (+ 24 %) im Jahr 2018 und von 7.248 ha im Jahr 2015 auf 12.465 ha (+ 72 %) im Jahr 2018 in Bayern (Recknagel 2019). Wie von den interviewten Landwirtinnen und Landwirten erwartet ging der Anbau unmittelbar nach dem Jahr 2015 kurzfristig zurück (Baden-Württemberg - 1% und Bayern - 9%), um ab 2017 wieder deutlich anzusteigen (Recknagel 2019). Wie die ökonomischen Analysen von Weiher et al. (2018) zeigen, waren in den Jahren 2014 - 2017 die durchschnittlichen Deckungsbeiträge bei Soja für Süddeutschland durchweg positiv mit einem Durchschnittsergebnis für den Zeitraum von 773 € ha⁻¹ im nördlichen Baden-Württemberg, wo die meisten der Interviewpartner tätig sind. Im Vergleich zu alternativen Kulturen zeigen die bundesweiten Daten von Weiher et al. (2018) die häufige Unterlegenheit von Soja gegenüber Winterraps; jedoch mit Körnermais, Silomais und Winterweizen konnte Soja auch bei Preisen unter 40 € dt⁻¹ konkurrieren.

Aus Sicht der befragten Expertinnen und Experten zeigen Sojabohnen in der Fruchtfolge viele Vorteile. Jedoch haben sie auch deutliche Ansprüche an die Unkrautkontrolle und der damit verbunden Flächenwahl, insbesondere beim Auftreten von problematischen Wurzelunkräutern wie Winde, Distel und Quecke. Dies zeigt sich auch in den Auswertungen der Pflanzenschutzstrategie im Demonstrationsbetriebsnetzwerk Soja: bei den konventionellen Betrieben benötigten die besseren Betriebe häufig nur eine Voraufbauherbizidbehandlung (Weiher *et al.* 2018). Falls diese nicht erfolgreich war, ging dies zu Lasten der Wirtschaftlichkeit. Jedoch wirken die derzeitig zugelassen Voraufbauherbizide nicht in allen Jahren zuverlässig (Gehring *et al.* 2014).

Zusätzlich können die bisher in Soja zugelassen Herbizide die genannten Wurzelunkräuter, abgesehen von der Quecke, nicht ausreichend bekämpfen. Folglich muss die Regulierung der Wurzelunkräuter in den Vorfrüchten bzw. auf der Stoppel vor den Sojabohne bzw. der Sojaanbau auf möglichst wurzelunkrautfreien Flächen erfolgen (Imgraben & Recknagel 2019). Dies wurde, wie die Interviews zeigen, in der Praxis erkannt und wird von den befragten Beratern als Strategie unterstützt. Darüber hinaus, zeigt die Befragung, dass aus Sicht der Beratung und Praxis, Soja sich gut in Betriebe mit reduzierter Bodenbearbeitung integrieren lässt. Vielmehr werden Sojabohnen, als sehr gute Vorfrucht von Winterweizen für die Direktsaat hervorgehoben.

In vielen Interviews wurde die Anwendung von Stickstoffdüngern im Sojaanbau angesprochen. Bei dem befragten Personenkreis gibt es viele Praktiker und Berater die trotz der Fähigkeit der biologischen Stickstofffixierung der Sojabohne von der Notwendigkeit einer Stickstoffdüngung ausgehen.

Wie unsere Ergebnisse aus den Versuchen zur Fixierungsleistung von Sojabohnen zeigen, hat Soja einen hohen Stickstoffbedarf, eine hohe Stickstoffabfuhr durch die Erntereste und eine häufig negative Stickstoffbilanz. In den dargelegten Versuchen hat die Sojabohne das N-Bilanzdefizit wahrscheinlich aus den Bodenvorräten gedeckt. Auch Salvagiotti *et al.* (2008) gehen von einer ausreichenden Deckung des Stickstoffbedarfs von Sojabohnen durch die biologische N₂-Fixierung und aus dem Bodenvorrat aus. Gaspar *et al.* (2017) berechneten theoretisch mögliche Erträge mit mehr als 65 dt ha⁻¹ aus beiden genannten Quellen. Jedoch steigt mit der Zunahme der Erträge der Stickstoffanteil der aus anderen Quellen wie der biologischen N₂-Fixierung stammt (Salvagiotti *et al.* 2008; Cafaro La Menza *et al.* 2017). Dies wird häufig als

Grund für einen Stickstoffdüngbedarf auf Hohertragsstandorten in Verbindung mit Hohertragsorten (Ertragspotenzial $>45 \text{ dt ha}^{-1}$) angeführt (Salvagiotti *et al.* 2008).

Der Effekt der mineralischen Stickstoffdüngung auf Sojabohnen mit verschiedenen Düngzeitpunkten, Düngegaben, Düngeformen und Ausbringtechniken wurde in vielen Studien untersucht (Hungria *et al.* 2006; Salvagiotti *et al.* 2008). Beim Vergleich der Ergebnisse zeigt sich jedoch in Versuchen der sehr starke Einfluss der verschiedenen Umwelten und Anbauverfahren auf den Kornertrag und die physiologische Reaktion (Mourtzinis *et al.* 2018). Der stickstoffbezogene Ertragseffekt fiel im Vergleich zu den anderen Einflussgrößen wie Umwelt, Sorte und Anbaumanagement sehr gering aus. Hiernach stammen in den USA 68 % der Ertragsschwankungen aus dem Jahreseinfluss und nur 3 % aus dem Stickstoffdüngeeffekt (Mourtzinis *et al.* 2018).

Mehrere Studien zeigen, dass eine mineralische N-Düngung nur dann zu positiven Ertragseffekten führt, wenn die biologische Stickstofffixierung gehemmt ist (Heitholt *et al.* 2007; Kinugasa *et al.* 2012; Santachiara *et al.* 2017). So reagieren z. B. Sojabohnen die aufgrund von Wassermangel eine negativ beeinflusste N_2 -Fixierung haben, mit einem positiven Ertragseffekt auf die Stickstoffdüngung (Purcell & King 1996; Ray *et al.* 2006). Unter ausreichender Wasserversorgung zeigt sich dieser Effekt jedoch kaum noch (Purcell & King 1996; Mourtzinis *et al.* 2018). Es besteht eine komplementäre Interaktion zwischen Stickstoffaufnahme aus dem Boden und N_2 -Fixierung: hohe N_{min} -Gehalte im Boden führen zu einer Verringerung der N_2 -Fixierungsleistung (Herridge & Brockwell 1988; Goss *et al.* 2002). Zudem konnte auch in mehreren Untersuchungen eine negative Korrelation zwischen der Stickstoffdüngehöhe und der Knöllchenanzahl an der Sojapflanze gezeigt werden (Harper 1974; Sinclair & De Wit 1976; Herridge & Brockwell 1988; Imsande 1998). Die höchsten Erträge und Proteingehalte sind zu erwarten, wenn die Sojabohne auf beide Stickstoffquellen, N_2 -Fixierung und den Bodenvorrat, zurückgreifen kann (Harper 1974; Imsande 1998; Fabre & Planchon 2000). Neuere Untersuchungen in den USA zeigen in den meisten Regionen keine Ertragssteigerung bei Sojabohnen durch die Stickstoffdüngung. Nur bei 13 von 207 analysierten Versuchen konnte eine signifikante Ertragssteigerung von 0,9 bis 3 kg Korn $\text{kg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ N}$ aus Stickstoffdünger festgestellt werden (Mourtzinis *et al.* 2018).

In den Interviews wurde besonders die Stickstoffgabe zur Saat als wichtig betont. Hierbei wurde neben der Hoffnung auf höhere Erträge auch eine beschleunigte Jugendentwicklung angeführt. In den ersten Tagen nach dem Auflaufen, bevor der Blattapparat und die Knöllchen vollständig ausgebildet sind, werden bei Sojapflanzen

zum Teil Symptome des Stickstoffmangels wie blassgrüne Blätter, beobachtet. Diese Beobachtung in der Phase in der Soja noch die Reserven aus dem Samen maßgeblich nutzt, führt zur Annahme, dass eine Stickstoffstartgabe zur Saat für eine beschleunigte Jugendentwicklung und Ertragsverbesserung notwendig sei (Peoples *et al.* 1995; Hungria & Mendes 2015). Auch zeigen Studien eine Förderung für das frühe Wachstum bis zur Blüte von Sojapflanzen durch eine Startdüngung (Osborne & Riedell 2006; Ray *et al.* 2006; Gai *et al.* 2017). Jedoch fand Goss *et al.* (2002) bei einer gestaffelten Startdüngung von 0, 20, 60 und 180 kg N ha⁻¹ keine Unterschiede im Biomassewachstum zur Blüte. Zudem wurde beobachtet, dass eine negative Beziehung zwischen Knöllchenanzahl und Stickstoffdüngung, schon ab geringen Düngemengen von 20 – 40 kg N ha⁻¹ zur Saat, besteht (Mendes *et al.* 2003). Mendes *et al.* (2003) beobachteten auch das selbst geringe Startgaben von kleiner 50 kg N ha⁻¹ keinen vorteilhaften Einfluss auf den Ertrag zeigen. Beim Vergleich der Düngzeitpunkte erreichte die Startdüngung gegenüber späteren Düngzeitpunkte in den meisten Versuchen die geringsten Kornerträge (Mourtzinis *et al.* 2018).

Als weitere Stickstoffdüngestrategie wurde die Düngung zur Sojablüte in den Interviews genannt. Eine N-Düngung zur Blüte wirkt weniger hemmend auf die Knöllchenanzahl als die Dünggabe zur Saat (Hoover & Beard 1970). Jedoch führen auch hier hohe Düngemengen von 180 kg N ha⁻¹ zu massiven Knöllchenverlusten von bis zu 74 % im Vergleich zur nicht gedüngten Kontrolle in der Vollblüte (Goss *et al.* 2002). Salvagiotti *et al.* (2008) beobachtete Ertragssteigerung von bis 8,7 kg Korn kg⁻¹ ha⁻¹ N aus Stickstoffdünger bei Düngehöhen kleiner 50 kg N ha⁻¹ zur Blüte. Wenn die Stickstoffdüngung kleiner 50 kg N ha⁻¹ als Spätdüngung nach der Blüte zur Hülsenfüllung ausgebracht wurde steigt die Stickstoffdüngerausnutzung deutlich auf 24 kg Korn kg⁻¹ ha⁻¹ N deutlich. Auch Wood *et al.* (1993) und Mourtzinis *et al.* (2018) mit 60 kg N ha⁻¹, fanden bei der N-Spätdüngung zur Hülsenfüllung positivere Effekte als bei Düngung zur Blüte. Jedoch steht die Spätdüngung mit den Ertragspotenzial des Standortes in Beziehung und korreliert nur auf Hohertragsstandorten positiv (Wesley *et al.* 1998). Untersuchungen der Universität von Minnesota kommen zum Schluss, eine Spätdüngung von Soja für die Praxis nicht zu empfehlen, da sie unsicher und wie eine frühe Düngung nur eingeschränkt in der Ertragswirkung sei (Schmitt *et al.* 2001).

Der Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern beim Sojaanbau führt demnach in der Regel nicht zu dem von den Landwirten und Beratern erwarteten Nutzen einer

signifikanten Ertrags- und Qualitätssteigerung im Vergleich zur Kontrolle. Da die Düngekosten zudem häufig über dem Erlös durch die Ertragssteigerung liegen, ist eine Stickstoffdüngung nicht wirtschaftlich (Wood *et al.* 1993; Goss *et al.* 2002; Hungria *et al.* 2006; Ray *et al.* 2006; Salvagiotti *et al.* 2008; Hungria & Mendes 2015; Kaschuk *et al.* 2016; Bader 2018; Mourtzinis *et al.* 2018). Ökonomisch sinnvoller als eine Stickstoffdüngung ist eine Inokulation mit Knöllchenbakterien. Selbst mit einer 50 kg N ha⁻¹ Düngung zur Blüte lag der Ertrag von nicht inokulierten Sojabohnen noch 40 % unter der erfolgreich inokulierten Variante (Aigner 2014). So sollte für einen erfolgreichen Sojaanbau die biologische Stickstofffixierung die Hauptquelle für die Stickstoffversorgung von Sojabohnen bleiben (Hungria *et al.* 2006). Eine verbesserte N₂-Fixierung kann den Ertrag und vor allen den Proteingehalt von Sojabohnen stärker erhöhen als eine N-Düngung (Imsande 1998).

Wie in den Interviews zu recht angemerkt, bestehen erhebliche Unterschiede im Leistungsvermögen von Impfmittel (Wächter *et al.* 2013; Zimmer *et al.* 2015; Thilakarathna & Raizada 2017; Butz 2018). In Impfmittelversuchen in Baden-Württemberg zeigten jedoch zuverlässige Impfmittel Mehrerträge von bis zu 25 dt ha⁻¹ und höhere Proteingehalte von bis zu 9,9 % im Vergleich zur Kontrolle (Butz 2018).

6. Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse

6.1. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen

In den beiden Arbeitspaketen 1 und 2 zur Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im konventionellen und ökologischen Anbau konnte Wissen über die N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Körnererbsen und deren Vorfruchtwirkung auf Winterweizen für Süddeutschland erlangt werden. Die vorgenommene ökonomische Bewertung der Leistung der beiden Körnerleguminosen in der Fruchtfolge ermöglicht eine Bewertung der Leistung über das Anbaujahr hinaus in den Anbausystemen. Die erzielten Erkenntnisse fließen über Veröffentlichungen in Forschung und Praxis, sowie in die Fortbildungsaktivitäten der beteiligten Institutionen in die landwirtschaftliche Beratung ein und sind in den Wissenstransfer des Sojanetzwerk (FKZ: 14EPS001-004) eingebunden gewesen. Hierdurch werden für Praxis und die Akteure der Beratung, die Vorzüglichkeit des Soja- und Erbsenanbaus als Kultur und in der Fruchtfolge besser einschätzbar. Dies wird besonders bei den Sojabohnen, aber auch bei den Erbsen im ökologischen Anbau, das Interesse von Landwirten am Anbau in Deutschland stärken.

6.2. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau

Aus den Versuchen zur reduzierten Bodenbearbeitung im konventionellen Sojaanbau konnten viele wichtige Ergebnisse für die Praxis abgeleitet werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mit den beiden geprüften Verfahren Mulchsaat und Strip-Till Saat zwei praxistaugliche und wirtschaftliche Verfahren den Sojaanbauern auf erosionsgefährdeten Standorten zu Verfügung stehen, die auch einen Anbau im System reduzierter Bodenbearbeitung ohne Totalherbizideinsatz vor der Sojasaat ermöglichen. Die beiden geprüften Direktsaatverfahren in Grünroggen haben sich als nicht praxistauglich und unwirtschaftlich herausgestellt. Durch den On-Farm Ansatz wurde die Erfahrungen unmittelbar mit der Praxis verknüpft und bei gemeinsamen Veranstaltungen mit dem Sojanetzwerk (FKZ 14EPS001-04) wurden die Ergebnisse

unmittelbar der Praxis dargelegt. Die erzielten Erkenntnisse fließen über Veröffentlichungen in Forschung und Praxis, sowie in die Fortbildungsaktivitäten der beteiligten Institutionen in die landwirtschaftliche Beratung ein.

Die Ergebnisse aus der Interviewstudie wurden aufgegriffen und die kritischen Punkte wie z. B. Sojadüngung und Impfmittelqualität werden in der Forschung und im Wissenstransfer für die Beratung und Praxis bearbeitet.

7. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weitere Fragestellungen

Das Projektziel die Bestimmung der N₂-Fixierungsleistung und der Vorfruchtleistung von Sojabohnen im Vergleich zu wichtigsten Konkurrenzkulturen (Erbsen, Sommergetreide und Mais) in den aktuellen und potenziellen Sojaanbaugebieten Süddeutschlands auf die praxisübliche Folgekulturen Winterweizen, konnte erfüllt werden. So wurde wie geplant N₂-Fixierungsleistung für Sojabohnen und Körnererbsen im konventionellen und ökologischen Anbau an drei Standorten bestimmt. Die Vorfruchtleistung auf den Ertrag der Nachfrucht Winterweizen wurde an allen drei Standorten ermittelt. Die ökonomische Bewertung der Leistung der beiden Körnerleguminosen in der Fruchtfolge konnte erstellt werden. Hierdurch wurde einen Beitrag zur Verbesserung der monetären Bewertbarkeit von der Körnerleguminosen Erbse und Soja erbracht. Die Vorzüglichkeit von konventionellen und ökologischen Sojabohnen in einer Fruchtfolge konnten hiermit klar dargelegt werden. Bei der Bestimmung der N₂-Fixierungsleistung wurde ein hoher Umwelteinfluss festgestellt, eine Klärung der wichtigsten Einflussparameter und deren Optimierung für die N₂-Fixierungsleistung für Süddeutschland wären für eine Verbesserung des Sojaanbaus zweckdienlich. Im Projekt war es nur Ziel die Vorfruchtleistung zu bestimmen, nicht jedoch die Klärung der zugrundeliegende Nährstoffflüsse und anderen Einflussgrößen auf die Vorfruchtleistung, dies würde weit umfangreichere Untersuchungen benötigen.

Es konnten mit der Mulchsaat und Strip-Till-Saat, geeignete praxisreife Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung für einen nachhaltigen konventionellen Anbau von

Sojabohnen auf erosionsgefährdeten Standorten identifiziert werden. Zudem konnte ermittelt werden, dass die geprüften Direktsaatsysteme von Soja in abgefahren bzw. gewalzten Roggen nicht für die Praxis empfehlenswert sind. Für die geprüften Bodenbearbeitungsverfahren Mulchsaat und Strip-Till konnte unter den vorliegenden Standortbedingungen für Soja gezeigt werden, dass ein Verzicht auf Glyphosat auch bei reduzierter Bodenbearbeitung keinen agronomischen und wirtschaftlichen Nachteil darstellt. Grundlage war hierfür die weitestgehend erfolgreich durchgeführten Versuche. Die in den Exaktversuch 2016 auftretenden Probleme in der Unkrautbekämpfung sind systemimmanente für den damaligen Stand der möglichen Herbizidstrategien im konventionellen Sojaanbau in Süddeutschland. Trotzdem konnten die gesetzten Projektziele erfüllt werden. Dies zeigt jedoch, dass eine Weiterentwicklung der Unkrautbekämpfungsstrategien im Sojaanbau erforderlich ist.

Durch die erfolgreich durchgeführten Interviews mit Landwirte und Berater konnten die Praxiserfahrungen und –probleme in Deutschland bei reduzierter Bodenbearbeitung von Soja ermittelt werden.

Durch die enge Vernetzung mit dem Sojanetzwerk (EPS FKZ 14EOS001-04) konnte im Wissenstransfer die gesetzten Ziele mehr als erfüllt werden. Es wurde wie geplant alle drei Ebenen in der Wissenskette: Forschung, Beratung und Praxis mit Informationen über verschiedene Medien: wissenschaftliche und fachliche Veröffentlichungen, Vorträge, Feldveranstaltungen, Fachtagung und ein Kurzvideo versorgt. Es bestand ein großes Interesse an den bearbeiteten Themen. Wie die Ergebnisse aus der Interviewstudie zeigen besteht grundsätzlich ein hoher Bedarf an Wissenstransfer und –austausch zwischen Forschung, Beratung und Praxis über den Sojaanbau.

8. Zusammenfassung

8.1. Vorfruchtwirkung und N₂-Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen

Die N₂-Fixierungsleistung, die N-Bilanz und die Vorfruchtwirkung von Soja im Vergleich zu Erbsen wurden an drei Standorten in drei Jahren untersucht. Die Versuche im ökologischen Anbau fanden an den Standorten Forchheim am Kaiserstuhl (Baden-Württemberg; langjährige Mittel 11,2 °C und 630 mm; L) und Hohenkammer (Bayern; langjährige Mittel 7,8 °C und 816 mm; sL) statt, im konventionellen Anbau war der Standort Rheinstetten (Baden-Württemberg; langjährige Mittel 10,1 °C und 742 mm; IS). In Rheinstetten wurde der Versuch bewässert.

Es wurden je zwei Sorten Körnererbsen (*Alvesta* und *Respect* (konventionell) bzw. *Salamanca* (ökologisch)) und Sojabohnen (*ES Mentor* (Reifegruppe 00) und *Merlin* (Reifegruppe 000)) ausgesät. Die Schätzung der N₂-Fixierungsleistung erfolgte über die erweiterte Differenzmethode nach Stülpnagel (1982) mit der Erweiterung III für den Blattfall nach Hauser (1987). Bei der Berechnung wurde zunächst die Summe aus der N-Menge im Korn, im Blatt und im Spross der Leguminose sowie des N_{min}-Gehaltes im Boden zur Ernte gebildet und von dieser der gleiche Wert einer Referenzfrucht nach folgender Gleichung abgezogen:

$$N_{\text{fix}} = (N_{\text{Korn}} + N_{\text{Spross}} + N_{\text{min}} + N_{\text{Blattfall}})_{\text{Leguminose}} \\ - (N_{\text{Korn}} + N_{\text{Spross}} + N_{\text{min}} + N_{\text{Blattfall}})_{\text{Referenzfrucht}}$$

Als Referenzfrüchte wurden die Silomaisorten *Saludo* (S210) und *Ronaldinio* (S240) für die Sojasorten *Merlin* bzw. *ES Mentor* verwendet. Bei den Erbsen wurde die Sommergerstensorte *Grace* an den Standorten Rheinstetten und Forchheim am Kaiserstuhl genutzt, am Standort Hohenkammer die Hafersorten *Aragon* (2015) und *Max* (2016 bis 2017). Die Referenzfrüchte wurden nicht mit Stickstoff gedüngt.

Die N-Bilanz wurde aus N₂-Fixierungsleistung und N-Abfuhr errechnet. Die Vorfruchtwirkung wurde über Ertrag und Rohproteingehalt der Nachfrucht Winterweizen (*Florian* im ökologischen, *Ambello* im konventionellen Anbau) in den Jahren 2016 bis 2018 auf allen drei Standorten untersucht. Auf dem konventionellen Standort in Rheinstetten erfolgte die mineralische Stickstoffdüngung unter Berücksichtigung von parzellengenauen N_{min}-Gehalten. Nach den Erbsen wurde zusätzlich der Einfluss der

Zwischenfrucht Senf auf die Vorfruchtwirkung bestimmt. Zur ökonomischen Bewertung wurden aus den Versuchsergebnissen Deckungsbeiträge berechnet. Hierbei lag der Fokus auf der Nachfrucht Winterweizen. Für die beiden ökologischen Standorte wurde zusätzlich die Deckungsbeitragssumme für den Fruchtfolgeausschnitt Körnerleguminose bzw. Sommergetreide und Winterweizen kalkuliert.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Auf den beiden Standorten in Baden-Württemberg erzielten die Erbsen mit durchschnittlichen 48 dt ha⁻¹ konventionell und 53 dt ha⁻¹ ökologisch einen um ca. 14 dt ha⁻¹ höheren Kornertrag als Soja. In 5 von 6 Umwelten war dieser Unterschied signifikant. In Hohenkammer fiel der Kornertrag zwischen Erbse und Soja im Mittel der drei Jahre mit ca. 42 dt ha⁻¹ vergleichbar aus.
- Die N₂-Fixierungsleistung war um 96 kg ha⁻¹ auf den beiden ökologisch bewirtschafteten Standorten und um 40 kg ha⁻¹ auf den konventionell bewirtschafteten Standort bei Soja höher als bei den Erbsen. Mit Ausnahme einer Umwelt fiel dieser Unterschied ebenfalls signifikant aus. Die höhere N₂-Fixierungsleistung der Sojabohnen ist v.a. auf höhere N-Erträge (im Mittel aller Orte 242 bzw. 156 kg N ha⁻¹) und höhere N-Mengen der Ernterückstände (im Mittel aller Orte 77 bzw. 40 kg N ha⁻¹) zurückzuführen.
- Die N-Bilanz war auf beiden ökologisch bewirtschafteten Standorten sowohl bei Erbse und bei Soja mit -5 bis -153 kg ha⁻¹ negativ. Auf dem konventionell bewirtschafteten Standort wurden Werte zwischen -73 bis +98 kg ha⁻¹ für die Körnerleguminosen berechnet. Die N-Bilanz fiel in sechs der neun Umwelten zwischen Erbse und Soja vergleichbar aus. In den drei anderen Umwelten war die N-Bilanz von Soja zweimal niedriger und einmal höher als die der Erbsen.
- Der Kornertrag des Weizens nach Erbsen ohne Zwischenfrucht fiel durchschnittlich mit 49,3 dt ha⁻¹ um 4,6 bzw. 5,1 dt ha⁻¹ höher aus als nach Erbsen mit Zwischenfrucht bzw. Soja auf den beiden ökologisch bewirtschafteten Standorten. Statistisch signifikant war dies allerdings nur in je zwei von sechs Umwelten. Beim Rohproteingehalt wurden nach den Varianten mit Körnerleguminosen in fünf von sechs Umwelten keine Unterschiede festgestellt. Demnach ist die Vorfruchtwirkung von Erbse ohne Zwischenfrucht höher als nach Soja und Erbse mit nichtlegumer Zwischenfrucht einzuschätzen.
- Der Deckungsbeitrag von Sojabohnen lag in der Summe des betrachteten Fruchtfolgeausschnittes unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus mit

3.880 € ha⁻¹ um 1.155 € ha⁻¹ bzw. 895 € ha⁻¹ höher als nach Erbsen mit und ohne Zwischenfrucht. Dies ist auf die hohe Wirtschaftlichkeit von Soja zurückzuführen, welche auch den geringeren Deckungsbeitrag in der Nachfrucht Winterweizen mehr als ausgleichen konnte.

- Der Kornertrag und die Qualität des Weizens auf dem konventionell bewirtschafteten Standort unterschieden sich aufgrund der mineralischen N-Düngung nicht zwischen den geprüften Kulturarten. Durch die maximal geringen Unterschiede in der N-Düngung nach den verschiedenen Vorfrüchten lagen auch keine Unterschiede im Deckungsbeitrag vor. Bei Betrachtung des Fruchtfolgeausschnitts zeigt sich das Soja- Winterweizen in zwei der drei Jahren ökonomisch vergleichbar ist mit Körnermais – Winterweizen.

8.2. Reduzierte Bodenbearbeitung im konventionellen Anbau

Am Standort Stifterhof in Östringen (Baden-Württemberg, langjähriges Mittel 10,3 °C und 720 mm; sL wurde in den Jahren 2015 bis 2017 ein vierfach wiederholter Split-plot Anlage angelegt. Als Varianten wurde Strip-Till mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, Mulchsaat mit und ohne Einsatz eines Totalherbizides, sowie Direktsaat in Grünroggen mit Abfuhr mit und ohne Herbizide und Direktsaat in Grünroggen mit Walzung mit und ohne Herbizide angelegt. Die Vorfrucht war Winterweizen, die ausgesäte Sojabohnensorte war Sultana. Im Herbst vor der Aussaat der Sojabohnen wurden bei den Strip-Till und Mulchsaatvarianten Phacelia als Zwischenfrucht, bei den Direktsaatvarianten Grünroggen ausgesät. Bei den Varianten mit Totalherbizid wurde dieses wenige Wochen vor der Aussaat eingesetzt. In sämtlichen Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten erfolgte eine Voraufbauherbizidbehandlung. Die Mulchsaat- und Strip-Till-Varianten wurden zur ortsüblichen Zeit ausgesät. Die Abfuhr und die Walzung des Grünroggens fanden jeweils zur Vollblüte des Roggens statt. Nach der Abfuhr fand die Aussaat der Sojabohnen mit einer Direktsaatmaschine statt. Die gewalzten Varianten wurden in einem Schritt mit einer vorgebauten Messerwalze gewalzt und mit der Direktsaatmaschine eingesät. Bei allen Varianten wurde der Kornertrag erhoben sowie regelmäßig der Unkrautdeckungsgrad bonitiert. Bei dem Vergleich der Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung und unterschiedlicher Herbizidstrategien wurden die direkt- und arbeitskostenfreien

Leistungen anhand der Versuchsergebnisse berechnet. An drei weiteren Standorten (Eppingen, Riedlingen und Zaisenhausen) wurden in den Jahren 2016 und 2017 On-Farm-Versuche durchgeführt. Bei allen gab es mindestens die Varianten Mulchsaat mit und ohne Totalherbizid bei ansonsten üblichem Herbizideinsatz. Zusätzlich gab es an den Standorten Eppingen und Riedlingen eine Pflugvariante, am Standort Zaisenhausen eine Direktsaatvariante. An allen Standorten wurde der Kornertrag erhoben.

Es wurde eine Interviewstudie durchgeführt mit dem Ziel zu klären, welche Erfahrungen, Probleme und Problemlösungsansätze in der praktischen Landwirtschaft mit reduzierter Bodenbearbeitung im Sojaanbau gemacht wurden.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zwischen den beiden Bodenbearbeitungsverfahren Strip-Till und Mulchsaat wurden keine Ertragsunterschiede bei einem mittleren Ertrag vom 27 dt ha⁻¹ in den Versuchen beobachtet.
- In den On-Farm Versuchen konnte die Praxiseignung der konservierenden Bodenbearbeitung gezeigt werden. Nur in einer von vier Umwelten war der Pflug dem Mulchsaatsystem überlegen.
- Der Einsatz von Glyphosat als Totalherbizid führte weder in der Mulchsaat noch bei der Strip-Till Saat zu einem signifikant niedrigeren Unkrautdeckungsgrad noch zu einem signifikant höheren Ertrag.
- Die Erträge in beiden Direktsaatvarianten in Grünroggen waren mit durchschnittlich 14,4 dt ha⁻¹ deutlich niedriger wie die Erträge in den geprüften reduzierten Bodenbearbeitungsverfahren. Die Verfahren der Roggenbehandlung vor der Saat, Messerwalze oder Mahd, hatten keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag.
- In den Direktsaatvarianten in Grünroggen führte der Verzicht auf Voraufbauherbizide nur bei der Nutzung des Roggens zu einem signifikant höheren Unkrautdeckungsgrad. Zur Ernte war jedoch, unabhängig vom Einsatz der Voraufbauherbizide, der Unkrautdeckungsgrad im Jahr 2015 in den Direktsaatvarianten mit Nutzung mit 47 % höher als mit 1,4 % in den Varianten mit konservierender Bodenbearbeitung.
- Die direkten und arbeitskostenfreien Leistungen zeigen einen erheblichen wirtschaftlichen Nachteil der beiden geprüften Direktsaatverfahren (Roggen gewalzt: -647 € ha⁻¹ bis -47 € ha⁻¹, Roggen genutzt: -765 € ha⁻¹ bis 30 € ha⁻¹)

gegenüber den Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung Mulchsaat (-286 € ha⁻¹ bis 169 € ha⁻¹) und Strip-Till-Saat (-279 € ha⁻¹ bis 261 € ha⁻¹).

- In der Interviewstudie mit Landwirten und Beratern wurden drei zentrale Themenfelder im Sojaanbau mit reduzierter Bodenbearbeitung: Preisentwicklung und Wirtschaftlichkeit (in 83 % der Interviews), Stickstoffdüngung in Soja (in 42 % der Interviews) und der Komplex Fruchtfolgegestaltung im Sojaanbau mit den Unterthemen Unkrautbekämpfung (in 100 % der Interviews da deduktive Kategorie) und Vorfruchteffekte (in 58 % der Interviews) identifiziert. Die Analyse der Aussagen zu den Themen zeigt, dass in einigen Bereichen z. B. Unkrautbekämpfung mögliche Lösungen bekannt sind und in anderen Bereichen z. B. Stickstoffdüngung in Soja ein erheblicher Bedarf an Wissenstransfer zwischen Forschung, Beratung und Praxis besteht.

9. Referenzen

- Aigner, A. (2014). *Sojabohnen: Sorgfältige Impfung ein Muss. Sojaförderring*. Available at: https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2013/12/Impfversuche_Internet.pdf
- Alpmann, D. & Schäfer, B.C. (2014). *Der Wert von Körnerleguminosen im Betriebssystem*. 2. ed. Berlin: Union zur Förderung von Oel- u. Proteinpflanzen. (UFOP- Praxisinformationen)
- Arora, V.K., Singh, C.B., Sidhu, A.S. & Thind, S.S. (2011). Irrigation, tillage and mulching effects on soybean yield and water productivity in relation to soil texture. *Agricultural Water Management*, vol. 98 (4), pp. 563–568
- Asam, L., Wilbois, K.P., Spiegel, A.K., Balko, C., Becker, H., Berset, E., Butz, A.F., Haase, T., Habekuß, A. & Hahn, V. (2013). *Ausweitung des Sojaanbaus in Deutschland durch züchterische Anpassung sowie pflanzenbauliche und verarbeitungstechnische Optimierung*
- Bader, J. (2018). *Wirkung einer mineralischen Stickstoffdüngung auf den Ertrag und die Qualität von Sojabohnen*. (Masterarbeit). Universität Hohenheim.
- Bastidas, A.M., Setiyono, T.D., Dobermann, A., Cassman, K.G., Elmore, R.W., Graef, G.L. & Specht, J.E. (2008). Soybean Sowing Date: The Vegetative, Reproductive, and Agronomic Impacts. *Crop Sci*, vol. 48 (2), p. 727
- Bernstein, E.R., Posner, J.L., Stoltenberg, D.E. & Hedtcke, J.L. (2011). Organically Managed No-Tillage Rye–Soybean Systems: Agronomic, Economic, and Environmental Assessment. *Agronomy Journal*, vol. 103 (4), pp. 1169–1179
- Bernstein, E.R., Stoltenberg, D.E., Posner, J.L. & Hedtcke, J.L. (2014). Weed community dynamics and suppression in tilled and no-tillage transitional organic winter rye–soybean systems. *Weed science*, vol. 62 (1), pp. 125–137
- Bundy, L.G., Andraski, T.W. & Wolkowski, R.P. (1993). Nitrogen Credits in Soybean-Corn Crop Sequences on Three Soils. *Agronomy Journal*, vol. 85 (5), pp. 1061–1067
- Butz, A.F. (2018). Einfluss der Impfung von Sojabohnen mit kommerziellen Bradyrhizobien-Präparaten auf Ertrag und Eiweißgehalt. *Proceedings of 130. VFLUFA-Kongress*, Münster, 2018. pp. 197–200. Münster: VDLUFA-Verlag
- BVL (2019). *PSM- Datenblatt Anwendungen Clearfield-Clentiga*. Available at: <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/DatenBlatt.jsp?kennr=008002-00> [2019-10-03]
- Cafaro La Menza, N., Monzon, J.P., Specht, J.E. & Grassini, P. (2017). Is soybean yield limited by nitrogen supply? *Field Crops Research*, vol. 213, pp. 204–212
- Cociu, A. (2016). Long-term effects of tillage systems on winter wheat, maize and soybean grain yield and yield stability under rainfed conditions in the eastern Romanian Danube plain. *Romanian Agricultural Research*, vol. 33, pp. 97–109
- Cociu, A.I., Zaharia, G.V. & Constantin, N. (2010). Tillage system effects on water use and grain yield of winter wheat, maize and soybean in rotation. *Romanian Agricultural Research*, vol. 27, pp. 69–80
- Corre-Hellou, G., Fustec, J. & Crozat, Y. (2006). Interspecific Competition for Soil N and its Interaction with N₂ Fixation, Leaf Expansion and Crop Growth in Pea–Barley Intercrops. *Plant and Soil*, vol. 282 (1), pp. 195–208
- Davis, A.S. (2010). Cover-Crop Roller–Crimper Contributes to Weed Management in No-Till Soybean. *Weed Science*, vol. 58 (03), pp. 300–309
- Dill-Macky, R. & Jones, R.K. (2000). The effect of previous crop residues and tillage on Fusarium head blight of wheat. *Plant disease*, vol. 84 (1), pp. 71–76
- Eckert, H. (1997). Stoff- und Energiebilanzen im landwirtschaftlichen Betrieb. *Stoff- und Energiebilanzen in der Landwirtschaft*. (VDLUFA Kongressband; 46). Leipzig, pp. 65–70.
- Evans, J., Fettell, N.A., Coventry, D.R., O'Connor, G.E., Walscott, D.N., Mahoney, J. & Armstrong, E.L. (1991). Wheat response after temperate crop legumes in south-eastern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, vol. 42 (1), pp. 31–43
- Fabre, F. & Planchon, C. (2000). Nitrogen nutrition, yield and protein content in soybean. *Plant Science*, vol. 152 (1), pp. 51–58
- Forcella, F. (2013). Short-and full-season soybean in stale seedbeds versus rolled-crimped winter rye mulch. *Renewable agriculture and food systems*, vol. 29 (1), pp. 92–99
- Freyer, B., Pietsch, G., Hrbek, R. & Winter, S. (2005). *Futter-und Körnerleguminosen im biologischen Landbau*. Leopoldsdorf: Österreichischer Agrarverlag.
- Froschmeir, S., Reents, H.J., Jobst, F. & Urbatzka, P. (2017). Einsatz von Strohmulch zur Unkrautregulierung bei Sojabohnen. In: Wolfrum, S., Heuwinkel, H., Wiesinger, K., Reents, H.J., & Hülsbergen, K.-J. (eds.), Freising, March 2017. pp. 70–71. Freising: Verlag Dr. Köster, Berlin
- Gai, Z., Zhang, J. & Li, C. (2017). Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. *PLOS ONE*, vol. 12 (4)

- Gaspar, A.P., Laboski, C.A.M., Naeve, S.L. & Conley, S.P. (2017). Dry Matter and Nitrogen Uptake, Partitioning, and Removal across a Wide Range of Soybean Seed Yield Levels. *Crop Science*, vol. 57 (4), pp. 2170–2182
- Gehring, K., Festner, T., Gerhards, R., Hüsgen, K. & Thyssen, S. (2014). Chemische Unkrautregulierung beim Anbau von Sojabohnen (*Glycine Max*, L.). *Julius-Kühn-Archiv*, (443), p. 701
- Goss, M.J., de Varennes, A., Smith, P.S. & Ferguson, J.A. (2002). N₂ fixation by soybeans grown with different levels of mineral nitrogen, and the fertilizer replacement value for a following crop. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 82 (2), pp. 139–145
- Gunsolus, J.L. (1990). Mechanical and cultural weed control in corn and soybeans. *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. 5 (3), pp. 114–119
- Halwani, M., Reckling, M., Bloch, R. & Bachinger, J. (2019). Economic effects of rye as cover crop before soybean in zero-tillage cropping systems at the north-east of Germany. *Proceedings of Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Göttingen, 2019. pp. 99–100. Göttingen: Liddy Halm
- Harper, J.E. (1974). Soil and Symbiotic Nitrogen Requirements for Optimum Soybean Production. *Crop Science*, vol. 14 (2), p. 255
- Hauser, S. (1987). *Schätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge von Ackerbohnen (Vicia faba L.) mit erweiterten Differenzmethoden*. (Dissertation). Universität Göttingen.
- Hauser, S. (1992). Estimation of symbiotically fixed nitrogen using extended N difference methods. *Proceedings of - Proceedings of the fourth international conference of the African Association for Biological Nitrogen Fixation (AABNF)*, Cichster, 1992. pp. 309–321. Cichster: John Wiley and Sons
- Heitholt, J.J., Kee, D., Sloan, J.J., MacKown, C.T., Metz, S., Kee, A.L. & Sutton, R.L. (2007). Soil-applied nitrogen and composted manure effects on soybean hay quality and grain yield. *Journal of plant nutrition*, vol. 30 (10), pp. 1717–1726
- Herridge, D.F. & Brockwell, J. (1988). Contributions of fixed nitrogen and soil nitrate to the nitrogen economy of irrigated soybean. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 20 (5), pp. 711–717
- Hoover, R. & Beard, B. (1970). Effects of nitrogen on nodulation and yield of irrigated soybeans. *California Agriculture*, vol. 24 (6), pp. 10–11
- Hu, M. & Wiatrak, P. (2012). Effect of Planting Date on Soybean Growth, Yield, and Grain Quality: Review. *Agron. J.*, vol. 104 (3), p. 785
- Hungria, M., Franchini, J.C., Campo, R.J., Crispino, C.C., Moraes, J.Z., Sibaldelli, R.N.R., Mendes, I.C. & Arihara, J. (2006). Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 86 (4), pp. 927–939
- Hungria, M. & Mendes, I.C. (2015). Nitrogen Fixation with Soybean: The Perfect Symbiosis? *Biological nitrogen fixation*. Hoboken, NJ: Wiley Blackwell, pp. 1009–1023.
- Hussain, I., Olson, K.R. & Ebelhar, S.A. (1999). Impacts of tillage and no-till on production of maize and soybean on an eroded Illinois silt loam soil. *Soil and Tillage Research*, vol. 52 (1), pp. 37–49
- Imgraben, H. & Recknagel, J. (2014). *Anbauanleitung für Sojabohnen 2014*. RP Freiburg & LTZ Augustenberg.
- Imgraben, H. & Recknagel, J. (2019). *Anbauanleitung für Sojabohnen 2019*. Regierungspräsidium Freiburg. Available at: http://www.ltz-bw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Kulturpflanzen/Ackerbau/K%C3%B6rnerleguminosen/Sojabohne/Soja_Allgemein_conv_DL/Anbauanleitung_f%C3%BCr_Sojabohnen.pdf?attachment=true
- Imsande, J. (1998). Nitrogen deficit during soybean pod fill and increased plant biomass by vigorous N₂ fixation. *European Journal of Agronomy*, vol. 8 (1–2), pp. 1–11
- Janssen, W. (2009). Online irrigation service for fruit and vegetable crops at farmers site., 2009.
- Jenkinson, D.S., Fox, R.H. & Rayner, J.H. (1985). Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called ‘priming’ effect. *Journal of soil Science*, vol. 36 (3), pp. 425–444
- Jensen, E.S. (1987). Seasonal patterns of growth and nitrogen fixation in field-grown pea. *Plant and Soil*, vol. 101 (1), pp. 29–37
- Jensen, E.S. (1996). Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and soil*, vol. 182 (1), pp. 25–38
- Jobst, F., Demmel, M. & Urbatzka, P. (2014). Praxiserfahrungen im ökologischen Sojabohnenanbau in Bayern und Österreich-Ergebnisse einer Umfrage. *Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern*, pp. 124–127
- Jobst, F., Urbatzka, P. & Demmel, M. (2013). Ergebnisse einer Umfrage zur Anbautechnik im ökologischen Sojabohnenanbau in Bayern und Österreich., Bonn, 2013. pp. 118–121. Bonn
- Jost, B. (2003). *Untersuchungen und Kalkulationstabellen zur Schätzung der N₂-Fixierleistung und der N-Flächenbilanz beim Anbau von Lupinus albus und Lupinus luteus in Reinsaat und von Vicia faba*

- und *Pisum sativum* in Reinsaat und im Gemenge mit *Avena sativa*. (Dissertation). Universität Göttingen.
- Kapusta, G. (1979). Seedbed Tillage and Herbicide Influence on Soybean (*Glycine max*) Weed Control and Yield. *Weed Science*, vol. 27 (5), pp. 520–526
- Kaschuk, G., Nogueira, M.A., de Luca, M.J. & Hungria, M. (2016). Response of determinate and indeterminate soybean cultivars to basal and topdressing N fertilization compared to sole inoculation with *Bradyrhizobium*. *Field Crops Research*, vol. 195, pp. 21–27
- Kinugasa, T., Sato, T., Oikawa, S. & Hirose, T. (2012). Demand and supply of N in seed production of soybean (*Glycine max*) at different N fertilization levels after flowering. *Journal of plant research*, vol. 125 (2), pp. 275–281
- Kolbe, H., Karalus, W., Hänsel, M., Grünbeck, A., Gramm, M., Arp, B. & Krelling, B. (2002). *Körnerleguminosen im Ökologischen Landbau*. (Sächsisches Landesanstalt für Landwirtschaft, ed.). Dresden.
- Liebl, R., Simmons, F.W., Wax, L.M. & Stoller, E.W. (1992). Effect of Rye (*Secale cereale*) Mulch on Weed Control and Soil Moisture in Soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*, vol. 6 (4), pp. 838–846
- Liu, Y., Wu, L., Baddeley, J.A. & Watson, C.A. (2011). Models of biological nitrogen fixation of legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 31 (1), pp. 155–172
- Mayer, J. & Heß, J. (1997). Welchen Beitrag zur Stickstoffversorgung leisten Körnerleguminosen. *Ökologie & Landbau*, vol. 3, pp. 18–22
- Mazzoncini, M., Di Bene, C., Coli, A., Antichi, D., Petri, M. & Bonari, E. (2008). Rainfed wheat and soybean productivity in a long-term tillage experiment in central Italy. *Agronomy journal*, vol. 100 (5), pp. 1418–1429
- Mendes, I.C., Hungria, M. & Vargas, M. a. T. (2003). Soybean response to starter nitrogen and *Bradyrhizobium* inoculation on a Cerrado oxisol under no-tillage and conventional tillage systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 27 (1), pp. 81–87
- Mirsky, S.B., Curran, W.S., Mortensen, D.A., Ryan, M.R. & Shumway, D.L. (2009). Control of Cereal Rye with a Roller/Crimper as Influenced by Cover Crop Phenology. *Agronomy Journal*, vol. 101 (6), pp. 1589–1596
- Möller, K. & Reents, H.J. (1999). Einfluß verschiedener Zwischenfrüchte nach Körnererbsen auf die Nitratgehalte im Boden und das Wachstum der Folgefrucht (Kartoffeln, Weizen). *Proceedings of 5. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, Berlin, 1999. pp. 109–112. Berlin: Dr. Köster,
- Mourtzinis, S., Kaur, G., Orłowski, J.M., Shapiro, C.A., Lee, C.D., Wortmann, C., Holshouser, D., Nafziger, E.D., Kandel, H. & Niekamp, J. (2018). Soybean response to nitrogen application across the United States: A synthesis-analysis. *Field Crops Research*, vol. 215, pp. 74–82
- Nouri, A., Lee, J., Yin, X., D Tyler, D., Jagadamma, S. & Arelli, P. (2018). Soil Physical Properties and Soybean Yield as Influenced by Long-Term Tillage Systems and Cover Cropping in the Midsouth USA. *Sustainability*, vol. 10 (12), p. 4696
- Oberson, A., Nanzer, S., Bosshard, C., Dubois, D., Mäder, P. & Frossard, E. (2007). Symbiotic N 2 fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by 15 N dilution and 15 N natural abundance. *Plant and Soil*, vol. 290 (1–2), pp. 69–83
- Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, vol. 144 (1), pp. 31–43
- Osborne, S.L. & Riedell, W.E. (2006). Starter nitrogen fertilizer impact on soybean yield and quality in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, vol. 98 (6), pp. 1569–1574
- Paffrath, A. (2003). Versuche zum viehlosen ökologischen Landbau. *25 Jahre Ökologischer Obst-, Gemüse-und Ackerbau im Gartenbauzentrum Köln-Auweiler: Praxisnahe Forschung für Erzeuger und Verbraucher*. Landwirtschaftskammer Rheinland, Fachbereich Ökolandbau, pp. 30–40.
- Peoples, M.B., Herridge, D.F. & Ladha, J.K. (1995). Biological nitrogen fixation: An efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? In: Ladha, J.K. & Peoples, M.B. (eds.) *Management of biological nitrogen fixation for the development of more productive and sustainable agricultural systems*. (Symposium on Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture; 15). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 3–28.
- Pittelkow, C.M., Linnquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T. & van Kessel, C. (2015). When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, vol. 183, pp. 156–168
- Purcell, L.C. & King, C.A. (1996). Drought and nitrogen source effects on nitrogen nutrition, seed growth, and yield in soybean. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 19 (6), pp. 969–993
- Purcell, L.C., Serraj, R., Sinclair, T.R. & De, A. (2004). Soybean N₂ Fixation Estimates, Ureide Concentration, and Yield Responses to Drought. *Crop Science*, vol. 44 (2), pp. 484–492
- Ray, J.D., Heatherly, L.G. & Fritsch, F.B. (2006). Influence of Large Amounts of Nitrogen on Nonirrigated and Irrigated Soybean. *Crop Science*, vol. 46 (1), p. 52

- Reckling, M., Bachinger, J. & Bellingrath-Kimura, S.D. (2017). Potenziale des Sojabohnenanbaus in Nord-Ostdeutschland: Einfluss von Beregnung und Sojasorte auf Ertrag, N₂-Fixierung und Vorfruchtwirkung. *Tagungsband zur Soja-Tagung 2017, 06.–07.12. 2017, Rastatt, Deutschland*, pp. 56–57
- Recknagel, J. (2019). *Statistik – Sojaförderring. Deutscher Sojaförderring*. Available at: <https://www.sojafoerderring.de/links-mehr/statistik/> [2019-10-06]
- von Richthofen, J.-S. (2005). Kostengünstig und umweltschonend - Körnerleguminosen rechnen sich - innerhalb der Fruchtfolge. *Neue Landwirtschaft*, vol. 8, pp. 28–32
- Ryan, M.R., Mirsky, S.B., Mortensen, D.A., Teasdale, J.R. & Curran, W.S. (2011). Potential synergistic effects of cereal rye biomass and soybean planting density on weed suppression. *Weed science*, vol. 59 (2), pp. 238–246
- Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A. & Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, vol. 108 (1), pp. 1–13
- Santachiara, G., Borrás, L., Salvagiotti, F., Gerde, J.A. & Rotundo, J.L. (2017). Relative importance of biological nitrogen fixation and mineral uptake in high yielding soybean cultivars. *Plant and Soil*, vol. 418 (1–2), pp. 191–203
- SchALVO (2001). *Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr über Schutzbestimmungen und die Gewährung von Ausgleichsleistungen in Wasser- und Quellenschutzgebieten. SchALVO*. Available at: <http://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&docid=jlr-WasSchAusglVBW2001rahmen&psml=bsbawueprod.psml&max=true>
- Schätzl, R., Stockinger, B., Reisenweber, J., Schägger, M. & Frank, J. (2019). *Sojabohnen - LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten*. Available at: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/sojabohne.html> [2019-10-06]
- Schmitt, M.A., Lamb, J.A., Randall, G.W., Orf, J.H. & Rehm, G.W. (2001). In-season fertilizer nitrogen applications for soybean in Minnesota. *Agronomy Journal*, vol. 93 (5), pp. 983–988
- Schulte, M. & Theuvsen, L. (2015). Der ökonomische Nutzen von Herbiziden im Ackerbau unter besonderer Berücksichtigung des Wirkstoffs Glyphosat. *Journal für Kulturpflanzen*, vol. 67 (8), pp. 269–279
- Schweiger, P., Hofer, M., Hartl, W., Wanek, W. & Vollmann, J. (2012). N₂ fixation by organically grown soybean in Central Europe: Method of quantification and agronomic effects. *European Journal of Agronomy*, vol. 41, pp. 11–17
- Senaratne, R. & Hardarson, G. (1988). Estimation of residual N effect of faba bean and pea on two succeeding cereals using 15 N methodology. *Plant and Soil*, vol. 110 (1), pp. 81–89
- Serraj, R., Sinclair, T.R. & Purcell, L.C. (1999). Symbiotic N₂ fixation response to drought. *Journal of Experimental Botany*, vol. 50 (331), pp. 143–155
- Sinclair, T.R. & De Wit, C.T. (1976). Analysis of the Carbon and Nitrogen Limitations to Soybean Yield 1. *Agronomy Journal*, vol. 68 (2), pp. 319–324
- Smith, A.N., Reberg-Horton, S.C., Place, G.T., Meijer, A.D., Arellano, C. & Mueller, J.P. (2011). Rolled rye mulch for weed suppression in organic no-tillage soybeans. *Weed Science*, vol. 59 (2), pp. 224–231
- Spolti, P., Shah, D.A., Fernandes, J.M.C., Bergstrom, G.C. & Del Ponte, E.M. (2015). Disease risk, spatial patterns, and incidence-severity relationships of Fusarium head blight in no-till spring wheat following maize or soybean. *Plant disease*, vol. 99 (10), pp. 1360–1366
- Stülpnagel, R. (1982). Schätzung der von Ackerbohnen symbiontisch fixierten Stickstoffmenge im Feldversuch mit der erweiterten Differenzmethode. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, vol. 151, p. 446.458
- The European GMO database *The European GMO database*. [Datenbank]. Available at: <http://www.euginius.eu> [2019-09-23]
- Thilakarathna, M.S. & Raizada, M.N. (2017). A meta-analysis of the effectiveness of diverse rhizobia inoculants on soybean traits under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 105, pp. 177–196
- Thomsen, I.K., Kjellerup, V. & Christensen, B.T. (2001). Leaching and plant offtake of N in field pea/cereal cropping sequences with incorporation of 15N-labelled pea harvest residues. *Soil use and management*, vol. 17 (4), pp. 209–216
- Urbatzka, P. (2010). *Anbauwürdigkeit von Wintererbsen-ein Vergleich zu Sommererbsen in Rein-und Gemengesaat unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus*. (PhD Thesis). Universität Kassel.
- Urbatzka, P., Grass, R., Haase, T., Schüler, C. & Heß, J. (2009). Fate of legume-derived nitrogen in monocultures and mixtures with cereals. *Agriculture, ecosystems & environment*, vol. 132 (1–2), pp. 116–125

- Urbatzka, P. & Heiles, E. (2015). Vergleich der Gesamtleistung von Erbse und Gerste in Rein- und Gemengesaat. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, vol. 27, pp. 1991–192
- Urbatzka, P., Jobst, F., Demmel, M. & Froschmeir, S. (2017). Mulchsaat mit und ohne Saatbettbereitung von Sojabohnen im ökologischen Landbau. *Landwirtschaft ohne Pflug*, (Sonderheft Ökologischer Landbau ohne Pflug), pp. 36–42
- Urbatzka, P., Jobst, F. & Kimmelmann, S. (2019). Leistungsfähigkeit von Sojabohnen in Abhängigkeit der Saatzeit. In: Mühlrath, D., Albrecht, J., Finckh, M.R., Hamm, U., Heß, J., Knierim, U., & Möller, D. (eds.) *Proceedings of Beiträge zur 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel*, Berlin, March 5 2019. Berlin: Verlag Dr. Köster
- Van Acker, R.C., Swanton, C.J. & Weise, S.F. (1993). The critical period of weed control in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Weed Science*, vol. 41 (2), pp. 194–200
- Vivian, R., Reis, A., Kálnay, P.A., Vargas, L., Ferreira, A.C.C. & Mariani, F. (2013). Weed Management in Soybean — Issues and Practices. In: El-Shemy, H.E. (ed.) *Soybean - Pest Resistance*. IntechOpen,
- Wächter, K., Gruber, S. & Claupein, W. (2013). Unterscheidet sich das Inokulationsergebnis verschiedener Impfmittel bei Soja. *Journal für Kulturpflanzen*, vol. 65, pp. 401–410
- Wagner-Riddle, C., Gillespie, T.J. & Swanton, C.J. (1994). Rye cover crop management impact on soil water content, soil temperature and soybean growth. *Canadian journal of plant science*, vol. 74 (3), pp. 485–495
- Weber, J.F., Kunz, C. & Gerhards, R. (2016). Chemical and mechanical weed control in soybean (*Glycine max*). *Julius-Kühn-Archiv*, (452), p. 171 (27. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung)
- Weber, J.F., Kunz, C., Peteinatos, G.G., Zikeli, S. & Gerhards, R. (2017). Weed Control Using Conventional Tillage, Reduced Tillage, No-Tillage, and Cover Crops in Organic Soybean. *Agriculture*, vol. 7 (5), p. 43
- Weiber, N., Tschigg, S., Schätzl, R., Wolf, L., Gain, A., Pfeiffer, T., Miersch, M. & Mayus, M. (2018). *Modellhaftes Demonstrationsnetzwerk zur Ausweitung und Verbesserung des Anbaus und der Verwertung von Sojabohnen in Deutschland*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, D-Freising; Landesvereinigung für den Ökologischen Landbau in Bayern e.V., D-München; Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, D-Karlsruhe und Taifun-Tofu GmbH, D-Freiburg. Available at: <http://orgprints.org/35051/> [2019-10-01]
- Wesley, T.L., Lamond, R.E., Martin, V.L. & Duncan, S.R. (1998). Effects of late-season nitrogen fertilizer on irrigated soybean yield and composition. *Journal of Production Agriculture*, vol. 11 (3), pp. 331–336
- Wichern, F., Mayer, J., Joergensen, R.G. & Müller, T. (2007). Rhizodeposition of C and N in peas and oats after 13C–15N double labelling under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 39 (10), pp. 2527–2537
- Wichmann, S. (2003). *Ertragsleistung, Futterqualitätsentwicklung, N₂-Fixierung und Vorfruchtwirkung von verschiedenen Körnerleguminosenarten in Reinsaat und im Gemenge mit Getreide*. (Dissertation). Christian-Albrecht-Universität.
- Wilkins, E.D. & Bellinder, R.R. (1996). Mow-kill Regulation of Winter Cereals for Spring No-till Crop Production. *Weed Technology*, vol. 10 (2), pp. 247–252
- Wood, C.W., Torbert, H.A. & Weaver, D.B. (1993). Nitrogen Fertilizer Effects on Soybean Growth, Yield, and Seed Composition. *Journal of Production Agriculture*, vol. 6 (3), pp. 354–360
- Yin, X. & Al-Kaisi, M.M. (2004). Periodic response of soybean yields and economic returns to long-term no-tillage. *Agronomy Journal*, vol. 96 (3), pp. 723–733
- Zhang, H., Prithviraj, B., Charles, T.C., Driscoll, B.T. & Smith, D.L. (2003). Low temperature tolerant *Bradyrhizobium japonicum* strains allowing improved nodulation and nitrogen fixation of soybean in a short season (cool spring) area. *European Journal of Agronomy*, vol. 19 (2), pp. 205–213
- Zimmer, S., Haase, T., Stoll, E., Heidt, H. & Hess, J. (2015). Korn- und Proteinerträge verschiedener Körnerleguminosenarten in Reinsaat und im Gemengeanbau sowie deren Vorfruchtwirkung auf Winterweizen., Eberswalde, 2015. pp. 190–193. Eberswalde

10. Veröffentlichungen

Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt, bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse.

Im Projekt wurde ein Kurzfilm „Soja-Aussaat in pfluglosen Bodenbearbeitungssystemen“ von Tobias Pabel & Benedikt Paeßens, LTZ Augustenberg 2018 erstellt.

Tabelle 21: wissenschaftliche Publikationen und Fachartikel

| Nummer | Datum | Veröffentlichungsorgan | Titel |
|--------|---------|---|---|
| 1 | 09.2016 | Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 28: 218-219 | Effekte von reduzierter Bodenbearbeitung und unterschiedlicher Herbizidstrategien auf Verunkrautung und Erträge im Sojaanbau |
| 2 | 11.2016 | Landinfo 5: 8-9 | Projektvorstellung „Optimierung des Anbaus von Sojabohnen – Bestimmung des Vorfruchtwertes und der N ₂ -Fixierungsleistung sowie Reduzierung der Bodenbearbeitung“ |
| 3 | 11.2016 | Tagungsband Kongress „Hülsenfrüchte – Wegweiser für eine nachhaltigere Landwirtschaft“: 20-22 | Optimierung des Anbaus von Sojabohnen – Bestimmung des Vorfruchtwertes und der N ₂ -Fixierungsleistung sowie Reduzierung der Bodenbearbeitung – Erste Ergebnisse |

| Nummer | Datum | Veröffentlichungsorgan | Titel |
|--------|---------|--|---|
| 4 | 01.2017 | AgroJournal | Projektvorstellung „Optimierung des Anbaus von Sojabohnen – Bestimmung des Vorfruchtwertes und der N ₂ -Fixierungsleistung sowie Reduzierung der Bodenbearbeitung“ |
| 5 | 03.2017 | Beiträge der 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau | N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen im ökologischen Anbau |
| 6 | 05.2017 | LTZ-Report | Projektvorstellung „Optimierung des Anbaus von Sojabohnen – Bestimmung des Vorfruchtwertes und der N ₂ -Fixierungsleistung sowie Reduzierung der Bodenbearbeitung“ (Akronym: FixVorSaat Soja) |
| 7 | 09.2017 | Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 29:116-117 | Schätzung der N ₂ -Fixierungsleistung in Süddeutschland |
| 8 | 09.2017 | Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 29: 223-224 | Auswirkungen von reduzierter Bodenbearbeitung und von unterschiedlichen Herbizidstrategien auf den Kornertrag und die Verunkrautung bei Sojabohnen |
| 9 | 09.2017 | Tagungsband der Sojatagung 2017: 20-21 | N ₂ -Fixierungsleistung und Vorfruchtwert von Soja |
| 10 | 07.2018 | Der Pflanzenarzt 6-7: 22-23 | N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen |
| 11 | 09.2018 | Tagungsband Öko-Landbautag Bayern 2018: 45-48 | Schätzung der N ₂ -Fixierungsleistung von Erbsen und Sojabohnen in Süddeutschland |

| Nummer | Datum | Veröffentlichungsorgan | Titel |
|--------|---------|--|---|
| 12 | 09.2018 | VDLUFA-Schriftenreihe 75: 193-196 | Reduzierte Bodenbearbeitung und unterschiedliche Herbizidstrategien bei Sojabohnen |
| 13 | 09.2018 | VDLUFA-Schriftenreihe 75: 180-184 | Schätzung der N ₂ -Fixierungsleistung von Sojabohnen und Erbsen in Süddeutschland |
| 14 | 03.2019 | Tagungsband der 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 2019 | Vergleich der N ₂ -Fixierungsleistung, der N-Bilanz und der N-Menge in den Ernteresiduen von Sojabohnen und Erbsen |
| 15 | 09.2019 | Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 31:89-90 | Vergleich der Vorfruchtwirkung von Soja, Körnererbsen und nichtlegumenen Vorfrüchten auf Ertrag und Qualität von Winterweizen im ökologischen Landbau |

Tabelle 22 Presseberichte

| Nummer | Datum | Zeitschrift | Titel |
|--------|------------|------------------------------|---|
| 1 | 29.09.2015 | Badische Neueste Nachrichten | Lautes Getrommel für die Sojabohne |
| 2 | 14.07.2016 | BW agrar | Eiweiß für umme |
| 3 | 19.08.2016 | Agrarzeitung | Lupine und Soja gedeihen gut |
| 4 | 22.11.2016 | Badische Neueste Nachrichten | Imageschub für Sojabohne |
| 5 | 24.08.2017 | Badische Neueste Nachrichten | Soja-Landwirte sind sauer über EU-Beschluss |
| 6 | 12.12.2017 | Top agrar, Südplus | Was ist regionaler Soja wert? |
| 7 | 16.12.2017 | BW agrar | Das Problem mit den Pflanzenschutzmitteln |
| 8 | 16.12.2017 | Badische Bauernzeitung | Wie geht Sojaanbau ohne Pflanzenschutz? |

| | | | |
|---|------------|------------------------|---------------------------------------|
| 9 | 16.12.2017 | Badische Bauernzeitung | Soja wird viel Potenzial zugesprochen |
|---|------------|------------------------|---------------------------------------|

Tabelle 23: Veranstaltungen mit Beteiligung des Projektes FixVorSaat Soja

| Nummer | Datum | Teilnehmer | Veranstaltung |
|--------|---------------------|------------|--|
| 1 | 28.06.2016 | Ca. 55 | Feldtag Betrieb Buck, Riedlingen |
| 2 | 01.07.2016 | Ca. 180 | Öko-Feldtag der LfL, Hohenkammer |
| 3 | 03.07.2016 | Ca. 3000 | Tag der Offenen Tür, LTZ, Rheinstetten |
| 4 | 07.07.2016 | Ca. 10 | Führung InspektorInnenanwärterInnen, LTZ, Rheinstetten |
| 5 | 08.07.2016 | Ca. 35 | Interne Vorträge LTZ, Führung, Rheinstetten |
| 6 | 13.07.2016 | Ca. 30 | Führung Abteilung 2 LTZ, Rheinstetten |
| 7 | 17.08.2016 | Ca. 40 | Feldtag und Felderbegehung, Betriebe Heitlinger und Pfeil, Eppingen und Zaisenhausen |
| 8 | 21.03.2017 | Ca. 30 | Vortrag, Beraterschulung des Sojanetzwerkes, Rheinstetten |
| 9 | 13.06.2017 | Ca. 10 | Felderbegehung, LTZ, Rheinstetten |
| 10 | 06.07.2017 | Ca. 55 | Feldtag, Betrieb Buck, Riedlingen |
| 11 | 27.07.2017 | Ca. 20 | Felderbegehung Abt. 1, LTZ, Forchheim am Kaiserstuhl |
| 12 | 21.08.2017 | Ca. 90 | Feldtag, Betrieb Heitlinger mit KRZ, Eppingen |
| 13 | 12.10.2017 | Ca. 20 | Vortrag, LfL Arbeitskreis Leguminosen, Freising |
| 14 | 06. – 07.12.2017 | Ca. 140 | Sojatagung 2017 mit Vortrag, Rastatt |
| 15 | 16.01.2018 | Ca. 30 | Vorlesung Conservation Biology, Universität Hohenheim, Rheinstetten |
| 16 | 28.02.2018 | Ca. 15 | Vortrag, Infoabend Soja, Landratsämter Calw, Böblingen in Gäufelden |
| 17 | 29.06.2018 | Ca. 200 | Öko-Feldtag der LfL, Hohenkammer |
| 18 | 02.08.2018 | Ca. 22 | Vortrag, Feldtag des Sojanetzwerkes in Buggingen |
| 19 | 29.08.2018 | Ca. 39 | Vortrag, Sojalehrfahrt des Sojanetzwerkes nach Rheinstetten |
| 20 | 28.11.2019 | Ca. 20 | Vortrag, Fachgespräch Ökolandbau, Karlsruhe |
| 21 | 06.12.2018 | Ca. 40 | Vortrag, Beraterschulung des Sojanetzwerkes, |

| Nummer | Datum | Teilnehmer | Veranstaltung |
|--------|------------|------------|---|
| | | | Rheinstetten |
| 22 | 23.01.2019 | Ca. 150 | Vortrag, Naturland-Ackerbautagung Süd, Erdweg |
| 23 | 25.2.2019 | Ca. 80 | Vortrag, Naturland-Ackerbautagung Nord-West, Freckenhorst |
| 24 | 17.10.2019 | Ca. 20 | Vortrag, LfL Arbeitskreis Leguminosen, Freising |

Tabelle 24 Tagungs- und Konferenzteilnahmen

| Nummer | Datum | Tagung/Konferenz | Beitrag | Teilnahme |
|--------|------------------|--|-----------------------|------------------|
| 1 | 26. – 27.11.2015 | Sojatagung 2015 des Rahmen des bundesweiten Sojanetzwerkes in Freising | Poster und Vortrag | Benedikt Paeßens |
| 2 | 29. – 30.10.2016 | Workshop „Creating value-added chains: Non genetically modified (GMO-free) soya in the Danube region“ in Ulm | Poster | Benedikt Paeßens |
| 3 | 27. – 29.09.2016 | Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften in in Gießen | Poster | Andreas Butz |
| 4 | 03. – 04.11.2016 | Kongress „Hülsenfrüchte – Wegweiser für eine nachhaltigere Landwirtschaft in Berlin | Vortrag | Benedikt Paeßens |
| 5 | 7, - 10.03.2018 | 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau in Freising | Poster | Benedikt Paeßens |
| 6 | 26. – 28.09.2017 | Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften in Witzenhausen | Poster und Vortrag | Benedikt Paeßens |
| 7 | 06. – 07.12.2017 | Sojatagung 2017 in Rastatt | Vortrag, Organisation | Benedikt Paeßens |
| 8 | 21.08.2018 | Tagung Sojaanbau in Grenzlagen, Fischbach | Vortrag | Benedikt Paeßens |
| 9 | 18. – 21.09.2018 | 130. VDLUFA-Kongress in Münster | Vortrag und Poster | Benedikt Paeßens |

| Nummer | Datum | Tagung/Konferenz | Beitrag | Teilnahme |
|---------------|------------------|--|----------------|------------------|
| 10 | 23. – 24.11.2018 | Sojatagung 2018 in Würzburg | Poster (2) | Benedikt Paeßens |
| 11 | 05.- 08.03.2019 | Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau in Kassel | Vortrag | Andreas Butz |
| 12 | 10. – 12.09.2019 | Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften in Berlin | Vortrag | Andreas Butz |