



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Pflanzenproduktion

Prof. Dr. sc. agr. Bernhard Seggewiß

Dipl.-Ing. agr. Bernd Schulze

Bachelorarbeit

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2010-0602-1

„Stoffwechselphysiologie und Umsatzleistung von Rhizobien“

Nancy Krings

November 2010

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Formelverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1. Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	3
1.2 Vorgehensweise.....	3
2. Rhizobien.....	4
2.1 Infektion und Knöllchenbildung	6
2.2 Kollchentypen.....	7
2.3 Genaktivitäten	9
2.4 Nitrogenase	10
2.5 Besonderheiten und Forschung	11
3. Umsatzleistung	14
3.1. Futterleguminosen.....	15
3.2 Körnerleguminosen	23
3.3 Zwischenfrüchte	31
4. Berechnung der Stickstofffixierungsleistung	35
5. Stickstoffflächenbilanzierung	38
6. Schlussfolgerung	39
7. Zusammenfassung	41
8. Summery	42
Quellenverzeichnis	43
Literaturverzeichnis	43
Internetquellen.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: graphische Darstellung des Stickstoffverbrauches;.....	1
Abbildung 2: Reinnährstoff-Preise von N-Düngermittel;.....	2
Abbildung 3: Nicht determiniertes Knöllchen;.....	8
Abbildung 4: determiniertes Knöllchen;.....	8
Abbildung 5: Nitrogenase;.....	10
Abbildung 6 Erbsen- (rechts) und Luzerneknöllchen (links) im Querschnitt, in verschiedenen Stadien der Seneszenz;.....	12
Abbildung 7:Übersicht über die biologische Stickstoff-Fixierung und die einzelnen Forschungsansätze des FIXNET-Programms;.....	13
Abbildung 8: Beziehung zwischen den N_{min} -Werten und der relativen N-Bindung bei Körnerleguminosen;.....	15
Abbildung 9: Korrelation zwischen dem gesamten Stickstoffertrag und dem gesamt TM Ertrag im Schnittgut im Feldversuch;.....	22
Abbildung 10: Durchschnittliche Erträge und standortbedingte Ertragsschwankungen von Körnerleguminosen 1995 -1997;.....	28
Abbildung 11: Mittlerer Verlauf der N_{min} -Werte unter den Zwischenfrüchten und den Nachfrüchten 0-60 cm Bodentiefe, oben: Mais, unten: Kartoffel;.....	33
Abbildung 12: Einfluss auf die Erträge und Qualität der Nachfrüchte im Vergleich zu ohne Zwischenfruchtanbau (=100%), oben Mais, Mittelwert von 3 Jahren; unten Kartoffeln, Mittelwert von 2 Jahren;.....	34
Abbildung 13: Vergleich von Methoden zur Bestimmung der N_2 -Fixierung Einfache Differenzmethode vs. Einfache ^{15}N -Anreicherungstechnik.....	37
Abbildung 14: Vergleich von Methoden zur Bestimmung der N_2 -Fixierung: Einfache Differenzmethode vs. Einf. Natural- ^{15}N -abundance-Methode.....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Taxonomie der Rhizobien;	4
Tabelle 2: Knöllchenbakterien-Rassen gängiger Leguminosen;.....	5
Tabelle 3: Stickstofffixierungsleistung von Luzerne (<i>Medicago sativa</i> L.) in Reinsaat und im Gemenge mit Gräsern nach verschiedenen;	17
Tabelle 4 Stickstofffixierungsleistung von Rotklee (<i>Trifolium partense</i> L.) in Reinsaat und im Gemenge mit Gräsern, nach verschiedenen Autoren;.....	18
Tabelle 5 Stickstofffixierungsleistung von Persischem Klee (<i>Trifolium resupinatum</i> L.) in Reinsaat und im Gemenge mit Gräsern, nach verschiedenen Autoren;.....	19
Tabelle 6: Luft-Stickstoff- Menge in der Pflanze, Standort Reinshof	20
Tabelle 7: Luft- Stickstoff-Menge der Pflanze am Standort Oederquart;	21
Tabelle 8: Ackerbohnen, Futtererbsen und Süßlupinenanbau in Deutschland.....	23
Tabelle 9: Mehrerträge verschiedener Getreidearten als 1. Nachfrüchte nach Körnerleguminosen, Winterraps und Kartoffeln im Vergleich zu Getreide als Vorfrucht bei N- Düngung nach SBA (dt/ha)	25
Tabelle 10: Einsparung von Düngerstickstoff beim Anbau von Getreide als 1. Nachfrucht nach Körnerleguminosen, Winterraps und Kartoffel im Vergleich zu Getreide als Vorfrucht (kg N/ha).....	26
Tabelle 11 Vorfruchtwert von Körnerleguminosen beim Anbau von Winterweizen als 1. Nachfrucht und Wintergerste bzw. Sommergerste als 2. Nachfrucht sowie N-Düngung nach SBA;.....	27

Tabelle 12: Mehrjährige Durchschnittserträge des 1. Nachbaus Winterweizen (1996- 1998);.....	29
Tabelle 13: Mehrjährige Durchschnittserträge des 2. Nachbaus Winterroggen (1996- 1998) LfL.....	30
Tabelle 14: Stickstoff-Bilanzierung nach Kurz- und erweiterter Fassung auf Schlagebene;	39

Formelverzeichnis

Formel 1: Summenformel Stickstofffixierung.....	11
Formel 2: Berechnung der Stickstofffixierung mittels Differenzmethode;	35
Formel 3: Berechnung der Stickstofffixierung mittels ¹⁵ N- Anreicherungsrechnung.....	36

Abkürzungsverzeichnis

dt	Dezitonne
ha	Hektar
HNJ	Hauptnutzungsjahre
N	Stickstoff
Ndfa	Proportion of Nitrogen derived from the atmosphere (Anteil Stickstoff aus der Luft)
Nfix	Gesamtpflanzliche Luftstickstoffmenge
N _{Leg.}	Stickstoff in den Leguminosen
N-min	im Boden mineralisierter Stickstoff
N _{Ref.}	Stickstoff in der Referenzpflanze
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen- Konzentration

1. Einleitung

Stickstoff ist für alle Pflanzen und Tiere lebensnotwendig, denn es ist Bestandteil von Enzymen Proteinen und Nucleinsäuren. In der Landwirtschaft ist es einer der wichtigsten Nährstoffe, da es der limitierende Faktor für den Ertrag und die Qualität ist. Durch die wachsende Weltbevölkerung und den Drang nach immer größeren Erträgen und besseren Qualitäten steigt auch der Bedarf an mineralischen Stickstoff. Im Jahr 2007/2008 wurden ca. 98,4 Mill. Tonnen Stickstoff in der Landwirtschaft verbraucht. (vgl. Zöschg et al 2008, S. 18) Zusätzlich rechnet Zöschg et al bis 2011/2012 mit einer jährlichen Wachstumsrate von 1,4%. (vgl. Zöschg et al 2008, S. 18) In der folgenden Abbildung 1 vom Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen wird der Düngemittelverbrauch von 1961 bis 2003 dargestellt.

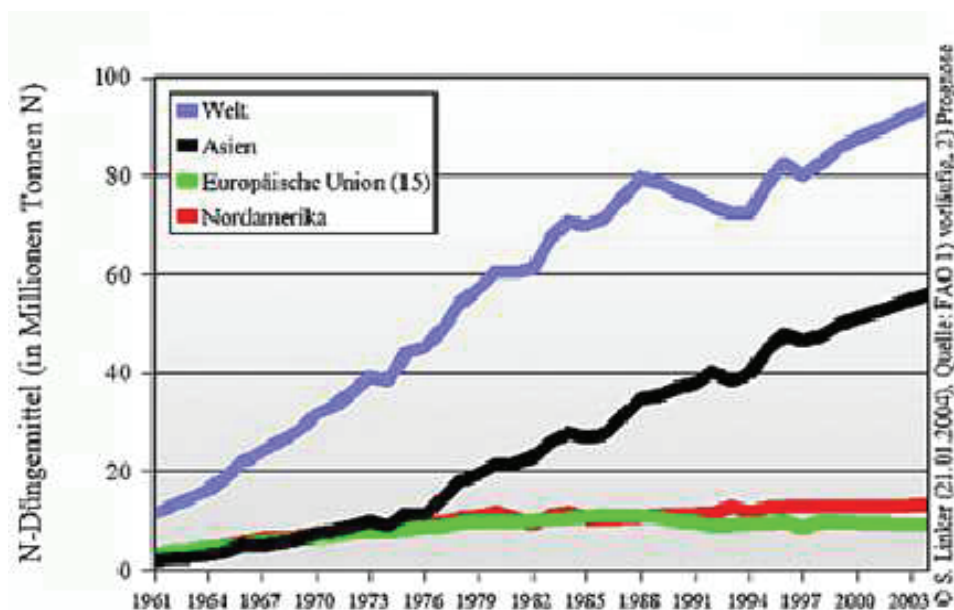


Abbildung 1 graphische Darstellung des Stickstoffverbrauches;

Quelle: Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, 2004

In den Industrieländern wird der benötigte Stickstoff für die Pflanzen hauptsächlich über organischen Dünger oder das Haber- Bosch- Verfahren gewonnen. Um Stickstoffhaltigen Dünger über dieses Verfahren herzustellen

wird ein Druck von 250 bis 350 bar und eine Temperatur von 550°C benötigt. Die dafür erforderliche Energie wird aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen bezogen, welches ein endlicher Stoff ist und auch hier, der Verbrauch, jährlich ansteigt. Die Folge sind kontinuierliche Preissteigerungen der stickstoffhaltigen Düngemittel. In der Abbildung 2 vom Landesamt Landwirtschaft Hessen ist die Preisentwicklung von Stickstoffdüngemittel dargestellt.

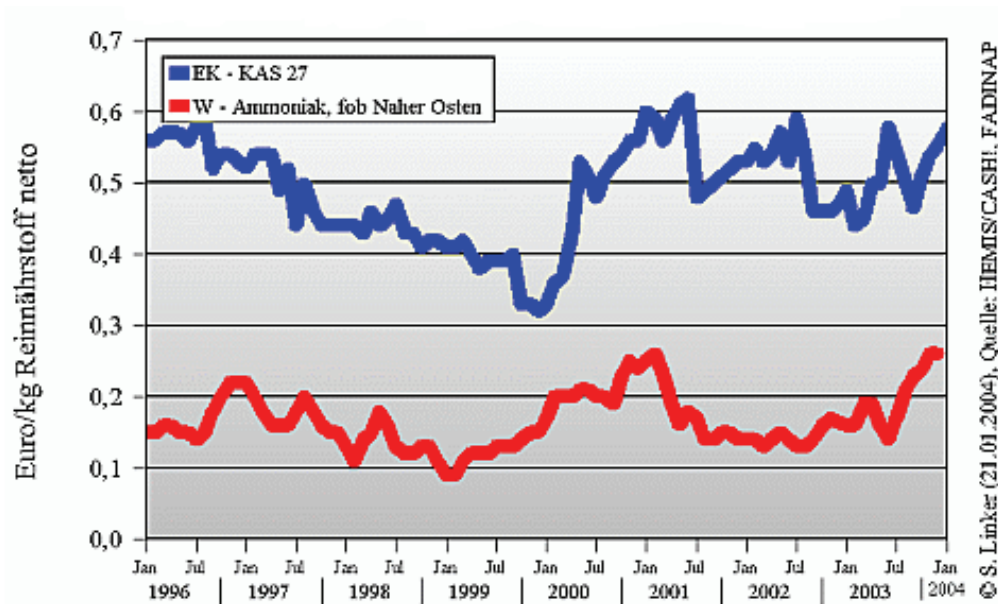


Abbildung 2: Reinnährstoff-Preise von N-Düngemittel;

Quelle: Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, 2004

Im Ökologischen Landbau, sowie in ärmeren Ländern ist der Einsatz dieser Düngemittel nicht möglich. Um trotzdem den Ertrag der Hauptfrucht zu sichern, wird die Symbiose von Rhizobien mit den Leguminosen zur Stickstofffixierung genutzt, wobei die Leguminosen bereits einen festen Standpunkt in der Fruchtfolge haben. Sie gehören in die Abteilung der Angiospermae (bedecktsamige Pflanzen) und in die Klasse der Dicotyledonae (zweikeimblättrige Pflanzen), sowie in die Familie der Leguminosae. Zu dieser Familie gehören ca. 650 Gattungen mit über 1800 Arten (vgl. Kahnt 2008 S. 45)

In der Fruchtfolge ist es wichtig die Kultur und die Folgekulturen optimal zu versorgen. Allerdings ist die Berechnung der Humus und Stickstoffbilanz schwieriger, da die symbiotische Stickstofffixierung mit einfließen muss. Der aufgenommene Luftstickstoffanteil ist dabei von mehreren Einflussgrößen abhängig. Besonders die Leguminosenart und die Bewirtschaftungsmaßnahmen spielen eine wichtige Rolle. Durch unterschiedliche Witterungs-, und Standortbedingungen können ebenfalls unterschiedlich symbiotische Leistungen der Leguminosen mit Rhizobien entstehen.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu beschreiben, wie die Symbiose zwischen den Rhizobien und den Leguminosen funktioniert, und wie viel Stickstoff durch die Symbiose umgesetzt werden kann. Zusätzlich soll beschrieben werden, was beachtet werden muss und welche Faktoren die Umsatzleistung der Rhizobien beeinflussen können. Dann können Rückschlüsse auf die Umsatzleistung getroffen, und ein optimales Stickstoffmanagement durchgeführt werden.

1.2 Vorgehensweise

In dieser Arbeit soll die Symbiose der Rhizobien mit den Leguminosen genauer beschrieben werden. Dabei stützt sich diese Arbeit auf Untersuchungen, die die Infektion, sowie den Vorgang der Stickstofffixierung genauer beschreiben. Bei der Umsatzleistung der Rhizobien gliedert sich diese Arbeit in die Untergruppen Futterleguminosen, Körnerleguminosen und Zwischenfrüchte. Zusätzlich fließen Ergebnisse von verschiedenen Versuchen an verschiedenen Standorten ein. Anschließend wird genauer dargestellt, wie die Stickstofffixierungsleistung der Rhizobien ermittelt werden kann und welche Möglichkeiten es gibt eine Stickstoffbilanz für einen Ackerschlag zu ermitteln.

2. Rhizobien

Die Rhizobien kommen aus der Familie der Rhizobiaceae und gehören in die Klasse der Alphaproteobacteria. Die Systematik der Rhizobien ist in der Tabelle 1 nochmal dargestellt.

Klassifikation:	Lebewesen
Domäne:	Bakterien
Abteilung:	Proteobacteria
Klasse:	Alphaproteobacteria
Ordnung:	Rhizobiales
Familie:	Rhizobien
Wissenschaftlicher Name:	Rhizobiaceae

Tabelle 1: Taxonomie der Rhizobien;

Quelle: Wikipedia 2010, <http://de.wikipedia.org/wiki/Kn%C3%B6llchenbakterien>

1866 wurde erstmals ein Zusammenhang zwischen den Knöllchen der Lupine und Bakterien von dem russischen Botaniker Michail Stepanowitsch Woronin beschrieben. Die Symbiose zwischen den Bakterien und den Leguminosen sowie die Fähigkeit atmosphärischen Stickstoff zu binden wurde 1886 von den Forschern Hermann Hellriegel und Hermann Wilfarth entdeckt. Die häufigste Symbiose tritt zwischen den Leguminosen und den Bodenbakterien der Gattung Rhizobium, Bradyrhizobium, Azorhizobium, Sinorhizobium und Photorhizobium auf. Insgesamt werden diese Bakterien unter dem Begriff Rhizobien zusammengefasst. Es sind gramnegative Bodenbakterien und können sich aktiv bewegen. (vgl. Taiz & Eduardo 2000, S. 330) Eine Besonderheit ist, dass die Rhizobien artenspezifisch sind, und nur mit bestimmten Leguminosen eine Symbiose eingehen, welches durch Signalmoleküle gesteuert wird. In der folgenden Tabelle 2 sind einige Vertreter der Leguminosen zusammen mit den dazugehörigen Rhizobienpartnern aufgelistet. (vgl. Kahnt 2008, S. 47)

1. Erbsengruppe	Pisum-Arten (Erbse) Vicia-Arten (Wicken, Ackerbohnen) Lens-Arten (Linse)
2. Kleegruppe	Trifolium-Arten (Rot-, Weiß-, Gelb-, Schweden-, Perser-, Alexandrinerklee)
3. Lupinengruppe	Lupinus-Arten (Gelbe, Weiße, Blaue Süß- oder Bitterlupinen)
4. Medicagogruppe	Medicago-Arten (Blaue, Gelbe, Bastard-Luzerne) Melilotus-Arten (Weißer, Gelber Steinklee)
5. Phaseolusgruppe	Phaseolus-Arten (Busch-, Stangenbohnen)
6. Sojagruppe	Sojasorten der verschiedenen Reifegruppen und Kornfarben
7. Lathyrusgruppe Platterbsen	Platterbsen
8. Onobrychisgruppe	Espарsette
9. Arachisgruppe	Erdnuss

Tabelle 2: Knöllchenbakterien-Rassen gängiger Leguminosen;

Quelle: Kahnt 2008, S 47

Die Rhizobien sind chemotaktisch, das bedeutet, dass sie in der Lage sind Signalstoffe und chemische Verbindungen, wie z.B. Flavonoide oder Aminosäuren, zu erkennen, und sich gezielt darauf zu bewegen können. Mit Hilfe von Flagellen können sie sich dann in die Richtung der Rhizosphäre der Leguminosen bewegen.

2.1 Infektion und Knöllchenbildung

Die Symbiose zwischen den Rhizobien und den Leguminosen führen zu morphologischen und physiologischen Veränderungen der Pflanze. Die Grundvoraussetzung ist ein Stickstoffmangel im Boden, wodurch die Pflanze Flavonoide produziert. Diese gehören zu der Gruppe der Phenole, wobei das Grundgerüst aus zwei aromatischen Ringen besteht, welche durch eine C₃-Brücke verbunden sind. Dieses Kohlenstoffgrundgerüst ist in der Lage viele Substituenten wie z.B. Hydroxylgruppen oder Zucker zu tragen. Die Flavonoide aktivieren die Nodulationstranskription. Die vom Rhizobium ausgehenden Signalmoleküle bewirken sichtbare Veränderungen der Pflanze. Die Spitzen der Wurzelhaare der Leguminosen fangen an sich einzukrümmen. Dabei schließen sie die Rhizobien ein, wobei diese Kontakt zur Zellwand der Wurzelhaare erhalten. Nebenbei beginnen die Zellen im umliegenden Rindengewebe sich zu teilen, so dass undifferenziertes Knöllchengewebe entsteht. Nach drei bis vier Tagen sind bereits Aufwölbungen der Wurzeloberfläche durch neue Zellen zu erkennen. Das Wurzelhaar presst die Rhizobien an die Zellwand, wobei die Pflanze mit Hilfe von hydrolytischen Enzymen des Bakteriums mit der lokalen Auflösung der Zellwand beginnt. Dadurch erhalten die Rhizobien einen direkten Zugang zur äußeren Oberfläche der pflanzlichen Plasmamembran. Wenn die Rhizobien in die Pflanze eindringen, werden sie von einem Infektionsschlauch umhüllt. Dies ist eine röhrenförmige Einstülpung der Plasmamembran, welche vorwiegend aus Pektinverbindungen und Fibrillen besteht. Nebenbei entdifferenzieren und teilen sich die Zellen des Rindengewebes, dadurch entsteht ein abgegrenzter veränderter Bereich, welches als Knöllchenprimordium bezeichnet wird. Die Rhizobien beginnen sich in dem Infektionsschlauch zu teilen, wodurch dieser sich verlängert und in die Richtung der Knöllchenprimordium wächst. Nun verzweigt er sich, so dass mehrere veränderte Bereiche in der Wurzel angesteuert werden können. Wenn der Schlauch diese speziellen Zellen erreicht hat, verschmelzen diese Zellen mit dem Infektionsschlauch und die Rhizobien werden aus ihm entlassen. Dabei werden die Rhizobien von einer Peribakteroidmembran der Wirtszelle umhüllt. Dort teilen sich die Bakterien weiter, und die

Membranhülle vergrößert sich. Nach kurzer Zeit ist die Zellteilung abgeschlossen. Sie differenzieren sich in stickstoffbindende endosymbiotische Bakterioide. Zusätzlich wird ein Gefäßsystem für den Nährstoffaustausch mit der Pflanze ausgebildet. Anschließend wird eine weitere Zellschicht erschaffen, um die Stickstofffixierung vor dem Sauerstoff aus dem inneren der Wurzel zu schützen. Als letztes werden die entdifferenzierten Zellen vollständig oder Teilweise mit Symbiosomen besiedelt, dies sind Zellorganellen aus Bakterioiden, die von einer Symbiosomenmembran umgeben sind, und ein Symbiosomenraum dazwischen liegt. Nach ca. 3 Wochen ist die Differenzierung der Knöllchen abgeschlossen. (vgl. Heldt 2003, S. 322-325)

2.2 Köllchentypen

Es gibt in der Natur zwei verschiedene Knöllchenarten, determinierte und nicht-determinierte Knöllchen.

Nicht determinierte Knöllchen haben ein längliches Wachstum mit einem endständigem Meristem. Dadurch gliedern sich die Knöllchen in Wachstumszonen, Stickstofffixierenden Zonen und Seneszenzonen. Dies tritt z.B. bei der Symbiose von Rhizobien mit den Gattungen *Vicia* (Wicken) und *Pisum* (Erbsen) auf. Sie transportieren den Stickstoff in Form von Amide, wie Asparagin und Glutamin, in die Pflanze. In diesen Knöllchen ist ein Knöllchenmeristem vorhanden, welches kontinuierlich neue Zellen bildet, die anschließend infiziert werden. (vgl. Nilles 2008, S. 17-18) Die folgende Abbildung 3 stellt ein nicht determiniertes Knöllchen zum einen in Form eines Fotos und zum anderen als chematische Darstellung mit den dazugehörigen Zonen dar.

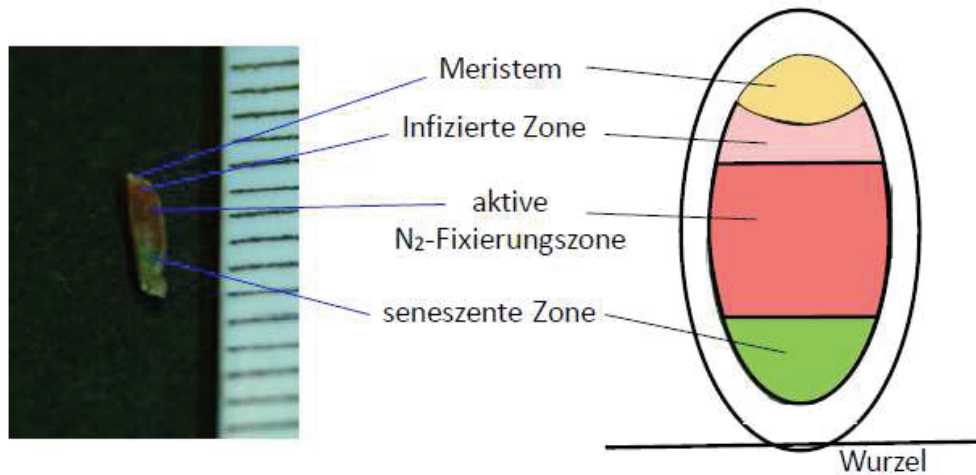


Abbildung 3: Nicht determiniertes Knöllchen;

Quelle: Fischinger 2009, S. 5

Determinierte Knöllchen besitzen einen sphärischen Habitus, wie z.B. bei der Gattung Phaseolus (Bohnen). Sie haben eine kugelförmige Form, wobei das Wachstum von der äußeren Wurzelrinde ausgeht. Sie transportieren den Stickstoff in Form von Ureide wie z.B. Allantoin und Allantoinsäure. (vgl. Nilles 2008, S. 18-19) Die folgende Abbildung 4 stellt ein determiniertes Knöllchen, in Form eines Fotos und im Grundaufbau dar.

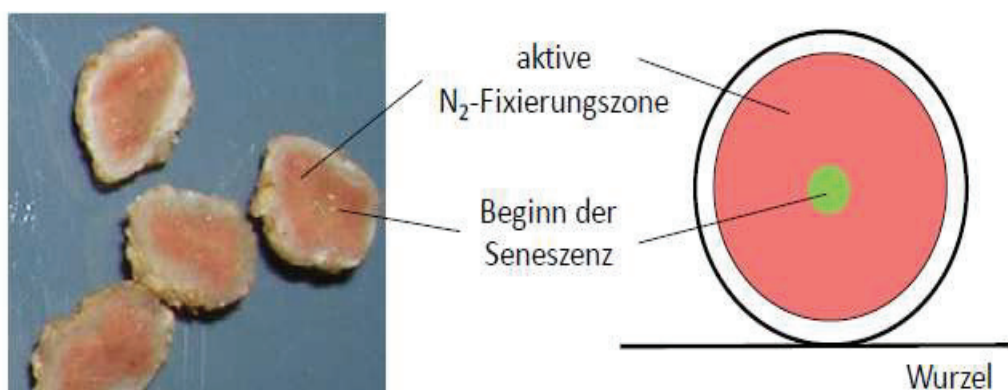


Abbildung 4: determiniertes Knöllchen;

Quelle: Fischinger 2009, S. 5

2.3 Genaktivitäten

Die Rhizobien besitzen eine hohe Anzahl von Genen. Diese sind, bei den im Boden lebenden Bakterien, inaktiv und werden erst durch den Kontakt mit der Wirtspflanze aktiviert. Dadurch entsteht eine kontrollierte Infektion einer bestimmten Rhizobienart mit einer speziellen Leguminose. Dabei bildet die Bakterie artspezifische Nodulationsfaktoren, die auch Nod-Faktoren genannt werden. Dies sind Lopooligosaccharide, welche als Signalmoleküle wirken. Sie haben eine hohe strukturelle Spezifität. Diese sind der Grund für die Spezialisierung der Rhizobien auf eine bestimmte Pflanze. Die Gene der Bakterien in 2 Gruppen geteilt.

Die erste Gruppe sind die Gene für die Induktion der Bildung der Knöllchen, diese werden auch nod-Gene genannt. Die zweite Gruppe dient zur Stickstofffixierung und werden nif-Gene genannt. Alle Rhizobien haben 4 allgemeine Gene und mehr als 20 wirtsspezifische Nod-Gene, wobei der Unterschied in der Modifikation der Fettsäureester und der Anlagerung der stammspezifischen Substituenten liegt. Die Wirtspflanze signalisiert durch Flavonoide und Isoflavonoide die Bereitschaft zur Knöllchenbildung. Diese pflanzlichen Elizitoren binden sich an das bakterielle Protein, welches durch ein exprimiertes nod-Gen codiert ist. Die von der Wirtspflanze synthetisierten Proteine zur Knöllchenbildung sind die Nodulingene. Dabei wird in frühe Noduline, und späte Noduline unterschieden. Die frühen Noduline sind für den Infektionsprozess und die Knöllchenbildung verantwortlich. Die späten Noduline werden erst nach der Knöllchenbildung synthetisiert, und wirken bei der Stickstofffixierung sowie bei den Folgereaktionen mit. (vgl. Heldt 2003, S. 325-327)

2.4 Nitrogenase

Nach der erfolgreichen Infektion der Pflanze durch die Rhizobien, beginnt die Stickstofffixierung in den Knöllchen. Dabei wird atmosphärischer molekularer Stickstoff in pflanzenverfügbares Ammonium umgewandelt. Dieser Prozess ist durch die stabile Dreifachbindung des Stickstoffes sehr energieaufwendig und benötigt Elektronen, diese werden von der Pflanze zur Verfügung gestellt. Die Stickstofffixierung geschieht durch ein Nitrogenaseenzymkomplex, welches den Stickstoff zu Ammoniak reduziert. In der Folgenden Abbildung 5 wird der chemische Vorgang der Nitrogenase dargestellt.

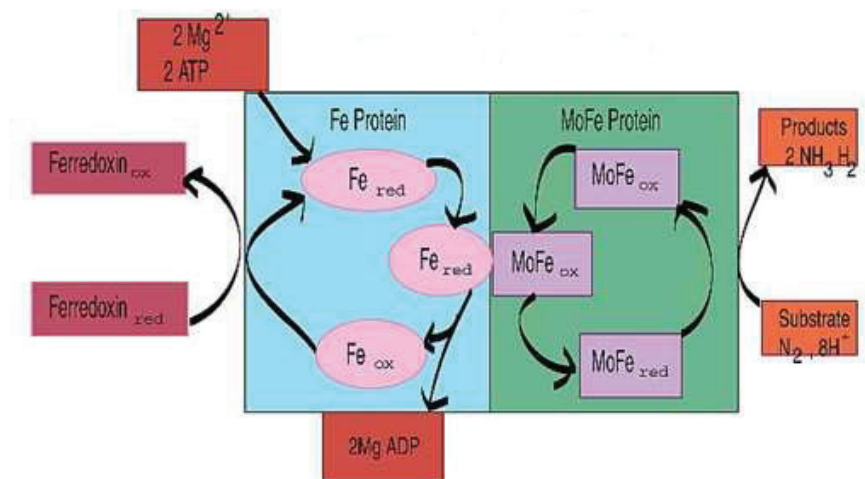
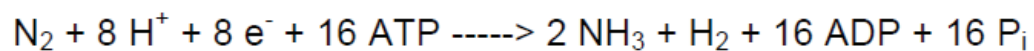


Abbildung 5: Nitrogenase;

Quelle: Taiz & Eduardo 2000, S. 336

Die Hauptkomponenten der Nitrogenase sind erstens die Dinitrogenase-Reduktase auch Eisenprotein genannt und zweitens die Dinitrogenase, welches Molybdän-Eisen-Protein bezeichnet. Das Eisenprotein ist ein Elektronenüberträger, wobei 2 identische Untereinheiten gemeinsam ein 4 Eisen-4 Schwefel Zentrum bilden. Es verfügt über Bindungsstellen für Mg-ATP und Mg-ADP. Die Dinitrogenase - Reduktase ist eng mit der Dinitrogenase assoziiert. Nach der Reduktion binden sich zwei Moleküle ATP an das Eisen-Protein. Dies führt zu einer Konformationsänderung des Proteins und lässt das Redoxpotential anheben. Nach der Elektronenübergabe an die Dinitrogenase werden die beiden am Eisen-

Protein gebundenen ATP Moleküle in ADP und Phosphat gespalten. Das ursprüngliche Redoxpotential ist wiederhergestellt. Durch diesen Vorgang werden beim Verbrauch von zwei Molekülen ATP jeweils ein Elektron vom NADH auf die Dinitrogenase übertragen. Das Molybdän-Eisen-Protein besteht aus zwei Alpha und zwei Beta Untereinheiten, welche weitestgehend in der Größe, Struktur und Faltungsmuster übereinstimmen. Dieses Protein kann durch die Aufnahme von 34 Elektronen den molekularen Stickstoff zu 2 mol Ammoniak reduzieren. Zusätzlich entsteht, wie in der folgenden Summengleichung ersichtlich, Wasserstoff. (vgl. Taiz & Eduardo 2000, S. 334-337)



Formel 1 Summenformel Stickstofffixierung

Quelle: Fischinger 2009, S. 5

2.5 Besonderheiten und Forschung

Die Umwandlung des molekularen Stickstoffes in Ammonium ist sehr Energieaufwendig, wobei 16 ATP benötigt werden. Gleichzeitig entsteht bei diesem Prozess molekularer Wasserstoff. Dieser benötigt bei der Entstehung ebenfalls einen Teil der benötigten Elektronen.

Eine weitere Besonderheit ist, die Sauerstoffempfindlich der Nitrogenase. Aus diesem Grund kann die Stickstofffixierung nur unter sehr niedrigen Sauerstoffverhältnissen ablaufen. Die Knöllchen besitzen mehrere Möglichkeiten den Sauerstoff zu reduzieren. Die äußere Schicht dient als Diffusionshindernis für eintretende Luft. Der mit dem Stickstoff eindiffundierende Sauerstoff wird in der Bakterioidmembran vorhanden Atmungskette verbraucht. Dadurch kann der geringe Gehalt an vorhandenen Sauerstoff für die Rhizobien ein begrenzendes Mittel für die Stickstofffixierung sein. Zusätzlich befindet sich in den Knöllchen Leghämoglobin. Es besitzt die Fähigkeit Sauerstoff reversibel zu binden und verhindert dadurch eine zu hohe Konzentration in den Knöllchen. Das Leghämoglobin ist ein Produkt welches von beiden Symbionten gebildet wird.

Die Pflanze stellt das Apoprotein zur Verfügung und das Bakterium synthetisiert das Häm. Das Leghämoglobin in den Knöllchen hat eine rötliche Farbe, im Verlauf der Seneszenz wird das Leghämoglobin abgebaut und das Knöllchen erhält aufgrund des Abbauproduktes Biliverdin eine grünliche Farbe. (vgl. Heldt 2003, S. 330-332) In der Folgenden Abbildung sind verschiedene Stadien der Seneszenz abgebildet.



Abbildung 6 Erbsen- (rechts) und Luzerneknöllchen (links) im Querschnitt, in verschiedenen Stadien der Seneszenz;

Quelle: Fischinger 2009, S. 7

Da die Rhizobien nur auf bestimmte Pflanzen reagieren, und sich die richtigen Rhizobienarten sich nicht immer in ausreichender Form im Boden befinden, wird das Saatgut mit der entsprechenden Art geimpft. Dadurch kann sichergestellt werden, dass sich genügend Bakterien in der Umgebung der Pflanzenwurzel aufhalten. Weltweit ist man bemüht die Vorgänge bei der Stickstofffixierung besser zu erforschen, um die Umsatzleistung zu steigern. In der europäischen Forschung gibt es verschiedene Projekte, wie z.B. FIXNET. Bei dieser Forschungsgruppe haben sich neun europäische Partner zusammengeschlossen, um die Vorgänge bei der Symbiose von Rhizobien mit Leguminosen zu untersuchen. In Deutschland beteiligen sich unter anderem die Universität für Genetik sowie die Hochschule für Ökologie des Bodens in Aachen. Die folgende Darstellung zeigt die Partner und deren Forschung bei Fix Net.

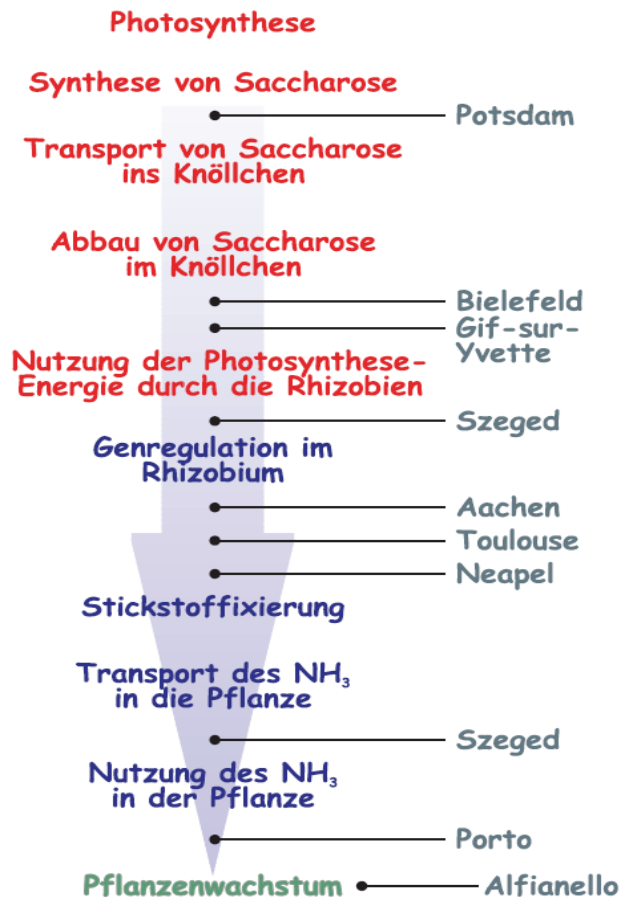


Abbildung 7: Übersicht über die biologische Stickstoff-Fixierung und die einzelnen Forschungsansätze des FIXNET-Programms;

Quelle: Perlick & Küster Helge 1999, S. 7

Bei dem Projekt FIXNET werden verschiedene Fragen behandelt. Dabei wird untersucht, welchen Einfluss die Versorgung des Knöllchens mit Saccharose auf die Stickstoff-Fixierung hat, und wie die, in der Saccharose, enthaltene Energie mobilisiert und den Rhizobien zur Verfügung gestellt wird. Dadurch sind im späteren Verlauf der Untersuchungen, Aussagen zu der Optimierung dieser Prozesse und zur Steigerung der Effizienz der Stickstofffixierung möglich. Zusätzlich erforscht man, in wie weit die Aktivität der bakteriellen Gene, die an der Stickstoff-Fixierung beteiligt sind, aufeinander abgestimmt wird. In diesem Projekt wird ebenfalls versucht zu ermitteln, wie die Stoffwechselmechanismen, die für die Verarbeitung und den Transport des fixierten Stickstoffs verantwortlich sind, in Pflanzen und Bakterien reguliert und aufeinander abgestimmt werden. Im Bereich der Rhizobienstämme wird versucht, die Symbiose besonders produktiv zu gestalten, so dass größere

Mengen Stickstoff gebunden werden können, und dieser dann der Pflanze, für das Wachstum, zur Verfügung gestellt werden kann. (vgl. Perlick & Küster Helge 1999, S. 6)

Im allgemeinen, versucht das Projekt FIXNET die Zusammenhänge bei der Symbiose besser zu verstehen, und dadurch zu optimieren. (vgl. Perlick & Küster Helge 1999, S. 6)

Durch den verminderten Anbau von Leguminosen in Deutschland gingen die züchterischen Leistungen aus Kostengründen zurück. (vgl. Specht 2009, S.8). Bei den noch vorhandenen Versuchen wird sich hauptsächlich darum bemüht, die Leguminosen resistenzfähiger gegen Krankheiten wie z.B. Anthraknose zu gestalten und den Ertrag witterungsunabhängiger zu machen. (vgl. Sass 2009, S. 11-12)

3. Umsatzleistung

Die Leistungen der Rhizobien sind, je nach Art und Kultur, unterschiedlich. Sie ist vom Genotyp und Entwicklungszustand der Wirtspflanze, sowie vom Symbionten abhängig. Zusätzlich wird sie sehr stark von äußeren Faktoren, wie z.B. dem Standort und der Witterung beeinflusst. Es gibt verschiedene Ursachen, die die Umsatzleistung verringern können. Eine wichtige Rolle für die Fixierungsleistung spielt dabei der pflanzenverfügbare Stickstoff im Boden, je niedriger der N-min Wert im Boden ist, desto mehr Knöllchen werden an der Pflanzenwurzel gebildet, und die Fixierungsleistung von den Rhizobien steigt. Bei höheren Stickstoffgehalten im Boden, nehmen die Pflanzen zuerst diesen auf. Dadurch werden weniger Knöllchen gebildet, und der Stickstoffgewinn für den Betrieb ist gering. Um dies zu verhindern, können die Leguminosen nach stickstoffzehrenden Kulturen, wie z. B. Getreide, anbauen und somit die Knöllchenbildung fördern. Auch niedrige PH-Werte sind negativ für die Bildung von Knöllchen, genauso wie Trockenheit und Bodenverdichtungen. Die folgende Abbildung 8 verdeutlicht die Korrelation zwischen den Bodenstickstoffgehalt und der Stickstofffixierungsleistung der Rhizobien.

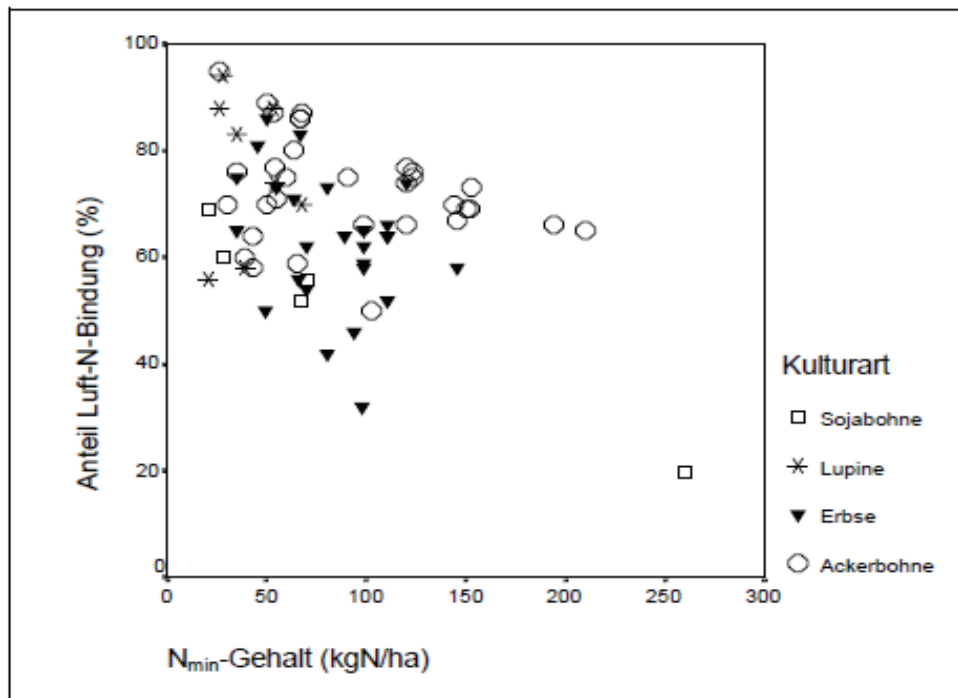


Abbildung 8: Beziehung zwischen den N_{min} -Werten und der relativen N-Bindung bei Körnerleguminosen;

Quelle: Kolbe, Karalus, Hänsel, Grünbeck, & Gramm 2002, S. 15

Um sicherzustellen, dass ausreichend Rhizobien sich frei im Boden befinden, sollten, vor dem Anbau von Leguminosen, Bodenproben genommen und untersucht werden. Dadurch kann das optimale Saatgut ermittelt werden so dass, bei günstigen Temperaturen und gutem Auflaufen der Leguminosen nach 3-4 Wochen voll funktionsfähige Knöllchen an den Pflanzenwurzeln vorhanden sind.

3.1. Futterleguminosen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Leguminosen anzubauen und die Vorteile optimal zu nutzen. Je nach weiterer Nutzung der Pflanzen wird in Körner und Futterleguminosen unterschieden. Die Leguminosen binden den Stickstoff nicht nur für das eigene Wachstum sondern stellen ihn auch den nicht Leguminosen im Bestand zur Verfügung. Futterleguminosen werden in der Regel als ganze Pflanze geerntet und in Silagen oder ähnliches konserviert. Durch den Anbau der Futterleguminosen kann die Qualität und den Ertrag des Futters verbessert werden. Sie können einjährig oder

mehrfährig, sowie in Reinsaat oder gemischt mit Gräsern angebaut werden. Die wichtigsten mehrjährigen Futterleguminosen sind der Weißklee, Rotklee, und Luzerne. Für die Futtergewinnung werden sie meist in Gemengen mit verschiedenen Grassorten angebaut. Dieses Gras reduziert den N-min Vorrat im Boden und fördert somit die Knöllchenbildung und die Stickstofffixierung.

Ein Nachteil, der mehrjährigen Leguminosen, ist die mangelnde Ausdauer, welche verschiedene Gründe, wie z.B. genetisch bedingte Kurzlebigkeit, Krankheiten, Schädlinge, oder nicht angepasste Bewirtschaftung haben kann. Einjährige Futterleguminosen sind der Alexandrienerklee, Wicken und die Felderbse (Futtererbse). Sie werden in Gemengen aber auch in Reinsaat angebaut. Der optimale Leguminosenanteil in diesem Gemenge beträgt 80 Prozent. Dadurch werden, gegenüber der Reinsaat die Wachstumsfaktoren wie Licht, Wasser und Nährstoffe optimaler ausgenutzt und Unkräuter, Schädlinge und Pflanzenkrankheiten weitestgehend unterdrückt.

Die wichtigsten Futterleguminosen in Deutschland sind Luzerne (*Medicago sativa* L.), Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Weißklee (*Trifolium repens* L.). Aber auch Schwedenklee (*Trifolium hybridum* L.), Steinklee (*Melilotus* ssp.) sowie der Inkarnatklee (*Trifolium incarnatum* L.), der Alexandrienerklee und der Persischer Klee (*Trifolium alexandrinum* L.) sind im Anbau vertreten. (vgl. Jung 2003, S. 4) Im Feldfutteranbau werden die Leguminosen häufig in Gemengen mit Poaceen angebaut, um die Flächenleistung zu erhöhen und das Anbaurisiko zu mindern. Zusätzlich kann im Verlauf der Vegetationsperiode der symbiotisch fixierte Stickstoff von den Leguminosen zu den Poaceen übertragen werden. Die Stickstoffmengen, die von den Leguminosen zu den Gemengepartnern übertragen werden, ist dabei von vielen Faktoren, wie z.B. die Zusammensetzung des Gemenges (Arten, Mischverhältnis), Alter der Bestände sowie der Nutzungsart (Schnittnutzung, Beweidung) abhängig. Die Fixierungsleistung von Futterleguminosen hat in der Literatur hohe Spannweiten. Die nachfolgenden Tabellen 3,4 und 5 stellen verschiedene Quellen für Luzerne Rotklee und Persischem Klee in Reinsaat und Gemenge, sowie die Angaben zur Stickstoffaufnahme aus der Luft dar.

Quelle	N-Menge in kg ha ⁻¹ im Ansaatjahr	N-Menge in kg ha ⁻¹ im ersten HNJ	N-Menge in kg ha ⁻¹ im zweiten HNJ
<u>Luzerne in Reinsaat</u>			
HEICHEL et al. 1981 ¹⁾	148	165	
HEICHEL et al. 1984 ²⁾⁷⁾	169	127	168 (198 im 3.HNJ)
TA & FARIS 1987b ²⁾	180	183	
WIVSTAD et al. 1987 ¹⁾		242	319
HARDARSON et al. 1988 ¹⁾	141	274	
BURITY et al. 1989 ¹⁾	128	342	311
CLAUPEIN 1994 ²⁾		354	
SPARROW et al. 1995 ¹⁾³⁾	44 / 58	23 / 63	
BROCKWELL et al. 1995 ¹⁾	90 (im 6. Bestandesjahr)		
LAMB et al. 1995 ¹⁾	50	245	
WALLEY et al. 1996 ²⁾	210	430	438
KELLNER et al. 1997 ²⁾³⁾	174	414 / 450	433 / 466
LOGES & TAUBE 1999 ¹⁾		246	
SCHMIDTKE & RAUBER 2000 ²⁾	263	261	
BOWMAN et al. 2002 ¹⁾⁸⁾		46	54 (26 im 3.HNJ)
<u>Luzerne im Gemenge mit Gräsern</u>			
WEST & WEDIN 1985 ¹⁾		68	72
TA & FARIS 1987b ²⁾⁴⁾	70	121	
TA & FARIS 1987b ²⁾⁵⁾	88	149	
HARDARSON et al. 1988 ¹⁾⁵⁾	143	282	
HARDARSON et al. 1988 ¹⁾⁶⁾	114	230	
HEICHEL & HENJUM 1991 ²⁾	82	254	
DANSO et al. 1988 ¹⁾	102	108	
BURITY et al. 1989 ⁷⁾	153	344	328
LORY et al. 1992 ²⁾		326	
WALLEY et al. 1996 ²⁾	121	289	365
HEUWINKEL & GUTSER 1997 ¹⁾⁹⁾		320 / 430	

¹⁾ Nur Sprossmasse

²⁾ Sprossmasse mit Ernteresten (Wurzeln)

³⁾ An zwei Standorten ermittelt

⁴⁾ Mischungsverhältnis Leguminose zu Gras: 1:1

⁵⁾ Mischungsverhältnis Leguminose zu Gras: 2:1

⁶⁾ Mischungsverhältnis Leguminose zu Gras: 1:2

⁷⁾ Mittelwert aus mehreren Sorten

⁸⁾ Mittelwert aus mehreren Standorten

⁹⁾ Gemenge aus Luzerne, Rotklee und Gräsern bei zwei Bodenarten (Sand / Lehm)

Tabelle 3: Stickstofffixierungsleistung von Luzerne (*Medicago sativa* L.) in Reinsaat und im Gemenge mit Gräsern nach verschiedenen;

Quelle: Jung 2003, S. 23)

Quelle	N-Menge in kg ha ⁻¹ im Ansaatjahr	N-Menge in kg ha ⁻¹ im ersten HNJ	N-Menge in kg ha ⁻¹ im zweiten HNJ
<u>Rotklee in Reinsaat</u>			
WITTY 1983 ¹⁾	40	56	
HEICHEL et al. 1985 ²⁾	133	69	87 (76 im 3.HNJ)
BOLLER 1988b ¹⁾		146	
SPARROW et al. 1995 ^{1) 3)}	121 / 76	41 / 33	
LOPOTZ 1996		415 ¹⁾ bzw. 461 ²⁾	
SCHMIDTKE 1997a ^{1) 3)}		223 / 69	120 / 116
LOGES & TAUBE 1999 ¹⁾		255	
SCHMIDTKE & RAUBER 2000 ²⁾	268	193	
REITER et al. 2002b ^{2) 6)}	147 / 208		
REITER et al. 2002b ^{2) 7)}	177 / 212		
<u>Rotklee im Gemenge mit Gräsern</u>			
BOLLER & NÖSBERGER 1987 ¹⁾	165 / 49	373 / 307	
BOLLER 1988a ¹⁾		340	
BOLLER 1988b ¹⁾		110	
MALLARINO et al. 1990a ^{1) 3)}	157 / 49	232 / 277	
HEICHEL & HENJUM 1991 ²⁾	8	150	80
FARNHAM & GEORGE 1993 ¹⁾	153	93	
NESHEIM & ØYEN 1994 ^{1) 3)}	258 / 173	162 / 83	
BOLLER & NÖSBERGER 1994 ¹⁾	145	215	
SCHNOTZ 1995 ¹⁾	144	77	
LOPOTZ 1996 ¹⁾		313	
SCHMIDTKE 1997a ^{1) 3) 4)}		160 / 34	145 / 79
SCHMIDTKE 1997a ^{1) 3) 5)}		171 / 45	118 / 94
LOGES & TAUBE 1999 ¹⁾		248	
VINTHER & JENSEN 2000 ¹⁾		217	

¹⁾ Nur Sprossmasse

²⁾ Sprossmasse mit Ernteresten (Wurzeln)

³⁾ An zwei Standorten ermittelt

⁴⁾ Mischungsverhältnis Leguminose zu Gras: 2:1

⁵⁾ Mischungsverhältnis Leguminose zu Gras: 1:2

⁶⁾ bei konventioneller Bodenbearbeitung (Pflug)

⁷⁾ bei reduzierter Bodenbearbeitung (pfluglos)

Tabelle 4 Stickstofffixierungsleistung von Rotklee (*Trifolium partense* L.) in Reinsaat und im Gemenge mit Gräsern, nach verschiedenen Autoren;

Quelle: Jung 2003, S. 24

Quelle	N-Menge in kg ha ⁻¹	Anmerkungen
<u>Persischer Klee in Reinsaat</u>		
BOLLER 1988a ¹⁾	70	Ansaat im April
LOPOTZ 1996 ¹⁾	68	Ansaat im April
BECKMANN 1998 ¹⁾	115	Ansaat Anfang Juli
MÜLLER & THORUP-KRISTENSEN 2001 ¹⁾	100	Ansaat im August
PEOPLES et al. 2001 ¹⁾	64	Australien, bewässert
<u>Persischer Klee im Gemenge mit Gräsern</u>		
BOLLER 1988a ¹⁾	46	Ansaat im April
LOPOTZ 1996 ¹⁾	64	Ansaat im April
BECKMANN 1998 ¹⁾	54	Ansaat Anfang Juli

¹⁾ Nur Sprossmasse

Tabelle 5 Stickstofffixierungsleistung von Persischem Klee (*Trifolium resupinatum* L.) in Reinsaat und im Gemenge mit Gräsern, nach verschiedenen Autoren;

Quelle: Jung 2003, S. 25

An dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Georg-August-Universität Göttingen wurde die Stickstofffixierungsleistung von Luzerne, Rotklee und Persischem Klee in Reinsaat und Gemenge in einem 3 Jährigen Feldversuch untersucht. Dabei wurde, bei der Schnittnutzung, eine Stickstofffixierungsleistung der Luzerne-Reinsaat, im überjährigen Anbau, einen Durschnitt von 203 kg N ha⁻¹ festgestellt. In der Summe von zwei Hauptnutzungsjahren wurde ein Durchschnitt von 433,6 kg N ha⁻¹ ermittelt. Der Rotklee lag im überjährigen Anbau bei einem Mittel von 306,4 kg N ha⁻¹ und in der Summe von zwei Hauptnutzungsjahren bei einem Durchschnitt von 543,3 kg N ha⁻¹. Im Gemenge mit dem Wiesenschwingel hatte die Luzerne eine Stickstofffixierungsleistung von durchschnittlich 267,3 kg N ha⁻¹. Und der Rotklee 292,7 kg N ha⁻¹. Der Persische Klee konnte im einjährigen Anbau im Mittel 117,9 kg N ha⁻¹ aufnehmen und zeigte im Anbau mit Poaceen eine geringere Fixierungsleistung mit durchschnittlich 65 kg N ha⁻¹. (vgl. Jung 2003, S. 190-191) In den folgenden Tabellen 5 und 6 wird die aufgenommene Luft-Stickstoffmenge dieses Versuches dargestellt.

Gesamtpflanzliche Luft-Stickstoff-Menge (Nfix) im Gemenge und in den Reinsaaten der Luzerne, des Rotkleees und des Persischen Kleees am Standort **Reinshof**. Nfix des ersten und zweiten Hauptnutzungsjahres der Versuchsanlage A (1999 und 2000) und der Versuchsanlage B (2000 und 2001) sowie Addition der Luft-N-Menge aus zwei Hauptnutzungsjahren (Σ , nur bei Luzerne und Rotklee). Vergleich der Luft-N-Menge

- zwischen den Anbauformen Gemenge und Reinsaat (große Buchstaben)
- zwischen den Sorten (kleine Buchstaben)
- zwischen den Arten Luzerne und Rotklee (griechische Buchstaben)

Nfix [kg ha ⁻¹]	Versuchsanlage A			Versuchsanlage B		
	1999 ↓ ↓	2000 ↓ ↓	Σ ↓ ↓	2000 ↓ ↓	2001 ↓ ↓	Σ ↓ ↓
Luzerne						
Europe + Cosmos 11	355,7 A	355,5 A	711,2 A	358,9 A	212,4 A	571,3 A
Europe	452,8 A a	333,2 A a	786,0 A a	438,9 A a	203,9 A a	642,8 A a
Franken neu	412,2 a	251,8 a	664,0 a	518,4 a	281,6 a	800,1 b
Orca	361,0 a	332,6 a	693,6 a	407,0 a	251,3 a	658,3 a
<i>arith. Mittel der Sorten</i>	408,7 α	305,9 α	714,5 α	454,8 α	245,6 α	700,4 α
Rotklee						
Odenwälder + Cosmos 11	370,9 A	400,7 A	771,5 A	438,9 A	216,7 A	655,6 A
Odenwälder Rotklee	370,0 A a	379,8 A a	749,8 A a	469,2 A a	226,4 A a	695,6 A a
Titus	364,7 a	389,6 a	754,3 a	447,4 a	261,8 a	709,2 a
Lucrum	347,6 a	314,2 a	661,8 a	409,0 a	244,1 a	653,1 a
<i>arith. Mittel der Sorten</i>	360,8 α	361,2 β	722,0 α	441,9 α	244,1 α	686,0 α
Persischer Klee	1999 ↓ ↓			2000		
Felix + Lipo	105,2 A			---- *		
Felix	167,3 A a			----		
Archibald	163,2 a			----		
<i>arith. Mittel der Sorten</i>	165,3			----		

Nfix nach $\delta^{15}\text{N}$ -Methode berechnet, Referenzpflanze Wiesenschwingel;
 verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Tukey-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung: ↓).
 * - Ernteausfall des Persischen Kleees wegen Pilzbefalls

Tabelle 6: Luft-Stickstoff- Menge in der Pflanze, Standort Reinshof

Quelle: Jung 2003, S. 67

Gesamtpflanzliche Luft-Stickstoff-Menge (Nfix) im Gemenge und in den Reinsaat der Luzerne, des Rotklee und des Persischen Klees am Standort **Oederquart**. Nfix des ersten und zweiten Hauptnutzungsjahres der Versuchsanlage A (1999 und 2000) und der Versuchsanlage B (2000 und 2001) sowie Addition der Luft-N-Menge aus zwei Hauptnutzungsjahren (Σ , nur bei Luzerne und Rotklee). Vergleich der Luft-N-Menge

- zwischen den Anbauformen Gemenge und Reinsaat (große Buchstaben)
- zwischen den Sorten (kleine Buchstaben)
- zwischen den Arten Luzerne und Rotklee (griechische Buchstaben)

Nfix [kg ha ⁻¹]	Versuchsanlage A			Versuchsanlage B		
	1999 ↓ ↓	2000 ↓ ↓	Σ ↓ ↓	2000 ↓ ↓	2001 ↓ ↓	Σ ↓ ↓
Luzerne						
Europe + Cosmos 11	49,2 A	28,5 A	77,7 A	22,3 A	42,5 A	64,8 A
Europe	160,2 A a	247,1 B a	407,3 B a	42,7 A a	175,9 B a	218,6 B a
Franken neu	168,2 a	208,8 a	377,0 a	71,7 a	166,9 a	238,6 a
Orca	146,3 a	216,8 a	363,1 a	63,7 a	177,2 a	240,9 a
<i>arith. Mittel der Sorten</i>	158,2 α	224,2 #	382,4 α	59,4 α	173,3 α	232,7 α
Rotklee						
Odenwälder + Cosmos 11	383,8 A	290,1 A	673,9 A	273,8 A	157,6 A	431,4 A
Odenwälder Rotklee	388,9 A a	249,3 A a	638,3 A a	282,3 A a	197,3 A a	479,6 A a
Titus	435,5 a	299,7 a	735,2 a	334,8 a	179,1 a	513,9 a
Lucrum	349,1 a	246,7 a	595,9 a	280,6 a	182,0 a	462,6 a
<i>arith. Mittel der Sorten</i>	391,2 β	265,2 #	656,4 β	299,2 β	186,1 α	485,4 β
Persischer Klee		1999 ↓ ↓			2000 ↓ ↓	
Felix + Lipo		43,9 A			4,5 A	
Felix		182,3 B a			43,0 B a	
Archibald		171,8 a			40,1 a	
<i>arith. Mittel der Sorten</i>		177,0			41,5	

Nfix nach $\delta^{15}\text{N}$ -Methode berechnet, Referenzpflanze Wiesenschwingel;
 verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Tukey-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung: ↓).
 # Daten nicht normalverteilt, Varianzanalyse nicht möglich.

Tabelle 7: Luft- Stickstoff-Menge der Pflanze am Standort Oederquart;

Quelle: Jung 2003, S. 72

In Österreich wurde ebenfalls die Luzerne und der Rotklee sowie der Weiße Steinklee auf ihre Stickstofffixierungsleistung an der Universität für Bodenkultur in Raasdorf getestet. In den Jahren 1999 bis 2001 wurde die Reinsaat sowie die Gemengesaat, aber auch die Nutzungsart in Feldversuchen untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass futterbaulich genutzte Leguminosenbestände eine höhere Stickstofffixierungsleistung

aufwiesen als die gemulchten Bestände. Die Luzerne Gras Schnittnutzung konnte 320 kg N ha^{-1} aufnehmen, wobei die Luzerne Gras Mulch Nutzung 136 kg N ha^{-1} umsetzte.

Durch das Belassen des gemulchten Aufwuchses auf dem Feld, konnten positive Stickstoffflächenbilanzen gegenüber der Schnittnutzung ermittelt werden (2000: $+186 \text{ kg N ha}^{-1}$, 2001: $+175 \text{ kg N ha}^{-1}$).

Bei den Untersuchungen zur Reinsaat und Gemenge konnte nur, im zweiten Versuchsjahr, tendenziell eine höhere Stickstofffixierungsleistung bei der Gemengesaat festgestellt werden (1. -3. Schnitttermin gesamt Reinsaat 189 kg N ha^{-1} Gemenge 197 kg N ha^{-1}). Zusätzlich wurde die Aussage getroffen, dass der Trockenmasseertrag und der Stickstoffertrag eng zusammenhängen. (vgl. Pietsch 2004, S. 72.) Dies ist in der folgenden Abbildung 9 dargestellt.

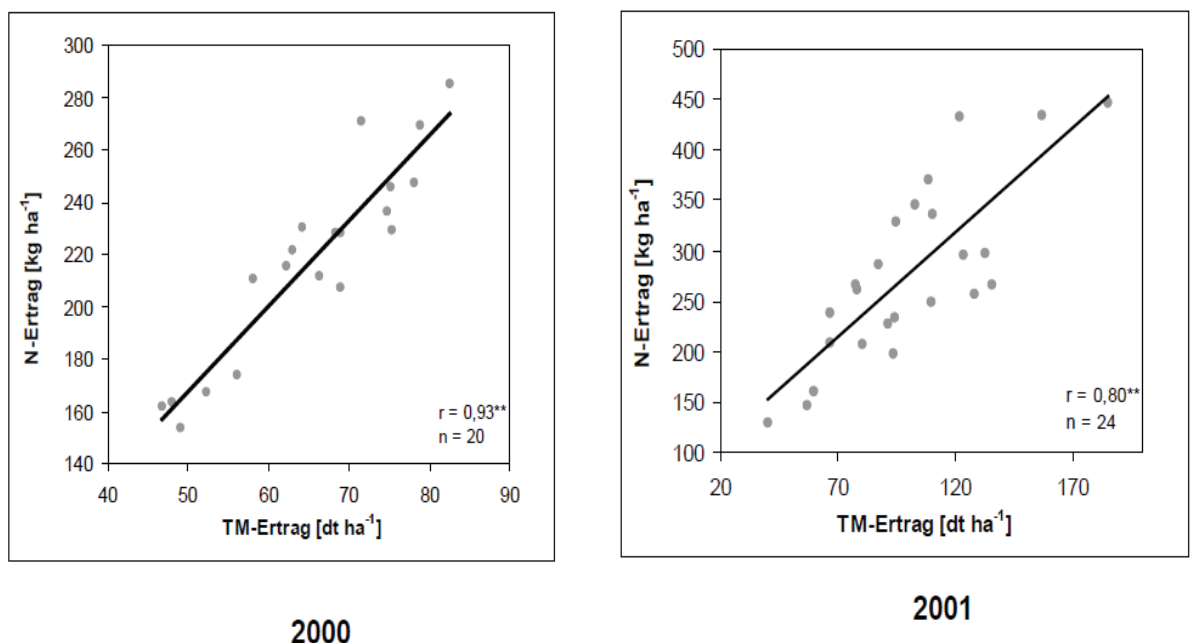


Abbildung 9: Korrelation zwischen dem gesamten Stickstoffertrag und dem gesamt TM Ertrag im Schnittgut im Feldversuch;

Quelle: Pietsch 2004, S. 72

3.2 Körnerleguminosen

Körnerleguminosen sind groß sämige meist einjährige Kulturpflanzen, die in der Regel als Druschfrucht zur Gewinnung der proteinreichen Samen für die Human- und Tierernährung angebaut werden. Die in der EU hauptsächlich angebauten Körnerleguminosen sind die Ackerbohne, Futtererbse und Lupinen. Der Selbstversorgungsgrad in der Europäischen Union bei der Produktion von pflanzlichen Proteinen für die Tierernährung lag 2003/2004 bei 24%, wobei das Defizit fast vollständig durch Importe der Sojabohne und dem Sojaextraktionsschrot ausgeglichen wurden.

Die in Deutschland fehlende wirtschaftliche Attraktivität von Körnerleguminosen, führte in den letzten Jahren zu einem Rückgang der Anbauflächen und somit zu einer eingeschränkten züchterischen Aktivität. Dadurch ist in nächster Zukunft nur noch mit einem eingeschränkten Züchtungsfortschritt bei den Körnerleguminosen zu rechnen. Die folgende Tabelle 8 zeigt, dass 2008 deutlich weniger Körnerleguminosen angebaut wurde als in den vor Jahren.

Anbau von Ackerbohnen, Futtererbsen und Süßlupinen in Deutschland (in 1.000 ha)

	2007	2008	Mittel 2002/2007
Ackerbohnen	12,2	11,1	16,2
Futtererbsen	67,7	47,9	112,6
Süßlupinen	25,2	19,9	29,7
Σ	105,1	78,9	158,5

Tabelle 8: Ackerbohnen, Futtererbsen und Süßlupinenanbau in Deutschland

Quelle: Specht 2009, S. 3

Da der Erzeugerpreis für Körnerleguminosen sehr gering ist liegt der Marktpreis deutlich unter dem Futterwert, so dass die produzierten Eiweißfuttermittel zumindest in Viehbetrieben nicht veräußert, sondern im eigenen Betrieb veredelt und verwertet werden. Auf Grund von fehlenden Massen und einheitlichen Qualitäten an produzierten Körnerleguminosen ist das Interesse des Landhandels an der Abnahme sehr gering. (vgl. Specht 2009, S. 7)

Außer den Heimischen Körnerleguminosen, kann in den wärmegünstigen Lagen auch die hochwertige Sojabohne angebaut werden. In Südwestdeutschland besteht bereits eine regionale Nachfrage, durch die Ansiedlung eines Bio-Tofu Produzenten.

Die Körnerleguminosen hinterlassen durch die Ernterückstände aber auch durch den gebundenen Stickstoff der Rhizobien eine kontinuierlich fließende Stickstoffquelle, welches den Vorfruchtwert stark beeinflusst. In der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft wurden von 1994 bis 2003 verschiedene Feldversuche, an 2 Standorten, durchgeführt, um genaue Angaben zum Vorfruchtwert im konventionellen Anbau zu machen. Dabei wurde festgestellt, dass die Erträge der ersten Nachfrucht Weizen nach den Körnerleguminosen höher waren als nach einer Getreidevorfrucht. Im Mittel der Versuche konnten die Körnerleguminosen einen Mehrertrag von 9,2 dt/ha erreichen. Auch auf die 2. Nachfrucht konnte ein positiver Effekt festgestellt werden, der allerdings nicht in allen Versuchen vorhanden war. Es wurden dreimal Mehrerträge (5,0dt/ha Wintergerste, 5,0 und 3,8 dt/ha Sommergerste) ermittelt, einmal konnte kein Unterschied erkannt werden und einmal wurde sogar ein um 3,9 dt/ha geringerer Ertrag ermittelt. Dabei erfolgte die Stickstoffdüngung in zwei Varianten. Die erste Variante war ohne Stickstoffgaben und die zweite eine Düngung nach SBA (Stickstoffbedarfsanalyse) basierend auf die N-min Gehalte im Boden zum Vegetationsbeginn. (vgl. Albrecht & Guddat 2004, S. 2) Die folgende Tabelle 9 stellt die Ergebnisse bei den Mehrerträgen der verschiedenen Getreiden als erste Nachfrucht nach Körnerleguminosen, Winterraps und Kartoffeln zu der Referenzfrucht zu Getreide.

Getreideart	Ertrag nach Getreide-Vorfrucht	Mehrertrag nach		
		Leguminosen	Wi.-Raps	Kartoffeln
Versuch 2 (Dornburg, 1997)				
Wi.-Weizen	69,7	+ 12,7		
Wi.-Triticale	75,2	+ 12,6		
So.-Gerste	50,4	+ 14,3		
Versuch 3 (Dornburg, 1999)				
Wi.-Weizen	78,2	+ 10,4	+ 6,5	+ 7,4
Wi.-Gerste	76,6	+ 6,7	+ 4,2	+ 9,6
Versuch 4 (Heßberg, 2000)				
Wi.-Weizen	90,6	+ 9,5	+ 9,1	
Versuch 5 (Dornburg, 2001)				
Wi.-Weizen	85,0	+ 4,8	+ 4,1	0
Versuch 6 (Heßberg 2002)				
Wi.-Weizen	79,7	+ 8,4	+ 13,3	
Versuche 3 bis 6				
Wi.-Weizen	83,4	+ 8,3	+ 8,3	
Alle Versuche				
Wi.-Weizen	80,6	+ 9,2		

Tabelle 9: Mehrerträge verschiedener Getreidearten als 1. Nachfrüchte nach Körnerleguminosen, Winterraps und Kartoffeln im Vergleich zu Getreide als Vorfrucht bei N-Düngung nach SBA (dt/ha)

Quelle: Albrecht & Guddat 2004; S. 3

Die zweite Variante führte zu einer Bedarfsgerechten Düngung, welche je nach Vorfrucht Düngereinsparungen zuließ. Allerdings wurde ebenfalls ermittelt, dass je nach Standort und N-Mineralisierung im Winter der N-min Gehalt und somit auch die Einsparungen unterschiedlich ausfallen können. In der Tabelle 10 sind die ermittelten Einsparungen von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zu erkennen.

Getreideart	Geringerer N-Bedarf nach		
	Leguminosen	Wi.-Raps	Kartoffeln
Versuch 1 (Dornburg, 1995)			
Wi.-Weizen	15 ¹⁾		
Versuch 2 (Dornburg, 1997)			
Wi.-Weizen	29		
Triticale	22		
So.-Gerste	27		
Versuch 3 (Dornburg, 1999)			
Wi.-Weizen	15	0	5
Wi.-Gerste	8	0	0
Versuch 4 (Heßberg, 2000)			
Wi.-Weizen	5	0	
Versuch 5 (Dornburg, 2001)			
Wi.-Weizen	35	32	12
Versuch 6 (Heßberg, 2002)			
Wi.-Weizen	5	0	

Tabelle 10: Einsparung von Düngerstickstoff beim Anbau von Getreide als 1. Nachfrucht nach Körnerleguminosen, Winterraps und Kartoffel im Vergleich zu Getreide als Vorfrucht (kg N/ha)

Quelle: Albrecht & Guddat 2004; S. 4

Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft hat anschließend anhand von Erzeugerpreisen 2002 einen monetären Vorfruchtwert errechnet, der sich aus den Erlösen der Mehrerträge der 1. und 2. Nachfrucht, sowie den Wert des eingesparten Düngers und der evtl. eingesparten Boden- und Arbeitszeit zusammensetzt. Dabei werden die zusätzlich aufgetretenen Kosten wie z.B. höhere Transportkosten durch den mehr Ertrag abgezogen. Dadurch wurde ein Vorfruchtwert für die Körnerleguminosen, beim Anbau von Qualitätsweizen als erste Nachfrucht und Brau- bzw. Futtergerste als 2. Nachfrucht, von 120-140 €/ha ermittelt. (vgl. Albrecht & Guddat 2004, S. 5) Dies ist auch in der Tabelle 11 nochmal dargestellt.

Komponente des Vorfruchtwertes, Rechengang	Mehrleistung je ha im Vergleich zu Getreide-Vorfrucht
Mehrertrag 1. Nachfrucht (9,2 dt/ha) 9,2 dt/ha Qualitätsweizen á 10,70 €	98 €
Mehrertrag 2. Nachfrucht (2,0 dt/ha) 1,0 dt/ha Braugerste á 12,40 € = 12,40 € 1,0 dt/ha Futtergerste á 8,10 € = 8,10 €	20 €
Einsparung N-Dünger (24 bzw. 5 kg N/ha) 24 kg N/ha á 0,50 € = 12,00 € (Dornburg) 5 kg N/ha á 0,50 € = 2,50 € (Heißberg)	2 bis 12 €
Einsparung bei der Bodenbearbeitung (nach Literaturangaben)	15 bis 25 €
Zusätzliche Kosten durch Mehrerträge Mehrerträge 1. + 2. Nachfrucht = 11,2 dt/ha á 1,50 €	- 17 €
Vorfruchtwert insgesamt (gerundet)	120 bis 140 €
Vorfruchtwert ohne 2. Nachfrucht (gerundet)	100 bis 120 €

Tabelle 11 Vorfruchtwert von Körnerleguminosen beim Anbau von Winterweizen als 1. Nachfrucht und Wintergerste bzw. Sommergerste als 2. Nachfrucht sowie N-Düngung nach SBA;

Quelle: Albrecht & Guddat 2004, S. 5

Die Versuchsvariante ohne N-Düngung diene hauptsächlich dazu, die Vorfruchtwirkung ohne evtl. Düngungseffekte erkennbar zu machen. Dabei vielen die vorfruchtbedingten Ertragsunterschiede wesentlich größer aus. In diesen Versuchsvarianten erzielte die Leguminosen-Vorfrucht einen Weizenertrag von durchschnittlich 60 dt/ha während eine Getreide-Vorfrucht einen Weizenertrag von durchschnittlich 27 dt/ha erreichte.

Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL.) hat einen 3 Jährigen Versuch an 3 viehlosen Ökobetrieben mit Körnerleguminosen durchgeführt und neben der Vorfruchtwirkung der einzelnen Leguminose auch die Auswirkung von Untersaaten und verschiedene Reihenweiten geprüft.

Die Ergebnisse haben ausgesagt, dass nach Futtererbsen meist ein höherer Ertrag erzielt wurde als nach Ackerbohne und Lupinen. Wobei die Böden mit einer höheren Ackerzahl bessere Erträge bei Futtererbsen und Ackerbohne hervorgerufen haben. Die Lupine konnte in diesem Versuch nicht mit den

anderen Körnerleguminosen konkurrieren, die Erträge waren sehr gering, und gingen bei Standorten mit Anthraknosebefall bis auf 10-20 dt/ha zurück. (vgl. Pommer & Fink 1998, S. 2) Dies ist in der folgenden Abbildung 10 graphisch dargestellt.

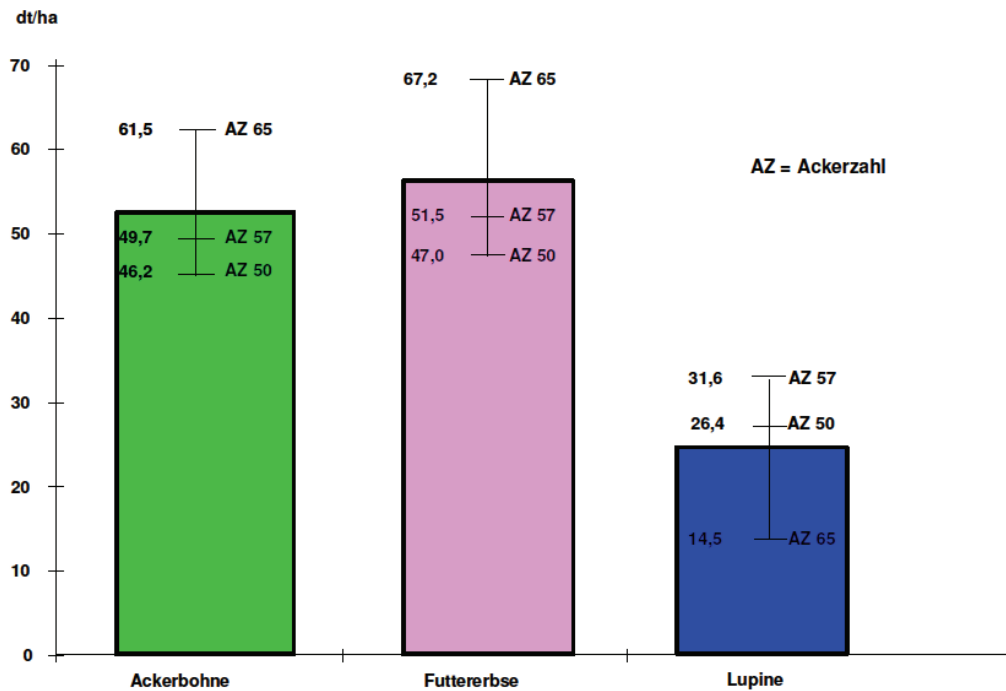


Abbildung 10: Durchschnittliche Erträge und standortbedingte Ertragsschwankungen von Körnerleguminosen 1995 -1997;

Quelle: Pommer & Fink 1998, S. 3

Die Durchschnittserträge des ersten Nachbaus von Winterweizen lagen auch hier auf einem hohen Niveau wobei die witterungsbedingte Schwankungen von 43-81 dt/ha auftraten. Weitere Ertragsunterschiede wurden durch die Körnerleguminosenarten und die Bonität der einzelnen Standorte hervorgerufen. Die durchschnittlichen Erträge, der ersten Nachfrucht Winterweizen wurden in der folgenden Tabelle 12 zusammen mit den einzelnen Standorten aufgeführt.

Fruchtart (Vorfrucht)	Anbauverfahren		Erträge dt/ha			
	Reihenweite	Zwischenfrucht	Hohen- kammer (2-jährig)	Pfaffen- hofen (3-jährig)	Rudlfing (2-jährig)	Durchschnitt Orte
Ackerbohne	weit	ohne	52,2	65,7	69,6	62,5
Ackerbohne	eng	ohne	51,9	65,5	70,3	62,6
Ackerbohne	weit	mit	51,0	66,3	66,1	61,1
Ackerbohne	eng	mit	51,3	65,7	67,1	61,4
Ø			51,6	65,8	68,3	61,9
Futtererbse		Ausfall	55,2	64,3	70,4	63,4
Futtererbse	Stoppelsaat	Stop. WEI+AKL	53,8	64,5	71,1	63,3
Futtererbse	Stoppelsaat	Stop. A.Wicke	58,1	65,4	73,9	65,7
Futtererbse	Stoppelsaat	Stop. Weißklee	56,6	64,1	72,5	64,4
Ø			55,9	64,6	72,0	64,2
Lupine	weit	ohne	59,6	67,4	60,9	62,6
Lupine	eng	ohne	58,4	65,8	61,1	61,8
Lupine	weit	mit	59,5	64,2	63,7	62,5
Lupine	eng	mit	56,8	63,2	61,3	60,4
Ø			58,6	65,2	61,8	61,8

Tabelle 12: Mehrjährige Durchschnittserträge des 1. Nachbaus Winterweizen (1996- 1998);

Quelle: Pommer & Fink 1998; S. 4

An Hand der Tabelle ist zu erkennen, dass durch das Anbauverfahren keinen Einfluss auf die Nachfrucht ausgeübt wurde. So dass die Erträge des Winterweizens mit Hilfe von Unter- oder Stoppelsaat, bzw. durch weitere oder engere Reihen nicht gesteigert werden konnten.

Die 2. Nachfrucht war Roggen. Hier lagen die Durchschnittserträge bei rund 40dt/ha und damit unter dem des Winterweizens. In diesem Versuch wurde festgestellt, dass die Einflüsse der Körnerleguminosen nur sehr leicht auf den Roggen wirken. Zusätzlich wurde auch in diesem Versuch keine Wirkung von Untersaat und Reihenweiten ermitteln. In der folgenden Tabelle 13 sind die Durchschnittserträge des Winterroggens nochmal dargestellt.

Fruchtart (Vorfrucht)	Anbauverfahren		Erträge dt/ha			
	Reihenweite	Zwischenfrucht	Hohenkammer (2-jährig)	Pfaffenhofen (3-jährig)	Rudlfing (2-jährig)	Durchschnitt Orte
Ackerbohne	40	ohne	38,8	41,2	43,8	41,3
Ackerbohne	20	ohne	38,2	40,9	45,3	41,4
Ackerbohne	40	mit	38,6	41,7	47,0	42,3
Ackerbohne	20	mit	38,8	40,7	47,3	42,0
Ø			38,6	41,1	47,3	42,0
Futtererbse	20	Ausfall	39,5	38,5	43,6	40,2
Futtererbse	20	einj. WEI+AKL	39,5	39,3	45,5	41,1
Futtererbse	20	Ackerwicke	38,2	38,0	43,4	39,6
Futtererbse	20	Weißklee	36,6	37,9	42,5	38,9
Ø			38,5	38,4	43,8	40,1
Lupine	40	ohne	39,7	39,5	42,9	40,5
Lupine	20	ohne	40,7	40,3	44,2	41,5
Lupine	40	mit	41,4	42,0	46,7	43,2
Lupine	20	mit	41,2	41,5	46,1	42,7
Ø			40,8	40,8	45,0	42,0

Tabelle 13: Mehrjährige Durchschnittserträge des 2. Nachbaus Winterroggen (1996-1998)

Quelle: Pommer & Fink 1998; S. 5

Um die Unterschiede von Körnerleguminosen in Reinsaat und im Gemenge mit Getreide (Erbsen-Sommergerste-, Ackerbohnen- Hafer, Lupinen-Sommergerste- Gemenge) zu untersuchen, wurde an der Universität Kiel, auf dem Versuchsgut für Ökologischen Landbau und extensiver Ladnutzungssysteme Lindhof ein 2 Jähriger Versuch durchgeführt. Dabei lagen die höchsten Kornerträge bei der Reinsaat der Erbse mit 41dt/ha, 32 dt/ha bei der Ackerbohnenreinsaat und 12 dt/ha bei der Lupinenreinsaat. Im Gemenge gab es die höchsten Leguminosenanteile mit 61% bei der Kombination von Erbsen mit Sommergerste, gefolgt von dem Lupinen-Sommergerstengemisch mit 50% Leguminosenanteil und Ackerbohnen-Hafergemisch mit 37%. Die Stickstofffixierungsleistung und der Stickstoffbilanz Saldo wurde unter der Berücksichtigung von den Referenzfrüchten Sommergerste und Hafer dargestellt. Die Stickstoffbilanz fällt für die Reinsaaten positiv aus, wobei die Lupine den höchsten Wert aufweist. Bei den Gemengen mit der Erbse und der Ackerbohne wurden negative Werte erreicht, so dass nur das Lupinen Sommergersten Gemisch positiv auffiel. Zusätzlich konnte ein hoher Jahreseinfluss festgestellt werden,

wobei die Stickstofffixierungsleistung im Jahr 2001 fast doppelt so hoch war wie im Jahr darauf. (vgl. Wichmann, Loges, & Taube 2006, S. 12)

3.3 Zwischenfrüchte

Zwischenfrüchte werden zwischen zwei Hauptkulturen angebaut und dienen hauptsächlich zur Gründüngung oder zur zusätzlichen Futtergewinnung. Besonders im ökologischen Anbau haben sie eine besondere Bedeutung, denn sie fördern die Bodenfruchtbarkeit, erhöhen den Ertrag der nachfolgenden Hauptfrucht und schützen den Boden vor Erosionen, sowie vor Auswaschung von Nährstoffen in untere Bodenschichten oder in das Grundwasser. Es gibt zwei verschiedene Anbauformen, den Sommer,- und den Winterzwischenfruchtanbau.

Beim Sommerzwischenfruchtanbau wird direkt nach der Ernte der Hauptfrucht, meist in die Stoppel, die Zwischenfrucht in den Boden gebracht. Die Hauptentwicklung dieser Kultur befindet sich im Spätsommer beziehungsweise im Frühherbst. Anschließend kann vor dem Eintritt des Winters die Zwischenfrucht abgeerntet werden oder sie friert bei Frost ab.

Bei dem Winterzwischenfruchtanbau werden die winterharten Zwischenfrüchte im Spätsommer ausgesät und verbleiben bis zum nächsten Frühjahr auf der Fläche. Kurz vor dem Umbruch kann dann die Zwischenfrucht geerntet werden, oder sie wird für Düngungszwecke gemulcht und eingearbeitet.

Bei den Anbauformen können die Zwischenfrüchte direkt mit der Hauptfrucht als Beisat in den Boden bringen oder nachträglich als Untersaat zu der Hauptkultur hinzufügen. Hier steht die bedarfsgerechte Versorgung der Hauptkultur im Vordergrund. Die in den Winterungen häufig angebauten Beisaaten sollen die Nährstoffe im Boden aufnehmen und die Leguminosen zusätzlich Stickstoff aus der Luft binden. Im Winter frieren sie ab und sollen nun im Frühjahr die aufgenommenen Stoffe an die Hauptkultur abgeben. Die

Untersaat bleibt auch im Winter bestehen und wächst in der Hauptkultur weiter. Nach der Ernte der Hauptfrucht wächst die Untersaat weiter und dient der Folgekultur als Gründünger.

An der Universität für Bodenkultur in Raasdorf bei Wien wurden in den Jahren 2002 bis 2004 auf ökologisch bewirtschafteten Flächen die Effizienz von verschiedenen Zwischenfrüchten mit unterschiedlich hohen Leguminosenanteilen untersucht. Es wurden vier verschiedene Versuchsvarianten durchgeführt. Die Versuchsreihen bestanden aus einem Leguminosengemenge, einer reinen Leguminosenansaat, einer Ansaat ohne Leguminosen und Schwarzbrache. Die Erträge waren in den beiden Jahren unterschiedlich was nach Aussage von Rinnhofner et.al. durch die Witterung und verschiedene Aussaattermine zu erklären war. Die Tendenz war allerdings, dass der Biomasseertrag bei dem Leguminosen-Gemenge und bei dem Versuch ohne Leguminosen höher war als bei den reinen Leguminosen, der Stickstoffertrag bei beiden Versuchen mit Leguminosen höher als bei dem ohne Leguminosen. Bei den N-min Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei der Variante mit reinen Leguminosen der Stickstoffgehalt im Boden tendenziell höher war als bei den anderen Versuchen (vgl. Rinnohner et al 2005, S. 2-3)

Im Auftrag der sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurden auf Öko-Versuchsfeldern in Roda verschiedene Zwischenfrüchte als Vorfrucht für Mais und Kartoffeln geprüft. Es gab 5 Versuchsvarianten, zum einen Leguminosen (Perserklee, Inkarnatklee, Weißklee, Zottelwicke, Lupine, Felderbse und Platterbse). Zum anderen Gemenge, (Landsberger Gemenge, Meliorationsgemenge) sowie Gräser, Kräuter, und ohne Zwischenfrucht. Im Frühjahr nach der Aussaat lagen die N-min Werte bei den reinen Leguminosen und den Leguminosen-Gemengen über den anderen Varianten (vgl. Kolbe 2007, S. 2) In der folgenden Abbildung 11 werden die ermittelten N-min Werte graphisch dargestellt.

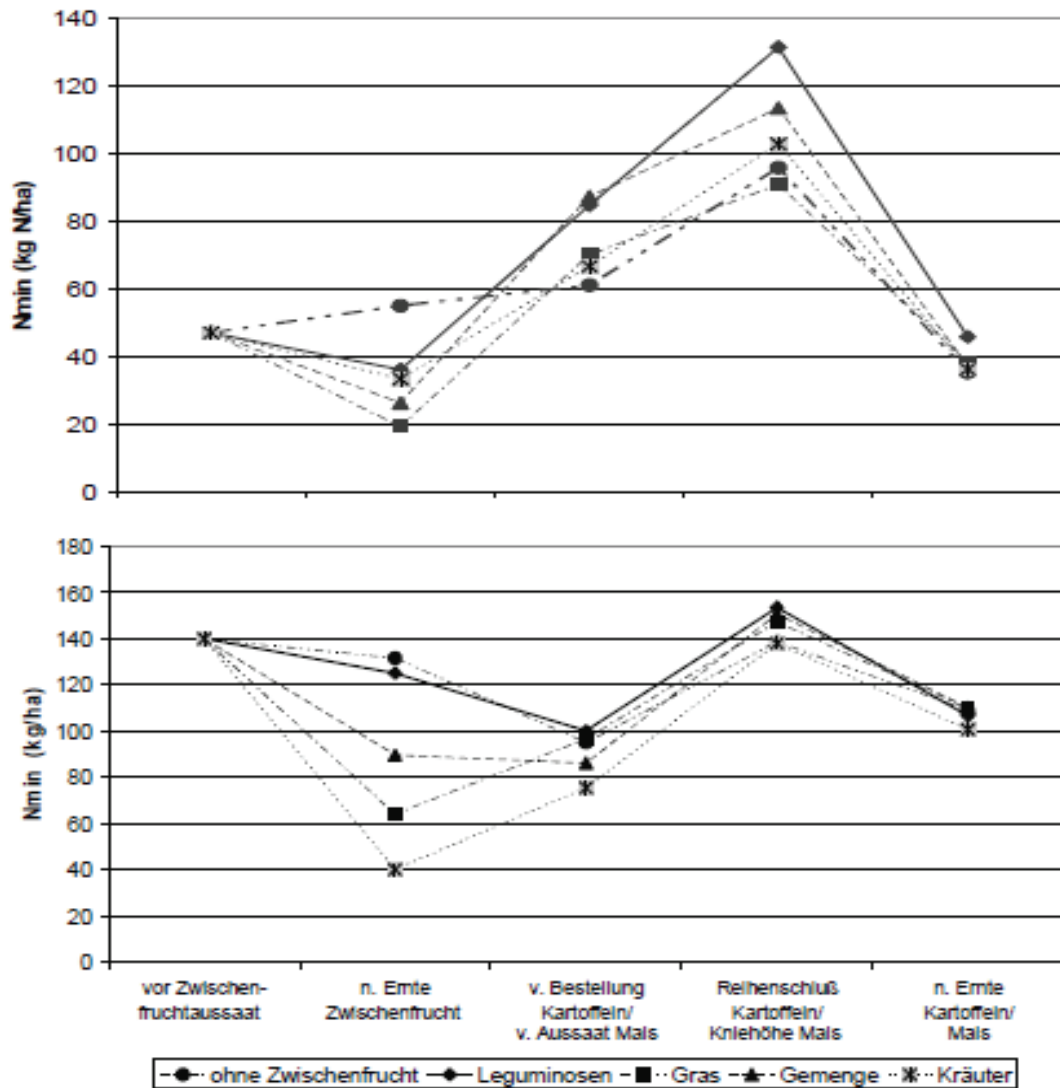


Abbildung 11 Mittlerer Verlauf der N_{min} -Werte unter den Zwischenfrüchten und den Nachfrüchten 0-60 cm Bodentiefe, oben: Mais, unten: Kartoffel;

Quelle: Kolbe 2007; S. 2

Auf die Folgekulturen hatten die Zwischenfrüchte unterschiedliche Auswirkungen, Beim Mais führte die Grasansaat zum höchsten Masseertrag vom Mais, wobei die Inhaltsstoffe durch alle Varianten angehoben wurden. Bei der Kartoffel führten alle Varianten zu einem höheren Knollenertrag. In der folgenden Abbildung 12 werden die prozentualen Veränderungen auf Grund des Zwischenfruchtanbaus dargestellt.

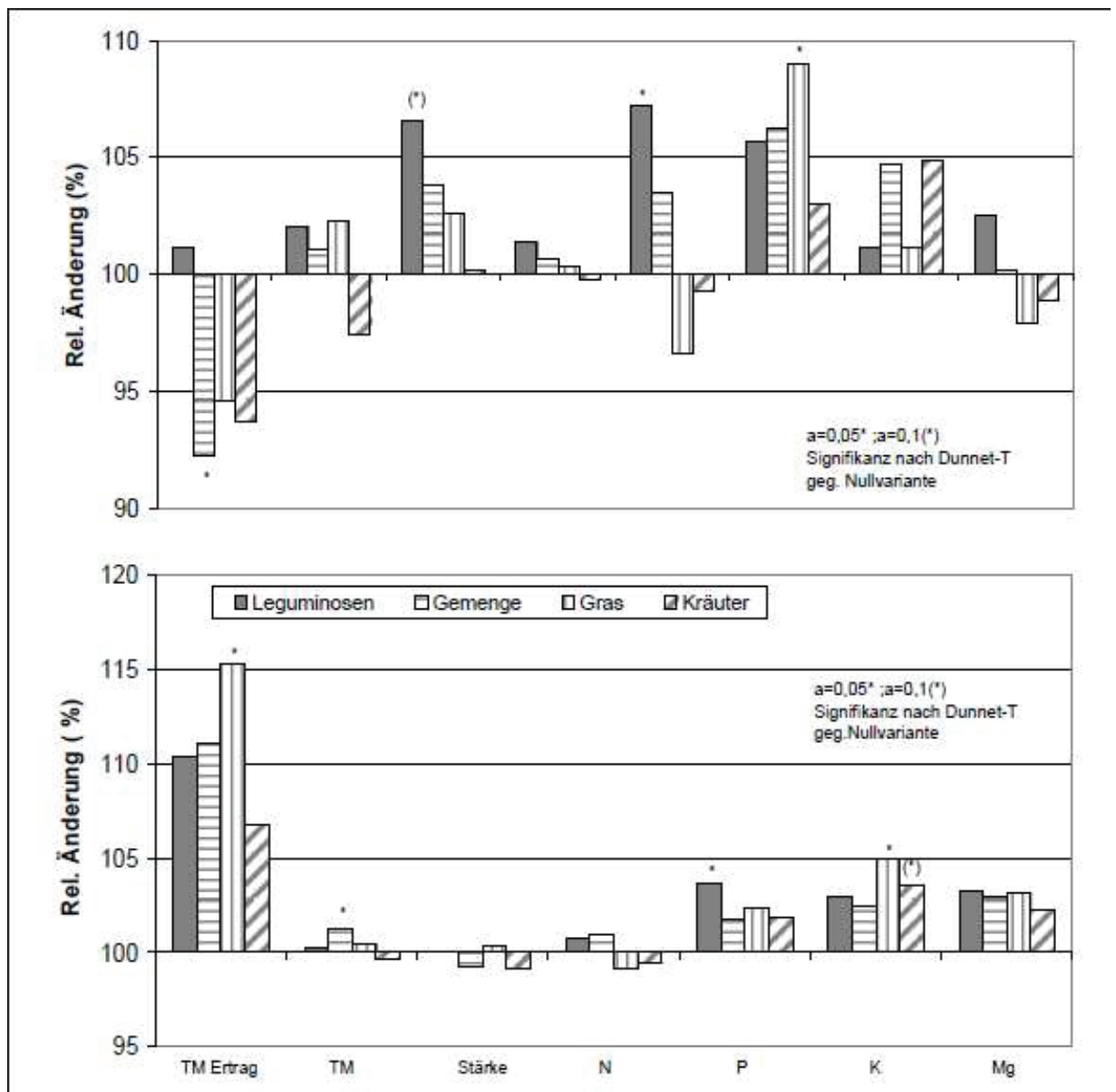


Abbildung 12 Einfluss auf die Erträge und Qualität der Nachfrüchte im Vergleich zu ohne Zwischenfruchtanbau (=100%), oben Mais, Mittelwert von 3 Jahren; unten Kartoffeln, Mittelwert von 2 Jahren;

Quelle: Kolbe 2007; S.3

4. Berechnung der Stickstofffixierungsleistung

Die Stickstofffixierungsleistung der Leguminosen spielt betriebswirtschaftlich eine wichtige Rolle. Sie ist bedeutsam für die Betriebsstickstoffbilanz und der Fruchtfolgeplanung. In der Regel werden die Berechnungen der Stickstofffixierung anhand der Trockenmasseerträge angefertigt. Dabei werden die Stickstoffmengen in der Wurzel nicht eingerechnet. Um die Leistung der Rhizobien zu bestimmen, werden in Feldversuchen verschiedene Techniken angewandt:

- Differenzmethode
- Natural-¹⁵N-abundance-Methode
- ¹⁵N-Anreicherungstechnik

Bei diesen Varianten werden alle Pflanzenteile berücksichtigt und fließen bei der Berechnung mit ein. (vgl. Loges et al 2001, S. 1)

Bei der Differenzmethode wird die Stickstofffixierungsleistung der Leguminose über die Differenz in der Gesamtstickstoffaufnahme zu einer Referenzpflanze, welche keine Stickstofffixierung durchführt, aber zur selben Zeit am selben Standort angebaut wird, geschätzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Leguminosen und die Referenzpflanzen dieselben Mengen Stickstoff aus dem Boden aufnehmen. Bei der erweiterten Differenzmethode wird auch der N-Gehalt im Spross, der Wurzel und der mineralisch pflanzenverfügbare Stickstoff mit beachtet.

$$\begin{aligned} \text{N}_2\text{-Fixierungsleistung kg ha}^{-1} = & [(\text{Spross-N}_{\text{Leg}} + \text{Wurzel-N}_{\text{Leg}} \text{ kg ha}^{-1}) & - \\ & (\text{Spross-N}_{\text{Ref}} + \text{Wurzel-N}_{\text{Ref}} \text{ kg ha}^{-1})] & + \\ & [\text{N}_{\text{min im Boden}_{\text{Leg}}} - \text{N}_{\text{min im Boden}_{\text{Ref}}}] \end{aligned}$$

Formel 2: Berechnung der Stickstofffixierung mittels Differenzmethode;

Quelle: Pietsch 2004, S. 33

Bei der Natural-¹⁵N-abundance-Methode wird das Verhältnis der stabilen Stickstoff-Isotope ¹⁴N und ¹⁵N in der Pflanze genutzt. Dadurch ist es möglich,

den Unterschied vom pflanzenverfügbaren Bodenstickstoff (0,3672 atom % ^{15}N) und molekularem Luftstickstoff (0,3663 atom% ^{15}N) feststellen. Durch einen Vergleich bei einer Referenzfrucht kann anschließend die Stickstofffixierung abgeschätzt werden.

Um die Stickstofffixierungsleistung der Leguminosen bei ^{15}N -Anreicherungsmethode zu ermitteln, wird der pflanzenverfügbare Stickstoff mit ^{15}N -Isotopen angereichert. Dabei wird versucht, die Differenz zwischen dem $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ -Verhältnis der Luft und dem pflanzenverfügbaren Stickstoff im Boden künstlich zu vergrößern. Anschließend wird eine Leguminose und eine nicht stickstofffixierende Referenzfrucht angebaut, so dass, aus deren Isotopenzusammensetzung den aus der Luft aufgenommenen Stickstoff der Leguminose ableiten.

$$\text{Ndfa} = [1 - (\text{atom \% } ^{15}\text{N excess}_{\text{Leguminose}} / \text{atom \% } ^{15}\text{N excess}_{\text{Referenzpflanze}})] \times 100$$

Formel 3: Berechnung der Stickstofffixierung mittels ^{15}N -Anreicherungsrechnung

Quelle: Pietsch 2004, S. 34

Die Abweichungen der Fixierungsleistung der einzelnen Methoden haben Loges et. al. 2001 untersucht. Dabei haben sie festgestellt, dass bei der ^{15}N -Anreicherungstechnik ähnliche Ergebnisse wie bei der einfachen Differenzmethode erzielt wurden. Bei dem Vergleich der einfachen Differenzmethode mit der ^{15}N -abundance-Methode wichen die Ergebnisse ab. Dies wurde in den Abbildungen 13 und 14 nochmal graphisch dargestellt.

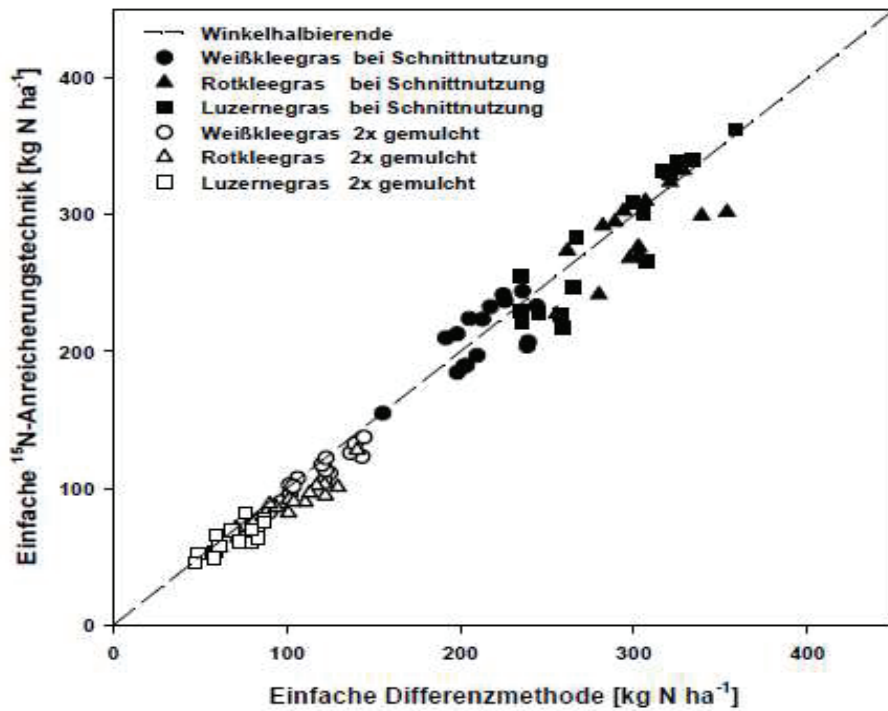


Abbildung 13: Vergleich von Methoden zur Bestimmung der N₂-Fixierung Einfache Differenzmethode vs. Einfache ¹⁵N-Anreicherungstechnik

Quelle: Loges et al 2001, S. 3

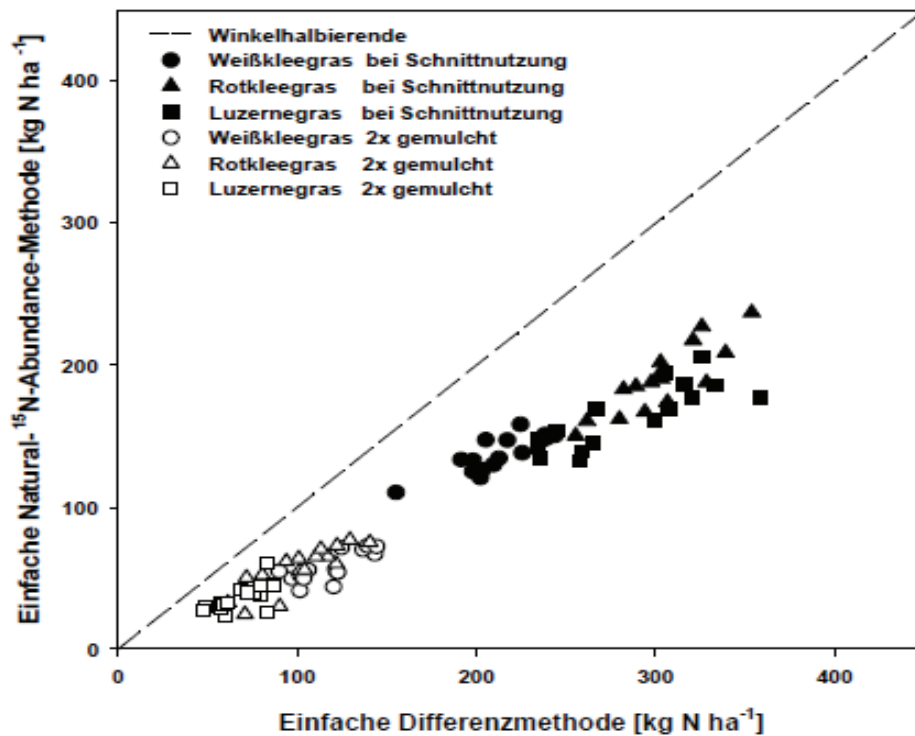


Abbildung 14: Vergleich von Methoden zur Bestimmung der N₂-Fixierung: Einfache Differenzmethode vs. Einf. Natural-¹⁵N-abundance-Methode

Quelle: Loges et al 2001, S. 3

Zusätzlich zu den unterschiedlichen Ergebnissen, müssen weitere Nachteile, wie z.B. Kosten und Durchführbarkeit, der einzelnen Verfahren beim Einsatz bedacht werden. Für den betrieblichen Einsatz sind sie weniger geeignet.

5. Stickstoffflächenbilanzierung

Um in der Landwirtschaft betriebswirtschaftlich und umweltschonend zu arbeiten, müssen Kenntnisse über die Stickstoffbilanz der eigenen betrieblichen Ackerschläge vorhanden sein. Das Ziel ist es, ausgeglichene Stickstoffbilanzen zu realisieren. Es gibt zwei Bilanzierungsformen, eine vereinfachte und eine erweiterte Stickstoffflächenbilanz. Für die vereinfachte Stickstoffflächenbilanz müssen die Stickstoffmengen, die mit Ernteprodukten entfernt werden und die auf dem Feld als Erntereste verbleiben, erfasst werden. Zusätzlich wird der Anteil des Stickstoffes der Ernteprodukte sowie den Ernteresten, der aus der Stickstofffixierung entstanden ist, benötigt. Dabei werden keine potentiellen Rückführungen von organischen Düngemitteln bei der Schnittnutzung oder der vorhandene Stickstoff in den Wurzeln der Leguminosen berücksichtigt.

In der erweiterten Stickstoffbilanz versucht man die Stickstoffströme möglichst genau zu betrachten, dafür werden weitere Angaben, wie z.B. der Stickstoff in Saat und im Pflanzgut, die Asymbiotische N-Fixierung, die gesamte Stickstoff Deposition und die Ammoniakverluste benötigt. (vgl. Kolbe & Köhler 2008, S. 57-58) In der folgenden Abbildung 14 ist die Stickstoffbilanzierung auf Schlagenebene dargestellt.

	Kurzfassung	Erweiterte Fassung
N-Zufuhr		
N-Düngung (organisch):	Düngermenge x N-Gehalt mit Abzug von Ausbringungsverlusten	Düngermenge x N-Gehalt mit Ausweisung von Ausbringungsverlusten (wählbar)
legume N-Bindung:	Berechnung der legumen N-Bindung mit einfachen Gleichungen	Berechnung der legumen N-Bindung unter Einbeziehung weiterer wichtiger Parameter mit komplexen Gleichungen
asymbiotische N-Bindung:	--	10 kg N/ha
Saat-/Pflanzgut-N:	--	Saat-/Pflanzgutmenge x N-Gehalt Saat-/Pflanzgut
N-Deposition (gesamt):	--	30 kg N/ha (für Sachsen)
N-Abfuhr		
Ernteprodukte:	Ertragsmenge x N-Gehalt pflanzlicher Produkte je nach Fruchtart oder Artengruppe	Ertragsmenge x N-Gehalt pflanzlicher Produkte je nach Fruchtart differenziert nach Erntezeitpunkt sowie Ertragsverteilung
N-Saldo		
Nährstoffmenge je Bezugseinheit:	Nährstoffvergleich	Brutto-Saldo Summe aus: Nitratauswaschung, NH ₃ -Verluste (extra ausgewiesen), Denitrifikation, Bodenvorratsänderung

Tabelle 14: Stickstoff-Bilanzierung nach Kurz- und erweiterter Fassung auf Schlagebene;

Quelle: Kolbe & Köhler 2008, S. 58

6. Schlussfolgerung

Die Stickstofffixierung der Rhizobien spielt weltweit eine große Rolle. Sie ermöglicht es den Landwirten mineralischen Dünger einzusparen und nebenbei das Klima zu schützen, denn pro ha Körnerleguminosen können bis zu 200 l Erdöl eingespart werden. (vgl. Schmid-Eisert 2010, S. 3). Zusätzlich fördern die Leguminosen den Ertrag der Folgefrucht bis zu 30 % (vgl. Schmid-Eisert 2010, S. 3) und erweitern die Fruchtfolge, sodass der Schädlings- und Krankheitsdruck für die Hauptfrucht geringer wird. Um die Leistungen der Rhizobien optimal zu nutzen, müssen grundlegende Kenntnisse über die Symbiose mit den Leguminosen vorhanden sein. Die Bildung der Knöllchen im Zusammenhang mit den Rhizobien ist schon seit längeren bekannt. Nun versuchen die Forscher mit Hilfe der Gene die Leistungen zu verbessern. Dafür ist es wichtig, die Bedeutung der einzelnen Gene bei der Pflanze und des Rhizobiums zur Stickstofffixierung zu kennen.

Zusätzlich wird sich darum bemüht, die Funktionen verschiedener Enzyme beim Stoffwechsel sowie bei der Nitrogenase zu ermitteln.

In mehreren Versuchen wurden die Vorfruchtwirkung, sowie die Stickstofffixierungsleistung verschiedener Leguminosen auf verschiedenen Standorten und verschiedenen Nutzungsformen geprüft. Dabei wurde eine große Spanne der Stickstofffixierungsleistung der Leguminosen festgestellt. Dies lag zum einen an den unterschiedlichen Witterungsbedingungen, aber auch an den Bodenverhältnissen und dem Versuchsaufbau. Ein Problem dabei ist es, die Fixierungsleistung der Rhizobien genau zu definieren. Selbst die Verfahren im Versuchswesen stellen unterschiedliche Aussagen zur Fixierungsleistung dar. Ein weiteres Problem ist, dass diese Methoden für die Anwendung in Betrieben weniger geeignet und zu teuer sind. Hier kommt die vereinfachte oder erweiterte Stickstoffbilanz zum Einsatz, welche allerdings mehrere geschätzte Parameter beinhaltet, und dadurch ungenauer wird.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass sagen, dass Leguminosen, trotz einer großen Variationsbreite, eine gute Vorfrucht sind. Sie haben neben der Stickstofffixierung auch viele weitere positive Eigenschaften, wie z.B. Humusmehrend und Bodengare fördernd. Leider sind die Leguminosen sehr ertragsschwankende Pflanzen. Sie reagieren stark auf ungünstige Standortverhältnisse, sowie auf Fehler beim Anbau.

Leider ist der Anbau besonders von Körnerleguminosen in den letzten Jahren zurückgegangen, und hat in Deutschland meist nur noch im ökologischen Landbau eine Bedeutung. Durch die geringere wirtschaftliche Bedeutung werden Zuchtprogramme eingestellt und die züchterischen Fortschritte gehen zurück.

7. Zusammenfassung

Stickstoff ist einer der wichtigsten Stoffe in der Landwirtschaft. Durch die Rhizobien hat die Natur Bakterien geschaffen, die die Fähigkeit besitzen molekularen Stickstoff in pflanzenverfügbaren Stickstoff umzuwandeln. Die verschiedenen Rhizobienstämme sind artenspezifisch und treten nur mit bestimmten Leguminosen in eine Symbiose ein. Die Infektion, sowie die Symbiose werden von verschiedenen Genen gesteuert. Der molekulare Stickstoff wird durch einen Enzymkomplex, der Nitrogenase, in pflanzenverfügbaren Stickstoff gespalten. Dieser Vorgang ist sehr energieaufwendig, weshalb die Rhizobien die Pflanzen als Symbionten benötigen. Die Umsatzleistungen der einzelnen Leguminosen sind sehr unterschiedlich. Wobei die Umweltfaktoren, wie z.B. Boden oder Witterung, eine wichtige Rolle spielen. Die Berechnungen der Stickstofffixierung sowie die Stickstoffflächenbilanz gestalten sich schwierig, da mehrere Faktoren zwar untersucht wurden, aber für einen Einsatz im Betrieb, aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen und Voraussetzungen ungeeignet sind, so dass die Stickstofffixierungsleistung geschätzt werden muss. In der Forschung versucht man die Leistungen der Rhizobien zu steigern, sowie weitere Zusammenhänge der Symbiose mit den Leguminosen zu verstehen, und diese eventuell auf andere Pflanzen umzusetzen.

8. Summery

Nitrogen is one of the most important substances in agriculture. Through rhizobia nature has created bacteria which can transform molecular nitrogen into plant available nitrogen. The various rhizobia strains are species-specific and only form a symbiosis with specific legumes. The infection as well as the symbiosis are controlled by different genes. Molecular nitrogen is segregated into plant-specific nitrogen through an enzyme complex known as nitrogenase. This process takes a lot of energy, which is why rhizobia require plants as symbionts. The productivity of the individual legumes are highly diverse. In this context, environmental factors, for instance related to soil or weather, play an important part. The calculations of the nitrogen fixation and the nitrogen balances are challenging. Although several factors were investigated, they are unsuitable for the use every day because of the various conditions and requirements. As a result, the nitrogen fixation must be estimated. In research one attempts to increase the performance of the rhizobia, as well as to understand further relations of the symbiosis with the legumes in order to potentially transfer them to other plants.

Quellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

Heldt, H. W. (2003). *Pflanzenbiochemie*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.

Kahnt, G. (2008). *Leguminosen*. VLG Verlag.

Taiz, L., & Eduardo, Z. (2000). *Physiologie der Pflanzen*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin.

Internetquellen

Albrecht, R., & Guddat, C. (2004). *Welchen Wert haben Körnerleguminosen in der Fruchtfolge*.

<http://www.tll.de/ainfo/pdf/kleg0104.pdf>: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.

Fischinger, S. K. (2009). *Die Bedeutung der CO₂-Fixierung von Leguminosenknöllchen für ihre Aktivität und Effizienz*. Georg-August-Universität Göttingen:

<http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2009/fischinger/fischinger.pdf>.

Jung, R. (2003). *Stickstoff-Fixierleistung von Luzerne (*Medicago sativa* L.), Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Persischem Klee (*Trifolium resupinatum* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen*.

http://orgprints.org/2241/1/Diss_RJung_dps.pdf: Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Georg-August-Universität Göttingen.

Kolbe Hartmut;. (2008). *Verfahren zur Berechnung der N-Bindung von Leguminosen im Ökolandbau*. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Erzeugung Leipzig,

<http://orgprints.org/13627>.

- Kolbe, H. (2007). *Zwischenfrüchte als Vorfrüchte für die Ertrags- und Qualitätsleistung von Mais und Kartoffeln*. 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau:
<http://orgprints.org/view/projects/wissenschaftstagung-2007.html>.
- Kolbe, H., & Köhler, B. (2008). *Erstellung und Beschreibung des PC Programms BEFU, Teil Ökologischer Landbau; Verfahren der Grunddüngung, Legumen N-Bindung, Nährstoff- und Humusbilanzierung*.
http://orgprints.org/15101/1/BEFU_Teil_Oekologischer_Landbau08.pdf
 f: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen.
- Kolbe, H., Karalus, W., Hänsel, M., Grünbeck, A., & Gramm, M. (2002). *Körnerleguminosen im Ökologischen Landbau*. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft:
<http://orgprints.org/15102/3/Koernerleguminosen.pdf>.
- Liebhard. (2007). *Bedeutung der N₂-Bindung in Leguminosen*. Universität für Bodenkultur Wien:
<http://www.heffterhof.at/img/Umweltgespraeche/liebhard.pdf>.
- Loges, R. (2010). *Klee gras und Luzerne: Was passt am besten wohin in Schleswig Holstein?* 13. Grundfuttertag der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein:
http://www.lwksh.de/cms/fileadmin/user_upload/Downloads/Pflanzenbau/Gruenland-Futterbau/2010/Klee gras_Loges_10.pdf.
- Loges, R., Ingwersen, K., & Taube, F. (2001). *Methodische Aspekte zur Bestimmung der symbiotischen Stickstoff-Fixierungsleistung von Leguminosen*. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,
<http://orgprints.org/2147/1/loges-2001-methode-stickstoff-fixierung-leguminose.pdf>.

- Loges, R., Westphal, R., & Taube, F. (2009). *Ertragsleistung und Futterqualität von extensiv bewirtschafteten Leguminosen-Gras-Beständen im ökologischen Ackerfutterbau*.
http://www.ulmer.de/Artikel.dll/gja-loges-et-al_MTEyMjg4NQ.PDF.
- Nilles, P. (2008). *Experimentelle Ansätze zur Untersuchung spezifischer Prozessierung extrazytoplasmatischer Proteine durch drei allele Signalpeptidasen aus Bradyrhizobium japonicum*.
http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=994892330&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=994892330.pdf
- Perlick, A., & Küster Helge, K. (1999). *Forschung im europäischen Verbund: das EU-Projekt FIXNET*.
http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/s38_45_perlick.pdf.
- Pietsch, M. G. (2004). *N₂-Fixierungsleistung und Wasserverbrauch von Futterleguminosen im Ökologischen Landbau unter den klimatischen Bedingungen der pannonischen Region Österreichs*. Universität für Bodenkultur, Wien:
<http://orgprints.org/3080/1/GPDISS.pdf>.
- Pommer, G., & Fink, K. (1998). *Anbauverfahren mit Körnerleguminosen im Ökologischen Landbau*.
http://www.lfl.bayern.de/iab/oekologisch/pflanzenbau/08789/linkurl_0_2_0_0.pdf.
- Rinnofner, Friedel, Farthofer, Pietsch, & Freyer. (2005). *Effizienz verschiedener Zwischenfruchtvarianten unterschiedlich hohen Leguminosenanteils in der Reduktion der Mineralstickstoffgehalte im Boden unter pannonischen Standortbedingungen*.
http://orgprints.org/6232/1/Rinnofner_et_al_2005_ZF_PBT.pdf.
- Sass, O. (2009). *Marktsituation und züchterische Aktivitäten bei Ackerbohnen und Erbsen in der Eu*.
http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/leguminosen/Sass.pdf

- Schmid-Eisert, A. (2010). *Wirtschaftlichkeit des Körnerleguminosenanbaus*.
http://www.bioland.de/fileadmin/bioland/lv/mitte/file/Wirtschaftlichkeit_Leguminosen.pdf.
- Specht, M. (2009). *Anbau von Körnerleguminosen in Deutschland – Situation, limitierende Faktoren und Chancen*.
http://www.ulmer.de/Artikel.dll/specht_MTE0NzMzNA.PDF: Journal für Kulturpflanzen.
- Wichmann, S., Loges, R., & Taube, F. (2006). *Kornerträge, N₂-Fixierungsleistung und N-Flächenbilanz von Erbsen, Ackerbohnen und Schmalblättrigen Lupinen in Reinsaat und im Gemenge*.
http://www.ulmer.de/artikel.dll/wichmann-et-al_MTI5ODA3.PDF?UID=93544111FB64A2D9FFB28C18B5A4C0DFCEAC6DA8883504.
- Wikipedia. (2010). Knöllchenbakterien
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kn%C3%B6llchenbakterien>.
Stand: 18.10.2010
- Zöschg, M., & Mitterer, D. (2008). *Der Düngemittelmarkt ist in Bewegung*.
http://www.beratungsring.org/stepone/data/pdf/3e/07/00/zoeschg_mitterer_duengemittelmarkt.pdf.