

Einfluss von Anbauverfahren und Umweltfaktoren auf Ertrag, Qualität und agronomische Eigenschaften von Soja (*Glycine max* L. Merrill)

**Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften
(Dr. sc. agr.)**

**Fakultät Agrarwissenschaften
Universität Hohenheim**

Institut für Kulturpflanzenwissenschaften

vorgelegt von

*Olena Sobko
aus Sumy (Ukraine)*

Januar 2021

Diese Arbeit wurde am 27. Januar 2021 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juni 2021

Prüfungskommission:

1. Gutachter: apl. Prof. Dr. Sabine Gruber
 2. Gutachter: Prof. Dr. Sonoko Dorothea Bellingrath-Kimura
 3. Gutachter: Prof. Dr. Torsten Müller
- Leiter: Prof. Dr. Stefan Böttinger

„Ex nihilo nihil fit.“

„Von nichts kommt nichts.“

Lukrez

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Sojaanbau in Deutschland	1
1.2 Einfluss von Umwelt, Saatverfahren und Saatstärke auf die Sojaproduktion	3
1.2.1 Auswirkung der Umwelt auf die Sojaproduktion.....	3
1.2.2 Neue Kultur-keine optimierte Anbautechnik.....	5
1.3 Zielsetzung und Versuchsfragen	7
1.4 Inhalt der Arbeit.....	8
2 Publikationen.....	9
3 Seed yield, seed protein, oil content, agronomic characteristics of soybean (<i>Glycine max</i> L. Merrill) depending on different seeding systems and cultivars in Germany	11
4 Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (<i>Glycine max</i> L. Merrill).....	23
5 Environmental effects on soybean (<i>Glycine Max</i> (L.) Merr) production in Central and South Germany	31
6 Generaldiskussion	45
6.1 Versuchsübersicht.....	45
6.2 Kornertrag	46
6.3 Qualitätsinhaltsstoffe Protein und Öl	50
6.4 Agronomische Eigenschaften.....	53
6.5 Quintessenz und Perspektiven.....	56
7 Zusammenfassung.....	59
8 Summary.....	61

9	Literaturverzeichnis	63
	Danksagung	83
	Eidesstattliche Versicherung über die eigenständig erbrachte Leistung	85
	Curriculum vitae.....	86

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht der Posterpräsentationen.....	10
Tabelle 2: Versuchsansätze sowie Versuchsjahre und Standorte mit untersuchtem Material und Versuchsfragen aus den Kapiteln 3, 4 und 5.....	45
Tabelle 3: Eignung von Reifegruppen bei Soja für Produktionsziele an unterschiedlichen Standorten in Deutschland	58

1 EINLEITUNG

1.1 Sojaanbau in Deutschland

Soja (*Glycine max* L. Merrill) ist weltweit die wichtigste Hülsenfrucht und stammt ursprünglich aus China (Qiu und Chang 2010). Die **größten Anbauländer** von Soja sind die USA, Brasilien und Argentinien mit 95 Mio. ha von insgesamt 123 Mio. ha globaler Anbaufläche von Soja. Diese drei Staaten produzierten im Jahr 2019 ca. 300 Mio. t Soja, was 83 % der Weltproduktion entspricht (FAOSTAT 2019). In der Europäischen Union wird Soja auf fast 1 Mio. ha angebaut und es können 2,6 Mio. t produziert werden, wobei der Bedarf von 40 Mio. t damit nicht gedeckt wird (Bickert 2020).

Soja ist eine **vielseitig nutzbare** Kulturart. Sie kann als Lebensmittel, Futtermittel und Biokraftstoff eingesetzt werden (Likhochvor et al. 2004). Die Körner beinhalten 35-50 % Rohprotein, 13-26 % Rohfett sowie 20-32 % Kohlenhydrate (Kumar et al. 2010). Sojaprotein ist in der Human- und Tierernährung sehr wertvoll, weil es reich an essentiellen Aminosäuren ist (Schaafsma 2005). Sojaöl hat ein beinahe ideales Verhältnis von Linolsäure (Omega 6; ca. 53 %) und Linolensäure (Omega 3; ca. 8 %) von 5:1 für den menschlichen Organismus (Chan et al. 1993; Guebre-Egziabher et al. 2008). Weitere Komponenten im Sojakorn wie Isoflavone und Lecithin werden in der Lebensmittelproduktion sowie in der Medizin eingesetzt (Setchell und Cassidy 1999; Betz et al. 2005). Nachteilig sind bei Soja antinutritive Inhaltsstoffe, wie Protease und Urease, die die Verdauungsprozesse stark negativ beeinflussen (Gopalan et al. 1989). Deswegen sollten diese vor dem Verzehr oder der Verfütterung thermisch, hydrothermisch oder druckthermisch deaktiviert werden (Likhochvor et al. 2004; Chauhan und Chauhan 2007). Im Schnitt der letzten Jahre deckte Soja bis zu 70 % des Schrot- und 25 % des Pflanzenölverbrauchs der ganzen Welt (FAO 2020). Sojaschrot, eigentlich ein Nebenprodukt bei der Ölgewinnung, wird nach einer Aufbereitung zum wertvollen Futtermittel mit 45-50 % Eiweißgehalt (Hahn und Miedaner 2013).

Beim Anbau auf landwirtschaftlichen Flächen stellt Soja ein sehr **wertvolles Fruchtfolgeglied** dar, da sie ein starkes Wurzelwerk hat, das den oberen Bodenhorizont intensiv lockern kann und die Bodenbelüftung fördert (Rochester et al. 2001; Bhattacharyya et al. 2008). Als Leguminose kann sie durch Symbiose mit Knöllchenbakterien (*Bradyrhizobium japonicum*) Stickstoff aus der Luft fixieren und sich bis zu 60 % selbst damit versorgen (Atkins 1982; Herridge et al. 2008; Salvagiotti et al. 2008). Nach der Ernte verbleiben die Wurzeln zusammen mit Blättern und Stängeln auf dem Feld. Diese Ernterückstände tragen zur biologischen Bodenaktivität bei und erlauben die Einsparung von Stickstoffdünger bei den Folgekulturen (Okogun et al. 2007; Oberson et al. 2007; Sharma und Behera 2009; Hammelehle et al. 2013).

Die ersten Anbauversuche von Soja in Deutschland liegen in den 1870er Jahren. Damals wurde nach Möglichkeiten gesucht, das bestehende Defizit an Eiweiß in der Ernährung zu decken (Hahn und Miedaner 2013). Es ging jedoch nicht über Versuche hinaus und der Sojaanbau konnte bis vor einigen Jahren nicht fest in Deutschland etabliert werden. Seit 2012 stiegen die Anbauflächen in Deutschland stets. Dieser Trend startete mit 5000 ha im Jahr 2012, und 2020 wurden knapp 33.000 ha mit Soja in Deutschland bestellt (Transparenz Gentechnik 2020a).

Soja ist ein Schlüsselfaktor bei der Fleisch- und Milchproduktion in der EU, denn ihr Anteil beläuft sich auf ca. 40 % aller Eiweißfuttermittel; dabei wird sie zu 95 % aus Nord- und Südamerika eingeführt (Colsell et al. 2019). Im Jahr 2019 wurden knapp 6,1 Mio. t Sojaschrot in Deutschland verfüttert, der zu 97 % aus gentechnisch veränderter (GVO) Soja bestand (Bickert 2020). Die Verbraucher in Deutschland gehen zunehmend bewusster bei der Auswahl der Lebensmittel vor. Heutzutage legen immer mehr Menschen Wert auf die Rückverfolgbarkeit von Produkten (OVID 2020). Ein wachsender Anteil der Verbraucher wünscht möglichst klimaneutral produzierte Lebensmittel, das heißt Einsparen von CO₂ durch minimalen Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutz- und Düngemitteln, kurze Transportwege und Vermeidung der Rodung von Regenwald (BLE 2020). Es zeichnet sich eine klar steigende Nachfrage nach GVO-freie Soja aus Europa und beziehungsweise aus Deutschland ab (Meyer und Schröpfer 2018).

Soja wird nicht nur für Ölgewinnung und das Nebenprodukt Sojaschrot angebaut, sondern ca. 6 % der Weltproduktion fließen auch in die Herstellung von Sojadrinks, Sojasauce und Tofu (FAOSTAT 2019). In Deutschland sind das derzeit etwa 10 % der inländischen Ernte (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft 2020). In den letzten Jahren lässt sich in Deutschland der Trend beobachten, dass sich immer mehr Menschen vegetarisch oder sogar vegan ernähren (Projektgruppe Ökolandbau 2018). Die Verbraucher wollen einen Beitrag zur eigenen Gesundheit, zum Tierwohl und zum Klimaschutz leisten und entscheiden sich deswegen für pflanzliches Eiweiß. Sehr oft wird dieses aus Soja gewonnen, unter anderem weil Sojaprodukte in einigen Ländern traditionell erzeugt und verzehrt werden, sodass Methoden zur Verarbeitung von Soja etabliert sind (Horan 1974; Muredzi 2013). Speziell dieser Personenkreis legt Wert auf Regionalität und GVO-Freiheit. Somit ergibt sich ein wachsender Markt, der mit deutscher Soja bedient werden könnte, auch, weil in Deutschland GVO-Sojasorten nicht für den Anbau zugelassen sind.

Von allen süd- und nordamerikanischen Sojalieferanten kann nur Brasilien tatsächlich GVO-freie Soja anbieten (Transparenz Gentechnik 2018). 2018 waren es 5,5 Mio. t, was ca. 5 % der brasilianischen Produktion entspricht (Bickert 2020; FAOSTAT 2020). Im gleichen Jahr wurden in der EU 2,85 Mio. t GVO-freie Soja erzeugt, von der Deutschland nur 0,09 Mio. t importiert hat (Transparenz Gentechnik 2020b). Aus Osteuropa (Ukraine und Russland) kann man keine große Menge an GVO-freier Soja beziehen, da trotz eines Anbauverbots dort der Großteil der Produktion aus GVO Soja stammt (Transparenz Gentechnik 2020b).

Nur 0,09 Mio. t GVO-freie Ware hat die Ukraine an Deutschland 2018 geliefert (Transparenz Gentechnik 2020b), und ca. 0,06 Mio. t hat Deutschland selbst produziert (STATISTA 2020). In Summe konnten die deutschen Landwirte und Lebensmittelproduzenten nun über ca. 1,9 Mio. t GVO-freie Soja verfügen, bei einem Gesamtverbrauch von über 6 Mio. t (Transparenz Gentechnik 2018; Bickert 2020). Das heißt, der **Bedarf an GVO-freier Soja ist groß** und könnte nachhaltig mit heimischem Anbau von GVO-freier Soja gedeckt werden, um die Importabhängigkeit zu mindern und um eine leichtere Rückverfolgung von Sojapartien zu ermöglichen.

Der züchterische Fortschritt bei Sojasorten für Deutschland sowie die im Zuge des Klimawandels stattfindende Verlängerung der Vegetationszeit ermöglichen eine Expansion der Anbaufläche auch in den norddeutschen Regionen (Hahn und Miedaner 2013; Colsell et al. 2019). Somit ist eine gut ausgearbeitete Anbautechnik dieser Kultur mit optimierten Produktionssystemen unverzichtbar. Da Soja in Deutschland keine langjährige Anbaugeschichte hat, sind nur begrenzt Erfahrungswerte in diesem Bereich vorhanden, und es besteht hoher Bedarf an wissenschaftlich fundierten Daten zur Anbautechnik.

1.2 Einfluss von Umwelt, Saatverfahren und Saatstärke auf die Sojaproduktion

1.2.1 Auswirkung der Umwelt auf die Sojaproduktion

Das Ertragspotenzial der Soja ist definiert durch die Kombination von genetischen Eigenschaften und Umweltbedingungen sowie deren gegenseitigen Interaktionen (Corassa et al. 2018). Der Faktor Umwelt ist in dieser Reihe derjenige, der sich am wenigsten vorhersagen oder beeinflussen lässt. Die **Umweltbedingungen** werden generell durch Klima und im Einzelnen durch das aktuelle Wetter bestimmt.

Ursprünglich ist Soja eine Kurztagpflanze und kommt aus Südostasien mit überwiegend subtropischem Klima und mit relativ hohen Temperaturen während der Vegetationsperiode (Hahn und Miedaner 2013). Der Züchtungsfortschritt hat es jedoch ermöglicht, nahezu **tagesneutrale Sorten** zu schaffen (Kurasch et al. 2017a; Aggarwal et al. 2014). Soja hat einen hohen Wärmebedarf, ähnlich wie Körnermais, und lässt sich daher in den südlichen, wärmeren Teilen Deutschlands anbauen (Leithold et al. 2003). Der Klimawandel und die damit steigenden Temperaturen in Mitteleuropa bieten darüber hinaus Möglichkeiten, die Sojaanbauflächen auch auf weiter nördlich gelegene, kühlere Gebiete auszuweiten (Hahn und Miedaner 2013; Sojafoerderung 2019; Chanprasert 1988). Bei der Anpassung von Soja an neue Umwelten in höheren nördlichen Breitengraden sind die schnelle Blüte und zeitige Abreife von großer Bedeutung (Kurasch et al. 2017a). Diese beiden Merkmale werden von mehreren Genen und ihren bestimmten Mutationen gleichzeitig kontrolliert (Jia et al. 2014).

Die Entwicklungsstadien von Soja werden international meistens nach der in den USA entwickelten Klassifizierung beschrieben und in die vegetative Entwicklung (VE-Auflauf, V1-erstes Laubblattpaar am ersten Nodium entfaltet, V2-zweites Laubblattpaar usw.) und reproduktive Entwicklung (R1-Blühbeginn, R2-Vollblüte bis zu R8-Vollreife) aufgeteilt (Fehr et al. 1971). Der Beginn der reproduktiven Entwicklung wird grundsätzlich zu einem durch den Breitengrad (über die Photoperiode) und zu anderem über die Temperatur bestimmt (Boerma und Specht 2004); bei annähernd tagesneutralen Sorten ist die Photoperiode jedoch nicht relevant. Daher werden Sojasorten in Reifegruppen eingeteilt. Da in Europa kein einheitliches Klassifizierungssystem vorhanden ist, wird die amerikanische Einstufung verwendet, die auf der Temperatursumme CHU (**Crop Heat-Units**) basiert (Berschneider 2016; Bachteler 2017a). Die täglichen CHU werden durch die Bildung des Mittelwertes aus Tagesminimum von nicht unter 4,4 °C und Tagesmaximum von 10-30 °C der Lufttemperatur berechnet. Dann wird eine Summe der täglichen CHU für die frostfreie Periode gebildet. Die CHU wurde, ebenso wie die ReifeEinstufung, anhand nordamerikanischer Anbaubedingungen ausgearbeitet und ist daher nur bedingt auf mitteleuropäische Regionen übertragbar (Roßberg und Recknagel 2017). In den USA sind 13 Reifegruppen definiert, von sehr frühen 000, etwas späteren 00, dann 0 und I, II usw. bis zu sehr späten Reifegruppe X (Bachteler 2017a). Der Unterschied in der Abreife von zwei aufeinander folgenden Reifegruppen kann bis zu 12-14 Tage betragen (Berschneider 2016). In Deutschland werden nur Sojasorten aus Reifegruppen 000 (CHU $\leq$ 2400) bis 0 (CHU 2550-2800) und teilweise I (CHU 2800-3000) angebaut (Berschneider 2016). So bietet die Züchtung derzeit ein Sortiment von frühreifenden bis sehr frühreifenden Sorten und erlaubt, zum Beispiel Sorten der Reifegruppe 000 in ursprünglich wenig geeigneten Regionen Deutschlands anzubauen.

Ein wichtiger Einflussfaktor für den Sojaanbau ist die Intensität der **Sonneneinstrahlung** (Wells 1991; Board und Kahlon 2011; Caron et al. 2018). Am empfindlichsten auf schwache Sonneneinstrahlung reagiert Soja zur Blüte und Kornfüllung (R1-R6) (Fehr et al. 1971; Board und Harville 1993). Die Ausnutzung der Einstrahlung hängt unter anderem vom Blattflächenindex (LAI-Leaf Area Index) ab. Ein hoher LAI-Wert kann grundsätzlich zu intensiver Photosynthese und erhöhter Produktivität beitragen (Jeffers und Shibles 1969). Mit zunehmender Bestandesdichte und der damit verbundenen Beschattung geht die Nutzung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR; Photosynthetically Active Radiation) zurück (Duncan 1986; Purcell et al. 2002). Der LAI variiert stark je nach Reihenabstand und Bestandesdichte (Board und Kahlon 2011; Board 2000).

Der **Wasserbedarf** von Soja ist generell niedrig im Vergleich mit anderen Sommerungen wie Mais (Yu et al. 2004). Der Wasserverbrauch von Soja variiert je nach Pflanzenentwicklung und Witterungsbedingungen und liegt zwischen 2,5 mm und 5 mm pro Tag während des vegetativen Wachstums (V2-V6), und zwischen 5 mm und 8 mm pro Tag während der Blüte und Kornfüllung (R1-R6) (Fehr et al. 1971; Bachteler 2017b). Am sensibelsten auf Wassermangel

reagiert Soja zur Vollblüte und Hülsenbildung (R2-R4 (Fehr et al. 1971; Ku et al. 2013). Sogar eine kurze Stressphase (ca. 3 Tage) ist für spürbare Ertragseinbußen ausreichend, weil die Dauer der Kornfüllungsphase durch das Abwerfen von Blättern verkürzt wird (Brevedan und Egli 2003).

Außer CHU, Tageslänge, Strahlungsintensität und Wasserstress ist Kältestress zur Blüte (Ende Juni bis Ende Juli) in Deutschland ein kritischer Punkt. Ein einwöchiger Abfall der Nachttemperaturen unter 10 °C kann bis zu 24 % Ertragsminderung durch das Abwerfen der Blüten, frisch gebildeter Hülsen und durch die Reduktion der Korngröße mit sich bringen (Baker et al. 1989; Board und Kahlon 2011).

Suboptimale Umweltbedingungen können die Inhaltsstoffe von Soja qualitativ und quantitativ beeinflussen. In Wisconsin und in Minnesota (USA) führen hohe Temperaturen während des reproduktiven Wachstums tendenziell zu einem höheren Ölgehalt (Mourtzinis et al. 2017). Der Einfluss der Temperatur auf den Proteingehalt ist jedoch nicht eindeutig. Es gibt Hinweise darauf, dass bei höheren Temperaturen (>20 °C bis <28 °C) während der Wachstumsperiode der Proteingehalt im Sojakorn steigt (Vollmann et al. 2000), aber es wurde auch über eine negative Korrelation zwischen Temperatur und Proteingehalt berichtet (Maestri et al. 1998). Eine ähnliche Uneindeutigkeit wurde bei der Auswirkung des Niederschlages auf den Protein- und Ölgehalt von Soja beobachtet: Es bestand eine positive Korrelation zwischen Niederschlag während der Vegetationsperiode und dem Ölgehalt, aber eine negative zwischen Niederschlag und Proteingehalt (Kumar et al. 2006; Carrera et al. 2011). Auch über eine negative Korrelation beider Merkmale mit dem Niederschlag wurde berichtet (Maestri et al. 1998).

1.2.2 Neue Kultur-keine optimierte Anbautechnik

Im Gegensatz zu den nicht planbaren Umweltbedingungen kann die **Anbautechnik** zielgerecht eingesetzt und modifiziert werden. Mit optimaler Saatstärke, Aussaatzeit und Saatverfahren ist in der Regel eine gezielte Einflussnahme möglich, um einen optimalen Bestand zu etablieren und die Grundlage für einen hohen Ertrag zu schaffen (Wilbois et al. 2014).

Der Standraum der Pflanzen im Bestand bestimmt die Verfügbarkeit von Licht, Wasser und Nährstoffen für jede Einzelpflanze und somit die Entwicklung der Biomasse, die sich später in Ertrag und Qualität widerspiegelt (Procópio et al. 2013). Zunächst ist die **Saatstärke** eine entscheidende Größe für die Etablierung eines Pflanzenbestandes und somit für den Ertrag (Board 2000). Je nach Anbauregion werden unterschiedliche Bestandesdichten empfohlen. Diese liegen normalerweise zwischen 30 und 60 Kö m⁻² in den größten Sojaanbauländern (Rahman et al. 2011a). In Nord- und Südamerika liegt das Optimum bei 30-50 Kö m⁻², in Indien 40-60 Kö m⁻² und in Russland 40-70 Kö m⁻² (Rahman et al. 2011a; Vaulin 2013). Das Sojasaatgut ist in Deutschland teuer und nimmt mit bis zu 30 % den größten Posten an den Produktionskosten ein (Unsleber et al. 2018). Es besteht daher die Notwendigkeit

herauszuarbeiten, welche Saatstärke an Standorten in Deutschland einen hohen Ertrag bei gleichzeitig sehr guten Qualitätsmerkmalen garantiert. Mit zunehmender Saatstärke nimmt die Anzahl der Seitentriebe und Hülsen pro Pflanze ab (Mehmet 2008), aber die Lagerneigung sowie die Höhe der untersten Hülse eher zu (Boquet 1990; Epler und Staggenborg 2008). Niedrige Ansätze der untersten Hülsen können auf Grund von Druschverlusten zu Ertragseinbußen von bis zu 25 % führen (Yilmaz 2003). Dieses Merkmal kann durch die Anbaumaßnahmen nur zum Teil beeinflusst werden und ist daher auch eine der Züchtungsaufgaben (Hahn und Miedaner 2013). Die Frage, wie genau sich die Saatstärke auf die Pflanzenlänge von Soja auswirkt, ist noch offen. Einige Ergebnisse deuten auf Zusammenhänge von Pflanzenlänge und Saatstärke hin (Rahman et al. 2011a; Souza et al. 2016), andere Studien zeigten keinen Einfluss (Moreira et al. 2015). Die Sojasorten aus verschiedenen Reifegruppen können unterschiedlich auf eine Variation der Saatstärke reagieren. Die früher reifenden Sorten mit tendenziell geringem Verzweigungsgrad benötigen höhere Saatstärken, um eine höhere Leistung zu bringen im Vergleich zu den spätreifenden Sorten, die mehr Seitentriebe ausbilden können (Agudamu und Shiraiwa 2016; Ribeiro et al. 2017).

Die deutschen Sojaanbauer sind an der Ertragsleistung und den Möglichkeiten interessiert, den Protein- und Ölgehalt zu erhöhen (Sojafoederring 2019). Diese Gehalte sind prinzipiell genetisch bestimmt, doch haben Umweltfaktoren ebenfalls einen gewissen Einfluss (Popovic et al. 2012). Studien aus Iran und Bangladesch zeigten einen Anstieg des Proteingehalts und eine Abnahme des Ölgehaltes mit zunehmender Saatstärke (Boroomandan et al. 2009; Rahman et al. 2011b). Eine negative Korrelation zwischen Protein- und Ölgehalt bei Soja ist grundsätzlich bekannt (Vollmann et al. 2000; Luca et al. 2014; Novikova et al. 2018; Flajsman et al. 2019).

Ein weiteres wichtiges Element der Anbautechnik bei Soja ist das **Saatverfahren**. Ein Saatverfahren wird primär durch den Reihenabstand und die Aussaatmethode beschrieben, die aufgrund der technischen Möglichkeiten zusammenwirken. Ein Saatverfahren soll bestmögliche Auflaufbedingungen schaffen, um die optimale vegetative Entwicklung der Sojapflanzen und damit ihre hohe Produktivität in Quantität (Kornertrag) und Qualität (Protein- und Ölgehalt beziehungsweise -ertrag) zu gewährleisten (Hamid et al. 2002; Bellaloui et al. 2015; Fadeeva et al. 2018). Eine klare Empfehlung bezüglich des Saatverfahrens in Deutschland liegt noch nicht vor. Die Verfügbarkeit der Aussaatgeräte auf einem landwirtschaftlichen Betrieb spielt dabei eine wichtige Rolle (Popp et al. 2000). Laut einer Umfrage verwenden fast 60 % aller Sojaanbauer in Deutschland eine Drillmaschine zur Aussaat von Soja und fast 40 % Einzelkornsäugeräte, weil diese Technik auf den Betrieben bereits verfügbar ist (Jobst et al. 2013). Die Einzelkornsaat bietet eine präzise Platzierung der Samen in der Reihe, was einen homogenen Feldaufgang und damit einen gleichmäßigen Bestand fördert (Plösch 2019). Sie ermöglicht gleichzeitig die Saatstärke gegenüber der Drillsaat um bis zu 15 % zu reduzieren (von Beesten 2016).

Die Einzelkornsämaschine hat jedoch technische Schwierigkeiten, die höheren Aussaatmengen (ab ca. 65 Kö m⁻²), die für sehr frühreifende 000 Sorten empfohlen sind, auszubringen (von Beesten 2016). Drillmaschinen hingegen ermöglichen hohe Saatstärken, haben einen großen Saatguttank, sind robust und mit variablen Reihenabständen vielseitig einsetzbar (Houk 2009). Nachteilig ist, dass Drillsämaschinen nicht ohne Weiteres eine exakte Tiefenführung der Kornablage erreichen, was somit zu heterogenem Pflanzenaufgang und -entwicklung führen könnte (von Beesten 2016).

Zahlreiche Studien aus Nord- und Südamerika mit Soja ab Reifegruppe III aufwärts deuten darauf hin, dass Reihenabstände zwischen 19 und 38 cm am besten geeignet sind und im Vergleich zu größeren Reihenabständen (etwa 70 cm) höhere Kornerträge gewährleisten (Bruin und Pedersen 2008; Orłowski et al. 2012). Die Frage nach der effektivsten Aussaatmethode für frühreife Soja (Reifegruppen 00 und 000) bleibt unbeantwortet. Es sind keine wissenschaftlichen Studien bekannt, die den Einfluss des Aussaatystems auf den Protein- und Ölgehalt von Soja explizit untersucht haben. Ein orthogonaler Vergleich von fünf Anbausystemen in den USA (Arkansas) ergab keine signifikanten Unterschiede im Ertrag (Popp et al. 2000). Im Gegensatz zu diesen Daten wurden bei der Aussaat mit pneumatischer Einzelkornsaat höhere Kornerträge gemeldet (Iowa, USA; (Colvin und Erbach 1982). In Argentinien wird die Einzelkornsaat bevorzugt, weil die homogene Verteilung der Körner in der Reihe einen angemessenen Feldaufgang und damit die optimale Nutzung der Ressourcen Licht, Wasser und Nährstoffversorgung für jede Sojapflanze erleichtert (Souza et al. 2004).

1.3 Zielsetzung und Versuchsfragen

Infolge des Klimawandels und des züchterischen Fortschrittes können Pflanzen mit hohen Temperaturansprüchen wie Soja vermehrt in Deutschland angebaut werden. Es wird trotzdem in Deutschland Regionen mit eher kühl-feuchten oder warm-trockenen Bedingungen geben und somit sind unterschiedlich ausgerichtete Anbauverfahren und Produktionsziele mit entsprechend angepassten Sorten notwendig. In Deutschland wird Soja für Tierfütterung und für die Lebensmittelherstellung genutzt. Die Nachfrage nach heimischer, GVO-freier Soja für die Tierfütterung und die menschliche Ernährung steigt und kann derzeit noch nicht gedeckt werden. Da der Anbau von Soja in Deutschland in größerem Umfang noch nicht etabliert ist, fehlen Informationen zur Produktionstechnik wie Saatstärke und Saatverfahren (Einzelkornsaat, Drillsaat). Um die Sojaproduktion gezielt ausrichten zu können, sind Informationen erforderlich, welchen Einfluss Umweltbedingungen in den verschiedenen Anbauregionen Deutschlands auf die Produktivität von Sojasorten verschiedener Reifegruppen haben.

Ziel der Arbeit ist, Effekte von Saatverfahren, Saatstärke und Umwelt auf die Produktivität von Soja zu beschreiben, um geeignete Empfehlungen für den Anbau ableiten zu können.

Die vorliegende Arbeit geht daher folgenden Versuchsfragen nach:

- *Welchen Einfluss nimmt das **Saatverfahren** auf Kornertrag, Protein- und Ölgehalt sowie auf folgende agronomische Eigenschaften: Pflanzenlänge, Lager, die Höhe des untersten Hülsenansatzes und Knöllchenbildung der Soja?*
- *Wie beeinflussen verschiedene **Saatstärken** Kornertrag und Ertragsstruktur, Qualität und agronomische Eigenschaften wie LAI, Lager und die Höhe des untersten Hülsenansatzes von Soja?*
- *Welche Wirkungen haben ausgewählte **Umweltfaktoren** auf den Kornertrag, den Proteingehalt und den Ölgehalt von Soja?*

1.4 Inhalt der Arbeit

Um den Einstieg in das umfangreiche Thema zu schaffen, wird in **Kapitel 1** (Abschnitte 1.1. und 1.2) eine Literaturübersicht mit den Angaben zu Hintergründen und Wissensdefiziten formuliert. Daraus folgt im Abschnitt 1.3 die Zielsetzung mit den Versuchsfragen. Im Abschnitt 1.4 sind die Bausteine der vorliegenden Arbeit aufgeführt. Um die obigen Versuchsfragen zu beantworten, wurden mehrjährige und mehrortige Feldversuche durchgeführt und ausgewertet. Die gewonnenen Ergebnisse sind in drei peer-reviewed **Artikeln** in internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften **alle bereits veröffentlicht**.

Die inhaltlichen Einführungen der Publikationen werden in **Kapitel 2** dargestellt. In den **Kapiteln 3, 4 und 5** sind die Artikel wiedergegeben, die sich mit der bestehenden Problematik auseinandersetzen. In **Kapitel 6** wird über die gewonnenen Ergebnisse über alle Veröffentlichungen hinsichtlich der Zielsetzung diskutiert. Hier werden auch die ausgearbeiteten Schlussfolgerungen zu einzelnen Fragestellungen und die Perspektiven präsentiert. Die **Kapitel 7 und 8** liefern die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit in deutscher und in englischer Sprache. Zum Schluss im Literaturverzeichnis (**Kapitel 9**) sind alle Literaturquellen aufgelistet, die in den Publikationen aus den Kapiteln 3-5 und in der Dissertation verwendet wurden. Die komplette Arbeit endet mit einer Danksagung, einer eidesstattlichen Versicherung über die eigenständig erbrachte Leistung und dem Curriculum Vitae.

2 PUBLIKATIONEN

Diese Dissertation basiert auf drei Publikationen, die in den folgenden Kapiteln 3 bis 5 dargestellt sind.

Kapitel 3 mit dem Titel **“Seed yield, seed protein, oil content, and agronomic characteristics of soybean (*Glycine max* L. Merrill) depending on different seeding systems and cultivars in Germany”** hat produktionstechnischen Charakter und bietet die Ergebnisse aus einem zweifaktoriellen Feldversuch auf zwei Standorten über zwei Jahre. In einer Spaltanlage wurden die Saatverfahren Drillsaat und Einzelkornsaat mit vier Sorten aus verschiedenen Reifegruppen (00 und 000) getestet, um zu prüfen, wie sich beide Faktoren oder deren Interaktion auf wichtige Kenngrößen beim Sojaanbau wie Kornertrag und Ertragsstruktur, Qualität, Pflanzenlänge, Höhe des untersten Hülsenansatzes, Lager und Knöllchenanzahl auswirken. Der Sojabestand sah bei Einzelkornsaat optisch gleichmäßiger als bei Drillsaat aus. Das Ergebnis zeigte, dass die geprüften Saatverfahren keinen signifikanten Einfluss auf die oben genannten Merkmale hatten. Der Sojaproduzent kann das Saatverfahren wählen, das am besten in die Betriebsstruktur passt und wirtschaftlich ist, ohne eine Investition in eine neue Sämaschine tätigen zu müssen.

Der Artikel wurde am 15. Juli 2020 bei Agronomy Journal MDPI veröffentlicht und kann so zitiert werden: Sobko, O.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S. (2020). Seed yield, seed protein, oil content, and agronomic characteristics of soybean (*Glycine max* L. Merrill) depending on different seeding systems and cultivars in Germany. In: Agronomy 10 (7), 1020. DOI:10.3390/agronomy10071020.

Die produktionstechnische Thematik wird im **Kapitel 4** mit dem Titel **“Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill)”** fortgesetzt. Dafür wurden die gleichen Sorten wie in Kapitel 3 mit vier Saatstärken (30, 50, 70 und 90 Kö m⁻²) als vollrandomisierte Blockanlage angebaut. Das Ziel war, eine optimale Saatstärke für den Anbau von Soja in Deutschland herauszuarbeiten. Geprüft wurde der Zusammenhang zwischen Saatstärke und Kornertrag, Protein- und Ölgehalt, LAI, Lagerneigung, Pflanzenlänge, Höhe sowie Knöllchenzahl. Der höchste Kornertrag wurde bei 90 Kö m⁻² erreicht, wobei die Kornerträge bei 50 und 70 Kö m⁻² fast gleich waren. Die Saatstärke beeinflusste die Qualitätsmerkmale nicht. Die Höhe des untersten Hülsenansatzes nahm mit zunehmender Saatstärke zu und die Anzahl der Hülsen sowie Seitentriebe pro Pflanze ab. Für ressourcenschonenden Sojaanbau in Deutschland wären Saatstärken von 50 bis 70 Kö m⁻² empfehlenswert.

Der Artikel ist am 4. Dezember 2019 im Plant, Soil and Environment erschienen und kann wie folgt zitiert werden: Sobko, O.; Hartung, J.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S. (2019): Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine*

max L. Merrill). In: Plant, Soil and Environment 65 (12), S. 594-601. DOI: 10.17221/346/2019-PSE.

In **Kapitel 5** mit dem Titel **“Environmental effects on soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) production in Central and South Germany”** wurden die Ergebnisse aus zweijährigen Feldversuchen mit 13 Sojasorten aus den Reifegruppen 00 und 000 auf vier Standorten im Jahr 2016 und fünf Standorten im Jahr 2017 präsentiert. Es wurde ausführlich untersucht, wie die Produktivität sowie der Protein- und Ölgehalt von Soja in Deutschland von Sonneneinstrahlung, Temperatur und Niederschlag beeinflusst wird. Im Mittel beider Versuchsjahre haben die sehr frühen Sorten (Reifegruppe 000) stärker mit den geprüften Umweltfaktoren korreliert als die früheren Sorten (Reifegruppe 00). Der Faktor „Sorte“ bestimmte sehr stark den Protein- und Ölgehalt, aber nicht den Kornertrag. Erhöhte Sonneneinstrahlung und Niederschlag führten tendenziell zu höheren Kornerträgen, aber die höheren Temperaturen zur Abreife mindern diese eher. Keiner der getesteten Umweltfaktoren führte zu statistisch abgesicherter Erhöhung des Protein- und Ölgehaltes der Soja. Protein- und Ölertrag pro Fläche ließen sich anhand dieser Ergebnisse am ehesten über eine Steigerung des Kornertrags erzielen.

Der Artikel wurde am 24. November 2020 bei Agronomy Journal MDPI online publiziert und kann folgendermaßen zitiert werden: Sobko, O.; Stahl, A.; Hahn, V.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S. (2020): Environmental effects on soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) production in Central and South Germany. In: Agronomy 10 (12), 1847. DOI: 10.3390/agronomy10121847.

Die Zwischenergebnisse der Versuche wurden in drei Posterpräsentationen veröffentlicht (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Posterpräsentationen

Sobko, O.; Gruber, S.; Zikeli, S.; Claupein, W. (2017): Einfluss der Aussaatstärke auf Ertrag, Qualität und agronomische Eigenschaften konventionell angebauter Soja (*Glycine max*. L. Merrill). Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften; Bd. 29; 60. Jahrestagung vom 26. bis 28. September in Witzenhausen “Anforderungen an den Pflanzenbau in einer sich urbanisierenden Welt”, S. 229-230.

Sobko, O.; Röhl, C.; Zikeli, S.; Gruber, S.; Claupein W. (2018): Einfluss des Saatverfahrens auf Ertrag, Qualität und agronomische Eigenschaften konventionell angebauter Soja verschiedener Reifegruppen (*Glycine max*. L. Merrill). Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften; Bd. 30; 61. Jahrestagung vom 25. bis 27. September in Kiel “From Big Data to Smart Farming”, S. 201-202.

Sobko, O.; Zikeli, S.; Claupein W.; Gruber, S. (2019): Umwelteinflüsse auf die Sojaproduktion in Deutschland. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften; Bd. 31; 62. Jahrestagung vom 10. bis 12. September in Berlin “Landscape Matters- Agrarlandschaften der Zukunft”, S. 240-241.

3 SEED YIELD, SEED PROTEIN, OIL CONTENT, AND AGRONOMIC CHARACTERISTICS OF SOYBEAN (*GLYCINE MAX* L. MERRILL) DEPENDING ON DIFFERENT SEEDING SYSTEMS AND CULTIVARS IN GERMANY



Article

Seed Yield, Seed Protein, Oil Content, and Agronomic Characteristics of Soybean (*Glycine max* L. Merrill) Depending on Different Seeding Systems and Cultivars in Germany

Olena Sobko ^{1,*}, Sabine Zikeli ², Wilhelm Claupein ¹ and Sabine Gruber ¹

¹ Institute of Crop Science, University of Hohenheim, Erwinstr. 23, 70599 Stuttgart, Germany; Wilhelm.Claupein@uni-hohenheim.de (W.C.); Sabine.Gruber@uni-hohenheim.de (S.G.)

² Center for Organic Farming, University of Hohenheim, Erwinstr. 14, 70599 Stuttgart, Germany; sabine.zikeli@uni-hohenheim.de

* Correspondence: olena.sobko@uni-hohenheim.de; Tel.: +49-8761-729-55913

Received: 17 June 2020; Accepted: 9 July 2020; Published: 15 July 2020



Abstract: Soybean (*Glycine max* L. Merrill) is one of the most important crops worldwide. In several European countries such as Germany, soybean cultivation is not traditional and as such remains to be optimized. One option to increase soybean production is to adapt and improve the seeding system. To investigate the effects of different seeding systems on seed yield, seed protein, and oil content, plant characteristics were assessed using a two-factorial (two seeding systems and four cultivars) field trial over two years (2017–2018) at two locations in southeast Germany. The seeding systems were drill (row spacing 14 cm) and precision seeding (row spacing 28 cm), and the cultivars were Viola 000, Lissabon 000, LS Mentor 00, and Orion 00. Depending on the seeding system, a seed yield of 3.8 t ha⁻¹ dry matter (DM), 40.9% protein content (DM), and 18.8% oil content (DM) was achieved by drilling, and 3.6 t ha⁻¹ yield (DM), 40.1% protein content (DM), and 19.1% oil content (DM) with precision seeding (average across four cultivars, two locations, and two years). No significant effects of the seeding system on all seed and plant characteristics were observed. As drilling and precision seeding did not affect the seed yield, seed protein, oil contents, and plant characteristics of soybean in this study, farmers are able to choose the seeding system which fits best into their farms and is economically most viable.

Keywords: soybean; seed yield; drill seeding; precision seeding; seed ingredients

1. Introduction

Soybean (*Glycine max* L. Merrill) is considered a globally strategic crop because it has become the main supplier of plant oil and protein [1]. Soybean grains contain 30–45% high quality protein with essential amino acids and 15–22% oil with a favorable proportion of linoleic to linolenic acid of 6–7 [2]. The global area cultivated with soybeans in 2017 was 123.6 million ha, providing 352.6 million t of grain at an average yield of 2.8 t ha⁻¹ [3]. Domestic demand for soybean for food and feed is driving an increase in its acreage in Germany [4]. The German soybean area was 19,000 ha in 2017, with an average yield of 3.2 t ha⁻¹ DM and total production of 61,000 t. The increase in soybean growing area in Germany is being driven, at least in part, by climate change: more areas of the country are becoming suitable for crops, such as soybean, that are adapted to warm regions. Successful plant breeding in recent years has supported the increase in soybean production [5].

Domestic soybean production can be further increased by expanding its growing area and by increasing the yield per area through optimized agricultural practices. Important parameters that cannot be modified are precipitation, temperature, and solar radiation [6]. Optimizing soybean cultivation technology, including breeding, is therefore an option for increasing and stabilizing yields. Seeding density, seeding time and seeding methods are important for crop establishment and provide the foundation for a high yield [4,7]. A seeding system is defined by the key factors of row spacing and seeding method: these are inseparable due to their technical interactions [2], as the type and availability of seeding equipment defines them [8]. The choice of seeding system must also take into account region, soil properties, weeds, pests, seeding time, characteristics of the crop, and its use [9] in addition to economic considerations. The choice of seeding system is intended to achieve optimal emergence conditions in order to guarantee optimal vegetative development of the soybean plants and thus their high productivity in quantity (seed yield) and in quality (protein and oil content/yield) [10].

Precision seeding provides for the precise placement of seeds in depth and distance from each other. There is the same space between the grains and plants in a row, in contrast to drill seeding, thus enabling homogeneous emergence and plant stand [11]. As homogeneous plant density and spacing affects the choice of phenotype and projected yield of soybean [7,12], sowing density can be reduced by 10–15% [13]. Precision seeders are known for technical problems when planting at higher sowing rates (approx. 70 seeds m^{-2}), but this high crop density is recommended for early maturing (000) cultivars [13]. For the other maturity groups, low sowing densities are conceivable, up to 30 seeds m^{-2} [14]. Drill seeders, on the other hand, enable high sowing densities, have large seed tanks [13], and are robust and multi-purpose with the capacity for variable row spacing [15]. As a disadvantage, drill seeders do not easily achieve exact depth control by grain placement, and thus can result in heterogeneous plant emergence and development [13].

Worldwide, soybean cultivars are divided into 13 maturity groups ranging from 000 (very early) to X (tropical). In Germany, mainly 00 and 000 cultivars are cultivated [16]. Numerous studies from North and South America with soybean from maturity groups III upward indicate that row spacings between 19 and 38 cm are most suitable for these cultivars and ensure higher seed yields compared to wider row spacings (around 70 cm) [17–23]. The most effective seeding system for early maturity soybean (maturity group 00 and 000) remains a question [12]. Wider row spacing (up to 70 cm) tends to lead to significantly higher protein levels compared to row spacing of 40, 50, and 60 cm, but medium row spacing (50 cm) seems to result in higher oil content [24]. No scientific studies are known to have explicitly examined the influence of seeding system on protein and oil content of soybean. A multi-site comparison of five seeding methods (broadcast, drill, air seeder, planter and no-till drill) in the USA (Arkansas) did not detect significant differences in yield [8]. In contrast to these studies, higher seed yields were reported from drilling compared to air seeding (USA; Iowa) [25]. In Argentina, precision seeding is preferred because the homogeneous distribution of grains in the row facilitates appropriate plant emergence and thus optimal access of each soybean plant to the resources light, water, and nutrient supply [18]. A clear recommendation concerning the optimal seeding system in Germany has not yet been determined. Higher seed yields (+13%) were achieved by drill seeding with row spacing of 13.6 cm compared to precision seeding with row spacing of 50 cm in Bavaria (average over three cultivars and three sowing densities) [26]. According to one survey, almost 60% of all soybean farmers in Germany use drill seeders to sow soybeans and almost 40% use precision seeding systems when this technique is already available on the farms [27]. Soybean growers in Germany could benefit from experimental results of sowing methods for their region in order to base their choice of sowing method on yield data.

The aim of this study was to determine how seed yield, seed composition (protein, oil content), and plant characteristics of soybeans are influenced by two different seeding systems in field trials at two locations and with different cultivars. The results may help to sow soybeans in the most appropriate way for homogeneous crop emergence and rapid development during the critical juvenile

growth stages and thus provide all the requirements for optimal crop development. This could provide the basis of a higher seed yield and the growth of German soybean production.

2. Materials and Methods

2.1. Location and Weather Conditions

The trials were performed at two locations of Saaten Union GmbH research station in 2017 and 2018. The locations were Grünseiboldsdorf (GSD, 48°29' N 11°54' E, altitude of 440 m) and Landshut (LA, 48°34' N 12°9' E, altitude of 398 m) in East Bavaria Germany. They are located at the border of the maritime climate of Western Europe and the continental climate of Eastern Europe in Zone 5, according to the global agroecological zones (FAO, 2019). Weather conditions during the trials were obtained from the agrometeorological station of the German weather service located closest to the trials (Freising; Ergolding and Buerg; Figure 1) [28].

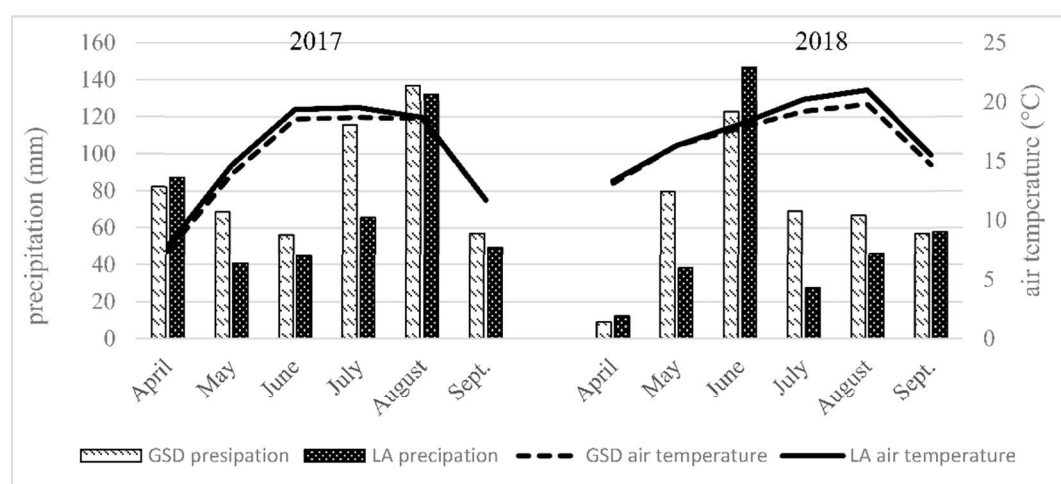


Figure 1. Precipitation (monthly accumulated) and air temperature (monthly averages) during the experimental periods 2017 and 2018 at two locations (GSD = Grünseiboldsdorf and LA = Landshut) in Bavaria, southeast Germany.

Details of cultivation and soil are presented in Table 1. The trial was set up in a split plot design with four replicates at each location. The first factor, ‘seeding system’, consisted of two levels, namely drill seeding and precision seeding, and the second factor was ‘cultivar’ at four levels (Viola 000, semi-determinate; Lisbon 000, determinate; ES Mentor 00, determinate; Orion 00, indeterminate). Plot sizes were 8 m long and 1.8 m width at sowing, and 5.8 m long and 1.8 width at harvest. The sowing density was in all years and at all locations 65 germinable seeds m² in both seeding systems. Sowing time was between mid-April and beginning of May, depending on year and location (Table 1). The sowing depth was 3.5–4.0 cm at both locations and in both years.

For the drill seeding, a tractorseeder INOTEC was used, with a double disc system for seed depot and seed dispenser, and a rubber wheel for soil re-compaction [29]. The precision seeding was operated with a pneumatic precision seeder HEGE 95B, with parallelogram-guided double coulters and skid with trailed depth rollers [30]. The plot with drill seeding consisted of 11 rows with row spacing of 14 cm and by precision seeding of 5 rows and 28 cm row spacing. The working speed for drill seeding was 4.0 km h^{−1} on average and 2.0 km h^{−1} for precision seeding. The seeding of the trials was supported by a GPS guidance system.

The seeds of all four soybean cultivars were inoculated with liquid formulated Rizoloq Top S® (Buenos Aires, Argentina) (1 × 10¹⁰ KBE m^{−1} *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 and SEMIA 5080; 300 mL ha^{−1}). The inoculation was performed immediately before sowing together with the bacterial protection Premax® (Buenos Aires, Argentina) (100 mL ha^{−1}). In both growing seasons and at both

locations, insects and diseases (low infection of bacterial blight (*Pseudomonas syringae* pv. *glycinea*) were not controlled chemically (the damage threshold was not exceeded). Harvesting was performed by a plot harvester (HALDRUP C-85) with a 1.8-m cutting unit.

Table 1. Cultural practices and environmental data for location Grünseiboldsdorf GSD and Landshut (LA) in two trial years (2017 and 2018).

Location	2017		2018	
	GSD	LA	GSD	LA
soil type	luvisol	histosol	luvisol	luvisol
N _{min} 0–90 cm content in Early spring, kg/ha ^{−1}	36	145	35	28
Preceding Crop	winter wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	corn (<i>Zea mays</i>)	spring barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	corn (<i>Zea mays</i>)
Pre-Preceding Crop	corn (<i>Zea mays</i>)	winter wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	winter wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	winter wheat (<i>Triticum aestivum</i>)
Primary tillage	soil inversion tillage by a mouldboard plough (25 cm depth)			
Seedbed preparation	rotary harrow (28 March)	rotary harrow (18 April and 06 May)	rotary harrow (2 April and 16 April)	rotary harrow (12 April)
Seeding	24 Apr.	06 May	17 April.	13 Apr.
Herbicide and application time	Centium 36 C 0.25 l/ha + Sencor WG 0.3 kg/ha + Spektrum 0.8 l/ha			
	17 May	17 May	21 April.	18 April.
Harvesting date	26 September., 05 October.	29 September.	13 September.	29 August.

2.2. Data Collection

Crop density was determined at development stage V5 (fifth unrolled trifoliate leaf) [31] by counting one running meter in a randomly selected row in each soybean plot [32]. The leaf area index (LAI) was measured at growth stage R2 (at flowering/full bloom) and at the beginning of maturity (R7). Values were determined using the plant canopy analyzer LAI-2000 from LI-COR (Lincoln, NE, USA) [31,33].

At R2, six plants per plot were carefully removed by digging (20 × 20 × 25 cm soil volume), roots were washed, and the number of nodules was determined. All nodules were divided into primary (at the tap root) and secondary nodules (at lateral roots). At full seed stage (R6), the plant heights of 10 randomly selected plants per plot were measured. All soybean plants in an area of 0.25 m² per plot were cut at development stage R7 at the soil surface and dried at 100 °C for 72 h for dry matter determination. After measuring the height of the first pod, the harvested material was separated into grains, pods, and stem with remaining leaves. The height of the first pod, the number of pods per plant, the number of seeds per pod, and the number of side branches were determined. The harvest index was calculated as dry grain mass/(dry grain mass + dry mass of soybean). Just before machine harvesting of the entire plot (R8 + 10 to 12 days), plant lodging was evaluated by rating from 1 (no lodging) to 9 (total plant lodging).

Samples of freshly threshed soybean were taken (ca. 500 g per plot) and immediately examined for oil and protein content by Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) with appropriate calibration from Polytec PSSSHA03–2.1 (Waldbronn, Germany) [34]. After seeds were cleaned, thousand kernel mass (TKM) was determined by a Marvin seed analyzer.

2.3. Statistics

Statistical analysis was conducted with application of PLABSTAT, system version 3A [35]. Homogeneity of the data was checked graphically. A linear model for balanced data set was chosen to exclude the effects of the two factors seeding system and cultivar, and of their interaction. Year and location were included as random factors in the model, and their interaction and interactions between seeding system, cultivar, and year-by-location were also assessed. According to results from ANOVA and *F*-tests, simple multiple *t*-tests were performed to carry out the least significant differences (LSD) and standard errors (SE).

3. Results

3.1. Analysis of Variance

Effects of the seeding system were not statistically significant for any of the assessed plant properties. TKM, height of the first pod, lodging, plant height, and sum of nodules were significantly affected by cultivar. Only one trait—seed yield was significantly affected by the interaction of seeding system and cultivar. The random factors (year, location, their interaction, and interactions between seeding system, cultivar, and year-by-location) had little effect on the analyzed soybean properties (Table 2).

Table 2. Analysis of variance for yield and plant properties of soybean (*Glycine max*) for two seeding systems (drill seeding, precision seeding) and four cultivars at two locations in southeast Germany in the years 2017 and 2018: $p \leq 0.05$ ** $p \leq 0.01$ ***; SeSy—seeding system; NSB—number of side branches; LAI—leaf area index; PN—number of primary nodules; SN—number of secondary nodules; NN—total number of nodules; HI—harvest index.

	ANOVA								
	Seed Yield	Crop Density	Plant Height	Pods/Plant	Seeds/Pod	TKM	Protein Content	Oil Content	NSB
SeSy	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
cultivar	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns
year	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
location	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SeSy × cultivar	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SeSy × year	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SeSy × location	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SeSy × year × location	ns	**	ns	ns	ns	**	**	**	ns
cultivar × year	*	ns	ns	ns	ns	ns	+	ns	ns
cultivar × location	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
cultivar × year × location	ns	ns	**	ns	*	ns	**	**	ns
year × location	*	ns	**	ns	**	**	**	**	ns
	LAI R2	LAI R7	Height 1st Pod	PN	SN	NN	Lodging	HI	
SeSy	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
cultivar	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	
year	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
location	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
SeSy × cultivar	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
SeSy × year	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
SeSy × location	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
SeSy × year × location	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	
cultivar × year	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
cultivar × location	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
cultivar × year × location	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	ns	
year × location	**	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	

3.2. Seed Yield and Yield Structure

The mean seed yield across all seeding systems, cultivars, and locations was 1.0 t ha^{-1} DM higher in the year 2017 (4.2 t ha^{-1} DM) than in 2018 (3.2 t ha^{-1} DM; data not shown). Across seeding systems, cultivars, and years the yield at both locations was almost the same (3.7 t ha^{-1} DM; data not shown). The seed yield with drill seeding tended to be higher than with precision seeding in each of the tested cultivars (Figure 2). The highest-yielding cultivar in both seeding systems was ES Mentor 00 (4.0 t ha^{-1}) and the lowest-yielding was Viola 000 (3.5 t ha^{-1} ; data not shown).

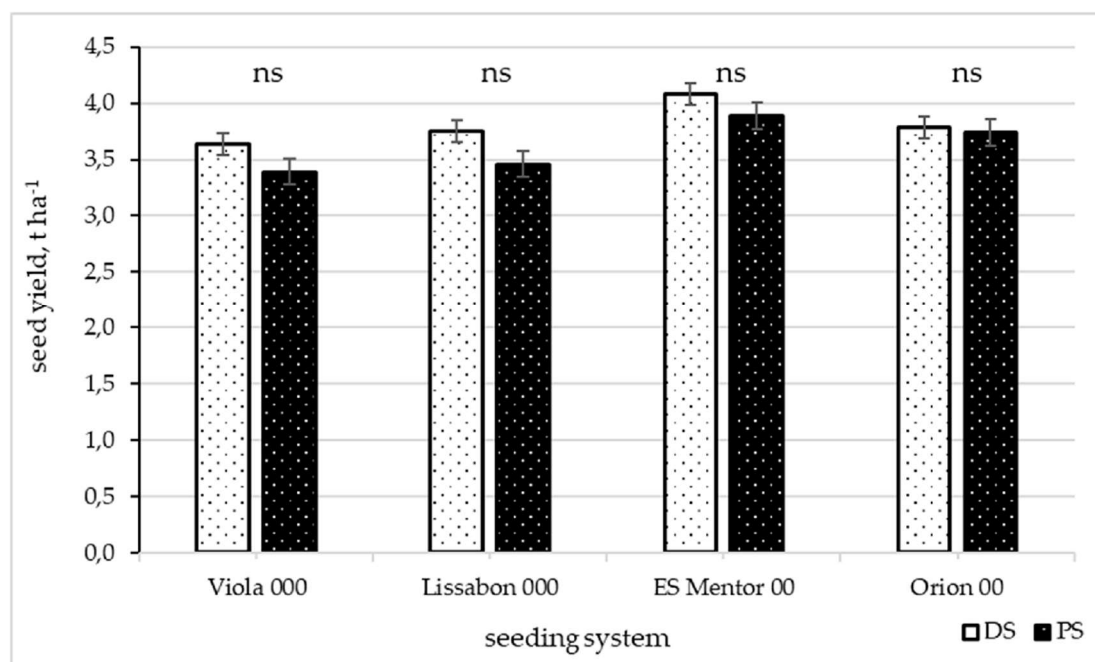


Figure 2. Seed yield of soybeans (*Glycine max*) with drill seeding (DS) or precision seeding (PS) and four cultivars; means over two locations in southeast Germany and two years (2017 and 2018), no significant differences, comparison within cultivar.

The yield of soybean after drill seeding tended to be higher than after precision seeding, although most of the yield components developed in greater numbers (not significant) with precision seeding (Table 3), except crop density (not significant).

Table 3. Seed yield structure and harvest index of soybeans by different seeding systems, average across four cultivars, two locations in southeast Germany (GSD, LA) and two years (2017, 2018), LSD: least significant difference, $p \leq 0.05$; SE—standard error, NSB—number of side branches, HI—harvest index.

Seeding System	Crop Density, Plant m^{-2} (ns)	Pods/Plant, n (ns)	Seeds/Pod, n (ns)	HI (ns)	NSB, $n \text{ Plant}^{-1}$ (ns)
Drill Seeding	62.5	20.4	2.2	0.6	1.4
Precision Seeding	44.5	30.0	2.2	0.6	1.9
LSD	31.1	29.3	0.4	0.5	0.6
SE	2.3	1.9	0.03	0.01	0.2

The crop density with drill seeding was $62.4 \text{ plant m}^{-2}$, which was 18 plants m^{-2} more than with precision seeding. A similar tendency was observed for number of pods per plant, with ca. 10 pods per plant more with precision seeding. The number of seeds per pod and harvest index were the same in both seeding systems.

3.3. Seed Characteristics

Across both seeding systems, the thousand kernel mass varied from approximately 168 to 200 g, protein from 39.4% to 41.0% DM, and oil from 18.8% to 19.4% DM, depending on cultivar (Table 4).

Table 4. Seed characteristics of soybeans of different cultivars, average across two seeding systems (drill seeding and precision seeding), two locations in southeast Germany (GSD, LA) and two years (2017, 2018), LSD: least significant difference, $p \leq 0.05$.

Cultivar	TKM g	Protein Content % DM (ns)	Oil Content % DM (ns)
Viola 000	167.6	40.8	18.9
Lissabon 000	186.4	39.4	19.4
ES Mentor 00	199.9	41.0	18.8
Orion 00	205.1	40.9	18.7
LSD	19.8	2.9	1.5
SE	4.7	0.3	0.3

The highest values of TKM were measured in cultivars from maturity group 00—ES Mentor (199.9 g) and Orion (205.1 g). Only the difference in TKM between Viola and Orion was statistically significant. Cultivars of maturity group 00 had higher protein content than cultivars of 000. There were few differences between the cultivars in oil content across the seeding systems. The protein content across cultivars was 40.9% with drill seeding and 40.1% with precision seeding, with oil content 18.8% and 19.1%, respectively (data not shown).

3.4. Plant Characteristics

Height of the first pod from the soil surface across the seeding systems was similar for the cultivars Viola, Lissabon, and ES Mentor, and significantly lower for the cultivar Orion (Table 5). Plant height and lodging were also higher for cultivar Orion (99.7 cm and 5.2, respectively).

Table 5. Plant characteristics of soybeans of different soybean cultivars, average across two seeding systems (drill seeding and precision seeding) at two locations in southeast Germany (GSD, LA) and two years (2017, 2018), LSD: least significant difference, $p \leq 0.05$.

Cultivar	Height 1 st Pod, cm	Lodging, Rating ¹	Plant Height, cm	Number of Nodules Plant ⁻¹
Viola 000	10.3	2.9	87.5	74.0
Lissabon 000	10.4	1.6	76.4	62.5
ES Mentor 00	10.4	1.1	85.7	78.0
Orion 00	13.4	5.2	99.7	59.6
LSD	2.5	2.3	9.6	7.4
SE	0.6	0.6	2.1	5.6

¹ Rating according to a scale from 1 = no lodging and 9 = total plant lodging.

The highest number of nodules was found on the roots of ES Mentor (78.0). The cultivars Lissabon and Orion formed significantly lower numbers of nodules (62.5 and 59.6).

4. Discussion

The two seeding systems studied differed mainly in the spacing between rows and between plants in each row. With drill seeding, the soybean plants did not have the same individual space in the field, which could have led to competition for solar radiation, nutrients, and water. This aspect has been discussed in other studies from the USA [36]. The doubled width of row spacing with precision seeding compared to drill seeding (28 cm versus 14 cm) and exact grain placement in the row could promote more space for each soybean plant and ensure the development of more side branches [37]. Similar to

our results, studies from the USA [8], India [38], and Russia [39,40] did not find significant differences in yield between different seeding systems (drill, air seeder, planter) with varied row spacing and sowing densities. A study from Argentina [18], however, found that precision seeding of soybean was superior to drill seeding in terms of how carefully the grains were handled during sowing, leading to uniform field emergence and also to higher seed yield. However, accurate placement at the same seeding depth for each seed in a row in precision seeding is difficult to achieve with lightweight models of seeding units such as the HEGE 95B, which was used in our study [13]. This could have led to uneven field emergence because soybean, as a large grain legume with epigenetic germination, needs a lot of force to break through the soil surface. Breaking the soil surface is easiest if all germinating seedlings in a row exert pressure at the same time. If the soybean grains are not placed at the same depth, this simultaneous pressure cannot be applied and only the seedlings with greater germination power will emerge [2,41]. The initial conditions in both trial years were different, and especially in 2018, soybeans were grown under dry conditions, as there was less than 15 mm of precipitation throughout April at both locations (Figure 2). In such conditions, the field emergence of soybean cross-tested cultivars using precision seeding was not equal to drill seeding, resulting in low crop densities, sometimes below 30 plant m² (data not shown).

By trend, the plants sown with precision seeding had more side branches, more pods per plant could be produced compared to drill seeding (Table 3). Competition between plants was therefore low, so all were able to form more pods on their side branches, as also shown by other studies [42,43]. The increase in these two yield components, more side branches and lower competition, usually leads to an increase in seed yield [36]. The yield, however, tended to be unexpectedly lower with precision seeding than with drill seeding, perhaps due to potentially uneven field emergence in our study. The tested cultivars belong to different maturity groups and have different habitus properties. Cultivars of late maturity groups usually form more side branches, as shown by studies from North and South America with maturity groups from IV to VIII [43,44]. These differences are not found between the much earlier maturity groups (00 and 000).

For increasing soybean productivity, the genetics of cultivars also play a major role. Since the tested cultivars had different genetic backgrounds and therefore different growth types, the latter resulted in temporal shifts in vegetative and reproductive development of the studied soybean plants. The temperature sum (crop heat units (CHU)) during the growing season affects soybean growth and development [45]. Cultivars from maturity group 00 (ES Mentor, determinate, and Orion, indeterminate) had higher heat requirements than those from maturity group 000 (Viola, semi determinant, and Lissabon, determinant) for transitioning from one growth phase to another and to maturing [45,46]. ES Mentor and Orion, as 00 cultivars, have the genetic potential to develop more above-ground biomass and thus intercept more solar radiation; this could in turn contribute to higher photosynthetic rates and possibly higher plant heights than in early maturing cultivars [37]. Due to its determinate growth type, lodging was the lowest of all cultivars in ES Mentor. For the other cultivars, the well-known relationship between plant height and lodging was confirmed: the higher the plant height, the higher the lodging [47]. As lodging causes harvest losses, successful breeding has been done to develop more stable cultivars even at high crop densities [48]. Plant height and lodging were also higher for cultivar Orion (99.7 cm and 5.2, respectively). Another potential contributor to harvest losses is low distance of the first pods from the ground surface. Previous results have indicated that drastic harvest losses occurred at a height of first pod below 7.5 cm [49]. All cultivars assessed in our study developed the first pod at a stem height > 10 cm and therefore had a low risk of harvest loss due to distance of first pods from the soil surface.

Soybean can supply up to 80% of its nitrogen needs through symbiosis with rhizobia and subsequent fixation of N₂ from the air [2]. According to Smit et al., 1992 [50], the success of root infection with rhizobia and subsequent symbiosis between the soybean plant and bacterium depends on compatibility of the genes of both plant and bacterium. This interaction, together with environmental and soil factors, determines not only the quantity, but also the efficacy of the nodulations [2].

Therefore, different genetic backgrounds of the tested cultivars resulted in the sum of the nodules for each cultivar to differ (Table 3).

Seed characteristics, such as protein and oil content, did not depend on the seeding system (Table 4). The higher number of side branches and, consequently, more pods per plant, with precision seeding compared to drill seeding did not lead to an increase in protein or oil content in soybean. However, an increase in crop density tends to lead to higher protein content [51,52] and since the two, i.e., protein and oil content, correlate negatively [53], oil content also increases with decreasing crop density by trend [54]. Our results showed that neither drill nor precision seeding reduced or increased protein content and oil content.

To achieve the full potential of soybean plant development with respect to a particular cropping system in Germany, the seeding system can be adapted to the phenotype of the cultivars. Cultivars with a higher number of side branches (for example ES Mentor) can be sown in a precision seeding system with greater row spacing (28 cm and more) as they can make a good use of the initial space and nutrients for each individual plant to increase yield via side branches. The cultivar types with low branching capacity (such as Viola) can be sown by drill seeding and can produce good seed yields with narrow row spacing. The cultivation of the indeterminate cultivar types is more likely to benefit from precision seeding. The determinate cultivar types can be sown by drill seeding with lower row spacing and make good use of solar radiation for efficient photosynthesis during the critical period of grain formation and filling, as has been demonstrated in other scientific studies [55].

5. Conclusions

As neither tested seeding system for soybean resulted in significant differences in seed yield, seed composition, seed composition (protein and oil contents), and plant characteristics, farmers have the opportunity to decide on any of the seeding systems, depending on their farm management, farm structure, and the economics of their machinery and labor requirements.

Author Contributions: O.S., conceptualization, data collection, data evaluation, main writing, and structuring of original draft; S.Z., conceptualization, review, and editing; W.C., conceptualization, review, and editing; S.G., contributor role, conceptualization, review, editing, and supervision. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: We thank Saaten Union GmbH for the opportunity to carry out the trials. The special thank counts to Franz Xaver Zellner, who supported the organization of field trials. We are grateful to the Franziska Stoeckl and Christoph Röhrli for their support in technical realization of the field trials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Likhchvor, V.; Protz, R.; Mugal, I. *Soybean*; Ukrainian Technologies: Lviv, Ukraine, 2004; ISBN 966-666-035-0.
2. Singh, G. *The Soybean. Botany, Production and Uses*; CABI: Wallingford, CT, USA, 2010; ISBN 978-1-84593-644-0.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Agro-Ecological Zones. Available online: <http://www.fao.org/nr/gaez/en/> (accessed on 15 January 2020).
4. Hahn, V.; Miedaner, T. *Soybean Cultivation in the EU. Rewarding Cultivation without GMO's; (100% practice) in German*; DLG-Publisher: Frankfurt am Main, Germany, 2013; ISBN 9783769020199.
5. Sojafoederring. Soybean Cultivation in Germany has Many Advantages—Time for the Protein Turnaround. Available online: <https://www.sojafoederring.de/> (accessed on 15 January 2020).
6. Aggarwal, N.; Ram, H.; Singh, G. Heat utilization, irrigation efficiency and productivity of soybean (*Glycine max* L. Merrill) as influenced by sowing dates, sowing methods and seeding rates. *Progress. Res.* **2014**, *9*, 16–21.
7. Masino, A.; Rugeroni, P.; Borrás, L.; Rotundo, J.L. Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. *Eur. J. Agron.* **2018**, *98*, 14–24. [CrossRef]

8. Popp, M.P.; Oliver, L.R.; Dillon, C.R.; Keisling, T.C.; Manning, P.M. Evaluation of seedbed preparation, planting method, and herbicide alternatives for dryland soybean production. *Agron. J.* **2000**, *92*, 1149–1155. [\[CrossRef\]](#)
9. Shestakova, N.; Gordeyeva, Y.; Kolesnikova, L.; Zhirnova, I. Sowing standards and methods. Their effect on tanaïs and lanceolate leaflet soybean varieties performance in the dry steppe Sowing standards and methods. Their effect on tanaïs and lanceolate leaflet soybean varieties performance in the dry steppe zone of the North Kazakhstan. *EurAsian J. Biosci.* **2017**, *11*, 22–26.
10. Bellaloui, N.; Bruns, H.A.; Abbas, H.K.; Mengistu, A.; Fisher, D.K.; Reddy, K.N. Effects of row-type, row-spacing, seeding rate, soil-type, and cultivar differences on soybean seed nutrition under US Mississippi delta conditions. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0129913. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Plösch, J. Which Sowing Technique Is Suitable for the Soybean. Available online: <https://www.diesaat.at/welche-saattechnik-passt-fuer-die-sojabohne+2500+3066141> (accessed on 10 February 2020).
12. Bozdoğan, A.M. Seeding uniformity for vacuum precision seeders. *Sci. Agric.* **2008**, *65*, 318–322. [\[CrossRef\]](#)
13. Beesten, F.V. Sowing technology for organic soya—what is important. *Taifun Soybeaninfo* **2016**, *6*, 16.
14. Rahman, M.; Hossain, M.; Bell, R.W. Plant density effects on growth, yield and yield components of two soybean varieties under equidistant planting arrangement. *Asian J. Plant. Sci.* **2011**, *10*, 278–286. [\[CrossRef\]](#)
15. Louisiana, A. Conservation planting methods for native and introduced species. *Nat. Resour. Conserv. Serv.* **2009**, *14*, 1–6.
16. Berschneider, J. *Chances and Limitations of European Soybean Production: Market Potential Analysis*; Universität Hohenheim: Stuttgart, Germany, 2016.
17. Bowers, G.R.; Rabb, J.L.; Ashlock, L.O.; Santini, J.B. Row spacing in the early soybean production system. *Agron. J.* **2000**, *92*, 524–531. [\[CrossRef\]](#)
18. Souza, E.; Botta, G.; Tourn, M.; Hidalgo, R. Sowing efficiency of two seeding machines with different metering devices and distribution system: A comparison using soybean, *Glycine max* (L.) Merr. *Span. J. Agric. Res.* **2004**, *2*, 315–321. [\[CrossRef\]](#)
19. Cox, W.J.; Cherney, J.H. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. *Agron. J.* **2011**, *103*, 123. [\[CrossRef\]](#)
20. Orłowski, J.; Cox, W.J.; Ditommaso, A.; Knoblauch, W. Planting soybean with a grain drill inconsistently increases yield and profit. *Agron. J.* **2012**, *104*, 1065. [\[CrossRef\]](#)
21. Bruin, J.L.; de Pedersen, P. Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. *Agron. J.* **2008**, *100*, 704. [\[CrossRef\]](#)
22. Janovicek, K.J.; Deen, W.; Vyn, T.J. Soybean response to zone tillage, twin-row planting, and row spacing. *Agron. J.* **2006**, *98*, 800. [\[CrossRef\]](#)
23. Hamid, M.A.; Islam, M.Z.; Biswas, M.; Begum, A.A.; Saifullah, M.; Asaduzzaman, M. Effect of method of sowing and seed rate on the growth and yield of soybean. *Pak. J. Biol. Sci.* **2002**, *5*, 1010–1013. [\[CrossRef\]](#)
24. Boydak, E.; Alpaslan, M.; Hayta, M.; Gerçek, S.; Simsek, M. Seed composition of soybeans grown in the Harran region of Turkey as affected by row spacing and irrigation. *J. Agric. Food Chem.* **2002**, *50*, 4718–4720. [\[CrossRef\]](#)
25. Colvin, T.S.; Erbach, D.C. Soybean response to tillage and planting methods. *Trans. ASAE* **1982**, *25*, 1533–1535. [\[CrossRef\]](#)
26. Aigner, A.; Salzeder, G. Seed technology and seeding density for soybeans. *Pub. Ser. Bavar. State Inst. Agric.* **2015**, *6*, 53–56.
27. Jobst, F. *Results of a Survey on Cultivation Technology in Organic Soybean Cultivation in Bavaria and Austria*; Peer, U., und Markus, D., Eds.; Köster: Berlin, Germany, 2013; ISBN 9783895748158.
28. Agrometeorology Bavaria. Weather Data in Bavaria. Available online: <https://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L941ES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=10VER48553&p4=4D078O1691> (accessed on 1 June 2019).
29. HALDRUP. Product Description of Drill Machine. Available online: <https://www.haldrup.net/saemaschinen/sb25.html> (accessed on 4 July 2020).

30. Zuern. Product Description of Single Row Seed Drill. Available online: <https://www.zuern.de/de/feldversuchstechnik/produkte/saetechnik/zuern-d90/eigenschaften.html> (accessed on 4 July 2020).
31. Fehr, W.R.; Caviness, C.E.; Burmood, D.T.; Pennington, J.S. Stage of Development Descriptions for Soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop. Sci.* **1971**, *11*, 929–933. [\[CrossRef\]](#)
32. Federal Office for Plant Varieties. *Guidelines for Carrying out Agricultural Variety Tests*; Federal Office for Plant Varieties: Hannover, Germany, 2000.
33. LI-COR Inc. *LAI-200 Plant. Canopy Analyzer*; Instruction Manual; LI-COR Inc.: Lincoln, NE, USA, 1992.
34. Pazdernik, D.L.; Killam, A.S.; Orf, J.H. Analysis of amino and fatty acid composition in soybean seed, using near infrared reflectance spectroscopy. *Agron. J.* **1997**, *89*, 679–685. [\[CrossRef\]](#)
35. Utz, H.F. *PLABSTAT: A Computer Program for Statistical Analysis of Plant Breeding Experiments*; University of Hohenheim: Stuttgart, Germany, 2001.
36. Board, J. Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. *Crop. Sci.* **2000**, *40*, 1285–1294. [\[CrossRef\]](#)
37. Norsworthy, J.K.; Shipe, E.R. Effect of row spacing and soybean genotype on mainstem and branch yield. *Agron. J.* **2005**, *97*, 919. [\[CrossRef\]](#)
38. Ram, H.; Singh, G.; Aggarwal, N.; Kaur, J. Soybean (*Glycine max*) growth, productivity and water use under different sowing methods and seeding rates in Punjab. *Indian J. Agron.* **2011**, *56*, 377–380.
39. Vaulin, A.J. Sowing method and soybean sowing rate in the southern Urals. *J. Altai State Agrar. Univ.* **2013**, *99*, 5–8.
40. Fadeeva, M.F.; Vorobjeva, L.B.; Matveeva, O.L. Effect of sowing methods on the formation of the number of seeds in soybeans. *J. Legumes Cereals* **2018**, *25*, 40–42.
41. Ram, H.; Singh, Y.; Saini, K.S.; Kler, D.S.; Timsina, J. Tillage and planting methods effects on yield, water use efficiency and profitability of soybean-wheat system on a loamy sand soil. *Exp. Agric.* **2013**, *49*, 524–542. [\[CrossRef\]](#)
42. Miura, H.; Gemma, T. Effect of square planting on yield and its components of soybean under different levels of planting density. *Jpn. J. Crop. Sci.* **1986**, *55*, 483–488. [\[CrossRef\]](#)
43. Souza, R.; Teixeira, I.; Reis, E.; Silva, A. Soybean morphophysiology and yield response to seeding systems and plant populations. *Chil. J. Agric. Res.* **2016**, *76*, 3–8. [\[CrossRef\]](#)
44. Ball, R.A.; McNew, R.W.; Vories, E.D.; Keisling, T.C.; Purcell, L.C. Path analyses of population density effects on short-season soybean yield. *Agron. J.* **2001**, *93*, 187–195. [\[CrossRef\]](#)
45. Shroyer, J.P. Soybean Morphological Characters and Yield Components as Influenced by Growth Type, Row Spacing, Population and Planting Date. Retrospective Theses and Dissertations, Iowa State Univ., Ames, IA, USA, 1980; pp. 1–197. [\[CrossRef\]](#)
46. Recknagel, J. Studies on the cultivation suitability of soybeans in Germany. *J. Cultiv. Plants* **2017**, 137–145. [\[CrossRef\]](#)
47. Suhre, J.J.; Weidenbenner, N.H.; Rowntree, S.C.; Wilson, E.W.; Naeve, S.L.; Conley, S.P.; Casteel, S.N.; Diers, B.W.; Esker, P.D.; Specht, J.E.; et al. Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. *Agron. J.* **2014**, *106*, 1631–1642. [\[CrossRef\]](#)
48. Ustun, A.; Allen, F.L.; English, B.C. Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. *Crop. Sci.* **2001**, *41*, 993–998. [\[CrossRef\]](#)
49. Epler, M.; Staggenborg, S. Soybean yield and yield component response to plant density in narrow row systems. *Crop. Manag.* **2008**, *7*, 1–22. [\[CrossRef\]](#)
50. Smit, G.; Swart, S.; Lugtenberg, B.J.; Kijne, J.W. Molecular mechanisms of attachment of Rhizobium bacteria to plant roots. *Mol. Microbiol.* **1992**, *6*, 2897–2903. [\[CrossRef\]](#)
51. Sobko, O.; Hartung, J.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S. Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Plant Soil Environ.* **2019**, *65*, 594–601. [\[CrossRef\]](#)
52. Popovic, V.; Vidic, M.; Jockovic, D.; Ikanovic, J.; Jaksic, S.; Cvijanovic, G. Variability and correlations between yield components of soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Genetika* **2012**, *44*, 33–45. [\[CrossRef\]](#)
53. Luca, M.J.D.; Nogueira, M.A.; Hungria, M. Feasibility of lowering soybean planting density without compromising nitrogen fixation and yield. *Agron. J.* **2014**, *106*, 2118–2124. [\[CrossRef\]](#)

54. Rahman, M.M.; Hossain, M.M.; Anwar, M.P.; Juraimi, A.S. Plant density influence on yield and nutritional quality of soybean seed. *Asian J. Plant. Sci.* **2011**, *10*, 125–132. [[CrossRef](#)]
55. Andrade, F.H.; Calviño, P.; Cirilo, A.; Barbieri, P. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. *Agron. J.* **2002**, *94*, 975–980. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

4 EFFECT OF SOWING DENSITY ON GRAIN YIELD, PROTEIN AND OIL CONTENT AND PLANT MORPHOLOGY OF SOYBEAN (*GLYCINE MAX* L. MERRILL)

Original Paper

Plant, Soil and Environment, 65, 2019 (12): 594–601

<https://doi.org/10.17221/346/2019-PSE>

Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill)

OLENA SOBKO^{1*}, JENS HARTUNG¹, SABINE ZIKELI², WILHELM CLAUPEIN¹,
SABINE GRUBER¹

¹Institute of Crop Science, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany

²Center for Organic Farming, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany

*Corresponding author: sobkolena91@gmail.com

Citation: Sobko O., Hartung J., Zikeli S., Claupein W., Gruber S. (2019): Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill). Plant Soil Environ., 65: 594–601.

Abstract: To find out exactly how sowing density and sowing pattern affect soybean grain yield, quality and its components in non-traditional soybean growing regions, such as Germany, two field trials have been conducted at two locations in Bavaria in 2016 and 2017. The experiments were carried out with four sowing densities (30, 50, 70, 90 seeds/m²) and four cultivars from different maturity groups (Viola 000, Lissabon 000, ES Mentor 00, Orion 00) as randomized complete block design with four replicates. Almost all evaluated traits varied significantly depending on year × location. There was no interaction between the main factors (cultivar × sowing density). The results revealed that grain yield and height of the first pod increased with increase of sowing density. The number of pods per plant and branching decreased with increasing sowing density. At higher sowing densities at flowering leaf area index was significantly higher than at lower sowing densities. The cv. ES Mentor (00) with 70 seeds/m² has proved to be a suitable cultivar in terms of yield and quality in southern Germany (> 3.6 t/ha grain yield and 40% protein).

Keywords: seed quality; climate change; competition; height of first pod; yield structure; harvest index

Soybean is a double use crop with focus on different ingredients (oil and protein) depending on the production area, and the demand. The average oil content in soybean seeds is between 18% and 25%. The by-product of oil extraction is soybean meal with 40–44% crude protein. It is the main source of protein for the food industry and for animal feed (Yilmaz 2003). With the increasing demand for vegetarian foods, soybean protein is increasingly in focus. The crop has high heat demand and a long growing season; for this reason, cultivation is still restricted in some areas of Central and Northern Europe, though it has a long tradition in Asian countries and is frequently grown in South and North America. The interest in soybean production has been growing since several years in Germany, and climate change offers the opportunity to grow the crop on non-traditional locations as well (Hahn and Miedaner 2013). Therefore, the acreage used for soybean production increased rapidly: in 2017 only 19 100 ha were cropped with soybeans in Germany while in

2018 the area increased to 23 900 ha – an increase by 25% in one year (Sojafoederung 2018).

The productivity of soybean is affected by the genetic potential of the cultivar, environmental conditions, and techniques of cultivation (Yilmaz 2003). To increase the yield, taking southern Germany as an example, where the crop heat units (CHU) are not considered to be at optimum levels, it is very important to choose appropriate cultivars and appropriate production systems with improved cultivation methods, including sowing density. Sowing density is a suitable tool to regulate plant growth, crop biomass and yield, and to decrease the production costs with reduced sowing density (Ribeiro et al. 2017). The optimum plant density varies all over the world, and usually ranges between 30 and 60 plants/m² (Rahman et al. 2011a). The genotype of soybean from different maturity groups can influence the response to different sowing densities; some cultivars show a better performance for high grain productivity in high crop densities, and others in low densities (Ribeiro

<https://doi.org/10.17221/346/2019-PSE>

et al. 2017). Under the conditions of climate change and unpredictable drought periods, uncertainties of yield occur more often, thus the adjustment of sowing density could control soybean production more efficiently.

The object of this study was to determine the effect of sowing density and cultivar from different maturity groups on the performance of soybean plants. The overall aim was to expand the cultivation of soybean in Germany and other countries with similar climatic conditions.

MATERIAL AND METHODS

Site description. The experiments were conducted at the research station of Saaten Union GmbH on two locations, Grünseiboldsdorf (GSD, 48°29'N, 11°54'E, altitude 440 m a.s.l.) and Landshut (LA, 48°34'N, 12°9'E, altitude 398 m a.s.l.) in south east Germany in 2016 and 2017. These locations are situated in the transitional zone of the maritime climate to a continental climate and are in zone 5 (temperate cool) according global agro-ecological zones (FAO 2018). Weather data for the experimental years were obtained from official meteorological stations nearby (Figure 1).

The experimental design was a randomized complete block design with four replicates. The experimental factors were sowing density in four levels (30, 50, 70 and 90 seeds/m²) and cultivar in four levels from different maturity groups and growth types (Viola 000, semi determinate; Lissabon 000, determinate; ES Mentor 00, determinate; Orion 00, indeterminate). The plot area was 12.3 m², and had 11 rows with a row spacing of 14 cm.

Soil properties and agricultural measures presented in Table 1.

The seeds of all four soybean cultivars were inoculated with HiStick® Soy (2×10^9 CFU (colony-forming unit)/g *Bradyrhizobium japonicum*; 400 g/100 kg seeds). The peat formulated inoculant was applied dryly to the seeds immediately before sowing. Since insects and diseases have been below the economic threshold, no chemical insect or disease control were performed, however, control by herbicides was done (Table 1). The harvest of the plots was performed using a plot harvester (HALDRUP C-85, Løgstør, Denmark) with a cutting unit of 1.8 m in width.

Monitoring of plant development. At development stage V5 (five unrolled trifoliate leaf; Fehr et al. 1971) crop density was determined by counting the number of plants of four times the length of one running meter in a randomly selected row. At development stage R2 (at flowering/full bloom) and R7 (beginning of maturity) the leaf area index (LAI) was measured with a plant canopy analyser LAI-2000 from LI-COR (LI-COR, 1992). The measurements were performed under the same degree of sunlight intensity (cloudy or sunny).

At R2 the number of nodules per plant were determined according to the following pattern: six plants per plot were carefully dug out in soil cubes of 20 × 20 × 25 cm. The plants were carefully cleaned in a bucket of water, and the soil was checked for any lost nodules. The primary (on the tap roots) and secondary (on lateral roots) nodules were counted. The plant height was determined at development stage R6 on 10 plants per plot. At the beginning of maturity (R7) the height of the first pod (distance from soil surface) was measured for 10 randomly

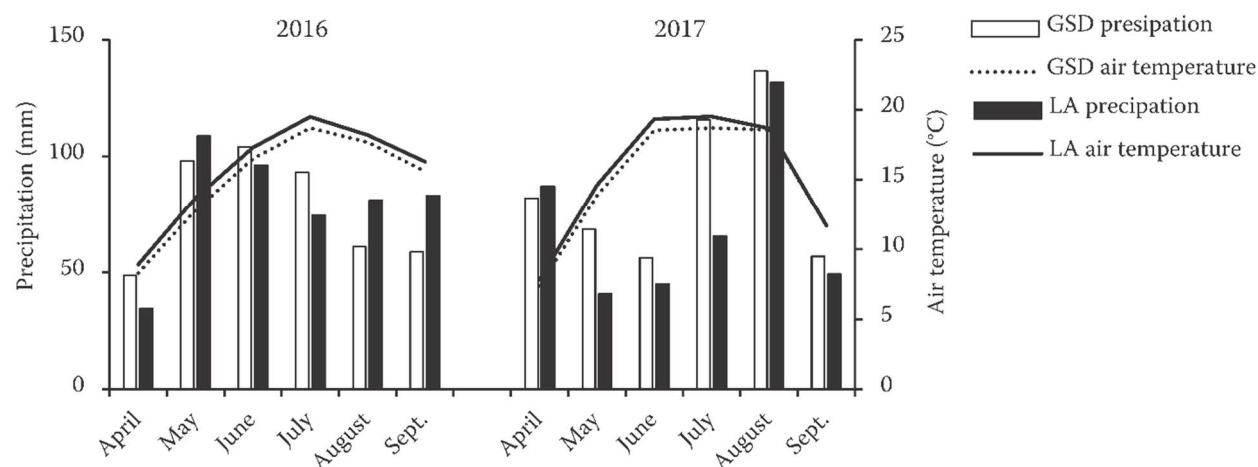


Figure 1. Precipitation and air temperature (average of every month) during the experimental periods (2016 and 2017) at the locations Grünseiboldsdorf (GSD) and Landshut (LA) (Agrometeorology Bayern 2018)

Table 1. Cultural practices and soil properties for locations Grünseiboldsdorf (GSD) and Landshut (LA)

	2016		2017	
	GSD	LA	GSD	LA
Soil type	L3/Loe (loam loess)	L3/Loe (loam loess)	L2/Loe (loam loess)	L/Mo-b2 (loam moor)
N _{min} 0–90 cm in early spring (kg/ha)	13	120	36	145
Preceding crop	winter wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	winter barley (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	winter wheat (<i>T. aestivum</i> L.)	maize (<i>Zea mays</i> L.)
Pre-preceding crop	sugar beet (<i>Beta vulgaris</i> L.)	winter wheat (<i>T. aestivum</i> L.)	maize (<i>Z. mays</i> L.)	winter wheat (<i>T. aestivum</i> L.)
Primary tillage ¹	mouldboard ploughing (25 cm)			
Seedbed preparation	rotary harrow (28/04/2016)	rotary harrow (12/04/2016)	rotary harrow (28/03/2017)	rotary harrow (18/04/2017 and 06/05/2017)
Seeding ²	02/05/2016	21/04/2016	24/04/2017	06/05/2017
Herbicide application time	Centium 36 C 0.25 L/ha + Sencor WG 0.3 kg/ha + Spektrum 0.8 L/ha			
	05/05/2016	28/04/2016	17/05/2017	17/05/2017
Harvesting date	30/09/2017	13/09/2016 and 30/09/2017	26/09/2017 and 05/10/2017	29/09/2017

¹in autumn before soybean cultivation; ²3.5–4.0 cm

picked plants per plot. Additionally, in R7 samples were taken on a sampling area of 0.25 m² from each plot to determine the harvest index (HI), the number of pods per plant and the number of seeds per pod. The harvest index was calculated by the formula:

HI = dry grain mass/(dry grain mass + dry mass of soybean) (Spaeth et al. 1984).

At the same time the number of side branches was determined. Plant lodging was evaluated via a visual scoring at R8 from 1 to 9 on plot level (1 = no plant lodging and 9 = total plant lodging).

Post-harvest treatments and laboratory analyses. After harvesting, the samples were cleaned using PFEUFFER MLN (sieve machine with aspiration and deawner, Kitzingen, Germany) and for the determination of thousand kernel mass (TKM), a MARVIN seed analyser (Neubrandenburg, Germany) was used. Oil and protein content in the harvested seed samples were measured in 400 g intact and freshly harvested soybean grains by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) with appropriate calibration from Polytec PSSSHA03-2.1 (Pazdernik et al. 1997).

Data analysis methods. The statistical analysis was done using the PROC MIXED procedure of the SAS system version 9.4M2 (Littell 2004). Normal distribution and homogeneity of variances of residuals were checked graphically. Interaction between sowing densities and cultivars, year and location were fitted. Year,

location and year-by-location interaction effects were assumed as random but taken as fixed in the analysis, as expected inter-environmental information is low and the number of levels were only 2 and 4, respectively. A year-by-location-specific error variance was fitted (PROC MIXED). In case of significant *F*-tests, a simple multiple *t*-test (least significant difference (*LSD*)) was performed (Piepho et al. 2003). Additionally, a regression analysis of the main factors was carried out.

RESULTS AND DISCUSSION

The factors sowing density and cultivar had significant effects on yield and some yield components (Table 2). None of the interactions of sowing density × cultivar were significant. However, some parameters were significantly influenced by interaction year-by-location. The exceptions were grain yield, LAI R7, crop density, pods/plant and seeds/pod, HI.

Grain yield. The grain yield across all cultivars and locations was slightly higher in 2017 (3.6 t/ha dry matter (DM)) than in 2016 (3.4 t/ha DM), and yield at both locations was also almost the same in GSD with 4.2 t/ha and 4.0 t/ha in LA (over all years and cultivars; data not shown). The highest grain yield occurred at a sowing density of 90 seeds/m² with 4.4 t/ha, and the lowest yield at 30 seeds/m² with 3.2 t/ha across locations and years (Figure 2). Only the yield of sowing density of 30 seeds/m² di-

<https://doi.org/10.17221/346/2019-PSE>

Table 2. Analysis of variance (*P*-value) for soybean grain yield, yield components, protein and oil content, and other agronomic traits of four soybean cultivars sown with different sowing densities, from field trials in the years 2016 and 2017 in south east Germany

	Grain yield	Protein content	Oil content	TKM	LAI		Height of first pod	Lodging
					R2	R7		
SD	0.0278*	0.1263	0.1294	0.0733	< 0.0001***	0.7008	< 0.0001***	0.0446*
CV	0.7619	0.2534	0.0919	0.0680	0.0065*	0.7536	0.0957	0.0957
SD × CV	0.2706	0.2738	0.7640	0.7977	0.4294	0.6701	0.5622	0.7009
Y × L	0.0603	0.0004**	0.0004**	0.0224*	0.0002***	0.1268	0.0314*	0.0208*
	plant height	primary nodules	secondary nodules	crop density	branching	pods/plant	seeds/pod	HI
SD	0.9911	0.3295	0.9384	0.0268*	0.0324*	0.0152*	0.7528	0.9726
CV	0.0927	0.1134	0.1186	0.6141	0.1056	0.7244	0.1442	0.5121
SD × CV	0.5496	0.0972	0.1410	0.9234	0.3514	0.6363	0.5143	0.4465
Y × L	0.0012**	< 0.001***	0.0009***	0.0002	0.0406*	0.0071	0.2613	0.0086

P* < 0.05; *P* < 0.01; ****P* < 0.001; SD – sowing density; CV – cultivar; Y – year; L – location; TKM – thousand kernel mass; LAI – leaf area index; HI – harvest index

ffered significantly from the other sowing densities, although an increasing trend was visible with higher yields at higher sowing densities.

The average grain yield level in 2017 was 2.7 t/ha in Germany (Sojafoedering 2019). All plot yields were higher than this average (Figure 2). Soybean is known for a high phenotypic plasticity (Ribeiro et al. 2017). The maximal soybean grain yield can be achieved if the plant density supports the interception of 95% solar radiation in R5 (at the beginning of seed filling) (Rahman et al. 2011a). This cannot fully explain the declining yields at low sowing density in the current experiment. The standard sowing

densities in Germany with 50 to 70 seeds/m² depend on the maturity group (Hahn and Miedaner 2013).

Protein and oil content. Protein and oil content were not affected by sowing density or cultivar (Table 3). This is consistent with the results of study Popovic et al. (2012), which imply that the environment is the dominant factor affecting protein content rather than the genetics.

The protein content rose slightly with an increase of sowing density for all cultivars over all locations by trend. At 90 and 70 seeds/m² the protein content was approximately 1.0–1.4 percentage points higher than at 30 and 50 seeds/m² over all cultivars. Similar

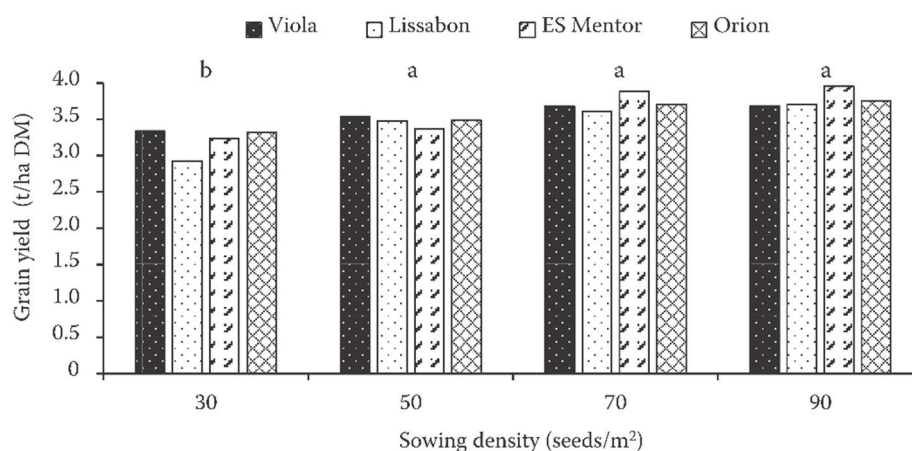


Figure 2. Soybean grain yield (t/ha dry matter (DM)) of the cvs. Viola, Lissabon, ES Mentor and Orion as effect of sowing densities, average of the years 2016 and 2017 and locations Grünseiboldsdorf and Landshut; least significant different (*LSD*) = 3.0 t/ha DM; no significant differences of values with same letters, *P* ≤ 0.05

Table 3. Seed protein and oil content of soybean, means of four cultivars (Viola, Lissabon, ES Mentor, Orion) depending on different sowing densities (A), and means of four sowing densities (30, 50, 70, 90 seeds/m²) depending on cultivar (B), over two trial years (2016, 2017) and two locations (Grünseiboldsdorf, Landshut)

	Protein content	Oil content
	(% dry matter)	
Sowing density (seeds/m ²) (A)		
30	39.0	20.0
50	39.5	19.7
70	40.0	19.6
90	40.2	19.5
<i>LSD</i>	1.3	0.6
Cultivar (B)		
Viola 000	40.1	19.7
Lissabon 000	38.5	20.3
ES Mentor 00	40.9	19.1
Orion 00	39.4	19.7
<i>LSD</i>	3.0	0.9

LSD – least significant different

results were reported by Boroomandan et al. (2009) and Rahman et al. (2011b). The opposite trend occurred for oil content, which decreased along with higher sowing density. Our research confirmed the negative correlation between protein and oil content ($R = 0.88$, data not shown) as described by Popovic et al. (2012) and De Luca et al. (2014).

Leaf area index. Sowing density and cultivar significantly affected the LAI at flowering (R2) but not significantly at the beginning of maturity (R7; Figure 3). LAI at low sowing densities was significantly lower at flowering (R2) than at high sowing densities (Figure 3), with a difference of approximately 0.3.

By trend, leaf area index at R2 was positively correlated with sowing density and the higher number of plants as also shown by Weber et al. (1966), Herbert and Litchfield (1984), Wells (1991) and Rahman et al. (2011a). The morphology of the soybean plants, mainly the number of pods and leaves in particular, can be actively changed by altering the sowing density (Egli 1993). At high sowing densities, due to competition, the leaves can become smaller, but their numbers remain high, allowing for greater accumulation of dry matter (Weber et al. 1966, Herbert and Litchfield 1984). A higher LAI results in higher photosynthetic capacity at flowering and grain filling, and finally, in a higher grain yield at higher sowing densities (Wells 1991). The tested cultivars differed in LAI at flowering (R2). The highest LAI (2.5) at flowering was measured for cv. ES Mentor 00, and at the lowest (2.0) for cv. Viola 000. Cvs. Lissabon 000 and Orion 00 both had a LAI of 2.2 and differed significantly from ES Mentor 00. All cultivars varied in growth type, therefore, they may form different leaf canopies as described by BAES (2018). As the development and productivity of the nodes at the main stem in the determinate cultivars ended earlier than that of indeterminate genotypes, this could explain why

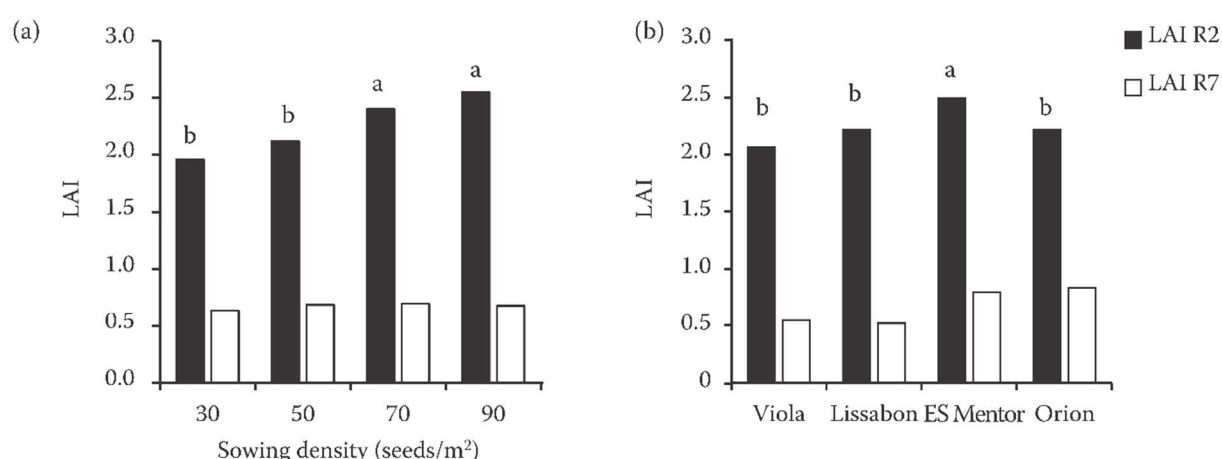


Figure 3. Leaf area index (LAI) (development stages R2 and R7) of soybean, means of years (2016, 2017) and of two locations (Grünseiboldsdorf, Landshut), depending on sowing density (a) across four cultivars (Viola, Lissabon, ES Mentor, Orion), and on cultivars (b) across four sowing densities (30, 50, 70, 90 seeds/m²); *LSD* (least significant different) LAI R2 (a): 0.09, *LSD* LAI R2 (b): 0.24; no significant differences between values with same letters of R2 at $P \leq 0.05$; no significant differences at R7

<https://doi.org/10.17221/346/2019-PSE>

Table 4. Morphology traits of soybean at different sowing densities

Sowing density (seeds/m ²)	Height of first pod (cm)	Plant height	Lodging (rating)*
30	9.4 ^d	83.7	2.7 ^b
50	11.4 ^c	84.7	2.9 ^b
70	12.1 ^b	85.2	3.2 ^{ab}
90	13.4 ^a	84.6	3.6 ^a
<i>LSD</i>	0.6	ns	0.6

Means of four cultivars (Viola, Lissabon, ES Mentor, Orion), two trial years (2016, 2017) and two locations (Grünseiboldsdorf and Landshut); letters show significant differences at $P \leq 0.05$. *1 – no lodging; 9 – total lodging; *LSD* – least significant different; ns – not significant

cv. Lissabon 000 had higher LAI at flowering than cv. Viola 000 (Weber et al. 1966, Herbert and Litchfield 1984). Cv. ES Mentor 00 has determinate growth combined with a dense canopy, which could explain the high LAI at R2. This is probably reflected in the highest grain yield of cv. ES Mentor at sowing densities 50, 70 and 90 seed/m² compared to the other cultivars of the trial.

LAI at physical maturity (R7) was almost identical at different sowing densities (0.7 in average). LAI of late maturity cvs. such ES Mentor 00 and Orion 00 was higher than early cvs. Viola 000 and Lissabon 000, similar to the results of Weber et al. (1966) and Egli (1993).

Plant morphology. To avoid cutting losses at mechanical harvest it is necessary that the first pod (lowest insertion) has a large distance to the soil surface. This morphological parameter is dependent on the genetic structure of the soybean cultivar, precipitation level and cultivation technology (Yilmaz 2003). In our study, the height of the first pod was significantly affected by plant density and not affected by cultivar (Tables 2 and 4).

Across all locations and years, the height of the first pod increased with increasing sowing density and ranged from 9.4 cm at 30 seeds/m² to 13.4 cm at 90 seeds/m², similar to Yilmaz (2003) and Epler and Staggenborg (2008). A typical harvest cutting height for soybean is between 7.5 and 12.5 cm above the soil surface (Epler and Staggenborg 2008, Mehmet 2008). Therefore, at high sowing densities harvest losses are not likely to occur. In contrast, the probability of harvest losses by low sowing density was higher, since the height of first pod was just over 9 cm. The

Table 5. Average yield structure and crop density by different sowing densities

Sowing density (seeds/m ²)	Crop density (plants/m ²)	Pods/ plant (<i>n</i>)	TKM (g DM)	Number of branches (<i>n</i>)
30	30.9 ^c	30.3 ^a	193.0	2.8 ^a
50	47.5 ^{bc}	23.0 ^b	198.4	2.2 ^{ab}
70	61.6 ^{ab}	18.4 ^{bc}	199.7	1.5 ^b
90	71.8 ^a	15.6 ^c	202.0	1.4 ^b
<i>LSD</i>	20.9	5.3	ns	0.8

Means of four different cultivars (Viola, Lissabon, ES Mentor, Orion), two trial years (2016, 2017) and both location (Grünseiboldsdorf, Landshut); lower case letters show significant differences at $P < 0.05$. TKN – thousand kernel mass; DM – dry matter; *LSD* – least significant different; ns – not significant

common sowing density in Germany is 55 germinable seeds/m² (Sojafoedering 2019). The harvest losses could be avoided by increasing of sowing density on the locations with enough water availability.

Plant height and lodging were not affected by cultivar. The lodging was affected significantly by sowing density (Tables 2 and 4). With increasing sowing density, plant height increased, and along with it the risk of lodging. The comparatively high lodging of some cultivars at 90 seeds/m² (data not shown) which occurred at the highest sowing density did not reduce yield, similar to Boquet (1990).

Nodulation. The number of nodules was not influenced by sowing density or cultivar (Table 2). The number of primary nodules tended to be higher at low sowing densities compared to higher sowing densities across all cultivars (data not shown). The

Table 6. Number of seeds per pod and harvest index (HI) of soybean as effect of different sowing densities and of cultivar, average over two trial years (2016, 2017) and two locations in south east Germany

Sowing density (seeds/m ²)	Seeds/ pod	HI	Cultivar	Seeds/ pod	HI
30	2.28	0.56	Viola	2.27	0.54
50	2.23	0.56	Lissabon	2.29	0.53
70	2.24	0.55	ES Mentor	2.26	0.56
90	2.18	0.55	Orion	2.10	0.58
<i>LSD</i>	0.27	0.07	<i>LSD</i>	0.19	0.14

LSD – least significant different

number of secondary nodules was almost identical at all sowing densities. There were no significant differences in the number of primary and secondary nodules among the different cultivars across all sowing densities (data not shown).

Yield and yield components. Grain yield is formed by several components. Crop density, number of pods/plant and number of branches were significantly influenced by sowing density (Tables 2 and 5), but TKM, one of the key components, remained unaffected by sowing density and cultivar in our experiments.

At lower sowing densities (30 and 50 seeds/m²), the number of established plants per square meter was more similar than higher sowing densities. A reason might be that competition between plants increases with increasing sowing density (Yunusa and Ikawelle 1990), thus not all seeds and seedlings developed into a plant at higher sowing densities.

The number of branches/plant ranged between 1.4 at sowing density of 90 seeds/m², and 2.8 at sowing density of 30 seeds/m² (Table 5). At high sowing density, the space for each individual plant was lower compared to low sowing density, and the plants produced fewer or even no side branches, which also reduced the number of pods per plant (Table 5). It cannot be firmly stated whether the number of branches was the only determinant of the number of pods per plant in the trial. Some studies from South of Brazil (about 1100 m altitude) show lower grain yields at high sowing densities (45 seeds/m²) compared to low densities (25 seeds/m²) (Spader and Deschamps 2015, Souza et al. 2016). In contrast, our trials have shown the highest grain yield at the highest sowing density (Figure 1). Clearly, the high number of plants per area compensated the lower number of branches and of pods per plant in terms of grain yield. The highest number of pods/plant was obtained at 30 seeds/m², with > 30 pods per plant (Table 5) and showed a negative correlation with the sowing density. Several studies, including our own trial, show that soybean is a flexible crop which produces grain yield by several constellations of the yield components (Epler and Staggenborg 2008, Mehmet 2008, Ferreira et al. 2016, Ribeiro et al. 2017).

TKM was not significantly affected by sowing density (Table 5) and ranged between 193 g (30 seeds/m²) and 202 g (90 seeds/m²). Mehmet (2008) and Spader and Deschamps (2015) report that the TKW tended to decline with increasing sowing density.

The number of seeds per pod and harvest index tended to decrease with increasing sowing density

though not significantly. Regardless of sowing density and cultivar, the pods had an average of 2.23 seeds (Table 6).

According to Spader and Deschamps (2015), the number seeds/pod is mainly genetically determined, though the results of the current study show at the very least, a trend of the effect of cultivation techniques on the number of seeds per pod. According to research results of Herbert and Litchfield (1984) and Mehmet (2008) harvest index is stable characteristic within a cultivar and is not affected by sowing density, similar to our results.

Acknowledgement

We thank Saaten Union GmbH for the opportunity to carry out the trials, and for any support. Special thanks go to Franz Xaver Zellner, who has supported the field trials.

REFERENCES

- Agrometeorology Bayern (2018): Weather data in Bavaria. Available at: <https://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L94IES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=10VER48553&p4=4D078O1691> (last updated 01 January 2018, verified 1 February 2018).
- BAES (2018): Austrian descriptive list of varieties 2018. Available at: <https://www.baes.gv.at/pflanzenarten/oesterreichische-beschreibende-sortenliste> (last updated 01 May 2018, verified 1 Jun 2018).
- Boquet D.J. (1990): Plant population density and row spacing effects on soybean at post-optimal planting dates. *Agronomy Journal*, 82: 59–64.
- Boroomandan P., Khoramivafa M., Haghi Y., Ebrahimi A. (2009): The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean (*Glycine max* L. Merr). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 12: 378–382.
- Egli D.B. (1993): Cultivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Research*, 32: 147–158.
- Epler M., Staggenborg S. (2008): Soybean yield and yield component response to plant density in narrow row systems. *Crop Management*, 7.
- FAO (2018): Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Available at: <http://gaez.fao.org/Main.html> (verified 1 Jun 2018).
- Fehr W.R., Caviness C.E., Burmood D.T., Pennington J.S. (1971): Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, 11: 929–933.
- Ferreira A.S., Balbinot J.A.A., Werner F., Zucareli C., Franchini J.C.r., Debiasi H. (2016): Plant density and mineral nitrogen fer-

<https://doi.org/10.17221/346/2019-PSE>

- tilization influencing yield, yield components and concentration of oil and protein in soybean grains. *Bragantia*, 75: 362–370.
- Hahn V., Miedaner T. (2013): Soybean Cultivation in the EU (Germany): Rewarding Cultivation without GMOs (100% practice). Frankfurt am Main, DLG-Verlag, 120.
- Herbert S.J., Litchfield G.V. (1984): Growth response of short-season soybean to variations in row spacing and density. *Field Crops Research*, 9: 163–171.
- De Luca M.J., Nogueira M.A., Hungria M. (2014): Feasibility of lowering soybean planting density without compromising nitrogen fixation and yield. *Agronomy Journal*, 106: 2118–2124.
- LI-COR (1992): LAI-2000 Plant Canopy Analyzer: Instruction Manual. Lincoln.
- Littell R.C. (2004): SAS System for Mixed Models. 6th Edition. Cary, SAS Institute, 633.
- Mehmet O.Z. (2008): Nitrogen rate and plant population effects on yield and yield components in soybean. *African Journal of Biotechnology*, 7: 4464–4470.
- Pazdernik D.L., Killam A.S., Orf J.H. (1997): Analysis of amino and fatty acid composition in soybean seed, using near infrared reflectance spectroscopy. *Agronomy Journal*, 89: 679–685.
- Piepho H.P., Buchse A., Emrich K. (2003): A Hitchhiker's guide to mixed models for randomized experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189: 310–322.
- Popovic V., Vidić M., Jocković Đ., Ikanović J., Jaksic S., Cvijanovic G. (2012): Variability and correlations between yield components of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Genetics*, 44: 33–45.
- Rahman M.M., Hossain M., Bell R.W. (2011a): Plant density effects on growth, yield and yield components of two soybean varieties under equidistant planting arrangement. *Asian Journal of Plant Sciences*, 10: 278–286.
- Rahman M.M., Hossain M.M., Anwar M.P., Juraimi A.S. (2011b): Plant density influence on yield and nutritional quality of soybean seed. *Asian Journal of Plant Sciences*, 10: 125–132.
- Ribeiro A.B.M., Bruzi A.T., Zuffo A.M., Zambiazzi E.V., Soares I.O., Vilela N.J.D., Pereira J.L. de A.R., Moreira S.G. (2017): Productive performance of soybean cultivars grown in different plant densities. *Ciência Rural*, 47: 81–89.
- Sojafoedering (2018): 25% Growth: Record Acreage for Soybean in Germany. Available at: <https://www.sojafoederring.de/> (last updated 20 Sep 2018, verified 1 Dec 2018).
- Sojafoedering (2019): Growing Counsellor for Soybean in Germany. Available at: <https://www.sojafoederring.de/> (last updated 20 Sep 2017; verified 10 Jan 2019).
- Souza R., Teixeira I., Reis E., Silva A. (2016): Soybean morphophysiology and yield response to seeding systems and plant populations. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 76: 3–8.
- Spader V., Deschamps C. (2015): Grain yield of soybean cultivars using different densities and sowing dates in a high-altitude region of south Brazil. *Ciências Agrárias*, 36: 1823–1834.
- Spaeth S.C., Randall H.C., Sinclair T.R., Vendeland J.S. (1984): Stability of soybean harvest index. *Agronomy Journal*, 76: 482–486.
- Weber C.R., Shibles R.M., Byth D.E. (1966): Effect of plant population and row spacing on soybean development and production. *Agronomy Journal*, 58: 99–102.
- Wells R. (1991): Soybean growth response to plant density: Relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. *Crop Science*, 31: 755–761.
- Yilmaz N. (2003): The effects of seed rate on yield and yield components of soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 6: 373–376.
- Yunusa I.A.M., Ikawelle M.C. (1990): Yield response of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) to planting density and row spacing in a semi-arid tropical environment. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 164: 282–288.

Received on June 20, 2019

Accepted on October 7, 2019

Published online on December 4, 2019

5 ENVIRONMENTAL EFFECTS ON SOYBEAN (*GLYCINE MAX* (L.) MERR) PRODUCTION IN CENTRAL AND SOUTH GERMANY



agronomy



Article

Environmental Effects on Soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) Production in Central and South Germany

Olena Sobko ^{1,*}, Andreas Stahl ^{2,3}, Volker Hahn ⁴, Sabine Zikeli ⁵, Wilhelm Claupein ¹ and Sabine Gruber ¹

¹ Institute of Crop Science, University of Hohenheim, Fruwirthstraße 23, 70599 Stuttgart, Germany; Wilhelm.Claupein@uni-hohenheim.de (W.C.); Sabine.Gruber@uni-hohenheim.de (S.G.)

² Department of Plant Breeding, IFZ Research Centre for Biosystems, Land Use and Nutrition, Justus Liebig University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Giessen, Germany; Andreas.Stahl@julius-kuehn.de

³ Institute for Resistance Research and Stress Tolerance, Federal Research Centre for Cultivated Plants, Julius Kühn-Institut (JKI), Erwin-Baur-Straße 27, 06484 Quedlinburg, Germany

⁴ State Plant Breeding Institute, University of Hohenheim Fruwirthstraße 21, 70593 Stuttgart, Germany; volker.hahn@uni-hohenheim.de

⁵ Center for Organic Farming, University of Hohenheim, Fruwirthstraße 14, 70599 Stuttgart, Germany; sabine.zikeli@uni-hohenheim.de

* Correspondence: olena.sobko@uni-hohenheim.de; Tel.: +49-8761-729-55913

Received: 10 October 2020; Accepted: 21 November 2020; Published: 24 November 2020



Abstract: The cultivation area of soybean (*Glycine max* (L.) Merr) is increasing in Germany as a way to ensure self-sufficiency through its use as feed and food. However, climatic conditions needed for soybean cultivation are not appropriate in all parts of the country. The objective of this study was to determine the influence of solar radiation, temperature, and precipitation on soybean seed productivity and quality in central and south Germany. A multi-factorial field trial was carried out with three replicates at four locations in 2016 and five locations in 2017, testing 13 soybean varieties from the maturity groups MG 00 and MG 000. Considering all the tested factors, “variety” was highly significant concerning protein content ($\bar{O}$ 41.1% dry matter (DM)) and oil content ($\bar{O}$ 19.1% in DM), but not seed yield ($\bar{O}$ 40.5 dt ha⁻¹). The broad sense heritability of protein content was $H^2 = 0.80$ and of oil content $H^2 = 0.7$. Protein and oil content were significantly negatively correlated ($r = -0.82$). Seed yield was significantly positively correlated with solar radiation ($r = 0.32$) and precipitation ($r = 0.33$), but significantly negatively with Crop Heat Units (CHU) ($r = -0.42$). Over both experimental years, varieties from maturity group MG 00 were less significantly correlated with the tested environmental factors than varieties from maturity group MG 000. None of the environmental factors tested significantly increased the protein or oil content of soybean. In growing areas with heat periods during ripening, protein content tended to be higher than in cooler areas; in areas with high solar radiation during flowering, protein content tended to be reduced.

Keywords: soybean seed yield; protein content; oil content; crop heat units; precipitation; solar radiation

1. Introduction

Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), with its multiple uses, is one of the most important crops worldwide [1]. The high-quality of its protein makes it an important component of animal feed for both milk and meat production. Soybean oil is also used for human nutrition. As the demand for vegetarian and vegan food has increased, vegetable proteins and oils from soybeans have gained importance in recent years [2]. The world soybean production in 2017 was 352.6 million tons, of which 77% was GMO soybean [3,4]. The average soybean grain yield in the entire European Union in the years 2016–2017

(3.0 t ha⁻¹) was 10% higher than the yield in Germany (2.7 t ha⁻¹), 20 % lower than in the USA (3.4 t ha⁻¹), and about 13% lower than in Brazil (3.1 t ha⁻¹) [4]. The mean protein content in these trials (41.6%) was comparable to the global average protein content; for example, Brazil (40.9%), USA (41.4 %), and China (42.1%). The oil content in the trials (19.1%) was higher than the oil content in Brazil (18.7%), USA (18.8%), and China (16.8%) [5]. This confirms that the potential for both protein production and oil production via soybean cultivation in Germany gets little attention and consideration. The cultivation of GMO soybean is not permitted in Germany. For environmental and health safety reasons consumers in Germany prefer GMO-free products; this necessitates domestic production, but soy is not a traditional crop in Germany [6]. However, climate change and increasing temperatures in Central Europe offer opportunities to implement and extend soybean into non-traditional areas [1,7,8]. Soybean has a high heat demand. It can therefore only be lucratively cultivated in the southern, warmer parts of Germany [9]. Soybean is also historically a short-day plant, originating from regions with relatively high temperatures during the growing season [1], but breeding progress has made it possible to grow almost day-neutral soybean varieties [2,10]. The beginning of reproductive development (bud formation and flowering) is determined by the latitude and temperature sum of the growing area and genotype (E-gene alleles) [11]. Changes in day length and prevailing daily temperature are of primary importance for these steps [12]. The soybean starts to flower when the length of daylight becomes shorter than critical photoperiod at the growing location [10]. The flowering period and pod filling are also highly sensitive to water stress [13], and water shortages during these periods can lead to significant yield losses up to 20–25 % [4,14]. Soybeans require a precisely determined heat sum during the growing season to mature; for example, >2400 Crop Heat Units (CHU) for very early MG 000 varieties, 2400–2600 CHU for early MG 00 varieties, and well over 3200 CHU for late maturing varieties [15]. In Germany, early and very early varieties of maturity groups MG 00 and MG 000, which were developed to suit our climatic conditions, are cultivated [10]. In the USA, in contrast, varieties from later maturity groups—MG V, MG IV, genotypes with highest, to MG 0, genotypes with the lowest requirement for heat sum, are grown [16].

On average, soybean seeds contain 18–25% oil [2]. The by-product of oil extraction is soybean meal, containing 40–44% crude protein [17]. The concentrations of these two components are genetically predetermined but can vary depending on the environment [18]. The protein and oil content of soybean seeds are negatively correlated [19,20]. A higher temperature during reproductive growth tends to result in higher oil content [21,22]. The effect of temperature on protein content, however, is not yet clear. There is evidence that warm temperatures (>20 °C to <28 °C) during the growing period increase the protein content of soybean [23,24]. However, a negative correlation between temperature and protein content has also been reported [25]. The effects of precipitation on protein and oil content of soybean seeds seem to be inconsistent; there is a positive correlation between precipitation during the growing season and oil content, but a negative correlation between precipitation and protein content [26,27]. Also, a negative correlation of both traits with precipitation has been reported [25].

To meet the demands of protein for food and feed and for soy oil by domestically produced soybeans, it is important to know in which growing areas varieties from different maturity groups (MG 00 and MG 000) develop their best potential. Political decisions and commercial demand as well as preferences in Germany call for an expansion of organic agricultural production [28]. Soybean is one of the few crops that delivers comparable productivity under both organic and conventional farming [29]. The regions where soybean with a high protein content cannot be successfully grown, would be better suited for oil production, especially in organic farming, since there is still no suitable organic oil crop in Germany. The objective of this study was to determine the effects of solar radiation, temperature, and precipitation on soybean seed productivity, protein, and oil content in Germany. The following hypotheses were tested:

- (1) High solar radiation ensures high grain yield.
- (2) Insufficient precipitation leads to a high oil content and low protein content of soybean seeds.
- (3) High temperatures during the growing season increase the protein content of soybean seeds.

2. Materials and Methods

2.1. Cultivation

The field experiments were conducted in two years and at four locations in Germany in 2016—Grünseiboldsdorf: GSD; Eckartsweier: EKW; Wetterau: WET; Guesten: GUS; and five locations in 2017—Added Rossleben: ROS (Table 1).

Table 1. Characterization of locations and cropping details.

Trial	Location	GPS Position	Date of Sowing	Method of Sowing	Date of Harvest	Preceding Crop [§]	Harvest Area, m ⁻²	Precipitation and Temperature ^{§§}	
								mm	°C
2016									
GSD2016	Grünseiboldsdorf	48°29′ N 11°56′ E	22 April	Drill	17 September	WW	10.4	814	7.7
EKW2016	Eckartsweier	48°32′ N 7°52′ E	29 April	Single seed	13 September	WW	7.8	726	9.9
WET2016	Wetterau	50°24′ N 8°39′ E	22 April	Single seed	20 September	WW	15.0	655	9.3
GUS2016	Guesten	50°95′ N 6°43′ E	20 April	Drill	22 September	SB	10.5	660	10.0
2017									
GSD2017	Grünseiboldsdorf	48°29′ N 11°56′ E	24 April	Drill	24 September	WW	10.4	814	7.7
EKW2017	Eckartsweier	48°32′ N 7°52′ E	24 April	Single seed	16 September	WW	7.8	726	9.9
WET2017	Wetterau	50°22′ N 8°39′ E	25 April	Single seed	14 October	WW	15.0	655	9.3
GUS2017	Guesten	50°96′ N 6°42′ E	25 April	Drill	27 September	SB	10.5	660	10.0
ROS2017	Rosslieben	51°18′ N 11°26′ E	5 May	Drill	16 October	C	10.5	532	9.4

[§] WW: winter wheat (*Triticum aestivum*), SB: sugar beet (*Beta vulgaris*), C: Canola (*Brassica napus*) ^{§§} long-term means (last 20 years).

The soil texture at all locations was sandy loam with optimal pH 6.5–6.9. The experimental design at all locations was a randomized complete block design with three replicates and 13 varieties. The plot size was identical with harvest area (Table 1).

The seeds of all varieties were untreated and inoculated with HiStick[®] Soy (2×10^9 colony forming units per gram nitrogen fixing bacterium *Bradyrhizobium japonicum*); the application rate was 400 g per 100 kg of seeds). The seeding depth was 3–5 cm and seed rate was calculated to achieve plant density of 60–65 plants m^{−2}. In all years and at all locations, weeds and pests were controlled chemically according to the best management practices. For weed control at the GSD, WET, and EKW locations, the mixture of Centium[®] 36 CS (360 g l^{−1} Clomazone) 0.25 l ha^{−1} + Sencor WG (700 g kg^{−1} Metribuzin) 0.3 kg ha^{−1} + Spectrum (720 g l^{−1} Dimethenamid-P) 0.8 l ha^{−1} was applied as pre-emergence weed control. In the GUS location Artist[®] (240 g kg^{−1} Flufenacet, 175 g kg^{−1} Metribuzin) 2.0 l ha^{−1} + Centium[®] 36 CS (360 g l^{−1} Clomazone) 0.2 l ha^{−1} were additionally used in pre-emergence. In ROS, chemical weed control consisted of pre-emergence spraying of Stomp[®] Aqua (455 g l^{−1} Pendimethalin) 2.4 l ha^{−1} + Spectrum (720 g l^{−1} Dimethenamid-P) 1.4 l ha^{−1}. In 2016 at all locations Karate Zeon[®] (9, 4%) Lambda-Cyhalothrin was applied at 0.075 l ha^{−1} against butterfly painted lady (*Vanessa cardui*). In the second trial year, there was no infestation by this insect. No fungicides were used, as none are officially registered for soybeans in Germany and none of the diseases exceeded the threshold.

The study comprised five varieties from maturity group MG 00 and eight varieties from maturity group MG 000 (Table 2). All varieties were recommended for cultivation in Germany and were among the most widely-grown varieties (Merlin, Sultana) or were new promising varieties (Regina, Sculptor, Coraline) [30].

Table 2. Tested varieties according to year of registration and maturity group ¹.

Variety	Maturity Group (MG)	Year of Registration	Variety	Maturity Group (MG)	Year of Registration
Tourmaline	000/00	2013	Adsoy	000/0000	2012
ES Mentor	00	2009	Merlin	000	1997
SY Eliot	00	2013	Sultana	000	2009
Orion	00	1999	Viola	000	2015
Primus	00	2005	Sculptor	000	2017
			Lissabon	000	2008
			Regina	000	2016
			Coraline	000	2014

¹ it is approximately 12–14 days of difference in maturity between the maturity groups.

2.2. Data Collection

Seed yield was determined by combine harvesting at full maturity (R8 (full maturity) + 8–15 days) [31]. The water content of seeds was measured immediately after harvest, and seed yield per plot was corrected to 14% moisture in seed. Protein yield and oil yield were calculated by multiplying seed yield with their corresponding protein or oil content. From all plots at all locations, samples were taken (400–500 g intact soybean seeds) to determine the protein and oil content via near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS, Polytec PSSSHA03-2.1) [32].

Weather data was provided by the German weather service. The weather stations were a maximum of 5 km away from the trial fields (Table 3).

Table 3. Overview of weather conditions at the trial locations.

Trial	Pwv [§] , mm	SRwv [#] , kWh m ⁻²	CHUwv [†]	Pfs [¥] , mm	T _{night} at Flowering, °C	SRf [‡] , kWh m ⁻²	CHU at Maturity
GDS2016	396	566.2	2747	205.0	13.0	169.0	724
EKW2016	281	562.9	3102	77.0	14.4	155.6	761
WET2016	243	512.9	3020	81.3	13.1	148.4	759
GUS2016	321	421.2	3101	132.4	14.1	117.3	794
GDS2017	497	563.4	2664	206.4	13.1	203.3	565
EKW2017	253	556.6	3163	117.0	15.5	197.9	708
WET2017	466	498.9	2873	201.0	13.5	172.4	648
GUS2017	276	360.4	3063	134.3	14.7	150.9	671
ROS2017	365	520.8	2783	225.0	14.1	179.9	609

[§] Pwv—Total precipitation over entire vegetation period; [#] SRwv—Solar radiation over entire vegetation period; [†] CHUwv—Crop Heat Units over entire vegetation period; [¥] Pfs—Precipitation flowering-seed filling;

[‡] SRf—Solar radiation at flowering.

The total precipitation over the entire vegetation period (Pwv) was summed for each month, for the growing season (15 April–15 September), and for the critical period for drought stress (15 June to 15 August, R1–R6—Flowering-seed filling). The sum of solar radiation (SRwv) was calculated from the daily value in kWh m⁻² for the period from 15 April to 15 September in all trials and years. Solar radiation during flowering (SRf) is the sum of daily value solar radiation in kWh m⁻² from 1 June to 1 July. The sum of CHU for the entire vegetation period (CHUwv) was calculated according to Rossberg and Recknagel [15] for the period from 1 June to 15 September. Crop Heat Units (CHU) at maturity was determined for the period 15 August to 15 September. Temperature (T_{night}) at flowering is the average of temperatures for every night from R1 to R3 (15 June–31 July).

2.3. Data Analysis

We first calculated the mean of each individual variety for each trait in the respective environments. The means of individual varieties were then averaged across the environments by calculating the arithmetic mean. The normality of distribution and homogeneity of variance of residuals were checked graphically.

For computing broad sense heritability, we estimated the genetic variance in a full random model Equation (1) based on the variety means of each single environment. The standard error of entry means was estimated in a model that considers interactions with the variety as random and all other effects as fixed Equation (2). Analyses were carried out with the software R [33] using the packages lmerTest [34], lsmeans [35], and lme4 [36].

Equation (1):

$$P_{ikl} = \mu + G_i + Y_k + L_l + (GL)_{il} + (GY)_{ik} + (YL)_{lk} + e_{ikl}, \quad (1)$$

where P_{ikl} is the observed phenotype of the i th variety in the k th year at the l th location, G_i is the random effect of the i th variety, Y_k the random effect of the k th year and L_l the random effect of the l th location, $(GL)_{il}$ is the random effect of the i th variety in the l th location, $(GY)_{ik}$ is the random effect of the i th variety in the k th year, and $(YL)_{lk}$ is the random effect term of the l th location in the k th year. e_{ikl} denotes the error term.

Equation (2):

$$P_{ikl} = \mu + \mathbf{g}_i + \mathbf{y}_k + \mathbf{l}_l + (GL)_{il} + (GY)_{ik} + e_{ikl}, \quad (2)$$

where P_{ikl} is the observed phenotype of the i th variety in the k th year at the l th location, $\mathbf{g}_i$ is the fixed effect of the i th variety, $\mathbf{y}_k$ the fixed effect of the k th year and $\mathbf{l}_l$ the fixed effect of the l th location. $(GL)_{il}$ is the random effect of the i th variety in the l th location, and $(GY)_{ik}$ is the random effect of the i th variety in the k th year. Fixed effects are written in bold lowercase letters. e_{ikl} denotes the random error term.

Based on the genetic variance (1) and standard error (2) broad sense heritability was computed as described in (3) [37].

Equation (3):

$$H^2 = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_G^2 + SE^2}, \quad (3)$$

where σ_G^2 is the genetic variance derived from the full random model (1) and SE^2 is the squared standard error of the difference between the means, derived from (2).

Interrelationships between environmental impacts and seed properties were determined by calculating the Pearson coefficients of correlation (r).

3. Results

The analysis of variance showed highly significant effects of variety on protein and oil content (Table 4). The interaction of year $\times$ location was also highly significant for protein and oil content.

Table 4. Analysis of variance (based on Equation (1)) and heritability (Equation (3)) for seed yield and quality over five locations and two trial years.

	<i>p</i> Value				
	Seed Yield	Protein Content	Oil Content	Protein Yield	Oil Yield
Variety	0.14	0.0001 ***	0.002 **	0.13	0.09
Year	0.28	1.0	1.0	0.7	0.19
Location	0.32	1.0	1.0	0.87	0.05 *
Year $\times$ variety	0.02 *	0.7	0.104	0.01 *	0.04 *
Location $\times$ variety	0.43	0.5	1.0	0.18	0.7
Year $\times$ location	0.01 *	0.0001 ***	0.0001 ***	0.0001 ***	0.8
Heritability (H^2), %	0.55	0.80	0.69	0.55	0.61

Significant codes, p =: < 0.001 *** 0.01 ** 0.05 *.

The highest heritability was estimated for protein content with $H^2 = 0.80$. The heritabilities for seed and protein yields were $H^2 = 0.55$ and for oil yield $H^2 = 0.61$.

The mean seed yield of varieties from maturity group MG 00 was higher than that from maturity group MG 000 (Table 5). The means of protein and oil content were almost equal for both maturity groups.

Table 5. Soybean seed yield (arithmetic means) and seed properties' means over five locations, 13 varieties and two trial years (2016, 2017) in Germany, $p < 0.05$.

	MG [§] 00		MG 000		MG 00 and 000	
	Mean	SD ^{§§}	Mean	SD	Mean	SD
Seed yield [t ha ⁻¹]	3.58	±0.49	3.39	±0.60	3.48	±0.57
Protein content [% DM [†]]	41.08	±1.97	41.05	±1.58	41.06	±1.74
Oil content [% DM]	19.16	±1.12	19.11	±0.93	19.14	±1.00
Protein yield [t ha ⁻¹]	1.47	±0.22	1.40	±0.26	1.44	±0.25
Oil yield [t ha ⁻¹]	0.69	±0.09	0.65	±0.11	0.67	±0.10

[§] MG—Maturity group; ^{§§} SD—Standard deviation, [†] DM—Dry matter.

The responses of varieties grouped by maturity groups and depending on year revealed significant correlations ranging from $r = 0.25$ to $r = 0.74$ (Table 6). In Table 6, the effects of year are shown.

Table 6. Correlations between environmental conditions and seed traits of soybean (*Glycine max*) across five locations and 13 varieties in Germany in the years 2016 and 2017 respectively, and averaged over both years, $p < 0.05$.

	Precipitation, mm	Solar Radiation, kWh m ⁻²	CHU	PFS [‡] , mm	T _{night} at Flowering, °C	SRf [‡] , kWh m ⁻²	CHU at Maturity
Maturity group 00							
Seed yield							
2016	−0.04	0.64 *	0.01	−0.18	0.35	0.50 *	−0.31
2017	0.14	0.49 *	−0.25	0.41 *	−0.08	0.32	−0.16
mean	0.18	0.46 *	−0.19	−0.25	0.19	0.50 *	−0.37 *
Protein content							
2016	0.20	−0.03	−0.16	0.21	−0.10	0.09	−0.07
2017	−0.16	−0.10	0.18	0.13	0.16	−0.32	0.31
Mean	−0.12	−0.07	0.12	0.07	0.06	−0.23	0.22
Oil content							
2016	−0.74 *	−0.21	0.51 *	−0.67 *	0.04	−0.26	0.36
2017	0.26	0.03	−0.24	−0.07	−0.28	0.25	−0.35
Mean	−0.06	0.02	0.04	−0.38 *	−0.27	−0.13	0.12
Protein yield							
2016	0.03	0.63 *	−0.01	−0.14	0.33	0.50 *	−0.32
2017	0.06	0.36	−0.13	0.39	−0.01	0.13	−0.02
Mean	0.13	0.40 *	−0.14	0.26	0.19	0.38 *	−0.27
Oil yield							
2016	−0.21	0.58 *	0.16	−0.37	0.37	0.42	−0.21
2017	0.29	0.51 *	−0.36	0.36	−0.23	0.47 *	−0.34
Mean	0.17	0.49 *	−0.17	0.08	0.09	0.46 *	−0.32 *
Maturity group 000							
Seed yield							
2016	0.60 *	0.19	−0.67 *	0.66 *	−0.49 *	0.32	−0.49 *
2017	0.22	0.41 *	−0.30	0.39 *	−0.17	0.30	−0.25
Mean	0.41 *	0.26 *	−0.47 *	0.59 *	−0.12	0.45 *	−0.46 *

Table 6. Cont.

	Precipitation, mm	Solar Radiation, kWh m ⁻²	CHU	PFS †, mm	T _{night} at Flowering, °C	SRf ‡, kWh m ⁻²	CHU at Maturity
Protein content							
2016	0.24	0.21	−0.23	0.21	−0.05	0.22	−0.23
2017	−0.22	−0.18	0.23	0.10	0.21	−0.41 *	0.35 *
Mean	−0.17	−0.07	0.14	0.05	0.09	−0.25 *	0.25 *
Oil content							
2016	−0.64 *	−0.33	0.44 *	−0.54 *	−0.03	−0.35	0.39 *
2017	0.31	0.16	−0.30	−0.01	−0.31	0.36 *	−0.41 *
Mean	−0.02	0.05	−0.003	−0.32 *	−0.31 *	−0.12	0.13
Protein yield							
2016	0.62 *	0.22	−0.69 *	0.68 *	−0.49*	0.35*	−0.52 *
2017	0.13	0.32 *	−0.22	0.39 *	−0.10	−0.16	−0.13
Mean	0.35 *	0.22	−0.43 *	0.58 *	−0.09	0.38 *	−0.39 *
Oil yield							
2016	0.48 *	0.12	−0.60 *	0.57 *	−0.52 *	0.26	−0.42 *
2017	0.33 *	0.45*	−0.40 *	0.38 *	−0.28	0.41 *	−0.38 *
Mean	0.43 *	0.28 *	−0.50 *	0.52 *	−0.22	0.44 *	−0.45 *

† Pfs—Precipitation flowering–seed filling; ‡ SRf—Solar radiation at flowering; * $p < 0.05$.

Varieties from the maturity group MG 000 were significantly correlated with environmental conditions compared to varieties from the maturity group MG 00. Solar radiation was the main factor leading to an increase in seed yield and thus to increases in protein yield and oil yield. Precipitation often significantly increased yield and thus protein yield and oil yield in MG 000 varieties. Crop Heat Units, which had no significant effects on the observed traits in MG 00 varieties, were negatively correlated with seed yield, protein yield, and oil yield in MG 000 varieties. The response of MG 000 varieties to precipitation correlated positively with seed yield, protein yield, and oil yield. Crop Heat Units (CHU) and CHU at maturity correlated negatively with yield and thus protein and oil yields.

There was a strong negative correlation ($r = -0.82^{***}$) between oil content and protein content over all varieties, locations, and trial years (Figure 1a).

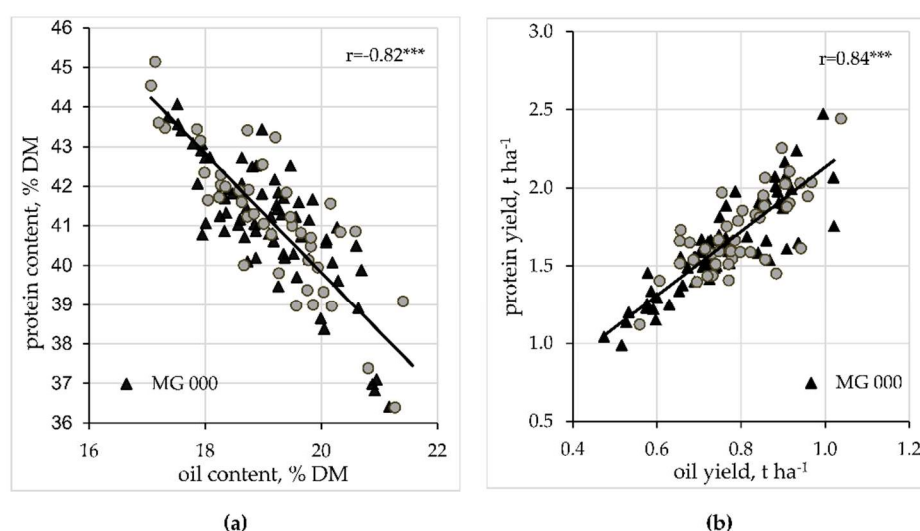


Figure 1. Correlation between protein content and oil content (a) and protein yield and oil yield (b) of soybean. Figure shows results from five locations, 13 varieties from the maturity groups MG 00 and MG 000; two trial years (2016, 2017). *** $p < 0.001$.

Protein content ranged from 35.4% to 45.1% with a mean of 41.1%. Oil content ranged from 17.1% to 21.6% with a mean of 19.1% (Table 5). The correlation between protein yield and oil yield was positive at $r = 0.84$, at the highly significant level ($p < 0.01$) (Figure 1b).

The correlation between seed yield and protein content was low and not significant (data not shown). In contrast, seed yield and oil content were significantly negatively correlated at $r = -0.28$ *** (Figure 2).

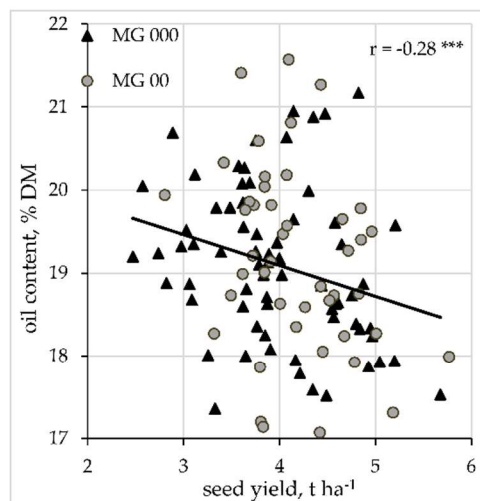


Figure 2. Correlation between seed yield and oil content of soybean. Figure shows results from 13 varieties from the maturity groups MG 00 and MG 000 at five locations and two trial years (2016, 2017). *** $p < 0.001$.

4. Discussion

The high heritability of traits contributes to genetic progress, a characteristic that informs the selection of the most suitable genotypes as future varieties [17,38]. The conditions under which soybeans are grown, including the environment, determine the breeding direction, and this in turn depends on the geographic regions and the proposed cultivation of specific varieties [39,40]. Weather conditions differed in both trial years (Table 3); only night temperatures and solar radiation did not vary greatly over all locations. On average, the year 2017 was moister and cooler than 2016. Crop Heat Units at maturity in 2017 were approximately 60–160 units lower than in 2016. Solar radiation at flowering and seed filling however, was on average 30 kWhm^{-2} higher in 2017 than in 2016. As a result, the soybean production properties correlated with environmental factors with varying degrees of intensity (Table 6).

The most critical period in the entire vegetation period of soybean concerning water availability and sufficiency is R4–R6 (pod formation and seed filling) [14,18,21,41]. The results of the current study, with a positive correlation ($r = 0.47$) between seed yield and precipitation during flowering–seed filling are in accordance with existing literature. The early maturing varieties of MG 000 were more sensitive to increases in precipitation in the period R4–R6 than MG 00 varieties in each trial year (Table 6). This may have been due to the shorter seed filling period and shorter duration of individual periods of vegetation growth of soybean from maturity group 000. This agrees with Souza et al. [42], who compared MG 00 (early ripening) and II (later ripening) varieties in Brazil and also with Chen und Wiatrak [41], who performed experiments with MG IV to VIII in the USA. High solar radiation at flowering increased seed yield in the current study over the two experimental years independent of the maturity group (Table 6), similar to findings of other researchers [13,39,43]. The intensification of solar radiation at the time of flowering could stimulate photosynthesis and thus raise the production of assimilates, leading to an increase in seed yield by increasing the number of pods per reproductive node [39]. Similar results ($r = 0.37$) for five maturity groups in the USA have also been reported by

Kane und Grabau 1992 [44]. At the same time, high temperatures at certain stages of development (R3–R6) can have a negative impact on seed yield and quality characteristics of soybean. For example, Dornbos and Mullen and Gibson and Mullen [45,46] reported that high temperatures ($>29^{\circ}\text{C}$) led to a reduction in number of seeds per plant and in seed weight. The negative correlation between CHU at maturity and seed yield in our study ($r = -0.42$) was higher for the early maturing varieties (MG 000). MG 000 varieties can mature in the middle of September in Germany, whereas MG 00 varieties are usually harvested 10–12 days later. High temperatures during the final period of ripening may interfere with the physiological maturing process and simply lead to desiccation, not perfect maturing [9,47].

As previous studies suggest, the protein content of soybean seeds is influenced by day and night temperatures and varies depending on their stage of development [18,47]. Temperatures of about 20°C correlated significantly positively with soybean protein content. Our results indicate that higher temperatures at maturity may lead to higher protein content (Table 6). The protein content of soybean seeds increased with increasing mean temperatures $>28^{\circ}\text{C}$ and remained constant $<28^{\circ}\text{C}$ [18]. Compared to our studies, previous studies quoted above examined varieties with a much longer vegetation period (MG up to VIII) and in locations at a much lower latitude ($<29.4^{\circ}\text{S}$). In our study, the early ripening varieties (MG 00 and MG 000) reacted more rapidly to the higher temperatures they experienced, which have begun to occur more often in Germany.

Oil content was the only seed property that correlated negatively with T_{night} at development stage R1–R3, similar to previous results [48–50]. However, soybean studies at 23 locations in Argentina indicated the opposite [27]. Such differences in results were likely due to the fact that those studies [25] were conducted in different regions in Argentina while other three were performed in the USA (Iowa) [48–50]; the varieties examined, therefore, belonged to different maturity groups (MG IV–V) (middle late) and II (late).

The time during the growing season when drought occurs can affect the intensity of its influence on protein and oil content [21]. It is well established from studies in the USA, South America, Central Europe, and Russia that oil content is negatively correlated with precipitation at flowering-seed filling phase [14,20,23,47]. Our studies, conducted in a region (Germany) previously considered not suitable for soybean cultivation (because only few varieties were able to ripen at the low CHU), is in line with these results (Table 6). A much stronger negative correlation, as compared to the average of both years, was observed in the dry year 2016 compared to 2017 (Table 6). It is possible that if the season were already dry, further water deficits at this stage could have had a stronger increasing effect on the oil content. If water deficiency occurred at R5–R6, soybean seeds did not fully develop and did not reach their variety-specific size [42,49,51,52]. The transfer processes of nutrients (first of all carbohydrate) and thus seed quality were impaired [14,47], and the assimilates could not be completely converted into protein and oil [52]. However, the protein and oil content are negatively correlated, so the protein content of soybean seeds increased by 3–5% under drought stress then oil content decreased by 2–3% compared to seeds of control plants with optimal water supply [48]. Protein formation in soybean seeds starts about 10–15 days earlier than that of fats [20]; when drought becomes more severe, protein synthesis continues but nutrients for oil are exhausted [21]. From a biochemical point of view, this can be linked to the activation of superoxide, which, in a drought, promotes the accumulation of protein more than that of oil [53]. Such a phenomenon is already known from cereals; when under drought stress, starch enzyme activity is more strongly affected than enzyme for protein formation [54]. Therefore, at drier sites and/ or at locations where drought periods can be expected, varieties that have been selected for high oil content and oil yield should not be grown; rather, this production objective should be pursued at more humid locations. The negative correlation between precipitation at flowering-seed filling and oil content was only detected under dry conditions; under more humid conditions we could not detect this effect (trial year 2017).

Negative correlations of oil content with protein content of soybeans have been reported for soybean since the mid-1960s [17]. The highest negative correlation between protein and oil content was found in the European early maturing genotypes (0-0000); for example, almost $r = -0.9$ in Germany [17],

$r = -0.79$ in Austria [23], and $r = -0.83$ in Slovenia [55]. According to investigations in Russia over 27 years, this correlation was on average $r = -0.53$ [20] and in the Midwest of the USA $r = -0.64$ [56]. Piper und Boote analyzed 1863 varieties from 10 maturity groups at 60 locations throughout the USA and documented a correlation of $r = -0.43$ [18]. This strong negative correlation between protein content and oil content was also seen in our results $r = -0.82$ (average over only early maturing MG 00 and MG 000 varieties—Figure 1a), as typical for Central Europe. The reasons for the strong negative correlation between protein and oil content are not completely clear. These two properties are determined by the same combination of genes and it is difficult to do plant breeding work only to increase of one of these properties without leaving the other unchanged [20,57,58]. However, the synthesis of protein and oil in soybean seeds utilize the same carbon metabolism, and the synthesis processes interact with each other [59]. Therefore, competition for carbon can develop, and this is reflected in a negative correlation.

If the aim is to increase total soybean protein production in Germany, increasing seed yield would increase the amount of protein per unit area. In this context, the phenotypic correlations of seed yield with protein and oil content are important. Though seed yield correlated negatively with protein content but positively with oil content in the common studies [17,56], our investigation did not find a significant correlation of seed yield with protein content; this is similar to the findings of Whaley und Eskandari [40]. Despite its importance, there is no clear evidence of a relationship between seed yield and protein content. Test results from Germany provide information about a low and negative correlation [17] while in the USA a low but positive correlation has been calculated [22]. This correlation is influenced by year and weather/soil conditions in the growing area [23]. Such a regulation process between protein content and seed yield is known from wheat [60]. Therefore, genotypic variation together with environment provides many breeding possibilities for the adaptation of new varieties [40]. The low negative correlation between seed yield and oil content in our study contrasts with other available results [22,51]. It is essential to take the findings of referenced studies into consideration when planning the production, especially the choice of varieties, of certain soybean products such as soybean meal, soybean oil or tofu, and other foodstuffs, in different growing areas of a country with a temperate climate.

Time to maturity, drought tolerance, and heat tolerance are important traits to consider in adapting soybean varieties to different growing environments. Since the levels of protein content and oil content of the maturity groups MG 00 and MG 000 barely differed, and since the seed yields of MG 00 varieties trended higher than those of MG 000 varieties, MG 00 varieties should preferentially be cultivated and bred in regions suitable either for protein or oil production. To select for varieties with high seed yield and with long ripening period, such as the tested MG 00 varieties, the testing should occur in regions with comparatively high solar radiation (for example location Eckartsweier). The late ripening varieties from MG 0 would also be appropriate for these locations. In regions with comparatively high precipitation, MG 000 varieties would be suitable because of their high seed yields and therefore high protein and oil yields (for example Grünseiboldsdorf, Wetterau, and Rossleben). If MG 00 varieties were cultivated in drier areas (such as Eckartsweier and Guesten) the oil content would be higher. High temperatures at maturation would result in higher protein content in MG 000 varieties (Eckartsweier, Wetterau and Grünseiboldsdorf). The following table ranks the tested soybean varieties according to their adaption to locations with different environmental properties in Germany (Table 7).

Table 7. Classification of soybean varieties according to their adaption to different locations in Germany.

Location	MG 00 Varieties	MG 000 Varieties
	Suitable for High	
dry	oil content	oil content
wet	no effect	yield
warm	yield	protein content
cool	no effect	no effect
high solar radiation	yield	yield

5. Conclusions

Environmental parameters such as solar radiation, temperature, and precipitation, in addition to breeding progress, will determine the success of soybean production in Germany. It is necessary to place the varieties in suitable growing environments according to the direction of use to achieve the highest performance. Regions with high solar radiation and ample precipitation are suitable for producing high seed, protein, and oil yields of soybean using varieties from MG 00 and MG 000 maturity groups. Dry growing areas should be selected for oil production as a possible supply of vegetable oil, especially in organic farming. If production is concentrated on high protein content, the MG 000 varieties should be grown in regions where temperatures remain high during ripening. This knowledge can be used as a tool to expand soybean cultivation to the dry eastern Germany and northern German cool regions. Domestically grown soy products can then meet the growing demand for vegan and vegetarian food.

Author Contributions: O.S.: conceptualization, data collection, data evaluation, main writing and structuring of original draft; A.S. conceptualization, data evaluation; V.H. conceptualization, review and editing; S.Z. conceptualization, review and editing; W.C. conceptualization, review and editing; S.G. contributor role, conceptualization, review and editing, supervision. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: We thank Saaten Union GmbH for the opportunity to carry out the trials, and for all support. Special thanks go to all research institutions, who has realized the field trials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Hahn, V.; Miedaner, T. *Soybean Cultivation in the EU. Rewarding Cultivation Without GMOs; 100% Practice*; in German; DLG-Verlag: Frankfurt am Main, Germany, 2013; ISBN 9783769020199.
2. Singh, G. (Ed.) *The Soybean. Botany, Production and Uses*; CABI: Wallingford, CT, USA, 2010; ISBN 9781845936440.
3. ISAAA. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops. Available online: <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/52/executivesummary/default.asp> (accessed on 23 January 2020).
4. FAOSTAT. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed on 3 November 2019).
5. Grieshop, C.M.; Fahey, G.C. Comparison of quality characteristics of soybeans from Brazil, China, and the United States. *J. Agric. Food Chem.* **2001**, *49*, 2669–2673. [CrossRef] [PubMed]
6. EST GmbH. Soybeans—Global Volume Distribution and Volume Flows. Available online: <http://www.sojatoaster.com/hintergrundinfos/sojaanbau-globale-mengenverteilung-und-mengenstroeme/> (accessed on 23 January 2020).
7. Sojafoederring. Available online: <https://www.sojafoederring.de/aktuell/aktuelle-kurzmeldungen/> (accessed on 22 January 2020).
8. Jongman, R.H.G.; Bunce, R.G.H.; Metzger, M.J.; Mücher, C.A.; Howard, D.C.; Mateus, V.L. Objectives and applications of a statistical environmental stratification of Europe. *Landsc. Ecol.* **2006**, *21*, 409–419. [CrossRef]
9. Leithold, G.; Schulz, F.; Franz, K.-P. Suitability of short-seasoned soybeans for cultivation on an organic marginal site, taking into account different row spacing (in German). *Crop Sci.* **2003**, *1*, 21–28.
10. Berschneider, J. Chances and Limitations of European Soybean Production: Market Potential Analysis. Master's Thesis, Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany, 2016.
11. Jia, H.; Jiang, B.; Wu, C.; Lu, W.; Hou, W.; Sun, S.; Yan, H.; Han, T. Maturity group classification and maturity locus genotyping of early-maturing soybean varieties from high-latitude cold regions. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e94139. [CrossRef] [PubMed]
12. Boerma, H.R.; Specht, J.E. (Eds.) *Soybeans. Improvement, Production, and Uses*, 3rd ed.; American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 2004; ISBN 978-0-89118-266-5.

13. Jones, P.G.; Laing, D.R. The effects of phenological and meteorological factors on soybean yield. *Agric. Meteorol.* **1978**, *19*, 485–495. [CrossRef]
14. Brevedan, R.E.; Egli, D.B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Sci.* **2003**, *43*, 2083. [CrossRef]
15. Roßberg, D.; Recknagel, J. Investigations on the suitability of soybean cultivation in Germany (in German). *J. Cult. Plant* **2017**, *69*, 137–145.
16. Miersch, M. Soybean Cultivation in North America—Web Links. Available online: https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2016/12/Sojainfo_18_2016_Sojanbau_USA_Weblinks1.pdf (accessed on 14 March 2020).
17. Kurasch, A.K.; Hahn, V.; Leiser, W.L.; Starck, N.; Würschum, T. Phenotypic analysis of major agronomic traits in 1008 RILs from a diallel of early European soybean varieties. *Crop Sci.* **2017**, *57*, 726. [CrossRef]
18. Piper, E.L.; Boote, K.I. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **1999**, *76*, 1233–1241. [CrossRef]
19. Hurburgh, C.R.; Paynter, L.N.; Schmitt, S.G. Quality characteristics of Midwestern soybeans. *Appl. Eng. Agric.* **1987**, *3*, 159–165. [CrossRef]
20. Novikova, L.Y.; Seferova, I.V.; Nekrasov, A.Y.; Perchuk, I.N.; Shelenga, T.V.; Samsonova, M.G.; Vishnyakova, M.A. Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. *Vavilov J. Genet. Breed.* **2018**, *22*, 708–715. [CrossRef]
21. Carrera, C.; Martínez, M.J.; Dardanelli, J.; Balzarini, M. Water deficit effect on the relationship between temperature during the seed fill period and soybean seed oil and protein concentrations. *Crop Sci.* **2009**, *49*, 990. [CrossRef]
22. Mourtzinis, S.; Gaspar, A.P.; Naeve, S.L.; Conley, S.P. Planting date, maturity, and temperature effects on soybean seed yield and composition. *Agron. J.* **2017**, *109*, 2040. [CrossRef]
23. Vollmann, J.; Fritz, C.N.; Wagentristl, H.; Ruckenbauer, P. Environmental and genetic variation of soybean seed protein content under Central European growing conditions. *J. Sci. Food Agric.* **2000**, *80*, 1300–1306. [CrossRef]
24. Sudaric, A.; Simic, D.; Vratarić, M. Characterization of genotype by environment interactions in soybean breeding programmes of southeast Europe. *Plant Breed.* **2006**, *125*, 191–194. [CrossRef]
25. Maestri, D.M.; Labuckas, D.O.; Meriles, J.M.; Lamarque, A.L.; Zygadlo, J.A.; Guzmán, C.A. Seed composition of soybean cultivars evaluated in different environmental regions. *J. Sci. Food Agric.* **1998**, *77*, 494–498. [CrossRef]
26. Kumar, V.; Rani, A.; Solanki, S.; Hussain, S.M. Influence of growing environment on the biochemical composition and physical characteristics of soybean seed. *J. Food Compos. Anal.* **2006**, *19*, 188–195. [CrossRef]
27. Carrera, C.; Martínez, M.J.; Dardanelli, J.; Balzarini, M. Environmental variation and correlation of seed components in nontransgenic soybeans: Protein, oil, unsaturated fatty acids, tocopherols, and isoflavones. *Crop Sci.* **2011**, *51*, 800. [CrossRef]
28. BMEL. “Organic Farming—Looking Forwards” Strategy: Towards Greater Sustainability in Germany. Available online: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/OrganicFarmingLookingForwards.pdf?__blob=publicationFile (accessed on 14 March 2020).
29. Sojafoerderring. Bio-Soybean Info Bavaria. Available online: <https://www.sojafoerderring.de/aktuell/newsletter/bio-soja-info-bayern/> (accessed on 14 March 2020).
30. Federal Office for Plant Varieties. Descriptive List of Varieties: Cereals, Maize Oil and Fiber Crops, Leguminous, Beet Root and Catch Crops. (In German). Available online: https://www.bundessortenamt.de/apps6/bsa_bsl/public/de/result (accessed on 25 January 2020).
31. Fehr, W.R.; Caviness, C.E. Stage of development descriptions for soybeans, Glycine Max (L.) Merrill. *Crop Sci.* **1971**, *11*, 929–931. [CrossRef]
32. Pazdernik, D.L.; Killam, A.S.; Orf, J.H. Analysis of amino and fatty acid composition in soybean seed, using Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Agron. J.* **1997**, *89*, 679–685. [CrossRef]
33. R Foundation for Statistical Computing, A language and environment for statistical computing: Version 3.1; Vienna, Austria, 2013. Available online: <http://www.R-project.org/> (accessed on 25 January 2020).

34. Kuznetsova, A.; Brockhoff, P.B.; Christensen, R.H.B. lmerTest Package: Tests in linear mixed effects models. *J. Stat. Softw.* **2017**, *82*, 9892–9918. [\[CrossRef\]](#)
35. Russell, V.L. Least-squares means: The R Package lsmeans. *J. Stat. Softw.* **2016**, *69*, 4801–4834. [\[CrossRef\]](#)
36. Douglas, B.; Maechler, M.; Bolker, B.; Walker, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* **2015**, *67*, 363–385. [\[CrossRef\]](#)
37. Piepho, H.-P.; Möhring, J. Computing heritability and selection response from unbalanced plant breeding trials. *Genetics* **2007**, *177*, 1881–1888. [\[CrossRef\]](#)
38. Aditya, J.P.; Bhartiya, P.; Bhattiya, A. Genetic variability, heritability and character association for yield and component characters in soybean (*G. max* (L.) Merrill). *J. Cent. Eur. Agric.* **2011**, *12*, 27–34. [\[CrossRef\]](#)
39. Board, J.E.; Harville, B.G. Soybean yield component responses to a light interception gradient during the reproductive period. *Crop Sci.* **1993**, *33*, 772. [\[CrossRef\]](#)
40. Whaley, R.; Eskandari, M. Genotypic main effect and genotype-by-environment interaction effect on seed protein concentration and yield in food-grade soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). *Euphytica* **2019**, *215*, 1. [\[CrossRef\]](#)
41. Chen, G.; Wiatrak, P. Soybean development and yield are influenced by planting date and environmental conditions in the southeastern coastal plain, United States. *Agron. J.* **2010**, *102*, 1731. [\[CrossRef\]](#)
42. De Souza, P.I.; Egli, D.B.; Bruening, W.P. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. *Agron. J.* **1997**, *89*, 807. [\[CrossRef\]](#)
43. Caron, B.O.; Sgarbossa, J.; Schwerz, F.; Elli, E.F.; Eloy, E.; Behling, A. Dynamics of solar radiation and soybean yield in agroforestry systems. *An. Acad. Bras. Cienc.* **2018**, *90*, 3799–3812. [\[CrossRef\]](#)
44. Kane, M.V.; Grabau, L.J. Early planted, early maturing soybean cropping system: Growth, development, and yield. *Agron. J.* **1992**, *84*, 769. [\[CrossRef\]](#)
45. Dornbos, D.L.; Mullen, R.E. Influence of stress during soybean seed fill on seed weight, germination, and seedling growth rate. *Can. J. Plant Sci.* **1991**, *71*, 373–383. [\[CrossRef\]](#)
46. Gibson, L.R.; Mullen, R.E. Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Sci.* **1996**, *36*, 98. [\[CrossRef\]](#)
47. Rotundo, J.L.; Westgate, M.E. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crop. Res.* **2009**, *110*, 147–156. [\[CrossRef\]](#)
48. Dornbos, D.L.; Mullen, R.E. Soybean seed protein and oil contents and fatty acid composition adjustments by drought and temperature. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **1992**, *69*, 228–231. [\[CrossRef\]](#)
49. Gibson, L.R.; Mullen, R.E. Soybean seed quality reductions by high day and night temperature. *Crop Sci.* **1996**, *36*, 1615. [\[CrossRef\]](#)
50. Kane, M.V.; Steele, C.C.; Grabau, L.J.; MacKown, C.T.; Hildebrand, D.F. Early-maturing soybean cropping system: III Protein and oil contents and oil composition. *Agron. J.* **1997**, *89*, 464. [\[CrossRef\]](#)
51. Leffel, R.C. Breeding soybeans for the economic values of seed oil and protein. *JPA* **1989**, *2*, 338. [\[CrossRef\]](#)
52. Egli, D.B.; Bruening, W.P. Water stress, photosynthesis, seed sucrose levels and seed growth in soybean. *J. Agric. Sci.* **2004**, *142*, 1–8. [\[CrossRef\]](#)
53. Ku, Y.-S.; Au-Yeung, W.-K.; Yung, Y.-L.; Li, M.-W.; Wen, C.-Q.; Liu, X.; Lam, H.-M. Drought Stress and Tolerance in Soybean. Available online: <https://www.intechopen.com/books/a-comprehensive-survey-of-international-soybean-research-genetics-physiology-agronomy-and-nitrogen-relationships/drought-stress-and-tolerance-in-soybean> (accessed on 25 January 2020).
54. Dupont, F.M.; Altenbach, S.B. Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J. Cereal Sci.* **2003**, *38*, 133–146. [\[CrossRef\]](#)
55. Flajsman, M.; Santavec, I.; Kolmanic, A.; Kosmelj, K.; Kocjan-Acko, D. Agronomic performance and stability of seed, protein and oil yields of seven soybean cultivars determined in field experiments in Slovenia. *Genetika* **2019**, *51*, 31–46. [\[CrossRef\]](#)
56. Naeve, S.L.; O'Neill, T.A.; Miller-Garvin, J.E. Canopy nitrogen reserves: Impact on soybean yield and seed quality traits in Northern Latitudes. *Agron. J.* **2008**, *100*, 681. [\[CrossRef\]](#)
57. Hwang, E.-Y.; Song, Q.; Jia, G.; Specht, J.E.; Hyten, D.L.; Costa, J.; Cregan, P.B. A genome-wide association study of seed protein and oil content in soybean. *BMC Genom.* **2014**, *15*, 1. [\[CrossRef\]](#)

58. Yaklich, R.W.; Vinyard, B.; Camp, M.; Douglass, S. Analysis of seed protein and oil from soybean northern and southern region uniform tests. *Crop Sci.* **2002**, *42*, 1504. [[CrossRef](#)]
59. Sugimoto, T.; Tanaka, K.; Monma, M.; Kawamura, Y.; Saio, K. Phosphoenolpyruvate carboxylase level in soybean seed highly correlates to its contents of protein and lipid. *Agric. Biol. Chem.* **2014**, *53*, 885–887. [[CrossRef](#)]
60. Fiez, T.E.; Miller, B.C.; Pan, W.L. Winter wheat yield and grain protein across varied landscape positions. *Agron. J.* **1994**, *86*, 1026–1032. [[CrossRef](#)]

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

6 GENERALDISKUSSION

6.1 Versuchsübersicht

In den vorherigen Kapiteln 3 bis 5 wurden die gewonnenen Ergebnisse aus der Forschungsstudie präsentiert. Die angewendeten Arbeitsansätze und Zeiträume, das geprüfte Material und die Fragestellungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Versuchsansätze sowie Versuchsjahre und Standorte mit untersuchtem Material und Versuchsfragen aus den Kapiteln 3, 4 und 5.

Versuch	Standort	Jahr	Material/Methode	Versuchsfrage	Kapitel
zweiortiger zweifaktorieller Feldversuch	Grünseiboldsdorf Landshut	2017- 2018	2 Saatverfahren (Drillsaat und Einzelkornsaat) über 4 Sorten	Saatverfahren	3
		2016- 2017	4 Saatstärken (30,50,70,90 Kö m ⁻²) über 4 Sorten	Saatstärke	4
mehrortiger Feldversuch	Grünseiboldsdorf Eckartsweiher Wetterau Güsten Roßleben	2016- 2017	13 Genotypen aus Reifegruppen 00 und 000	Umwelt- einflüsse	5

In den zweiortigen, zweifaktoriellen Feldversuchen auf zwei Standorten in Bayern (Grünseiboldsdorf und Landshut) wurden die produktionstechnischen Versuchsfragen geprüft. Zum einen wurden die zwei Saatverfahren Drillsaat mit einem Reihenabstand von 14 cm und Einzelkornsaat mit einem Reihenabstand von 28 cm (kleinster Abstand, der technisch mit einer Parzellensämaschine möglich und praxistauglich war) über vier Sojasorten aus zwei Reifegruppen 00 und 000 getestet (**Kapitel 3**). Diese vier Sorten wurden auch in dem Versuch zu Herausarbeitung der optimalen Saatstärke verwendet (**Kapitel 4**). Umwelteinflüsse auf die Produktion von Soja wurden nicht nur in Süddeutschland (Grünseiboldsdorf, Landshut, Eckartsweiher), sondern auch in nördlicheren Teilen des Landes (Nordrhein-Westfalen (Güsten), Südhessen (Wetterau) und in Ostthüringen (Roßleben)) untersucht. Dafür wurden 13 Sojagenotypen aus den Reifegruppen 00 und 000 verschiedener Nutzungsrichtungen verwendet (**Kapitel 5**).

6.2 Kornertrag

Die weltweite Produktion von Soja belief sich im Jahr 2018 auf 348,7 Mio. t bei einer Anbaufläche von 124,9 Mio. ha, wohingegen vor 50 Jahren nur 27 Mio. t produziert wurden (FAOSTAT 2020). Bis 2030 wird ein Anstieg der Erntemenge auf bis zu 515 Mio. t prognostiziert (WWF 2014). Eine Steigerung der Weltproduktion von Soja wurde durch die gleichzeitige Ausdehnung der Anbaufläche und die Erhöhung des Kornertrages erreicht (van Roekel et al. 2015; Xu et al. 2020). Die steigenden Hektarerträge sind auf die **Verbesserung und Intensivierung der Anbaverfahren** und auf Züchtungsfortschritt zurück zu führen (IDH 2020). Ein effizienter Weg, die Sojaproduktion weiter zu steigern, wäre, Synergien zwischen Züchtungsfortschritt und Optimierung der Anbautechnik zu forcieren (Egli 2008).

Der Kornertrag ist oft die ausschlaggebende Zielgröße beim Anbau der wichtigsten Kulturarten, und die Optimierung der Anbautechnik ist daher zumeist auf eine Ertragssteigerung ausgerichtet. Hier wirken verschiedene Maßnahmen wie Saatverfahren und Saatstärke für eine optimale Bestandesetablierung zusammen, um die Verteilung der Sojapflanzen auf der Fläche zu definieren sowie die Entwicklung der Pflanzenorgane von Beginn an zu steuern.

Der Kornertrag von Soja setzt sich aus den **Ertragskomponenten** sowie deren komplexen Interaktionen zusammen (Moschini 2014). In erster Linie sind es die Bestandesdichte, Tausendkornmasse (TKM), die Anzahl der Seitentriebe und der Hülsen pro Pflanze sowie Körner pro Hülse (Board und Kahlon 2011). Die Saatstärke ist in der Regel nicht gleichzusetzen mit der Bestandesdichte. Keimfähigkeit und Triebkraft können je nach Saatgutqualität, Saatverfahren, Jahr und Auflaufbedingungen vermindert sein und zu einer abweichenden Pflanzenanzahl pro Fläche führen (Likhochvor et al. 2004). Die Anzahl der Körner pro Hülse und TKM sind überwiegend genetisch definiert, unterliegen dennoch Schwankungen durch die Rahmenbedingungen, wie Bestandesdichte (Mehmet 2008; Spader und Deschamps 2015). Tendenziell fällt mit zunehmender Saatstärke die TKM im Erntegut ab, weil Pflanzen in dichteren Beständen in Konkurrenz um Assimilate treten (Spader und Deschamps 2015). Dies wurde so auch im Versuch zur Herausarbeitung der optimalen Saatstärke gezeigt ((Sobko et al. 2019); Kapitel 4). Die untersuchten Saatverfahren (Drillsaat mit 14 cm Reihenabstand und Einzelkornsaat mit 28 cm Reihenabstand, Kapitel 3) hatten pro Flächenäquivalent zu vergleichbaren Bestandesdichten geführt, sodass vermutlich deshalb trotz unterschiedlicher Verteilung der Pflanzen auf der Fläche keine signifikanten Unterschiede bei der Anzahl Körner pro Hülse sowie TKM fest gestellt werden konnten (Sobko et al. 2020a). Von allen Ertragskomponenten reagiert die Anzahl der Hülsen pro Pflanze am stärksten auf eine Veränderung der Saatstärke, wobei beide negativ korrelieren (Ferreira et al. 2016). In der vorliegenden Arbeit wurden bei der niedrigsten geprüften Saatstärke von 30 Kö m⁻² doppelt so

viele Hülsen je einzelner Pflanze gezählt wie bei der höchsten Saatstärke von 90 Kö m⁻² (Sobko et al. 2019).

Die Sojapflanze zeigt im Bestand eine **hohe Kompensationsfähigkeit** (Ribeiro et al. 2017). Sogar bei einer Reduzierung der Saatstärke um 75 % waren die Pflanzen in der Lage, einen vertretbaren Ertrag zu bilden (Luca et al. 2014). Bei größerem Standraum bilden Sojapflanzen vermehrt Wurzeln, sofern der Bestand unkrautfrei ist und können mehr Wasser und Nährstoffe aufnehmen, um diese durch Photosynthese dann in Ertrag umzuwandeln (Board und Kahlon 2011; Corassa et al. 2018). Es wird hier von einer Optimumkurve ausgegangen, bei der mit Steigerung eines Faktors (hier: Standraum) zunächst ein Ertragsmaximum erreicht wird, der Ertrag bei weiterer Anhebung des Faktors jedoch wieder abnimmt. Bei Soja kann diese Limitierung schon bei Saatstärken ab 75 keimfähigen Kö m⁻² auftreten (Weber et al. 1966; Shibles und Weber 1965; Egli 1988). Das Kompensationsvermögen von Soja zeigt sich auch bei der Anzahl der Seitentriebe (Agudamu und Shiraiwa 2016): Bei geringer Bestandesdichte werden grundsätzlich mehr Seitentriebe gebildet (Mehmet 2008), wie auch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen (Sobko et al. 2019). Da das Saatgut der höchste Kostenposten der Deckungsbeitragsrechnung von Soja ist (fast 30 %), können hohe Saatstärken unter anderem auch die Wirtschaftlichkeit des Anbaus negativ beeinflussen (Leffel 1989; Hahn und Miedaner 2013; Schmidt et al. 2019). Das Resultat des Versuchs mit Saatverfahren bei 00 und 000 Sorten zeigte nur einen Trend, mehr Hülsen und Seitentrieben pro Pflanze bei Einzelkornsaat als bei Drillsaat zu generieren (Sobko et al. 2020a), ähnlich den Ergebnissen von Miura und Gemma (1986) aus Japan. Trotz des obigen Trends war der Kornertrag bei Drillsaat etwas höher als bei Einzelkornsaat (nicht signifikant), was sich vermutlich durch den uneinheitlichen Feldaufbau bei Einzelkornsaat erklären lässt. Aus Sicht der Praxis ist die Erkenntnis nicht nur für den deutschen und europäischen Sojaanbau wertvoll, sondern könnte gegebenenfalls auch in Ländern Süd- und Nordamerikas, wie USA, Canada, Brasilien, Argentinien, Uruguay und Paraguay zum Einsatz kommen. Dort werden Sojafelder überwiegend mittels No-till-Systemen oder einer Kombination von konservierender Bodenbearbeitung und Einzelkornsaat mit Roundup Ready Sorten bestellt. Da Drillsaat keine Kornertragsminderung bewirkt, könnte es für die größeren Landwirte, die in der Fruchtfolge auch noch Raps oder Getreide haben, denkbar sein, die vorhandene Drilltechnik auch für den Sojaanbau einzusetzen und dadurch eventuell die Arbeitsspitzen durch die zeitlich versetzte Aussaatperiode etwas abzuflachen. Nach den vorgestellten Versuchen kann in Deutschland eine Sojaaussaat sowohl mit Drill- als auch Einzelkornsämaschine und einer Saatstärke von 50 Kö m⁻² bis 70 Kö m⁻² hohe Kornerträge erzielen. Wenn Sojaanbau in Trockengebieten geplant ist, kann eine niedrigere Saatstärke um 50 Kö m⁻² von Vorteil sein. Positive Erfahrungen mit bis zu 40 % Reduktion der Saatstärken (20-30 Kö m⁻²) wurden aus den Anbauregionen mit möglichem Trockenstress, wie Kentucky, Arkansas und zum Teil

Pennsylvania mit Sorten aus den Reifegruppen 0-III auch berichtet (Holshouser und Whittaker 2002; Kratochvil et al. 2004; Edwards und Purcell 2005; Lee et al. 2008).

Die Sorte als Träger der genetisch bedingten Charakteristika der Kulturpflanze hat ebenfalls Einfluss auf die Höhe des Ertrags (Board und Kahlon 2011). Der Kornertrag besitzt eine Heritabilität von mindestens 70 % (Aditya et al. 2011; Malek et al. 2014). Die Züchtung der letzten Jahrzehnte weltweit hat bei Soja abhängig von der Reifegruppe einen Ertragszuwachs von bis zu 30,6 kg ha⁻¹Jahr⁻¹ bewirkt (Wilcox 2001; Rincker et al. 2014; Wang et al. 2016). In Deutschland ist die **Sortenwahl**, und speziell die Reifegruppe, nach wie vor eine entscheidende Voraussetzung für einen erfolgreichen Sojaanbau (Hahn und Miedaner 2013). Aufgrund von Klima- und Bodenbedingungen (Wasserlieferungsvermögen) können in Deutschland Sorten aus den Reifegruppen 00 und 000 sowie vereinzelt in besonders günstigen Regionen auch 0 Sorten erfolgreich angebaut werden (Roßberg und Recknagel 2017). Die frühreifenden 00 und sehr frühreifenden 000 Sorten weisen in erster Linie Unterschiede in der Vegetationsdauer auf (Egli 1993; Kurasch et al. 2017a). Unter nicht optimalen Wetterbedingungen oder Anbauverfahren können die 00 Sorten die Vorteile der längeren Vegetationsdauer nicht zwingend ausschöpfen, sondern geraten möglicherweise in Verzug mit der Abreife und könnten zu einer schwierigen Beerntung im Herbst führen. Im dreijährigen Mittel (2016-2019) war der durchschnittliche Kornertrag in Deutschland vergleichsweise hoch und lag bei 2,9 t ha⁻¹ (FAOSTAT 2020). Er kann mit den durchschnittlichen Kornerträgen im gleichen Zeitraum aus Österreich (2,9 t ha⁻¹), Tschechien (2,1 t ha⁻¹), Nordfrankreich (2,6 t ha⁻¹), Zentralukraine (2,3 t ha⁻¹), Südrussland (1,5 t ha⁻¹), Südkanada (2,7 t ha⁻¹), Nordchina (1,8 t ha⁻¹) verglichen werden, weil dort auch Sorten aus den Reifegruppen 00 und 000 angebaut werden (Berschneider 2016; Liu et al. 2017; Kurasch et al. 2017a; Bachteler 2017a; FAOSTAT 2020). Generell könnte man alle genannten Anbauggebiete unter Berücksichtigung von lokalen Klimaeigenschaften zwischen dem Breitengrad 48 °N und 51 °N für den Anbau von 00 und 000 Sorten gruppieren.

Die **Umweltbedingungen** (Jahr und Standort) beeinflussen den Kornertrag (Whaley und Eskandari 2019). Das Ertragspotenzial der Soja kann nicht immer in jeder Anbauregion und in jedem Jahr ausgeschöpft werden. Limitierende Stressfaktoren können zu Ertrags- oder Qualitätseinbußen führen (Kurasch et al. 2017b). Zu den stark ertragsmindernden Umweltfaktoren zählen Wassermangel zur Kornfüllung (R6) und Hitze zur Abreife (R7-R8) (Piper und Boote 1999; Board und Kahlon 2011). Bei Wasserdefizit ist die wahrscheinlichste Folge eine verminderte Korngröße beziehungsweise TKM, die sich negativ auf die Erntemenge auswirkt (Brevedan und Egli 2003). Der Einfluss von Wasserstress auf den Ertrag von Soja hängt nicht nur von der Dauer und Intensität des Stresses ab, sondern auch vom Zeitpunkt des Auftretens (Desclaux und Roumet 1996). Soja benötigt eine kontinuierliche Wasserzufuhr am meisten zur Hülsenausbildung und Kornfüllung (R4-R6) (Bachteler 2017b). Korngröße und Anzahl der Körner pro Hülse werden durch Wassermangel zur Kornfüllung (im Stadium R6) reduziert (Ku et al. 2013).

Je später die Sojasorte ist, desto höher ist der grundsätzliche Wasserbedarf der Pflanzen (Singh 2010a). Die einzelnen Entwicklungsstadien bei späteren Sorten verlaufen tendenziell langsamer (Likhochvor et al. 2004; Aditya et al. 2016). Allerdings reagieren Sorten aus früheren Reifegruppen sensibler auf Wassermangel, da ihre Vegetationsdauer generell kürzer ist und Wasserstress zur Kornfüllung die Abreifeperiode verkürzt und die Blattseneszenz beschleunigt (Souza et al. 1997; Chen und Wiatrak 2010). Es ist davon auszugehen, dass Sorten aus späteren Reifegruppen robuster sind gegenüber Wassermangel. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die sehr frühreifenden 000 Sorten im Vergleich mit den Sorten aus Reifegruppe 00 empfindlicher gegenüber einem Wasserdefizit in R6 waren und an feuchten Standorten höhere Erträge erbrachten (Sobko et al. 2020b). In Versuchen, durchgeführt in den amerikanischen trockenheitsgefährdeten Regionen Kentucky sowie Indiana, mit Sorten aus den Reifegruppen II und III, wurden vergleichbare Zusammenhänge beobachtet, waren aber aufgrund der späteren Reifegruppe noch stärker ausgeprägt (Egli und Bruening 2004; Robinson et al. 2009).

Soja benötigt für den optimalen Vegetationsverlauf Tagestemperaturen von 24-29 °C (Hoeft 2007). Nachttemperaturen zur Blüte und Hülsenbildung (R1-R3) unter 10 °C können zur Reduktion des Kornertrages durch Abwerfen der frisch gebildeten Hülsen führen (Baker et al. 1989; Funatsuki et al. 2005), hatten jedoch in anderen Studien keine Ertragsverluste zur Folge (Musser et al. 1986). Auch Hitze zur Blüte und Kornfüllung wirkt sich negativ auf den Kornertrag aus, da durch die Beschleunigung des Verlaufs von einzelnen Entwicklungsstadien nicht ausreichend Zeit für die optimale Ausbildung der generativen Organe besteht (Egli und Bruening 2002; Bachteler 2017b). Hohe Temperaturen zur Abreife (> 29 °C zu R7) führen zur Reduzierung der Erntemenge pro Pflanze (Gibson und Mullen 1996a; Board und Kahlon 2011; Rotundo und Westgate 2009). Die Ergebnisse aus Deutschland im Rahmen dieser Arbeit zeigten, dass die sehr frühreifenden 000 Sorten stärker negativ mit CHU zur Abreife korrelierten als 00 Sorten (Sobko et al. 2020b). Das geschieht vermutlich aufgrund des früheren Beginns der Abreife im Vergleich mit 00 Sorten. Mit zunehmendem Klimawandel kann auch Anfang September noch eine Hitzewelle in Deutschland auftreten (Leithold et al. 2003), deswegen ist der Anbau von Sorten aus der Reifegruppe 00 für die Septemberhitze anfälligen Regionen (Süd- Südostdeutschland) empfehlenswert. Die japanischen Wissenschaftler prognostizieren basierend auf einem Simulationsversuch einen effizienten Sojaanbau im heute kühleren Nordosten des Landes (38 °-40 °N) mit Sorten aus Reifegruppen IV bis zu den 2090er Jahren, weil durch eine klimawandelbezogene Erwärmung der Erde und der daraus folgenden Verkürzung der Vegetationsperiode die früheren Sorten nicht mehr den vollständigen Kornertrag ausbilden werden könnten (Kumagai und Sameshima 2014).

Die Beschaffenheit des Sojabestandes hinsichtlich des Standraums, der Pflanzengesundheit und der Versorgung mit Nährstoffen beeinflusst die Entwicklung der oberirdischen Biomasse und des Blattapparates. Eine intakte Blattfläche wird zur optimalen

Nutzung der **Sonneneinstrahlung** führen und sich in hohem Kornertrag widerspiegeln (Shibles und Weber 1965; Weber et al. 1966; Egli 1988; Caron et al. 2018). Eine hohe Sonneneinstrahlung zum Zeitpunkt der Blüte ist förderlich für die Produktion von Assimilaten und somit zur Steigerung des Kornertrags (Board und Harville 1993; Board et al. 2010). Laut den Ergebnissen der durchgeführten Versuche in Deutschland korreliert die Sonneneinstrahlung zur Blüte und der Kornertrag positiv ($r = 0,47$). So können die Sojabestände auf den Standorten mit hoher Sonneneinstrahlung in Juni und Juli höhere Kornerträge generieren (Sobko et al. 2020b). Da die Sonneneinstrahlungsintensität steigt, je näher eine Anbauregion am Äquator liegt, ist es zu erwarten, dass wesentlich höhere Kornerträge erzielt werden könnten bei der Kultivierung von spätreifenden Sorten. Aufgrund des steigenden Risikos an solchen Standorten für Hitzeperioden und auch Wasserdefizite sind die erwartbaren Erträge dennoch limitiert (Chauhan und Joshi 2005; Alliprandini et al. 2009). Die Sojazüchter in China arbeiten ständig an der genetischen Verbesserung und Akklimatisierung der trockentoleranten Sojasorten, die ein maximales Angebot an Sonnenstrahlung in Ertrag umsetzen können (Tsubokura et al. 2013; Wu et al. 2015).

6.3 Qualitätsinhaltsstoffe Protein und Öl

Soja ist nach der Ölpalme (*Elaeis guineensis*) die zweitgrößte Quelle von **Pflanzenöl** und größte Quelle für proteinhaltiges **Tierfutter** weltweit (CERES 2020). Dazu ist **Sojaprotein** ein Bestandteil der menschlichen Ernährung, zum Beispiel als Tofu oder Bestandteil bei Fleischersatzprodukten im Rahmen einer vegetarischen oder veganen Ernährung. In Folge der stetig wachsenden Nachfrage nimmt die weltweite Sojaproduktion weiter zu (IDH 2020). Daher stellt sich die Frage, wie sich bedarfsorientiert die Menge an Protein und/oder Öl im Sojakorn erhöhen lässt. Beiden Merkmale sind zum Teil genetisch definiert (Hwang et al. 2014; Kochegura et al. 2015), unterliegen aber auch Umwelteinflüssen (Piper und Boote 1999; Sudaric et al. 2006; Song et al. 2016; Novikova et al. 2018) und korrelieren stark und negativ miteinander (Piper und Boote 1999; Kurasch et al. 2017b; Novikova et al. 2018; Flajsman et al. 2019). Proteingehalt sowie Ölgehalt werden von den gleichen Genen kontrolliert und haben eine hohe Heritabilität ($H^2 \geq 0,7$) (Li et al. 2019; Yao et al. 2020). Kaum beeinflussbare Faktoren wie Strahlungsintensität, Photoperiode, Temperaturen, Niederschlagsmenge und -verteilung könnten die Nutzungsrichtung der Sojaproduktion (Tierfutter, Öl- oder Proteinproduktion für menschliche Ernährung) an einem Standort beeinflussen (Piper und Boote 1999; Hwang et al. 2014).

Die Sorten aus verschiedenen Reifegruppen weisen zwar **unterschiedliche Protein- und Ölgehalte** auf, bewegen sich allerdings nahe am Niveau von 20 % Öl in der Trockenmasse (TM) und 40 % Protein in der TM (Voldeng et al. 1997; Mertz-Henning et al. 2018). Hohe Temperaturen zur Abreife (R7) können zu einem höheren Proteingehalt im Korn führen (Piper und Boote 1999; Yaklich et al. 2002). In den Versuchen der vorgestellten Arbeit in Deutschland zeigte sich eine nicht hohe positive signifikante Korrelation zwischen Proteingehalt und CHU zur Abreife (Sobko

et al. 2020b). Mit dem Klimawandel könnte sich die Möglichkeit bieten, Soja mit hohen Proteingehalten auch in nördlichen Landesteilen Deutschlands zu produzieren, wozu auch Tofu geeignete Sorten in Frage kämen. Es ist denkbar, einen Ergebnistransfer aus einer umfangreichen Studie, die ihren Anfang im Jahr 1949 hat und sich bis zum Jahr 2012 erstreckt, aus teilweise klimatisch zu Deutschland vergleichbaren Standorten in der USA und Kanada heranzuziehen (Yaklich et al. 2002). Die Wissenschaftler verzeichneten sehr starke Jahresschwankungen bei den Proteingehalten, jedoch die höchsten Werte wurden bei den spätreifenden Sorten (Reifegruppe VI-VIII) gemessen (Yaklich et al. 2002). Dem gegenüber weisen die auch in Deutschland verbreiteten 00 Sorten und zum Teil 0 Sorten nur einen um 1 % geringeren Proteingehalt auf (Yaklich et al. 2002).

Kontinuierliche und ausreichende Wasserzufuhr wirkt sich zwar auf den Körnertrag positiv aus, mindert aber den Proteingehalt (Rotundo und Westgate 2009; Ku et al. 2013). Aus den zahlreichen Untersuchungen aus Zentralindien (12 °N-32 °N) und Brasilien (29 °S-38 °N) und USA und Kanada (30 °N-50 °N) mit spätreifenden Sorten ab Reifegruppe 0 aufwärts geht eine negative Korrelation zwischen Proteingehalt und Niederschlagsmenge sowohl in der ganzen Vegetationsperiode als auch zur Kornfüllung hervor (Kumar et al. 2006; Rotundo und Westgate 2009; Carrera et al. 2011). In den in Deutschland durchgeführten Versuchen mit frühreifenden Sorten 00 und 000 wurden keinerlei Einflüsse von Niederschlag auf den Proteingehalt identifiziert (48 °N-51 °N (Sobko et al. 2020b)). In Österreich war in Versuchsjahren mit überdurchschnittlicher Wasserversorgung ebenfalls eine Stagnation des Proteingehaltes zu beobachten (Vollmann et al. 2000), was die Ergebnisse und Thesen der vorliegenden Arbeit weiter bekräftigt.

Eine gemäßigte Temperatur (um die 20 °C) wirkt sich leicht positiv auf den Ölgehalt der spätreifenden Sorten (Reifegruppe 0 und später) aus (Triboi und Triboi-Blondel 2002; Iyer et al. 2008), wobei die Reaktion auf Hitze (über 30 °C) noch nicht eindeutig geklärt ist (Carrera et al. 2011). Bei den Versuchen in Deutschland mit den Sorten aus Reifegruppe 00 und 000 zeigte die Temperatur keinen Effekt auf den Ölgehalt (Sobko et al. 2020b). Bei Versuchen in Rostow am Don und im Nordkaukasus in Russland mit vergleichbaren Klimabedingungen haben bei Temperaturen zwischen 18 und 22 °C Sorten aus Reifgruppen 0 und 00 den höchsten Ölgehalt erzielt (Ermolina et al. 2011; Novikova et al. 2018).

Feuchte Anbaubedingungen sind nicht förderlich für den Ölgehalt von Soja (Carrera et al. 2009). Eine 10-jährige Meta-Analyse der größten Sojaanbauregion im Norden der USA mit Sorten aus den Reifegruppen 0-IV zeigten eine Ölgehaltreduktion bis zu 35 % bei Wasserstress. (Rotundo und Westgate 2009). Die Ergebnisse aus den Versuchen in Deutschland, allerdings mit 00 und 000 Sorten stellten **eine negative Korrelation zwischen Ölgehalt und Niederschlag** zu Blüte-Kornfüllung ($r = -0,34$) dar (Sobko et al. 2020b). Im benachbarten Österreich wurde in drei aus sechs Versuchsjahren eine Steigerung des Ölgehaltes mit der Erhöhung der

Niederschlagsmenge zur Kornfüllung bei 0 und 00 Sorten beobachtet, wobei gleichzeitig die Proteingehalte unterdurchschnittlich waren (Vollmann et al. 2000). Dies könnte durch den Jahreseffekt und die stark negative Korrelation zwischen Protein- und Ölgehalt erklärt werden. Dennoch waren die in Kapitel 5 dargestellten Regressionen (Ölgehalt/Niederschlag zu Blüte-Kornfüllung) im trockenen Jahr 2016 stärker ausgeprägt als im Jahr 2017, was auf die höheren Wasserdefizite und daraus resultierende, nicht vollständige und sortentypische Sojakornausbildung (Egli und Bruening 2004) mit verbundenen Ölgehaltseinbußen deuten könnte. Da der Protein- und Ölgehalt jedoch negativ korreliert (Flajsman et al. 2019), steigt der Proteingehalt unter Trockenstress um 3-5 % an, während der Ölgehalt um 2-3 % abnimmt im Vergleich zu optimaler Wasserversorgung (Dornbos und Mullen 1992). Die Einlagerung von Protein im Sojakorn beginnt etwa 10-15 Tage früher als die von Öl (Novikova et al. 2018). Bei zunehmender Trockenheit tritt eine Limitierung der Nährstoffe ein, weswegen die später einsetzende Ölakкумуляtion nicht ausreichend mit Assimilaten versorgt wird und der Proteingehalt höher ausfällt als bei Pflanzen ohne Trockenstress (Carrera et al. 2009; Ku et al. 2013). Ein ähnliches Phänomen ist bereits von Getreide bekannt (Dupont und Altenbach 2003). Laut Versuchsstudien aus Afrika (Ojo et al. 2002), USA und Kanada (Yaklich et al. 2002), Türkei (Arslanoglu et al. 2011), Russland (Novikova et al. 2018) und Südeuropa (Sudaric et al. 2006) zeichnet sich ab, dass der Proteingehalt viel sensibler auf die Veränderung von Umweltbedingungen als der Ölgehalt reagiert.

Saatstärke und Saatverfahren können die Inhaltsstoffe des Kornes beeinflussen, indem sie den Phänotyp der Sojapflanzen beeinflussen (Likhochvor et al. 2004). Das **Saatverfahren** allein, unabhängig vom Reihenabstand, **beeinflusst den Protein- und Ölgehalt nicht**. Bei Einzelkornsaat wurden tendenziell mehr Seitentriebe mit insgesamt mehr Hülsen im Vergleich zur Drillsaat gebildet (Sobko et al. 2020a). Man könnte vermuten, dass die Inhaltsstoffe in den Körnern aus den Haupttrieben eine andere Kombination haben könnten als die Körner aus den Hülsen der Seitentriebe, wie es bei der Kulturart Raps (*Brassica napus* L. ssp. *oleifera* (Metzg.) Sinsk.) erwiesen ist (Shrief et al. 1990; Hu et al. 2017). In den durchgeführten Feldversuchen waren die Auswirkungen von Saatverfahren und Saatstärke auf Protein- und Ölgehalt nicht signifikant. Es ließ sich allerdings einen Trend verzeichnen: Bei Erhöhung der Saatstärken nahm der Proteingehalt leicht zu und der Ölgehalt ab (Sobko et al. 2019). In Brasilien, wo sehr viele Klimazonen vorhanden sind und das Land sich 30 Breitengrade vom Äquator weg ausdehnt, was einen Anbau von Sojasorten aus den Reifegruppen V-X erlaubt (Alliprandini et al. 2009), ist dieser Trend viel stärker ausgeprägt und bereits bekannt (Luca et al. 2014).

Die Produktivität der Soja wird nicht nur über den Kornertrag, sondern auch über den **Proteinertrag und Ölertrag** bemessen. Dabei spielt der Kornertrag eine wichtige Rolle und der Protein- sowie Ölgehalt eher eine untergeordnete Rolle (Kumar et al. 2006; Flajsman et al. 2019). Da der Kornertrag signifikant und positiv mit den Niederschlägen korreliert, sollte man für bei

angestrebter Protein- oder Ölproduktion die Anbaustandorte mit ausreichender Wasserverfügbarkeit bevorzugen. Die Tausendkornmasse als Ertragskomponente, korreliert negativ mit dem Proteingehalt (Popovic et al. 2012; Hwang et al. 2014; Bandillo et al. 2015; Kurasch et al. 2018). Eine der Wildformen von Soja-*Glycine soja* (Piper und Boote 1999; Kurasch et al. 2017b; Novikova et al. 2018) hat kleine Körner und gleichzeitig über 50 % Proteingehalt (Sebolt et al. 2000; Xu 1989). Diese Wildform ist seit Jahren eine Quelle für proteinausgiebiges genetisches Material und treibt die Entwicklung von proteinreichen zukunftsorientierten Sorten voran (Kochegura et al. 2015).

6.4 Agronomische Eigenschaften

Neben den wichtigsten Merkmalen für die Sojaproduktion wie Kornertrag, Protein- und Ölgehalt sind weitere **agronomische Eigenschaften** wie Pflanzenlänge, Lager, die Höhe des untersten Hülsenansatzes und Knöllchenbildung erforderlich zum Verständnis der Anpassung des Pflanzenbestandes an die äußeren Bedingungen.

Die **Pflanzenlänge** ist bei Soja zum Teil genetisch bedingt (Specht et al. 1999; Aditya et al. 2011). Alle Sorten werden in indeterminierte, semi-determinierte und determinierte Wuchstypen unterschieden (Altinok et al. 2004; Boerma und Specht 2004). Die Pflanzen des indeterminierten Wuchstyps setzten Stammwachstum und die Nodienproduktion am Haupttrieb auch nach der Blüte fort, was in längeren Pflanzen, hoher Lagerneigung aber auch Kompensationsvermögen resultiert (Hartung et al. 1981). Bei determinierten Wuchstypen wird das Längenwachstum der Pflanzen kurz nach der Blüte eingestellt, was die Standfestigkeit und die Gleichmäßigkeit der Abreife erhöht (Teodoro et al. 2015). Die Pflanzenlänge reagiert auch auf die Veränderung des Standraums durch Saatstärke oder Reihenabstand (Khan et al. 2003; Davis et al. 2015). Große Sojapflanzen können, verglichen mit kurzen Pflanzen, größere Biomasse, Assimilationsfläche und höhere Kornerträge ausbilden (Mehmet 2008; Umburanas et al. 2019). Bei hohen Bestandesdichten durch die Konkurrenz der Pflanzen um Licht nimmt die Pflanzenlänge bis zu einem gewissen Grad zu (Board 2001; Prusiński und Nowicki 2020). Die Ergebnisse aus Nordamerika zeigen, bei der Prüfung der Bestandesdichten von 15 bis 55 Pflanzen m⁻² mit indeterminierten Sorten aus der späteren Reifegruppe V schon ab ca. 50 Pflanzen m⁻² kein Längenzuwachs mehr gemessen wurde (Epler und Staggenborg 2008). Jedoch wurden bei den in dieser Arbeit vorgestellten Sojaversuchen mit Saatstärken von 30 bis 90 Kö m⁻² und zwei unterschiedlichen Saatverfahren (Einzelkorn- und Drillsaat) für die indeterminierte (Orion), semideterminierte (Viola) und determinierten (Lissabon, ES Mentor) Sorten in Süddeutschland keine signifikanten Unterschiede in der Pflanzenlänge festgestellt (Sobko et al. 2019; Sobko et al. 2020a). Solche Reaktionen sind keine Einzelfälle und können auf die Sortenunterschiede (Ribeiro et al. 2017) sowie das Kompensationsvermögen der Soja (gerade bei niedrigen Saatstärken) zurückgeführt werden (Rahman et al. 2011a).

Die **Lagerneigung** ist oft an die Pflanzenlänge gekoppelt (Wilcox und Sediyaama 1981; Spader und Deschamps 2015). Die Stärke des Lagers im Sojabestand ist tendenziell zunehmend mit steigenden Bestandesdichten beziehungsweise steigender intraspezifischer Konkurrenz, unabhängig davon, ob diese durch hohe Saatstärken oder enge Reihenabstände entsteht (Herbert und Litchfield 1984; Boquet 1990; Board 2001). Bei engen Standräumen haben die wachsenden Pflanzen dünnere Haupttriebe, kaum Seitentriebe und sind dann anfälliger für Lager im Vergleich zu kräftigen Pflanzen, die mehr Fläche zur Verfügung haben (Wilcox und Sediyaama 1981; Board 2001). Es ist bekannt, dass liegende Sojabestände durch nicht ausreichende Assimilation von Nährstoffen (Board 2001) und Verzögerung in der Abreife (Mancuso und Caviness 1991), zu einer Kornertragsstagnierung führen können, entsprechend den Ergebnissen aus Japan (Saitoh et al. 2012) und Brasilien (Spader und Deschamps 2015). In den durchgeführten Versuchen zur Saatstärke (Kapitel 4) stieg signifikant die Lagerneigung der Sojapflanzen mit der Erhöhung der Saatstärke, was nicht zur Reduktion des Kornertrages führte (Sobko et al. 2019). Da das Lager im Bestand im Feldversuch generell auf einem niedrigen Niveau war (höchster Wert 3,6 bei 90 Kö m⁻², wobei 1-keinem Lager und 9-totalem Lager entspricht), könnte es sein, dass es nicht stark genug war, um als limitierender Faktor hervortreten und eine Verminderung des Kornertrages verursachen zu können. Solche Beobachtungen wurden auch im Süden (Boquet 1990) und Osten (Herbert und Litchfield 1984) der USA gemacht. Nach den Ergebnissen aus der Saatverfahrensprüfung (Kapitel 3), bewirken weder Einzelkornsaat noch Drillsaat eine signifikante Lagerneigung der Soja (Sobko et al. 2020a). Es scheint so zu sein, dass die Differenzen in Standraum bei den untersuchten Reihenabständen (14 und 28 cm) und Saatmethoden (Drill- und Einzelkornsaat) nicht zu ausschlaggebender Konkurrenz mit darauffolgendem Kornertragsrückgang führten. Ein standfester Sojabestand kann durch eine Auswahl von mittleren Saatstärken erreicht werden.

Eine weitere Eigenschaft, die mit der Pflanzenlänge in Verbindung gebracht wird, ist die **Höhe des untersten Hülsenansatzes** (Board 2001; Epler und Staggenborg 2008). Diese ist sehr wichtig, weil es bei der vollmechanisierten Sojaernte sehr oft vorkommt, dass die untersten Hülsen auf dem Haupt- sowie den Seitentrieben nicht mitgemäht werden können, weil sie nah an der Bodenoberfläche angesetzt sind. Das Schneidwerk des Mähdreschers kann trotz technischer Anpassungen wie Flexschneidwerk diese Hülsen dann nicht erfassen, ohne gleichzeitig Erde oder Steine aufzunehmen (Yilmaz 2003; Çalışkan et al. 2007). Eine übliche Schnitttiefe bei Soja liegt zwischen 7,5 cm und 12,5 cm, sodass alle tieferen Hülsenansätze in Ernteverlusten resultieren (Mehmet 2008). Eine gewünschte Ansatzhöhe für die untersten Hülsen wäre somit 10 cm aufwärts. Diese ist zunächst sortenspezifisch, zum Teil aber auch von der Anbautechnik abhängig (Yilmaz 2003; Edwards und Purcell 2005). Hohe Saatstärken fördern die Höhe des untersten Hülsenansatzes, sodass man teilweise bis zu 5 cm signifikante Unterschiede feststellen konnte (Spader und Deschamps 2015; Ribeiro et al. 2017). In der vorliegenden Arbeit führte eine

Erhöhung der Saatstärke über alle Sorten (geprüft wurden 30, 50, 70 und 90 Kö m⁻²) ebenfalls zu einer signifikanten Steigerung der Höhe des untersten Hülsenansatzes (Sobko et al. 2019). Somit wäre die Saatstärke ein Instrument, die Höhe des untersten Hülsenansatzes zu steuern. Die Erhöhung der Saatstärken kann durch Minimierung der Ernteeinbußen einen höheren Kornertrag fördern. Dabei sollte man aber nicht die Tatsache aus den Augen verlieren, dass Saatgut ein großer Kostenposten in der Produktionskostenrechnung des Sojaanbaus nicht nur in Deutschland (Schmidt et al. 2019), sondern auch in der USA (Kratochvil et al. 2004), in Asien (Rahman et al. 2011a), Brasilien (Ribeiro et al. 2017; Corassa et al. 2018) ist. Enge Reihenabstände im Sojabestand (Sorte aus Reifegruppe IV) führten in der Studie von Mehmet (2008) in der Türkei zu höheren Ansätzen der untersten Hülsen. Bei den in der vorliegenden Arbeit geprüften Saatverfahren (Drillsaat mit 14 cm Reihenabstand und Einzelkornsaat mit 28 cm Reihenabstand) und Sorten (Reifegruppe 00, 000) wurden allerdings keine Unterschiede in der Höhe des untersten Hülsenansatzes festgestellt (Sobko et al. 2020a). Es könnte in den geringen Unterschieden der Standräume im Sojabestand durch nicht weit auseinander liegende Reihenabstände begründet sein, wie auch in Versuchen von Yilmaz (2003) gezeigt wurde.

Die oberirdische Biomasse, vor allem die Blattfläche, ist wichtig für die Produktivität der Sojapflanze. Die Größe der gesamten Blattfläche wird durch den **LAI** beschrieben (Board und Harville 1993; Board und Kahlon 2011). Infolgedessen ist eine möglichst große Blattfläche zu den kritischen Entwicklungsstadien gewünscht, in denen die Pflanze am meisten Energie benötigt (Shibles und Weber 1965; Fageria et al. 2006). Eine hohe photosynthetische Leistung und ein hoher LAI sind bei Soja ab dem Wechsel in die reproduktiven Phasen ertragsfördernd (Wells 1991; Gaspar und Conley 2015). Der LAI reagiert sensibel auf die Veränderung der Saatstärke und auch der Reihenabstände (Board und Harville 1996; Board 2000; Purcell et al. 2002). Mit der Erhöhung der Saatstärke beziehungsweise der daraus folgenden Bestandesdichte steigt auch der LAI, jedoch nur bis zu einer Grenze, ab der die Pflanzen im dichten Bestand in Konkurrenz zueinander treten und gegenseitige Beschattung stattfindet (Weber et al. 1966; Herbert und Litchfield 1984; Wells 1991; Lee et al. 2008). Der LAI spielt mit beginnender Abreife (R7) kaum noch eine Rolle, weil zu diesem Zeitpunkt vor allem Umlagerungsprozesse von Assimilaten ins Korn erfolgen (Board und Kahlon 2011). Auch in den in Deutschland durchgeführten Untersuchungen zeigte sich diese Veränderung der LAI-Werte im Verlauf der Vegetation: Sie stiegen mit der Erhöhung der Saatstärken zur Vollblüte (R2), blieben dann aber fast unverändert bis zur Abreife (R7) (Sobko et al. 2019). Hierbei hat die Saatstärke keinen Einfluss auf die Abreife ausgeübt. Zwischen Drillsaat (14 cm Reihenabstand) und Einzelkornsaat (28 cm Reihenabstand) wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede im LAI zu R2 und zu R7 beobachtet (Sobko et al. 2020a), wie auch die Studie von Souza et al. (2016) zeigte. Tendenziell können die schmalere Reihenabstände (19-38 cm) im Sojabestand in jedem Entwicklungsstadium zu höheren LAI-Werten führen (Kratochvil et al. 2004; Cox und Cherney 2011). Man kann annehmen, dass in

Trockengebieten oder Trockenjahren die schmalere Reihenabstände bevorzugt werden sollten, da ein hoher LAI (hohe Bodenbedeckung) der Wasserverdunstung aus dem Boden vorbeugen könnte. Es wäre für den ökologischen Sojaanbau in Deutschland, sowie Europa zusätzlich von Vorteil, weil man schneller Reihenschluss und daraus folgend bessere Unkrautunterdrückung erreichen könnte.

Soja kann sich in Symbiose mit **Knöllchenbakterien** (hier: *Bradyrhizobium japonicum*) mit Stickstoff aus der Luft nahezu vollständig selbst versorgen (van Kessel und Hartley 2000; Hungria und Vargas 2000; Kinkema et al. 2006). Allerdings muss das Sojasaatgut mit Knöllchenbakterien geimpft werden, da *B. japonicum* in den hiesigen Böden natürlicherweise nicht vorkommt, und das Überleben der Bakterien im Boden zwischen zwei Anbaujahren von Soja zudem nicht sicher ist (Salvagiotti et al. 2008; Zimmer et al. 2013; Hammelehle et al. 2013). Die erfolgreiche Infektion der Sojawurzel mit *B. japonicum* ist von der Kompatibilität der beiden Partner abhängig (Smit et al. 1992; Mason et al. 2018). Es sind Sojasorten und Bakterienstämme bekannt, die unterschiedlich gut miteinander kompatibel sind (Wilbois et al. 2014; Zimmer et al. 2016). Kräftiges und gesundes Wurzelwerk trägt auch zur Knöllchenbildung sowie der Knöllchenfunktionalität bei und somit zu einer hohen Stickstofffixierungsleistung und -versorgung der Pflanzen (Smit et al. 1992; Coskan und Dogan 2011). In den durchgeführten Versuchen war kein Zusammenhang zwischen Saatstärke beziehungsweise Saatverfahren feststellbar, der auf die Veränderung der Knöllchenanzahl hinweisen würde (Sobko et al. 2019; Sobko et al. 2020a). Grundsätzlich könnte man aber in dünneren Sojabeständen mehr Knöllchen pro Einzelpflanze finden, weil den Wurzeln ein größerer Wuchsraum zur Verfügung steht (Luca et al. 2014). In den geprüften Saatstärken und in den beiden Versuchsjahren herrschenden Wetterbedingungen zeigte sich das jedoch nicht.

6.5 Quintessenz und Perspektiven

Deutschland ist kein klassisches Land für den Sojaanbau. Allerdings setzen die steigende Nachfrage nach Sojaprodukten speziell aus heimischem Anbau (GVO-frei) und die zunehmende Erwärmung vieler Regionen, bedingt durch den Klimawandel, Impulse für die Ausdehnung des Sojaanbaus in Deutschland. Neben intensiver Züchtungsarbeit ist eine Optimierung der Anbautechnik von Soja in Deutschland gefordert. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse zu Steuerung der Produktivität von Soja in Deutschland und zu den Inhaltsstoffen Protein und Öl geliefert.

Die für die vorliegende Arbeit aufgestellten Versuchsfragen können folgendermaßen beantwortet werden:

- *Welchen Einfluss nimmt das **Saatverfahren** auf Kornertrag, Protein- und Ölgehalt sowie auf folgende agronomische Eigenschaften wie Pflanzenlänge, Lager, die Höhe des untersten Hülsenansatzes und Knöllchenbildung der Soja?*

Der Kornertrag sowie Protein- und Ölgehalt wurden weder bei der Drillsaat noch bei der Einzelkornsaat signifikant beeinflusst. Generell ließ sich ein gleichmäßigerer Sojabestand bei Einzelkornsaat erzielen als bei Drillsaat. Zwischen den geprüften Saatverfahren zeigten sich keine signifikanten Unterschiede der agronomischen Eigenschaften wie Pflanzenlänge, Lager, Höhe des untersten Hülsenansatzes oder Knöllchenbildung. Daher sind Drillsaat und Einzelkornsaat für den Sojaanbau gleich effizient.

- *Wie beeinflussen verschiedene **Saatstärken** Kornertrag und Ertragsstruktur, Qualität und agronomische Eigenschaften wie LAI, Lager und die Höhe des untersten Hülsenansatzes von Soja?*

Der Kornertrag war bei einer Saatstärke von 30 Kö m⁻² signifikant niedriger als bei 90 Kö m⁻², und die Kornerträge bei 50 und 70 Kö m⁻² waren fast gleich. Die Sorten der frühreifenden Reifegruppe 00 lieferten höhere Erträge als die der sehr frühreifenden 000 Sorten. Auf den Protein- und Ölgehalt hatte die Saatstärke keinen signifikanten Einfluss. Mit der Erhöhung der Saatstärke nahm die Höhe des untersten Hülsenansatzes zu, aber der Sojabestand wurde auch lageranfälliger. Bei einer Saatstärke von 30 Kö m⁻² wurden doppelt so viele Hülsen pro Pflanzen und Seitentriebe gebildet wie bei 90 Kö m⁻², doch blieben TKM, Anzahl Körner pro Hülsen und Harvest Index fast unverändert. Auf Grund der Ergebnisse unter den gegebenen Wetterbedingungen in Deutschland ist für 00 und 000 Sorten eine Saatstärke von 50 bis 70 Kö m⁻² empfehlenswert.

- *Welche Wirkungen haben ausgewählte **Umweltfaktoren** auf den Kornertrag, den Proteingehalt und den Ölgehalt von Soja?*

Ursprünglich ist Soja eine subtropische Pflanze mit hohen Wärmeansprüchen, die ohne züchterische Anpassung an das gemäßigte, meist ozeanische Klima in Deutschland kaum angebaut werden könnte. Derzeit sind in Deutschland überwiegend Sorten der Reifegruppen 00 und 000, vereinzelt Reifegruppe 0, vertreten. Mit dem Wissen, welche Sorten mit welchen Produktionszielen das züchterische Potenzial und das Potenzial des Standortes am besten ausschöpfen, ließen sich diese Sorten angepasst auf Nutzungsziel und Anbauregion besser platzieren und gegebenenfalls weiterentwickeln. Reifegruppenübergreifend korrelierten Korn-, Protein- und Ölerträge positiv mit hoher Sonneneinstrahlung. Bei 000 Sorten korrelierte der Proteingehalt schwach positiv mit hohen Temperaturen zur Abreife. Diese Standorte wären

demnach für Erzeugung hoher Proteingehalte, wie sie zum Beispiel für die Herstellung von Tofu gefordert sind, besonders geeignet. Die 00 Sorten konnten in den warmen Anbauregionen stabil hohe Kornerträge liefern. Wenn bei Soja der Fokus auf eine Protein- oder Ölproduktion gelegt wird, wären die Anbaustandorte mit ausreichender Wasserverfügbarkeit besser geeignet

Die folgende Tabelle klassifiziert die Sojasorten verschiedener Reifegruppen nach ihrer Anpassung an Anbaustandorte mit unterschiedlichen Umwelteigenschaften in Deutschland (Tab.3).

Tabelle 3: Eignung von Reifegruppen bei Soja für Produktionsziele an unterschiedlichen Standorten in Deutschland

Standort	Reifegruppe 00	Reifegruppe 000
	geeignet für hohe Werte bei	
trocken	Ölgehalt	Ölgehalt
feucht	kein Einfluss	Kornertrag
warm	Kornertrag	Proteingehalt
kühl	kein Einfluss	kein Einfluss
hohe Einstrahlung	Kornertrag	Kornertrag

Die zunehmende Erwärmung im Zuge des Klimawandels ermöglicht grundsätzlich eine Expansion der Anbaufläche von Soja in Deutschland. Hier sind die Züchter, Pflanzenbauer und Techniker gefordert, angepasste und leistungsfähige Sojasorten mit optimierter und nachhaltiger Anbautechnik für die Praxis zu entwickeln.

Neben dem Sojaprotein könnte in Deutschland auch Sojaöl ein Produktionsziel werden. Gerade in der ökologischen Landwirtschaft gibt es derzeit in Deutschland keine Ölpflanze, die man dauerhaft erfolgreich anbauen und vermarkten kann. Der Anbau von „Ökosoja“ in Deutschland ist erfahrungsgemäß sehr gut möglich und bringt im Vergleich mit konventionellem Anbau nur minimal geringere Erträge. Eine Doppelnutzung von Soja, mit Ölgewinnung und Verwendung des Presskuchens als eiweißreiches Tierfutter wäre wie in den USA oder Südamerika denkbar. Der Ausbau der Sojaproduktion in Deutschland mit züchterisch weiter angepassten Sorten (Frühreife, Ertragssteigerung, Verringerung antinutritiver Inhaltsstoffe, Schwerpunkte bei der Erzeugungsrichtung für Protein beziehungsweise Öl) würde die vom Verbraucher gewünschte Rückverfolgbarkeit der Herstellung von vegetarischen und veganen Lebensmitteln ermöglichen, die regional, nachhaltig und klimaneutral erzeugt werden könnten.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Soja (*Glycine max* L. Merrill) ist mit einem Gehalt von ca. 40 % Rohprotein sowie ca. 20 % Rohfettgehalt im Korn und **vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten** eine der wichtigsten Kulturpflanzen weltweit. Das hochwertige Sojaweiß ist wichtiger Bestandteil von Tierfutter bei der Milch- und Fleischerzeugung. Sojaöl wird in der menschlichen Ernährung oft eingesetzt, und mit zunehmender vegetarischer oder veganer Ernährungsweise sind proteinreiche Lebensmittel aus Soja sehr nachgefragt. Pflanzenbaulich gesehen ist Soja ein vorteilhaftes Fruchtfolgeglied, weil sie durch Symbiose mit Knöllchenbakterien den atmosphärischen Stickstoff fixieren kann, sich damit gut selbst versorgen kann und einen hohen Vorfruchtwert hat. Da Soja in Deutschland keine Anbautradition hat, ist eine Optimierung der Anbautechnik erforderlich.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten, **eine effiziente Anbautechnik** für Soja in Deutschland auszuarbeiten. In drei Publikationen, die auf drei mehrjährigen sowie mehrortigen und orthogonalen Feldversuchen basieren, werden die Einflüsse von Saatstärke und Saatverfahren bei mehreren Sorten aus verschiedenen Reifegruppen auf Ertrag, Protein- und Ölgehalt sowie agronomische Eigenschaften von Soja untersucht. Außerdem wird der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen Temperatur, Niederschlag und Sonnenstrahlung auf Ertrag, Ölgehalt und Proteingehalt haben, um potenzielle Standorte für bestimmte Produktionsschwerpunkte identifizieren zu können.

In der **ersten** Publikation (veröffentlicht in Agronomy Journal MDPI) sind die Ergebnisse aus den zweijährigen Versuchen über zwei Jahre und zwei Standorte in Süddeutschland mit vier Sojasorten unterschiedlicher Reifegruppen (00, 000) und Wuchstypen entweder mit Drillsaat (Reihenabstand 14 cm) oder mit Einzelkornsaat (Reihenabstand 28 cm) dargestellt. Um die Frage zu beantworten, welches Saatverfahren effizienter ist, sind folgende Parameter wie Kornertrag und Ertragsstruktur, Protein- und Ölgehalt, LAI, Pflanzenlänge und Höhe des untersten Hülsenansatzes, Lager und Knöllchenanzahl untersucht worden. Das Saatverfahren beeinflusste die geprüften Merkmale nicht signifikant, und die Erträge und Qualitäten unterschieden sich kaum (3,6 t ha⁻¹ TS, 40,9 % TS Proteingehalt, 18,8 % TS Ölgehalt bei Drillsaat; 3,8 t ha⁻¹ TS, 40,1 % TS Proteingehalt, 19,1 % TS Ölgehalt bei Einzelkornsaat). Diese Erkenntnis ist sehr hilfreich für die Sojaproduzenten, denn sie brauchen keine Investitionen in neue Saattechnik tätigen, sondern können mit der vorhandenen Technik (in der Regel Drillmaschine) aussäen.

Die **zweite** Publikation (veröffentlicht in Plant, Soil and Environment) befasst sich mit Effekten der Saatstärke für Soja mit vier Sorten der Reifegruppen 00 und 000. Vier Saatstärken (30, 50, 70 und 90 Kö m⁻²) wurden über zwei Jahre und zwei Standorte in Süddeutschland getestet. Der niedrigste Kornertrag (3,2 t ha⁻¹ TS) wurde bei einer Saatstärke von 30 Kö m⁻² und der höchste bei 90 Kö m⁻² (4,4 t ha⁻¹ TS) erzielt. Dabei waren die 00 Sorten (3,6 t ha⁻¹ TS)

ertragreicher als die 000 Sorten ($3,4 \text{ t ha}^{-1}$ TS). Die Saatstärke beeinflusste die Qualitätsmerkmale nicht. Die dichteren Bestände waren lageranfälliger als die weniger dichten. Der unterste Hülansenatz lag 4 cm höher bei einer Saatstärke von 90 Kö m^{-2} ($13,4 \text{ cm}$) als bei 30 Kö m^{-2} ($9,4 \text{ cm}$). Mit der Erhöhung der Saatstärke ließen sich Ertragseinbußen durch Druschverluste reduzieren, weil beim Drusch die untersten Hülsen besser erfasst werden könnten. Daraus folgend liegt die optimale Sojasaatstärke unter Berücksichtigung produktionstechnischer Aspekte (Saatgutqualität, Auflaufbedingungen) und Standorteigenschaften zwischen 50 und 70 Kö m^{-2} für 00 und 000 Sorten an den geprüften Standorten und ähnlichen Regionen in Deutschland.

In der **dritten Publikation** (veröffentlicht in Agronomy Journal MDPI) sind die Einflüsse von Umweltfaktoren auf Ertrag, Protein- und Ölgehalt sowie Protein- und Ölertrag von Soja in Deutschland untersucht worden. In den zweijährigen Feldversuchen wurden 13 Sojasorten aus den Reifegruppen 00 und 000 auf mehreren Standorten in ganz Deutschland (vier im Jahr 2016 und fünf im 2017) geprüft. Die 000 Sorten reagieren weniger sensibel auf die Veränderung der Umweltfaktoren im Vergleich zu den 00 Sorten. Unabhängig von der Reifegruppe förderte eine hohe Sonneneinstrahlung und ausreichend Niederschlag tendenziell die Kornerträge ($r_{\text{Kornertrag} / \text{Sonneneinstrahlung}} = 0,32$ und $r_{\text{Kornertrag} / \text{Niederschlag}} = 0,33$). Hohe Temperaturen zur Abreife senkten die Produktivität, könnten aber bei 000 Sorten tendenziell zu höherem Proteingehalt führen ($r_{\text{Proteingehalt} / \text{CHU zur Abreife}} = 0,23$). Standorte, die nicht Wasserstress gefährdet sind, wären geeignet für den Sojaanbau, wenn Protein- oder Ölertrag im Vordergrund steht.

Die gesamte Arbeit zeigt, dass eine angepasste Saatstärke von 50 - 70 Kö m^{-2} kombiniert mit Sorten aus geeigneten Reifegruppen für den Sojaanbau in Deutschland grundsätzlich zu empfehlen ist. In Trockengebieten ist eine geringerer Saatstärke ratsam in Gegensatz zu Gebieten mit mehr Niederschlag. Ein zusätzlicher Aufwand für die technische Ausstattung bei der Saat ist nicht erforderlich, weil sowohl Drillsaat als auch Einzelkornsaat durchgeführt werden können. Durch die Abstimmung der Nutzungsrichtung (Eiweiß oder Öl; menschliche Ernährung oder Viehfutter) mit den standortspezifischen klimatischen Bedingungen lässt sich Soja effizient und mit der gewünschten Rückverfolgbarkeit zur Qualitätssicherung produzieren.

Die mit dem Klimawandel einhergehende Erwärmung bietet **eine Chance**, die Sojaproduktion in Deutschland weiter auszudehnen. Dazu liefert diese Arbeit Ergebnisse, aus denen sich Empfehlungen ableiten lassen, die unmittelbar in die Praxis umsetzbar sind.

8 SUMMARY

With a crude protein content of approximately 40% and a crude fat content of approximately 20% in the seeds, **soybean** (*Glycine max* L. Merrill) **is one of the world's most important crops** with a wide range of uses. The high-quality soybean protein is an important component of animal feed in dairy and meat production. Soybean oil is often used in human nutrition, and with increasing vegetarian or vegan diets, protein-rich foods made from soybean are in high demand. In practical farming, soybean is a beneficial crop in crop rotations because it can fix atmospheric nitrogen through symbiosis with rhizobia, making the plant self-sufficient in nitrogen supply. Since soybean cultivation has no tradition in Germany, optimization of the cultivation technique is required.

The present work is about the elaboration of **efficient cultivation techniques** for soybean in Germany. In three publications, based on three multi-year as well as multi-location and orthogonal field trials, the effects of sowing density and sowing system on yield, protein and oil content as well as on agronomic properties of soybean are investigated in several varieties from different maturity groups. In addition, the effects of temperature, precipitation and solar radiation on yield, oil content and protein content has been investigated to identify potential locations for specific production priorities.

In the **first publication** (published in Agronomy Journal MDPI), the results from trials over two years and two locations in southern Germany with four soybean varieties of different maturity groups (00, 000) and growth types with either drill seeding (row spacing 14 cm) or precision seeding (row spacing 28 cm) are presented. To answer the question of which seeding method is more efficient, the following characteristics have been investigated, namely seed yield and yield structure, protein and oil content, LAI, plant height, height of the first pod set, lodging, and nodule numbers. The sowing system did not significantly affect the tested traits, and there was little difference in yield and qualities (seed yield: 3.6 t ha⁻¹ DM, protein content: 40.9 % DM, oil content: 18.8 % DM for drill seeding; seed yield: 3.8 t ha⁻¹ DM, protein content: 40.1 % DM, oil content: 19.1 % DM for precision seeding). These results are very helpful for soybean producers, because they do not need to invest in new sowing technique but can sow with sowing machines which are already available on the farm.

The **second publication** (published in Plant, Soil and Environment) is about effects of sowing density of soybean with four varieties of maturity groups 00 and 000. Four sowing densities (30, 50, 70 and 90 seeds m⁻²) were tested over two years and two locations in southern Germany. The lowest seed yield (3.2 t ha⁻¹ DM) was obtained at a sowing density of 30 seeds m⁻² and the highest at 90 seeds m⁻² (4.4 t ha⁻¹ DM). The 00 varieties (3.6 t ha⁻¹ DM) were higher yielding than the 000 varieties (3.4 t ha⁻¹ DM). Sowing density did not affect seed quality characteristics. Plants were more susceptible to lodging with increasing sowing density.

The lowest pod set was 4 cm higher at a sowing density of 90 seeds m⁻² (13.4 cm) than at 30 seeds m⁻² (9.4 cm). Increasing sowing density could reduce yield losses due to threshing because the height of the first pod set was increased at high sowing densities. Consequently, the optimum soybean seed rate would be between 50 and 70 seeds m⁻² for 00 and 000 varieties at the tested locations and similar regions in Germany.

In the **third publication** (published in Agronomy Journal MDPI), the influences of environmental factors on yield, protein and oil content, and protein and oil yield of soybean in Germany have been investigated. In the two-year field trials, 13 soybean varieties from maturity groups 00 and 000 were tested at several locations across Germany (four in 2016 and five in 2017). The 000 varieties were less sensitive to environmental factors compared to the 00 varieties. Regardless of maturity group, high solar radiation and appropriate precipitation tended to increase seed yields ($r_{\text{seed yield / solar radiation}} = 0.32$ and $r_{\text{seed yield / solar radiation}} = 0.33$). High temperatures at maturity reduced the productivity but provided slightly higher protein contents in 000 varieties ($r_{\text{protein content / CHU at maturity}} = 0.23$). The locations that are not at risk for water stress would be suitable for soybean production if protein or oil yield is the primary concern.

Overall, this study indicates that a sowing density of 50-70 seeds m⁻² in combination with varieties of appropriate maturity groups could promote the soybean cultivation in Germany. In dry locations, a lower sowing density is advisable in contrast to locations with more precipitation. Additional costs for the adaptation of technical equipment would not be incurred, because both drill seeding and precision seeding can be applied. By matching the direction of use (protein and/or oil production) of soybean to the climatic conditions of specific regions, soybeans for food and feed can be produced in Germany with sufficient traceability for quality and food safety.

The climate warming offers **opportunities** to extend soybean production in Germany. This thesis provides results from which recommendations can be derived that are immediately applicable in agricultural practice.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- Aditya, J. P.; Bhartiya, P.; Bhattiya, A.** (2011): Genetic variability, heritability and character association for yield and component characters in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). In: *Journal of Central European Agriculture* 12 (1), S. 27–34. DOI: 10.5513/JCEA01/12.1.877.
- Aditya, P.; Gupta, S. Kumar; Kumar, J.; Mehendi, S.; Pandey, V. R.** (2016): Soybean. In: Gupta, S. K. (Hg.): *Breeding oilseed crops for sustainable production. Opportunities and constraints*. London: Academic Press, S. 293-315. DOI: 10.1016/B978-0-12-801309-0.00012-4.
- Aggarwal, N.; Ram, H.; Singh, G.** (2014): Heat utilization, irrigation efficiency and productivity of soybean (*Glycine max* L. Merrill) as influenced by sowing dates, sowing methods and seeding rates. In: *Progressive Research* (9), S. 16–21. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/263138346_HEAT_UTILIZATION_IRRIGATION_EFFICIENCY_AND_PRODUCTIVITY_OF_SOY_BEAN_Glycine_max_L_Merrill_AS_INFLUENCED_BY_SOWING_DATES_SOWING_METHODS_AND_SEEDING_RATES.
- Agrometeorology Bavaria** (2019): Weather data in Bavaria. Agrometeorology Bayern. Online verfügbar unter <https://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L941ES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=1OVER48553&p4=4D078O1691>, zuletzt geprüft am 01.06.2019.
- Agrometeorology Bayern** (2018): Weather data in Bavaria. Agrometeorology Bayern. Online verfügbar unter <https://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L941ES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=1OVER48553&p4=4D078O1691>, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Agudamu, Y. T.; Shiraiwa, T.** (2016): Branch development responses to planting density and yield stability in soybean cultivars. In: *Plant Production Science* 19 (3), S. 331–339. DOI: 10.1080/1343943X.2016.1157443.
- Aigner, A.; Salzeder, G.** (2015): Seed technology and seeding density for soybean (in German). In: *Publication Series of the Bavarian State Research Center for Agriculture* (6), S. 53–56. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/soja-tagung-2015_lfl-schriftenreihe.pdf.
- Alliprandini, L. F.; Abatti, C. et al.** (2009): Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. In: *Crop Science* 49 (3), S. 801–808. DOI: 10.2135/cropsci2008.07.0390.
- Altinok, S.; Erdoğdu, I.; Rajcan I.** (2004): Morphology, forage and seed yield of soybean cultivars of different maturity grown as a forage crop in Turkey. In: *Canadian Journal of Plant Science* 84 (1), S. 181–186. DOI: 10.4141/P03-013.
- Andrade, F. H.; Calviño, P.; Cirilo, A.; Barbieri, P.** (2002): Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. In: *Agronomy Journal* (94), S. 975–980. DOI: 10.2134/agronj2002.9750.
- Arslanoglu, F.; Aytac, S.; Oner, E. K.** (2011): Effect of genotype and environment interaction on oil and protein content of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seed. In: *African Journal of Biotechnology* 10 (80), S. 18409–18417. DOI: 10.5897/AJB10.1879.

- Atkins, C.** (1982): Efficiencies and inefficiencies in the legume/Rhizobium symbiosis. A review. In: *Plant and Soil* (82), S. 273–284. DOI: 10.1007/BF02184267.
- Bachteler, K.** (2017a): Crop-Heat-Units-System bei Sojabohnen. In: *Taifun Sojainfo* (31), S. 1–4. Online verfügbar unter https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2017/11/Sojainfo_31.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- Bachteler, K.** (2017b): Entwicklungsstadien und Bedürfnisse der Sojabohne. In: *Taifun Sojainfo* (51), S. 1–4. Online verfügbar unter https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2018/11/Sojainfo_51_Sep18.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- BAES** (2018): Cultivars list. BAES. Online verfügbar unter <https://www.baes.gv.at/pflanzensorten/oesterreichische-beschreibende-sortenliste>, zuletzt geprüft am 01.06.2018.
- Baker, J. T.; Allen, L. H.; Boote, K. J.; Jones, P.; Jones, J. W.** (1989): Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. In: *Crop Science* 29 (1), S. 98–105. DOI: 10.2135/cropsci1989.0011183X002900010024x.
- Ball, R. A.; McNew, R. W.; Vories, E. D.; Keisling, T. C.; Purcell, L. C.** (2001): Path analyses of population density effects on short-season soybean yield. In: *Agronomy Journal* 93 (1), S. 187–195. DOI: 10.2134/agronj2001.931187x.
- Bandillo, N.; Jarquin, D.; Song, Q.; Nelson, R.; Cregan, P.; Specht, J.; Lorenz, A.** (2015): A population structure and genome-wide association analysis on the USDA soybean germplasm collection. In: *The plant genome* 8 (3), 1-13. DOI: 10.3835/plantgenome2015.04.0024.
- Bellaloui, N.; Bruns, H. A.; Abbas, H. K.; Mengistu, A.; Fisher, D. K.; Reddy, K. N.** (2015): Effects of row-type, row-spacing, seeding rate, soil-type, and cultivar differences on soybean seed nutrition under US Mississippi delta conditions. In: *PloS one* 10 (6), 1–23. DOI: 10.1371/journal.pone.0129913.
- Berschneider, J.** (2016): Chances and limitations of European soybean production: market potential analysis. Institute of Agricultural Policy and Markets. Stuttgart: Universität Hohenheim. Online verfügbar unter <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2016/1304/>, zuletzt geprüft am 02.01.2021.
- Betz, G.; Aeppli, A.; Menshutina, N.; Leuenberger, H.** (2005): In vivo comparison of various liposome formulations for cosmetic application. In: *International journal of pharmaceutics* 296 (1-2), S. 44–54. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2005.02.032.
- Bhattacharyya, R.; Kundu, S.; Prakash, V.; Gupta, H. S.** (2008): Sustainability under combined application of mineral and organic fertilizers in a rainfed soybean–wheat system of the Indian Himalayas. In: *European Journal of Agronomy* 28 (1), S. 33–46. DOI: 10.1016/j.eja.2007.04.006.
- Bickert, C.** (2020): Woher kommt unsere Soja? In: *DLG-Mitteilung* (3), S. 24–25.
- BLE** (2020): Was ist nachhaltige Landwirtschaft? Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-funktioniert-landwirtschaft-heute/was-ist-nachhaltige-landwirtschaft>, zuletzt geprüft am 10.12.2020.
- BMEL** (2017): “Organic Farming-Looking Forwards” strategy. Towards greater sustainability in Germany. Federal ministry of food and agricultur. Online verfügbar unter

https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/OrganicFarmingLookingForwards.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 14.03.2020.

- Board, J.** (2000): Light interception efficiency and light quality affect yield compensation of soybean at low plant populations. In: *Crop Science* 40 (5), S. 1285–1294. DOI: 10.2135/cropsci2000.4051285x.
- Board, J.** (2001): Reduced lodging for soybean in low plant population is related to light quality. In: *Crop Science* 41 (2), S. 379–384. DOI: 10.2135/cropsci2001.412379x.
- Board, J. E.; Harville, B. G.** (1993): Soybean yield component responses to a light interception gradient during the reproductive period. In: *Crop Science* 33 (4), S. 772. DOI: 10.2135/cropsci1993.0011183X003300040028x.
- Board, J. E.; Harville, B. G.** (1996): Growth dynamics during the vegetative period affects yield of narrow-row, late-planted soybean. In: *Agronomy Journal* 88 (4), S. 567–572. DOI: 10.2134/agronj1996.00021962008800040012x.
- Board, J. E.; Kahlon, C. S.** (2011): Soybean yield formation: what controls it and how it can be improved. In: El-Shemy, H. (Hg.): *Soybean. Physiology and Biochemistry*. London: IntechOpen, S. 1-36. DOI: 10.5772/17596. Online verfügbar unter <https://www.intechopen.com/books/soybean-physiology-and-biochemistry/soybean-yield-formation-what-controls-it-and-how-it-can-be-improved>.
- Board, J. E.; Kumudini, S.; Omielan, J.; Prior, E.; Kahlon, C. S.** (2010): Yield response of soybean to partial and total defoliation during the seed-filling period. In: *Crop Science* 50 (2), S. 703–712. DOI: 10.2135/cropsci2009.03.0128.
- Boerma, H. R.; Specht, J. E.** (2004): Reproductive Morphology. In: Shibles, R. M.; Harper, J. E.; Wilson, R. F.; Shoemaker, R. C. (Hg.): *Soybeans. Improvement, production, and uses*. Madison, Wis.: American Society of Agronomy, S. 59-93.
- Boquet, D. J.** (1990): Plant population density and row spacing effects on soybean at post-optimal planting dates. In: *Agronomy Journal* 82 (1), S. 59–64. DOI: 10.2134/agronj1990.00021962008200010013x.
- Boroomandan, P.; Khoramivafa, M.; Haghi, Y.; Ebrahimi, A.** (2009): The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean (*Glycine max* L. Merr). In: *Pakistan Journal of Biological Sciences* 12 (4), S. 378–382. DOI: 10.3923/pjbs.2009.378.382.
- Bowers, G. R.; Rabb, J. L.; Ashlock, L. O.; Santini, J. B.** (2000): Row spacing in the early soybean production system. In: *Agronomy Journal* 92 (3), S. 524–531. DOI: 10.2134/agronj2000.923524x.
- Boydak, E.; Alpaslan, M.; Hayta, M.; Gerçek, S.; Simsek, M.** (2002): Seed composition of soybeans grown in the Harran region of Turkey as affected by row spacing and irrigation. In: *Journal of agricultural and food chemistry* 50 (16), S. 4718–4720. DOI: 10.1021/jf0255331.
- Bozdoğan, A. M.** (2008): Seeding uniformity for vacuum precision seeders. In: *Scientia Agricola* 65 (3), S. 318–322. DOI: 10.1590/S0103-90162008000300013.
- Brevedan, R. E.; Egli, D. B.** (2003): Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. In: *Crop Science* 43 (6), S. 2083. DOI: 10.2135/cropsci2003.2083.

- Bruin, J. L. d.; Pedersen, P.** (2008): Effect of row spacing and seeding rate on soybean yield. In: *Agronomy Journal* 100 (3), S. 704. DOI: 10.2134/agronj2007.0106.
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft** (2020): Soja-Nahrungsmittel für Tier und Mensch. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft.de/diskussion-und-dialog/umwelt/soja-nahrungsmittel-fuer-tier-und-mensch#:~:text=98%20Prozent%20der%20Bohnen%20werden,insgesamt%2010%20bis%2020%20Prozent.,> zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- Çalışkan, S.; Arslan, M.; Üremiş, İ.; & Çalışkan, M. E.** (2007): The effects of row spacing on yield and yield components of full season and double-cropped soybean. In: *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 31 (3), S. 147–154.
- Caron, B. O.; Sgarbossa, J.; Schwerz, F.; Elli, E. F.; Eloy, E.; Behling, A.** (2018): Dynamics of solar radiation and soybean yield in agroforestry systems. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* 90 (4), S. 3799–3812. DOI: 10.1590/0001-3765201820180282.
- Carrera, C.; Martínez, M. J.; Dardanelli, J.; Balzarini, M.** (2009): Water deficit effect on the relationship between temperature during the seed fill period and soybean seed oil and protein concentrations. In: *Crop Science* 49 (3), S. 990. DOI: 10.2135/cropsci2008.06.0361.
- Carrera, C.; Martínez, M. J.; Dardanelli, J.; Balzarini, M.** (2011): Environmental variation and correlation of seed components in nontransgenic soybeans: protein, oil, unsaturated fatty acids, tocopherols, and isoflavones. In: *Crop Science* 51 (2), S. 800. DOI: 10.2135/cropsci2010.06.0314.
- CERES** (2020): Engage the chain. An Investor guide on agricultural supply chain risk. CERES. Online verfügbar unter <https://engagethechain.org/soybeans>, zuletzt geprüft am 05.06.2020.
- Chan, J. K.; McDonald, B. E.; Gerrard, J. M.; Bruce, V. M.; Weaver, B. J.; Holub, B. J.** (1993): Effect of dietary alpha-linolenic acid and its ratio to linoleic acid on platelet and plasma fatty acids and thrombogenesis. In: *Lipids* 28 (9), S. 811–817. DOI: 10.1007/BF02536235.
- Chanprasert, W.** (1988): The effects of plant competition on vegetative and reproductive growth in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) with particular reference to reproductive to reproductive abortion. PhD Thesis. Palmerston North: Massey University.
- Chauhan, G. S.; Joshi, O. P.** (2005): Soybean (*Glycine max*): the 21st century crop. In: *Indian journal of agricultural science* 75 (8), S. 461–469.
- Chauhan, O. P.; Chauhan, G. S.** (2007): Development of anti-nutrients free soy beverage using germinated soybean. In: *Journal of Food Science and Technology* (44), S. 62–65.
- Chen, G.; Wiatrak, P.** (2010): Soybean development and yield are influenced by planting date and environmental conditions in the Southeastern Coastal Plain, United States. In: *Agronomy Journal* 102 (6), S. 1731. DOI: 10.2134/agronj2010.0219.
- Clive, J.** (2017): Global status of commercialized biotech/GM crops. ISAAA. Online verfügbar unter <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/52/executivesummary/default.asp>, zuletzt geprüft am 23.01.2020.

- Colsell, S.; Bebb, A.; Becheva, S.; Wenz, K.** (2019): Soja-Report: Wie kann die Eiweißpflanzenproduktion der EU auf nachhaltige und agrarökologische Weise angekurbelt werden? Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/soja-report/>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- Colvin, T. S.; Erbach, D. C.** (1982): Soybean response to tillage and planting methods. In: *Transactions of the ASAE* 25 (6), S. 1533–1535. DOI: 10.13031/2013.33761.
- Corassa, G. M.; Amado, T. J. C.; Strieder, M. L.; Schwalbert, R.; Pires, J. L. F.; Carter, P. R.; Ciampitti, I. A.** (2018): Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. In: *Agronomy Journal* 110 (6), S. 2430–2438. DOI: 10.2134/agronj2018.04.0239.
- Coskan, A.; Dogan, K.** (2011): Symbiotic nitrogen fixation in soybean. In: El-Shemy, H. (Hg.): *Soybean. Physiology and biochemistry*. London: IntechOpen, S. 167–182. DOI: 10.5772/1006. Online verfügbar unter <https://www.intechopen.com/books/soybean-physiology-and-biochemistry/symbiotic-nitrogen-fixation-in-soybean>.
- Cox, W. J.; Cherney, J. H.** (2011): Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. In: *Agronomy Journal* 103 (1), S. 123. DOI: 10.2134/agronj2010.0316.
- Davis, V. M.; Mellendorf, N. E.; Villamil, M. B.; Nafziger, E. D.** (2015): Initial plant size affects response to thinning in soybean. In: *Agronomy Journal* 107 (1), S. 158–166. DOI: 10.2134/agronj13.0599.
- Desclaux, D.; Roumet, P.** (1996): Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. In: *Field Crops Research* 46 (1-3), S. 61–70. DOI: 10.1016/0378-4290(95)00086-0.
- Dornbos, D. L.; Mullen, R. E.** (1991): Influence of stress during soybean seed fill on seed weight, germination, and seedling growth rate. In: *Canadian Journal of Plant Science* (71), S. 373–383. DOI: 10.4141/cjps91-052.
- Dornbos, D. L.; Mullen, R. E.** (1992): Soybean seed protein and oil contents and fatty acid composition adjustments by drought and temperature. In: *Journal of the American Oil Chemists' Society* 69 (3), S. 228–231. DOI: 10.1007/BF02635891.
- Douglas, B.; Maechler, M.; Bolker, B.; Walker, S.** (2015): Fitting linear mixed-effects models using lme4. In: *Journal of Statistical Software* 67 (1), S. 363–385. DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- Dupont, F. M.; Altenbach, S. B.** (2003): Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. In: *Journal of Cereal Science* 38 (2), S. 133–146. DOI: 10.1016/S0733-5210(03)00030-4.
- Edwards, J. T.; Purcell, L. C.** (2005): Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups: agronomic characteristics. In: *Crop Science* 45 (5), S. 1770–1777. DOI: 10.2135/cropsci2004.0564.
- Egli, D. B.** (1988): Plant density and soybean yield. In: *Crop Science* 28 (6), S. 977–981. DOI: 10.2135/cropsci1988.0011183X002800060023x.
- Egli, D. B.** (1993): Cultivar maturity and potential yield of soybean. In: *Field Crops Research* 32 (1-2), S. 147–158. DOI: 10.1016/0378-4290(93)90027-K.

- Egli, D. B.** (2008): Comparison of corn and soybean yields in the United States. Historical trends and future prospects. In: *Agronomy Journal* 100 (S3), S. 79–85. DOI: 10.2134/agronj2006.0286c.
- Egli, D. B.; Bruening, W. P.** (2004): Water stress, photosynthesis, seed sucrose levels and seed growth in soybean. In: *The Journal of Agricultural Science* 142 (1), S. 1–8. DOI: 10.1017/s0021859604004095.
- Egli, D.B.; Bruening, W.P.** (2002): Flowering and fruit set dynamics at phloem-isolated nodes in soybean. In: *Field Crops Research* 79 (1), S. 9–19. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00016-3.
- Epler, M.; Staggenborg, S.** (2008): Soybean yield and yield component response to plant density in narrow row systems. In: *Crop Management* 7 (1), online. DOI: 10.1094/CM-2008-0925-01-RS.
- Ermolina, O. V.; Antonov, S. I.; Korotkova, O. V.** (2011): Change of soybean seed quality during breeding in the Don region (in Russian). In: *Zernovoe Khozjaistvo Rossii* (6), S. 20–28.
- EST GmbH** (2017): Soybeans-Global volume distribution and volume flows. EST GmbH. Online verfügbar unter <http://www.sojatoaster.com/hintergrundinfos/sojaanbau-globale-mengenverteilung-und-mengenstroeme/>, zuletzt geprüft am 23.01.2020.
- Fadeeva, M. F.; Vorobjeva, L. B.; Matveeva, O. L.** (2018): The effect of sowing methods on the formation of the number of seeds in soybeans (in Russian). In: *Journal of legumes and cereals* 25 (1), S. 40–42. DOI: 10.12737/2073-0462-2020-49-53.
- Fageria, N. K.; Baligar, V. C.; Clark, R.** (2006): Physiology of crop production. New York: Food Products Press.
- FAO** (2018): Global Agro-Ecological Zones. FAO. International institute for applied system analysis. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/nr/gaez/en/>, zuletzt geprüft am 01.06.2018.
- FAO** (2020): Crops and livestock products. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- FAOSTAT** (2019): Crops. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, zuletzt geprüft am 03.11.2019.
- FAOSTAT** (2020): Crops. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, zuletzt geprüft am 17.12.2020.
- Federal Office for Plant Varieties** (2000): Guidelines for carrying out agricultural variety tests. Hg. v. Federal Office for Plant Varieties. Hannover. Online verfügbar unter https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/Richtlinie_LW2000.pdf, zuletzt geprüft am 02.01.2021.
- Federal Office for Plant Varieties** (2017): Descriptive list of varieties: cereals, maize oil and fiber crops, leguminous, beet root and catch crops. Federal Office for Plant Varieties. Online verfügbar unter <http://www.bundessortenamt.de/internet30/index.php?id=47.>, zuletzt geprüft am 25.01.2020.

- Fehr, W. R.; Caviness, C. E.; Burmood, D. T.; Pennington, J. S.** (1971): Stage of development descriptions for soybean *Glycine Max* (L.) Merrill. In: *Crop Science* 11 (6), S. 929. DOI: 10.2135/cropsci1971.0011183X001100060051x.
- Ferreira, A. S.; Balbinot Junior, A. A.; Werner, F.; Zucareli, C.; Franchini, J. Cezar; Debiassi, H.** (2016): Plant density and mineral nitrogen fertilization influencing yield, yield components and concentration of oil and protein in soybean grains. In: *Bragantia* 75 (3), S. 362–370. DOI: 10.1590/1678-4499.479.
- Fiez, T. E.; Miller, B. C.; Pan, W. L.** (1994): Winter wheat yield and grain protein across varied landscape positions. In: *Agronomy Journal* 86 (6), S. 1026–1032. DOI: 10.2134/agronj1994.00021962008600060018x.
- Flajsman, M.; Santavec, I.; Kolmanic, A.; Kosmelj, K.; Kocjan-Acko, D.** (2019): Agronomic performance and stability of seed, protein and oil yields of seven soybean cultivars determined in field experiments in Slovenia. In: *Genetika* 51 (1), S. 31–46. DOI: 10.2298/gensr1901031f.
- Funatsuki, H.; Kawaguchi, K.; Matsuba, S.; Sato, Y.; Ishimoto, M.** (2005): Mapping of QTL associated with chilling tolerance during reproductive growth in soybean. In: *Theoretical and applied genetics* 111 (5), S. 851–861. DOI: 10.1007/s00122-005-0007-2.
- Gaspar, A. P.; Conley, S. P.** (2015): Responses of canopy reflectance, light interception, and soybean seed yield to replanting suboptimal stands. In: *Crop Science* 55 (1), S. 377–385. DOI: 10.2135/cropsci2014.03.0200.
- Gibson, L. R.; Mullen, R. E.** (1996a): Influence of day and night temperature on soybean seed yield. In: *Crop Science* 36 (1), S. 98. DOI: 10.2135/cropsci1996.0011183X003600010018x.
- Gibson, L. R.; Mullen, R. E.** (1996b): Soybean seed quality reductions by high day and night temperature. In: *Crop Science* 36 (6), S. 1615. DOI: 10.2135/cropsci1996.0011183X003600060034x.
- Gopalan, C.; Sastri, R.; Balasubramanian, S. C.** (1989): Nutritive Value of Indian Foods. Hyderabad: National Institute of Nutrition.
- Grieshop, C. M.; Fahey, G. C.** (2001): Comparison of quality characteristics of soybeans from Brazil, China, and the United States. In: *Journal of agricultural and food chemistry* 49 (5), S. 2669–2673. DOI: 10.1021/jf0014009.
- Guebre-Egziabher, F.; Rabasa-Lhoret, R. et al.** (2008): Nutritional intervention to reduce the *n*-6/*n*-3 fatty acid ratio increases adiponectin concentration and fatty acid oxidation in healthy subjects. In: *European journal of clinical nutrition* 62 (11), S. 1287–1293. DOI: 10.1038/sj.ejcn.1602857.
- Hahn, V.; Miedaner, T.** (2013): Soybean cultivation in the EU (in German). Rewarding cultivation without GMOs; [100% practice]. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- HALDRUP:** Product description of drill machine. Online verfügbar unter <https://www.haldrup.net/saemaschinen/sb25.html>, zuletzt geprüft am 04.07.2020.
- Hamid, M. A.; Islam M. Z.; Biswas, M.; Begum, A. A.; Saifullah, M.; Asaduzzaman, M.** (2002): Effect of method of sowing and seed rate on the growth and yield of soybean. In: *Pakistan Journal of Biological Sciences* 5 (10), S. 1010–1013. DOI: 10.3923/pjbs.2002.1010.1013.

- Hammelehle, A.; Dubois, A.; Müller, T.; Oberson, A.; Mäder, P.; Mayer, J. (2013):** Symbiotische N₂ Fixierung und N-Bilanz von Soja unter Berücksichtigung der N-Rhizodeposition im DOK Versuch. In: Neuhoﬀ, D.; Stumm, C.; Ziegler, S.; Rahmann, G.; Hamm, U.; Koepke, U. (Hg.): Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Ideal und Wirklichkeit. Berlin: Dr. Köster, S. 112-113. Online verfügbar unter https://orgprints.org/21426/1/21426_hammelehle.pdf.
- Hartung, R. C.; Specht, J. E.; Williams, J. H. (1981):** Modification of soybean plant architecture by genes for stem growth habit and maturity. In: *Crop Science* 21 (1), S. 51–56. DOI: 10.2135/cropsci1981.0011183X002100010015x.
- Herbert, S. J.; Litchfield, G. V. (1984):** Growth response of short-season soybean to variations in row spacing and density. In: *Field Crops Research* 9, S. 163–171. DOI: 10.1016/0378-4290(84)90022-4.
- Herridge, D. F.; Peoples, M. B.; Boddey, R. M. (2008):** Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. In: *Plant and Soil* 311 (1-2), S. 1–18. DOI: 10.1007/s11104-008-9668-3.
- Hoeft, R. (2007):** Sojabohnen und der Klimafaktor (in Russian). In: *Zerno* (4), S. 14–17.
- Holshouser, D. L.; Whittaker, J. P. (2002):** Plant population and row-spacing effects on early soybean production systems in the Mid-Atlantic USA. In: *Agronomy Journal* 94 (3), S. 603–611. DOI: 10.2134/agronj2002.6030.
- Horan, F. E. (1974):** Soy protein products and their production. In: *Journal of American Oil Chemists' Society* (51), 67A-73A. DOI: 10.1007/BF02542094.
- Houk, M. (2009):** Conservation planting methods for native and introduced species. In: *Natural resources conservation services* (4), S. 1–6. Online verfügbar unter https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_PLANTMATERIALS/publications/lapmctn9048.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- Hu, Q.; Hua, W. et al. (2017):** Rapeseed research and production in China. In: *The Crop Journal* 5 (2), S. 127–135. DOI: 10.1016/j.cj.2016.06.005.
- Hungria, M.; Vargas, M. A.T. (2000):** Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. In: *Field Crops Research* 65 (2-3), S. 151–164. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00084-2.
- Hurburgh, C. R.; Paynter, L. N.; Schmitt, S. G. (1987):** Quality characteristics of Midwestern soybeans. In: *Applied Engineering in Agriculture* 3 (2), S. 159–165. DOI: 10.13031/2013.26665.
- Hwang, E.-Y.; Song, Q.; Jia, G.; Specht, J. E.; Hyten, D. L.; Costa, J.; Cregan, P. B. (2014):** A genome-wide association study of seed protein and oil content in soybean. In: *BMC Genomics* 15 (1), S. 1–12. DOI: 10.1186/1471-2164-15-1.
- IDH (2020):** European soy monitor. Insights on European responsible and deforestation-free soy consumption in 2018. sustainable trade initiative. Online verfügbar unter <https://www.idhsustainabletrade.com/uploaded/2020/05/IDH-European-Soy-Monitor-v2.pdf?fbclid=IwAR3hkzMMhV1RANYoaLD2qD8b9NejCL-l3lsLZzaf7RZF7bgDpTP4BTviFlw>, zuletzt geprüft am 05.06.2020.
- Iyer, V. V.; Sriram, G.; Fulton, D. B.; Zhou, R.; Westgate, M. E.; Shanks, J. V. (2008):** Metabolic flux maps comparing the effect of temperature on protein and oil biosynthesis in

- developing soybean cotyledons. In: *Plant, cell & environment* 31 (4), S. 506–517. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2008.01781.x.
- Janovicek, K. J.; Deen, W.; Vyn, T. J.** (2006): Soybean response to zone tillage, twin-row planting, and row spacing. In: *Agronomy Journal* 98 (3), S. 800. DOI: 10.2134/agronj2005.0231.
- Jeffers, D. L.; Shibles, R. M.** (1969): Some effects of leaf area, solar radiation, air temperature, and variety on net photosynthesis in field-grown soybeans. In: *Crop Science* 9 (6), S. 762–764. DOI: 10.2135/cropsci1969.0011183X000900060027x.
- Jia, H.; Jiang, B. et al.** (2014): Maturity group classification and maturity locus genotyping of early-maturing soybean varieties from high-latitude cold regions. In: *PloS one* 9 (4), e94139. DOI: 10.1371/journal.pone.0094139.
- Jobst, F.; Urbatzka, P.; Demmel, M.** (2013): Results of a survey on cultivation technology in organic soybean cultivation in Bavaria and Austria. In: Neuhoﬀ, D.; Stumm, C.; Ziegler, S.; Rahmann, G.; Hamm, U.; Koepke, U. (Hg.): Contributions to the 12th scientific conference on organic farming. Ideal and reality: Perspectives of organic farming. Berlin: Dr. Köster, S. 118-121. Online verfügbar unter https://orgprints.org/21450/1/21450_Jobst.pdf.
- Jones, P. G.; Laing, D. R.** (1978): The effects of phenological and meteorological factors on soybean yield. In: *Agricultural Meteorology* 19 (6), S. 485–495. DOI: 10.1016/0002-1571(78)90045-6.
- Jongman, R. H. G.; Bunce, R. G. H.; Metzger, M. J.; Mûcher, C. A.; Howard, D. C.; Mateus, V. L.** (2006): Objectives and applications of a statistical environmental stratification of Europe. In: *Landscape Ecology* 21 (3), S. 409–419. DOI: 10.1007/s10980-005-6428-0.
- Kane, M. V.; Grabau, L. J.** (1992): Early planted, early maturing soybean cropping system: growth, development, and yield. In: *Agronomy Journal* 84 (5), S. 769. DOI: 10.2134/agronj1992.00021962008400050002x.
- Kane, M. V.; Steele, C. C.; Grabau, L. J.; MacKown, C. T.; Hildebrand, D. F.** (1997): Early-maturing soybean cropping system: III. Protein and oil contents and oil composition. In: *Agronomy Journal* 89 (3), S. 464. DOI: 10.2134/agronj1997.00021962008900030016x.
- Khan, A. Z.; Shah, P.; Khalil, S. K.; & Taj, F. H.** (2003): Influence of planting date and plant density on morphological traits of determinate and indeterminate soybean cultivars under temperate environment. In: *Pakistan Journal of Agronomy* 3 (2), S. 146–152.
- Kinkema, M.; Scott, P. T.; Gresshoff, P. M.** (2006): Legume nodulation: successful symbiosis through short- and long-distance signalling. In: *Functional plant biology* 33 (8), S. 707–721. DOI: 10.1071/FP06056.
- Kochegura, A. V.; Zelentsov, S. V.; Moshnenko, E. V.; Petibskaya, V.S.** (2015): Breeding and genetic improvement of biochemical parameters in soybean (in Russian). In: *Scientific and Technical Bulletin of the All Russian Research Institute of Oil Crops* 133 (2), S. 24–35.
- Kratochvil, R. J.; Pearce, J. T.; Harrison, M. R.** (2004): Row-spacing and seeding rate effects on glyphosate-resistant soybean for mid-atlantic production systems. In: *Agronomy Journal* 96 (4), S. 1029–1038. DOI: 10.2134/agronj2004.1029.
- Ku, Y.-S.; Au-Yeung, W.-K.; Yung, Y.-L.; Li, M.-W.; Wen, C.-Q.; Liu, X.; Lam, H.-M.** (2013): Drought stress and tolerance in soybean. In: Board, J. (Hg.): A Comprehensive Survey of International Soybean Research. Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen

- Relationships. London: IntechOpen, S. 209-237. DOI: 10.5772/52945. Online verfügbar unter <https://www.intechopen.com/books/a-comprehensive-survey-of-international-soybean-research-genetics-physiology-agronomy-and-nitrogen-relationships/drought-stress-and-tolerance-in-soybean>.
- Kumagai, E.; Sameshima, R.** (2014): Genotypic differences in soybean yield responses to increasing temperature in a cool climate are related to maturity group. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 198-199, S. 265–272. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.08.016.
- Kumar, V.; Rani, A.; Chauhan, G. S.** (2010): Nutritional value of soybean. In: Singh, G. (Hg.): *The Soybean. Botany, production and uses*. Wallingford: CABI, S. 375-403.
- Kumar, V.; Rani, A.; Solanki, S.; Hussain, S. M.** (2006): Influence of growing environment on the biochemical composition and physical characteristics of soybean seed. In: *Journal of Food Composition and Analysis* 19 (2-3), S. 188–195. DOI: 10.1016/j.jfca.2005.06.005.
- Kurasch, A. K.; Hahn, V. et al.** (2017a): Identification of mega-environments in Europe and effect of allelic variation at maturity *E* loci on adaptation of European soybean. In: *Plant, cell & environment* 40 (5), S. 765–778. DOI: 10.1111/pce.12896.
- Kurasch, A. K.; Hahn, V.; Leiser, W. L.; Starck, N.; Würschum, T.** (2017b): Phenotypic analysis of major agronomic traits in 1008 RILs from a diallel of early European soybean varieties. In: *Crop Science* 57 (2), S. 726. DOI: 10.2135/cropsci2016.05.0318.
- Kurasch, A. K.; Hahn, V.; Miersch, M.; Bachteler, K.; Würschum, T.; Varshney, R. K.** (2018): Analysis of tofu-related traits by a bench-scale tofu production method and their relationship with agronomic traits in European soybean. In: *Plant Breeding* 137 (3), S. 271–282. DOI: 10.1111/pbr.12581.
- Kuznetsova, A.; Brockhoff, P. B.; Christensen, R.H.B.** (2017): lmerTest Package. Tests in linear mixed effects models. In: *Journal of Statistical Software* 82 (13), S. 9892–9918. DOI: 10.18637/jss.v082.i13.
- Lee, C. D.; Egli, D. B.; TeKrony, D. M.** (2008): Soybean response to plant population at early and late planting dates in the Mid-South. In: *Agronomy Journal* 100 (4), S. 971–976. DOI: 10.2134/agronj2007.0210.
- Leffel, R. C.** (1989): Breeding soybeans for the economic values of seed oil and protein. In: *Journal of Production Agriculture* 2 (4), S. 338–343. DOI: 10.2134/jpa1989.0338.
- Leithold, G.; Schulz, F.; Franz, K.-P.** (2003): Suitability of short-seasoned soybeans for cultivation on an organic marginal site, taking into account different row spacing (in German). In: *Crop Sciences- German Journal of Agronomy* 1 (7), S. 21–28.
- Li, S.; Xu, H.; Yang, J.; Zhao, T.** (2019): Dissecting the genetic architecture of seed protein and oil content in soybean from the Yangtze and Huaihe River Valleys using multi-locus genome-wide association studies. In: *International journal of molecular sciences* 20 (12), S. 1–18. DOI: 10.3390/ijms20123041.
- LI-COR, i.** (1992): LAI-2000 Plant canopy analyzer. Instruction manual. Lincoln. Online verfügbar unter <https://licor.app.boxenterprise.net/s/q6hrj6s79psn7o8z2b2s>, zuletzt geprüft am 02.01.2021.
- Likhochvor, V.; Protz, R.; Mugal, I.** (2004): Soybean (in Ukrainian) 2000. Aufl. Lviv: Ukrainian technologies.

- Littell, R. C.** (2004): SAS System for mixed models 6. print. Cary, NC: SAS Institute.
- Liu, X.; Wu, J.-A. et al.** (2017): Genetic variation of world soybean maturity date and geographic distribution of maturity groups. In: *Breeding science* (67), S. 221–232. DOI: 10.1270/jsbbs.16167.
- Luca, J. M. de; Nogueira, M. A.; Hungria, M.** (2014): Feasibility of lowering soybean planting density without compromising nitrogen fixation and yield. In: *Agronomy Journal* 106 (6), S. 2118–2124. DOI: 10.2134/agronj14.0234.
- Maestri, D. M.; Labuckas, D. O.; Meriles, J. M.; Lamarque, A. L.; Zygadlo, J. A.; Guzmán, C. A.** (1998): Seed composition of soybean cultivars evaluated in different environmental regions. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 77 (4), S. 494–498. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0010(199808)77:4<494::AID-JSFA69>3.0.CO;2-B.
- Malek, M. A.; Rafii, M. Y.; Shahida Sharmin Afroz, M.; Nath, U. Kumar; Mondal, M. M. A.** (2014): Morphological characterization and assessment of genetic variability, character association, and divergence in soybean mutants. In: *The Scientific World Journal* 2014, S. 1–12. DOI: 10.1155/2014/968796.
- Mancuso, N.; Caviness, C. E.** (1991): Association of selected plant traits with lodging of four determinate soybean cultivars. In: *Crop Science* 31 (4), S. 911–914. DOI: 10.2135/cropsci1991.0011183X003100040014x.
- Masino, A.; Rugeroni, P.; Borrás, L.; Rotundo, J. L.** (2018): Spatial and temporal plant-to-plant variability effects on soybean yield. In: *European Journal of Agronomy* 98, S. 14–24. DOI: 10.1016/j.eja.2018.02.006.
- Mason, M. L. T.; Tabing, B. L. C.; Yamamoto, A.; Saeki, Y.** (2018): Influence of flooding and soil properties on the genetic diversity and distribution of indigenous soybean-nodulating bradyrhizobia in the Philippines. In: *Heliyon* 4 (11), 1-21. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00921.
- Mehmet, O. Z.** (2008): Nitrogen rate and plant population effects on yield and yield components in soybean. In: *African Journal of Biotechnology* 24 (7), S. 4464–4470.
- Mertz-Henning, L.; Ferreira, L. et al.** (2018): Effect of water deficit-induced at vegetative and reproductive stages on protein and oil content in soybean grains. In: *Agronomy* 8 (1), S. 1–12. DOI: 10.3390/agronomy8010003.
- Meyer, A.; Schröpfer, C.** (2018): Auf dem Weg zu mehr nachhaltigem Soja: Herausforderungen und Lösungsansätze. OVID Verband der Ölsaatenverarbeitenden. Online verfügbar unter https://www.ovid-verband.de/fileadmin/user_upload/OVID-Brief_Nachhaltiges_Soja.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- Miersch, M.** (2016): Soybean cultivation in North America-Web links. Life Food GmbH (18). Online verfügbar unter https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2016/12/Sojainfo_18_2016_Sojanbau_USA_Weblinks1.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2020.
- Moreira, A.; Moraes, L. A. C.; Schroth, G.; Mandarino, J. M. G.** (2015): Effect of nitrogen, row spacing, and plant density on yield, yield components, and plant physiology in soybean-wheat intercropping. In: *Agronomy Journal* 107 (6), S. 2162–2170. DOI: 10.2134/agronj15.0121.

- Moschini, G. C.** (2014): Technology and productivity in U.S. corn and soybean. Hg. v. Agricultural Policy Review. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa. Online verfügbar unter https://www.card.iastate.edu/ag_policy_review/pdf/spring-2014.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2020.
- Mourtzinis, S.; Gaspar, A. P.; Naeve, S. L.; Conley, S. P.** (2017): Planting date, maturity, and temperature effects on soybean seed yield and composition. In: *Agronomy Journal* 109 (5), S. 2040–2049. DOI: 10.2134/agronj2017.05.0247.
- Muredzi, P.** (2013): Soybean Nature, Processing and Utilisation 1. Aufl. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Musser, R. L.; Kramer, P. J.; Thomas, J. F.** (1986): Periods of shoot chilling sensitivity in soybean flower development, and compensation in yield after chilling. In: *Annals of Botany* 57 (3), S. 317–329. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a087113.
- Naeve, S. L.; O'Neill, T. A.; Miller-Garvin, J. E.** (2008): Canopy nitrogen reserves: impact on soybean yield and seed quality traits in Northern Latitudes. In: *Agronomy Journal* 100 (3), S. 681–689. DOI: 10.2134/agronj2007.0179.
- Norsworthy, J. K.; Shipe, E. R.** (2005): Effect of row spacing and soybean genotype on mainstem and branch yield. In: *Agronomy Journal* 97 (3), S. 919–923. DOI: 10.2134/agronj2004.0271.
- Novikova, L. Y.; Seferova, I. V.; Nekrasov, A. Y.; Perchuk, I. N.; Shelenga, T. V.; Samsonova, M. G.; Vishnyakova, M. A.** (2018): Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. In: *Vavilov Journal of Genetics and Breeding* 22 (6), S. 708–715. DOI: 10.18699/VJ18.414.
- Oberson, A.; Nanzer, S.; Bosshard, C.; Dubois, D.; Mäder, P.; Frossard, E.** (2007): Symbiotic N₂ fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by ¹⁵N dilution and ¹⁵N natural abundance. In: *Plant and Soil* 290 (1-2), S. 69–83. DOI: 10.1007/s11104-006-9122-3.
- Ojo, D. K.; Adebisi, M. A.; Tijani, B. O.** (2002): Influence of environment on protein and oil contents of soybeans seed (*Glycine Max* (L.) Merril). In: *Global Journal of Agricultural Sciences* 1 (1), S. 27–32. DOI: 10.4314/gjass.v1i1.2199.
- Okogun, J. A.; Sangina, N.; Abaidoo, R. C.** (2007): Evaluation of maize yield in an on-farm maize-soybean and maize lablab crop rotation systems in the Northern Guinea Savanna of Nigeria. In: *Pakistan Journal of Biological Sciences* 21 (10), S. 3905–3909.
- Orlowski, J.; Cox, W. J.; Ditommaso, A.; Knoblauch, W.** (2012): Planting soybean with a grain drill inconsistently increases yield and profit. In: *Agronomy Journal* 104 (4), S. 1065–1073. DOI: 10.2134/agronj2012.0109.
- OVID** (2020): Nachhaltige Lieferketten: Herausforderungen und Chancen beim Aufbau entwaldungsfreier Lieferketten am Beispiel Soja aus Brasilien. Verband der Ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.ovid-verband.de/fileadmin/user_upload/Positionspapiere/2020-03_Positionspapier_NachhaltigeLieferketten_Soja-aus-Brasilien.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.2020.

- Pazdernik, D. L.; Killam, A. S.; Orf, J. H.** (1997): Analysis of amino and fatty acid composition in soybean seed, using near infrared reflectance spectroscopy. In: *Agronomy Journal* 89 (4), S. 679–685. DOI: 10.2134/agronj1997.00021962008900040022x.
- Piepho, H. P.; Buchse, A.; Emrich, K.** (2003): A Hitchhiker's guide to mixed models for randomized experiments. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 189 (5), S. 310–322. DOI: 10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x.
- Piepho, H.-P.; Möhring, J.** (2007): Computing heritability and selection response from unbalanced plant breeding trials. In: *Genetics* 177 (3), S. 1881–1888. DOI: 10.1534/genetics.107.074229.
- Piper, E. L.; Boote, K. I.** (1999): Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. In: *Journal of the American Oil Chemists' Society* 76 (10), S. 1233–1241. DOI: 10.1007/s11746-999-0099-y.
- Plösch, J.** (2019): Which sowing technique is suitable for the soybean? Die Saat. Online verfügbar unter <https://www.diesaat.at/welche-saattechnik-passt-fuer-die-sojabohne+2500+3066141>, zuletzt geprüft am 10.02.2020.
- Popovic, V.; Vidic, M.; Jockovic, D.; Ikanovic, J.; Jaksic, S.; Cvijanovic, G.** (2012): Variability and correlations between yield components of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). In: *Genetika* 44 (1), S. 33–45. DOI: 10.2298/GENSR1201033P.
- Popp, M. P.; Oliver, L. R.; Dillon, C. R.; Keisling, T. C.; Manning, P. M.** (2000): Evaluation of seedbed preparation, planting method, and herbicide alternatives for dryland soybean production. In: *Agronomy Journal* 92 (6), S. 1149–1155. DOI: 10.2134/agronj2000.9261149x.
- Procópio, S. d. O.; Balbinot, A. A.; Debiasi, H.; Franchini, J. Cézar; Panison, F.** (2013): Sowing in crossed rows in a soybean cultivar with indeterminate growth habit (in Portuguese). In: *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 56 (4), S. 319–325. DOI: 10.4322/rca.2013.048.
- Projektgruppe Ökolandbau** (2018): Sechs Gründe, warum der heimische (Bio-)Sojaanbau weiter zunehmen wird. BLE. Online verfügbar unter <https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/betrieb/marketing/maerkte/sechs-gruende-warum-der-heimische-bio-sojaanbau-weiter-zunehmen-wird/>, zuletzt geprüft am 06.12.2020.
- Prusiński, J.; Nowicki, R.** (2020): Effect of planting density and row spacing on the yielding of soybean (*Glycine max* L. Merrill). In: *Plant, Soil and Environment* 66 (12), S. 616–623. DOI: 10.17221/403/2020-PSE.
- Purcell, L. C.; Ball, R. A.; Reaper, J. D.; Vories, E. D.** (2002): Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. In: *Crop Science* 42 (1), S. 172–178. DOI: 10.2135/cropsci2002.0172.
- Qiu, L.-J.; Chang, R.-Z.** (2010): The origin and history of soybean. In: Singh, G. (Hg.): *The soybean. Botany, production and uses*. Wallingford: CABI, S. 1-23.
- R Foundation for Statistical Computing** (2013): A language and environment for statistical computing: Version 3.1. Vienna. Online verfügbar unter <http://www.R-project.org/>, zuletzt geprüft am 25.01.2020.

- Rahman, M.; Hossain, M.; Bell, R. W.** (2011a): Plant density effects on growth, yield and yield components of two soybean varieties under equidistant planting arrangement. In: *Asian Journal of Plant Sciences* 10 (5), S. 278–286. DOI: 10.3923/ajps.2011.278.286.
- Rahman, M. M.; Hossain, M. M.; Anwar, M. P.; Juraimi, A. S.** (2011b): Plant density influence on yield and nutritional quality of soybean seed. In: *Asian Journal of Plant Sciences* 10 (2), S. 125–132. DOI: 10.3923/ajps.2011.125.132.
- Ram, H.; Singh, G.; Aggarwal, N.; Kaur, J.** (2011): Soybean (*Glycine max*) growth, productivity and water use under different sowing methods and seeding rates in Punjab. In: *Indian Journal of Agronomy* 56 (4), S. 377–380. Online verfügbar unter <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123067186>, zuletzt geprüft am 30.05.2019.
- Ram, H.; Singht, Y.; Saini, K. S.; Kler, D. S.; Timsina, J.** (2013): Tillage and planting methods effects on yield, water use efficiency and profitability os soybean-wheat system on a loamy sand soil. In: *Experimental Agriculture* 49 (4), S. 524–542. DOI: 10.1017/S0014479713000264.
- Recknagel, J.** (2017): Studies on the cultivation suitability of soybean in Germany (in German). In: *Journal of Cultivated Plants* (69), S. 137–145.
- Ribeiro, A. B. M.; Bruzi, A. T. et al.** (2017): Productive performance of soybean cultivars grown in different plant densities. In: *Ciência Rural* 47 (7), S. 81–89. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160928.
- Rincker, K.; Nelson, R. et al.** (2014): Genetic improvement of U.S. soybean in maturity groups II, III, and IV. In: *Crop Science* 54 (4), S. 1419–1432. DOI: 10.2135/cropsci2013.10.0665.
- Robinson, A. P.; Conley, S. P.; Volenec, J. J.; Santini, J. B.** (2009): Analysis of high yielding, early-planted soybean in Indiana. In: *Agronomy Journal* 101 (1), S. 131–139. DOI: 10.2134/agronj2008.0014x.
- Rochester, I.J.; Peoples, M.B.; Hulugalle, N.R.; Gault, R.R.; Constable, G.A.** (2001): Using legumes to enhance nitrogen fertility and improve soil condition in cotton cropping systems. In: *Field Crops Research* 70 (1), S. 27–41. DOI: 10.1016/S0378-4290(00)00151-9.
- Roßberg, D.; Recknagel, J.** (2017): Investigations on the suitability of soybean cultivation in Germany (in German). In: *Journal for cultural plant* 69 (4), S. 137–145. DOI: 10.5073/JfK.2017.04.02.
- Rotundo, J. L.; Westgate, M. E.** (2009): Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. In: *Field Crops Research* 110 (2), S. 147–156. DOI: 10.1016/j.fcr.2008.07.012.
- Russell, V. L.** (2016): Least-squares means. The R package lsmeans. In: *Journal of Statistical Software* 69 (1), S. 4801–4834.
- Saitoh, K.; Nishimura, K.; Kitahara, T.** (2012): Effect of lodging on seed yield of field-grown soybean-artificial lodging and lodging preventing treatments. In: *Japanese Journal of Crop Science* 81 (1), S. 27–32. DOI: 10.1626/jcs.81.27.
- 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. In: *Field Crops Research* 108 (1), S. 1–13. DOI: 10.1016/j.fcr.2008.03.001.

- Schaafsma, G.** (2005): The protein digestibility-corrected amino acid score (PDCAAS)-a concept for describing protein quality in foods and food ingredients: a critical review. In: *Journal of AOAC International* 88 (3), S. 988–994. DOI: 10.1093/jaoac/88.3.988.
- Schmidt, H.; Langanky, L.; Wolf, L.** (2019): Soja-Anbau in der Praxis. Ackerbau & Ökonomie : ökologisch & konventionell 1. Auflage. Berlin: Dr. Köster.
- Sebolt, A. M.; Shoemaker, R. C.; Diers, B. W.** (2000): Analysis of a quantitative trait locus allele from wild soybean that increases seed protein concentration in soybean. In: *Crop Science* 40 (5), S. 1438–1444. DOI: 10.2135/cropsci2000.4051438x.
- Setchell, K. D.; Cassidy, A.** (1999): Dietary isoflavones. Biological effects and relevance to human health. In: *The Journal of nutrition* 129 (3), 758S-767S. DOI: 10.1093/jn/129.3.758S.
- Sharma, A. R.; Behera, U. K.** (2009): Recycling of legume residues for nitrogen economy and higher productivity in maize (*Zea mays*)–wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 83 (3), S. 197–210. DOI: 10.1007/s10705-008-9212-0.
- Shestakova, N.; Gordeyeva, Y.; Kolesnikova, L.; Zhirnova, I.** (2017): Sowing standards and methods. Their effect on tanais and lanceolate leaflet soybean varieties performance in the dry steppe zone of the North Kazakhstan (in Russian). In: *EurAsian Journal of BioSciences* (11), S. 22–26. Online verfügbar unter <http://www.ejobios.org/article/sowing-standards-and-methods-their-effect-on-tanais-and-lanceolate-leaflet-soybean-varieties>, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- Shibles, R. M.; Weber, C. R.** (1965): Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. In: *Crop Science* 5 (6), S. 575–577. DOI: 10.2135/cropsci1965.0011183X000500060027x.
- Shrief, S. A.; Shabana, R.; Ibrahim, A. F.; Geisler, G.** (1990): Variation in seed yield and quality characters of four spring oil rapeseed cultivars as influenced by population arrangements and densities. In: *journal of Agronomy and Crop Science* 165 (2-3), S. 103–109. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1990.tb00840.x.
- Shroyer, J. P.** (1980): Soybean morphological characters and yield components as influenced by growth type, row spacing, population and planting date. Retrospective Theses and Dissertations. Iowa: Iowa State University.
- Singh, G.** (2010a): Water management in Soybean. In: Singh, G. (Hg.): The soybean. Botany, production and uses. Wallingford: CABI, S. 191-209.
- Singh, G.** (2010b). In: Singh, G. (Hg.): The soybean. Botany, production and uses. Wallingford: CABI, S. 1-494.
- Smit, G.; Swart, S.; Lugtenberg, B. J.; Kijne, J. W.** (1992): Molecular mechanisms of attachment of Rhizobium bacteria to plant roots. In: *Molecular microbiology* 6 (20), S. 2897–2903. DOI: 10.1111/j.1365-2958.1992.tb01748.x.
- Sobko, O.; Hartung, J.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S.** (2019): Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill). In: *Plant, Soil and Environment* 65 (12), S. 594–601. DOI: 10.17221/346/2019-PSE.

- Sobko, O.; Stahl, A.; Hahn, V.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S.** (2020b): Environmental effects on soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) production in Central and South Germany. In: *Agronomy* 10 (12), S. 1847. DOI: 10.3390/agronomy10121847.
- Sobko, O.; Zikeli, S.; Claupein, W.; Gruber, S.** (2020a): Seed yield, seed protein, oil content, and agronomic characteristics of soybean (*Glycine max* L. Merrill) depending on different seeding systems and cultivars in Germany. In: *Agronomy* 10 (7), S. 1020. DOI: 10.3390/agronomy10071020.
- Sojafoedering** (2018): 25 % Growth: record acreage for soybean in Germany. Sojafoedering. Online verfügbar unter <https://www.sojafoederring.de/>, zuletzt geprüft am 01.12.2018.
- Sojafoedering** (2019): Growing counsellor for soybean in Germany. Sojafoedering. Online verfügbar unter <https://www.sojafoederring.de/>, zuletzt geprüft am 10.01.2019.
- Sojafoederring** (2019): Soybean cultivation in Germany has many advantages-time for the protein turnaround! Sojafoederring. Online verfügbar unter <https://www.sojafoederring.de/>, zuletzt geprüft am 15.01.2020.
- Sojafoederring** (2020). Sojafoederring. Online verfügbar unter <https://www.sojafoederring.de/aktuell/aktuelle-kurzmeldungen/>, zuletzt geprüft am 22.01.2020.
- Sojafoedering** (2019): Bio-soybean info Bavaria. Sojafoedering. Online verfügbar unter <https://www.sojafoederring.de/aktuell/newsletter/bio-soja-info-bayern/>, zuletzt geprüft am 14.03.2020.
- Song, W.; Yang, R. et al.** (2016): Analyzing the effects of climate factors on soybean protein, oil contents, and composition by extensive and high-density sampling in China. In: *Journal of agricultural and food chemistry* 64 (20), S. 4121–4130. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b00008.
- Souza, E.; Botta, G.; Tourn, M.; Hidalgo, R.** (2004): Sowing efficiency of two seeding machines with different metering devices and distribution system: a comparison using soybean, *Glycine max* (L) Merr. In: *Spanish Journal of Agriculture Research* (2), S. 315–321. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Soza_E/publication/228711494_Sowing_efficiency_of_two_seeding_machines_with_different_metering_devices_and_distribution_systems_a_comparison_using_soybean_Glycine_max_L_Merr/links/54d0b84e0cf298d656683c3c/Sowing-efficiency-of-two-seeding-machines-with-different-metering-devices-and-distribution-systems-a-comparison-using-soybean-Glycine-max-L-Merr.pdf, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- Souza, P. I. de; D. B. Egli; W. P. Bruening** (1997): Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. In: *Agronomy Journal* 89 (5), S. 807–812. DOI: 10.2134/agronj1997.00021962008900050015x.
- Souza, R.; Teixeira, I.; Reis, E.; Silva, A.** (2016): Soybean morphophysiology and yield response to seeding systems and plant populations. In: *Chilean journal of agricultural research* 76 (1), S. 3–8. DOI: 10.4067/S0718-58392016000100001.
- Spader, V.; Deschamps, C.** (2015): Grain yield of soybean cultivars using different densities and sowing dates in a high-altitude region of south Brazil. In: *Semina: Ciências Agrárias* 36 (3), S. 1823–1834. DOI: 10.5433/1679-0359.2015v36n3Supl1p1823.

- Spaeth, S. C.; Randall, H. C.; Sinclair, T. R.; Vendeland, J. S.** (1984): Stability of soybean harvest index. In: *Agronomy Journal* 76 (3), S. 482–486. DOI: 10.2134/agronj1984.00021962007600030028x.
- Specht, J. E.; Hume, D. J.; Kumudini, S. V.** (1999): Soybean yield potential—a genetic and physiological perspective. In: *Crop Science* 39 (6), S. 1560–1570. DOI: 10.2135/cropsci1999.3961560x.
- STATISTA** (2020): Statistiken zum Thema Soja und Sojaprodukte. STATISTA. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/themen/6916/soja-und-sojaprodukte/>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- Sudaric, A.; Simic, D.; Vratarić, M.** (2006): Characterization of genotype by environment interactions in soybean breeding programmes of southeast Europe. In: *Plant Breeding* 125 (2), S. 191–194. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2006.01185.x.
- Sugimoto, T.; Tanaka, K.; Monma, M.; Kawamura, Y.; Saio, K.** (2014): Phosphoenolpyruvate carboxylase level in soybean seed highly correlates to its contents of protein and lipid. In: *Agricultural and Biological Chemistry* 53 (3), S. 885–887. DOI: 10.1080/00021369.1989.10869369.
- Suhre, J. J.; Weidenbenner, N. H. et al.** (2014): Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. In: *Agronomy Journal* 106 (5), S. 1631–1642. DOI: 10.2134/agronj14.0003.
- Teodoro, P. E.; Ribeiro, L. P.; Corrêa, C. C. G.; Júnior, R. Apolinário Alves da Luz; Zanoncio, A. dos Santos; Capristo, D. Prevedel; Torres, F. E.** (2015): Path analysis in soybean genotypes as function of growth habit. In: *Bioscience Journal* 31 (3), S. 794–799. DOI: 10.14393/BJ-v31n1a2015-26094.
- Transparenz Gentechnik** (2018): Infografiken Sojawelten: Die Zahlen. Bio- und Gentechnologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.transgen.de/lebensmittel/2626.soja-welt-zahlen.html>, zuletzt geprüft am 17.05.2020.
- Transparenz Gentechnik** (2020a): Der Anbau von Sojabohnen in Deutschland steigt-aber die Eiweißlücke wird immer größer. Bio- und Gentechnologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.transgen.de/lebensmittel/599.sojabohnen-deutschland-anbau-importe.html>, zuletzt geprüft am 10.05.2020.
- Transparenz Gentechnik** (2020b): Ohne Gentechnik! Und wo kommt das ganze Futter her? Bio- und Gentechnologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.transgen.de/data/media/2470/1200x900f.jpg>, zuletzt geprüft am 15.12.2020.
- Triboi, E.; Triboi-Blondel, A.-M.** (2002): Productivity and grain or seed composition: a new approach to an old problem-invited paper. In: *European Journal of Agronomy* 16 (3), S. 163–186. DOI: 10.1016/S1161-0301(01)00146-0.
- Tsubokura, Y.; Matsumura, H. et al.** (2013): Genetic variation in soybean at the maturity locus *E4* is involved in adaptation to long days at high latitudes. In: *Agronomy* 3 (1), S. 117–134. DOI: 10.3390/agronomy3010117.
- Umburanas, R. C.; Yokoyama, A. H. et al.** (2019): Soybean yield in different sowing dates and seeding rates in a subtropical environment. In: *International Journal of Plant Production* 13 (2), S. 117–128. DOI: 10.1007/s42106-019-00040-0.

- Unsleber, J.; Kreikenbohm, C.; Schätzl, R.; Braun, S.; Nadler, C.; Reindl, A.** (2018): Soja-Anbau und Verwertung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/kooperationen/dateien/soja-anbau-verwendung_handreichung-unterricht_lfl-kooperation.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2020.
- Ustun, A.; Allen, F. L.; English, B. C.** (2001): Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. In: *Crop Science* 41 (4), S. 993–998. DOI: 10.2135/cropsci2001.414993x.
- Utz, H. F.** (2001): PLABSTAT: a computer program for statistical analysis of plant breeding experiments. Stuttgart: University of Hohenheim.
- van Kessel, C.; Hartley, C.** (2000): Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? In: *Field Crops Research* 65 (2-3), S. 165–181. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00085-4.
- van Roekel, R. J.; Purcell, L. C.; Salmerón, M.** (2015): Physiological and management factors contributing to soybean potential yield. In: *Field Crops Research* 182, S. 86–97. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.05.018.
- Vaulin, A. J.** (2013): Sowing method and soybean sowing rate in the southern Urals (in Russian). In: *Journal of the Altai State Agrarian University* 99 (1), S. 5–8. Online verfügbar unter <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-poseva-i-normy-vyseva-soi-na-yuzhnom-urale/viewer>, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- Voldeng, H. D.; Cober, E. R.; Hume, D. J.; Gillard, C.; Morrison, M. J.** (1997): Fifty-eight years of genetic improvement of short-season soybean cultivars in Canada. In: *Crop Science* 37 (2), S. 428–431. DOI: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700020020x.
- Vollmann, J.; Fritz, C. N.; Wagentristsl, H.; Ruckenbauer, P.** (2000): Environmental and genetic variation of soybean seed protein content under Central European growing conditions. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80 (9), S. 1300–1306. DOI: 10.1002/1097-0010(200007)80:9<1300::AID-JSFA640>3.0.CO;2-I.
- von Beesten, F.** (2016): Sowing technology for organic soya - what is important (in German). In: *Taifun Soybeaninfo* (16), S. 1–6. Online verfügbar unter <https://www.sojafoerderring.de/wp-content/uploads/2013/12/Taifun-Sojainfo-Saattechnik-f%C3%BCr-Bio soja.pdf>, zuletzt geprüft am 04.01.2021.
- Wang, C.; Wu, T. et al.** (2016): Seventy-five years of improvement of yield and agronomic traits of soybean cultivars released in the Yellow-Huai-Hai River Valley. In: *Crop Science* 56 (5), S. 2354–2364. DOI: 10.2135/cropsci2015.10.0618.
- Weber, C. R.; Shibles, R. M.; Byth, D. E.** (1966): Effect of plant population and row spacing on soybean development and production. In: *Agronomy Journal* 58 (1), S. 99–102. DOI: 10.2134/agronj1966.00021962005800010034x.
- Wells, R.** (1991): Soybean growth response to plant density: relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. In: *Crop Science* 31 (3), S. 755–761. DOI: 10.2135/cropsci1991.0011183X003100030044x.
- Whaley, R.; Eskandari, M.** (2019): Genotypic main effect and genotype-by-environment interaction effect on seed protein concentration and yield in food-grade soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill). In: *Euphytica* 215 (2), S. 1–17. DOI: 10.1007/s10681-019-2344-2.
- Wickham, H.** (2009): ggplot2. Elegant graphics for data analysis. New York: Springer.

- Wilbois, K.-P.; Spiegel, A.-K. et al.** (2014): Ausweitung des Sojaanbaus in Deutschland durch züchterische Anpassung sowie pflanzenbauliche und verarbeitungstechnische Optimierung. FiBL Deutschland e.V. Online verfügbar unter www.orgprints.org/28484, zuletzt geprüft am 02.01.2021.
- Wilcox, J. R.** (2001): Sixty years of improvement in publicly developed elite soybean lines. In: *Crop Science* 41 (6), S. 1711–1716. DOI: 10.2135/cropsci2001.1711.
- Wilcox, J. R.; Sedyama, T.** (1981): Interrelationships among height, lodging and yield in determinate and indeterminate soybeans. In: *Euphytica* 30 (2), S. 323–326. DOI: 10.1007/BF00033993.
- Wu, T.; Li, C.; Sun, C.; Mao, T.; Jiang, B.; Han, T.** (2015): Analysis of the independent- and interactive-photo-thermal effects on soybean flowering. In: *Journal of Integrative Agriculture* 14 (4), S. 622–632. DOI: 10.1016/S2095-3119(14)60856-X.
- WWF** (2014): The growth of soy: impacts and solutions. WWF International. Gland. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/20140312_WWF_TheGrowthOfSoy_Impacts_Solutions.pdf, zuletzt geprüft am 31.05.2020.
- Xu, B.** (1989): A decade of wild soybean (*Glycine soja*) research in China. In: *Jilin Agricultural Science* (39), S. 5–13.
- Xu, C.; He, Y.; Sun, S.; Song, W.; Wu, T.; Han, T.; Wu, C.** (2020): Analysis of soybean yield formation differences across different production regions in China. In: *Agronomy Journal* 112 (5), S. 4195–4206. DOI: 10.1002/agj2.20373.
- Yaklich, R. W.; Vinyard, B.; Camp, M.; Douglass, S.** (2002): Analysis of seed protein and oil from soybean northern and southern region uniform tests. In: *Crop Science* 42 (5), S. 1504–1515. DOI: 10.2135/cropsci2002.1504.
- Yao, Y.; You, Q. et al.** (2020): Quantitative trait loci analysis of seed oil content and composition of wild and cultivated soybean. In: *BMC plant biology* 20 (51), S. 1–13. DOI: 10.1186/s12870-019-2199-7.
- Yilmaz, N.** (2003): The effects of seed rate on yield and yield components of soybean (*Glycine max* L. Merill). In: *Pakistan Journal of Biological Sciences* 6 (4), S. 373–376. DOI: 10.3923/pjbs.2003.373.376.
- Yu, G.-R.; Wang, Q.-F.; Zhuang, J.i.e.** (2004): Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: Application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. In: *Journal of Plant Physiology* 161 (3), S. 303–318. DOI: 10.1078/0176-1617-00972.
- Yunusa, I. A. M.; Ikawelle, M. C.** (1990): Yield response of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) to planting density and row spacing in a semi-arid tropical environment. In: *journal of Agronomy and Crop Science* 164 (4), S. 282–288. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1990.tb00818.x.
- Zimmer, S.; Messmer, M. et al.** (2016): Effects of soybean variety and Bradyrhizobium strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany. In: *European Journal of Agronomy* 72, S. 38–46. DOI: 10.1016/j.eja.2015.09.008.

Zimmer, S.; Meßmer, M.; Haase, T.; Mindermann, A.; Schulz, H.; Wilbois, K.-P.; Heß, J.
(2013): Eignung von Bradyrhizobien-Impfpräparaten zur Inokulation von Sojabohnen. In:
Pekrun, C.; Wachendorf, M.; Müller, T.; Utermann, J.; Düker, A. (Hg.): Mitteilungen der
Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Bedeutung und Bestimmung in Pflanzenbau
und Bodenkunde. Göttingen: Liddy Halm, S. 341-342.

Zuern: Product description of single row seed drill. Online verfügbar unter
<https://www.zuern.de/de/feldversuchstechnik/produkte/saetechnik/zuern-d90/eigenschaften.html>, zuletzt geprüft am 04.07.2020.

DANKSAGUNG

Ganz herzlich möchte ich mich bei **Prof. Dr. Sabine Gruber** für das geschätzte Vertrauen bedanken, das mir den Rahmen geschaffen hat, die Promotion nach eigener Kreativität zu gestalten. Prof. Dr. Gruber hat immer ein offenes Ohr für mich gehabt und ihre zahlreichen Anregungen und Ideen haben mir ständig bei der ganzen Promotion neue Entwicklungswege und Sichtweisen erläutert. An dieser Stelle will ich mich bei ihr für die vielen, trotzdem zeitnahen und konstruktiven Korrekturvorschläge bedanken. Ein großes Dankeschön geht an **Prof. Dr. Claupein** für sein sympathisches kritisches Hinterfragen, das immer zielführend war. Weiterer Dank gilt für **Dr. Sabine Zikeli** für die hilfreichen Korrekturvorschläge.

Prof. Dr. Bellingrath-Kimura danke ich für ihr Interesse an meiner Arbeit, die Bereitschaft Zweitgutachter zu sein und **Prof. Dr. Müller** für die Übernahme der Drittkorrektur.

Eine erkenntlich hilfreiche Mitwirkung habe ich bei **Prof. Dr. Fridrich Utz, Dr. Jens Hartung and Dr. Andreas Stahl** während der statistischen Auswertung der Versuchsdaten erfahren, ohne die ich verzweifelt hätte.

Ein herzliches „Thank you“ geht an **Kathleen Regan**, die hochprofessionelle, sachliche und auch kritische Englisch-Korrekturen der Publikationen immer freundlich und schnell erledigt hat. Lieben Dank möchte ich **Gertrud Strobl** für die hervorragende Sprachkorrektur der Dissertation aussprechen.

Ein besonderer Dank gilt meinem Chef, **Herrn Franz-Xaver Zellner**, für die Möglichkeit berufsbegleitend auf der Versuchsstation Bayern der Saaten Union GmbH zu promovieren. Ohne seine fachlichen und mentalen Ratschläge in jeder Situation hätte ich es eindeutig schwerer gehabt. Besonders herzlicher Dank geht an meine lieben **Arbeitskollegen**, die mich all diese Jahre bei der Planung, Durchführung und Beerntung der Feldversuche schlagkräftig unterstützt haben. **Christoph Röhl und Franziska Stöckl** danke ich für deren Beitrag bei dem aufwändigen Bonitieren der Versuche, die wir oft an Wochenenden oder bis tief in die Nacht hinein bei lustigen Gesprächen gemeinsam gemeistert haben. Ebenso sei den **Versuchsanstellern der externen Standorte** für die gewissenhafte Feldarbeit und schnelle sowie korrekte Bereitstellung der Versuchsergebnisse ein Dankeschön ausgesprochen.

Allen **meinem Freunden** danke ich für die Geduld und Akzeptanz meiner oft abgesagten Treffen. Es kommen bestimmt andere Zeiten auf uns zu.

Ein tiefes Dankeschön geht an **meinen Vater**, der immer gerne bereit war, mit mir fachlich und themenbezogen bis in kleinste Detail zu diskutieren und Gespräche zu führen, ebenso an **meine Mutter**, die mir mental stets zur Seite stand, an meine liebe **Oma** und an meine **Schwestern** für die innere Kraft, nur vorwärts zu treiben, die ich trotz der weiten Entfernung gespürt habe.

Der letzte, aber auch der wichtigste Dank, gilt **meinem Philipp**, der mir während der gesamten Dauer der Promotion einen starken und permanenten Rückhalt gegeben hat, der mich immer motiviert hat und einen wahnsinnigen Mut gezeigt hat meine berufsbegleitende Promotion mit mir durchzustehen.

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG ÜBER DIE EIGENSTÄNDIG ERBRACHTE LEISTUNG

gemäß § 18 Absatz 3 Satz 5 der Promotionsordnung der Universität Hohenheim für die Fakultäten Agrar-, Natur- sowie Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema
Einfluss von Anbauverfahren und Umweltfaktoren auf Ertrag, Qualität und agronomische Eigenschaften von Soja (*Glycine max* L. Merrill)
handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.
2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht.
3. Ich habe nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung oder -beratung in Anspruch genommen.
4. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und der strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt. Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärung bestätige ich. Ich versichere an Eides Statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erklärt und nichts verschwiegen habe.

Garching, 13.01.2021



Ort, Datum

Unterschrift

CURRICULUM VITAE

Persönliche Daten

Name, Vorname: Sobko, Olena
Geburtsdatum/-ort: 11.06.1991 in Sad, Ukraine

Schulbildung

1998-2008 Gesamtschule in Sad (Ukraine), Abschluss Abitur

Studium

Nationale Agraruniversität Sumy

09/2008 bis 04/2012 Fakultät für Agronomie mit Bachelorabschluss als
Agraringenieurin im Pflanzenbau
09/2013 bis 02/2015 Masterstudium als Agronomin und Züchterin (Fernstudium)

Hochschule Weihenstephan- Triesdorf

10/2012 bis 03/2014 Studium im Internationalen Masterstudiengang
Agrarmanagement

Universität Hohenheim

seit 03/2016 Arbeiten zur Promotion mit dem Thema: „Einfluss von
Anbauverfahren und Umweltfaktoren auf Ertrag, Qualität und
agronomische Eigenschaften von Soja (*Glycine max* L. Merrill)“

Praktische Erfahrungen

07/2010 bis 09/2010 Praktikum auf einem landwirtschaftlichen Familienbetrieb
(Bremen)
05/2011 bis 06/2011 Lehrpraktikum am Institut der Agrarwissenschaft im Bereich
Pflanzen- und Ackerbau (Sad, Ukraine)
07/2011 bis 11/2011 Praktikum auf einem Erhaltungszuchtbetrieb für Wildblumen
(Lengennwil, Schweiz)
04/2012 bis 09/2012 Studienpraktikum auf einem ökologischen Gemüsebetrieb mit
Mutterkuhhaltung und Direktvermarktung (Absberg, Bayern)
02/2013 bis 03/2013 studienbegleitendes Betriebspraktikum bei Strube Research
GmbH & Co.KG (Söllingen, Niedersachsen)
08/2013 bis 10/2013 Ferienarbeit bei Strube Research GmbH & Co. KG
(Söllingen, Niedersachsen)
seit 07/2014 Festanstellung als Versuchstechnikerin bei Saaten Union GmbH
Versuchsstation Bayern (Moosburg, Bayern)
seit 03/2020 Festanstellung als Produktmanagerin (national) und
Produktentwicklung (international) für Soja bei
Saaten Union GmbH (Hannover, Niedersachsen)
seit 08/2020 Festanstellung als Produktmanagerin inkl. Produktentwicklung
(national und international) für Soja bei Saaten Union GmbH
(Hannover, Niedersachsen)

Garching, 13.01.2021

