



## Mitglieder der Prüfungskommission

Vorsitzender: Prof. Dr. Christof Engels

Gutachter: Prof. Dr. Knut Schmidtke

Prof. Dr. Timo Kautz

weitere Mitglieder: Prof. Dr. Sonoko Dorothea Bellingrath-Kimura

Dr. Johann Bachinger

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss verschiedener Schwefel (S)-Düngemittel, der Leguminosenart und des Gemengebaus von Erbse (*Pisum sativum* L.) und Gerste (*Hordeum vulgare* L.) auf die Schwefelakkumulation sowie den Ertrag der Ackerbohne (*Vicia faba* L.), Schmalblättrige Lupine (*Lupinus angustifolius* L.) und Erbse zu erheben.

In den Jahren 2012 bis 2014 wurden Feldversuche auf zahlreichen Standorten durchgeführt, um die Wirkung von Kieserit ( $\text{MgSO}_4$ ), Gips ( $\text{CaSO}_4$ ), elementarem S und Bittersalz ( $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ) auf die Körnerleguminosen zu testen.

Die Düngung von Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse mit verschiedenen S-haltigen Düngemitteln führte unter den geprüften Feldbedingungen weder zu Ertragssteigerungen noch zu einer gesteigerten N-Akkumulation. Der S-Bedarf der drei Körnerleguminosen wurde offenbar über natürliche Ressourcen gedeckt. Trotzdem zeigten sich Gips und Kieserit, teilweise auch Bittersalz als geeignete Düngemittel, um die S-Konzentration im Gewebe der Pflanzen zu erhöhen.

Die S-Akkumulation im Spross der Ackerbohne ( $5\text{-}17 \text{ kg S ha}^{-1}$ ), Schmalblättrigen Lupine ( $5\text{-}15 \text{ kg S ha}^{-1}$ ) und Erbse ( $2\text{-}13 \text{ kg S ha}^{-1}$ ) war gering und wurde von den Pflanzen an deren Bedarf angepasst. Im Gegensatz zu Ackerbohne (SHI 0,65) und Erbse (SHI 0,63), die S vorwiegend im Korn akkumulierten, sammelte die Schmalblättrige Lupine einen Großteil des aufgenommenen S im Stroh (SHI 0,40) an.

Der Einfluss des Gemengeanbaus mit Gerste auf den S-Haushalt der Erbse war sehr gering. Die Erbse in Reinsaat nahm signifikant mehr S gemittelt über alle

getesteten Düngemittel auf als das Gemenge aus Erbse und Gerste. Erbse und Gerste akkumulierten ähnlich hohe Mengen S im Spross pro Einheit Kornertrag. Um maximale Kornerträge sowie N- und S-Akkumulationen in einem substitutiv zusammengesetzten Gemenge aus Erbse und Gerste zu erzielen, wurde ein optimales Saatverhältnis von 42-88% keimfähiger Erbsensamen zu 12-58% keimfähigen Gerstensamen der jeweiligen Reinsaatstärke ermittelt.

**Schlagworte:** Schwefel, Düngung, Körnerleguminosen,  
Schwefelakkumulation, Schwefel-Harvest-Index,  
Gemengeanbau

## Abstract

The objectives of this study were to evaluate the influence of different sulfur (S) containing fertilizers, the legume species and of intercropping of pea (*Pisum sativum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) on sulfur accumulation and yield of faba bean (*Vicia faba* L.), narrow leaf lupin (*Lupinus angustifolius* L.) and pea.

In the years 2012 to 2014 field trials have been conducted to test the effects of kieserite ( $\text{MgSO}_4$ ), gypsum ( $\text{CaSO}_4$ ), elemental S and epsom salt ( $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ) on grain legumes at several sites in Germany.

Under the given environmental conditions, fertilization of faba bean, narrow leaf lupin and pea with different S containing fertilizers did not increase yield and nitrogen (N) accumulation. The S demand of the three grain legumes was low and obviously covered by S sources from the soil as well as atmospheric S deposition. However, gypsum, kieserite and epsom salt generated noticeable increases in S concentration in parts of the plants.

S accumulation in shoots of faba bean ( $5\text{-}17 \text{ kg S ha}^{-1}$ ), narrow leaf lupin ( $5\text{-}15 \text{ kg S ha}^{-1}$ ) and pea ( $2\text{-}13 \text{ kg S ha}^{-1}$ ) was comparatively low and has been adapted to the plants respective S demand. In contrast to faba bean (SHI 0,65) and pea (SHI 0,63), who accumulated S predominantly in seeds, narrow leaf lupin (SHI 0,40) accumulated the bulk of S in its straw.

The influence of barley on peas S concentration was very low. Pea in pure stands accumulated significantly more S than the total intercrop of pea and barley, whereas pea and barley accumulated similar amounts of S in its shoots per unit seed yield. To achieve the maximum seed yield and maximum N and S accumulation in substitutive mixtures of pea and barley, a relative seed frequency

of 42%–88% pea seeds to 12%–58% barley seeds of their monocrop seeding rate has been calculated to be optimal.

**keywords:** Sulfur, Fertilization, Grain legumes, Sulfur accumulation, Sulfur-Harvest-Index, Intercropping

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Literaturübersicht</b> .....	<b>6</b>
2.1 Schwefel im Boden .....	6
2.2 Schwefel in der Pflanze .....	7
2.3 Schwefelbedarf von Körnerleguminosen .....	8
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>11</b>
3.1 Versuchsaufbau und Standortbeschreibung .....	11
3.2 Düngemittel .....	13
3.3 Beprobung des Bodens .....	14
3.4 Ertragsermittlung und Nährstoffanalyse .....	15
3.5 Statistische Auswertung .....	15
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>17</b>
4.1 Ertrag .....	17
4.2 N-Konzentration .....	18
4.3 N-Akkumulation .....	21
4.4 S-Konzentration .....	21
4.5 S-Akkumulation .....	21
4.6 N:S-Verhältnis .....	22
4.7 Harvest-Index und Scheinbare S-Ausnutzung .....	22
4.8 Regressionsanalyse .....	23
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>25</b>

<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>40</b>

**Anhang**

<b>Artikel I.....</b>	<b>49</b>
<b>Artikel II.....</b>	<b>50</b>
<b>Artikel III.....</b>	<b>51</b>
<b>Artikel IV.....</b>	<b>52</b>
<b>Erklärung.....</b>	<b>53</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>54</b>



**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Grafische Darstellung der Zusammenhänge zwischen  
den vier einzelnen Artikeln der kumulativen Dissertation .....5

Abbildung 2: S-Akkumulation im Spross der Körnerleguminosen  
in Abhängigkeit von deren Kornertrag .....24

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Standortbeschreibung .....	12
Tabelle 2:	Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode .....	13
Tabelle 3:	Ergebnisse der statistischen Analyse der Erbse und Ackerbohne (arithmetische / gewichtete Mittelwerte) .....	19
Tabelle 4:	Ergebnisse der statistischen Analyse der Erbse und Schmalblättrigen Lupine (arithmetische / gewichtete Mittelwerte) .....	20

## 1 Einleitung

Schwefel (S) ist ein wichtiger Makronährstoff für höhere Pflanzen und wird hauptsächlich über deren Wurzeln in Form von Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) aufgenommen. Bis zu 5% des gesamten S-Vorrates im Boden liegen als pflanzenverfügbares  $\text{SO}_4^{2-}$  vor, während häufig mehr als 95% organisch gebunden und somit nicht direkt pflanzenverfügbar sind (Scherer, 2009).

Neben dem Boden stellt die Atmosphäre eine weitere S-Quelle für Pflanzen dar, wobei über die Stomata der Blätter S in Form von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) aufgenommen werden kann (Aghajanzadeh et al., 2016; Cliquet & Lemauviel-Lavenant, 2019; Varin et al., 2013). Die Höhe der atmosphärischen S-Aufnahme über die Stomata ist abhängig von der Konzentration entsprechender S-haltiger Verbindungen in der Luft und den Blatteigenschaften der Pflanze (de Kok et al., 2002). Durch eine Blattdüngung ist außerdem eine Aufnahme von  $\text{SO}_4^{2-}$  über die Kutikula des Blattes aufgrund des Unterschiedes in der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration zwischen Cytosol und der Düngelösung auf dem Blatt möglich (Pedersen et al., 1998).

Lag die jährliche S-Gesamtdeposition in Deutschland 2007 noch bei sieben bis acht  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , sinkt sie bis 2020 voraussichtlich auf unter fünf  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  ab (Gauger, 2013). Hauptursache dafür sind die seit den 1970er bis 1980er Jahren rückläufigen  $\text{SO}_2$ -Emissionen in weiten Teilen Europas (Mylona, 1996; Pedersen et al., 1998). In Deutschland sind die  $\text{SO}_2$ -Emissionen seit 1990 um über 90% gesunken (UBA, 2016). Diese nachlassenden atmosphärischen S-Depositionen (Daemmgen et al., 1998), die Verwendung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln mit geringen S-Gehalten und steigender Nährstoffentzug aus den Böden aufgrund

steigender Erträge haben maßgeblich zum vermehrten Auftreten von S-Mangel in Pflanzen geführt (Ceccotti et al., 1998; Eriksen et al., 1998; Scherer, 2001). Besonders S-bedürftige Kulturen wie Raps (*Brassica napus* L.; Bailey, 1986; Becker et al., 2011; Grant & Bailey, 1993; Malhi et al., 2007) und Leguminosen (Bailey, 1986; Scherer & Lange 1996) sind auf niederschlagsreichen und sandigen Standorten mit erhöhtem Risiko der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Auswaschung (Eriksen et al., 1998), häufiger von S-Mangel betroffen.

Liegt ein S-Mangel vor, wird zunächst die Proteinsynthese S-haltiger Aminosäuren wie Cystein und Methionin sowie die Chloroplastenbildung der Pflanze gehemmt, was äußerlich zuerst durch Chlorosen an den jüngeren Blättern sichtbar wird (Dietz, 1989; Gilbert et al., 1997; Schilling et al., 2000). Chlorophyll liegt in Chloroplasten in Komplexen mit Proteinen vor, sodass eine gehemmte Cystein- und Methioninsynthese zu einer Verringerung des Gehaltes an Chlorophyll-Protein-Komplexen führt (Willenbrink, 1967). Als Reaktion der Pflanze auf S-Mangel nimmt der Gehalt an Chlorophyll im Blatt ab, wodurch die Photosyntheseleistung der Pflanze sinkt und somit auch der Glucose-Gehalt in der Pflanze abnimmt. Durch diese Stresssituation steigt jedoch die Stärke-Akkumulation in Folge eines gestörten Kohlenhydratstoffwechsels der Pflanze, was Lunde et al. (2008) an Reis nachwiesen. Leiden Leguminosen unter S-Mangel, verringern sich das Wurzelwachstum und die Anzahl und das Gewicht der Knöllchen an den Wurzeln, wodurch die symbiotische  $\text{N}_2$ -Fixierung deutlich gehemmt wird (Scherer & Lange, 1996).

Obwohl die Bedeutung des Schwefels für die Ertragsbildung und  $\text{N}_2$ -Fixierung von Körnerleguminosen nachgewiesen ist, fehlt es bislang an detaillierten Daten zur S-Akkumulation sowie zu S-Konzentration und N:S-Verhältnis in Korn, Stroh und

Spross von wichtigen Leguminosenarten wie Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse. Um den S-Bedarf dieser Leguminosenarten und die Wirkung verschiedener mineralischer S-Düngemittel auf S-Aufnahme, S-Verwertungseffizienz und Ertragsbildung unter Feldbedingungen zu ermitteln, wurden in den Jahren 2012 bis 2014 umfangreiche Feldversuche über mehrere, in Deutschland verteilte Standorte durchgeführt. Aufgrund steigender Bedeutung des Anbaus heimisch erzeugter, eiweißreicher Futtermittel und ökologisch erzeugter Lebens- und Futtermittel, wurden die Feldversuche mit Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse unter ökologischen Anbaubedingungen durchgeführt. Die bereits erwähnten nachlassenden atmosphärischen S-Depositionen in Kombination mit der durch zahlreiche Versuche (Cazzato et al., 2012; Habtemichael et al., 2007; Robson et al., 1995; Scherer & Lange, 1996; Scherer et al., 2008; Zhao et al., 1999) belegten S-Bedürftigkeit der Körnerleguminosen waren ausschlaggebend für das Forschungsvorhaben, das dieser Arbeit zugrunde liegt. Dabei wurde die Wirkung vier verschiedener S-haltiger Düngemittel, beziehungsweise Düngeverfahren, auf die Körnerleguminosen getestet. Diese waren Kieserit ( $MgSO_4$ ), Gips ( $CaSO_4$ ), elementarer Schwefel und das Blattdüngemittel Bittersalz ( $MgSO_4 \times 7H_2O$ ).

Ziel der vorliegenden Arbeit war es,

- a) zu untersuchen, wie sich die S-Düngemittel Kieserit, Gips, Bittersalz und elementarer S unter Feldbedingungen auf die S- und N-Akkumulation, die S- und N-Konzentration und den Ertrag der Ackerbohne (Artikel I), der Schmalblättrigen Lupine (Artikel II) und Erbse (Artikel III) in Reinsaat auswirken und in welchem Maß der gedüngte S von der Pflanze aufgenommen wird.

- b) zu prüfen, wie sich die S-Düngemittel Kieserit, Gips, Bittersalz und elementarer S unter Feldbedingungen auf die S- und N-Akkumulation, die S- und N-Konzentration, den Ertrag und die Ausnutzung des gedüngten S der Erbse in Reinsaat im Vergleich zum Gemengeanbau von Erbse mit Gerste auswirken (Artikel III).
- c) anhand eines Modells hinsichtlich S- und N-Aufnahme sowie der Kornertragsbildung den Gemengeanbau von Erbse und Gerste durch Variation der Saatanteile im Gemenge zu optimieren (Artikel IV).
- d) Unterschiede zwischen Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse in Bezug auf deren S-Bedarf und S-Akkumulation sowie Wirkungen auf eine S-Düngung unter Feldbedingungen herauszuarbeiten.

In Abbildung 1 werden die Zusammenhänge zwischen den vier Artikeln der kumulativen Dissertation veranschaulicht.

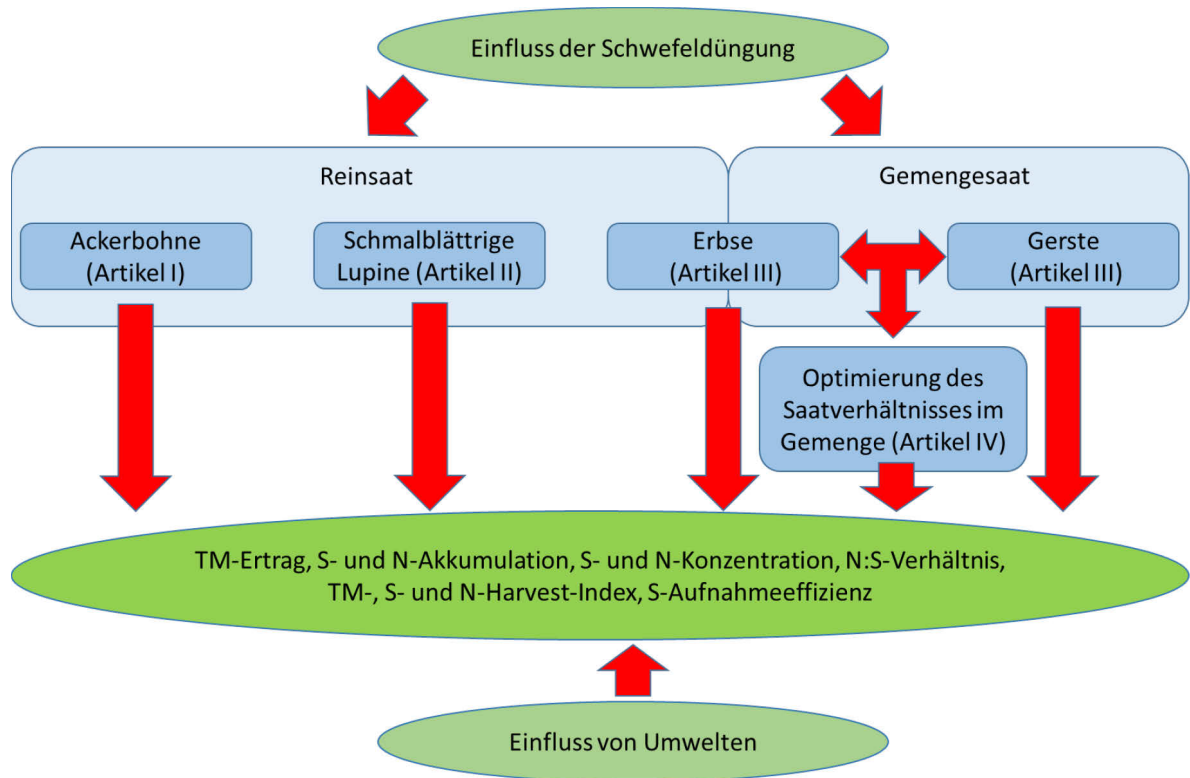


Abbildung 1: Grafische Darstellung der Zusammenhänge zwischen den vier einzelnen Artikeln der kumulativen Dissertation

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Schwefel im Boden

S liegt im Boden in mineralischer und in organischer Form vor. Ein geringer Teil, circa 5 % des gesamten S-Vorrates im Boden, liegt als mineralisches, pflanzenverfügbares  $\text{SO}_4^{2-}$  im Boden vor. Der weitaus größere Teil (> 95 %) des Gesamtvrates an Schwefel im Boden ist hingegen organisch gebunden und somit nicht direkt pflanzenverfügbar (Scherer, 2009). Organisch gebundener S liegt im Boden in zwei Fraktionen vor, als Sulfatester (C-O-S) und als Teil S-haltiger Aminosäuren wie Cystein und Methionin oder in mikrobieller Biomasse, an Kohlenstoff (C) gebunden (C-S). Die Mineralisation durch mikrobiell gebildete Enzyme (Sulfatasen) liefert  $\text{SO}_4^{2-}$  aus Sulfatestern und wird hauptsächlich vom  $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalt des Bodens, aber auch von der Bodenfeuchte und dem pH-Wert beeinflusst. Vermutlich nehmen auch Pflanzen über Rhizodeposition vor allem unter S-Mangel Bedingungen Einfluss auf den S-Haushalt des Bodens (Knauff et al., 2003; Vong et al., 2007). Die Mineralisation des an C gebundenen S wird durch den C-Bedarf der Mikroorganismen bestimmt, wobei C als Energiequelle dient und  $\text{SO}_4^{2-}$  als Nebenprodukt dieser Prozesse frei wird (Scherer, 2009). Die mikrobielle Oxidation reduzierter Schwefelverbindungen zu  $\text{SO}_4^{2-}$  kann einen erheblichen Anteil an S aus der organischen Bodensubstanz für die Pflanze bereitstellen (Eriksen et al., 1998; Scherer, 2009).  $\text{SO}_4^{2-}$  ist in der Bodenlösung zwar direkt pflanzenverfügbar, jedoch auch stark auswaschungsgefährdet (Schnug & Haneklaus, 1998). Ein Teil des  $\text{SO}_4^{2-}$  adsorbiert an Tonminerale, Fe-/Al-Oxide und an Hydroxide, ein weiterer Teil kann mit  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  oder  $\text{Na}^+$  reagieren und fällt als  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  oder  $\text{NaSO}_4$  aus oder kann als Eisensulfid (FeS) und Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) vorliegen (Scherer, 2001; Seehuber, 2014). Sehr hohe  $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalte im Boden



können dazu führen, dass die Aufnahme anderer Nährstoffe in die Pflanze behindert wird (Ionen-Antagonismus). Auf die hemmende Wirkung von S auf die Molybdän-Aufnahme der Pflanzenwurzel, was auch als Ionenantagonismus zwischen  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{MoO}_4^{2-}$  bezeichnet wird, verweisen Hamlin (2007), Pasricha et al. (1977) und Stout et al. (1951). Ein weiterer Antagonismus besteht zwischen Schwefel und Selen (Barak & Goldman, 1997).

Eine Bodenanalyse, die den mineralischen, pflanzenverfügbaren  $\text{SO}_4^{2-}$ -Vorrat des Bodens zeigt, gibt deshalb lediglich einen Anhaltspunkt für den daraus zu erwartenden S-Versorgungszustand der Kulturpflanzen. Diese wird zudem stark durch die Mineralisation organisch gebundenen Schwefels sowie atmosphärische S-Deposition während der Vegetationsperiode beeinflusst und lässt sich nur schwer präzise quantifizieren (Scherer, 2009). Um den S-Versorgungszustand von Kulturpflanzen einzuschätzen kann eine Analyse des Pflanzengewebes präzisere Hinweise über den S-Versorgungszustand der Kulturpflanze bieten (Scherer, 2001).

## 2.2 Schwefel in der Pflanze

Der Hauptweg der S-Versorgung der Pflanze erfolgt über die  $\text{SO}_4^{2-}$ -Aufnahme aus dem Boden über die Wurzeln. Die  $\text{SO}_4^{2-}$ -Aufnahme der Pflanze erfolgt aktiv über  $\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$ -Co-Transporter der Wurzelhaare (Leusteck & Saito, 1999). Der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Transport aus den Wurzeln erfolgt über den Transpirationsstrom im Xylem und mündet in den Mesophylzellen der Blätter (Rennenberg et al., 1979).  $\text{SO}_4^{2-}$  wird entweder direkt gespeichert oder primär in den Chloroplasten der Blätter assimiliert. Die notwendigen Elektronen für die S-Reduktion liefert Ferredoxin. Der

Prozess der S-Assimilation beginnt mit der Bildung von Adenosin-5'-phosphosulfat (APS) die durch Adenosintriphosphat (ATP)-Sulfurylase katalysiert wird, wobei die Sulfonylgruppe von  $\text{SO}_4^{2-}$  auf ATP übertragen und das  $\text{SO}_4^{2-}$  somit aktiviert wird (Zhao et al., 1999). Mittels des Enzyms APS-Transferase wird  $\text{SO}_4^{2-}$  auf Glutathion (Tripeptid aus Glutamat, Cystein und Glycin) übertragen. Nach der Reduktion der Sulfongruppe durch Thiosulfat-Reduktase entsteht eine Thiolgruppe, die unter Abspaltung von Acetylserin durch das Enzym Acetylserin-Sulphydrase auf den Serin-Rest übertragen wird, wodurch die Aminosäure Cystein entsteht und somit reduzierter S in andere Verbindungen überführt werden kann (Hawkesford, 2004).

Ein weiterer Weg der S-Aufnahme erfolgt über die Stomata in Form von atmosphärischem  $\text{SO}_2$ . Durch die Anlagerung von  $\text{H}_2\text{O}$  entsteht schwache schwefelige Säure ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), die zu  $\text{H}_2\text{SO}_4$  oxidiert wird. Sind Pflanzen empfindlich gegenüber dieser Säure kommt es zu Schädigungen des Gewebes (Hawkesford, 2004). Nach der Abspaltung von  $2\text{H}^+$  von  $\text{H}_2\text{SO}_4$  wird hingegen dem S-Haushalt der Pflanze  $\text{SO}_4^{2-}$  für die weitere Assimilation bereitgestellt.

### 2.3 Schwefelbedarf von Körnerleguminosen

Neben *Brassicaceae*, die aufgrund schwefelhaltiger Glucosinolate einen gesteigerten S-Bedarf aufweisen und Zwiebelgewächsen (*Allioideae*), in denen die S-haltige Aminosäure Alliin enthalten ist, gelten sowohl Futter- wie auch Körnerleguminosen als besonders schwefelbedürftig (Scherer & Lange, 1996). Zum einen sinkt bei S-Mangel der Gehalt der S-haltigen Aminosäuren Cystein und Methionin im Korn und Spross, was zu Qualitätsverlusten führt (Sexton et al., 1998). Zum anderen hängt die symbiotische  $\text{N}_2$ -Fixierung von Leguminosen stark

von einer ausreichenden S-Versorgung der Pflanze ab, da die Knöllchenentwicklung und deren Funktion bei S-Mangel gehemmt ist (Pacyna et al., 2006), die Konzentration von Leghämoglobin in den Knöllchen (Pacyna, 2005) und die ATP-Konzentration sowohl in den symbiotischen Bakterien als auch in den Mitochondrien der Wurzelknöllchen sinkt (Scherer et al., 2006). S ist zudem an Enzymaktivitäten von Nitrogenase, PEP-Carboxylase, Malat-Dehydrogenase oder Glutamat-Synthase beteiligt und hemmt in Mangelsituation deren Tätigkeit (Lange, 1998). Insbesondere bei Körnerleguminosen ist das Sprosswachstum und der Kornertrag von einer ausreichenden Versorgung mit S abhängig (Robson et al., 1995). Die Düngung von  $\text{SO}_4^{2-}$  führte in Gefäßversuchen von Scherer & Lange (1996) zu verstärktem Wurzelwachstum bei den Körnerleguminosen Erbse und Ackerbohne. Außerdem führte die S-Gabe zu vermehrter Knöllchenbildung und dadurch zu einer höheren symbiotischen  $\text{N}_2$ -Fixierleistung, die wiederum maßgeblich dafür verantwortlich gemacht wird, dass die N-Aufnahme der Körnerleguminosen durch eine S-Düngung mit Kaliumsulfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) signifikant gesteigert werden konnte (Scherer & Lange, 1996). Die positive Wirkung einer S-Düngung auf Ertrag und symbiotische  $\text{N}_2$ -Fixierung der Ackerbohne wurde unter Feldversuchsbedingungen mit einer  $\text{K}_2\text{SO}_4$ -Düngung durch Cazzato et al. (2012) und Habtemichial et al. (2007) und in Gefäßversuchen mit Natriumsulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) durch Eppendorfer (1971) bestätigt. Auch Pacyna et al. (2006) konnten in Gefäßversuchen mit der Ackerbohne durch eine  $\text{SO}_4^{2-}$ -Düngung den S-Gehalt des Sprosses, der Wurzeln und der Knöllchen sowie gleichzeitig die symbiotische  $\text{N}_2$ -Fixierleistung signifikant erhöhen. Eine positive Wirkung von S auf Ertragsparameter und symbiotische  $\text{N}_2$ -Fixierleistung der Erbse wiesen Scherer et al. (2008) und Zhao et al. (1999) in Gefäßversuchen nach. Robson et al. (1995)

konnte in Gefäßversuchen den Ertrag der Schmalblättrigen Lupine durch eine S-Düngung signifikant erhöhen. Die S-Bedürftigkeit der drei Körnerleguminosen Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse ist demnach unumstritten und wurde vor allem unter Gefäßbedingungen bestätigt. Die S-Konzentration im Samen der Ackerbohne gaben Makkar et al. (1997) mit 0,16 bis 0,22% in der Trockenmasse (TM) und Elsheikh & Elzidany (1997) mit 0,21 bis 0,26% in der TM an. Der kritische Wert für die S-Konzentration (Fageria et al., 1997; Marschner, 1995) im jüngsten voll entfalteten Blatt zur Blüte (BBCH 60 bis 65; Lancashire et al., 1991) liegt laut Seehuber (2014) bei 0.2% S in der TM mit einem N:S-Verhältnis von weniger als 20. In Gefäßversuchen ermittelten Robson et al. (1995) kritische Werte für die S-Konzentration im jüngsten voll entfalteten Blatt der Schmalblättrigen Lupine zu BBCH 60 von 0.28% in der TM und ein kritisches N:S-Verhältnis von 22. Für die Samen der Schmalblättrigen Lupine zu BBCH 89 gaben White et al. (1981) Werte zwischen 0,18 und 0.31% S in der TM und Schumacher et al. (2011) einen Wert von 0.3% S in der TM an. Eriksen et al. (2002) gaben die S-Konzentration im Spross der Erbse unter Feldbedingungen mit 0.09 bis 0.18% in der TM an und Zhao et al. (1999) ermittelten in Gefäßversuchen S-Konzentrationen im Spross zwischen 0,23 und 0,28% in der TM bei ausreichender S-Versorgung.

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Versuchsaufbau und Standortbeschreibung**

Die in den Artikeln I bis IV beschriebenen Feldversuche zur S-Düngung wurden in den Jahren 2012 bis 2014 an mehreren Standorten in Deutschland durchgeführt (Tabelle 1). Dabei wurden Flächen ausgewählt, die bereits länger als 10 Jahre ökologisch bewirtschaftet wurden. Die Versuche mit Ackerbohne und Schmalblättriger Lupine wurden an verschiedenen Standorten in randomisierten einfaktoriellen Blockanlagen mit vier Wiederholungen durchgeführt, in denen die Einzelparzellengröße  $10,0 \times 2,7$  m betrug (Artikel I und II). Die Ackerbohne (Sorte: Espresso) wurde in einer Saatkichte von 45 keimfähigen Körnern  $m^{-2}$  und die Schmalblättrige Lupine (Sorte: Boregine, verzweigter Wuchstyp) in einer Saatkichte von 95 keimfähigen Körnern  $m^{-2}$  ausgesät. Die Erbse und deren Gemengepartner Gerste wurden in zweifaktoriellen Spaltanlagen (Haupteinheit: Anbauform Erbse, Untereinheit: S-Düngung) mit vier Wiederholungen und einer Einzelparzellengröße von  $10,0 \times 2,7$  m angelegt (Artikel IV). Die Erbse (Sorte: Alvesta, halbblattloser Wuchstyp) wurde in einer Saatkichte von 95 keimfähigen Körnern  $m^{-2}$  in Reinsaat ausgesät. Der Gemengepartner der Erbse war Sommergerste (Sorte: Eunova) mit einer Reinsaatstärke von 300 keimfähigen Körnern  $m^{-2}$ . Das Saatverhältnis im substitutiven Gemenge aus Erbse und Gerste betrug 70 % der Reinsaatstärke der Erbse (67 keimfähige Körnern  $m^{-2}$ ) und 30 % der Reinsaatstärke der Gerste (90 keimfähige Körnern  $m^{-2}$ ). Die Einzelkomponenten wurden innerhalb der Saatzeilen, die in allen Versuchen einen Abstand von 0,15 m aufwiesen, gemischt. Die Niederschlagsverteilung während der Vegetationsperioden ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 1: Standortbeschreibung

Jahr	Standort	Abkürzung Umwelt	Pflanzenart	Bodenart	Höhe über NN [m]	Mittlerer Jahresniederschlag <sup>a</sup> [mm]	Mittlere Jahrestemperatur <sup>a</sup> [°C]	S <sub>min</sub> <sup>b</sup> [kg ha <sup>-1</sup> ]	pH <sup>c</sup>	Humusgehalt <sup>d</sup> [%]	P <sup>e</sup>	K <sup>e</sup> [mg 100 g <sup>-1</sup> Boden <sup>-1</sup> ]	Mg <sup>c</sup>	Aussaatdatum
2012	Taucha	TA12	L, E, G	S	148	488	9,2	28,7	4,5	1,9	3,8	13,8	3,6	31.03.2012
	Greifenhagen	GH12	L, E, G	sL	285	485	7,4	23,2	6,1	2,4	5,3	11,6	7,9	30.03.2012
	Eschdorf	ED12	L, E, G	sL	270	612	9,6	21,5	5,0	2,2	3,4	6,4	8,6	29.03.2012
	Puch	PU12	AB, E, G	IS	537	834	8,7	14,0	7,4	15-30	4,5	11,6	22,1	31.03.2012
	Auweiler	A12	AB	sL	48	817	11,5	19,4	6,7	2-3	7,9	9,1	8,0	04.04.2012
	Bissendorf	BI12	AB, E, G	sL	78	861	9,8	25,0	6,4	2-3	2,0	10,0	9,0	02.04.2012
2013	Taucha	TA13	L, E, G	S	148	488	9,2	13,3	4,9	1,9	2,5	5,8	5,3	19.04.2013
	Greifenhagen	GH13	L, E, G	sL	285	485	7,4	22,5	6,2	2,4	3,2	8,9	8,0	20.04.2013
	Dürröhrsdorf	DU13	L, E, G	sL	221	612	9,6	21,6	5,6	2,2	4,0	6,0	6,9	26.04.2013
	Drensteinfurt	DR13	AB	S	63	782	9,9	13,7	7,0	2-3	6,1	13,3	5,0	23.04.2013
	Puch	PU13	AB, E, G	IS	537	834	8,7	16,1	7,1	1-2	26,0	39,0	22,0	09.04.2013
2014	Linz	LI14	E, G	IS	152	665	9,4	5,7	6,3	1,6	6,4	5,0	7,4	15.03.2014
	Ogrosen	OG14	E, G	IS	73	566	9,6	7,4	5,3	1,6	5,3	9,2	6,8	27.03.2014
	Görlitz	GO14	AB	sL	220	656	8,8	11,3	5,2	1-2	2,0	10,3	10,4	31.03.2014
	Großzöbern	GZ14	L, E, G	IU	501	624	8,7	8,6	6,0	2,0	1,5	6,1	44,3	28.03.2014
	Ochsenhausen	OC14	AB, E, G	IS	580	858	8,2	13,1	6,3	2,1	1,4	4,3	12,7	13.03.2014
	Puch	PU14	E, G	IS	537	834	8,7	21,3	6,7	1-2	3,5	11,6	-	03.04.2014
	Bollheim	BO14	AB, E, G	IS	147	816	10,3	22,0	6,2	2-3	6,1	11,6	8,0	02.04.2014
	Belm	BE14	AB, E, G	sL	84	883	9,4	13,2	5,7	2-3	4,0	6,0	4,0	27.03.2014

Pflanzenarten: E – Erbse, G – Gerste, L – Schmalblättrige Lupine, AB – Ackerbohne; Bodenarten: S – Sand, IS – lehmiger Sand, sL – sandiger Lehm, IU – lehmiger Schluff; NN – Normal Null; <sup>a</sup> Werte der nächstgelegenen Wetterstation – langjähriges Mittel 1981 bis 2010 (DWD 2017); <sup>b</sup> Tiefe 0 – 0,6 m zum Zeitpunkt der Aussaat, PU12 und PU13 nur 0 – 0,3 m; <sup>c</sup> 0.01 M CaCl<sub>2</sub> (Jones, 2001); Humusgehalt in 0 – 0,3 m Tiefe (BGR, 2007); <sup>d</sup> durch trockene Verbrennung; <sup>e</sup> CAL (Schüller, 1969)

Tabelle 2: Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode

Jahr	Umwelt	Niederschlag [mm]						Summe
		März	April	Mai	Juni	Juli	August	
2012	TA12	8	19	42	72	76	34	<b>251</b>
	GH12	6	15	55	83	53	24	<b>236</b>
	ED12	16	27	39	57	68	68	<b>275</b>
	PU12	20	77	65	164	61	186	<b>573</b>
	AU12	29	51	38	66	121	54	<b>359</b>
	BI12	13	41	25	60	89	31	<b>259</b>
2013	TA13	33	46	118	129	40	34	<b>400</b>
	GH13	29	41	102	74	29	58	<b>333</b>
	DU13	23	26	120	175	52	28	<b>424</b>
	DR13	33	20	58	64	37	63	<b>275</b>
	PU13	34	38	138	179	19	113	<b>521</b>
2014	LI14	15	25	108	31	106	73	<b>358</b>
	OG14	28	67	92	36	52	190	<b>465</b>
	GO14	22	24	84	26	75	64	<b>295</b>
	GZ14	19	29	53	33	118	83	<b>335</b>
	OC14	19	41	74	65	155	111	<b>465</b>
	PU14	22	34	58	44	190	107	<b>455</b>
	BO14	8	29	56	68	152	127	<b>440</b>
	BE14	15	33	98	79	123	80	<b>428</b>

Nächstgelegene Wetterstation: TA12, TA13 – Leipzig-Holzhausen; GH12, GH13 – Halle(Saale); ED12, DU13, LI14 – Dresden-Klotzsche; PU12, PU13, PU14 – Puch; AU12 – Köln/Bonn; BI12, BE14 – Belm; DR13 – Werl; OG14 – Cottbus; GO14 – Baruth; GZ14 – Plauen; OC 14 – Kirchheim; BO14 – Nörvenich

### 3.2 Düngemittel

Die S-Düngemittel Kieserit –  $MgSO_4$  (K), Gips –  $CaSO_4$  (G) und elementarer S (E) wurden direkt vor der Aussaat flach (ca. 4 cm tief) in den Boden eingearbeitet. Die applizierte Düngemenge betrug jeweils  $40 \text{ kg S ha}^{-1}$ . Ein zusätzliches Prüfglied bildete das Blattdüngemittel Bittersalz (Epsom Top®) –  $MgSO_4 \times 7 H_2O$  (B), das mit einem S-Gehalt von 13 % zu drei Terminen zwischen BBCH 31 und BBCH 60

ausgebracht wurde. Die Aufwandmenge betrug  $8,4 \text{ kg S ha}^{-1}$  in einer 10,6 prozentigen Lösung, verteilt auf drei Gaben ( $200 \text{ l ha}^{-1}$  pro Applikation,  $2,8 \text{ kg S ha}^{-1}$  pro Applikation). Zudem wurde eine Kontrolle ohne S-Düngung (O) angelegt. In Bezug auf die Düngung mit  $\text{MgSO}_4$  und  $\text{CaSO}_4$  wurde angenommen, dass mögliche Düngeeffekte auf das  $\text{SO}_4^{2-}$  zurückzuführen sind, da die Begleitelemente  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  laut Tabelle 1 in ausreichender Menge in den getesteten Böden vorhanden waren. Um zu gewährleisten, dass neben S keine anderen Nährstoffe ertragsbegrenzend wirkten, wurde eine Grunddüngung mit  $50 \text{ kg P ha}^{-1}$  (weicherdiges Rohphosphat, Dolophos 26<sup>®</sup>) und  $50 \text{ kg}$  einer Mikronährstoffmischung  $\text{ha}^{-1}$  (Excello Base, Nährstoffmenge je ha:  $1,25 \text{ kg Cu}$ ,  $1,25 \text{ kg Zn}$ ,  $0,125 \text{ kg Mn}$ ,  $0,125 \text{ kg B}$ ,  $0,125 \text{ kg Fe}$ ,  $0,075 \text{ kg Na}$ ,  $0,002 \text{ kg Mo}$ ,  $0,0005 \text{ kg Co}$ ,  $1,5 \text{ kg S}$ ,  $3,1 \text{ kg Mg}$ ,  $11,2 \text{ kg Ca}$ ) in den Jahren 2013 und 2014 auf allen Standorten durchgeführt.

### 3.3 Beprobung des Bodens

Es wurden je Standort 10 gestörte Bodenproben mit Hilfe eines Pürckhauer Bohrstocks (Durchmesser: 30 mm) entnommen. Die Beprobung erfolgte von 0 - 0,6 m Bodentiefe, wobei die 10 Einzelproben je Standort zu einer Mischprobe zusammengefügt wurden. Die Bodenproben wurden direkt nach deren Entnahme für den Transport auf unter  $5 \text{ °C}$  gekühlt und am selben Tag bis zur Analyse bei  $-18 \text{ °C}$  eingefroren. Die genaue Methodik der Nährstoffanalyse ist den Artikeln I bis IV zu entnehmen.



### 3.4 Ertragsermittlung und Nährstoffanalyse

Zur Ermittlung der oberirdischen Sprossmasse zu BBCH 89 wurden die Pflanzen auf einer Fläche von  $1,5 \times 1,35$  m je Parzelle bodennah mit einer Schere geerntet. Nach der Separierung und Erfassung der Teilkomponenten Korn und Stroh der Gesamtprobe wurden alle Teilproben in einem Trockenschrank bei  $55\text{ °C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Für die Ermittlung der Restfeuchte des Pflanzenmaterials wurden Teilproben bei  $105\text{ °C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Restparzelle wurde mittels eines Parzellenmähdreschers abgeerntet (Erntefläche:  $11,5\text{ m}^2$ ). Der Blattfall der Körnerleguminosen wurde drei bis vier Wochen vor der Reife mit Hilfe von Blattauffangkörben (Größe:  $0,1\text{ m}^2$ ) ermittelt. Alle Pflanzenproben wurden mit Hilfe eines CNS-Analysators (EuroEA3000 - Hekatech) untersucht. Detaillierte Beschreibungen aller Arbeitsschritte (Handernte, Erfassung des Blattfalls, Parzellen-Mähdrusch, Blatt Probennahme zwischen BBCH 60 und BBCH 65 und die Analyse der Pflanzenproben) sowie Details zur Berechnung der Harvest-Indices und der Scheinbaren Ausnutzung des gedüngten S sind den Artikeln I bis IV zu entnehmen.

### 3.5 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der Daten zur Ackerbohne und Schmalblättrigen Lupine wurden getrennt voneinander in den Artikeln I und II beschrieben. Die statistische Auswertung der Daten zur Erbse in Reinsaat und im Gemenge mit Gerste wurde detailliert in den Artikeln III und IV dargestellt. In der vorliegenden Dissertationsschrift sollen über die Artikel hinaus die Körnerleguminosen miteinander verglichen werden. Zum einen die Erbse in Reinsaat mit der

Ackerbohne und zum anderen die Erbse in Reinsaat mit der Schmalblättrigen Lupine. Der jeweilige Vergleich war in den Umwelten möglich, in denen zeitgleich Erbse und Ackerbohne, beziehungsweise Erbse und Schmalblättrige Lupine angebaut wurden (Tabelle 1).

Der statistische Vergleich der Erbse (Spaltanlage) mit der Ackerbohne und Schmalblättrigen Lupine (Blockanlage) erfolgte mit Hilfe einer zweifaktoriellen Spaltanlage, in der die Haupteinheit die Pflanzenart (zwei Faktorstufen: Erbse und Ackerbohne oder Erbse und Schmalblättrige Lupine) und die Untereinheit die S Düngung (fünf Faktorstufen: O, E, B, G, K) bildete. Dabei wurden beide Faktoren als fixe Variablen verrechnet und die Anzahl der Umwelten, für die eine gemeinsame Verrechnung von Erbse und Ackerbohne oder Erbse und Schmalblättriger Lupine möglich war, bildete die Anzahl der Wiederholungen. Pro Umwelt wurde ein Mittelwert für jeden Parameter errechnet, der als eine Wiederholung im statistischen Modell betrachtet wurde. Für den Vergleich von Erbse und Ackerbohne wurden sechs Umwelten verrechnet, für die Erbse und Schmalblättrige Lupine sieben (Tabelle 1). Die Auswertung erfolgte mit dem Programm SAS Version 9.3 des SAS Institut Inc. von 2013. Der Test auf Normalverteilung erfolgte nach Shapiro-Wilk (Munzert, 2015). Der Vergleich der Mittelwerte wurde mit dem Tukey-Test (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha < 0,05$ ) mit PROC MIXED (Munzert, 2015) durchgeführt. Die Berechnung und Verwendung gewichteter Mittelwerte erfolgte nach Reiter et al. (2002) analog zu Artikel I bis IV. Für grafische Darstellungen und Regressionsanalysen fand das Programm Sigma Plot Version 12.5 der Systat Software Inc. von 2013 Verwendung.

## 4 Ergebnisse

Das Hauptaugenmerk des Ergebnisteils dieser Arbeit liegt auf dem Vergleich der Körnerleguminosen, da dieser in keinem der Artikel I bis IV enthalten ist. Dieser Vergleich erfolgte zum einen zwischen der Ackerbohne und der Erbse und zum anderen zwischen der Schmalblättrigen Lupine und der Erbse. Die Artikel I bis IV beleuchten die einzelnen Körnerleguminosen hingegen getrennt voneinander. Im Fall der Erbse spielte zudem der Gemengeanbau mit Gerste eine zentrale Rolle (Artikel III und IV). Die Ergebnisse zum Vergleich von Erbse und Ackerbohne finden sich in Tabelle 3 wieder. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zu Erbse und Schmalblättriger Lupine abgebildet.

### 4.1 Ertrag

Der Kornertrag der Erbse lag im Mittel der Umwelten um 38% und damit signifikant über dem der Ackerbohne (Tabelle 3) und um 16% signifikant über dem der Schmalblättrigen Lupine (Tabelle 4). Neben dem Kornertrag lagen zwar die Werte für Stroh- und Sprossertrag sowie Hülsenansatz der Erbse deutlich über denen der Ackerbohne, jedoch unter denen der Schmalblättrigen Lupine (Tabelle 3 und 4). Im Gegensatz zur Pflanzenart hatte die S-Düngung keinen signifikanten Einfluss auf die genannten Ertragsparameter der drei Körnerleguminosen (Tabelle 3 und 4).

### 4.2 N-Konzentration

Die N-Konzentration im jüngsten voll entfalteten Blatt zum Zeitpunkt der Blüte unterschied sich weder zwischen Erbse und Ackerbohne (Tabelle 3) noch zwischen Erbse und Schmalblättriger Lupine (Tabelle 4) signifikant voneinander. Die N-Konzentration in Korn, Stroh und Spross der Erbse zu BBCH 89 lag hingegen um 5%, 21% und 10% signifikant über den Werten der Ackerbohne (Tabelle 3). Die N-Konzentration im Stroh der Erbse war zwar um 25% signifikant höher als im Stroh der Schmalblättrigen Lupine, die N-Konzentration im Korn lag jedoch um 57% unter der Schmalblättrigen Lupine, was auch zu einer signifikant geringeren N-Konzentration im Spross der Erbse, verglichen mit der Schmalblättrigen Lupine, führte (Tabelle 4). Im Gegensatz zur Pflanzenart konnte für die S-Düngung kein Einfluss auf die N-Konzentration in den Körnerleguminosen nachgewiesen werden (Tabelle 3 und 4).

Tabelle 3: Ergebnisse der statistischen Analyse der Erbse und Ackerbohne (arithmetische / gewichtete Mittelwerte)

Parameter	Einheit	P – Wert Varianzanalyse			Mittelwert Pflanzenart		Mittelwert Düngung				
		Pflanzenart	Düngung	Pflanzenart × Düngung	Erbse	Ackerbohne	O	E	B	G	K
Kornertrag	Mg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,9836	0,9583	2,20 a	1,59 b	1,89	1,90	1,85	1,91	1,92
Strohertrag	Mg ha <sup>-1</sup>	0,0587	0,8769	0,6899	1,54	1,37	1,51	1,50	1,44	1,45	1,37
Sprossertrag	Mg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,9724	0,9783	3,76 a	2,96 b	3,41	3,43	3,30	3,35	3,29
TKG	g	0,0017	0,9814	0,9834	230 b	256 a	248	242	241	241	243
Hülsen	Hülsen m <sup>-2</sup>	< 0,0001	0,9427	0,7734	254 a	170 b	204	217	213	211	215
N Konzentration Blatt <sup>a</sup>	%	0,2051	0,8058	0,6237	4,78	4,61	4,82	4,71	4,73	4,59	4,61
N Konzentration Korn	%	0,0180	0,5752	0,9508	3,66 a	3,48 b	3,63	3,65	3,56	3,49	3,53
N Konzentration Stroh	%	0,0210	0,9982	0,9980	1,29 a	1,07 b	1,19	1,20	1,18	1,18	1,15
N Konzentration Spross	%	0,0103	0,9925	0,9331	2,61 a	2,38 b	2,51	2,52	2,47	2,48	2,51
N Akkumulation Korn <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,9976	0,8779	73,97 a	55,32 b	65,91	66,47	63,39	63,90	64,93
N Akkumulation Stroh <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	0,0290	0,9499	0,8784	19,86 a	14,63 b	17,85	18,03	16,96	17,14	15,80
N Akkumulation Spross <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,9846	0,8660	93,63 a	70,45 b	83,48	84,28	79,19	81,20	80,16
S Konzentration Blatt <sup>a</sup>	%	0,2576	0,0082	0,9690	0,31	0,29	0,29 b	0,28 b	0,29 ab	0,30 ab	0,35 a
S Konzentration Korn	%	0,4451	0,0367	0,4284	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21
S Konzentration Stroh	%	0,0584	< 0,0001	0,9930	0,14	0,12	0,10 c	0,11 bc	0,11 bc	0,15 ab	0,17 a
S Konzentration Spross	%	0,1492	< 0,0001	0,8175	0,17	0,16	0,14 b	0,15 b	0,15 b	0,18 a	0,19 a
S Akkumulation Korn <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,4157	0,8624	4,25 a	3,15 b	3,46	3,62	3,64	3,94	3,91
S Akkumulation Stroh <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	0,0003	0,0834	0,6822	2,12 a	1,61 b	1,49	1,66	1,55	2,16	2,36
S Akkumulation Spross <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,1162	0,8184	6,32 a	4,75 b	4,86	5,29	5,02	6,08	6,27
N:S-Verhältnis Blatt <sup>wa</sup>		0,6585	0,0063	0,9221	15,48	15,68	16,92 a	17,14 a	16,19 a	15,25 ab	13,05 a
N:S-Verhältnis Korn <sup>w</sup>		0,5192	0,0006	0,6378	17,41	17,55	19,07 a	18,38 ab	17,39 abc	16,22 c	16,59 bc
N:S-Verhältnis Stroh <sup>w</sup>		0,3222	0,1145	0,9889	9,37	9,09	12,01	10,84	10,94	7,95	6,68
N:S-Verhältnis Spross <sup>w</sup>		0,5840	0,0012	0,8643	14,82	14,82	17,16 a	15,94 abc	15,77 ab	13,35 bc	12,79 c
TM HI <sup>w</sup>		0,0166	0,6419	0,9496	0,59 a	0,54 b	0,55	0,55	0,56	0,57	0,58
N HI <sup>w</sup>		0,0155	0,6283	0,9345	0,78 b	0,79 a	0,78	0,78	0,78	0,79	0,80
S HI <sup>w</sup>		0,8643	0,1283	0,9350	0,68	0,68	0,69	0,68	0,71	0,66	0,66
SSA <sup>w</sup>	%	0,0270	0,9649	0,3570	3,78 a	- 0,64 b	-	0,13	0,69	2,54	1,99

O, Kontrolle; E, elementarer S; B, Bittersalz; G, Gips; K, Kieserit; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für  $P < 0,05$  (Tukey, sechs Wiederholungen); TKG, Tausendkorngewicht; TM, Trockenmasse; HI, Harvest Index; SSA, Scheinbare S Ausnutzung des gedüngten S; w, gewichtete Mittel; a, jüngstes voll entfaltetes Blatt zu BBCH 60 – 65

Tabelle 4: Ergebnisse der statistischen Analyse der Erbse und Schmalblättrigen Lupine (arithmetische / gewichtete Mittelwerte)

Parameter	Einheit	P – Wert Varianzanalyse			Mittelwert Pflanzenart		Mittelwert Düngung				
		Pflanzenart	Düngung	Pflanzenart × Düngung	Erbse	Schmalblättrige Lupine	O	E	B	G	K
Kornertrag	Mg ha <sup>-1</sup>	0,0382	0,9723	0,9999	2,18 a	1,88 b	2,08	2,08	2,05	1,96	1,98
Strohertrag	Mg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,9899	0,9896	1,81 b	2,60 a	2,29	2,17	2,17	2,24	2,16
Sprossertrag	Mg ha <sup>-1</sup>	0,0566	0,9875	0,9962	3,99	4,48	4,36	4,25	4,22	4,20	4,14
TKG	g	< 0,0001	0,9940	0,9631	215 a	177 b	197	194	196	197	195
Hülsen	Hülsen m <sup>-2</sup>	< 0,0001	0,8961	0,9387	278 b	509 a	412	390	400	365	401
N Konzentration Blatt <sup>a</sup>	%	0,4336	0,7916	0,9830	4,69	4,82	4,60	4,70	4,76	4,85	4,86
N Konzentration Korn	%	< 0,0001	0,8269	0,9034	3,31 b	5,20 a	4,22	4,21	4,27	4,32	4,26
N Konzentration Stroh	%	< 0,0001	0,7338	0,9364	1,04 a	0,83 b	0,92	0,90	0,96	0,96	0,94
N Konzentration Spross	%	< 0,0001	0,9938	0,9990	2,28 b	2,74 a	2,48	2,49	2,55	2,52	2,51
N Akkumulation Korn <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	0,0002	0,9877	0,9998	72,07 b	97,81 a	87,61	87,37	87,56	84,63	84,40
N Akkumulation Stroh <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	0,0746	0,8482	0,9079	18,83	21,67	21,10	19,51	20,96	21,46	20,24
N Akkumulation Spross <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	0,0004	0,9479	0,9672	90,94	122,67	108,39	105,68	107,52	105,69	103,87
S Konzentration Blatt <sup>a</sup>	%	0,0005	0,2190	0,8814	0,28 a	0,25 b	0,26	0,26	0,26	0,28	0,28
S Konzentration Korn	%	< 0,0001	0,0188	0,8748	0,19 b	0,27 a	0,22 b	0,23 ab	0,23 ab	0,24 ab	0,24 a
S Konzentration Stroh	%	< 0,0001	0,0284	0,3164	0,15 b	0,31 a	0,18	0,19	0,20	0,30	0,27
S Konzentration Spross	%	< 0,0001	0,0120	0,3327	0,17 b	0,28 a	0,20 b	0,21 ab	0,21 ab	0,27 a	0,25 ab
S Akkumulation Korn <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	0,0164	0,9919	0,9883	4,19 b	5,13 a	4,58	4,70	4,75	4,74	4,81
S Akkumulation Stroh <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,1402	0,9210	2,70 b	8,02 a	4,18	4,07	4,36	6,73	5,89
S Akkumulation Spross <sup>w</sup>	Kg ha <sup>-1</sup>	< 0,0001	0,3420	0,9481	6,91 b	12,66 a	8,73	8,73	9,08	11,17	10,49
N:S-Verhältnis Blatt <sup>wa</sup>		< 0,0001	0,5353	0,9521	16,62 b	19,98 a	17,78	18,36	18,46	17,60	17,35
N:S-Verhältnis Korn <sup>w</sup>		0,0065	0,0126	0,3001	17,20 b	19,06 a	19,13 a	18,60 ab	18,45 ab	17,84 b	17,53 b
N:S-Verhältnis Stroh <sup>w</sup>		< 0,0001	0,0006	0,0225	6,97 a	2,70 b	5,05 a	4,79 a	4,81 ab	3,19 b	3,44 b
N:S-Verhältnis Spross <sup>w</sup>		< 0,0001	< 0,0001	0,2776	13,15 a	9,69 b	12,42 a	12,11 a	11,84 ab	9,47 bc	9,91 c
TM HI <sup>w</sup>		< 0,0001	0,9617	0,9830	0,55 a	0,42 b	0,48	0,49	0,49	0,47	0,48
N HI <sup>w</sup>		0,0912	0,8556	0,9415	0,79	0,82	0,80	0,85	0,80	0,79	0,81
S HI <sup>w</sup>		< 0,0001	0,0023	0,5999	0,63 a	0,40 b	0,50 ab	0,53 a	0,49 ab	0,43 b	0,45 b
SSA <sup>w</sup>	%	0,5733	0,3909		2,61	4,49	-	- 0,55	5,34	4,41	3,60

O, Kontrolle; E, elementarer S; B, Bittersalz; G, Gips; K, Kieserit; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede für  $P < 0,05$  (Tukey, sieben Wiederholungen); TKG, Tausendkorngewicht; TM, Trockenmasse; HI, Harvest Index; SSA, Scheinbare S Ausnutzung des gedüngten S; w, gewichtete Mittel; a, jüngstes voll entfaltetes Blatt zu BBCH 60 – 65

#### 4.3 N-Akkumulation

Die N-Akkumulation in Korn, Stroh und Spross der Erbse war um durchschnittlich 34% signifikant höher als die der Ackerbohne (Tabelle 3). Die N-Akkumulation in Korn und Spross der Schmalblättrigen Lupine lag hingegen um 36% signifikant über den Werten der Erbse (Tabelle 4). In Bezug auf die S-Düngung zeigten sich keine Effekte auf die N-Akkumulation in Korn, Stroh und Spross der drei Körnerleguminosen (Tabelle 3 und 4).

#### 4.4 S-Konzentration

Die S-Konzentration in Blatt, Korn, Stroh und Spross wurde zwar nicht durch die Pflanzenart im Vergleich von Erbse und Ackerbohne beeinflusst (Tabelle 3), jedoch zwischen Erbse und Schmalblättriger Lupine (Tabelle 4). Besonders deutlich waren die Unterschiede bezogen auf die S-Konzentration in Korn, Stroh und Spross, die in der Schmalblättrigen Lupine 42%, 106% und 65% höher waren als in den jeweiligen Pflanzenteilen der Erbse (Tabelle 4). Die S-Konzentration aller drei Körnerleguminosen wurde besonders durch die S-Düngemittel Gips und Kieserit signifikant erhöht, wobei Werte von bis zu 70% Steigerung im Vergleich zur Kontrolle erreicht wurden (Tabelle 3).

#### 4.5 S-Akkumulation

Im Gegensatz zur S-Konzentration hatte die S-Düngung weder bei Erbse und Ackerbohne, noch bei Erbse und Schmalblättriger Lupine Einfluss auf die S-Akkumulation in Korn, Stroh und Spross. Hingegen beeinflusste die Pflanzenart

die S-Akkumulation der Körnerleguminosen sehr stark (Tabelle 3 und 4). Die Erbse akkumulierte im Stroh durchschnittlich 33% und damit signifikant mehr S als die Ackerbohne (Tabelle 3), wohingegen die Schmalblättrige Lupine im Stroh nahezu die dreifache Menge S des Erbsenstrohs akkumulierte (Tabelle 4).

### 4.6 N:S-Verhältnis

Bezogen auf den Vergleich von Erbse und Ackerbohne wurden keine signifikanten Effekte der Pflanzenart auf die N:S-Verhältnisse in Blatt, Korn, Stroh und Spross nachgewiesen (Tabelle 3). Beim Vergleich von Erbse und Schmalblättriger Lupine hingegen wurden signifikante Unterschiede zwischen den Pflanzenarten ermittelt (Tabelle 4). Diesbezüglich waren die N:S-Verhältnisse in Blatt und Korn der Erbse signifikant enger als die der Schmalblättrigen Lupine, wohingegen im Stroh und Spross die Schmalblättrige Lupine deutlich engere Werte als die Erbse aufwies (Tabelle 4). Die S-Düngung wirkte signifikant auf die N:S-Verhältnisse in den Pflanzenteilen der drei Körnerleguminosen, wobei insbesondere die Düngemittel Gips und Kieserit zu deutlich engeren N:S-Verhältnissen im Vergleich zur Kontrolle führten (Tabelle 3 und 4).

### 4.7 Harvest-Index und Scheinbare S-Ausnutzung

Signifikante Unterschiede in Bezug auf die Harvest-Indices bestanden zwar auch zwischen Erbse und Ackerbohne (Tabelle 3), besonders groß waren diese jedoch zwischen Erbse und Schmalblättriger Lupine, wobei der Trockenmasse- und Schwefel-Harvest-Index der Erbse deutlich über denen der Schmalblättrigen Lupine lag (Tabelle 4). Der Einfluss der S-Düngung auf die Harvest-Indices der



Körnerleguminosen war begrenzt, lediglich beim Vergleich von Erbse und Schmalblättriger Lupine führte die Düngung von Gips und Kieserit zu signifikant geringeren S-Harvest-Indices verglichen mit der Kontrolle (Tabelle 4).

Die scheinbare Ausnutzung des gedüngten S (SSA) war durch die Erbse signifikant höher als durch die Ackerbohne (Tabelle 3). Die Unterschiede zwischen den S-Düngemitteln waren zwar nicht signifikant, dennoch ist in Tabelle 3 und 4 erkennbar, dass die scheinbare Ausnutzung des gedüngten elementaren Schwefels am geringsten und die der übrigen drei  $\text{SO}_4^{2-}$ -haltigen Düngemittel höher war.

#### 4.8 Regressionsanalyse

Die linearen Regressionsanalysen der S-Akkumulation im Spross in Abhängigkeit vom Kornertrag wurden für die Umwelten berechnet, die analog zur jeweiligen Körnerleguminose in den Artikeln I (Ackerbohne), II (Schmalblättrige Lupine) und III (Erbse) ausgewertet wurden. Die Analysen wurden ausschließlich mit den Werten der Kontrolle der jeweiligen Versuche durchgeführt.

Die Interpretation der Daten zur Regressionsanalyse erfolgte im Fall der Ackerbohne für den Kornertragsbereich zwischen 1,23 und 5,39  $\text{Mg ha}^{-1}$ , für die Schmalblättrige Lupine von 1,19 bis 2,58  $\text{Mg ha}^{-1}$  und für die Erbse von 0,89 bis 4,13  $\text{Mg ha}^{-1}$  Kornertrag.

Zwischen der S-Akkumulation im Spross der Ackerbohne und deren Kornertrag bestand eine sehr enge signifikante Beziehung, wobei die Ackerbohne pro  $\text{Mg}$  Kornertrag ca. 2,39  $\text{kg S}$  im Spross akkumulierte (Abbildung 2). Dieser enge Zusammenhang wurde auch für die Erbse nachgewiesen, die ca. 2,84  $\text{kg S}$  pro  $\text{Mg}$

Kornertrag akkumulierte (Abbildung 2). Für die Schmalblättrige Lupine konnte hingegen kein Zusammenhang zwischen S-Akkumulation im Spross und dem Kornertrag festgestellt werden (Abbildung 2).

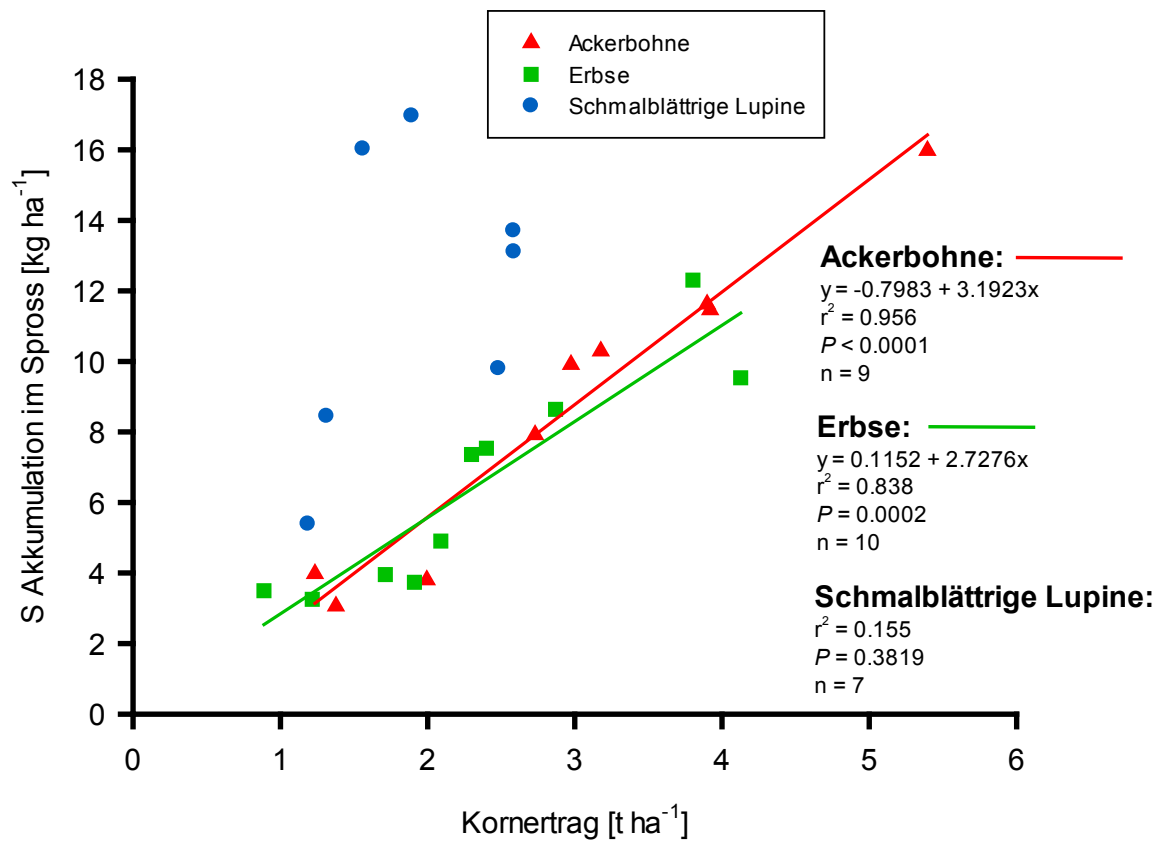


Abbildung 2: S-Akkumulation im Spross der Körnerleguminosen in Abhängigkeit von deren Kornertrag

## 5 Diskussion

Die in der Einleitung geschilderten Fragestellungen der Punkte a bis c werden in den Artikeln I bis IV ausführlich beantwortet und diskutiert. Das Augenmerk der nachfolgenden Diskussion liegt demnach auf dem unter Punkt d erwähnten Vergleich der drei Körnerleguminosen Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse bezüglich deren S-Bedarfs, S-Akkumulation und S-Düngung unter Feldbedingungen.

Unter den gegebenen Standortbedingungen generierte die Erbse mit 2,18 bis 2,20 Mg ha<sup>-1</sup> den höchsten Kornertrag der drei geprüften Körnerleguminosen und lag damit deutlich über dem Ertrag der Ackerbohne (Tabelle 3) und etwas über dem der Schmalblättrigen Lupine (Tabelle 4). Auffällig an den in Tabelle 3 und 4 dargestellten Mittelwerten ist, dass diese sich teilweise erheblich von Werten in den Artikeln I bis IV unterscheiden. Besonders deutlich wird dieses am Beispiel des Kornertrags der Ackerbohne, der mit nur 1,59 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabelle 3) deutlich unter dem Wert von 3,00 Mg ha<sup>-1</sup> liegt, der in Artikel I als durchschnittlicher Ertrag angegeben wurde. Der Grund dafür ist, dass besonders ertragsstarke Umwelten, wie AU12 und DR13 für die statistische Auswertung in Tabelle 3 nicht berücksichtigt werden konnten, da für diese Umwelten keine Daten zur Erbse verfügbar waren, was zu erheblichen Abweichungen bezüglich Ertrag, N- und S-Akkumulation, N:S-Verhältnis und Scheinbarer Schwefel Ausnutzung (SSA) führte. Aus diesem Grund werden im Verlauf des weiteren Textes Werte aus den Originalarbeiten verwendet (Artikel I bis IV). In Bezug auf die Schmalblättrige Lupine bestanden diese Abweichungen nicht, da alle in Artikel II erfassten Umwelten auch in die Analyse der Daten in Tabelle 4 eingeflossen sind, wohingegen die Erbse je nach berücksichtigten Umwelten, Unterschiede zwischen

Tabelle 3 und 4 zeigte. Die geprüften S-Düngemittel führten bei keiner der drei Körnerleguminosen zu Ertragssteigerungen (Tabelle 3 und 4). Cazzato et al. (2012) und Habtemichael et al. (2007) wiesen zwar Ertragszuwächse der Ackerbohne nach  $K_2SO_4$ -Düngung nach, jedoch waren sowohl die geprüften Sorten und Düngemittel als auch die Standorte von denen der vorliegenden Arbeit verschieden und auch der Effekt des Begleitelements K auf den Ertrag konnte nicht ausgeschlossen werden, worauf in Artikel I genauer Bezug genommen wurde. Die S-Konzentration im Korn der Ackerbohne in der Kontrolle von Habtemichael et al. (2007) lag um 0,04 bis 0,01 Prozentpunkte unterhalb des Wertes der Kontrolle in den eigenen Versuchen (Tabelle 3). Dieses deutet auf eine geringere S-Versorgung der Pflanzen aus der Umwelt hin und kann die ertragswirksamen Düngeeffekte des von Habtemichael et al. (2007) eingesetzten  $K_2SO_4$  mit erklären.

Der S-Bedarf der drei Körnerleguminosen wurde unter den geprüften Umweltbedingungen offensichtlich durch S-Einträge aus der Atmosphäre (Aghajanzadeh et al., 2016; Cliquet & Lemauviel-Lavenant, 2019; Varin et al., 2013) sowie den S-Vorrat des Bodens (Scherer, 2009) ausreichend gedeckt, da die Applikation S-haltiger Düngemittel keinen Effekt auf den Ertrag der Körnerleguminosen zeigte. Die aktuelle atmosphärische S-Deposition gab Gauger (2013) für Deutschland mit circa 5 bis 8  $kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$  an. Die S-Versorgung der Pflanzen wurde zudem durch den  $S_{min}$ -Vorrat des Bodens an den untersuchten Standorten von 5 bis 29  $kg\ ha^{-1}$  (Tabelle 1) und die S-Mineralisation während der Vegetationsperiode, die Scherer (2009) mit circa 7 bis 49  $kg\ ha^{-1}$  angab, sichergestellt. Die Summe der soeben beschriebenen geschätzten S-Einträge von 17 bis 86  $kg\ ha^{-1}$  ist demnach höher als die S-Akkumulation im Spross der Ackerbohne (5 bis 15  $kg\ ha^{-1}$ ; Artikel I), Erbse (2 bis 13  $kg\ ha^{-1}$ ; Artikel III) und

Schmalblättrigen Lupine (5 bis 15 kg ha<sup>-1</sup>; Artikel II), die in der vorliegenden Untersuchung ermittelt wurde. Die S-Deposition und S-Mineralisation während der Vegetationsperiode wurde zwar in der vorliegenden Untersuchung nicht erfasst, dennoch dienen die Literaturangaben als Hinweis für das Ausbleiben von Ertragseffekten nach Ausbringung der S-Düngemittel.

Die S-Akkumulation im Spross der Ackerbohne, Schmalblättrigen Lupine und Erbse lagen auf ähnlichem Niveau, auch die S-Konzentration in den Sprossbestandteilen der Körnerleguminosen war nahezu identisch (Tabelle 3). Die Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse akkumulierten offenbar weniger S als die Sojabohne (*Glycine max* L. Merr.), die in indischen Feldversuchen von Devi et al. (2012) bis zu 28 kg S ha<sup>-1</sup> im Spross akkumulierte.

Der Großteil des von der Schmalblättrigen Lupine akkumulierten S wurde im Stroh der Pflanze gebunden, was an einem S-Harvest-Index von nur 0,40 deutlich wurde und damit signifikant geringer als der S-Harvest-Index der Erbse (0,63; Artikel III), der Ackerbohne (0,65; Artikel I) und auch der Sojabohne (0,62; Sexton et al., 1998) war. Die starken Schwankungen des S-Harvest-Indexes der Schmalblättrigen Lupine von 0,31 (DU13) bis 0,60 (GZ14) werden als Begründung für den geringen Regressionskoeffizienten ( $r^2$ ) von nur 0,155 zwischen S-Akkumulation im Spross und dem Kornertrag der Pflanze, der auf einen geringen Zusammenhang zwischen beiden Parametern hinweist, angesehen (Abbildung 2). Eine bessere Wasserversorgung von Mai bis Juni förderte vermutlich das vegetative Wachstum der Schmalblättrigen Lupine am Standort DU13, was zu einem geringeren Trockenmasse-Harvest-Index und S-Harvest-Index führte, als in GZ14 mit geringerer Niederschlagsmenge und höherem S-Harvest-Index (Tabelle 2). De Costa et al. (1997) verwiesen auf sinkende Harvest-Indices aufgrund verstärkten

vegetativen Wachstums der Ackerbohne durch steigende Niederschlagsmengen. Auf diesen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Harvest-Indices wurde in Bezug auf die Ackerbohne ebenfalls in Artikel I hingewiesen. Die Erbse hingegen reagierte auf hohe Niederschlagsmengen in Mai und Juni (PU13) mit einem hohen S-Harvest-Index von 0,83 in der Kontrolle und auf weniger Niederschlag (BI12) mit einem geringeren S-Harvest-Index von 0,56. Wassermangel während der Kornfüllphase der Erbse führte auch in Versuchen von Jamieson et al. (1984) zu sinkenden Harvest-Indices aufgrund geringerer Kornerträge, die durch eine verkürzte Kornfüllphase verursacht wurden. Dieser Zusammenhang bestand in den eigenen Versuchen neben dem Trockenmasse-Harvest-Index auch zwischen den N- und S-Harvest-Indices der Erbse und der Niederschlagsmenge.

Es konnte für die Schmalblättrige Lupine unter den geprüften Umweltbedingungen keine Beziehung zwischen S-Akkumulation im Spross und deren Kornertrag festgestellt werden (Abbildung 2). Die S-Akkumulation im Spross der Erbse und der Ackerbohne wies hingegen eine sehr enge Beziehung zum Kornertrag der Pflanzen auf, was an Abbildung 2 sehr deutlich wird. Die enge Beziehung zwischen den beiden Parametern ist für die Erbse mit  $r^2=0,838$  und für die Ackerbohne mit  $r^2=0,956$  dadurch zu begründen, dass im Gegensatz zur Schmalblättrigen Lupine die Schwankungen zwischen den Standorten in Bezug auf den S-Harvest-Index geringer waren. Die geringsten Unterschiede zwischen den S-Harvest-Indices der einzelnen Standorte und den höchsten Regressionskoeffizienten wies die Ackerbohne auf (Abbildung 2). Richtwerte für die S-Akkumulation der Pflanzen in den geprüften Umwelten können demnach nur für die Ackerbohne mit ca. 2,39 kg S im Spross pro Mg Kornertrag und für die Erbse mit etwa 2,84 kg S im Spross pro Mg Kornertrag angegeben werden, nicht aber für die Schmalblättrige Lupine

aufgrund fehlenden Einflusses des Kornertrags auf die S-Akkumulation im Spross dieser Körnerleguminose (Abbildung 2). Der im Vergleich zu Erbse und Ackerbohne geringe S-Harvest-Index der Schmalblättrigen Lupine liegt im geringen Trockenmasse-Harvest-Index von im Mittel nur 0,42 (Artikel II) begründet, wonach anders als bei Erbse (0,53; Artikel III) und Ackerbohne (0,48; Artikel I) der Strohertrag deutlich über dem Kornertrag lag (Tabelle 3 und 4). Die Schmalblättrige Lupine war im Überschuss mit Schwefel versorgt (Artikel II), konnte diesen allerdings weniger effektiv als Stickstoff aus den Blättern in das Korn umlagern. Der N-Harvest-Index aller drei geprüften Körnerleguminosen lag mit 0,78 bis 0,82 auf ähnlich hohem Niveau (Tabelle 3 und 4), was auf eine intensive Translokation von Stickstoff aus den vegetativen Pflanzenteilen in das Korn hinweist. Auch Sexton et al. (1998) schloss aus den höheren N-Harvest-Index (0,75) der Sojabohne im Vergleich zum geringeren S-Harvest-Index (0,62), dass Schwefel während der Kornfüllung weniger effektiv aus Blättern und Stängeln in das Korn umgelagert wurde als Stickstoff. Dieser Unterschied in der Nährstoffumlagerung zur Kornfüllphase scheint bei der Schmalblättrigen Lupine aufgrund des großen Unterschieds zwischen N-Harvest-Index und S-Harvest-Index zudem stärker ausgeprägt zu sein als bei Erbse, Ackerbohne und Sojabohne. Offensichtlich war die Schmalblättrige Lupine adäquat mit S versorgt, nahm das  $\text{SO}_4^{2-}$  in die Sprossmasse auf und lagerte dieses allerdings weniger stark in das Korn um als Ackerbohne und Erbse. Die hohen N-Harvest-Indices aller drei geprüften Körnerleguminosen weisen auf eine intensive Umlagerung des Stickstoffs aus Stroh und Blättern in das Korn zur Kornfüllphase hin. Trotz eines vergleichsweise niedrigen Trockenmasse-Harvest-Indexes der Schmalblättrigen Lupine war der N-Harvest-Index vergleichsweise hoch, was mit der knapp zwei

Prozentpunkte höheren N-Konzentration im Korn bei gleichzeitig geringerer N-Konzentration im Stroh, verglichen mit Ackerbohne und Erbse, begründet werden kann (Tabelle 3 und 4). Versuche an Gerste zeigten, dass Schwefel verglichen mit N relativ immobil in der Pflanze war und weniger im Blatt remobilisiert und in das Korn umgelagert wurde als Stickstoff (Eriksen et al., 2001). Eine effektivere Remobilisierung von vegetativem Stickstoff während der Kornfüllung verglichen mit einer geringen S-Remobilisierung wiesen auch Imsande & Schmidt (1998) in der Sojabohne nach und kann anhand der eigenen Ergebnisse ebenfalls für Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse bestätigt werden.

In Bezug auf die N-Konzentration und N-Akkumulation bestanden Unterschiede zwischen den Pflanzenarten. Die Schmalblättrige Lupine wies eine deutlich höhere N-Konzentration im Korn auf als die Erbse, was auch in höheren N-Akkumulationen mündete (Tabelle 4), wohingegen die Erbse eine im Mittel höhere N-Konzentration und N-Akkumulation als die Ackerbohne zeigte (Tabelle 3). Eine zusätzliche S-Düngung hatte hingegen keinen Effekt auf die Körnerleguminosen, weder auf die N-Konzentration in den Pflanzen noch auf deren N-Akkumulation (Tabelle 3 und 4). Durch S-Düngung konnte die N-Akkumulation nicht gesteigert werden, was auf ausreichend S in den Böden und aus der Atmosphäre für eine angemessene symbiotische  $N_2$ -Fixierung auf dem angegebenen Ertragsniveau und unter den geprüften Umweltbedingungen schließen lässt (Scherer & Lange, 1996).

Die N:S-Verhältnisse in der Pflanze unterschieden sich zum Teil erheblich zwischen den drei Körnerleguminosenarten, wobei am stärksten das sehr enge N:S-Verhältnis im Stroh der Schmalblättrigen Lupine von nur 3 auffiel, was doppelt, beziehungsweise dreimal so eng wie in der Erbse und Ackerbohne ausgefallen



war und auf eine  $\text{SO}_4^{2-}$ -Akkumulation im Stroh der Schmalblättrigen Lupine verweist (Tabelle 3 und 4). Demnach scheint der S-Bedarf der Schmalblättrigen Lupine für Stängel-, Blatt- und Wurzelwachstum erhöht zu sein, die Umlagerung in das Korn während der Kornfüllung allerdings begrenzt, was die erhöhte S-Konzentration im Stroh erklärt. Die Anpassung der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Aufnahme der Pflanze an deren physiologischen Bedarf ist unumstritten (Marschner, 1995; Hawkesford, 2004; Hawkesford et al., 2012) und hängt offensichtlich auch von der Pflanzenart ab, was Unterschiede in den S-Konzentrationen, N:S-Verhältnissen und S-Harvest-Indices zwischen Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse erklären würde. Insbesondere durch die Düngemittel Gips und Kieserit wurden die N:S-Verhältnisse in der Pflanze signifikant verengt, was mit der Erhöhung der S-Konzentrationen in den jeweiligen Pflanzengewebe nach Ausbringung dieser Düngemittel zu begründen ist (Tabelle 3 und 4).

Der gedüngte S wurde von den Körnerleguminosen nur zu einem sehr geringen Teil aufgenommen, wobei die S-Aufnahmeeffizienz der Schmalblättrigen Lupine bei 1,2 % (Artikel II), die der Erbse bei 4,6 % (Artikel III) und die der Ackerbohne bei 4,4 % (Artikel I) lagen. Der gedüngte S wurde in ausreichenden Mengen (40 kg S ha<sup>-1</sup> bzw. 8,4 kg S ha<sup>-1</sup>), d.h. im Überschuss, und bis auf elementaren S auch in gut pflanzenverfügbarer sulfatischer Form gedüngt, was demnach nicht als Grund für die geringe Aufnahme des gedüngten S herangezogen werden kann. Vielmehr wurde offenbar der S-Bedarf der Körnerleguminosen durch das boden- und luftbürtige S-Angebot gedeckt, was zu der geringen Aufnahmeeffizienz des gedüngten Schwefels (Tabelle 3 und 4) führte. Zwischen den geprüften Düngemitteln bestand zudem kein signifikanter Unterschied bezogen auf deren scheinbare Ausnutzung. Dennoch waren die Aufnahmeeffizienz des gedüngten

Bittersalzes, Gipses und Kieserits etwas höher, als die des elementaren S, da der S dieses Düngemittel zunächst durch Bodenorganismen (zahlreiche *Thiobacillus*-Arten wie beispielsweise *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus thioparus* und *Thiobacillus ferrooxidans*; Germida & Janzen, 1993) oxidiert werden muss, bevor er von der Pflanze aufgenommen werden kann, was kurzfristig messbare Effekte auf das Pflanzenwachstum unwahrscheinlich machte (Jolivet, 1993).

## 6 Schlussfolgerungen

- a) Die Düngung der Ackerbohne, Schmalblättrigen Lupine und Erbse mit verschiedenen S-haltigen Düngemitteln führte unter den geprüften Feldbedingungen weder zu Ertragssteigerungen noch zu einer gesteigerten N-Akkumulation in der Pflanze. Der S-Bedarf der Ackerbohne, Schmalblättrigen Lupine und Erbse wurde offenkundig zum einen über den pflanzenverfügbaren S-Vorrat und die Mineralisation von organisch gebundenem Schwefel im Boden und zum anderen über atmosphärische S-Deposition gedeckt. Trotzdem zeigten sich Gips und Kieserit als geeignete Düngemittel, um die S-Konzentration und S-Akkumulation der geprüften Körnerleguminosen zu erhöhen sowie das N:S-Verhältnis in den Pflanzen zu verengen, was zum Teil auch nach Düngung von Bittersalz zu beobachten war. Elementarer Schwefel eignete sich hingegen nicht die S-Konzentration der Pflanzen im Jahr der Ausbringung zu steigern oder deren N:S-Verhältnis signifikant zu verengen. Die drei Körnerleguminosen passten offensichtlich ihre S-Akkumulation im Spross an ihren physiologischen Bedarf an, was als Begründung für die geringe Düngewirkung von Kieserit, Gips und Bittersalz dienen kann (Artikel I, II und III).
- b) Der Einfluss des Gemengeanbaus mit Gerste auf den S-Haushalt der Erbse war sehr gering. Die S-Konzentration im Spross der Erbse in Reinsaat war nur leicht und nicht signifikant um 6,3 Prozentpunkte höher als im Spross der Erbse aus Gemengesaat mit der Gerste. Die Erbse in Reinsaat nahm signifikant mehr Schwefel gemittelt über alle getesteten Düngemittel auf, als das Gemenge aus Erbse und Gerste. Der S-Harvest-Index wurde zwar nicht

durch die Anbauform, aber durch die S-Düngung beeinflusst, wonach Gips und Kieserit den S-Harvest-Index verringerten und elementarer Schwefel zu einer Vergrößerung des S-Harvest-Index führte. Auch der S-Bedarf der Erbse wurde in den geprüften Umwelten offensichtlich gänzlich durch die pflanzenverfügbaren S-Mengen im Boden und aus der Atmosphäre gedeckt, wie dieses auch für Ackerbohne und Schmalblättrige Lupine ermittelt wurde. Erbse und Gerste akkumulierten ähnlich große Mengen S im Spross pro Einheit Kornertrag (2,7 bzw. 3,1 kg S Mg<sup>-1</sup>), wobei die S-Akkumulation eng an den Sprossertrag gebunden war und deshalb offenbar den Bedürfnissen der Pflanze für ein optimales Wachstum eng angepasst war (Artikel III).

- c) Durch einen hohen Grad an Ressourcenkomplementarität wurden relative totale Kornerträge (RYT) von 1,35 und um 35 beziehungsweise 29 Prozentpunkte gesteigerte N- und S-Akkumulationen im Spross des Gemenges im Vergleich zum Mittel der Erbse und Gerste in Reinsaat erzielt. Die ermittelte Komplementarität der S-Ressourcen (RYT S Spross = 1,29) war offenkundig eine Folge gesteigerten vegetativen Wachstums im Gemenge aufgrund gesteigerter Komplementarität der N-Ressourcen im Erbse-Gerste-Gemenge. Um maximale Kornerträge und N- und S-Akkumulationen in einem substitutiv zusammengesetztem Gemenge aus Erbse und Gerste zu erzielen, wurde ein optimales Saatverhältnis von 42% bis 88% an keimfähigen Erbsen und 12% bis 58% keimfähigen Gerstensamen der Reinsaatstärke ermittelt. Die N-Verfügbarkeit im Boden der jeweiligen Umwelten nahm entgegen den Erwartungen nicht Einfluss auf das optimale Saatverhältnis im Gemenge (Artikel IV).

d) Unter den drei Körnerleguminosen Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse erreichte die Ackerbohne im Mittel den höchsten Kornertrag an den geprüften Standorten. Die S-Konzentration und S-Akkumulation im Spross von Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse lagen auf ähnlich hohem Niveau. Im Gegensatz zu Ackerbohne mit einem S-Harvest-Index von im Mittel 0,65 und Erbse von 0,63, die S vorwiegend im Korn akkumulierten, sammelte die Schmalblättrige Lupine einen Großteil des aufgenommenen S im Stroh (S-Harvest-Index im Mittel = 0,40) an. Zwischen der S-Akkumulation im Spross und dem Kornertrag bestanden bei Ackerbohne und Erbse sehr enge Beziehungen, wohingegen dieses für die Schmalblättrige Lupine nicht nachgewiesen werden konnte. Besonders das N:S-Verhältnis im Stroh der Schmalblättrigen Lupine unterschied sich mit einem Wert von nur 3 deutlich von den übrigen beiden Körnerleguminosen, wobei das N:S-Verhältnis im Stroh der Ackerbohne dreimal und im Stroh der Erbse doppelt so weit wie das der Schmalblättrigen Lupine ausfiel. Eine Verengung der N:S-Verhältnisse und eine Erhöhung der S-Konzentrationen im Spross der Leguminosen wurde vor allem nach Düngung von Gips und Kieserit ermittelt. Trotzdem war die scheinbare S-Ausnutzung der Düngemittel sehr gering, ohne dass sich die Düngemittel diesbezüglich signifikant voneinander unterschieden.

## 7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss verschiedener Schwefel (S)-Düngemittel, der Leguminosenart und des Gemengebaus von Erbse (*Pisum sativum* L.) und Gerste (*Hordeum vulgare* L.) auf S- und Stickstoff (N)-Akkumulation, S- und N-Konzentration und N:S-Verhältnis in Korn, Stroh und Spross sowie den Ertrag der Körnerleguminosen Ackerbohne (*Vicia faba* L.), Schmalblättrige Lupine (*Lupinus angustifolius* L.) und Erbse zu erheben. Zudem wurde evaluiert, in welchem Maß der gedüngte S von den Pflanzen aufgenommen wurde und wie sich diese S-Düngemittel auf die Erbse in Reinsaat im Vergleich zum Anbau von Erbse im Gemenge mit Gerste auswirkte. Ferner wurde untersucht, ob der Gemengeanbau von Erbse und Gerste neben dem Ertrag auch die S- und N-Akkumulation des Gemenges im Vergleich zur Reinsaat steigerte, ob diese Zuwächse abhängig von der jeweiligen Umwelt waren und ob diese im Zusammenhang mit dem Saatverhältnis der Komponenten Erbse und Gerste im Gemenge standen. Der Vergleich der drei Körnerleguminosen Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse in Bezug auf deren S-Bedarf, die S-Akkumulation und Ertragsbildung bildete den Kern der Dissertationsschrift, wohingegen die Wirkungen auf die Körnerleguminosen gesondert für die Arten in den Artikeln I bis IV dargestellt wurden.

In den Jahren 2012 bis 2014 wurden umfangreiche Feldversuche über mehrere, bundesweit verteilte Standorte durchgeführt. Dabei fanden die Versuche auf langjährig ökologisch bewirtschafteten Ackerflächen statt. Nachlassende atmosphärische S-Depositionen waren zusätzlicher Anlass für das Forschungsvorhaben. Es wurde die Wirkung von vier verschiedenen S-haltigen Düngemitteln, beziehungsweise Düngeverfahren, auf die Körnerleguminosen

getestet. Geprüft wurden Kieserit ( $\text{MgSO}_4$ ), Gips ( $\text{CaSO}_4$ ), elementarer Schwefel und das Blattdüngemittel Bittersalz ( $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ).

Die Düngung von Ackerbohne, Schmalblättriger Lupine und Erbse mit verschiedenen S-haltigen Düngemitteln führte unter den geprüften Feldbedingungen weder zu Ertragssteigerungen noch zu einer gesteigerten N-Akkumulation in den Pflanzen. Der S-Bedarf der drei Körnerleguminosen wurde offenbar zum einen über den S-Vorrat und die Mineralisation organischer S-Verbindungen im Boden und zum anderen über atmosphärische S-Deposition gedeckt. Trotzdem zeigten sich Gips und Kieserit als geeignete Düngemittel, um die S-Konzentration und S-Akkumulation der Körnerleguminosen im Spross zu erhöhen sowie das N:S-Verhältnis zu verengen, was zum Teil auch nach Düngung von Bittersalz zu beobachten war. Elementarer S eignete sich im Jahr der Ausbringung hingegen nicht dazu, die S-Konzentration in den untersuchten Körnerleguminosen zu steigern oder deren N:S-Verhältnis signifikant zu verengen.

Der Einfluss des Gemengeanbaus mit Gerste auf den S-Haushalt der Erbse war sehr gering. Die S-Konzentration im Spross der Erbse in Reinsaat fiel nur leicht und nicht signifikant um 6,3 Prozentpunkte höher aus als im Spross der Erbse aus Gemengesaat. Die Erbse in Reinsaat nahm signifikant mehr S gemittelt über alle getesteten Düngemittel auf als das Gemenge aus Erbse und Gerste. Der S-Harvest-Index wurde zwar nicht durch die Anbauform, jedoch durch die S-Düngung beeinflusst, wonach Gips und Kieserit den S-Harvest-Index verringerten und elementarer S zu einer Vergrößerung des S-Harvest-Indexes führte. Erbse und Gerste akkumulierten ähnlich hohe Mengen S im Spross pro Einheit Kornertrag, wobei die S-Akkumulation eng an den Sprossertrag gebunden war. Durch einen hohen Grad an Ressourcenkomplementarität wurden relative Kornerträge (RYT)

im Gemenge von 1,35 und um 35 beziehungsweise 29 Prozentpunkte gesteigerte N- und S-Akkumulationen im Spross des Gemenges, im Vergleich zum Mittel der Erbse und Gerste in Reinsaat, erzielt. Die gestiegene Komplementarität der S-Ressourcen ( $R_{YT\ S\ Spross} = 1,29$ ) war offenkundig eine Folge gesteigerten vegetativen Wachstums aufgrund gestiegener Komplementarität der N-Ressourcen des Erbse-Gerste-Gemenges. Um maximale Kornerträge und N- und S-Akkumulationen in einem substitutiv zusammengesetzten Gemenge aus Erbse und Gerste zu erzielen, wurde ein optimales Saatverhältnis von 42% bis 88% keimfähiger Erbsen zu 12% bis 58% keimfähigen Gerstensamen der jeweiligen Reinsaatstärke ermittelt. Die N-Verfügbarkeit in den Böden der jeweiligen Umwelten nahm hingegen keinen Einfluss auf das optimale Saatverhältnis im Gemenge.

Unter den drei Körnerleguminosen Ackerbohne, Schmalblättrige Lupine und Erbse erreichte die Ackerbohne im Mittel unter den geprüften Standortbedingungen den höchsten Kornertrag. Die S-Konzentration und S-Akkumulation im Spross der Ackerbohne, Schmalblättrigen Lupine und Erbse lagen auf ähnlich hohem Niveau. Im Gegensatz zu Ackerbohne (S-Harvest-Index im Mittel = 0,65) und Erbse (S-Harvest-Index = 0,63), die S vorwiegend im Korn akkumulierten, sammelte die Schmalblättrige Lupine einen Großteil des aufgenommenen S im Stroh (S-Harvest-Index im Mittel = 0,40) an. Zwischen der S-Akkumulation im Spross und dem Kornertrag bestanden bei Ackerbohne und Erbse sehr enge Beziehungen, wohingegen dieses für die Schmalblättrige Lupine nicht nachgewiesen werden konnte. Insbesondere das N:S-Verhältnis im Stroh der Schmalblättrigen Lupine unterschied sich mit einem Wert von nur 3 deutlich von den übrigen beiden Körnerleguminosen, wobei das N:S-Verhältnis im Stroh der Ackerbohne dreimal



und im Stroh der Erbse doppelt so weit wie das der Schmalblättrigen Lupine ausfiel.

## 8 Literaturverzeichnis

- Aghajanzadeha, T., Hawkesford, M.J., De Kok, L.J., 2016. Atmospheric H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub> as sulfur sources for *Brassica juncea* and *Brassica rapa*: Regulation of sulfur uptake and assimilation. *Environ. Exp. Bot.* 124, 1-10.
- Bailey, L.D., 1986. The Sulphur status of eastern canadian prairie soils: Sulphur response and requirements of alfalfa (*Medicago sativa* L.), rape (*Brassica napas* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.). *Can. J. Soil Sci.* 66, 209-216.
- Barak, P., Goldman, I.L., 1997. Antagonistic Relationship between Selenate and Sulfate Uptake in Onion (*Allium cepa*): Implications for the Production of Organosulfur and Organoselenium Compounds in Plants. *J. Agric. Food Chem.* 45, 1290-1294.
- Becker, K., Fischinger, S.A., Leithold, G., 2011. Einfluss von Schwefel- und Stickstoffdüngung auf den Kornertrag von Winterraps in ökologischem Anbau, in: Leithold, G., Becker, K., Brock, C., Fischinger, S., Spiegel, A.K., Spory, K., Wilbois, K.P., Williges, U. (Eds.), Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Justus-Liebig-Universität Gießen, Band 1. Verlag Dr. Köster, Berlin, pp. 310-311.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007. Map: Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands. Hannover, Germany. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/humusstatus-der-boeden>, eingesehen am 24. April 2018.

- Cazzato, E., Tufarelli, V., Ceci, E., Stellacci, A.M., Laudadio, V., 2012. Quality, yield and nitrogen fixation of faba bean seeds as affected by sulphur fertilization. *Acta Agr. Scand. B-S P. 62*, 732-738.
- Ceccotti, S.P., Morris, R.J., Messick, D.L., 1998. A global overview of the sulphur situation: industry's background, market trends, and commercial aspects of sulphur fertilizers, in: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Niederlande, pp. 175-202.
- Clinquet, J.-B., Lemauiel-Lavenant, S., 2019. Grassland species are more efficient in acquisition of S from the atmosphere when pedospheric S availability decreases. *Plant Soil* 435, 69-80.
- Daemmgen, U., Walker, K., Gruenhagen, L., Jaeger, H.J., 1998. The atmospheric sulphur cycle, in: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Niederlande, pp. 75-114.
- De Costa, W.A.J.M., Dennett, M.D., Ratnaweera, U., Nyalemegbe, K., 1997. Effects of different water regimes on field-grown determinate and indeterminate faba bean (*Vicia faba* L.). II. Yield, yield components and harvest index. *Field Crop Res.* 52, 169-178.
- De Kok, L.J., Westerman, S., Stuiver, C.E.E., Weidner, W., Stulen, I., Grill, D., 2002. Interaction between Atmospheric Hydrogen Sulfide Deposition and Pedospheric Sulfate Nutrition in *Brassica oleracea* L. *Phyton* 42, 35-44.
- Devi, K.N., Singh, L.N.K., Singh, M.S., Singh, S.B., Singh, K.K., 2012. Influence of Sulphur and Boron Fertilization on Yield, Quality, Nutrient Uptake and Economics of Soybean (*Glycine max*) under Upland Conditions. *J. Agr. Sci.* 4, 1-10.

Dietz, K.-J., 1989. Recovery of spinach leaves from sulfate and phosphate deficiency. *J. Plant Physiol.* 134, 551-557.

DWD – Deutscher Wetterdienst, 2017. Long-term mean annual Temperature and Precipitation from 1981 to 2010. [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/langj\\_mittelwerte.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/langj_mittelwerte.html) (eingesehen am 25. November 2017).

Elsheikh, E.A.E., Elzidany, A.A., 1997. Effect of Rhizobium inoculation, organic and chemical fertilizers on proximate composition, in vitro protein digestibility, tannin and sulphur content of faba beans. *Food Chem.* 59, 41-45.

Eppendorfer, W.H., 1971. Effects of S, N and P on Amino Acid Composition of Field Beans (*Vicia faba*) and Responses of the Biological Value of the Seed Protein to S-Amino Content. *J. Sci. Fd Agric.* 22, 501-505.

Eriksen, J., Murphy, M.D., Schnug, E., 1998. The soil sulphur cycle, in: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Niederlande, pp. 39-74.

Eriksen, J., Nielsen, M., Mortensen, J.V., Schjørring, J.K., 2001. Redistribution of sulphur during generative growth of barley plants with different sulphur and nitrogen status. *Plant Soil* 230, 239–246.

Eriksen, J., Olesen, J.E., Askegaard, M., 2002. Sulphate leaching and sulphur balances of an organic cereal crop rotation on three Danish soils. *Eur. J. Agron.* 17, 1-9.

Fageria, N.K., Baligar, V.C., Jones, C.A., 1997. Growth and mineral nutrition of field crops, second edition. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Gauger, T., 2013. Erstellung einer methodenkonsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland, Teil 2 Abschlussbericht Umweltbundesamt. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4444.html>. (eingesehen am 23. November 2016).
- Germida, J.J., Janzen, H.H., 1993. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fert. Res.* 35, 101-114.
- Gilbert, S., Clarkson, D.T., Cambridge, M., Lambers, H., Hawkesford, M.J., 1997. Sulfate-deprivation has an early effect on the content of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and photosynthesis in young leaves of wheat. *Plant Physiol.* 115, 1231-1239.
- Grant, C.A., Bailey, L.D., 1993. Fertility management in canola production. *Can. J. Plant Sci.* 73, 651-670.
- Habtemichial, K.H., Singh, B.R., Aune, J.B., 2007. Wheat response to N<sub>2</sub> fixed by faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by sulfur fertilization and rhizobial inoculation in semi-arid Northern Ethiopia. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 412-418.
- Hamlin, R.L., 2007. Molybdenum. In: Barker, A.V., Pilbeam, D.J. (Eds.), *Handbook of Plant Nutrition*, Taylor and Francis Group, USA, pp. 375-394.
- Hawkesford, M.J. (Ed.), 2004. Sulphur Metabolism in Plants – Integrating Complexity. Special Issue of the *Journal of Experimental Botany* 55, No 404.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I.S., White, P., 2012. Functions of Macronutrients, in: Marschner, P. (Ed.), *Mineral*

- Nutrition of Higher Plants, Third Edition. Elsevier Ltd, United Kingdom, pp. 151-158.
- Imssande, J., Schmidt, J.M., 1998. Effect of N source during soybean pod filling on nitrogen and sulfur assimilation and remobilization. *Plant Soil* 202, 41-47.
- Jamieson, P.D., Wilson, D.R., Hanson, R., 1984. Analysis of responses of field peas to irrigation and sowing date, 2. Models of growth and water use. *Proceedings Agronomy Society of N.Z.* 14, 75-81.
- Jones Jr, J.B., 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton.
- Jolivet, P., 1993. Elemental sulfur in agriculture. in: de Kok, L.J., Stulen, I., Rennenberg, H., Brunold, C., Raiser, W.E. (Eds.), *Sulfur Nutrition and Assimilation in Higher Plants*. SPB Academic Publishing, The Hague, pp. 193-206.
- Knauff, U., Schulz, M., Scherer, H.W., 2003. Arylsulfatase activity in the rhizosphere and roots of different crop species. *Europ. J. Agronomy* 19, 215-223.
- Lancashire, P.D., Bleiholder, H., van den Boom, T., Langelüdekke, P., Stauss, R., Weber, E., Witzemberger, A., 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 119, 561–601.
- Lange, A., 1998. Influence of S supply on the biological nitrogen fixation of legumes. Dissertation, University of Bonn, Germany.
- Leustek, T., Saito, K., 1999. Sulfate Transport and Assimilation in Plants. *Plant Physiol.* 120, 637-643.

- Lunde, C., Zygadlo, A., Simonsen, H.T., Nielsen, P.L., Blennow, A., Haldrup, A., 2008. Sulfur starvation in rice: the effect on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and oxidative stress protective pathways. *Physiologia Plantarum* 134, 508-521.
- Makkar, H.P.S., Becker, K., Abel, H., Pawelzik, E., 1997. Nutrient Contents, Ruman Protein Degradability and Antinutritional Factors in Some Colour- and White-Flowering Cultivars of *Vicia faba* Beans. *J. Sci. Food Agric.* 75, 511-520.
- Malhi, S.S., Gan, Y., Raney, J.P., 2007. Yield, Seed Quality, and Sulfur Uptake of Brassica Oilseed Crops in Response to Sulfur Fertilization. *Agron. J.* 99, 570-577.
- Marschner, P., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, second Edition. Academic Press, Elsevier, London.
- Munzert, M. (Ed.), 2015. *Landwirtschaftliche und gartenbauliche Versuche mit SAS*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- Mylona, S., 1996. Sulphur dioxide emissions in Europe 1880 - 1991 and their effect on sulphur concentrations and depositions. *Tellus* 48, 662-689.
- Pacyna, S., 2005. Bedeutung des Schwefels für den Ferredoxin- und Leghämoglobin-Gehalt sowie die Energieversorgung in N<sub>2</sub>-fixierenden Leguminosen. Ph.D. Thesis, University of Bonn.
- Pacyna, S., Schulz, M., Scherer, H.W., 2006. Influence of sulphur supply on glucose and ATP concentrations of inoculated broad beans (*Vicia faba minor* L.). *Biol. Fertil. Soils* 42, 324-329.

- Pasricha, N.S., Nayyar, V.K., Randhawa, N.S., Sinha, M.K., 1977. Influence of sulphur fertilization on suppression of molybdenum uptake by berseem (*Trifolium alexandrinum*) and oats (*Avena sativa*) grown on a molybdenum-toxic soil. *Plant Soil* 46, 245-250.
- Pedersen, C.A., Knudsen, L., Schnug, E., 1998. Sulphur Fertilisation, in: Schnug, E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Niederlande, pp. 115-134.
- Reiter, K., Schmidtke, K., Rauber, R., 2002. The influence of long-term tillage systems on symbiotic N<sub>2</sub> fixation of pea (*Pisum sativum* L.) and red clover (*Trifolium pratense* L.). *Plant Soil* 238, 41-55.
- Rennenberger, H., Schmitz, K., Bergmann, L., 1979. Long-Distance Transport of Sulfur in *Nicotiana tabacum*. *Planta* 147, 57-62.
- Robson, A.D., Osborne, L.D., Snowball, K., Simmons, W.J., 1995. Assessing sulfur status in lupins and wheat. *Aust. J. Exp. Agr.* 35, 79-86.
- Scherer, H.W., Lange, A., 1996. N<sub>2</sub> fixation and growth of legumes as affected by sulphur fertilization. *Biol. Fertil. Soils* 23, 449-453.
- Scherer, H.W., 2001. Sulfur in crop production - invited paper. *Eur. J. Agron.* 14, 81-111.
- Scherer, H.W., Pacyna, S., Manthey, N., Schulz, M., 2006. Sulphur supply of pea (*Pisum sativum* L.) influences symbiotic N<sub>2</sub> fixation. *Plant Soil Environ.* 52, 72-77.
- Scherer, H.W., Pacyna, S., Spoth, K.R., Schulz, M., 2008. Low levels of ferredoxin, ATP and leghemoglobin contribute to limited N<sub>2</sub> fixation of peas (*Pisum*



- sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions. Biol. Fertil. Soils 44, 909-916.
- Scherer, H.W., 2009. Sulfur in Soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 172, 326-335.
- Schilling, G., Kerschberger, M., Kummer, K.F., Peschke, H., 2000. Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Schnug, E., Haneklaus, S., 1998. Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug, E. (Ed.), Sulphur in Agroecosystems. Kluwer Academic Press, Niederlande, pp. 1-38.
- Schüller, H., 1969. Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats im Boden. Z. Pflanzenern. Bodenkd. 123, 48-63.
- Schumacher, H., Paulsen, H.M., Gau, A.E., Link, W., Jürgens, H.U., Sass, O., Dieterich, R., 2011. Seed protein amino acid composition of important local grain legumes *Lupinus angustifolius* L., *Lupinus luteus* L., *Pisum sativum* L. and *Vicia faba* L. Plant Breeding 130, 156-164.
- Sexton, P.J., Paek, N.C., Shibles, R., 1998. Soybean Sulfur and Nitrogen Balance under Varying Levels of Available Sulfur. Crop Sci. 38, 975-982.
- Seehuber, C., 2014. Nährstoffversorgung zur Optimierung der N<sub>2</sub>-Fixierung und Produktivität von Körnerleguminosen. Dissertation, University of Bonn, Germany.
- Stout, P.R., Meager, W.R., Pearson, G.A., Johnson, C.M., 1951. Molybdenum nutrition of crop plants. I. The influence of phosphate and sulfate on the

absorption of molybdenum from soils and solution cultures. *Plant Soil* 3, 51-87.

UBA (Umweltbundesamt), 2016. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4444.html>. (eingesehen am 23. November 2016).

Varin, A., Lemauviel-Lavenant, S., Cliquet, J.B., 2013. Is white clover able to switch to atmospheric sulphur sources when sulphate availability decreases? *J. Exp. Bot.* 64, 2511-2521.

Vong, P.-C., Piutti, S., Benizri, E., Slezack-Deschaumes, S., Robin, C., Guckert, A., 2007. Water-soluble carbon in roots of rape and barley: impacts on labile soil organic carbon, arylsulphatase activity and sulphur mineralization. *Plant Soil* 294, 19-29.

White, C.L., Robson, A.D., Fisher, H.M., 1981. Variation in Nitrogen, Sulfur, Selenium, Cobalt, Manganese, Copper and Zinc Contents of Grain from Wheat and Two Lupin Species grown in a Range of Mediterranean Environments. *Aust. J. Agr. Res.* 32, 47-59.

Willenbrink, J., 1967. Über Beziehungen zwischen Proteinumsatz und Schwefelversorgung der Chloroplasten. *Z. Pflanzenphysiol.* 56, 427-438.

Zhao, F.J., Wood, A.P., Mc Grath, S.P., 1999. Effects of sulphur nutrition on growth and nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 212, 209-219.

## Artikel I

Pöttsch, F., Lux, G., Schmidtke, K., 2018.

Sulphur demand, uptake and fertilization of *Vicia faba* L. under field conditions

Field Crops Research 228, pp 76-83

DOI: 10.1016/j.fcr.2018.08.013

## Artikel II

Pöttsch, F., Lux, G., Lewandowska, S., Schmidtke, K., 2019.

Does *Lupinus angustifolius* L. need sulfur fertilization under central European conditions?

Journal of Plant Nutrition and Soil Science 182, pp 31-39

DOI: 10.1002/jpln.201800361

## Artikel III

Pöttsch, F., Lux, G., Lewandowska, S., Schmidtke, K., 2019.

Sulphur demand, accumulation and fertilization of *Pisum sativum* L. in pure and mixed stands with *Hordeum vulgare* L. under field conditions

Field Crops Research 239, pp 47-55

DOI: 10.1016/j.fcr.2019.05.005

## Artikel IV

Pöttsch, F., Lux, G., Lewandowska, S., Bellingrath-Kimura, S.D., Schmidtke, K., 2019.

Optimizing relative seed frequency of intercropped pea and spring barley

European Journal of Agronomy 105, pp 32-40

DOI: [10.1016/j.eja.2019.02.009](https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.009)

## **Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe. Ich versichere außerdem, dass ich die vorliegende Arbeit erstmalig und nur an der Humboldt-Universität zu Berlin eingereicht habe.

Dresden, 30.06.2019

Fredo Frank Pöttsch

## **Danksagung**

Diese Dissertation basiert auf Daten, die im Rahmen eines Verbundvorhabens „Wirkung verschiedener Verfahren der Schwefeldüngung auf Ertragsleistung und Vorfruchtwert von Körnerleguminosen im Ökologischen Landbau“ der Landwirtschaftskammer Niedersachsen und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden erhoben und vom Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (Förderkennzeichen: 2811OE110 und 2811OE111) finanziert wurden. Herrn Armin Meyercordt von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen gebührt dabei besonderer Dank für die Initiierung und Betreuung des Projektes an der Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

Ich danke dem Europäischen Sozialfond für die finanzielle Unterstützung im Rahmen eines Promotionsstipendiums (Förderkennzeichen: 100284318) und für die damit verbundene Möglichkeit zur wissenschaftlichen Qualifikation und persönlichen Weiterentwicklung.

Mein Dank gebührt der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden und der Humboldt-Universität zu Berlin für die Durchführung meines kooperativen Promotionsverfahrens. Herrn Prof. Dr. Knut Schmidtke von der HTW Dresden möchte ich besonders für die Betreuung meiner Promotion, für den intensiven fachlichen Austausch, für das Geben von Denkanstößen und für seine großzügige und zwischenmenschlich herausragende Art, für das konstruktive Kritisieren und Motivieren während der vergangenen drei Jahre von Herzen danken. Frau Prof. Dr. Sonoko Dorothea Bellingrath-Kimura von der HU Berlin möchte ich für die Betreuung meiner Promotion und für den fachlichen Austausch ebenfalls danken.



Ich danke meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe Ökologischer Landbau an der HTW Dresden für ihre motivierenden Worte und Hilfe während der Promotion und möchte mich ganz besonders bei Herrn Dr. Guido Lux bedanken, ohne dessen Einsatz bei der Datenerhebung im Feld und im Labor diese Arbeit nie zustande gekommen wäre.

Abschließend bedanke ich mich vielmals bei meinen Freunden und meiner Familie, besonders bei meinen Eltern und Geschwistern, bei meiner lieben Frau Sandra und meiner Tochter Vida für ihren Zuspruch und für Ihre beruhigenden und motivierenden Worte besonders im Vorfeld der Disputation.