



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft



---

## Schlussbericht zum Thema

---

# Thema

FKZ: 2819OE074; 2819OE013; 2819OE075

Projektnehmer/Projektnehmerin:

DIL Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V.

Ölmühle Moog GmbH

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für  
Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES)

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische Landwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in die Praxis umgesetzt. Das Programm gliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder - das Forschungs- und das Informationsmanagement.

**Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter:**

[www.bundesprogramm.de](http://www.bundesprogramm.de)  
[www.oekolandbau.de/forschung](http://www.oekolandbau.de/forschung)

**Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:**

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung  
Bundesprogramm Ökologischer Landbau  
Deichmanns Aue 29  
53179 Bonn  
Tel.: 0228-6845-3280  
E-Mail: [boel-forschung@ble.de](mailto:boel-forschung@ble.de)

# Schlussbericht

## Projekt: Linovit

**Vorhabenbezeichnung:** Innovative Ansätze zum Umgang mit qualitätsbildenden und qualitätsmindernden Inhaltsstoffen von Lein und dessen Verarbeitungsprodukten mit dem Fokus auf Blausäure

**Laufzeit des Projektes:** 01.02.2020 – 31.10.2024

**Berichtszeitraum:** 01.02.2020 – 31.12.2024

### Projektpartner:

FKZ: 2819OE074

DIL Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V.  
Prof.-von-Klitzing-Str. 7, D-49610 Quakenbrück

FKZ: 2819OE013

Ölmühle Moog GmbH  
Klappendorf 2, D-01623 Lommatzsch

FKZ: 2819OE075

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) - Nachwachsende Rohstoffe, Campus Klein-Altendorf, Klein-Altendorf 2, 53359 Rheinbach-Wormersdorf

## Projektkurzfassung

### **Innovative Ansätze zum Umgang mit qualitätsbildenden und qualitätsmindernden Inhaltsstoffen von Lein und dessen Verarbeitungsprodukten mit dem Fokus auf Blausäure**

Autorinnen: Juliette Rudzick, Hanna Blum, Sarah Diener

Kontakt:

DIL Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V., Professor-von-Klitzing-Straße 7, 49610 Quakenbrück, Frau Juliette Rudzick, E-Mail: j.rudzick@dil-ev.de

Universität Bonn, INRES Nachwachsende Rohstoffe, Klein Altendorf 2, 53359 Rheinbach, Frau Hanna Blum, E-Mail: hblum@uni-bonn.de

BIO PLANÈTE Ölmühle Moog GmbH, Klappendorf 1, 01623 Lommatzsch, Frau Sarah Diener, E-Mail: sarah.diener@bioplanete.com

Das Forschungsprojekt Linovit widmete sich der Optimierung des Leinanbaus sowie der Reduktion von qualitätsmindernden Inhaltsstoffen wie Blausäure in Leinsamen und Leinsamenpresskuchen. Ziel war es, Leinsamenpresskuchen, ein Nebenprodukt der Leinölproduktion, als hochwertige Protein- und Ballaststoffquelle für die Lebensmittelindustrie nutzbar zu machen.

Im Anbaubereich wurden Sommer- und Winterleinsorten unter verschiedenen Bedingungen untersucht, um die Auswirkungen von Anbaufaktoren wie Standort, Sorte, pH-Wert und Unkrautregulierung auf Ertrag und Inhaltsstoffe zu bewerten. In einem vierjährigen Monitoring des Praxisanbaus wurden die qualitäts- und ertragswirksamen Faktoren bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass komplexe Zusammenhänge zwischen Sorte, Standort, Witterung und Anbaufaktoren auf die Qualität der Leinsaat wirken. Teilweise können diese über Sortenwahl ( $\alpha$ -Linolensäure) oder die Auswahl geeigneter Flächen (Cadmium) beeinflusst werden, teilweise sind abiotische Faktoren, allen voran die Witterung dominant (Blausäure). Winterlein stellt aufgrund seiner intensiven Durchwurzelung und dem damit verbundenen Aufschluss von Wasser- und Nährstoffvorräten eine interessante Alternative für frühjahrstrockene Ackerbaugebiete dar. Vor- und Mittelgebirgslagen scheiden aufgrund möglicher Frostschäden und der Gefahr der Auswinterung für den Anbau aus. Der Anbau von Sommerlein ist gekennzeichnet von hohen Anforderungen an die Bestandsführung sowie starken Ertragschwankungen. Winter- und Sommerlein zeigten gute Qualitäten und eine ansprechende Sensorik.

Zur Reduktion der Blausäure im Leinsamenpresskuchen wurde ein dreistufiger Prozess entwickelt: Zunächst erfolgt eine Inkubation des Presskuchens mit 30 % Wasser bei 40 °C über 30 Minuten, um die enzymatische Hydrolyse der cyanogenen Glycoside zu fördern. Anschließend wird die entstandene Blausäure durch Extrusion bei Produkttemperaturen  $\geq 150$  °C entfernt. Eine abschließende Trocknung im Wirbelschichttrockner stellt die Produktstabilität sicher. Dieser Prozess ermöglicht die Senkung des Blausäuregehalts unter die

gesetzlichen Grenzwerte und eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, etwa als texturiertes Pflanzenprotein (TVP) oder als Leinmehl für Backwaren.

Zusätzlich wurden sensorische und funktionale Eigenschaften des behandelten Presskuchens untersucht. Dabei zeigte sich, dass die funktionalen Eigenschaften der Proteine durch den Extrusionsprozess beeinträchtigt werden können. Dennoch konnte das entwickelte TVP, das auch in Kombination mit Erbsenprotein getestet wurde, Potenzial für die Verwendung in pflanzlichen Hackprodukten zeigen.

Die Projektergebnisse verdeutlichen die Bedeutung einer ganzheitlichen Betrachtung entlang der gesamten Wertschöpfungskette – vom Anbau über die Verarbeitung bis zur Anwendung. Neben technologischen Fortschritten wurde durch die Organisation eines Round Tables zur Blausäureanalytik ein wichtiger Beitrag zum Wissenstransfer und zur Harmonisierung analytischer Standards geleistet.

## **Abstract**

### **Novel approaches to handle flax's beneficial and detrimental nutrients focusing on hydrogen cyanide and its value chain products**

Authors: Juliette Rudzick, Hanna Blum, Sarah Diener

Contact:

DIL German Institute of Food Technologies, Professor-von-Klitzing-Straße 7, 49610 Quakenbrück, Ms. Juliette Rudzick, email: [j.rudzick@dil-ev.de](mailto:j.rudzick@dil-ev.de)

University of Bonn, INRES Renewable Resources, Klein Altendorf 2, 53359 Rheinbach, Ms. Hanna Blum, email: [hblum@uni-bonn.de](mailto:hblum@uni-bonn.de)

BIO PLANÈTE Ölmühle Moog GmbH, Klappendorf 1, 01623 Lommatzsch, Ms. Sarah Diener, email: [sarah.diener@bioplanete.com](mailto:sarah.diener@bioplanete.com)

The Linovit research project focused on optimising flaxseed cultivation and reducing undesirable components, such as hydrogen cyanide, in flaxseed and flaxseed press cake. The goal was to utilise flaxseed press cake, a by-product of flaxseed oil production, as a high-quality protein and fibre source for the food industry.

In the cultivation sector, both summer and winter flaxseed varieties were examined under various conditions to evaluate the effects of factors such as location, variety, pH levels, and weed control on yield and composition. A four-year monitoring of practical cultivation assessed the quality and yield-related factors. The results highlighted the complex interactions between variety, location, weather, and cultivation practices that influence flaxseed quality. While some factors, such as  $\alpha$ -linolenic acid content, can be influenced by variety selection

and cadmium levels by site selection, abiotic factors—particularly weather conditions affecting hydrogen cyanide content—remain predominant.

Winter flaxseed, with its deep rooting system that improves water and nutrient availability, presents an interesting alternative for arable regions prone to spring drought. However, regions at higher altitudes or in hilly areas are less suitable due to risks of frost damage and winterkill. Summer flaxseed cultivation, on the other hand, is characterised by high management demands and significant yield variability. Both winter and summer flaxseed varieties demonstrated good quality and appealing sensory characteristics.

To reduce hydrogen cyanide in flaxseed press cake, a three-step process was developed. First, the press cake is incubated with 30% water at 40 °C for 30 minutes to promote enzymatic hydrolysis of cyanogenic glycosides. Subsequently, the released hydrogen cyanide is removed through extrusion at product temperatures  $\geq 150$  °C. Finally, drying in a fluidised bed dryer ensures product stability. This process reliably reduces the hydrogen cyanide content below legal thresholds and expands the potential applications of flaxseed press cake, such as textured vegetable protein (TVP) or flaxseed flour for baked goods.

Additionally, the sensory and functional properties of the treated press cake were analysed. It was observed that the extrusion process can impair protein functionality. Nevertheless, the developed TVP, which was also tested in combination with pea protein, showed potential for use in plant-based mince products.

The project results highlight the importance of a holistic approach across the entire value chain—from cultivation to processing and application. Beyond technological advancements, the organisation of a Round Table on hydrogen cyanide analytics made a significant contribution to knowledge transfer and the harmonisation of analytical standards.

# Inhaltsverzeichnis

<b>PROJEKTKURZFASSUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>8</b>
<b>1 EINFÜHRUNG .....</b>	<b>9</b>
1.1 Gegenstand des Vorhabens.....	9
1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projektes, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖL oder zu konkreten Bekanntmachungen und Ausschreibungen .....	10
1.3 Planung und Ablauf des Projektes.....	11
<b>2 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND.....</b>	<b>14</b>
2.1 Bedeutung von Öllein und chemische Zusammensetzung .....	14
2.1.1 Cyanogene Glycoside in Leinsamen .....	14
2.1.2 Toxizität und Grenzwert von Blausäure in Lebensmitteln .....	15
2.2 Verfahren zur Reduktion .....	16
<b>3 MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>17</b>
3.1 Rohstoffe .....	17
3.1.1 Verwendete Leinsamen für Anbau.....	17
3.1.2 Verwendeter Leinsamenpresskuchen für Blausäurereduktion.....	17
3.2 Methoden zum Anbau .....	18
3.2.1 Standortscreening.....	18
3.2.2 Anbauoptimierung zur Ertrags- und Qualitätsstabilisierung.....	19
3.3 Verarbeitung von Leinsamen zu Öl und Presskuchen .....	20
3.3.1 Verarbeitung .....	20
3.3.2 Analytik Verarbeitungsprodukte Presskuchen und Öl .....	21
3.4 Methoden zur Blausäurereduktion (DIL) .....	23
3.4.1 Methodenscreening .....	24
3.4.2 Versuche zur Maßstabsübertragung.....	27
3.4.3 Fermentation .....	34
3.5 Analysen zur Charakterisierung.....	36
3.5.1 Externe Analysen.....	36
3.5.2 Chemische Analysen am DIL.....	36
3.5.3 Physikalische Analysen am DIL.....	38
3.5.4 Mikrobielle Analysen am DIL.....	40

<b>3.6</b>	<b>Sensorik</b> .....	<b>40</b>
3.6.1	Sensorik der Leinöle und Presskuchen .....	40
3.6.2	Verbraucherakzeptanztest .....	40
<b>4</b>	<b>AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Arbeitspaket Grow (Universität Bonn, Gäa e.V.)</b> .....	<b>41</b>
4.1.1	Sorten .....	41
4.1.2	Anbaufaktoren .....	60
<b>4.2</b>	<b>AP 1: Analyse qualitätswirksamer Faktoren bei Leinsamen und dessen Verarbeitungsprodukte</b> .....	<b>86</b>
4.2.1	TVH I: Standortscreening .....	86
4.2.2	TVH II: Verarbeitung und Analytik von Leinsamen zu Öl und Presskuchen (ÖM) .....	117
4.2.3	TVH III: Sensorik (ÖM) .....	120
<b>4.3</b>	<b>AP 2: Technologische Ansätze zur Minimierung der Blausäure in Leinsamen und Weiterverarbeitungsprodukten</b> .....	<b>122</b>
4.3.1	TVH I: Vorbehandlung von Leinsamen und Presskuchen (DIL) und TVH II: Abtrennung von Blausäure (DIL) .....	122
4.3.2	TVH III: Fermentation (DIL) .....	129
4.3.3	TVH V: Orientierende Versuche zur Maßstabsübertragung (DIL) .....	132
4.3.4	TVH IV: Versuche mit besten Rohstoffen (DIL) .....	145
<b>4.4</b>	<b>AP 3: Nutzung von Reststoffen aus der Ölpressung für innovative und funktionelle Lebensmittel aus Leinsamen</b> .....	<b>147</b>
4.4.1	TVH I: Wirtschaftliche Abschätzung der Verfahren (DIL) .....	147
4.4.2	TVH II: Prüfung des Leinmehls in Bestandsrezepturen (ÖM) .....	149
4.4.3	TVH III: Funktionalität, Lebensmittelsicherheit und Qualität von behandeltem Presskuchen (ÖM, DIL) .....	151
4.4.4	TVH IV: Applikationsfelder von behandeltem Presskuchen (ÖM) .....	164
<b>4.5</b>	<b>Round Table</b> .....	<b>165</b>
<b>5</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>168</b>
<b>5.1</b>	<b>GROW und Standortscreening</b> .....	<b>168</b>
5.1.1	Standortscreening .....	168
5.1.2	Grow .....	169
<b>5.2</b>	<b>Blausäurereduktion</b> .....	<b>170</b>
5.2.1	Thermische und mechanische Verfahren .....	170
5.2.2	Fermentationsverfahren .....	173
5.2.3	Erreichte Meilensteine .....	174
<b>5.3</b>	<b>Produktentwicklung</b> .....	<b>175</b>
5.3.1	Einfluss der Behandlung zur Blausäurereduktion auf Leinsamenpresskuchen .....	175
5.3.2	Applikationsfelder .....	177
<b>6</b>	<b>VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>177</b>

<b>7</b>	<b>GEGENÜBERSTELLUNG DES URSPRÜNGLICH GEPLANTEN ZU DEN TATSÄCHLICH ERREICHTEN ZIELEN UND HINWEISE AUF WEITERFÜHRENDE FRAGESTELLUNGEN .....</b>	<b>179</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>180</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>181</b>
<b>10</b>	<b>ÜBERSICHT ÜBER ALLE IM BERICHTZEITRAUM VOM PROJEKTNEHMER REALISIERTEN VERÖFFENTLICHUNGEN ZUM PROJEKT, BISHER UND GEPLANTE AKTIVITÄTEN ZUR VERARBEITUNG DER ERGEBNISSE.....</b>	<b>188</b>
<b>11</b>	<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>190</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>191</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AGW.....	Arbeitsplatzgrenzwert
DSC .....	Differential Scanning Calorimetry
HCN.....	Cyanwasserstoff (Blausäure)
HPLC.....	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
LEE .....	Lein-Erbсен-Extrudat
LSPK.....	Leinsamenpresskuchen
LSV .....	Landessortenversuche
NMR.....	Kernspinresonanzspektroskopie
PEF .....	Pulsed Electric Fields
SE .....	Sonnenblumenextrudat
SZ .....	Saatzeitpunkt
TKM .....	Tausendkornmassen
TRGS .....	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TS .....	Trockensubstanz

# 1 Einführung

## 1.1 Gegenstand des Vorhabens

Zwischen Superfood und den klassischen Nahrungspflanzen nimmt der Lein seit Jahren einen beständigen Platz als hochwertiges Lebensmittel und therapeutisch wirksame Arzneipflanze ein. Die einladenden offenen, meist blauen Blüten locken Insekten an, die geringen ökologischen Standortansprüche bringen den Lein in fast nahezu jede Blühmischungen und auf heimische Äcker. In dem traditionellen Begriff von der „Fahrt ins Blaue“ spiegelt sich die ästhetische Attraktivität der Pflanze für den Menschen wider.

Die wertvollen Inhaltsstoffe, wie der hohe Gehalt essentieller Omega 3 und Omega 6 Fettsäuren, Ballaststoffe und Mineralstoffe, aber auch die reichhaltig vorkommenden phytoöstrogenen Lignane mit ihrer antioxidativen Wirkung, machen die traditionell genutzten Samen der Leinpflanze zu einem geschätzten, hochwertigen Lebensmittel mit funktioneller Vielfalt. Ob als Leinsaat, Leinschrot oder als Leinöl erfahren Leinprodukte einen steigenden Absatz und der Bedarf nach Rohware nimmt deutlich zu. Neue Technologien und das gesteigerte Interesse der Verbraucher an proteinreichen Lebensmitteln ermöglichen der Industrie, aus Nebenströmen der Rohstoffverarbeitung neue Produkte und funktionelle Lebensmittel zu kreieren. Vor allem der bei der Leinölproduktion entstehende Presskuchen kann mit Hilfe verschiedener Mahltechniken als Leinmehl angeboten und als aromareiches, glutenfreies Mehl genutzt werden. In Shakes oder als Zusatz im Müsli ist das Mehl ein attraktiver Inhaltsstoff zur Supplementierung.

Neben den wertgebenden Inhaltsstoffen der Leinsamen und deren Verarbeitungsprodukten, können Leinsamen für den Menschen deutlich wertmindernde Inhaltsstoffe enthalten, welche im Sinne der Lebensmittelsicherheit minimiert werden müssen. Dazu gehören externe „Kontaminanten“, wie beispielsweise Cadmium, welches in Leinsamen akkumuliert wird, dessen Gehalte aber über gezielte Standortwahl erfolgreich beeinflusst werden können. Problematischer sind pflanzeigene Inhaltsstoffe, Syntheseprodukte zur Schädlingsabwehr beispielsweise, zu denen unter anderem die cyanogenen Glykoside gehören, die in den Leinsamen zu Blausäure abgebaut werden. Durch die Entölung der Saat erfahren nicht nur die wertgebenden Inhaltsstoffe des Leins im Presskuchen eine Anreicherung, sondern auch die problematischen. Im Fall der Blausäure stellen die neuen Verwendungsbereiche des Leins ein Risiko für den Endverbraucher dar, welches bis dato noch nicht ausreichend betrachtet wurde.

Der Lein bewegt sich somit in einem interessanten Spannungsfeld aus wertgebenden und wertmindernden Inhaltsstoffen. In dem geplanten Vorhaben sollten in der ersten Projektphase die qualitätswirksamen Faktoren entlang der gesamten Wertschöpfungskette dokumentiert und analysiert werden. Auf diese Weise sollten die Stellschrauben zur Anreicherung wertgebenden und Vermeidung wertmindernden Stoffe identifiziert werden.

In der zweiten Phase wurde die Blausäure, die als kritische Substanz immer weiter in den Fokus der Öffentlichkeit rückt (EFSA 2019), durch die Entwicklung von technologischen Prozessen für Saat und Presskuchen auf der Verarbeitungsebene minimiert. Es wurden gezielt technologische Verfahren zum Umgang mit der Risikosubstanz geprüft und entwickelt, welche neben der Minimierung des Blausäuregehaltes gleichzeitig die Erhaltung der wertgebenden und aromabildenden Faktoren sicherstellen.

In der dritten Projektphase wurde die Nutzung von Reststoffen aus dem Leinölverarbeitungsprozess hin zu neuen, funktionellen, proteinreichen Lebensmitteln untersucht.

Neben der Erhöhung der Sicherheit von Leinprodukten war ein wichtiges Ziel des Vorhabens die Bewerbung von wertgebenden Eigenschaften im Sinne einer Bereitstellung von gesunden Lebensmitteln und der positiven Sensorik von Leinprodukten, um eine höhere Verbraucherakzeptanz zu erreichen. Dabei ist es für die Ölmühle Moog besonders wichtig sowohl Rohwaren, als auch ein geeignetes technologisches Verfahren zu verwenden, welche konform mit der EG-Öko-Verordnung sind.

## **1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projektes, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖL oder zu konkreten Bekanntmachungen und Ausschreibungen**

Das Vorhaben nimmt Bezug auf die Bekanntmachung Nr. 12/18/31 über die Durchführung von FuE-Vorhaben zum Thema „Beitrag ökologisch und nachhaltig erzeugter Lebensmittel zu zukunftsfähigen Ernährungssystemen“ im BÖLN.

Die Projektziele reihten sich insbesondere in die Handlungsfelder der nachhaltigen Erzeugung und Bereitstellung qualitativ hochwertiger Lebensmittel aus ökologischem Landbau ein. Gemäß den Zielen der Zukunftsstrategie ökologischer Landbau (ZÖL) und des nationalen Programms für nachhaltigen Konsum (NPNK) wurden neben der Bereitstellung von ökologischen Lebensmitteln, herausragende Qualitätsmerkmale und die Funktionalität von Lebensmitteln mit ernährungsphysiologisch hohem Wert, als Basis für die Akzeptanz durch den Verbrauchenden, unterstützt.

Zudem sollte durch die Identifizierung wertmindernder Inhaltsstoffe in pflanzlichen Lebensmitteln und der Entwicklung von Minimierungskonzepten, den Anforderungen nach einer transparenten und sicheren Lebensmittelproduktion entsprochen werden. Qualität und Funktionalität wurden als wichtige Kaufargumente und damit zentrale Faktoren stabiler Wertschöpfungsketten gesehen. Das Vorhaben leistete im Besonderen einen Beitrag folgenden Punkten der Richtlinie:

- a) Ökologische/nachhaltige Lebensmittelverarbeitung:
  - i. Ökologische und nachhaltige Lebensmittelverarbeitung entlang der Wertschöpfungskette

- ii. Erhöhung der Ressourceneffizienz in der ökologischen und nachhaltigen Lebensmittelverarbeitung
  - iv. Minimierung von Lebensmittelabfällen, einschließlich Nachernteverluste und Verbesserung der Haltbarkeit von ökologischen und nachhaltigen Lebensmitteln
- c) Qualität ökologischer/nachhaltiger Lebensmittel
- iii. Verbesserung der Qualität verarbeiteter Lebensmittel

### **1.3 Planung und Ablauf des Projektes**

Das FuE-Vorhaben war als Verbundprojekt eines Wirtschaftsunternehmens der ökologischen Lebensmittelherstellung und zwei Forschungspartnern ausgelegt. Die Ölmühle Moog übernahm als Praxispartner VERARBEITUNG & ANALYTIK die Verarbeitung der Samen, analytische Untersuchungen und sensorische Bewertungen sowie die Testung neuer Produkte. Der Forschungspartner PFLANZE, die Universität Bonn, war für das Standortscreening verantwortlich, während der Forschungspartner TECHNOLOGIE, das Deutsche Institut für Lebensmitteltechnik (DIL), die technologische Entwicklung zur Blausäurereduktion, die wirtschaftliche Abschätzung der Verfahren sowie die Projektkoordination übernahm.

Das Vorhaben gliederte sich in drei Arbeitspakete (AP) mit jeweiligen Teilvorhaben (TVH). Im ersten Arbeitspaket (AP 1) stand eine umfassende Analyse der qualitätsbildenden und qualitätsmindernden Faktoren von Leinsamen und dessen Verarbeitungsprodukten im Fokus. TVH 1.I konzentrierte sich auf den Leinbau, wobei bundesweit zentrale Einflussfaktoren wie Standortbedingungen und Anbauverfahren analysiert wurden, insbesondere deren Einfluss auf die Ausbildung glycosidischer Verbindungen (Blausäure). In TVH 1.II wurden die gewonnenen Leinsamen zu Öl und Presskuchen verarbeitet, wobei die Ausbeute und die Inhaltsstoffe analysiert wurden. TVH 1.III umfasste die sensorische Bewertung der Öle und Presskuchen, um die Eigenschaften mit bestimmten Inhaltsstoffen, Sorten und Standorten in Korrelation bringen zu können.

Parallel dazu wurde in AP 2 die technologische Verarbeitung von Leinsamen zur Reduktion des Blausäuregehalts untersucht. TVH 2.I befasste sich zunächst mit der Vorbehandlung der Leinsamen, um die cyanogenen Glycoside zu spalten. In TVH 2.II wurden Verfahren zur Abtrennung der Blausäure, wie Extrusion und Wirbelschichttrocknung, geprüft. Zeitgleich erfolgte in TVH 2.III eine Fermentation des Presskuchens mit Laktobazillen, um die Möglichkeit der Reduktion von Glycosiden und damit des Blausäuregehalts zu untersuchen. TVH 2.IV zielte darauf ab, durch die Kombination von Leinsamen mit geringem Gehalt an glycosidischen Verbindungen und dem optimalen technologischen Abreicherungsprozess eine maximale Blausäurereduktion zu erreichen. Abschließend wurden in TVH 2.V orientierende Versuche zur Übertragung der Ergebnisse auf einen großtechnischen Maßstab durchgeführt.

Das dritte Arbeitspaket (AP 3) befasste sich mit der Nutzung von Reststoffen aus der Ölpressung für funktionelle Lebensmittel. In TVH 3.I wurde die wirtschaftliche Machbarkeit der gesamten Produktionskette zur Blausäureanreicherung analysiert. TVH 3.II führte einen Verbraucherakzeptanztest durch, bei dem der prozessierte Leinsamenpresskuchen mit einem handelsüblichen Referenzprodukt verglichen wurde. In TVH 3.III wurden die funktionellen Eigenschaften des behandelten Leinsamenpresskuchens im Vergleich zum unbehandelten untersucht. Abschließend ermittelte TVH 3.IV potenzielle Anwendungsfelder für den behandelten Leinsamenpresskuchen.

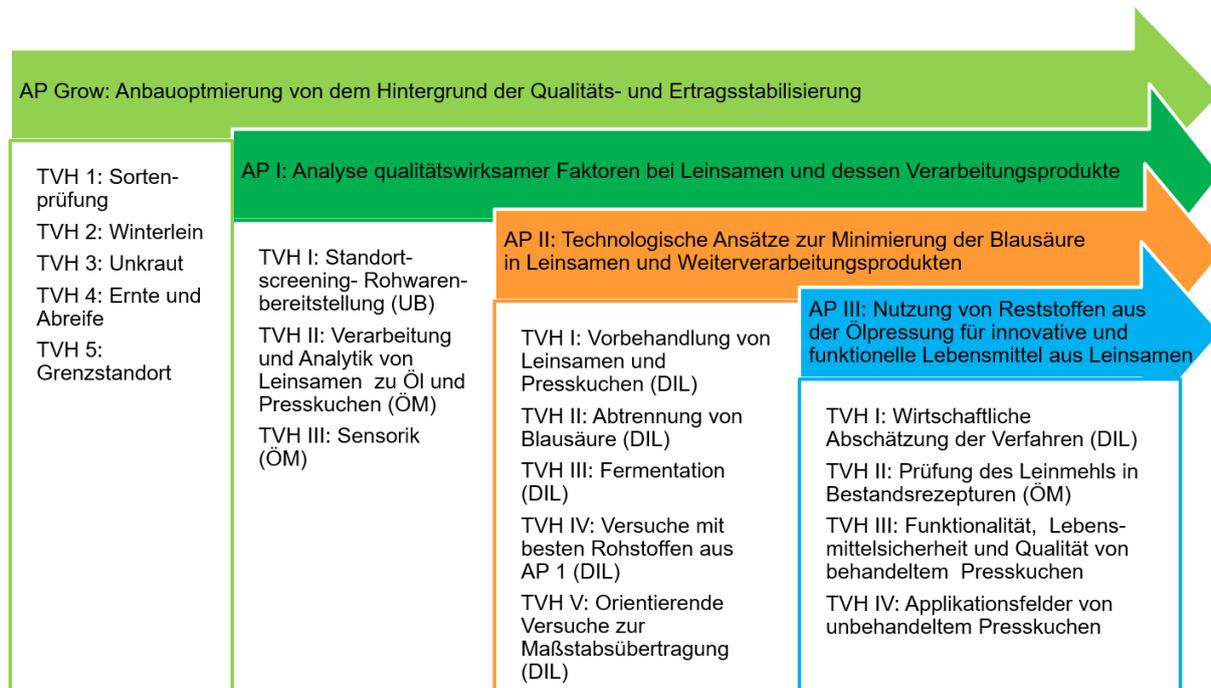


Abbildung 1.1: Arbeitspakete von Linovit

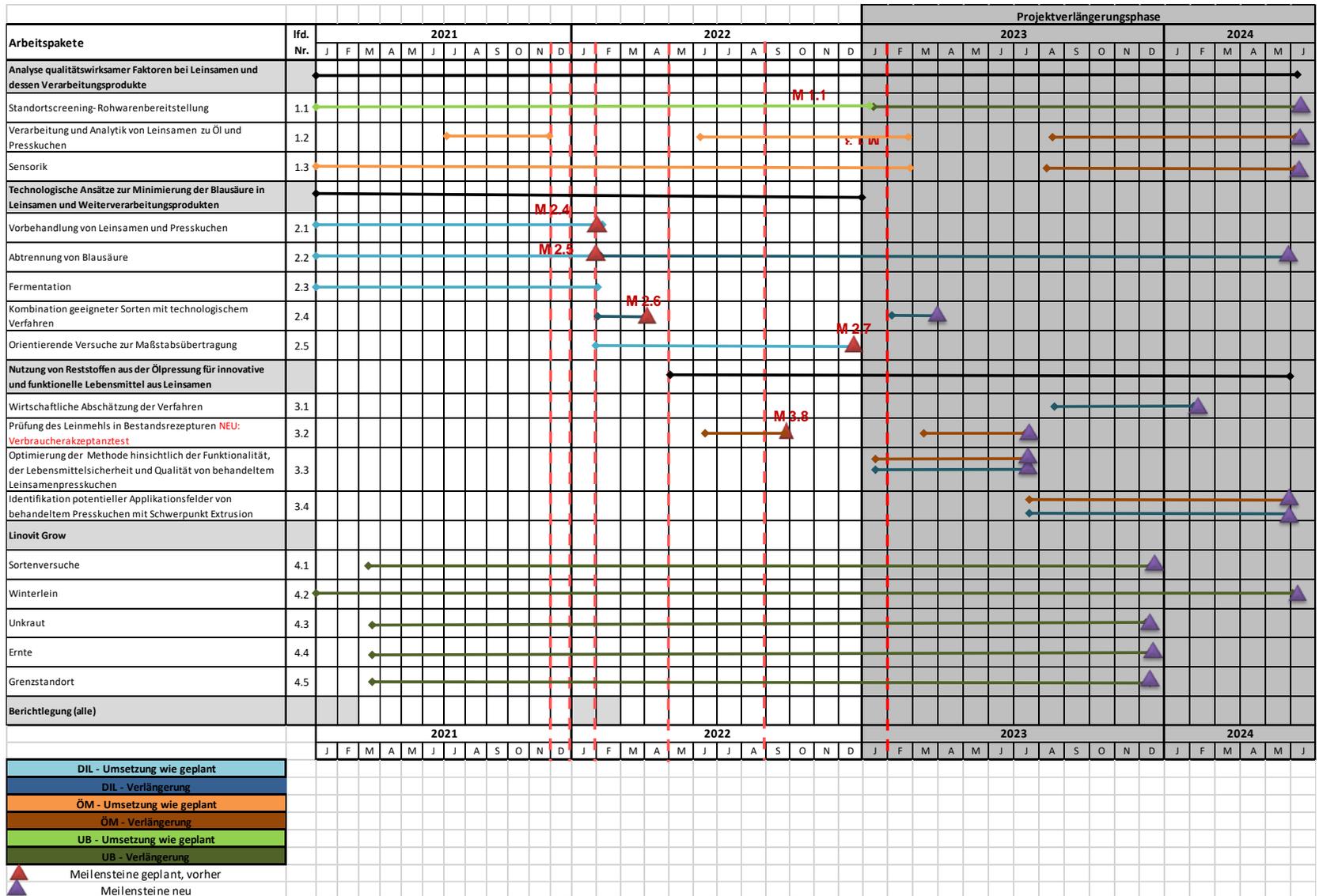


Abbildung 1.2: Arbeitspakete und Meilensteine

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### 2.1 Bedeutung von Öllein und chemische Zusammensetzung

Leinsamen, die Samen der Leinpflanze (*Linum usitatissimum* L.), gehören zu den ältesten Kulturpflanzen und wurden seit Jahrhunderten sowohl zur Ölgewinnung als auch zur Faserverarbeitung verwendet. Der weltweite Markt für Leinsamen wächst rasant, mit einer prognostizierten Marktgröße von 0,89 Milliarden US-Dollar im Jahr 2024 und einem Anstieg auf 1,54 Milliarden US-Dollar bis 2029 [1].

Leinsamen sind reich an mehrfach ungesättigten Fettsäuren, Proteinen, Polysacchariden und Lignan. Sie bestehen zu etwa 40 % aus Lipiden, wobei 40–60 % dieser Lipide aus der essentiellen Fettsäure  $\alpha$ -Linolensäure bestehen [2], [3], [4]. Darüber hinaus enthalten Leinsamen 20–25 % Proteine, 28–30 % Ballaststoffe und etwa 28 % Kohlenhydrate in Form von Polysacchariden. Ein Drittel der Ballaststoffe ist löslich und bildet ein Gel, während die restlichen zwei Drittel hauptsächlich aus Cellulose und Lignin bestehen [5]. Die Hauptproteine sind Globuline (58–66 %) und Albumin (20–42 %) [6], und sie enthalten auch die Aminosäuren Arginin, Asparaginsäure, Glutaminsäure sowie die limitierenden Aminosäuren Lysin, Methionin und Cystein [7], [8].

#### 2.1.1 Cyanogene Glycoside in Leinsamen

Leinsamen enthalten auch antinutritive Substanzen wie cyanogene Glycoside, die in über 2600 Pflanzenarten vorkommen [9]. Zu den wichtigsten Glycosiden in Leinsamen zählen die Diglycoside Linustatin und Neolinustatin sowie die Monoglycoside Linamarin und Lotaustralin. Diese Glycoside sind für die Freisetzung von Blausäure (HCN) verantwortlich, wenn das Pflanzengewebe beschädigt wird [10], [11].

Die Freisetzung von Blausäure erfolgt als Schutzmechanismus der Pflanze gegen Pflanzenfresser und Krankheitserreger. Cyanogene Glycoside werden in den Zellvakuolen gespeichert. Wenn das Pflanzengewebe beschädigt wird, tritt das Enzym  $\beta$ -1,6-Glykosidase mit den Glycosiden in Kontakt, was zur Spaltung des Kohlenhydratanteils führt. Dabei werden die Diglycoside in Monoglycoside hydrolysiert, die die Cyangruppe (CN) enthalten. Das entstehende Cyanhydrin zerfällt nach Abspaltung der Glucose entweder spontan bei einem pH-Wert über 5,0 oder wird enzymatisch durch Hydroxynitrillyase in ein Keton oder Aldehyd und die toxische Blausäure umgewandelt [9], [12], [13]. Der Gehalt an cyanogenen Glycosiden variiert je nach Sorte, Wachstumsbedingungen und Analyseverfahren. Zu Beginn des Wachstumszyklus sind die Gehalte an Diglycosiden wie Linustatin und Neolinustatin höher, wohingegen während der Keimung und Blütezeit der Gehalt an Monoglycosiden wie Linamarin ansteigt [14], [15], [16].

Die Konzentration von Blausäure in Leinsamen kann erheblich variieren. Studien zeigen unterschiedliche Werte: Rosling (1993) berichtet von einem Gehalt von 104–312 mg HCN/kg [17], während Mandokhot und Singh (1983) höhere Werte von bis zu 470 mg HCN/kg feststellen [18]. Diese Variabilität hängt von verschiedenen Faktoren wie der Sorte, den Wachstumsbedingungen und den verwendeten Analysemethoden ab.

Der Presskuchen, der nach der Ölgewinnung aus Leinsamen zurückbleibt, enthält höhere Konzentrationen an cyanogenen Glycosiden als die Samen selbst. Da diese cyanogenen Glycoside wasserlöslich sind, verbleiben sie größtenteils im Presskuchen, während das Leinöl weitgehend frei von diesen Verbindungen ist [19].

### 2.1.2 Toxizität und Grenzwert von Blausäure in Lebensmitteln

Blausäure ist eine hochgiftige Substanz, die die Zellatmung blockiert, indem sie an das Enzym Cytochrom-c-Oxidase bindet. Dies führt zu einer Unterbrechung der Atmungskette und letztlich zu einer „inneren Erstickung“. Die Symptome einer Blausäurevergiftung treten bei einer Konzentration von 0,5–1,0 mg HCN/kg Körpergewicht auf, während die tödliche Dosis bei 2,5–3,5 mg/kg Körpergewicht liegt [20]. Die Aufnahme kann über den Verdauungstrakt, die Atemwege oder die Haut erfolgen.

Seit dem 1. Januar 2023 legt die Verordnung (EU) 2022/1364 spezifische Höchstgehalte für Blausäure in Lebensmitteln fest, die durch die Verordnung (EU) 2023/915 vom 25. April 2023 aktualisiert wurde [21]. Die Verordnung umfasst folgende Grenzwerte für Leinsamen:

Tabelle 1: Höchstgehalte an Blausäure in Leinsamen und Leinsamenprodukten gemäß Verordnung (EU) 2023/915 [21]

<b>Blausäure, einschließlich in Blausäureglycosiden gebundener Blausäure</b>	<b>Höchst-gehalt (mg/kg)</b>	<b>Anmerkungen</b>
Unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte oder gehackte Leinsamen, die nicht für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden	250	Die Höchstgehalte gelten nicht für Ölsaaten zum Zermahlen und zur Ölraffination, sofern die restlichen gepressten Ölsaaten nicht als Lebensmittel in Verkehr gebracht werden.
Unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte oder gehackte Leinsamen, die für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden	150	Der Höchstgehalt gilt nicht für unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte oder gehackte Leinsamen, die in kleinen Mengen für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden, wenn der Warnhinweis „Nur zum Kochen und Backen verwenden. Nicht roh verzehren!“ im Hauptsichtfeld (Frontetikett) vorhanden ist. Die unverarbeiteten ganzen, geriebenen, gemahlene, geknackten oder gehackten Leinsamen mit diesem Warnhinweis müssen dem festgelegten Höchstgehalt von 250 mg/kg entsprechen.

## 2.2 Verfahren zur Reduktion

Die Reduktion der cyanogenen Glycoside in Leinsamen ist entscheidend, um den Leinsamenpresskuchen für die Lebensmittelindustrie sicher und vielseitig nutzbar zu machen. Effektive Reduktionsverfahren eröffnen Möglichkeiten, den Presskuchen als Proteinquelle und Zutat in verschiedenen Lebensmitteln zu verwenden. Die Entfernung cyanogener Glycoside erfolgt nach Essers et al. [22] in zwei Hauptschritten: zunächst der Abbau der Glycoside zu Blausäure und anschließend die Verflüchtigung der Blausäure.

In der Literatur werden verschiedene Methoden wie Kochen, Rösten, Autoklavieren, Extrusion, enzymatische und mechanische Verfahren sowie Lösungsmittel-Extraktion beschrieben. Eine Übersicht der in der Literatur veröffentlichten Verfahren ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: In der Literatur publizierte Verfahren zur Blausäurereduktion

Verfahren	Rohstoff	Erklärung	Erreichte Reduktion	Quelle
Einweichen	Ganze Leinsamen	100 g Leinsamen mit 200 ml Wasser für 2 h	Keine Messung möglich aufgrund von Gelbildung	[23]
Enzymatische Behandlung	Leinsamenmehl	Zugabe von 5% frisch gemahlene Leinsamen, Inkubation 18h bei 30 °C in 0,1 M Natriumcitrat-pufferlösung (pH 5,9), Bedampfung oder Gefriertrocknung	100 % (bei Bedampfung) 0 % bei Gefriertrocknung	[24]
Fermentation	Gemahlener Leinsamen	Zusatz von 8,9% Cyanidhydratase und 12,5% $\beta$ -Glykosidase, 48 h Fermentation	99,3 %	[25], [26]
Thermische Behandlung (Ofen)	Ganze Leinsamen	130 °C für 10 min und 20 Min.	16,2 % und 22,8 %	[23]
	Ganze Leinsamen	177 °C für 1 Stunde	80 %	[27]
	Gemahlener Leinsamen	177 °C für 1 Stunde	20 %	[27]
	Ganzer und gemahlener Leinsamen	38 °C für 1 Stunde	0 %	[27]
Kochen	Entfettetes Leinsamenmehl	Kochen in Wasser (1:5) für 15 min, dann Verdünnung (1:20), Zentrifugation, Vakuum-Trocknung bei 40 °C	100 % (nicht nachweisbar)	[28]
Mikrowellenbehandlung	Leinsamenpresskuchen	580 Watt für 300 s	81 %	[29]

	Ganze Leinsamen	750 Watt für 4 Min.	83,2 %	[23]
	Ganze Leinsamen	480 W, 2,5 min	82%	[30]
Mechanische Behandlung (Pelletieren)	Gemahlener Leinsamen	Einmaliges Pelletieren	13,6 %	[23]
		Sechsfaches Pelletieren	Bis zu 54,9 %	
	Gemahlene Leinsamen mit Mais	fünfmaliges Pelletieren von Leinsamen mit 50 % Mais	63,8 %	
Extrusion	Leinsamen	Einschnecken-Extruder, 143,6 °C, 133,5 U/min, 57,8 kg/h	89%	[4]
		Doppelschnecken- Extruder, 146 °C, 152,5 U/min, 32,7 kg/h, 12,5 % Feuchte	91,6 %	[31]
Autoklavieren	Leinsamen	120°C, Druck: 16,5 kg/cm <sup>2</sup> , 15 min	29,7 %	[23]
Ultraschall	Nicht spezifiziert für Leinsamen	600 W, 40 kHz (für Phillyrin)	82,6% (für Phillyrin)	[32]
Lösungsmittel- extraktion	Gemahlene Leinsamen	Zweiphasig mit Methanol,	84%	[33],
		Ammoniakwasser und Hexan		[34]

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Rohstoffe

##### 3.1.1 Verwendete Leinsamen für Anbau

Für die Anbauversuche wurde zertifiziertes Saatgut unterschiedlicher Sorten verwendet.

##### 3.1.2 Verwendeter Leinsamenpresskuchen für Blausäurereduktion

Um die verschiedenen Methoden zur Blausäurereduktion in Leinsamenpresskuchen am DIL zu testen, wurde die braunsamige Sorte Lirina verwendet. Diese wird bei der Ölmühle Moog am häufigsten zu Leinöl verarbeitet, sodass die Weiterverarbeitung zu blausäureabgereichertem Leinpresskuchen besonders interessant ist. Zudem weist sie eine gute Ölausbeute und einen mittleren Blausäuregehalt der Linovit-Proben von 229 mg/kg auf (s. Abschnitt 4.2.2). Sensorisch weist sowohl das Öl als auch der Presskuchen keine negativen Attribute auf und wurde vom sensorischen Panel positiv bewertet (s. Abschnitt 4.2.3).

## 3.2 Methoden zum Anbau

### 3.2.1 Standortscreening

Das Standortscreening wurde von der Universität Bonn, INRES Nachwachsende Rohstoffe in den Jahren 2020-2024 durchgeführt. Insgesamt wurden 104 Anbauflächen berücksichtigt (Rheinland-Pfalz: 8, Niedersachsen: 8, Thüringen: 11, Hessen: 9, Baden-Württemberg: 3, Bayern: 11, NRW: 21, Sachsen: 17, Sachsen-Anhalt: 14, Brandenburg: 2). Alle Flächen wurden mindestens zweimal im Vegetationsverlauf zur Bonitur des Bestandes und zur Bodenprobenentnahme besucht (Blüte und Reife).

Tabelle 3: Untersuchte Parameter innerhalb des Standortscreenings

Faktor	Untersuchte Parameter, Labor, Verfahren
<b>Boden</b>	Labor: Agrolab Bodenart, Humusgehalt, pH-Wert, Cadmiumgehalt, Makronährstoffe (P, K, Mg), Mikronährstoffe (B, Cu, Zn, Mn, Na), jeweils in 0-30 cm Tiefe
<b>Klima</b>	Witterung während Anbausaison (Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung): Für die Niederschlagshöhe wurden Radar-Online-Angleichungs (RADOLAN) Datensätze des Deutschen Wetterdienstes DWD verwendet. Sie liefern eine Kombination aus punktuell an den Niederschlagsstationen gemessenen stündlichen Werte und der Niederschlagserfassung 17 zusätzlicher Wetterradare. Es ergibt sich ein räumlich (1 km*1 km) und zeitlich (stündlich) hochaufgelöstes Netz mit interpolierten Niederschlagsdaten in Deutschland (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2018). Verarbeitung der RADOLAN Daten mit ArcMap (Version 10.8, 2020 Environmental Systems Research Institute, Inc.) mit Python (Python software Found.; 2010; Version 2.7) package „Radproc“.
<b>Anbau</b>	Betriebsbefragung: Ökologisch/Konventionell, Anbauverfahren, Fruchtfolge
<b>Leinsamensamen:</b>	
<b>Restfeuchte</b>	Trockenschrank
<b>Tausendkornmasse</b>	Pfeuffer Zählgerät
<b>Ölgehalt</b>	SGS Analytics Germany GmbH (in der reinen Saat) DIN EN ISO 659:2009-11 (LJE)
<b>Cadmiumgehalt</b>	SGS Analytics Germany GmbH, DIN EN ISO 17294-2:2017-01
<b>Ballaststoffgehalt</b>	SGS Analytics Germany GmbH, ASU L 00.00-18:1997-01, AOAC 985.29, AOAC 991.43 (nach Entfetten mit Hexan)
<b>Proteingehalt</b>	SGS Analytics Germany GmbH Gesamteiweiß (Nx6,25), ASU L 15.00-3:2019-07, DIN EN ISO 20483:2014-03
<b>C18:3n3 (alpha-Linolensäure)</b>	ASU L 13.00, 27/3:2018-06, DIN EN, ISO 12966-3:2016-11 (TMSH-Methode); ASU L 13.00, 45/46:2018-06, DIN, EN ISO 12966, 1/4:2015-11 (GC-FID)
<b>Blausäure (HCN)</b>	Institut für Produktqualität (ifp) HCN (Cyanid), gesamt, ifp 002914 (Titrimetrie) 2021-07 (a) [mg/kg]
<b>Quellzahl</b>	Institut für Getreideverarbeitung (IGV) GmbH; Ph. Eur, 10.0, 2.8.4,

Die Erfassung der schlagspezifischen Daten erfolgte gemeinsam mit den Betrieben (Tabelle 3). Von den Betrieben wurden Leinsamenproben zur Verfügung gestellt und diese am Campus

Klein-Altendorf mit verschiedenen Laborreinigungsgeräten auf einen Reinheitsgrad von 99 % gereinigt. Die statistische Verrechnung der Daten erfolgte mit SPSS Version 29.

### 3.2.2 Anbauoptimierung zur Ertrags- und Qualitätsstabilisierung

Die Versuche wurden am Campus Klein-Altendorf, Lehr- und Versuchsbetrieb der Universität Bonn auf konventionell bewirtschafteten Flächen und auf ökologisch bewirtschafteten Praxisflächen unter Beteiligung des Gää e.V. (Ulf Müller) durchgeführt (Tabelle 4). Die Standorte sind in Tabelle 5 charakterisiert.

Die Versuche an der Uni Bonn wurden jeweils als vollrandomisierte Blockanlagen mit mindestens vierfacher Wiederholung der Varianten angelegt. Die Parzellengröße betrug in Abhängigkeit von der Versuchsfrage 15 oder 30 m<sup>2</sup>. Aussaat, Pflege und Ernte wurde überwiegend mit Parzellenversuchstechnik durchgeführt. Es wurden keine Dünge- oder Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt, die Unkrautregulierung erfolgte nicht-chemisch mit unterschiedlichen Maschinen. Details, welche sich auf die konkrete Versuchsfrage beziehen, sind zum besseren Verständnis in die jeweiligen Ergebnisdarstellungen integriert. Im Rahmen der Landessortenversuche (LSV) wird unter ökologischen und konventionellen Anbaubedingungen seit einigen Jahren die Anbaueignung verschiedener Sommerleinsorten in Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt geprüft. Die Ergebnisse werden von den Landesanstalten in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt in jährlichen Sortenempfehlungen veröffentlicht. Der Fokus liegt auf den pflanzenbaulichen Merkmalen der Sorten und der Ertragsausbildung. In den Jahren 2021 bis 2024 wurden Proben aus den Öko-LSV auf Öl-, Ballaststoff- und Proteingehalt, Blausäure- und Cadmiumgehalt in den Samen analysiert. Aus den Samenproben wurde Leinöl gepresst, das Öl und der Presskuchen ebenfalls analysiert und sensorisch bewertet. Die LSV wurden in diesen Jahren um Sortenprüfungen an der Universität Bonn erweitert.

Die Datenauswertung der Versuche zur Anbauoptimierung erfolgte mit SPSS Version 29.

Tabelle 4: Übersicht Projektarbeiten zu unterschiedlichen Anbaufaktoren in Linovit in AP GROW

Fragestellung	Winterlein	Sommerlein
Sorten	✓	✓
Saatzeitpunkt	✓	-
Saatstärke	✓	✓
Reihenabstand	✓	✓
Unkrautregulierungsverfahren	✓	✓
Stickstoffdüngung	✓	✓
Ernteverfahren	-	✓
Gemengeanbau	✓	✓

Tabelle 5: Beschreibung der Versuchsstandorte in Linovit GROW

Standort	Kreis, Bundesland	Standortbedingungen	Wirtschaftsweise
Campus Klein-Altendorf, Universität Bonn	Rhein-Sieg-Kreis, NRW	sL, 173 m ü NN, Ø JahresT: 9,4 °C, Ø JahresNS: 605 mm	Konventionell bewirtschaftet
Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau, Bernburg	Salzlandkreis, Sachsen-Anhalt	L, 80 m ü NN, Ø JahresT: 10,2 °C, Ø JahresNS: 513 mm	Ökol. bewirtschaftet
Görsdorf, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	Erzgebirgskreis, Sachsen	sL, 508 m ü NN, Ø JahresT: 7,8 °C, Ø JahresNS: 826 mm	Ökol. bewirtschaftete Praxisfläche von Biohof Reichel
Mittelsömmern, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum	Unstrut-Hainich- Kreis, Thüringen	L, 290 m ü NN, Ø JahresT: 8,7 °C, Ø JahresNS: 534 mm	Ökol. bewirtschaftete Praxisfläche des Betriebes Marold
Doberquitz, Betrieb Eckhard Voigt	Mittelsachsen, Sachsen	uL, 160 m ü NN, Ø JahresT: 9,6 °C, Ø JahresNS: 530 mm	Ökologisch bewirtschaftet
Görsdorf, Betrieb Joachim Reichel	Erzgebirgskreis, Sachsen	uL, 508 m ü NN, Ø JahresT: 9 °C, Ø JahresNS: 980 mm	Ökologisch bewirtschaftet
Windeck, Betrieb Torsten Kück	Rhein-Sieg-Kreis, NRW	sL, 153 m ü NN, Ø JahresT: 10,1 °C, Ø JahresNS: 723 mm	Ökologisch bewirtschaftet
Werther, Betrieb Familie Maaß	Kreis Gütersloh, NRW	sL, 140 m ü NN, Ø JahresT: 9 °C, Ø JahresNS: 750 - 900 mm	Ökologisch bewirtschaftet

### 3.3 Verarbeitung von Leinsamen zu Öl und Presskuchen

Das Ziel dieses Teilvorhabens ist die Analyse der Verarbeitungsprodukte auf wertgebende und wertmindernde Inhaltsstoffe.

#### 3.3.1 Verarbeitung

Die gereinigten Leinsamen aus den verschiedenen Anbauversuchen wurden bei identischen Bedingungen mit einer kleinen, kontinuierlichen Expellerpresse mit einem Durchsatz von 3-5 kg/h des Herstellers IBG Monforts verarbeitet. Dieses Verfahren entspricht einer Kaltpressung, bei der ohne externe Hitzezufuhr nur mechanisch Öl aus dem Samen gewonnen wird.

Dabei wurden folgende relevante Parameter bestimmt:

Tabelle 6: Parameter Verarbeitung Leinsaat zu Öl und Presskuchen

Parameter übergeordnet	Parameter detailliert	Methode/Gerät
Aussehen	Farbe, Beschädigung, Glanz, Größe	Optische Bewertung
Besatz	Unkrautsamen, Dreck	Optische Bewertung
Feuchte	Feuchte	Feuchtemessgerät Precisa XM 50
Presseigenschaften	Lochdüse, Dauer, Verstopfung, Beschaffenheit des Presskuchens	Expellerpresse IBG Monforts, Beobachtung
Ölausbeute	Ölausbeute	Differenz zwischen Ausgangssaat und gepresstem Öl
Sensorik Öl und Presskuchen	Attribute: bitter, brotig, fischig, saartig	IN/OUT-Test durch geschultes Sensorikpanel
Fettkennzahlen	Freie Fettsäuren, Peroxidzahl	Titration 848 Titrino plus Metrohm
Inhaltsstoffe Öl	Vitamin E, Fettsäuremuster	Externes Labor SGS Germany GmbH Fettsäuremuster: ISO 12966-2 mod., GC/FID Vitamin E: SOP M 583, HPLC/FI
Inhaltsstoffe Presskuchen	Blausäure, Fett, Protein, Ballaststoffe	Externes Labor SGS Germany GmbH Blausäure: VDLUFA Methodenbuch Bd. III 16.3.2, mod. Fett: ASU L 06.00-6 Protein: ASU L 06.00-7 mod. Ballaststoffe: ASU L 00.00-18, mod.

Über den Projektzeitraum von 2020 - 2024 wurden 154 Saatmuster zur Ölpressung und Analytik zugesendet. Von den Saatproben konnten 137 Proben zu Öl und Presskuchen weiterverarbeitet werden. 17 Saatproben ließen sich nicht kaltpressen (Ölausbeute <10%).

### 3.3.2 Analytik Verarbeitungsprodukte Presskuchen und Öl

Seit 2023 regelt die Verordnung (EU) 2023/915 die Höchstgehalte für Blausäure in Leinsamen, die als Lebensmittel in den Verkehr gebracht werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Auszug aus der Verordnung (EU) 2023/915 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006, Anhang 1

2.3	Blausäure, einschließlich in Blausäureglycosiden gebundener Blausäure	Höchstgehalt (mg/kg)	Anmerkungen
2.3.1	Unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte oder gehackte Leinsamen, die nicht für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden	250	Die Höchstgehalte gelten nicht für Ölsaaten zum Zermahlen und zur Olraffination, sofern die restlichen gepressten Ölsaaten nicht als Lebensmittel in Verkehr gebracht werden. Werden die restlichen gepressten Ölsaaten als Lebensmittel in Verkehr gebracht, gelten die Höchstgehalte unter Berücksichtigung des Artikels 3 Absätze 1 und 2.
2.3.2	Unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte oder gehackte Leinsamen, die für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden	150	Der Höchstgehalt gilt nicht für unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte oder gehackte Leinsamen, die in kleinen Mengen für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden, wenn der Warnhinweis „Nur zum Kochen und Backen verwenden. Nicht roh verzehren!“ im Hauptsichtfeld (Frontetikett) vorhanden ist (es ist die vorgeschriebene Schriftgröße <sup>(1)</sup> zu verwenden). Die unverarbeiteten ganzen, geriebenen, gemahlene, geknackten oder gehackten Leinsamen mit diesem Warnhinweis müssen dem in 2.3.1 festgelegten Höchstgehalt entsprechen.

### Artikel 3

#### Getrocknete, verdünnte, verarbeitete und zusammengesetzte Lebensmittel

(1) Sofern in Anhang I keine spezifischen Höchstgehalte der Union für getrocknete, verdünnte, verarbeitete oder zusammengesetzte Lebensmittel (also aus mehr als einer Zutat bestehende Lebensmittel) festgelegt sind, sind bei der Anwendung der in Anhang I festgelegten Höchstgehalte auf diese Lebensmittel folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- a) Veränderungen in der Konzentration des Kontaminanten durch das Trocknungs- oder Verdünnungsverfahren,
- b) Veränderungen in der Konzentration des Kontaminanten durch die Verarbeitung,
- c) die relativen Anteile der Zutaten im Erzeugnis,
- d) die analytische Bestimmungsgrenze.

(2) Führt die zuständige Behörde eine amtliche Kontrolle durch, hat der Lebensmittelunternehmer die spezifischen Konzentrations-, Verdünnungs- oder Verarbeitungsfaktoren für die betreffenden Trocknungs-, Verdünnungs- oder Verarbeitungsverfahren bzw. die spezifischen Konzentrations-, Verdünnungs- oder Verarbeitungsfaktoren für die betreffenden getrockneten, verdünnten, verarbeiteten oder zusammengesetzten Lebensmittel sowie den Anteil der Zutaten für Mischverfahren mitzuteilen und zu begründen.

Teilt der Lebensmittelunternehmer den betreffenden Konzentrations-, Verdünnungs- oder Verarbeitungsfaktor nicht mit, oder erachtet die zuständige Behörde den Faktor angesichts der gegebenen Begründung als ungeeignet, so legt die zuständige Behörde diesen Faktor auf der Grundlage der verfügbaren Informationen und mit dem Ziel, den größtmöglichen Schutz der menschlichen Gesundheit zu erreichen, selbst fest.

Abbildung 3.1: Auszug aus der Verordnung (EU) 2023/915 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006, Artikel 3

Wie anhand der Abbildung 3.1 zu sehen, regelt der Artikel 3, dass ein Verarbeitungsfaktor angewendet werden darf, insofern dieser vom Lebensmittelunternehmer zureichend begründet werden kann. Bei dem Presskuchen findet eine Verarbeitung insofern statt, dass die Saat gepresst und dabei das Öl extrahiert wird. Dieser extrahierte Ölanteil macht etwa 30 % der Rohware aus (je nach Effektivität der Presse), was bedeutet, dass der Blausäuregehalt im Presskuchen aufkonzentriert wird.

### 3.4 Methoden zur Blausäurereduktion (DIL)

Die am DIL verwendeten Geräte im Labor-, Pilot- und industriellen Maßstab sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Im Forschungsprojekt verwendete Geräte von FS DIL

Gerät	Hersteller	Spezifikation
Heizplatte	IKA®-Werke GmbH & Co. KG (Staufen, Deutschland)	IKA RCT Basic
Zentrifuge	Thermo Fischer Scientific (Massachusetts, USA)	Sorvall™ RC6+
Mikrowelle	Robert Bosch GmbH (Gerlingen-Schillerhöhe, Deutschland)	HMT75M451
Ultraschallbad	Branson Ultrasonics Corp. (Danbury, Connecticut, USA)	8200 ultrasonic cleaner
Trockenschrank	Memmert GmbH + Co. KG Schwabach, Deutschland	Universalschrank
Dampferzeuger	Stritzel Dampftechnische Geräte GmbH	Modell: PS200 Betriebsdruck: 9 bar Dampfleistung: 21 kg/h
Pflugscharmischer Labormühle	Lödige GmbH Verder Scientific Inc. Haan, Germany	Volumen: 50 Liter Modell: ZM 1, No. 63320 Watt: 600, Volt: 220/50Hz
Kombidämpfer	Eloma GmbH Maisbach, Deutschland	Modell: Joker B
Sensor HCN	Drägerwerk AG & Co. KGaA (Lübeck, Deutschland)	X-am® 5600
Farbmessgerät	Conica Menolta, Holdings K.K. Tokio, Japan	CM-600d
Extruder	Coperion GmbH, Stuttgart, Deutschland	ZSK 27 Mv Plus
Wirbelschichttrockner	Glatt GmbH	Modell: GPCG 3
Wirbelschichttrockner	Ventilex B.V.	Modell: V6700
Sprühtrocknung	Externer Service	Universität Wien, Österreich: 2860 Soborg-Kopenhagen
Sprühtrockner	Trockenturm, externer Service	8-12 kg H <sub>2</sub> O-Verdampfung / h an HBLFA Francisco Josephinum in Wieselburg
Walzentrockner	Externe Versuche	Bei VITAM Hefe-Produkt GmbH
Allround-Schnellmischer	Glass GmbH & Co. KG, Paderborn	VAS-Mischer 150

### 3.4.1 Methodenscreening

#### 3.4.1.1 Versuche im Labormaßstab maximal 10 g Leinsamenpresskuchen

Am DIL wurden nach erfolgter Literaturrecherche verschiedene vielversprechende Methoden zur Reduktion von Blausäure in Leinsamen auf den Rohstoff Leinsamenpresskuchen übertragen und weiterentwickelt. Tabelle 9 fasst das Methodenscreening zur Blausäurereduktion zusammen, inklusive der Erklärung der Methode und der am DIL erreichten Reduktion der Blausäure im Labormaßstab.

Tabelle 9: Übersicht über die erfolgten Vorversuche zur Blausäurereduktion im Labormaßstab

<b>Methode</b>	<b>Erklärung der Methode</b>	<b>Erreichte Blausäure-reduktion am DIL</b>	<b>In Anlehnung an Literatur</b>
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einweichen der Leinsamen (10 g) mit Wasser (20 g) oder 0,4 % (w/v) Zitronensäurelösung bei 30 °C für 2 Stunden</li> <li>Trocknen für 24 h bei 30 °C</li> </ul>	21 – 29 %	Nach Feng et al. [23]
Enzymatisch Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frische Leinsamen und Leinsamenpresskuchen getrennt zerkleinert.</li> <li>0,5 g gemahlene Leinsamen, 10 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen, 105 g deionisiertes Wasser gemischt</li> <li>18-stündige Inkubation bei 30 °C im Trockenschrank</li> <li>Dämpfen des Gemischs bei 120 °C/40 °C für 6 Stunden.</li> <li>Trocknung der Masse bei 30 °C für 24 Stunden.</li> </ul>	99,5 % bei Dämpfung mit 120 °C; 86 % bei Dämpfung mit 40 °C	Nach Yamashita et al [24].
Enzymatisch Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frisch zerkleinerte Leinsamen (3 g) mit 20 g deionisiertem Wasser oder 0,4 % (w/v) Zitronensäurelösung bei 40 °C für 1 Stunde unter Rühren inkubiert.</li> <li>Gemisch mit 20 g zerkleinertem Leinsamenpresskuchen gemischt</li> <li>Weitere Inkubation bei 30 °C für 24 Stunden.</li> <li>Trocknung auf Silikonmatte bei 30 °C für 65 Stunden.</li> </ul>	77-79 %	[24]
Enzymatisch Variante 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frisch gemahlene Leinsamen (3 g) mit 20 g deionisiertem Wasser oder Säuregemisch bei 40 °C für 1 Stunde inkubiert.</li> <li>Siebung zur Trennung der Flüssigkeit von den Samen</li> </ul>	59-60 %	[24]

- Abgeseiebte Flüssigkeit zum Leinsamenpresskuchen gegeben, 6-stündige Inkubation bei 30 °C
- Bedampfung der Masse bei 40 °C für 6 Stunden.
- Trocknung bei 30 °C für 65 Stunden.

Kochen Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 g Leinsamenpresskuchen mit 50 ml kochendem Wasser übergossen und 15 Minuten gekocht</li> <li>• Abkühlung des Gemischs auf 50 °C unter Rühren, dann Zugabe von 150 g Wasser (Raumtemperatur), Verhältnis 1:20.</li> <li>• Abkühlung auf 30 °C unter Rühren</li> <li>• Zentrifugation bei 12.000 U/min für 10 Minuten, Überstand verworfen</li> <li>• Trocknung des Nassschlamms bei 30 °C für 24 Stunden im Trockenschrank</li> </ul>	97 %	Nach Madhusudhan und Singh [35]
Kochen Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 g Leinsamenpresskuchen mit 70 ml kochendem Wasser übergossen und 15 Minuten gekocht</li> <li>• Abkühlung auf 30 °C unter Rühren, keine Zentrifugation</li> <li>• Trocknung des Nassschlamms bei 30 °C für 24 Stunden im Trockenschrank.</li> </ul>	92 %	[35]
Dämpfen Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen für 6 Stunden bei 40 °C im Kombidämpfer gedämpft</li> <li>• Trocknung bei 30 °C für 24 Stunden auf Trocknungsblechen</li> </ul>	95 %	Nach Chadha et al. [27]
Dämpfen Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen für 6 Stunden bei 120 °C gedämpft.</li> <li>• Trocknung der Proben bei 30 °C für 24 Stunden im Trockenschrank.</li> </ul>	98 %	[27]
Mikrowellenbehandlung Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen wurde direkt einer Mikrowellenbehandlung unterzogen.</li> </ul>	33 %	Nach Feng et al., Yang et al. und Ganorkar und Jain [23], [29], [30]
Mikrowellenbehandlung Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leinsamenpresskuchen wurde mit Wasser (Verhältnis 1:2 und 1:5) oder einer 0,4 % (w/v) Zitronensäurelösung gemischt und 2 Stunden bei 30 °C im Trockenschrank inkubiert.</li> </ul>	50 %, wenn in Wasser inkubiert; 43 %, wenn in Zitronensäurelösung inkubiert	[23], [29], [30]

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemische wurden auf Aluminiumschalen gegeben und für 3 bzw. 5 Minuten bei 360 W, 600 W und 900 W in der Mikrowelle behandelt.</li> <li>Anschließend Trocknung der behandelten Proben bei 30 °C für 65 Stunden.</li> </ul>		
Ultraschall-behandlung Variante 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>10 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen mit 100 g Wasser in einem Becherglas vermengt.</li> <li>30 Minuten Inkubation bei 30 °C auf einer Rührplatte.</li> <li>60 Minuten Beschallung im Ultraschallbad bei 40 kHz, Wasserbadtemperatur ca. 30 °C.</li> <li>Zentrifugation bei 12.000 U/min für 10 Minuten.</li> <li>Trocknung bei 30 °C für 24 Stunden im Trockenschrank.</li> </ul>	85 %	Nach Xia et al. [32]
Ultraschall-behandlung Variante 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>10 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen mit 100 g Wasser in einem Becherglas vermengt.</li> <li>30 Minuten Inkubation bei 30 °C auf einer Rührplatte.</li> <li>60 Minuten Beschallung im Ultraschallbad bei 40 kHz, Wasserbadtemperatur ca. 30 °C.</li> <li>Dämpfung für 6</li> <li>Trocknung bei 30 °C für 24 Stunden im Trockenschrank.</li> </ul>	86 %	[32]
Ultraschall-behandlung Variante 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 g zerkleinerte Leinsamen in 30 ml deionisiertem Wasser für 30 Minuten bei 30 °C inkubiert.</li> <li>Erste Ultraschallbehandlung der Leinsamen bei 40 kHz für 1 Stunde (Wassertemperatur ca. 26 °C).</li> <li>Siebung zur Trennung von Flüssigkeit und Samen.</li> <li>Zugabe der extrahierten Flüssigkeit zum zerkleinerten Presskuchen und weitere 30 Minuten Ultraschallbehandlung.</li> <li>Trocknung für 24 Stunden bei 30 °C im Trockenschrank.</li> </ul>	54 %	[32]
PEF Behandlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>100 g zerkleinerter Leinsamenpresskuchen im Verhältnis 1:3 (300 g Wasser) oder 1:0,5 (50 g Wasser) vermischt.</li> </ul>	Keine signifikante Reduktion bei Verhältnis 1:3 (LSPK und Wasser); bei Mischungsverhältnis	-

- Quellzeit von 5 Minuten, dann Überführung der Masse in eine Batchzelle. 1:0,5 (LSPK zu Wasser) war eine Reduktion zwischen 73-83 % zu erreichen
  - Behandlung mit Pulsed Electric Fields in Doppelbestimmung (Feldstärke 3 kV/cm und spezif. Energieeintrag 10, 20 und 30 kJ/kg)
  - Nach der PEF-Behandlung: 2 Stunden Lagerung in einem geschlossenen Plastikbehälter.
  - Trocknung der Proben auf Trocknungsblechen bei 30 °C für 65 Stunden.
  - Kontrollproben wurden analog behandelt, aber nur 48 Stunden getrocknet.
- 

#### 3.4.1.2 Scale-up der Screeningversuche auf 150 g Leinsamenpresskuchen

Nach den ersten Screeningversuchen zur Ermittlung der Effektivität hinsichtlich der Blausäurereduktion wurden vier vielversprechende Methoden, die die beste Reduktion erzielten und am DIL gut auf einen größeren Maßstab übertragbar waren, in einem größeren Ansatz getestet. Dabei handelte es sich um die enzymatische Methode (Variante 1), die Methode des Kochens im Verhältnis 1:7 (Kochen, Variante 2) sowie die Methoden des Dämpfens bei 120 °C und bei 40 °C (Dämpfen, Varianten 1 und 2), die jeweils in einem dreifach größeren Ansatz mit 150 g LSPK getestet wurden.

#### 3.4.1.3 Optimierung der enzymatischen Methode

Zur weiteren Optimierung der vielversprechenden enzymatischen Methode Variante 1 nach Yamashita et al [24] (siehe Tabelle 9) erfolgte eine systematische Untersuchung der Versuchsparameter mit einem Ansatz von 150 g LSPK je Versuch. Zunächst wurde geprüft, welchen Einfluss die Prozessschritte Inkubation und Dämpfen sowie die Zugabe von frischen Leinsamen (5 %) auf die Blausäurereduktion haben. Anschließend erfolgte eine Versuchsplanung in Form eines vollständig faktoriellen 2<sup>3</sup>-Versuchsplans. Dieser Plan ermöglichte die Untersuchung der Haupteffekte und der Wechselwirkungen der drei wesentlichen Einflussgrößen: Inkubationszeit (1, 2 und 3 Stunden), Bedampfungstemperatur (40, 70 und 100 °C) und Bedampfungszeit (3, 4,5 und 6 Stunden). Ein Zentrumspunkt mit den Werten 2 Stunden Inkubationszeit, 70 °C und 4,5 Stunden Dämpfen wurde dreifach bestimmt, um die Variabilität der Ergebnisse abzuschätzen. Anschließend wurden die Proben getrocknet, die Restfeuchte und der Blausäuregehalt sowie die Farbe bestimmt.

### 3.4.2 Versuche zur Maßstabsübertragung

Auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse in den Screeningversuchen wurden maßstabsübertragende Versuche der Behandlungsmethode durchgeführt. Die Ausgangsbasis dazu bildete die zuvor entwickelte und optimierte Behandlungsmethode im Labormaßstab, bei der der LSPK 1 h bei 30 °C inkubiert, anschließend für 3 h bei 100 °C bedampft und für 48 h

bei 30 °C getrocknet wurde. Die Tabelle 10 zeigt eingesetzten Materialien und Maschinen im Labormaßstab, im Pilotmaßstab und im Industriemaßstab.

Tabelle 10: Darstellung der eingesetzten Maschinen/Geräte im Labormaßstab, Pilotmaßstab Maßstab sowie Industriemaßstab

Maßstab	Verwendete Geräte
Labormaßstab mit 150 g LSPK pro Ansatz	Labormühle (Moulinette), Manuelles Mischen, Labor-Dampfgarer, Trockenkammer, Labormühle (Moulinette)
Pilotmaßstab mit 2 kg LSPK pro Ansatz	Labormühle, Mechanisches Mischen, Industrieller Dampfgarer, Trockenkammer, Labormühle
Industriemaßstab mit > 60 kg LSPK pro Ansatz	Industrielle Mühle, Mechanisches Mischen, Industrieller Dampfgarer, Sprühtrockner

#### 3.4.2.1 Dämpfen

Zur Maßstabsübertragung der Bedampfung wurde ein VAS Mischer der Firma Glass mit einem Volumen von 150 L genutzt (Abbildung 3.2). Dieser ist mit Kapazitäten von 80 bis 2000 L Volumen erhältlich und bietet die Möglichkeit zur Vermahlung, Bedampfung und Vermischung des Materials.



Abbildung 3.2: VAS Mischer der Firma Glass (150 L Volumen).

Während der Versuche im Glass Mischer wurden verschiedene Einflussfaktoren auf die Blausäurereduktion untersucht: Der Ausgangszustand des LSPK (vermahlen und unvermahlen), die Bedampfungszeit (0, 15, 20 und 30 min), Menge des zugegebenen Wassers (Verhältnis 1:8, 1:9; 1:1 und ohne Wasser) sowie Einzug von Vakuum (ja oder nein).

Das Hauptziel der Versuche bestand darin, festzustellen, ob der Mischer den ungemahlene Presskuchen zerkleinern und zermahlen kann, während nur Wasser aus der Dampfeinspritzung verwendet und ein Vakuum zur Beseitigung der freigesetzten Blausäure angelegt wird. Dadurch könnte der Mahlschritt vor dem Dämpfen entfallen und die Zeit für die Verarbeitung des Presskuchens bei gleichzeitiger Wassereinsparung verkürzt werden.

#### 3.4.2.2 Sprühtrocknung

Für den industriellen Maßstab wurde die Trocknung des behandelten LSPK mittels Sprühtrocknung getestet. Dafür wurden 60 kg LSPK am DIL für 30 Minuten gedämpft und anschließend in drei Behältern zu je 20 kg eingefroren und an die Universität Wien, Österreich versandt.

Nach Ankunft an der Universität Wien wurde der gedämpfte LSPK überprüft und in einem einstufigen Sprühtrockner getrocknet. Der Trocknungsvorgang erfolgte bei hohen Temperaturen von etwa 180 bis 200 °C für wenige Sekunden, um ein feines, trockenes Leinsamenpresskuchen-Pulver zu erhalten. Nach Abschluss der Sprühtrocknung wurde das getrocknete Produkt zurück an das DIL versandt, wo es einer Blausäureanalyse unterzogen wurde.

Für eine weitere Trocknung wurde eine größere Menge von 150 kg Leinsamenpresskuchen (LSPK) an die HBLFA Francisco Josephinum in Wieselburg gesendet, um die Sprühtrocknung in einem Trockenturm zu testen. Aufgrund der gallertartigen Beschaffenheit des Presskuchens, der weder flüssig noch pumpfähig war, wurde Wasser zugegeben und die Dispersion auf 60 °C erwärmt, um die Pumpfähigkeit zu gewährleisten. Dafür wurden zu 2,4 kg LSPK 1,6 kg Wasser hinzugefügt. Die Trocknungsparameter wurden so eingestellt, dass eine Produkttemperatur von 60 °C erreicht wurde, während die Zulufttemperatur des Trockenturms auf 210 °C und die Ablufttemperatur auf 85 °C eingestellt war. Die Trocknung erfolgte über einen Zeitraum von 6 Stunden. Insgesamt konnten ca. 37 kg Leinsamenpresskuchen ohne zusätzlichen Wassergehalt getrocknet werden.

#### 3.4.2.3 Walzentrocknung

Die Walzentrocknung des LSPK erfolgte bei der Firma VITAM Hefe-Produkt GmbH in Hameln. Für die Vorbereitung der Trocknung wurde eine Versuchsmenge von 12 kg LSPK mit 108 kg Wasser im Stephan Vakuummischer auf einen Feststoffgehalt von 10 % verdünnt. Das Mischverhältnis von LSPK zu Wasser betrug 1:9, um eine ausreichende Pumpfähigkeit der Suspension zu gewährleisten. Die Mischung wurde 20 Minuten bei 80 °C gerührt und durch Umwälzen mit einem Schneidwerk dispergiert. Anschließend erfolgte eine Probenahme des nassen LSPK-Slurrys, welche zur späteren Analyse eingefroren wurde.

Der vorbereitete LSPK-Slurry wurde dann in Eimern auf die beheizte Walze der Trocknungsanlage aufgetragen, um bei 80 °C bzw. 95 °C getrocknet zu werden. Die Anlage hatte eine Trocknungskapazität von etwa 1 Tonne pro Tag. Nach der Trocknung wurde der LSPK auf seinen Blausäuregehalt analysiert.

#### 3.4.2.4 Wirbelschichttrocknung

Die Wirbelschichttrocknung erfolgte am DIL mit 2 verschiedenen Geräten. Mit dem Wirbelschichttrockner der Firma Ventilex wurden Trocknungsversuche bei 90 °C durchgeführt. Dafür wurden 1 kg vorgekutterter LSPK mit 133 g Wasser gemischt. Die Trocknung erfolgte bis zu einer Restfeuchte von 7,1 % im Endprodukt.

Weiterhin erfolgte die Trocknung nach der Extrusion mit einem Wirbelschichttrockner der Firma Glatt.

#### 3.4.2.5 Arbeitssicherheit beim Scale-up

Für die Durchführung der Versuche zur Blausäurereduktion im größeren Maßstab am DIL war die Sicherheit der Mitarbeitenden ein zentraler Aspekt, da durch die Freisetzung von Blausäure (Cyanwasserstoff, HCN) potenziell gesundheitsschädliche Bedingungen entstehen können. Cyanwasserstoff (CAS-Nr. 74-90-8) ist bei Temperaturen über 26 °C gasförmig und darunter flüchtig. Es ist leichter als Luft, wodurch es sich in der Umgebungsluft verteilen kann. Die Hauptaufnahmewege von HCN unter gewerblichen Bedingungen sind die Inhalation über den Atemtrakt und die Resorption über die Haut. Die Toxizität von HCN ist hoch, da es die Zellatmung blockieren kann, was bereits bei geringen Konzentrationen zu schweren Vergiftungen führt.

Die gesetzlichen Vorgaben zur Arbeitsplatzsicherheit in Bezug auf HCN sind in der TRGS 900 (Technische Regeln für Gefahrstoffe) festgelegt, die einen Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 0,9 ml/m<sup>3</sup> bzw. 1 mg/m<sup>3</sup> HCN vorschreiben. Die MAK-Kommission empfiehlt wissenschaftlich einen Grenzwert von 1,9 ml/m<sup>3</sup> bzw. 2,1 mg/m<sup>3</sup>. Diese Werte sind jedoch keine rechtlich bindenden Vorgaben, sondern dienen als Orientierung.

Um die Sicherheit während der Versuche zu gewährleisten, wurden mehrere Maßnahmen ergriffen: Alle Mitarbeitenden, die an den Versuchen beteiligt waren, erhielten eine Schulung zum sicheren Umgang mit HCN. Darüber hinaus wurden spezifische Betriebs- und Arbeitsanweisungen erstellt. Für die Überwachung der Raumluft wurde von der Firma Dräger bereits zu Beginn des Projektes zwei Gaswarngeräte vom Typ X-am 5600 mit einem XXS HCN-Sensor erworben. Diese Sensoren sind so konfiguriert, dass sie bei Erreichen der AGW von 0,9 ppm sowie der Empfehlung der MAK-Kommission von 1,9 ppm Alarm auslösen. Zwei dieser Gaswarngeräte wurden während der Versuche mitgeführt, um die HCN-Konzentrationen in der Raumluft sowohl bei den Screening-Versuchen im Labormaßstab als auch bei den Versuchen zur Maßstabsübertragung kontinuierlich zu überwachen. Die maximale messbare Konzentration des Geräts liegt bei 50 ppm, was etwa 56,1 mg/m<sup>3</sup> HCN entspricht (1 ppm HCN = ca. 1,12 mg/m<sup>3</sup>).

Für die Absaugung der freigesetzten Blausäure kam eine spezielle Absauganlage mit einem für das Projekt angeschafften Aktivkohlefilter zum Einsatz. Dies ermöglichte eine sichere Entfernung der freigesetzten Gase aus dem Arbeitsbereich.

Bei weiterem Projektfortschritt wurde von der Firma Dräger persönliche Schutzausrüstung für die Extrusionsversuche ausgeliehen und eingesetzt. Zur persönlichen Schutzausrüstung zählte

ein Gebläsefiltergerät vom Typ X-plore 8500 mit einem offenen System bestehend aus Haube und Schutzvisier als TH3 mit einem Schutzniveau von 100. Dadurch konnte es bei einer HCN-Konzentration von bis zu 90 ppm eingesetzt werden ( $\text{AGW } 0,9 \text{ ppm HCN} \times \text{Schutzfaktor } 100$ ). Das System war mit einem B1-Kombinationsfilter ausgestattet, der für den Schutz vor HCN zugelassen ist und bei Konzentrationen bis zu 1000 ppm verwendet werden kann. Alle beteiligten Mitarbeiter erhielten im Umgang der Schutzausrüstung eine separate Schulung.

Speziell für die ersten Extrusionsversuche wurde zu Beginn bei Inkubation des Leinsamenpresskuchens die Raumluft mit der Dräger X-am 5600 und der X-am Pumpe aus sicherer Entfernung überprüft. Durch das Ansaugen der Luft über einen Schlauch konnte die HCN-Konzentration im Raum gemessen werden, bevor der Raum betreten wurde. Diese Methode ermöglichte es, die Verteilung der Blausäure im Raum zu überwachen und bei Bedarf entsprechende Sicherheitsmaßnahmen einzuleiten.

Durch diese umfangreichen Sicherheitsvorkehrungen konnte die sichere Durchführung der Versuche zur Blausäurereduktion im größeren Maßstab am DIL gewährleistet werden.

#### 3.4.2.6 Extrusion

Als alternative Methode zur thermischen Behandlung des Leinsamenpresskuchens wurde die Extrusion von Leinsamenpresskuchen getestet, einerseits die Dry Extrusion zur Erzeugung von TVP und andererseits die High Moisture Extrusion zur Erzeugung von Nassextrudaten.

##### Dry Extrusion

Die TVP Extrusion bietet die Möglichkeit zum einen die Blausäure durch Hitze aus dem Presskuchen auszutreiben und zum anderen ein relativ trockenes Produkt zu erzeugen, das anschließend mittels bewährter Wirbelschichttrocknung nachgetrocknet werden kann. Auf diese Weise können mehrere Prozessschritte effizient kombiniert werden, sodass am Ende ein lebensmittelsicheres Produkt hergestellt werden kann.

Da die Reduktion des Blausäuregehaltes von LSPK die höchste Priorität hat, wurde zunächst geprüft, ob eine adäquate Reduktion auch bei geringeren Anteilen von zugesetztem Wasser möglich ist. Demnach wurde der Einfluss unterschiedlicher Wassermengen auf die Rieselfähigkeit sowie auf die Blausäurereduktion nach Inkubation untersucht.

Der Versuchsaufbau zur Extrusion setzte sich aus einer 30-minütigen Inkubation von 10,5 kg LSPK mit 4,5 l Wasser im Lödige-Mischer bei 40 °C und der anschließenden TVP Extrusion im Doppelschneckenextruder ZSK27 zusammensetzen. Der rieselfähige Presskuchen mit wurde anschließend mittels Feststoff-Dosierer in den Doppelschneckenextruder eindosiert. Der Extruder besitzt 10 heizbare Segmente. In Segment 1 wurde der mit 30 % Wasser angereicherte und zuvor inkubierte Presskuchen zudosiert. Im 2. Segment wurde je nach Versuchsreihe über eine Flüssigkeitsdosierung Wasser zugegeben. Die freiwerdende Blausäure konnte über ein Entgasungselement, welche je nach Versuchsreihe in Segment 7 oder 9 eingebaut wurde, gezielt austreten und mit einer Absaugung bestehend aus einem Aktivkohlefilter abgesaugt werden. Das Entgasungselement (Kombiblockgehäuse) wurde speziell für die Extrusionsversuche im Rahmen des Projektes angeschafft. Die Schnecken

wurden mit einer Drehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$  betrieben und der Durchsatz betrug zu Beginn  $6 \text{ kg/h}$  und wurde je Versuchsreihe angepasst. Am Extruderende wurde die Masse durch eine  $3 \text{ mm}$  Düse (mit einer Düsenöffnung) gepresst. Der austretende Produktstrang wurde anschließend mittels eines Granulierers in gleichmäßige Partikel geschnitten. Der extrudierte Presskuchen wurde anschließend auf eine Restfeuchte von  $< 8,0 \%$  im Glatt Wirbelschichttrockner und/oder im Trockenschrank getrocknet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.3 bis Abbildung 3.5 dargestellt.

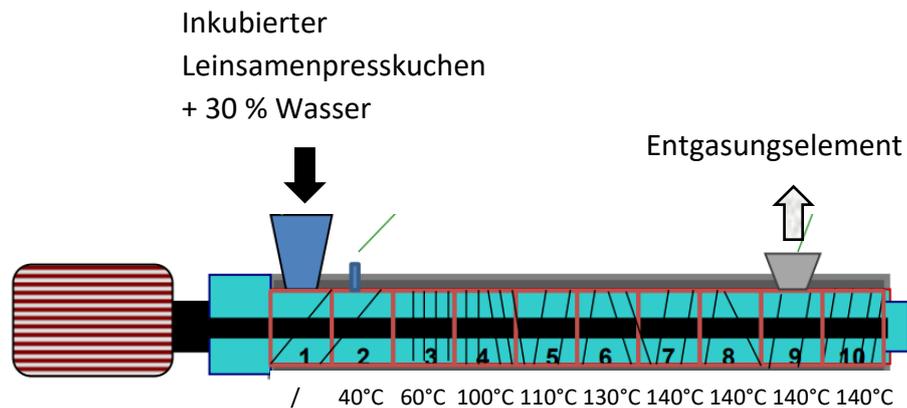


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Extruders

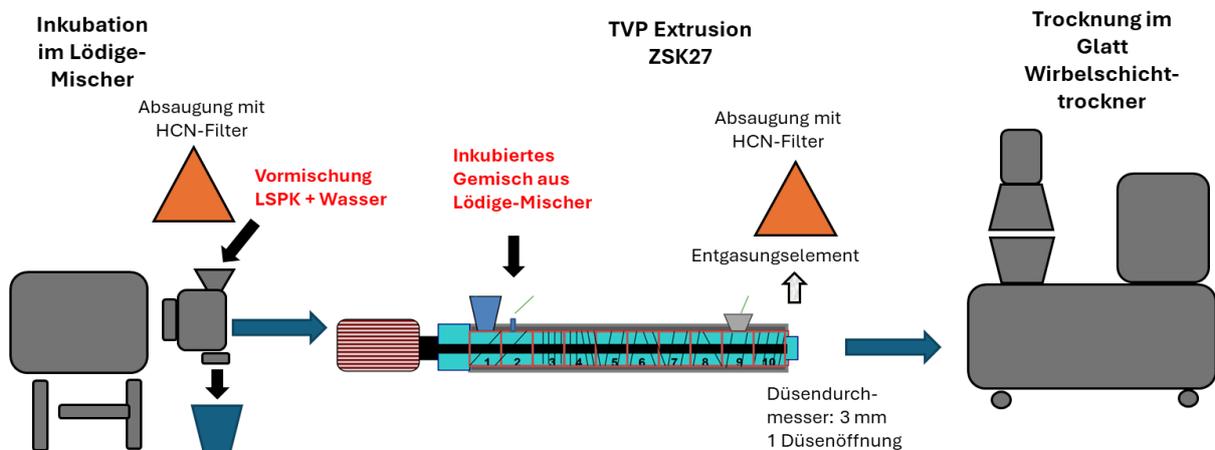


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Behandlungsprozesses bestehend aus Inkubation, Extrusion und Trocknung



Abbildung 3.5: Aufbau des Extrusionssetups Dry Extrusion zur Herstellung von TVP.

Für die Produktentwicklung von texturiertem Pflanzenprotein zur Anwendung in Fleischersatzprodukten wurde der Zusatz weiterer Proteine zum LSPK untersucht, um sowohl die Bitterkeit zu reduzieren als auch die fleischartige Textur zu verbessern. Nach der Inkubation (30 min, 40 °C) wurde der LSPK mit Erbsenprotein (Firma Roquette), Ackerbohnenprotein (Vestkorn) oder Sojaprotein (Firma ADM) in verschiedenen Mischungsverhältnissen vermischt und anschließend extrudiert, um die gewünschten texturgebenden Eigenschaften zu erzielen. Die getrockneten Extrudate wurden entweder bei 70 °C im Wirbelschichttrockner oder im Trockenschrank bei 70 °C getrocknet.

#### High Moisture Extrusion

Zur Untersuchung der Eignung von LSPK für die Herstellung von Nassextrudaten wurden High Moisture Extrusionsversuche durchgeführt. Dazu wurde zunächst 10,5 kg LSPK mit 4,5 kg Wasser gemischt und für 30 Minuten bei 40 °C im Lödige-Mischer inkubiert. Anschließend wurde das behandelte LSPK mit Erbsenproteinisolat (Firma Roquette) in zwei Mischungsverhältnissen (30:70 und 20:80; LSPK zu Wasser) vermischt. Im zweiten Extrudersegment erfolgte die zusätzliche Dosierung von Wasser. Für die Ausbildung der fasrigen Struktur und Texturierung ist bei der High Moisture Extrusion eine Kühldüse notwendig, die am Austritt des Extruders montiert wird. Die Kühltemperatur wurde auf 55 – 60 °C eingestellt. Der Gesamtdurchsatz betrug 18 kg/h, wobei 8,7 kg/h der Feststoffkomponente aus dem behandelten LSPK-Erbse-Gemisch entsprachen. Die Extrusionsversuche wurden sowohl mit installierter Entgasung im Extrudersegment 7 als auch ohne Entgasung durchgeführt.



Abbildung 3.6: Aufbau des Extrusionssetups High Moisture Extrusion zur Herstellung von Nassextrudaten.

### 3.4.3 Fermentation

#### 3.4.3.1 Ermittlung von Stämmen mit $\beta$ -Glucosidase-Aktivität

Das Ziel dieses Teilarbeitspaketes war die Reduktion des Blausäuregehalts in Leinsamenpresskuchen durch Fermentation mit verschiedenen *Lactobacillus*- und *Pediococcus*-Stämmen. Auf Basis der Literatur wurden Stämme aus der DIL-internen Sammlung sowie von offiziellen Stammsammlungen (DSMZ, ATCC) ausgewählt, die eine hohe  $\beta$ -Glucosidase- oder Linamarase-Aktivität aufwiesen (Tabelle 11). Diese Enzyme sind in der Lage,  $\beta$ -glykosidische Bindungen zu spalten und somit potenziell cyanogene Verbindungen im Leinsamen abzubauen.

Tabelle 11: Für die Fermentationsversuche ausgewählten *Lactobacillus* spp. und *Pediococcus pentosaceus*-Stämme

Spezies	Stamm	Kultivierungsbedingungen
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	DSM 20280	MRS, 30 °C
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	DSM 20281	MRS, 30 °C
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	ATCC 8042	MRS, 30 °C
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	DSM 20336T	MRS, 30 °C
<i>Lactobacillus plantarum</i>	DSM 20174 = ATCC 14917	MRS, 30 °C
<i>Lactobacillus plantarum</i>	DSM 20686 T	MRS, 30 °C
<i>Lactobacillus cellobiosus</i>	DSM 20055 = ATCC 11739	MRS, 30 °C
<i>Lactobacillus kefir</i>	DSM 20587 T	MRS, 30 °C
<i>Lactobacillus helveticus</i>	ATCC 12046	MRS, mikroaerophil-anaerob, 37 °C
<i>Lactobacillus buchneri</i>	DSM 20057 T = ATCC 4005	MRS, 37 °C
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	DSM 20242	MRS, mikroaerophil-anaerob, 37 °C
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	DSM 20079T	MRS, mikroaerophil-anaerob, 37 °C
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	ATCC 53544	MRS, mikroaerophil-anaerob, 37 °C
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	ATCC 521	MRS, mikroaerophil-anaerob, 37 °C
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	ATCC 4357	MRS, mikroaerophil-anaerob, 37 °C

In einem ersten Schritt wurden die  $\beta$ -Glucosidase-Aktivitäten der verschiedenen Stämme mittels eines Assays bestimmt. Die Stämme wurden dafür zunächst in einer Vorkultur herangezogen, bevor dem Nährmedium MRS das künstliche chromogene Substrat p-Nitrophenyl- $\beta$ -Glucopyranosid (pNG) in einer Konzentration von 800  $\mu\text{g}/\text{ml}$  zugegeben wurde. Nach 24 Stunden wurde die Menge an freigesetztem p-Nitrophenyl über die Absorption bei 405 nm im Spektralphotometer gemessen und anhand einer Standardkurve ausgewertet

#### 3.4.3.2 Bestimmung der Hintergrundmikrobiota

Um die autochthone Mikrobiota im Leinsamenpresskuchen zu identifizieren, wurde der Presskuchen ohne gezielte Zugabe von Bakterienstämmen fermentiert. Dazu wurde der Leinsamenpresskuchen in einem Verhältnis von 1:20 mit Wasser versetzt und über einen Zeitraum von drei Tagen bei 30 °C inkubiert. Proben wurden täglich entnommen und die Keimzahl sowohl unter aeroben als auch anaeroben Bedingungen auf MRS- (für Milchsäurebakterien) und CASO-(für Gesamtkoloniezahl) Nährböden bestimmt. Dies ermöglichte die Identifizierung der in den Proben vorkommenden Mikroorganismen und deren Entwicklung während der Fermentation.

#### 3.4.3.3 Fermentation mit ausgewählten Stämmen zur Blausäurereduktion

In einem weiteren Ansatz wurde der Leinsamenpresskuchen in einem Verhältnis von 1:20 mit Wasser versetzt und gezielt mit vier ausgewählten Milchsäurebakterienstämmen (*Pediococcus pentosaceus* DSM 20281, *Lactobacillus plantarum* DSM 20174, *Lactobacillus cellobiosus* DSM 20055 und einem aus dem Leinsamenpresskuchen isolierten *Pediococcus acidilactici*-Stamm) beimpft (1:1000). Die Fermentation erfolgte über drei Tage bei 30 °C. Es wurden täglich Proben genommen und die Keimzahl auf MRS- und CASO-Nährböden bestimmt.

Der pH wurde zu Beginn der Fermentation auf 6,0 oder 5,5 oder 5,0 eingestellt. Dies sollte zur Unterdrückung des Auskeimens von Sporen bzw. des Wachstums der Hintergrundmikrobiota dienen

Zur Untersuchung des Einflusses der Fermentation auf den Blausäuregehalt im Leinsamenpresskuchen wurde der Leinsamenpresskuchen nach der Inokulation mit den ausgewählten Bakterienstämmen in Wasser bei 30 °C über zwei Tage fermentiert. Täglich wurden Proben entnommen, zentrifugiert und getrocknet. Die Trocknung erfolgte über 3–5 Tage bei 30 °C. Die getrockneten Proben wurden bis zur Analyse bei -20 °C gelagert. Die Messung des Blausäuregehalts erfolgte gemäß der Norm ASU F 0093 2013-04 in Doppelbestimmung.

#### 3.4.3.4 Weitere Versuche zur Erklärung des Blausäureanstieges während der Fermentation

Um den unerwarteten Anstieg des Blausäuregehalts während der Fermentation weiter zu untersuchen, wurde in zusätzlichen Versuchen ein mit Dampf vorbehandelter Leinsamenpresskuchen verwendet, der einen reduzierten Blausäuregehalt aufwies. Ziel war es zu prüfen, ob die Freisetzung von Blausäure durch die Fermentation oder durch die Substratvorbereitung beeinflusst wird. Zudem wurde der Leinsamenpresskuchen mit sterilfiltriertem Kulturüberstand von *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281 inkubiert. Da die  $\beta$ -Glucosidase-Aktivität im Überstand der Bakterien nachgewiesen wurde, sollte der Abbau

cyanogener Glykoside auch ohne das Vorhandensein intakter Bakterien stattfinden. Zur Kontrolle wurde ein Ansatz ohne Kulturüberstand (nur Wasser) mitgeführt und die Fermentation wie üblich durch Beimpfen mit einer aktiven Kultur von *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281 durchgeführt. Alle Ansätze wurden für zwei Tage bei 30 °C inkubiert.

### **3.5 Analysen zur Charakterisierung**

#### **3.5.1 Externe Analysen**

##### **3.5.1.1 Analyse auf Blausäure (Labor SGS)**

Die Blausäurekonzentration vom externen Labor SGS wurde gemäß der modifizierten Methode nach VDLUFA Methodenbuch Bd. III 16.3.2 bestimmt. Dazu wird eine repräsentative Probe verwendet und homogenisiert. Die Spaltung der cyanogenen Glykoside erfolgt durch Emulsin (Mandelschlämme). Die zu untersuchende Probe wird mit Wasser und Mandelschlämme versetzt und mindestens 16 Stunden bei 39°C inkubiert.

Anschließend wird die Probe mittels Wasserdampfdestillation destilliert. Das Destillat wird in Silbernitrat aufgefangen. Die anschließende Titration wird automatisch durchgeführt, wobei das Destillat mit Ammoniumthiocyanat titriert wird, um die Blausäurekonzentration zu bestimmen.

##### **3.5.1.2 Analyse auf Blausäure (Labor Eurofins)**

Die externe Analyse der cyanogenen Glykoside in Leinsamenpresskuchen durch das Labor Eurofins erfolgte mittels Kernspinresonanzspektroskopie (NMR). Hierfür wird zunächst eine Extraktion der cyanogenen Glykoside aus der Probe durchgeführt. Anschließend erfolgt die <sup>1</sup>H-NMR Messung des Extraktes, wobei Linustatin und Neolinustatin quantifiziert werden. Die Gehalte dieser Glykoside werden anschließend umgerechnet und als Blausäure in [mg/kg] angegeben.

#### **3.5.2 Chemische Analysen am DIL**

##### **3.5.2.1 Analyse auf Blausäure**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde am DIL eine Methode zur Bestimmung der Blausäure etabliert gemäß der amtlichen Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 64 LFGB F0093. Der Begriff "Gesamtcyanid" wird verwendet, um den Cyanidgehalt eines Lebensmittels als Summe von gebundenem (cyanogene Glykoside, Cyanohydrine) und "freiem" Cyanid zu beschreiben. Nach der EN 16160:2012 liegt die Blausäure in Futtermitteln in Form von Cyanoglykosiden / cyanogenen Glykoside vor.

Zur Extraktion der cyanogenen Glykoside aus den Leinsamenpresskuchen wurden 3 bis 5 Gramm der Probe in 80 ml einer 0,02 M Orthophosphorsäure suspendiert, wobei die Temperatur konstant unter 10°C gehalten wurde. Die Probe wurde eine Stunde lang bei einer Temperatur von unter 26°C unter Verschluss gerührt. Anschließend wurden 15 ml einer 0,2 M EDTA-Lösung, ebenfalls gekühlt (<10°C), zugegeben, und die Mischung weitere 10 Minuten

bei gleicher Temperatur gerührt. Der pH-Wert der Lösung wurde mit einer 0,1 M Natriumhydroxidlösung auf 5,9 bis 6,0 eingestellt.

Zur enzymatischen Spaltung der in der Probe enthaltenen Cyanoglycoside wurde 0,5 ml einer Beta-Glucosidase-Lösung mit einer Aktivität von 200 Internationalen Einheiten pro Milliliter hinzugegeben. Die Probe wurde über Nacht bei 38°C unter Verschluss gerührt, um eine vollständige Umsetzung der Cyanoglycoside zu gewährleisten. Danach wurde die Lösung auf unter 10°C abgekühlt, um die weitere Verarbeitung vorzubereiten.

Für die Wasserdampfdestillation wurde die Probe mit maximal 50 ml Wasser (gekühlt auf unter 10°C) in einen Kjeldahlkolben überführt. Anschließend wurden 10 ml einer 0,75 M Natriumacetatlösung, die zuvor mit Essigsäure auf einen pH-Wert von 7,9 eingestellt worden war, hinzugefügt. Der Kjeldahlkolben wurde an eine Wasserdampfdestillationseinheit angeschlossen, und es wurden etwa 250 ml des Destillats in einem 500 ml Messkolben aufgefangen, der 50 ml einer 0,1 M Natriumhydroxidlösung (gekühlt auf <10°C) enthielt. Der Messkolben wurde abschließend mit Wasser auf das Endvolumen aufgefüllt.

Für die Derivatisierung wurden 0,5 ml der erhaltenen Lösung in ein HPLC-Vial pipettiert. Zur Reaktion wurden jeweils 100 µl einer Taurinlösung und 100 µl einer 2,3-Naphthalendicarboxyaldehyd-Lösung (NDA) hinzugefügt. Dadurch bildete die Blausäure einen fluoreszierenden Cyanidkomplex, der für die anschließende chromatographische Analyse geeignet war.

Die Bestimmung des Blausäuregehalts erfolgte mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC)). Hierfür wurde eine LiChrospher 100 RP 18 Säule (5 µm, 250 x 4 mm) verwendet. Als mobile Phase diente eine Mischung aus 850 ml Methanol und 1000 ml eines 0,05 M Phosphatpuffers, die isokratisch bei einer Flussrate von 1,0 ml/min eingesetzt wurde. Es wurden 10 µl der derivatisierten Probelösung injiziert und die Detektion des Cyanidkomplexes erfolgte mittels Fluoreszenzdetektion bei einer Anregungswellenlänge von 418 nm und einer Emissionswellenlänge von 460 nm.

Die Entfernungsrates an HCN wird durch Formel 1 berechnet und beschreibt den Gehalt an Blausäure, der durch die jeweilig angewandten Methoden entfernt wurde.

$$\text{Entfernungsrates HCN [\%]} = \left(1 - \frac{\text{Gehalt HCN nach Behandlung}}{\text{Gehalt HCN Romaterial}}\right) \cdot 100 \quad (\text{Formel 1})$$

#### 3.5.2.2 Big 8

Die Analyse der Big 8 wurde nach der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 durchgeführt und umfasst das Gesamtfett mit der Fettsäureverteilung, der Trockenmasse, die Asche, das Gesamtprotein, die Kohlenhydrate und davon der Zucker, Natrium sowie die Ballaststoffe. Die am DIL dafür durchgeführten Methoden sind in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 12: Verfahren zur Bestimmung der Big 8

Parameter	Verfahren	Einheit
Wasser	103°C DIL256-1 2011-3	g/100g
Asche	550°C DIL259-2 2011-2	g/100g
Rohprotein	VDLUFA III 4.1.1 1993	g/100g
Fett	DGF C-III 19 (00)	g/100g
Kohlenhydrate	Berechnung by difference	g/100g
Ballaststoffe gesamt	ASU L00.00-18 2017-10	g/100g
Saccharose	HPLC-RI DIL789-13 2016-7	g/100g
Glukose	HPLC-RI DIL789-13 2016-7	g/100g
Fruktose	HPLC-RI DIL789-13 2016-7	g/100g
Maltose	HPLC-RI DIL789-13 2016-7	g/100g
Zucker, Summe Mono- und Disaccharide	Berechnung	g/100g
Fettsäuren (gesättigt)	GC-FID DIL770-21 2019-4	g/100g
Fettsäuren (einfach ungesättigt)	GC-FID DIL770-21 2019-4	g/100g
Fettsäuren (mehrfach ungesättigt)	GC-FID DIL770-21 2019-4	g/100g
Natrium	550°C / ICP-OES DIL828-11 2018-5	g/100g
Salz	Berechnung	g/100g
Brennwert	Berechnung	kJ/100g
Brennwert	Berechnung	kcal/100g

### 3.5.3 Physikalische Analysen am DIL

#### 3.5.3.1 Farbmessung

Die Farbe wurde photometrisch mittels des CM-600d der Conica Menolda Holding K.K., Tokio Japan gemessen und auf Grundlage des CIE-Farbsystems ausgewertet.

#### 3.5.3.2 Schäumung

Das Schaumvermögen beschreibt die Fähigkeit eines Schaums, sein Volumen durch Einschluss von Luft zu vergrößern, während die Schaumstabilität die Fähigkeit angibt, dieses Volumen über einen bestimmten Zeitraum zu beibehalten.

Für die Untersuchung wurden unbehandelter LSPK, im Labormaßstab behandelte sowie sprühgetrocknete Presskuchen sowohl bei Raumtemperatur als auch bei vorherigem Erhitzen auf 60 °C und anschließender Abkühlung verwendet. Dazu wurde eine 2%-ige Proteinlösung aus den LSPK-Proben in destilliertem Wasser hergestellt, die anschließend 2 Stunden gerührt wurde. Der pH-Wert der Dispersion wurde auf 6,5 eingestellt.

Für die Proben, die auf 60 °C erhitzt wurden, erfolgte das Erhitzen für 15 Minuten, gefolgt von einer Abkühlung auf Raumtemperatur mithilfe von Eiswasser. Schließlich wurde die Dispersion

mit einem Aerolator geschäumt, und das Schaumvolumen wurde nach 5, 10 und 15 Minuten gemessen.

#### 3.5.3.3 Emulgierkapazität

Zunächst wurde die Emulgierkapazität an unbehandeltem, im Labormaßstab behandeltem sowie sprühgetrocknetem LSPK untersucht. Dabei wurde die Proteinkonzentration in der Wasserphase auf 0,5 % eingestellt und die Mischung für 2 Stunden gerührt. Anschließend wurde der pH-Wert auf 6,5 justiert. Um den Einfluss der Temperatur auf die Emulgierfähigkeit zu analysieren, wurden einige Proben auf 60 °C erhitzt, 15 Minuten bei dieser Temperatur gehalten und dann mit Eiswasser auf Raumtemperatur abgekühlt. Alle Proben wurden dann in eine wässrige Phase mit einer grenzflächenaktiven Substanz (Tensid) gegeben. Gefärbtes Sonnenblumenöl (mit Sudan Blau) wurde kontinuierlich mithilfe einer Spritze zugegeben und vor-dispersiert (30 Sekunden bei 1100 U/min). Danach erfolgte das Dispergieren bei 1300 U/min für eine Minute. Schließlich wurde die entstandene Emulsion bewertet, indem gemessen wurde, ab welcher Ölmenge sich nach 30 Minuten Standzeit sichtbares Öl absetzte. Die Untersuchung der extrudierten Probe erfolgte analog, wobei die Proteinkonzentration in der Wasserphase auf 1,0 % eingestellt wurde.

#### 3.5.3.4 Wasserimmobilisierung

Die Wasserimmobilisierung wurde durch Zentrifugation bestimmt. Die Proben (unbehandelter, im Labormaßstab behandelter und sprühgetrockneter LSPK) wurden im Verhältnis 1:9 mit Wasser versetzt, was einem Proteingehalt von 10 % entspricht. Der pH-Wert wurde auf 6,5 eingestellt und die Proben durften 2 Stunden quellen. Um den Temperatureinfluss zu untersuchen, wurden einige Proben auf 60 °C erhitzt, für 15 Minuten gehalten und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Alle Proben wurden dann mit einer Zentrifuge Sorvall RC 6+ bei 20°C und unter Verwendung des Rotors F21-8x50 zentrifugiert.

Die Untersuchung der extrudierten Probe erfolgte analog, wobei jedoch eine Proteinkonzentration von 5,56 % angesetzt wurde.

#### 3.5.3.5 Wasserbindung

Zur Analyse der Wasserbindung wurde die Differential Scanning Calorimetry (DSC) verwendet. DSC ist eine Analysetechnik, die den Wärmefluss in eine Probe hinein oder aus ihr heraus als Funktion der Zeit und/oder der Temperatur misst.

Die LSPK-Proben wurden auf -40°C eingefroren, wodurch das ungebundene (freie) Wasser kristallisiert. Die Menge an freiem Wasser wird anschließend durch die Messung der gebildeten Kristalle bestimmt. Die DSC-Temperaturbereiche reichten von -40°C bis 60°C. Der Wärmefluss in die Probe (endothrm) oder aus der Probe (exotherm) wurde als Funktion der Zeit und der Temperatur für die anschließende Analyse aufgezeichnet. Die in den DSC-Kurven dargestellte Enthalpie (in J/g) kann durch Integration der Fläche des Peaks und der interpolierten Basislinie zwischen Reaktionsbeginn und -ende (d.h. Peakbereich) ermittelt werden. Die Berechnung/Integration erfolgt mittels DSC-Software bei der Messung

### 3.5.3.6 Gelbildung

Die Gelbildung von LSPK wurde mithilfe eines Rheometers untersucht. Hierfür wurde eine 5 %-ige Lösung des LSPK hergestellt, da eine höhere Konzentration von 7 % aufgrund des starken Quellverhaltens des Pulvers nicht möglich war. Die Proben wurden in einer Temperaturrampe von 20 bis 98 °C in 5 K-Schritten erhitzt und die Schubspannung über der Temperatur aufgezeichnet.

### 3.5.3.7 DSC für Proteinstrukturveränderungen

Weiterhin wurde eine Differential Scanning Calorimetry-Analyse durchgeführt, um Veränderungen in der Proteinstruktur des LSPKs zu erfassen. Die Proben wurden mit einer Heizrate von 5 K/min von 20 bis 100 °C erhitzt und die benötigte Energie zur Denaturierung der Proteine gemessen.

## 3.5.4 Mikrobielle Analysen am DIL

Der behandelte LSPK wurde einer mikrobiellen Analyse unterzogen, um die Auswirkungen der Behandlung zur Blausäurereduktion auf die mögliche Anreicherung von Sporenbildnern zu untersuchen. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Aerobe Gesamtkeimzahl (nach ASU L00.00-88/2)
- Aerobe Sporenbildner, mesophil/thermophil (interne Methode)
- Hefen und Schimmelpilze (in Anl. an ASU L01.00-37)

## 3.6 Sensorik

### 3.6.1 Sensorik der Leinöle und Presskuchen

Das Ziel der sensorischen Bewertung der Öle und Presskuchen ist die Identifizierung von Unterschieden der typischen Attribute von Lein zwischen verschiedenen Sorten. Das Öl und der Presskuchen werden sensorisch mit dem IN/OUT-Test auf die Attribute sautig, brotig, nussig, bitter und adstringierend geprüft (vgl. DLG Sensorik DIN 10973, Sensorische Prüfverfahren – Innerhalb/Außerhalb-Prüfung aus dem Jahre 2006). Zudem werden sogenannte „Off-Flavour“ bzw. sensorische Fehler vermerkt. Für die Prüfung wird das interne Sensorikpanel der Ölmühle Moog herangezogen. Dieses besteht aus 12 Mitarbeitern aus den Bereichen Qualitätsmanagement und -sicherung, Produktmanagement und Forschung & Entwicklung, die sich regelmäßig schulen.

### 3.6.2 Verbraucherakzeptanztest

Wie im Ergebnisteil beschrieben ist, hat sich die Methode der Inkubation und Extrusion des Leinsamenpresskuchens als erfolgreich im Bezug auf die Blausäurereduktion erwiesen. Die dabei entstehenden Extrudate eignen sich in verschiedensten Lebensmittelanwendungen. Um eine gute Expansion und ein angenehmes Geschmacks- und Texturprofil zu erhalten, wird ein Extrudat aus 60 % Erbsenproteinisolat und 40 % Leinsamenpresskuchen hergestellt. Dieses Extrudat wird in einer Vergleichsverkostung mit dem am Markt etablierten Sunflowerhack von

Sunflowerfamily bewertet. Für den Fragebogen wird eine Hedonische Prüfung mit JAR-Fragen kombiniert. Hierdurch kann die Akzeptanz des Aussehens, Textur, Geschmack bewertet werden. Zudem werden einzelne Attribute als JAR abgefragt, wodurch eine subjektive Einschätzung der Produkte erfolgt. Fragen zur Ernährungsweise, der Kaufwahrscheinlichkeit und demografische Fragen erlauben eine Prognose der Käuferschaft. Der Fragebogen wird mit SoSciSurvey erstellt und die Befragung am Tablet/PC/Smartphone durchgeführt. Um möglichst verschiedene Verbrauchergruppen für die Verkostung zu gewinnen, wurde pro Projektpartner (DIL 58 Probanden, Uni Bonn 40 Probanden, Ölmühle Moog 37 Probanden) eine Verkostung durchgeführt. Insgesamt wurden 135 Probanden befragt. Die Hälfte der Probanden waren im Alter von 31-45 Jahren, etwa ein Viertel waren jünger und ein Viertel älter. Es nahmen ca. 50 % Männer und 50 % Frauen an der Verkostung teil. Jeweils 40 % der Probanden gaben an häufig oder wenig Fleisch (Flexitarisch) zu essen, 15 % ernähren sich vegetarisch und 4 % vegan.

## **4 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse**

### **4.1 Arbeitspaket Grow (Universität Bonn, Gäa e.V.)**

Im Arbeitspaket GROW stand die Frage der ertrags- und qualitätswirksamen Faktoren im Anbau von Lein im Vordergrund. In zahlreichen experimentellen Untersuchungen im Versuchsbetrieb und auf Praxisflächen wurden die Faktoren Sorte, Unkraut, Stickstoffdüngung, Saatzeit und Saatstärke sowie Reihenabstand und Ernteverfahren bei Winter- und Sommerlein untersucht. Diese Bereiche wurden von der Anbaupraxis und der ackerbaulichen Fachberatung als wichtige Stellschrauben zur Ertrags- und Qualitätssicherung benannt. Zudem liegen Hinweise aus der Literatur vor, dass es sich bei den untersuchten Faktoren um ertrags- als auch qualitätsrelevante Faktoren handelt.

#### **4.1.1 Sorten**

Der Anbau von Winterlein stellt eine interessante Alternative zum Sommerleinanbau dar. Nachteilig sind die fehlenden Ergebnisse aus Sortenprüfungen, die Informationen zu den Ertrags- und Qualitätseigenschaften der Sorten unter variierenden Standort- und Klimabedingungen liefern. Für Sommerlein hingegen besteht ein etabliertes Netzwerk aus Landessortenversuchen (LSV), auch auf ökologisch bewirtschaftenden Standorten, sodass die Anbaubetriebe und die Fachberatung langjährige mehrortige Ergebnisse nutzen können. Im Rahmen von Linovit wurden Prüfungen von vier Winterleinsorten am Standort Klein-Altendorf (NRW) durchgeführt und neben den agronomischen Eigenschaften verschiedene Qualitätsparameter bewertet. Für Sommerlein wurden die Qualitätseigenschaften der Ernteproben aus den ÖKO-LSV ausgewertet und um weitere Prüfungen am Standorte Klein-Altendorf ergänzt.

#### 4.1.1.1 Winterlein

Am Campus Klein-Altendorf, Außenlabor der Universität Bonn, NRW wurden in den Jahren 2020-2023 vier Winterleinsorten geprüft (siehe Abschnitt 3.2.2)

Versuchsdurchführung: keine N-Düngung, mechanische Unkrautregulierung, Vorfrucht jeweils Getreide, Saatstärke: 40 kg/ha, Reihenabstand: 45 cm.

##### Versuchsvarianten

Gelbsamige Sorte: `Orival`

Braunsamige Sorten: `Sideral`, `Apalache`, `Hivernal`

##### Ergebnisse

Der Feldaufgang der Leinpflanzen lag zwischen 10 und 13 Tagen. Die Blüte war jeweils zwischen Anfang und Mitte Mai. Im Mittel der Jahre lag die Kulturdauer zwischen 288 und 309 Tagen ( $\bar{\varnothing}$  299). In allen Versuchsjahren reifte die Sorte `Apalache` deutlich frühzeitiger ab. Früherster Erntetermin war der 10.7.23 während 2020 die Sorte `Orival` erst am 9.8.20 gedroschen werden konnte.

Auffallend waren die hohen Pflanzenlängen in den Versuchsjahren 2022 und 2023. Fast alle Sorten erreichten eine Höhe über 80 cm zur Ernte. Die mittlere Pflanzenzahl/m<sup>2</sup> lag 2021 bei 356 Pflanzen, 2022 bei 330 und 2023 bei 319 Pflanzen/m<sup>2</sup>. 2022 wurde das höchste Ertragsniveau erreicht. Während 2021 und 2023 keine deutlichen Unterschiede im Kornertrag zwischen den Sorten festgestellt wurden, lag 2022 die Sorte `Hivernal` unter dem Ertrag von `Apalache` und `Orival` (Tabelle 14).

In Tabelle 15 sind die Eigenschaften der Leinsorten dargestellt. `Apalache` zeigte sehr variierende Tausendkornmassen (TKM). Typisch für `Orival` ist ein kleines Korn mit einer TKM unter 6 g. Über dem Grenzwert für Blausäure in Leinsaat von 150 mg/kg Samen lagen im Jahr 2021 die Sorten `Sideral` und `Orival`. Die Sorte `Apalache` fiel insgesamt durch niedrige Blausäuregehalte auf.

In den Samen wurde der Fettgehalt analysiert, der fast in allen Fällen über 40 g/100 g Saat lag. Der Anteil an  $\alpha$ -Linolensäure (%) im Leinöl erreichte nicht immer die gewünschten 56 %. Sorteneffekte waren nicht erkennbar.

Der Cadmiumgehalt (Cd) der Samen zeigte deutliche Unterschiede zwischen den Sorten. Bei einem Ausgangsgehalt von 0,4- 0,5 mg/kg im Boden und einem pH-Wert von 6,9 - 7, lag der Cd-Gehalt der Samen bei den Sorten `Sideral` und `Orival` höher als bei `Apalache`. Bei `Orival` wurde in einer Probenwiederholung sogar der Grenzwert überschritten. Der zulässige Höchstgehalt an Cadmium für Leinsamen liegt bei 0,5 mg/kg Samen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Cadmiumgehalt der Leinsamen (mg/kg TM), Campus Klein-Altendorf, (Labore: SGS Analytics, AgroLab)

	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Apalache	0,23 a	0,27 A	0,44 a
Orival	0,39 b	0,41 B	0,62 b
Sideral	0,40 b	-	0,43 a
Hiver	-	0,33 A	-
Cadmiumgehalt Boden mg/kg	0,5	0,5	0,4
pH-Wert Boden	6,9	7,0	7,0

Standort- und jahresgetrennte statistische Verrechnung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = nicht signifikant

Tabelle 14: Agronomische Kennzahlen der geprüften Winterleinsorten am Standort Klein-Altendorf. 2020-2023  
 Statistisch verrechnet wurden Pflanzenhöhe, Pflanzenzahl und Ertrag.

(unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Tukey  $\leq 0,05$ , n.s. = nicht signifikant)

		2020/2021			2021/2022			2022/2023		
Sorte		Sideral	Orival	Apalache	Apalache	Orival	Hivernal	Apalache	Sideral	Orival
Aussaat		7.10.2020			23.9.2021			13.9.2022		
Feldaufgang		19.10.20	19.10.20	19.10.20	3.10.22	3.10.22	4.10.22	23.9.22	23.9.22	23.9.22
Blühbeginn		20.5.21	15.5.21	12.5.21	2.5.22	10.5.22	2.5.22	2.5.23	11.5.23	11.5.23
Blühende		16.6.21	16.6.21	10.6.21	15.5.22	21.5.22	20.5.22	22.5.23	25.5.23	28.5.23
Reife		22.7.21	1.8.21	18.7.21	12.7.22	23.7.22	23.7.22	8.7.23	19.7.23	19.7.23
Tage Aussaat bis Aufgang		12	12	12	10	10	11	10	10	10
Tage Aussaat bis Blühbeginn		225	220	217	221	229	221	231	240	240
Tage Aussaat bis Reife		288	306	288	292	303	303	297	309	309
Ernte		22.7.21	9.8.21	22.7.21	16.7.22	2.8.22	27.7.22	10.7.23	20.7.23	20.7.23
Ernte Sommerlein Lirina		26.8.21			3.8.22			10.8.23		
Pflanzenlänge zur Ernte (cm)		51 a	53 a	60 b	80	82	85	78	85	85
Pflanzenanzahl/m <sup>2</sup> zur Ernte		361	351	358	336	349	305	312	329	317
Ertrag: gereinigte Ware dt/ha		10,2	12,1	12,0	21,4 b	20,3 b	16,5 a	15,0	16,2	18,5

Tabelle 15: Eigenschaften des Erntegutes unterschiedlicher Winterleinsorten am Standort Klein-Altendorf.

(Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Tukey  $\leq 0,05$ , keine Angaben = nicht signifikant, C18:3 konnte nicht verrechnet werden)

Sorte	2020/2021			2021/2022			2022/2023		
	Apalache	Orival	Sideral	Apalache	Orival	Hivernal	Apalache	Orival	Sideral
TKM (g)	5,6 b	5 a	4,6 a	7,3 b	5,7 a	6,2 b	7,0 b	5,5 a	6,5 b
Quellzahl <sup>3</sup>	4,7	4,5	4,7	4,3	4,5	4,0	5,0	6,0	5,0
Fettgehalt <sup>2</sup> g/100 g	41,9 b	42,2 b	39,8 a	42,8 b	42,1 b	40,6 a	40,7	41,8	40,1
Proteingehalt <sup>2</sup> g/100 g	22,1	21,8	21,7	18,1 a	19,4 ab	21,2 b	16,9	16,6	17,8
Ballaststoffgehalt <sup>2</sup> g/100 g	39,4 b	35,3 a	41,3 b	25,6 a	29,1 b	25,5 a	28,9	28,3	29,0
$\alpha$ -Linolensäure, C18:3 <sup>2</sup> (%) im Öl	54,3	57	55	60,9	57,5	53,5	58,8	54,5	-
Blausäuregehalt HCN mg/kg Samen <sup>1</sup>	108 a	194 b	206 b	97 a	96 a	114 b	87 a	100 ab	107 b

<sup>1</sup> in TM, Analyse: Institut für Produktqualität Berlin <sup>2</sup> in TM oder Öl Analyse: SGS Analytics GmbH, <sup>3</sup> Analyse: IGV TestLab

In Tabelle 16 sind die Merkmale der geprüften Sorten am Standort Klein-Altendorf aufgeführt. Lediglich im Winter 2022/2023 kam es zu Auswinterungsschäden bei der Sorte `Apalache`. Besonders auffällig waren die Zwiewuchsneigung und die Reifeverzögerung des Stroh.

Tabelle 16: Merkmale der geprüften Winterleinsorten, Campus Klein-Altendorf 2020-2022  
1 = fehlend, 2 = sehr gering, 3 = gering, 4 = gering bis mittel, 5 = Mittel, 6 = Mittel bis stark, 7 = stark, 8 = stark bis sehr stark, 9 = sehr stark

	2020/2021			2021/2022			2022/2023		
	Sideral	Orival	Apalache	Apalache	Orival	Hiver	Apalache	Sideral	Orival
Auswinterung	1	1	1	1	1	1	4	1	1
Lagerneigung zur Ernte	1	1	1	3	1	7	2	1	1
Ausfall	4	3	4	2	4	4	1	1	1
Zwiewuchs	2	2	3	5	5	5	2	1	1
Reifeverzögerung Stroh	1	3	3	3	7	5	1	3	3
Krankheitsanfälligkeit	4	4	4	3	3	3	1	1	1
Befall mit E. Mehltau ( <i>Oidium lini</i> )	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Verschwärzung der Kapseln zur Ernte	5	7	4	1	1	1	1	1	1

#### Fazit Winterlein

Die Sichtungungen von Winterleinsorten am Standort Campus Klein-Altendorf zeigten insgesamt wenige deutliche Unterschiede zwischen den Sorten. Die braunsamigen Sorte `Apalache` und die gelbsamige `Orival` präsentierten sehr homogene Bestände. `Orival` reifte deutlich später aus und fiel durch eine geringe Tausendkornmasse auf. `Apalache` war frühreif, zeigte eine bessere Strohabreife, allerdings weniger Winterhärte.

Ertragsunterschiede waren nicht nachweisbar zwischen den Sorten, auch in den wertgebenden Inhaltsstoffen zeigten sich wenige Unterschiede. Auffallend war allerdings die höhere Cadmiumaneignung von `Orival` in drei Versuchsjahren und der stabil niedrige Blausäuregehalt in den Samen der Sorte `Apalache`.

#### 4.1.1.2 Sommerlein

In Zusammenarbeit mit den Öko-LSV Öllein wurden in Linovit die wertgebenden und wertmindernden Inhaltsstoffe der Leinsorten in den Jahren 2021-2024 untersucht und um Sortenprüfungen an der Universität Bonn erweitert. 2024 lag der Fokus einer Sortensichtung auf dem  $\alpha$ -Linolensäure- und dem Blausäuregehalt unterschiedlicher Sorten. Die Versuchsstandorte sind in Tabelle 5 beschrieben.

Kurzinformation zu den Prüf- und Versuchsstandorten:

- Bernburg: Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt).  
Sortenempfehlungen: [https://llg.sachsen.anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MLU/LLFG/Dokumente/04\\_themen/sortenpruefung/sorten\\_hinweise/2023/OElein\\_23.pdf](https://llg.sachsen.anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LLFG/Dokumente/04_themen/sortenpruefung/sorten_hinweise/2023/OElein_23.pdf)
- Görsdorf: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie).  
Sortenempfehlungen: <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/1646.htm>
- Mittelsömmern, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum).  
Sortenempfehlungen: <https://tillr.thueringen.de/wir/publikationen/landessortenversuche/oekolandbau>
- Klein-Altendorf, Universität Bonn

### Prüfglieder

Folgende Sorten wurde in den Landessortenversuchen – teilweise mehrjährig geprüft:

Brausamige Sorten: Lirina, Serenade, Justess, Bingo, Paltin, Richess,

Gelbsamige Sorten: Ingot, LS Koral, LS Orcalia

Nur am Standort Klein-Altendorf:

Brausamige Sorten: Kaolin, Omegalin, Talon, Blaues Wunder, Sunrise, Opera, Riviera

Gelbsamige Sorten: Goldstern, Rosetta

### Blausäure

Grundlage für die Bewertung der Sorten ist der Grenzwert für „Unverarbeitete ganze, geriebene, gemahlene, geknackte, gehackte Leinsamen, die für den Endverbraucher in Verkehr gebracht werden“  $\leq 150$  mg/kg Saat (Quelle: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1364>).

In den LSV und in Klein-Altendorf zeigten sich deutliche Sorteneffekte beim Gehalt an Blausäure in der Saat, aber auch standort- und jahresbedingte Einflüsse. Bei der statistischen Verrechnung der Daten wurden Wechselwirkungen zwischen den Standorten nachgewiesen, es kann also davon ausgegangen werden, dass die Sorten an den Standorten unterschiedliche reagierten (Tabelle 17). Die Sorte `Justess´ fiel mit hohen Blausäuregehalt im Samen auf. Bezogen auf die Frischmasse der Saat kam es neben den hohen Werten von `Justess´ nur bei `Paltin´ in einem Fall zu einem Blausäuregehalt über dem Grenzwert. Die mittleren Blausäuregehalten lagen bei 9 % der Samenproben über dem Grenzwert von 150 mg/kg Saat.

Tabelle 17: Mittlere Blausäuregehalte (HCN) **der Leinsamen** in mg/kg Saat, **rot**: Werte über dem Grenzwert von 150 mg/kg Saat, Mittels= Mittelsömmern (Labor: ifp)

	Bernburg				Mittels	Görsdorf			Kl.-Altendorf		
	2021	2022	2023	2024	2022 *	2022	2023	2024	2022*	2023	2024
Lirina	93 a	101 ab	91 a	101 bc	78	69 ab	108 a	79 ab	84	126 bc	93 ab
Serenade	-	136 bc	-	-	117	92 c	-	-			
Justess	155 b	167 c	164 c	-	176	123 d	207 bc	-			
LS Koral	75 a	86 a	94 a	109 c	85	62 a	109 a	94 abc		100 bc	76 ab
Ingot	115 ab	129 b	-	107 bc	-	82 bc	-	106 bc			93 ab
Paltin	-	121 ab	142 bc	111 c	126	78 abc	172 b	87 abc			
Bingo	-	-	117 ab	65 a	-	-	122 a	81 ab			
Richess	-	-	-	84 ab	-	-	-	90 abc			
LS Orcalia	-	-	-	109 c	-	-	-	68 a			93 ab
Goldstern										119 abc	
Talon										89 a	
Blaues										114	
Wunder										abc	
Omegalin										107 abc	
Kaolin									106	134 c	
Sunrise											98 b
Opera											71 a
Riviera											84 ab

Standort- und jahresgetrennte statistische Verrechnung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = nicht signifikant, \*keine Verrechnung möglich

Die Blausäuregehalte in den Leinsamen variierten jahres- und standortbedingt. Abbildung 4.1 verdeutlicht dies bei Sorte `Lirina`. Die Blausäuregehalte lagen im Bereich von 69 – 125 mg/kg Saat. Abbildung 4.2 zeigt die Streuung der Gehalte bei vier Wiederholungen in einem Versuch. Bei der Sorte `Talon` schwanken die Gehalte von 62 – 111 mg/kg Saat.

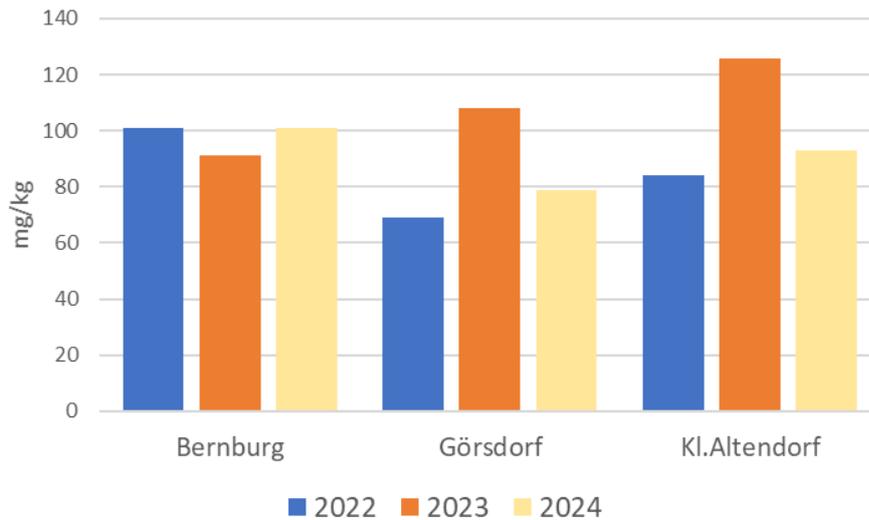


Abbildung 4.1: Mittlere Blausäuregehalte (mg/kg) der Sorte 'Lirina' an drei Standorten in den Jahren 2022-2024

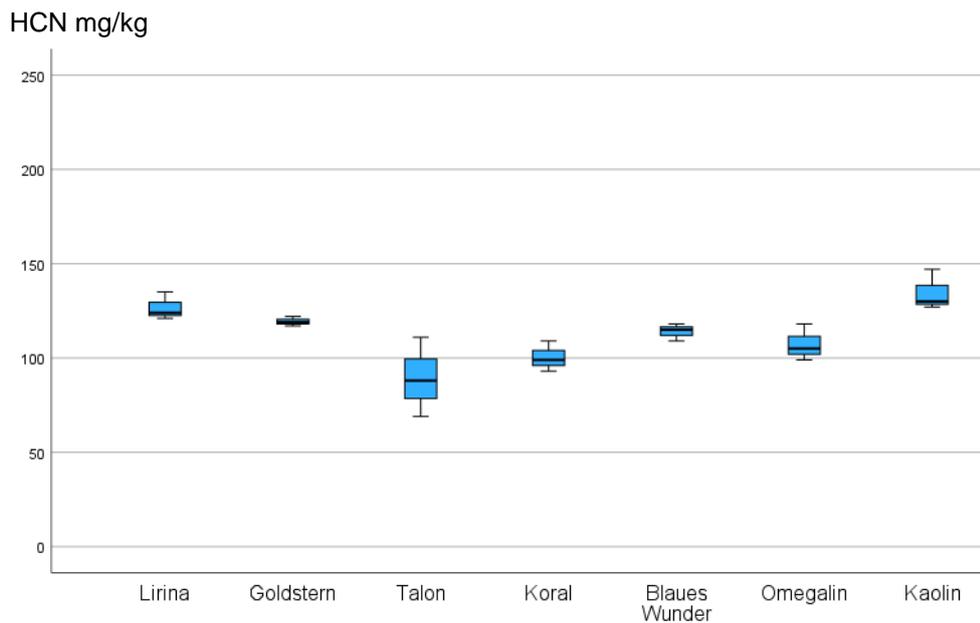


Abbildung 4.2: Streuung der Blausäuregehalt (mg/kg) im Leinsamen bei vier Wiederholungen, Leinsortenprüfung am Standort Klein-Altendorf, 2023

Abbildung 4.3 zeigt das standortbedingte unterschiedliche Niveau der Blausäuregehalte in den geprüften Leinsorten, bei gleichem Muster der Sorten. In Bernburg waren 2022 die Blausäuregehalte auffallend höher als am Standort Görzdorf.

HCN mg Görzdorf, 2022

HCN mg/kg

Bernburg, 2022

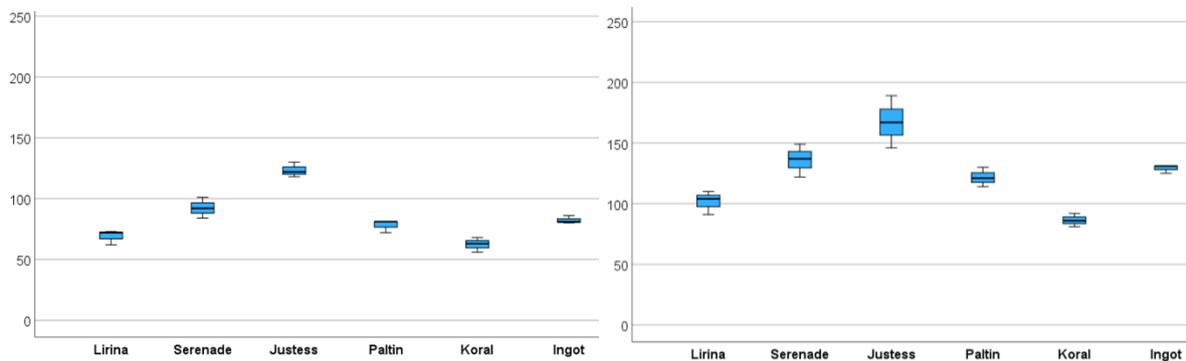


Abbildung 4.3: Blausäuregehalt (HCN) der Leinsamen in mg/kg Saat, LSV Görzdorf (2022) und Bernburg (2022)

Die Blausäureverbindungen verbleiben nach der Ölextraktion im Presskuchen und erreichen Konzentrationen, die den Einsatz des Presskuchens als Lebensmittel oder Futtermittel limitieren können. 20 % der untersuchten Presskuchen aus den Sortenversuchen lagen über dem Grenzwert für Futtermittel (350 mg/kg Presskuchen).

Sorteneffekte auf den Gehalt an cyanogenen Glycosiden werden von Klein et al. (2017) [36] beschrieben. Klein verweist auf kanadische Untersuchungen von Oomah et al. [19], in denen sortenbedingte Unterschiede vor allem im Gehalt an Linustatin ermittelt wurden, während die Ausbildung von Linamarin und Neolinustatin wenige genotypische Effekte zeigte. Auch die Untersuchungen von Rossi und Reggiani (2014) [16] zeigten eine signifikante Variabilität der unterschiedlichen Glykoside in verschiedenen Leingenotypen. Sie empfahlen diese Variabilität in Zuchtprogrammen zu nutzen, um den Gehalt von Linustatin und Neolinustatin zu reduzieren. Oomah und Mazza [19] sehen Sorte/Genotyp als wichtigsten Einflussfaktor auf den Blausäuregehalt in der Leinsaat, Standort und Jahresbedingungen als nachgelagerte Faktoren.

### Cadmium

Leinsamen akkumulieren stark Cadmium. Meist handelt es sich um natürlich im Boden vorkommendes Cadmium (geogen), gelegentlich führen Eintragsquellen wie cadmiumhaltige Phosphordünger zu erhöhten Werten im Boden. Die Verfügbarkeit hängt stark vom pH-Wert des Bodens ab: pH-Werte  $\leq 6,5$  erhöhen die Verfügbarkeit besonders auf leichten Standorten. Der Grenzwert für Cadmium in den Samen liegt bei 0,5 mg/kg Samen (Frischgewicht). In den LSV waren Sorteneffekte leicht erkennbar, allerdings nur an den Standorten, an denen hohe Ausgangsbelastungen im Boden gemeinsam mit niedrigem pH-Wert auftraten. In Bernburg, wo die Cadmiumaufnahme aufgrund des hohen pH-Wertes und des geringen Potentials im Boden sehr gering war, konnte auch kein Sorteneffekte ermittelt werden (Tabelle 18).

Am Standort Klein-Altendorf konnten 2023 signifikante Unterschiede zwischen den Sorten nachgewiesen werden. Trotz hohem pH-Wert des Bodens wurde eine starke Akkumulation des Schwermetalls in den Leinsamen festgestellt (Tabelle 19). Im Leinöl der Proben des LSV

Görsdorf 2023 wurde kein Cadmium nachgewiesen, sodass ein Übergang des Schwermetalls in das Öl ausgeschlossen werden konnte.

Tabelle 18 Cadmiumgehalt der Leinsamen in mg/kg Saat und in Boden mg/kg (0-30 cm) (Labore: SGS Analytics, AgroLab), in **rot** über Grenzwert

	Bernburg			Mittelsömmern*	Görsdorf	
	2021	2022	2023	2022	2022	2023
Lirina	0,19	0,14	0,35	0,07	0,49 a	<b>0,87 a</b>
Serenade	0,15	0,1	-	0,06	<b>0,53 a</b>	-
Justess	0,23	0,12	0,29	0,07	<b>0,53 a</b>	<b>0,96 a</b>
LS Koral	0,2	0,08	0,27	0,05	<b>0,62 b</b>	<b>1,22 b</b>
Ingot	0,21	0,15	-	0,07	0,47 a	-
Paltin	-	0,1	0,27	-	0,5 a	<b>0,79 a</b>
Bingo	-	-	0,34	-	-	<b>0,96 a</b>
Cadmiumgehalt	0,31	0,37	0,36	0,27	0,3	0,39
Boden (mg/kg)						
pH-Wert Boden	7,2	7,3	7,3	7,5	5,2	6,5

Standort- und jahresgetrennte statistische Verrechnung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = nicht signifikant, \*keine Verrechnung möglich

Tabelle 19: Mittlerer Cadmiumgehalt der Leinsamen in mg/kg Saat und im Boden mg/kg (0-30 cm), Klein-Altendorf (Labore: SGS Analytics, AgroLab), in **rot** über Grenzwert

	Klein-Altendorf 2022	Klein-Altendorf 2023
Lirina	<b>0,6</b>	0,35 a
Goldstern	-	<b>0,60 b</b>
Talon	-	0,37 a
LS Koral	-	0,43 a
Blaues Wunder	-	0,34 a
Omegalin	-	0,37 a
Kaolin	<b>0,59</b>	0,37 a
Cadmiumgehalt Boden (mg/kg)	0,45	0,3
pH-Wert Boden	6,9	7,0

Standort- und jahresgetrennte statistische Verrechnung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = nicht signifikant, \*keine Verrechnung möglich

Eine Belastung der Leinsaat mit Cadmium kann in erster Linie über die Wahl des Standortes ausgeschlossen werden. Bodenanalysen können als praxistaugliche Entscheidungshilfen Aufschluss über die Grundbelastung und den pH-Wert geben. Sorteneffekte werden zwar in der Literatur beschrieben [37], aber als nachgelagert eingestuft.

### Nährwertgehalt der Leinsaat

Der Ölgehalt der Leinsaat schwankte in den Versuchen zwischen 37 und 45 %. Den höchsten Gehalt mit 45,5 % erreichte 'Lirina' 2021 am Standort Bernburg. Basierend auf der hohen Fallzahl von Leinsamenproben der Sorte 'Lirina', lässt sich für diese Sorte ein stabiler Trend zu hohen Ölgehalten über die Jahre und Standorte hinweg ableiten. Bei allen anderen Sorten liegen entweder zu wenige oder deutlich schwankende Werte vor (Tabelle 20), für eine sortenbedingte Beurteilung. Diese Ergebnisse zum Ölgehalt decken sich mit den Angaben aus den Sortenempfehlungen der Thüringer Landesanstalt [38]. Hier wird in der Kategorie mit hohem Ölgehalt die Leinsorte 'Lirina' (& 'Libra') aufgeführt, in der Kategorie mit niedrigen Ölgehalten 'Ingot' (& 'Kaolin', 'Scorpion', 'Serenade', 'Juliet' 'Goldstern').

Tabelle 20: Mittlerer **Ölgehalt** (% in TM) in Leinsamen unterschiedlicher Sorten in den Jahren 2021-2024, Mittels. = Mittelsommern (Labor: SGS Analytics)

	Bernburg			Mittels.	Görsdorf			Kl. Altendorf		
	2021	2023	2024	2022	2022	2023	2024	2022	2023	2024
			*	*			*	*		
Lirina	45,5 b	42,8 b	43,2	41,5	44,6	43,4 b	44,0	42,2	42,3 c	42,8 c
Serenade	40,9 ab			37,1	43					
Justess	41,0 ab	39,1 a		38,9	42,6	39,2 a				
LS Koral	39,8 a	42,6 b	42,9	41,1	45,2	44,1 b	44,1		42,7 c	38,5 a
Ingot	44,0 b		43,6		45,3		43,6			42,5 ab
Paltin	-	41,8 b	41,2	40,7	43,2	43,1 b	42,5			
Blngo			40,8				43,2			
Richess			42,2				39,3			
LS Orcalia			42,8				43,8			42,5 ab
Kaolin								40,7	40,2 b	
Omegaln									44,7 d	
Talon									38,8 b	
Goldstern									37,4 a	
Sunrise										Klein-Altendorf, 2024: 41,4 b
Riviera										Klein-Altendorf, 2024: 42,4 ab
Opera										Klein-Altendorf, 2024: 43,5 c

Standort- und jahresgetrennte statistische Verrechnung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = nicht signifikant, \*keine Verrechnung möglich

Bei der Pressung der Saat wurde die Ölausbeute ermittelt. Sie schwankte je nach den Presseigenschaften der Saat sehr stark von 13 bis 43 %. Die Ölausbeute unterscheidet sich damit deutlich vom Ölgehalt. Dieser wird im Labor an den Samen analytisch bestimmt.

Der Proteingehalt (N x 6,25) der Leinsamen lag in den Versuchen zwischen 19 – 31,5 g/100 g und im Mittel bei 22,3 g/100 g Saat (Tabelle 21). Aus den bisherigen Werten lassen sich weder Sorten-, Standort – oder Jahreseffekte erkennen.

Die Werte liegen meist über den Angaben von Kajla et al. (2014) [39], die einen mittleren Proteingehalt von 20,3 g/100 Leinsamen angeben. Die ernährungsphysiologische Wertigkeit der Aminosäuren der Proteine wird mit denen von Soja verglichen [40].

2024 wurde im Sortenversuch der Ballaststoffgehalt der Sorten analysiert. Der Gehalt lag zwischen 24 – 31 g/100 g Saat, die Sorte `Ingot´ zeigte den höchsten Gehalt. Die beiden anderen gelbsamigen Sorten lagen im Mittelfeld (Abbildung 4.4).

Tabelle 21: Mittlerer **Proteingehalt** (g/100 g) in Leinsamen unterschiedlicher Sorten in den Jahren 2021-2024 an vier Standorten (Labor: SGS Analytics)

	Bernburg			Mittel- sömmern	Görsdorf		Kl. Altendorf		
	2021*	2022*	2023*	2022 *	2022*	2023*	2022*	2023	2024
Lirina	21,4	21,4	23,1	19,8	19,7	18,8	20,5	21,5 a	20,4 b
Serenade	21,9	22,7	-	19,1	19,8	-			
Justess	24,0	20,7	23,4	19,6	19,5	18,8			
LS Koral	22,3	22,3	23,2	20,6	19,2	20,1		25,6 cd	20,4 b
Ingot	24,9	22,6	-		20,1	-			19,9
Paltin	-	20,0	22,3	19,9	20,2	17,5			
Bingo	-	-	23,2	-	-	19,4			
Kaolin							19,6	22,4 ab	
Goldstern								26,9 d	
Talon								23,6 abc	
Blaues Wunder								22,8 ab	
Omegalin								24,0 bc	
Opera									20,5 b
Orcalia									20,5 b
Riviera									18,7 a
Sunrise									20,9 b

<sup>2</sup> in TM bzw Öl, Standort- und jahresgetrennte statistische Verrechnung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = nicht signifikant, \*keine Verrechnung möglich

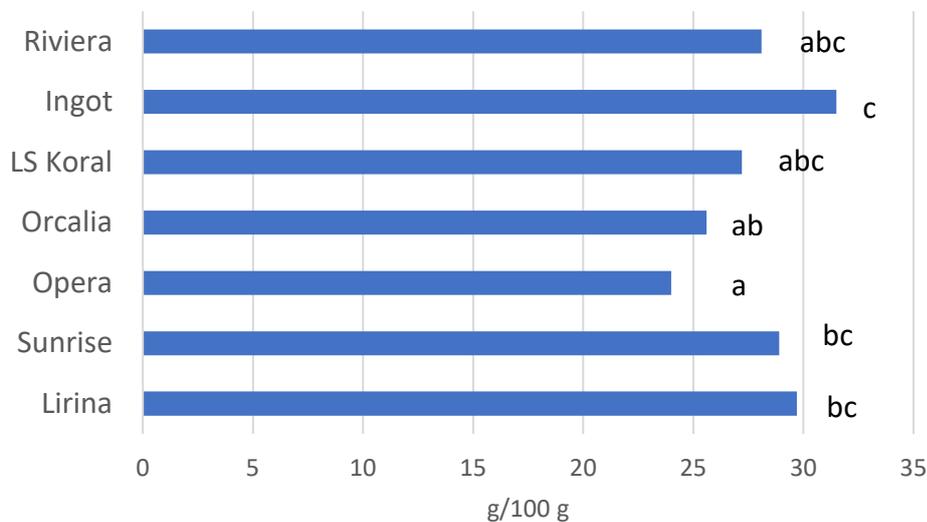


Abbildung 4.4: Mittlerer Ballaststoffgehalt g/100g Leinsamen, Sortenversuch Klein-Altendorf, 2024. (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ))

Eine wichtige Verwendung der Leinsamen liegt in deren Verarbeitung zu hochwertigem Speiseöl. In der Fettsäurezusammensetzung des Leinöles ist vor allem die  $\alpha$ -Linolensäure von Bedeutung. Die  $\alpha$ -Linolensäure ist eine dreifach ungesättigte Fettsäure und gehört zur Gruppe der Omega-3-Fettsäuren, die ernährungsphysiologisch als besonders wertvoll eingestuft werden. Günstig ist ein Anteil von mindestens 56 % der alpha-Linolensäure im Leinöl. Spezielle Pressverfahren können zur Stabilisierung des Omega-3-Fettsäureanteils genutzt werden.

Tabelle 22 zeigt, dass lediglich 45 % der Leinölproben aus den Sortenversuchen einen  $\alpha$ -Linolensäure-Gehalt über 56 % erreichten. Es kam zudem zu großen Schwankungen zwischen den Jahren und den Sorten. Abgesicherte Aussagen zu Sorteneffekten können aktuell nicht getroffen werden (geringe Probenzahl, keine statistische Datenverrechnung möglich). Die Beprobung einzelner Wiederholungen im Sortenversuch Klein-Altendorf (2024) zeigte eine sehr geringe Streuung der  $\alpha$ -Linolensäure-Werte bei Sorte `Lirina` ( $\pm 1$ ) und bei `LS Koral` ( $\pm 1,7$ ; Abbildung 4.5). Da der  $\alpha$ -Linolensäure Gehalt als ein wichtiges Qualitätsmerkmal der Leinsaat einzustufen ist, sollten weitere mehrortige und mehrjährige Sortenprüfungen stattfinden, um der Anbaupraxis geeignete Sorten und wertvolle Entscheidungshilfen anzubieten.

Tabelle 22: Anteil  $\alpha$ -Linolensäure (%) im Leinöl unterschiedlicher Sorten, rot: Werte < 56 %  $\alpha$ -Linolensäure (Labor: SGS)

	Bernburg			Mittel- sommern	Kl. Altendorf		
	2021	2022	2023	2022	2022	2023	2024
Lirina	57,8	57,8	59,7	54,2	58,5	57,7	60,6
Serenade	52,3	50,6	-	45,9			
Justess	58,8	53,2	57,6	51,9			
LS Koral	57,8	54,6	58,2	51,5		57,9	57,8
Ingot	56,4	52,6	-	-			57,1
Paltin	-	51,5	53,4	49,2			
Bingo	-	-	54,4	-			
Kaolin					55,1	52,7	
Goldstern						49,8	
Talon						57,3	
Blaues Wunder						54,5	
Omegalin						63,3	
Sunrise							57,5
Opera							70,5
Riviera							54,8
Orcalia							67,6

keine statistische Verrechnung, da nur Mischproben analysiert wurden

Quelle: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ernaehrung/Lebensmittel-Kennzeichnung/LeitsaetzeSpeisefette.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ernaehrung/Lebensmittel-Kennzeichnung/LeitsaetzeSpeisefette.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

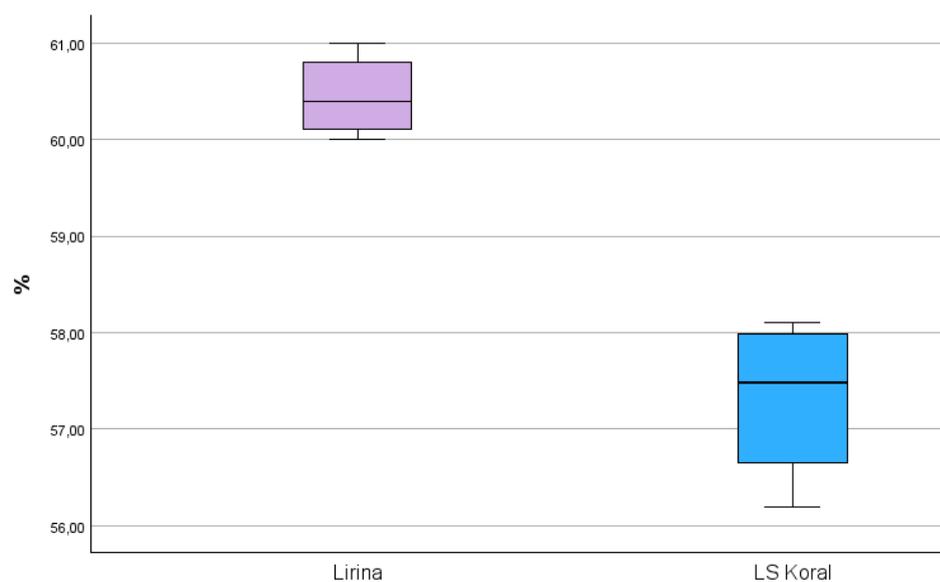


Abbildung 4.5 Streuung der ALA Werte (%) im Öl der Leinsamen von 'Lirina' und 'LS Koral', Sortensichtung, Klein-Altendorf 2024

Bei Untersuchungen aus China [41] liegen die Ölgehalte in einer Prüfung verschiedener Leinvarietäten im Bereich von 30 – 37 % und der Anteil an alpha-Linolensäure zwischen 47 und 53 %. Das Zusammenspiel von Sorte und Standort werden als Hauptursache für die Ausbildung des Ölgehaltes und des  $\alpha$ -Linolensäure -Anteiles gesehen.

Klein et al. [36] fassen die Ergebnisse ihrer Literaturrecherche zu Lein dahingehend zusammen, dass sie neben dem Standort und den Anbaueffekten, vor allem einen Sorteneffekt auf den  $\alpha$ -Linolensäure Gehalt sehen. Zu diesen Ergebnissen kommen auch Nykter et al. [42]; Diederichsen & Raney [43]. In einer Zusammenstellung der  $\alpha$ -Linolensäure Gehalte internationaler Leinproben sind wenige Effekte zwischen den Provenienzen der Leinsamenmuster erkennbar. Die Muster aus Deutschland zeigen  $\alpha$ -Linolensäure Gehalte im Bereich 56-62 % [36]. Hiltbrunner et al. (2009) [44] dokumentieren in ihren Anbauversuchen in der Schweiz ebenfalls sortenbedingte Unterschiede im Ölgehalt, aber auch Effekte der Anbaufaktoren, wie beispielsweise dem Saatzeitpunkt. Es zeigten sich zudem deutliche Jahresschwankungen. Im Mittel der Untersuchungsjahre lag der Ölgehalt bei den Schweizer Sortenprüfungen zwischen 33-40 %. Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf den Ölgehalt und die Ölzusammensetzung von Canvin (1965) [45] zeigen, dass eher niedrige Temperaturen in der Reifephase bei unterschiedlichen Leinsorten zu höheren Gehalten an ungesättigten Fettsäuren führten. Er konnte bestätigen, dass bei niedrigen Temperaturen der Gehalt an Palmitin- Stearin- und Ölsäure abnahm, während höhere Gehalte an Linol- und Linolensäure zunahm. Effekte hat nach Canvin auch die Tageslänge während der Reifephase sowohl auf Ölgehalt als auch auf das Fettsäurespektrum.

#### Sommerleinsortenversuche am Campus Klein-Altendorf, Universität Bonn

Am Standort Klein-Altendorf wurden 2022 bis 2023 neben den LSV zusätzliche Sichtung verschiedener Sommerleinsorten durchgeführt. Die Erträge sind im Folgenden dargestellt sowie die pflanzenbaulichen Parameter für die Versuchsjahre 2022 und 2023.

Versuchsdurchführung: keine N-Düngung, mechanische Unkrautregulierung, Vorfrucht Getreide, Saatstärke jeweils 40 kg/ha, Reihenabstand: 45 cm. Versuchsdesign: Vollrandomisierte Blockanlage, 4-fache Wiederholung der Varianten. Parzellengröße: 30 m<sup>2</sup>. Der Feldaufgang lag 2022 bei 12 Tagen, 2023 zwischen 10 bis 14 Tagen. Im Mittel der Versuchsjahre lag die Kulturdauer bei 116 (2022), bzw. 105-116 Tagen (2023). Dabei liegt der Blühbeginn Anfang Juni und der Erntetermin Mitte August.

2023 wurde der Lein aufgrund der schwierigen Witterungsverhältnisse erst Ende April gesät. Dennoch war die Kulturdauer kürzer als 2022. (‘Lirina’ 10 Tage kürzere Kultur in 2023 im Vergleich zu 2022). Während 2022 die Pflanzenentwicklung gleichmäßig verlief und bei guter Abreife der Leinpflanzen zu hohen Erträgen führte, war 2023 geprägt von einer späten Saat unter Langtagbedingungen, gefolgt von stark wechselnden Tag/Nachtemperaturen mit hoher Taubildung und starkem Befall mit Echtem Mehltau. Besonders die Sorten ‘LS Koral’, ‘Omegalin’ und ‘Kaolin’ zeigten eine hohe Anfälligkeit für Echtem Mehltau.

Auffallend waren die hohen Tausendkornmassen von ‘Goldstern’, ‘Omegalin’ und ‘Blaues Wunder’. ‘Goldstern’ erreichte mit 7,5 die deutlich höchste Quellzahl (Tukey  $\leq 0,05$ ).

Abbildung 4.6 zeigt die starken Ertragsschwankungen der Leinsorten über die Wiederholungen des Feldversuches im Jahr 2023. Während 2022 im Mittel 20 dt/ha Kornertrag ermittelt wurde, kamen 2023 nicht alle Sorten über einen Ertrag von 10 dt/ha. 2024 lag der Kornertrag zwischen 10 und 15 dt/ha (Tabelle 23, Abbildung 4.7).

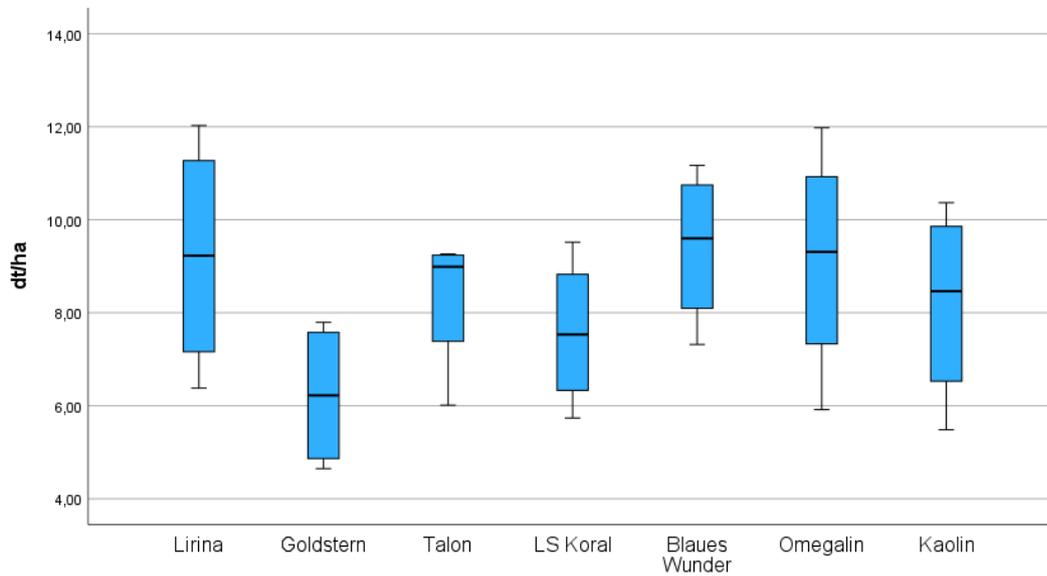


Abbildung 4.6 Streuung des Kornertrages (gereinigte Ware dt/ha) unterschiedlicher Leinsamensorten, Klein-Altendorf, 2023. (keine signifikanten Unterschiede, Tukey  $\leq 0,05$ )

Tabelle 23 Mittlerer Kornertrag (gereinigte Ware dt/ha) unterschiedlicher Leinsamensorten am Standort Klein-Altendorf, 2024

Sorte	Kornertrag dt/ha
Lirina	13,3 ab
Sunrise	14,5 b
Opera	12,5 ab
Riviera	15,1 b
Orcalia	10,6 a
Ingot	13,9 b
LS Koral	10,5 a

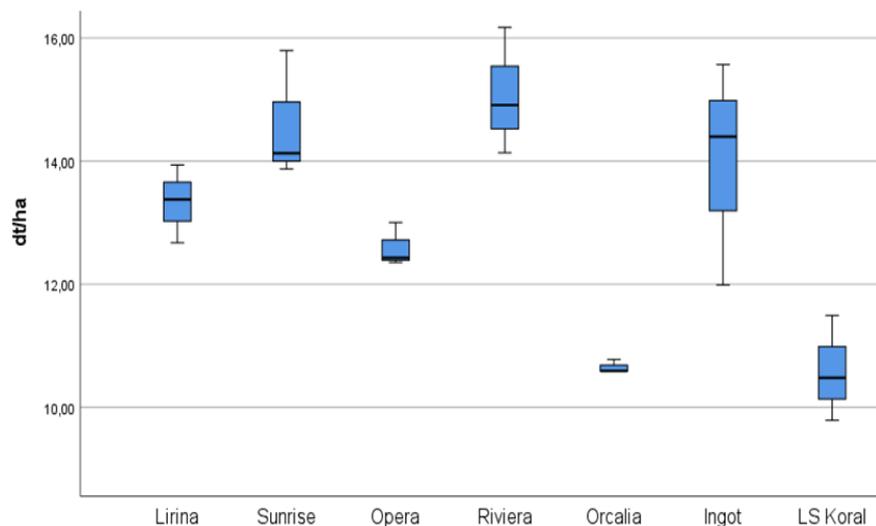


Abbildung 4.7: Streuung des Kornertrages (gereinigte Ware dt/ha) unterschiedlicher Leinsamensorten, Klein-Altendorf, 2024

#### Nährwert und cyanogene Glycoside

Kanadische Untersuchungen von Oomah und Mazza (1998) [46] zeigten eine positive Korrelation des Proteingehalten mit dem Gehalt von cyanogenen Glycosiden und einen negativen Zusammenhang des HCN Gehalts mit dem Ölgehalt. Diese Thesen wurden mit den Daten der LSV Sommerlein überprüft. Die Auswertung der LSV Sortenversuche in insgesamt 7 Umwelten (=Jahr & Standort) bestätigte diesen negativen Zusammenhang des Ölgehaltes mit dem HCN-Gehalt. Ein signifikanter Zusammenhang trat bei den meisten Umwelten und den meisten Sorten auf (Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 ). Im Gegensatz zu den kanadischen Untersuchungen von Oomah & Mazza [46] konnte in den Linovit-Untersuchungen im Mittel kein Zusammenhang zwischen HCN- und Proteingehalt gezeigt werden (Abbildung 4.10). Lediglich in einer der geprüften Umwelten (Umwelt 5,  $r^2=0,277$ ) zeigt sich im Streudiagramm ein negativer Zusammenhang zwischen HCN und Proteingehalt.

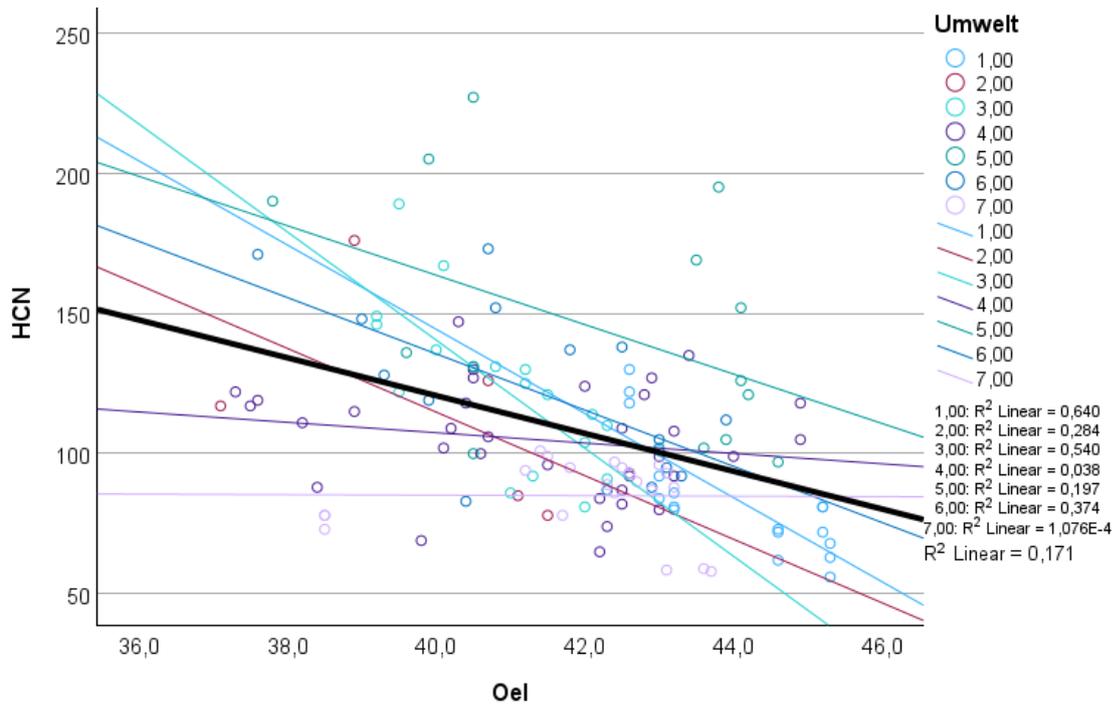


Abbildung 4.8 Zusammenhang Blausäuregehalt (HCN, mg/kg) und Ölgehalt (%) in Leinsamen, bei unterschiedlichen Umwelten (Jahr & Standort),  $r^2 = 0,171$

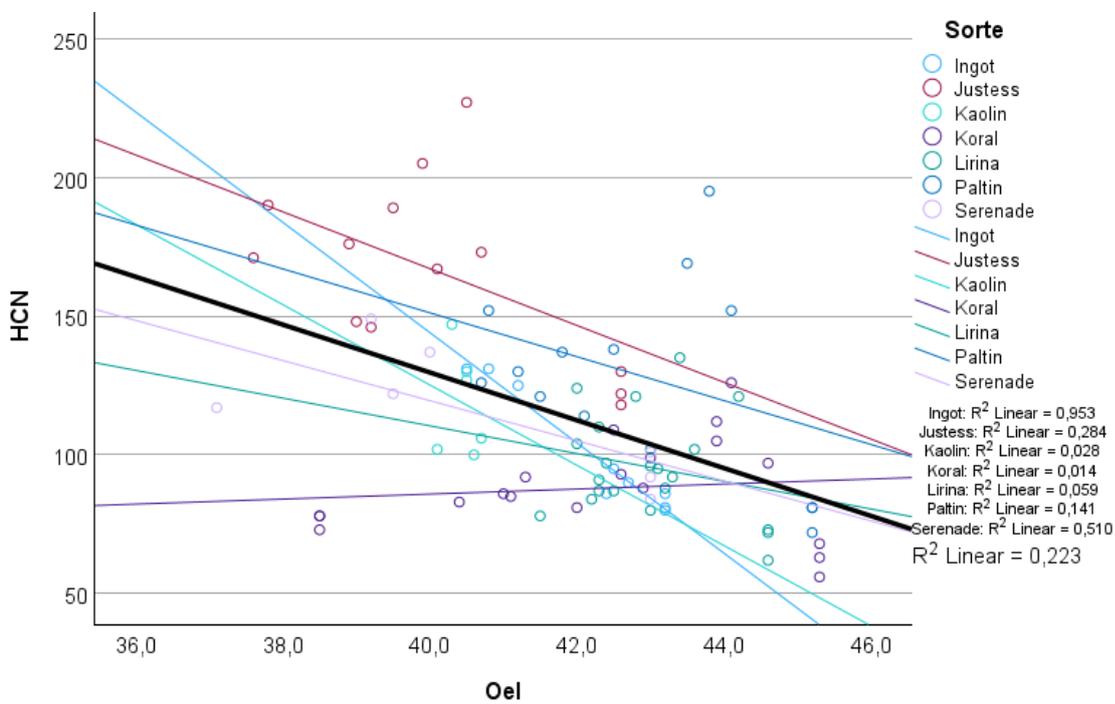


Abbildung 4.9 Zusammenhang Blausäuregehalt (HCN, mg/kg) und Ölgehalt (%) in Leinsamen der unterschiedlichen Sorten, an 4 Standorten in 3 Versuchsjahren,  $r^2 = 0,223$

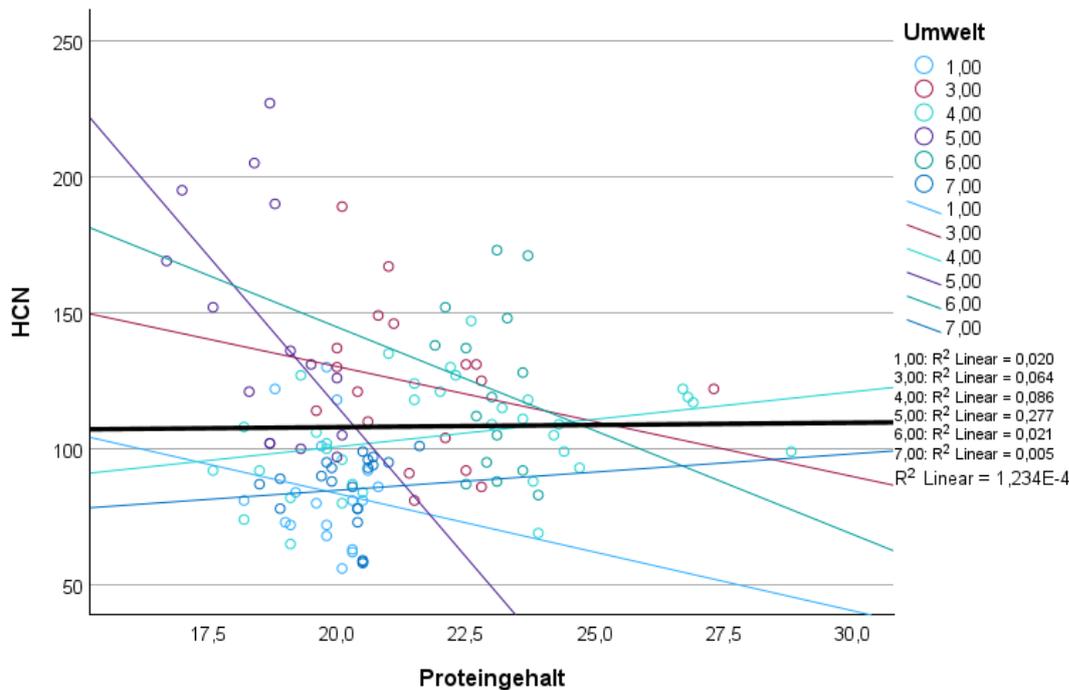


Abbildung 4.10 Zusammenhang Blausäuregehalt (HCN, mg/kg) und Proteingehalt (g/100 g) in Leinsamen, bei unterschiedlichen Umwelten (Jahr & Standort) in den Jahren 2022-2024

### Fazit Sommerlein

Mit den Ergebnissen aus den Landessortenversuchen (Öko. und konv.) stehen den Betrieben umfangreiche Informationen zu den agronomischen Merkmalen und dem Ölgehalt zur Verfügung. Wichtig ist die Berücksichtigung neuer Zuchtsorten in den LSV, die beispielsweise genetisch fixierte hohe Werte an Omega-3-Fettsäuren aufweisen und damit derzeit hohe Marktrelevanz haben würden. Die wertgebenden Qualitätsparameter wie auch die wertmindernden (Cadmium- und Blausäuregehalt) sollten in den LSV berücksichtigt werden, da sie für die Betriebe wichtige Entscheidungskriterien darstellen. Sollten sich sortenbedingte Effekte beispielsweise auf den Gehalt an cyanogenen Glycosiden über die Jahres- und Standorteffekte schieben, könnte dies im Rahmen der LSV erkannt werden (wie im Falle der Sorte 'Justess'). Die Ergebnisse aus Linovit bestätigen tendenziell die Untersuchungen von Oomah et al. (1992) [19], wonach Sorte, Standort und Anbaujahr Effekte auf den Gehalt an bestimmten cyanogenen Glycosiden (CG) in Lein haben, wobei der Genotyp als Hauptfaktor beschrieben wird. Die Folge wäre demnach Genotypen mit geringen CG-Gehalten in Zuchtprogramm zu integrieren.

## **4.1.2 Anbaufaktoren**

### 4.1.2.1 Saatzeitpunkt

#### Winterlein

In den Ansaatjahren 2022 und 2023 wurden am Camus Klein-Altendorf Versuche zum Saatzeitpunkt von Winterlein durchgeführt. Hintergrund ist die Frage, ob späte Saatzeiten

pflanzenbaulich möglich sind ohne Auswinterungsschäden zu riskieren beziehungsweise frühe Saattermine eine Unkrautregulierung vor Winter erlauben. Weiterhin sollte geprüft werden, ob der Saatzeitpunkt einen Effekt auf Ertrag und Qualität, insbesondere den Blausäuregehalt der Saat hat. Die Ergebnisse müssen im Kontext des Versuchsstandortes Klein-Altendorf gesehen werden (NRW, Rheinland, 173 m ü NN, Ø JahresT: 9,4 °C, Ø JahresNS: 605 mm). Dargestellte Versuchsparameter: Pflanzenhöhe vor Winter, Auswinterungsstärke, Ertrag, Blausäuregehalt der Samen sowie Tausendkornmasse (TKM), Öl-, Protein- und Ballaststoffgehalt.

Tabelle 24: Versuchsdurchführung, Variation Saatzeitpunkt (SZ) bei Winterlein, Campus Klein-Altendorf 2022-2024

	<b>2022/2023</b>	<b>2023/2024</b>
Saatstärke kg/ha	50	50
Reihenabstand cm	45	45
Saatzeitpunkt SZ 1	13.9.2022	13.09.2023
Saatzeitpunkt SZ 2	7.10.2022	10.10.2023
<b>Pflanzenzahl/m<sup>2</sup> nach Feldaufgang</b>		
bei SZ 1	351	557
bei SZ 2	387	505
<b>Tage vor Jahresende unter 0 °C</b>		
November	0	3 (Minimum: - 2,8 °C)
Dezember	15 (Minimum -12 °C)	6 (Minimum: - 3,6 °C)
Ernte	11.7.2023	18.7.2024

Die Pflanzenhöhe vor Winter unterschied sich deutlich zwischen den Saatzeitpunkten (Abbildung 4.11). In beiden Jahren erreichte der frühe Saatzeitpunkt zur letzten Bonitur im Dezember eine Höhe über 13 cm während Saatzeitpunkt 2 in beiden Jahren lediglich eine Wuchshöhe von 4-5 cm aufwies. Bei SZ 1 gingen die Pflanzen in beiden Jahren quasi im aufrechten Wuchs in die erste Frostperiode. 2022 war vor der Höhenmessung noch kein Frostereignis, 2023 war der Bestand schon gezeichnet von den ersten Frosträchten im November. Die Pflanzen des späten Saatzeitpunktes zeigten tendenziell in beiden Versuchsjahren den gewünschten Kriechwuchs. In beiden Jahren konnte nur in den Parzellen von SZ 1 eine mechanische Unkrautregulierungsmaßnahme vor Winter durchgeführt werden (2022: 1 x Hacke, 2023: 1 x Striegeln). In den Parzellen SZ 2 wurde dies aufgrund der hohen Bodenfeuchte und den starken Verschüttungseffekten nicht durchgeführt.

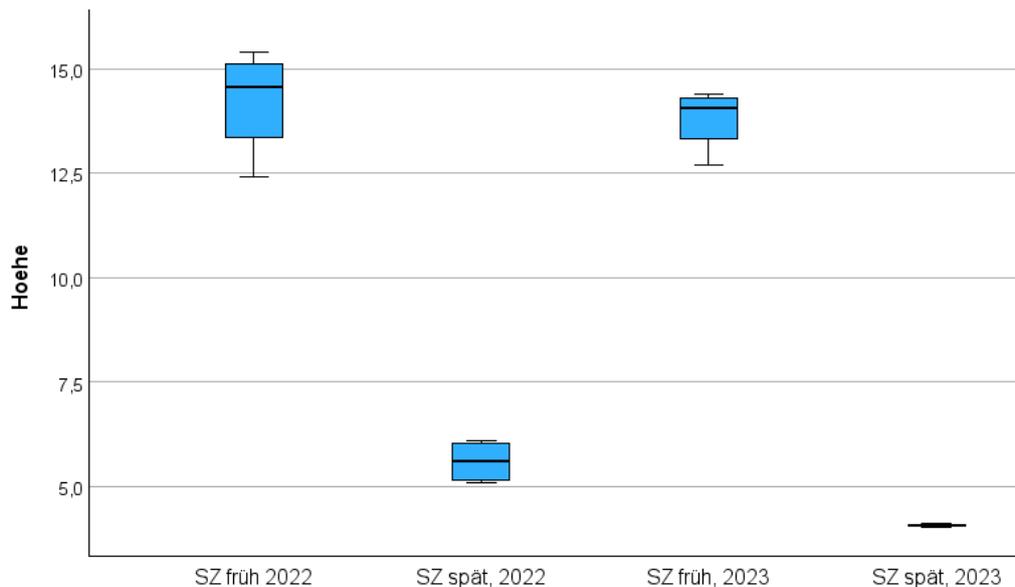


Abbildung 4.11: Wuchshöhe (cm) der Winterleinpflanzen zu je zwei Saatzeitpunkten (SZ) in den Jahren 2022 und 2023 zum letzten Boniturtermin vor Winter

Zur Dokumentation der Auswinterungsstärke wurde mit Boniturnoten für den Bereich der Kernparzelle gearbeitet (1 = fehlend,...,9 = sehr stark). In die Bonitur floss sowohl das Schadmaß/Befallsstärke als auch die Schadhäufigkeit/Befallshäufigkeit mit ein.

2023 traten die ersten Frostschäden in der Variante SZ 1 bereits am 20.12. nach der ersten Frostperiode auf. Bei der Auswinterungsbonitur (7.3. und 31.3.2023) zeigten sich deutliche Auswinterungsschäden in der früh gesäten Variante und keinerlei Schäden bei dem späten Saattermin. Bei SZ früh kam es zu einer starken Verbräunung der Pflanzen und Absterben ganzer Pflanzentriebe, jedoch nicht zum kompletten Absterben der Pflanzen. Zum Boniturtermin Ende März erschienen bereits die Neuaustriebe der Pflanzen.

2024 wurden die ersten Frostschäden Ende November nach der ersten Frostperiode festgestellt und nahmen im Laufe des Winters deutlich zu. Die Bonitur erfolgte ebenfalls zu zwei Terminen im März und zeigte auch in diesem Jahr sehr starke Frostschäden bei SZ 1 und mittlere Schäden bei SZ 2, die sich ebenfalls im Laufe des Frühjahrs verwuchsen (Tabelle 25).

Tabelle 25: Mittlere Auswinterungsschäden bei Winterlein, Variation Saatzeitpunkt (SZ), Campus Klein-Altendorf 2022-2024

(1 = fehlend, 2 = sehr gering, 3 = gering, 4 = gering bis mittel, 5 = Mittel, 6 = Mittel bis stark, 7 = stark, 8 = stark bis sehr stark, 9 = sehr stark)

	Saatzeitpunkt früh	Saatzeitpunkt spät
<b>2022/2023</b>		
07.3.2023	5	1
31.3.2023	4	1
<b>2023/2024</b>		
03.3.2024	8	5
27.3.2024	7	3

In beiden Versuchsjahren lagen 14 Tage zwischen dem Blühbeginn von SZ 1 zu SZ 2. Die Pflanzenentwicklung der Varianten glichen sich bis zur Samenreife an und konnten jeweils am

selben Termin gedroschen werden. Die mittleren Kornerträge des Winterleins in SZ1 (16,2 dt/ha) und SZ2 (15,9 dt/ha) zeigten 2023 keine statistisch absicherbaren Unterschiede, demnach konnte trotz starken Auswinterungsschäden in SZ 1 keinen Effekt des Saattermins auf die Ertragsausbildung dokumentiert werden.

2024 lagen die Erträge in beiden Varianten auf einem sehr geringen Niveau und zeigten deutliche Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ). Der mittlere Ertrag bei SZ 2 lag mit 10 dt/ha rund 21 % höher als der Kornertrag in SZ 1 (7,8 dt/ha; Abbildung 4.12). Deutliche Unterschiede gab es zudem in der Tausendkornmasse der Saat, die in SZ 2 ( $\bar{\varnothing}$  6,8 g) auffallend höher war als in SZ 1 ( $\bar{\varnothing}$  5,8g). Diese Unterschiede in der TKM waren im Jahr zuvor nicht nachweisbar. Dort lag in beiden Varianten die TKM bei 6,9 g.

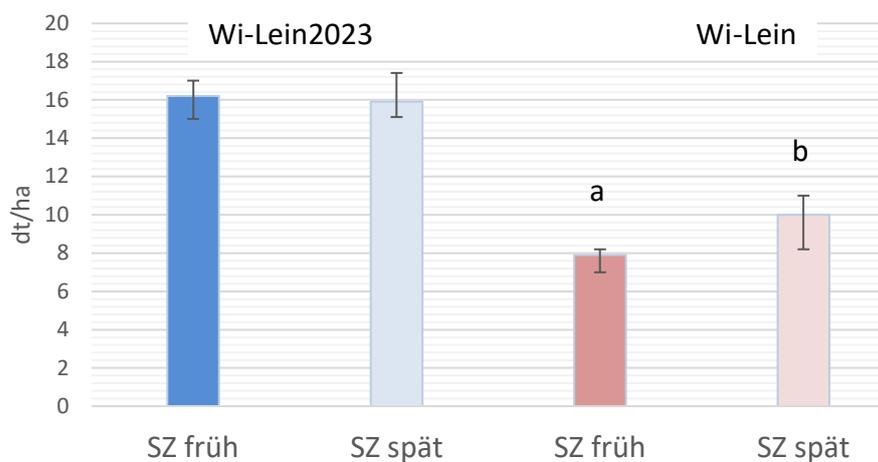


Abbildung 4.12: Mittlerer Kornertrag (dt/ha, dargestellt ist die Streuung der Werte) von Winterleinsorten zu zwei Saatterminen, Campus Klein-Altendorf, 2023 & 2024. (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), keine Buchstaben = n.s)

Bei der Analyse ausgewählter wertgebender und wertmindernder Inhaltsstoffe der Leinsaat wurde ein starker Jahreseffekt deutlich aber kein Effekt des Saatzeitpunktes (Tabelle 26). Der Anteil an  $\alpha$ -Linolensäure im Öl lag im Jahr 2024 beispielsweise deutlich über dem von 2023. Ein Einfluss des Saatzeitpunktes auf den Gehalt an Blausäure in den Samen ist aus den Untersuchungen nicht erkennbar.

Tabelle 26: Mittlere Inhaltsstoffgehalte der Leinsamenproben unterschiedlicher Saatzeitpunkt der Winterleinsorte 'Apalache' am Standort Klein-Altendorf, 2023-2024

	2022/2023		2023/2024	
	SZ 1	SZ 2	SZ 1	SZ 2
Ölgehalt <sup>2</sup> %	39,2	40,1	42,8	42,2
Proteingehalt <sup>2</sup> g/100 g	16,2	16,8	17,2	17,1
Ballaststoffgehalt <sup>2</sup> g/100 g	33	36	24	24
$\alpha$ -Linolensäure, C18:3 <sup>2</sup> (%) im Öl	57	57	66	65
Blausäuregehalt HCN mg/kg Samen <sup>1</sup>	97	94	77	82

<sup>1</sup> in TM, Analyse: Institut für Produktqualität Berlin <sup>2</sup> in TM oder Öl Analyse: SGS Analytics GmbH, Keine signifikanten Unterschiede, Tukey,  $p \leq 0,05$ ,  $\alpha$ -Linolensäure (%) im Öl konnte nicht verrechnet werden

### Fazit Saatzeitpunkt

Die zweijährigen Untersuchungen zeigen am Standort Klein-Altendorf (Rheinland) deutliche Auswinterungsschäden in Abhängigkeit vom Saattermin bei Winterlein, Sorte `Apalache´. Wie auch von Pellet et al. (2004) [47] beschrieben, schützt der „Kriechwuchs“ der Leinrosette die Pflanze vor Auswinterung. Bleibt sie aufrecht stehen, sorgen schon geringe Frostereignisse für Schaden. Beim Kriechwuchs legen sich die Triebe der Winterleinrosette platt auf den Boden. Dazu braucht die Rosette zum einen Platz aber auch eine begrenzte Trieblänge im Bereich von 5-8 cm. Hohe Pflanzendichten, frühe Saattermine die zu hohen Pflanzen über 10 cm führen aber auch der Anbau in Reihen (Reihenabstand >15 cm) können den Kriechwuchs verhindern. Um diese Faktoren näher zu untersuchen, wurden in Klein-Altendorf Versuche zur Saatstärke und zur Variation des Reihenabstandes durchgeführt.

Auffallend war in beiden Versuchsjahren, das auch bei starken Auswinterungsschäden ein Neuaustrieb/Durchtrieb der Pflanzen ab März erfolgt und es zu einem erntewürdigen Bestand kommen kann.



Abbildung 4.13 Frostschäden und Kriechwuchs (Foto Johanna Kirsch) bei Winterlein

#### 4.1.2.2 Saatstärke

In der Praxis wird der Sommerlein mit sehr unterschiedlichen Aussaatstärken gesät (30-70 kg/ha). Die häufigste Saatstärke für Winterlein lag in der Praxis bei 45 kg/ha. In drei Versuchen (2022 - 2024) zur Variation der Saatstärke sollten am Campus Klein-Altendorf Effekte der Saatstärke auf den Ertrag und die Qualität der Leinsaat geprüft werden. Erhobene Parameter waren in den Versuchen: Pflanzenzahl (Feldaufgang, ggf 2. Termin & zur Ernte) Lagerneigung, Ertrag, Mittlere Anzahl Kapseln/Pflanze ( $\emptyset$  10 Pflanzen/Parzelle), Blausäure- und Ölgehalt der Samen.

### Winterlein

In einem Versuch mit Winterlein (Sorte `Apalache´) wurden die Saatstärken 30 kg und 50 kg zu zwei Saatterminen (SZ 1 & SZ 2) und jeweils in den Reihenabständen 12,5 cm und 45 cm geprüft.

Der Feldaufgangs war bei Variante SZ1/50kg/12,5cm am höchsten. Von den 784 Pflanzen/m<sup>2</sup> blieben zur Ernte lediglich 31,6 % übrig (248 Pflanzen).

Die Auszählung der Pflanzen zur Ernte zeigte die höchste Pflanzenzahl in Variante SZ 1/50kg/45cm. Der Effekt des Feldaufgangs war als Kovariate nicht signifikant auf die Anzahl

Pflanzen zur Ernte, demnach konnte keine Abhängigkeit der Pflanzenzahl zur Ernte vom Feldaufgang bewiesen werden (Tabelle 27).

Die Kornerträge unterschieden sich deutlich zwischen den Saatterminen aber auch zwischen Varianten. Den höchsten Ertrag erreichte Variante SZ2/30 kg/12,5cm. In dieser Variante war auch die Kapselzahl/Pflanze am höchsten, allerdings nicht statistisch gesichert (Mittlere Kapselzahl: 13,1). Die niedrigsten Erträge erreichten insgesamt die SZ 1 und dort die Varianten SZ1/30kg/ 45 cm und 12,5 cm. Ein Zusammenhang der Pflanzenzahl zur Ernte auf den Ertrag konnte in einer Regressionsanalyse nicht nachgewiesen werden (Abbildung 4.14).

) Zudem konnte kein Zusammenhang zwischen Saatstärke und dem Gehalt an Blausäure- und Öl in den Samen nicht nachgewiesen werden (Saattermin und Reihenabstand zeigten ebenfalls keine Auswirkung auf die beiden Faktoren (Tabelle 27).

Tabelle 27 Variation Saatstärke (30 und 50 kg/ha) bei Winterlein zu zwei Saatterminen und zwei Reihenabständen (45 und 12,5 cm), Campus Klein-Altendorf, 2023/2024.

(1 = fehlend, 2 = sehr gering, 3 = gering, 4 = gering bis mittel, 5 = Mittel, 6 = Mittel bis stark, 7 = stark, 8 = stark bis sehr stark, 9 = sehr stark)

Saatzeitpunkt	Früh (SZ 1) 14.9.23				Spät (SZ 2) 10.10.23			
	30		50		30		50	
Saatstärke kg/ha	30		50		30		50	
Reihenabstand cm	12,5	45	12,5	45	12,5	45	12,5	45
Ø Pflanzenzahl/m <sup>2</sup> zu unterschiedlichen Terminen								
Feldaufgang	442	302	784	557	536	327	712	505
	a	a	c	abc	abc	a	bc	ab
13.3.2024	164	200	241	414	230	317	291	497
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup> zur Ernte	158	152	248	318	231	308	274	264
	a	a	bc	e	b	de	cd	bc
Anteil Pflanzen zur Ernte von auf- gelaufenen Pflanzen %	35,7	50,5	31,6	57	43	94	38	52,3
Lagerneigung zur Ernte	1	3	1	5	1	1	1	1
Ø Kapselzahl/Pflanze	12	14	15	12	12	14	12	14
Blausäuregehalt (HCN mg/kg) n.s.	82	86	85	90	91	89	85	82
Ölgehalt %	n.s.	42,6	41,0	41,4	42,8	41,8	40,3	42,6
		42,6	41,0	41,4	42,8	41,8	40,3	42,2

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede p ≤ 0,05, n.s. = nicht signifikant

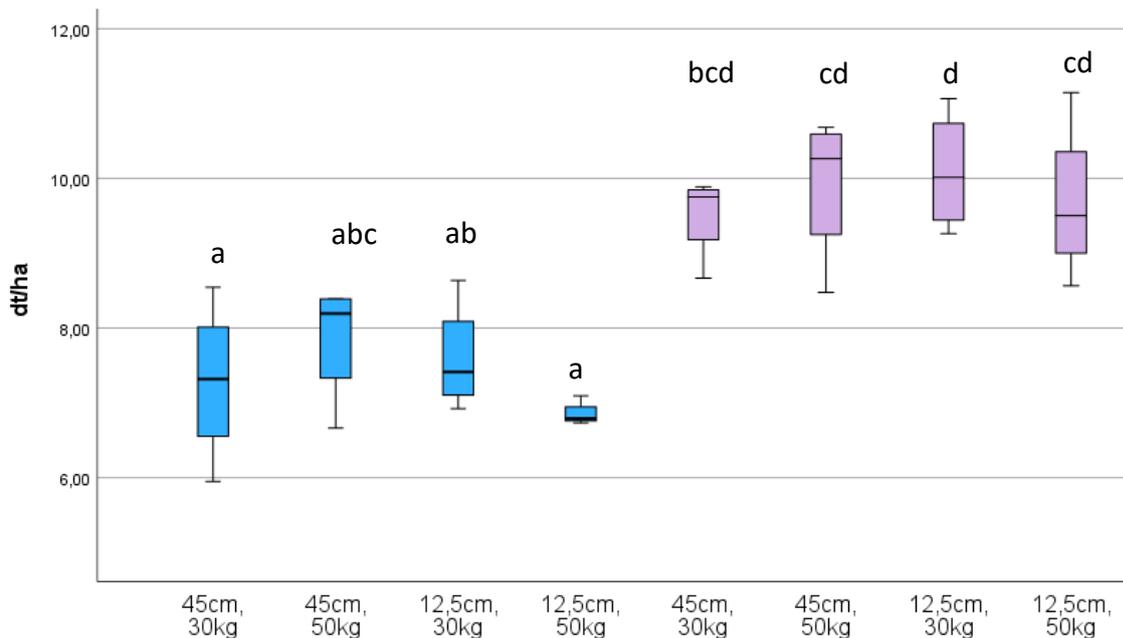


Abbildung 4.14 Ertrag dt/ha unterschiedlicher Saattermine, Saatstärken und Reihenabständen von Winterlein, Sorte `Apalache´ 2023/2024, Campus Klein-Altendorf.  
(Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede  $p \leq 0,05$ , n.s. = nicht signifikant)

### Sommerlein

Die Sommerleinsorte `Lirina´ wurde am Campus Klein-Altendorf in zwei Versuchsjahren ebenfalls mit unterschiedlichen Saatstärken gesät:

2022:	30 kg/ha	40 kg/ha	60 kg/ha	
2024:	30 kg/ha	40 kg/ha	50 kg/ha	60 kg/ha

In beiden Jahren zeigten sich deutliche Unterschiede in der Pflanzenzahl nach Feldaufgang, die entsprechend den Saatstärken abgestuft waren. Diese Unterschiede waren bis zur Ernte sichtbar, auch wenn die Pflanzenzahl zur Ernte deutlich geringer war als der Feldaufgang (maximal um 27 % reduzierte Pflanzenzahl, im Mittel um 20 % reduziert). Auffallend war die Lagerneigung der hohen Saatstärken ab Vollblüte im niederschlagsreichen Jahr 2024. Keine deutlichen Unterschiede ergab die Zählung der Kapselzahl/Pflanze. Sie lag im Mittel der Varianten bei 9,7 voll entwickelte Kapseln/Pflanze. 2024 nahm der Ertrag ab der Saatstärke 50 kg/ha deutlich ab, vermutlich aufgrund des Lagerens der Pflanzen. 2022 war der Ertrag bei den Saatstärken 40 und 60 kg/ha nahezu gleich hoch und deutlich höher als bei 30 kg. Insgesamt war 2022 ein deutlich ertragsstärkeres Jahr als 2024 mit bereits sehr gutem Feldaufgang (Abbildung 4.15). Weder der Gehalt an Blausäure im Samen noch der Ölgehalt stand in Zusammenhang mit den Saatstärken (Tabelle 28).

Tabelle 28: Variation Saatstärke bei Sommerlein, 2022 und 2024, Campus Klein-Altendorf

	2022			2024			
<b>Saatstärke kg/ha</b>	30	40	60	30	40	50	60
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup>	385 A	564 B	820 C	218 a	270 a	542 b	611 b
Feldaufgang							
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup> zur Ernte	337 A	453 B	602 C	176 a	221 a	440 b	494 b
Lagerneigung zur Ernte	1	1	1	1	1	3	6
Kapselzahl/Pflanzen n.s.	8	12	11	11	8	10	8
Blausäuregehalt (HCN mg/kg)	86	89	84	92	87	92	91
Ölgehalt %	42,3	42,1	42,4	41,6	40,8	41,2	41,8

Reihenabstand: 45 cm, Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ), n.s. = nicht signifikant

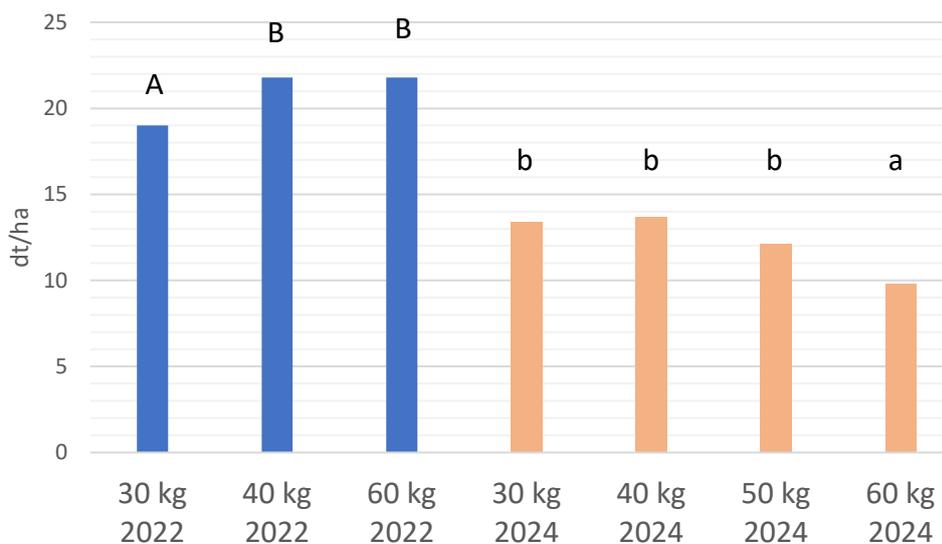


Abbildung 4.15 Mittlerer Ertrag Sommerlein bei Variation der Saatstärke (Sorte `Lirina´), Campus Klein-Altendorf, 2022 & 2024. (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey,  $p \leq 0,05$ ))

### Fazit Saatstärke

Methodisch stellen die Versuche zur Variation der Saatstärke eine Herausforderung dar, da trotz Einbeziehung von Keimfähigkeit und Tausendkornmasse der Saat, der Feldaufgang sehr stark von der Saatbeetbereitung und der Witterung nach der Saat abhängen. Dies spricht für den Risikoausgleich der in der Praxis bei der Wahl hoher Saatstärken ausschlaggebend ist, neben dem Faktor einer stärkeren Unkrautkonkurrenz von dichten Beständen. Erstaunlich war die starke Reduktion der Pflanzen vom Feldaufgang bis zur Ernte und die Lagerneigung dichter Bestände. Wobei hier das kritische Entwicklungsstadium der Leinpflanze die Blüte ist. In dieser

Phase führen dichte Bestände (hohe Reihenabstände) bei Niederschlägen zum Lagern der Pflanzen. Aufgrund seiner Pflanzenhöhe und der stärkeren Bestockung scheinen sich für Winterlein geringere Saatstärken zu eignen als für Sommerlein. Pellet et al. (2004) [47] empfehlen für Winterlein 100-200 Pflanzen/m<sup>2</sup> (Saatstärke circa 350-400 keimfähige Körner) und für Sommerlein 300 Pflanzen/m<sup>2</sup> (Saatstärke 600-650 keimfähige Körner) und verweisen auf ihre Untersuchungen zu einem sehr geringen Einfluss der Saatstärke auf den Ertrag. Findet eine Reduktion der Pflanzenzahl im Vegetationsverlauf statt (Unkrautregulierungsmaßnahme, schlechter bzw. unkalkulierbarer Feldaufgang), stellen die Empfehlungen von Pellet die unterste Grenze der Saatstärke dar.

Klein et al. (2007) [36] verweisen in ihrer Literaturrecherche auf die uneinheitlichen Forschungsergebnisse zum Zusammenhang von Saatedichte und Ertragsbildung. Untersuchungen von Casa (1999) [48] zeigten, dass von den Faktoren Witterung und Standort stärkere Ertragseffekte ausgehen als von der Saatstärke. Je nach Sorten können die Pflanzen bei geringeren Saatstärken über eine intensivere Bestockung und dadurch höhere Kapselzahl kompensieren. Die Versuche von Pageau et al. (2006) [49] zeigten, dass bereits ab einer Bestandesdichte von 250 Samen/m<sup>2</sup> keine kompensierende Bestockung mehr stattfindet und mit Ertragsverlusten zurechnen ist, während ab einer Bestandesdichte von 500 - 750 Samen/m<sup>2</sup> das Ertragsniveau stagniert. Casa (1999) [48] erklärt dies über eine stärkere Beschattung der Pflanzen bei hohen Bestandesdichten und damit einhergehender geringerer Assimilationsleistung der Pflanze. Wichtig ist bei der Berechnung der Saatstärke die Berücksichtigung der Keimfähigkeit und der Tausendkornmasse der jeweiligen Saatgutpartie.

#### 4.1.2.3 Unkrautregulierung und Reihenabstände

Das Monitoring des Praxis-Leinanbaus in den Jahren 2020-2023 zeigte, dass rund 50 % der untersuchten Betriebe Lein als Hackkultur anbauen mit Reihenabständen > 15 cm. Der Lein wird mehr oder weniger intensiv gehackt und gestriegelt. Die andere Hälfte der Betriebe kultiviert den Lein in Getreideabstand (12,5 cm), striegelt die Flächen oder verzichtet gänzlich auf den Striegeleinsatz.

Am Campus Klein-Altendorf (Universität Bonn) und auf den landwirtschaftlichen Betrieben von Eckhard Voigt, Doberquitz (Mittelsachsen), Joachim Reichel, Görsdorf (Erzgebirge), Andreas Maaß, Werther (NRW) und Torsten Kück, Windeck (NRW), alle ökologisch bewirtschaftete Betriebe, wurden in drei Versuchsjahren die Effekte unterschiedlicher Reihenabständen und Unkrautregulierungsmaßnahmen, bzw. die Unkrauttoleranz von Lein geprüft. Dabei sollte untersucht werden, ob der Anbau von Lein als Hack- oder als Striegelkultur Ertragsunterschiede bewirkt oder sich aus den Anbauverfahren Qualitätsunterschiede ergeben.

Teil 1: Exaktversuche, Campus Klein-Altendorf

Teil 2: Praxisversuche Betrieb Voigt und Betrieb Reichel

Teil 3: Unkrauttoleranz

### Teil 1: Exaktversuche, Campus Klein-Altendorf

Die Versuchsmethodik wird in Kapitel 3.2 erläutert. Die Striegelmaßnahmen wurden mit einem Treffler Präzisionsstriegel durchgeführt und die mechanische Hacke je nach Pflanzenentwicklungsstadium mit DUO Parallelogrammen (Hohlschutzscheiben mit Winkelmessern) oder Gänsefußscharen.

Tabelle 29: Versuchsdurchführung Variation Reihenabstand und Unkrautregulierungsmaßnahmen in Sommerlein, Campus Klein-Altendorf 2021+2023

Jahr	Varianten Reihenabstand / Verfahren	Aussaat	Ernte	Maßnahmen zur Unkrautregulierung
2021	• 45 cm/Hacken	23.4.2021	5.8.2021	Striegeln Hacken
	• 45 cm/Striegeln			3 x 3 x
2023	• 45 cm/Hacken	22.4.2023	10.8.2023	2 x 3 x
	• 45 cm/Striegeln			
	• 12,5 cm/Striegeln			

In den Versuchsjahren 2021 und 2023 wurde in Sommerlein bei gleichem Reihenabstand entweder gehackt oder gestriegelt und diese beiden Verfahren bewertet. Im Versuchsjahr 2021 lag der Ertrag des Leins in der Variante Hacken tendenziell über den gestriegelten Varianten, 2023 waren keine Unterschiede erkennbar (Abbildung 4.16).

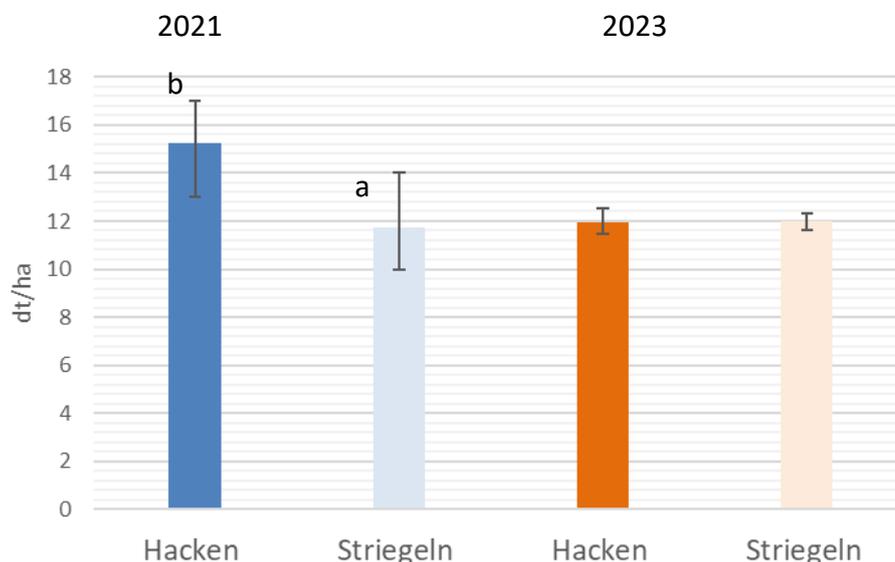


Abbildung 4.16: Kornenertrag (dt/ha, Streuung der Werte), Sorte Lirina, Vergleich Hacken und Striegeln, Campus Klein-Altendorf, 2021 und 2023. (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen tendenziell signifikante Unterschiede ( $p \leq 0,1$ ), keine Buchstaben = n.s.)

Bei den erhobenen agronomischen Parametern konnte in beiden Versuchsjahren nur in der Pflanzenhöhe signifikante Unterschiede ermittelt werden ( $p \leq 0,05$ ). In der Variante *Hacken* waren die Pflanzen deutlich höher. Diese Pflanzen gingen allerdings 2021 nach der Blüte stark ins Lager. Effekte der Varianten auf die Inhaltsstoffe der Leinsamen wurden nur im

Ballaststoffgehalt der Saat nachgewiesen (Tabelle 30). In beiden Jahren war der Ballaststoffgehalt in den gehackten Varianten höher.

Tabelle 30: Agronomische Merkmale und Inhaltsstoffe der Leinsaat, Sorte Lirina, Vergleich Hacken und Striegeln, Campus Klein-Altendorf, 2021 + 2023

(1 = fehlend, 2 = sehr gering, 3 = gering, 4 = gering bis mittel, 5 = Mittel, 6 = Mittel bis stark, 7 = stark, 8 = stark bis sehr stark, 9 = sehr stark).

	2021		2023		p ≤ 0,05
	Hacken	Striegeln	Hacken	Striegeln	
Tausendkornmasse g	5,3	5,3	5,7	5,7	n.s.
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup>	328	346	251	268	n.s.
Pflanzenhöhe cm	78 a	66 b	65 A	57 B	
Trockenmasse	22 a	81 b	14	20	
Unkraut/m <sup>2</sup> in g zur Erntereife					
Lagerneigung zur Ernte	6	1	1	1	
Blausäuregehalt (HCN) mg/kg	88	82	61	64	n.s.
Ölgehalt %	40,2	40,4	43,2	44	n.s.
Proteingehalt g/100 g	22,1	21,8	21,8	21,9	n.s.
Ballaststoffe g/100 g	30,9 a	28,3 b	30,8 A	24,6 B	

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen tendenziell signifikante Unterschiede (p ≤ 0,05), keine Buchstaben = n.s., Jahresgetrennte Datenverrechnung

Aus den beiden Versuchsjahren lassen sich für den Standort Klein-Altendorf keine eindeutigen Aussagen zu starken Effekten des Unkrautregulierungsverfahrens auf den Ertrag und weitere agronomische Merkmale ableiten. Ein Grund kann in der deutlich unterschiedlichen Witterung beider Jahre liegen. 2021 war die Leinvegetationszeit von starken Niederschlägen im Sommer geprägt. Hier zeigte sich die Unkrautregulierung mit der Hacke als deutlich effektiver. 2023 führte die kalt-nasse Witterung während der Bestandsetablierung, gefolgt von sehr hohen Temperaturen, insgesamt zu lückigen Beständen, schwacher Pflanzenentwicklung und geringem Unkrautdruck. Es konnte mit den Versuchen keine deutliche Auswirkung des Unkrautregulierungsverfahrens auf die wertgebenden und wertmindernden Inhaltsstoffe nachgewiesen werden.

#### Teil 2: Praxisversuche zur Unkrautregulierung: Vergleich Hacken/Striegeln

2021 bis 2023 wurden in Sommerlein an den Standorten Doberquitz und Görsdorf in Sachsen, Versuche zum Vergleich Hacken/Striegeln durchgeführt (Tabelle 5).

Tabelle 31: Praxisversuche zum Vergleich Hacken und Striegeln in Lein an den Standorten Görzdorf und Doberquitz, 2021-2023

Jahr	Standort	Sorte	Varianten Reihenabstand in cm	Aussaat	Ernte	Maßnahmen zur Unkrautregulierung
2021	Görzdorf	Bärenstein	Betriebsüblich:12,5 Hackvariante: 25	28.4.21	26.9.21	Striegeln 1 x Hacken 1 x
	Doberquitz	Lirina	Betriebsüblich; 12,5 Hackvariante: 37,5	10.5.21	17.8.21	0 2 x
2022	Görzdorf	Bärenstein	Betriebsüblich:12,5 Hackvariante: 25	13.4.22	13.8.22	1x 1x
2023	Görzdorf	Bärenstein	Betriebsüblich:12,5 Hackvariante: 25	2.5.23	15.8.23	0 2x
	Doberquitz	Lirina	Betriebsüblich: 12,5 Hackvariante: 37,5	24.4.23	10.8.23	0 2x

Der Kornertrag lag in den meisten Fällen in den Varianten *Hacken* höher als in Variante *Striegeln*/bzw. keine Unkrautregulierung. In Abbildung 4.17 wird die starke Streuung der Werte deutlich und zeigt die starken Unterschiede im Bestand. Im Mittel lag der Ertrag in den gehackten Varianten 13 % höher als in den Striegelvarianten.

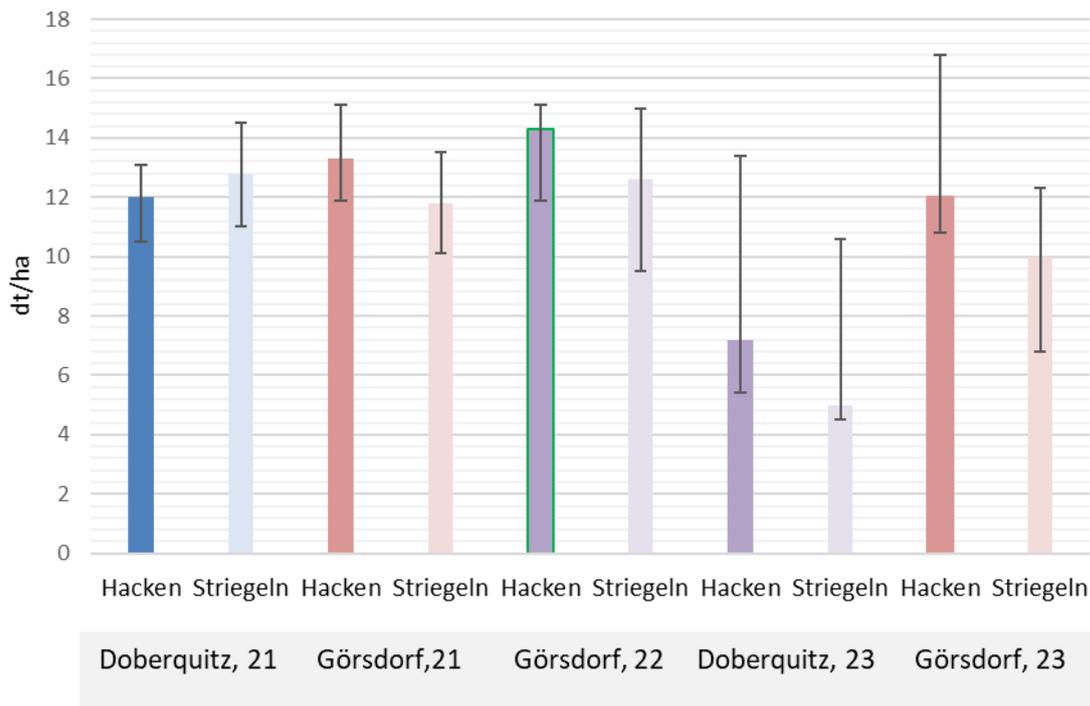


Abbildung 4.17 Kornertrag (dt/ha, Streuung der Werte), Vergleich Hacken / Striegeln in Lein, Praxisstandorte Doberquitz und Görzdorf, 2021-2023

Es zeigte sich jeweils in den Striegelvarianten (12,5 cm Reihenabstand) eine deutlich höhere Pflanzenzahl und eine geringere Unkrautmasse. Für die hohe Unkrautbiomasse in den Hackvarianten waren vor allem sehr große Weiße Gänsefußpflanzen in der Reihe

verantwortlich. Die Leinpflanzen waren in den Hackvarianten höher. Effekte auf den Blausäuregehalt in der Leinsaat konnten nicht ermittelt werden (Tabelle 32).

Tabelle 32: Agronomische Merkmale und Inhaltsstoffe der Leinsaat, Vergleich Hacken und Striegeln am Standort, Doberquitz, 2021 und 2023

	2021		2023	
	Hacken	Striegeln	Hacken	Striegeln
Tausendkornmasse g	6,5	6,7	5,2	5,2
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup>	236	411	265	319
Pflanzenhöhe cm	74	70	75	62
Trockenmasse Unkraut/m <sup>2</sup> in g zur Erntereife	248	150	395	288
Blausäuregehalt (HCN) mg/kg	84	81	98	103

Am Standort Görzdorf konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden. Die Pflanzenzahl beider Varianten war ähnlich, ebenso der Unkrautbesatz und der Gehalt an Blausäure in den Samen (Tabelle 33).

Tabelle 33: Agronomische Merkmale und Inhaltsstoffe der Leinsaat, Vergleich Hacken und Striegeln, Görzdorf, 2021-2023

	2021		2022		2023	
	Hacken	Striegeln	Hacken	Striegeln	Hacken	Striegeln
Tausendkornmasse g	6,0	6,1	6,1	6,0	6,0	6,0
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup>	182	182	208	215	79	79
Pflanzenhöhe cm	75	73	68	61	57	55
Trockenmasse Unkraut/m <sup>2</sup> in g zur Erntereife	251	260	180	151	102	113
Blausäuregehalt (HCN) mg/kg	82	86	80	77	101	97



Abbildung 4.18: Praxisvarianten Hacken und Striegeln auf dem LWB Eckhard Voigt, Doberquitz (4.6.21), Streifenversuch mit jeweils mehreren Messpunkten pro Variante

#### Fazit

Die On Farm Versuche zum Vergleich weiter Reihe (Hacke + Striegel) mit dem betriebsüblichen Reihenabstand (12,5 cm) Striegel bzw. keine mech. Maßnahmen im Bestand, zeigten das die Kulturführung beim Öllein sehr stark von den betrieblichen Voraussetzungen, sowohl vom Standort bzw. der Mechanisierung und den gesetzten Schwerpunkten im Betrieb und dem Verkaufspreis abhängt. Wenn eine gute Hacke im Betrieb vorhanden ist, spricht Vieles dafür den Öllein in weiter Reihe anzubauen und die Unkrautregulierung mit Hacke und Striegel durchzuführen. Mit präziser Hacktechnik in Kombination mit Striegel besteht die Möglichkeit den Unkrautbesatz auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren. Das Häufeln in die Kulturpflanzenreihe zum Verschütten kleiner Unkräuter, wäre eine zusätzliche wirksame Maßnahme. Ob und ab welchem Stadium der Öllein eine solche Maßnahme gut verträgt, könnte Gegenstand weiterer Versuche sein. Beide Betriebe, bei denen die Versuche stattfanden, haben die technische Möglichkeit den Öllein aus dem Schwad zu dreschen. Die betriebsübliche Variante mit 12,5 cm Reihenabstand und der Möglichkeit zum Striegeln, bzw keiner Unkrautregulierung bietet sich als extensives Anbauverfahren an, wenn die technischen Möglichkeiten des Schwaddrusches vorhanden sind. (Messerbalkenmähdwerk, Schwadaufnehmer für Mähdrescher). Ein wirtschaftlicher Vergleich der Verfahren ohne Unkrautregulierung mit Schwaddrusch v.s. weite Reihe verbunden mit mehreren Striegel- und Hackdurchgängen und Ernte aus dem Stand, soll in einem Folgeprojekt bearbeitet werden.

#### Teil 3: Unkrauttoleranz

Um die Auswirkungen des Unkrautbesatzes auf den Ertrag und die Qualität der Leinsaat zu bewerten, wurden am Campus Klein-Altendorf (2021 & 2022, Sorte `Lirina`) und auf zwei Praxisbetrieben Versuche durchgeführt.

Betrieb 1: Windeck (Tabelle 5), Sorte `Goldstern`, Versuchsjahr: 2021)

Betrieb 2: Werther (Tabelle 5), Sorte `Ingot`, Versuchsjahr 2021)

In bestehende Leinflächen wurden pro Schlag vier Unkrautfenster (jeweils 3 m<sup>2</sup>) markiert und manuell unkrautfrei gehalten. Auf Vergleichsflächen wurde der vorherrschende Unkrautbesatz des Schlages bonitiert. Zur Reife erfolgte eine manuelle Ernte der Flächen, eine Ertragsfeststellung und Analyse der Saat auf den Blausäuregehalt.

Auf allen Flächen waren sowohl der Ertrag als auch die Pflanzenzahl in den Parzellen ohne Unkraut deutlich höher (Abbildung 4.19). Auffallend waren die starken Ertragsschwankungen in den verunkrauteten Parzellen. Keine Unterschiede ergaben sich bei der Tausendkornmasse oder dem Blausäuregehalt in den Samen (Tabelle 34).

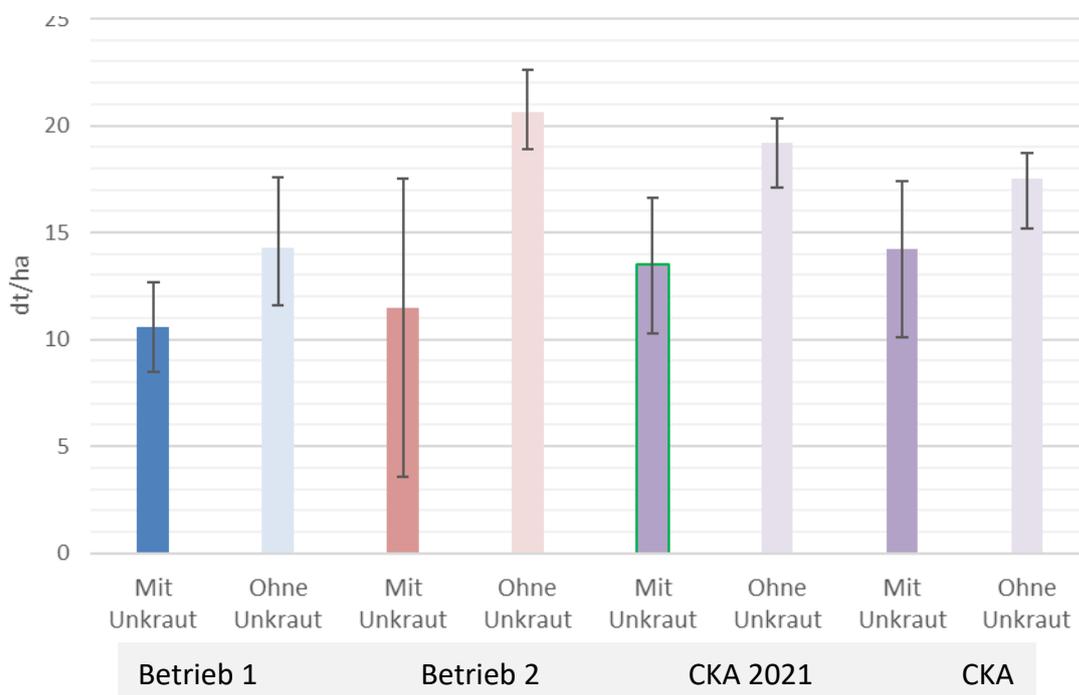


Abbildung 4.19 Mittlerer Kornenertrag (dt/ha) von Lein in Abhängigkeit vom Unkrautbesatz, ermittelt aus Unkraut- und erntefenstern in Praxisleinschlägen (2021) und Parzellenversuchen (2021 & 2022), sowie Streuung der Werte in den Wiederholungen

Tabelle 34 Mittlere Pflanzenzahl/m<sup>2</sup> und Qualitätsmerkmale der Leinsaat aus den Versuchen zur Unkrauttoleranz an Praxis- und Versuchsstandorten

	Betrieb 1		Betrieb 2		CKA 2021		CKA 2022	
	Mit Unkraut	Ohne Unkraut	Mit Unkr.	Ohne Unkr.	Mit Unkr.	Ohne Unkr.	Mit Unkr.	Ohne Unkr.
Ø Tausendkornmasse g	8,3	8,3	8,5	8,3	5,2	5,4	5,0	5,0
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup>	198	249	198	334	220	261	249	301
Unkrautdeckungsgrad zur Ernte in %	40-50	3	20-60	3	40	0	30-50	0
Blausäuregehalt (HCN) mg/kg	73	71	85	90	102	97	86	92

Bei Betrieb 2 und CKA 2021 wurden die Parzellen mit Unkrautbesatz im Bestand nach den dominanten Unkrautleitarten ausgewählt, um die Ertragswirksamkeit bestimmter Unkrautarten am jeweiligen Standort zu erfassen. In den Parzellen mit hohem Deckungsgrad von Windenknöterich und Kletten Labkraut waren die Ertragseinbußen deutlich geringer als in den Parzellen mit vorwiegend Ackerkratzdistel oder Bauernsenf. Am CKA war der geringste Ertrag bei starkem Getreidedurchwuchs und hohem Besatz an Weißem Gänsefuß im Vergleich zu hohem Ackerwindenbesatz oder einer Mischverunkrautung aus Kamille, Gänsedistel und Weißem Gänsefuß (Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21).

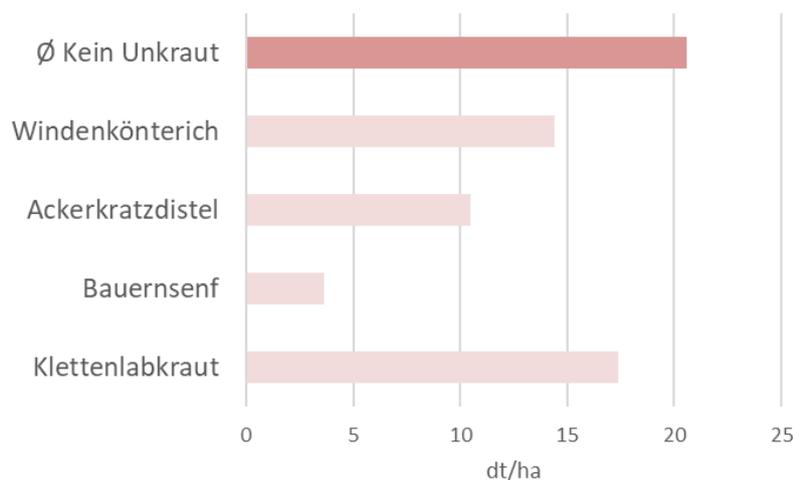


Abbildung 4.20 Kornenertrag (dt/ha) von Lein in Abhängigkeit vom Besatz mit unterschiedlichen Unkrautarten, Betrieb 2, 2021

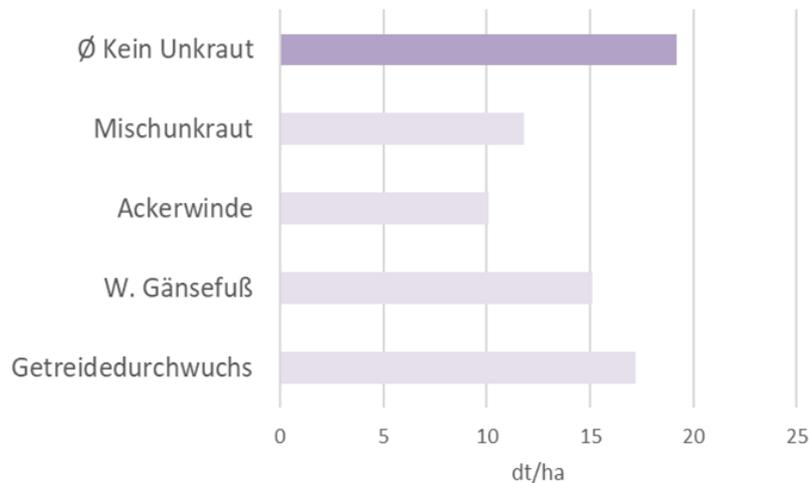


Abbildung 4.21 Kornertrag (dt/ha) von Lein in Abhängigkeit vom Besatz mit unterschiedlichen Unkrautarten, Campus Klein-Altendorf, 2021

#### Fazit Unkraut:

Die Versuche zur Unkrauttoleranz zeigen den ertragswirksamen Einfluss konkurrenzstarker Unkräuter auf den Lein. Die Wahl des Unkrautmanagements richtet sich neben der betrieblichen Maschinenausstattung nach den Standortbedingungen (Klima, Boden) und den Anbauverfahren (N-Düngung, intensiv/extensiv, Ernteverfahren). In den meisten Betrieben, die Lein hacken sind Sä- und Hacktechnik gut aufeinander abgestimmt, dennoch bleibt der sensible Bereich in der Reihe der konkurrenzstarken Unkräuter wie dem Weißen Gänsefuß genügend Raum bietet den Lein zu überwachsen. In frühjahrs- und sommertrockenen Gebieten oder auf flachgründigen Böden kann sich der tiefwurzelnde Lein gerade bei engem Reihenabstand und hoher Saatstärke als konkurrenzstark erweisen. Schwadddrusch kann in diesen Fällen mit hohem Unkrautbesatz „umgehen“. Auf tiefgründigen Standorten mit ausreichend Niederschlagsmengen, bei hoher N-Versorgung oder hohem Druck mit Problemunkräutern kann nur der Anbau als Hackkultur bei intensiver Bestandspflege als erfolgversprechend eingeschätzt werden. Ein Einfluss der Unkrautsituation auf den Gehalt mit Blausäure in den Samen ist nicht erkennbar.

#### 4.1.2.4 Stickstoffdüngung

In den Anbaujahren 2021 und 2022 wurden am Campus Klein-Altendorf Exaktversuche zur **Stickstoffdüngung von Sommerlein** mit den beiden Sorten `Lirina´ und `Kaolin´ durchgeführt und im Anbaujahr 2021/2022 zur **Stickstoffdüngung von Winterlein**, ebenfalls mit zwei Sorten. Die Versuche sollte Hinweise auf einen Zusammenhang von N-Düngung und Blausäuregehalt im Samen sowie auf das sortenbedingte Aneignungsvermögen liefern. Die ungedüngte Variante wurde jeweils mit einer Variante N-Düngung in Höhe von 60 kg N/ha verglichen. Die N-Düngung erfolgte mit Haarmehlpellets (N = 14 % in TM).

Dargestellte Versuchsparemeter waren: Pflanzenhöhe, Pflanzenentwicklung (nur Wi-Lein), Lagerneigung, Zwiewuchs, Homogenität der Samenabreife und Strohausreife jeweils zur Ernte, Ertrag, Blausäuregehalt der Samen sowie Tausendkornmasse (TKM), Öl-, Protein- und Ballaststoffgehalt.

### Sommerlein:

Die N-Düngung wurde jeweils zwei bis drei Wochen nach dem Feldaufgang vorgenommen (Einarbeitung der Pellets mit einer Radhacke).

In beiden Jahren konnten keine signifikanten Höhenunterschiede zur Ernte aufgrund der N-Düngung festgestellt werden. Bei der Sorte `Lirina` kam es in beiden Jahren zu deutlichen negativen Effekten der Düngung auf Lager, Zwiewuchs, Strohausreife sowie zur verzögerten Samenreife, allerdings zu signifikant höheren Erträgen. `Kaolin` verhielt sich in beiden Versuchsjahren unterschiedlich, ein Einfluss der N-Düngung auf den Ertrag war nicht statistisch abzusichern, vor allem aufgrund der großen Streuung der Werte (Tabelle 35).

Tabelle 35: Versuchsdurchführung und - ergebnisse, zwei Sommerleinsorten ohne Düngung (0 N) und mit N-Düngung (60 kg N), Campus Klein-Altendorf 2021 und 2022

(1 = fehlend, 2 = sehr gering, 3 = gering, 4 = gering bis mittel, 5 = Mittel, 6 = Mittel bis stark, 7 = stark, 8 = stark bis sehr stark, 9 = sehr stark)

	2021				2022			
	Lirina		Kaolin		Lirina		Kaolin	
	O N	60 kg N	O N	60 kg N	O N	60 kg N	O N	60 kg N
Aussattermin	8.4.2021				24.3.2022			
Nmin NO <sub>3</sub> _N*	Gesamt 0-60 cm: 34				Gesamt 0-60 cm: 50			
Versuchsbeginn								
Düngung	20.4.		20.4.		14.4.		14.4.	
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup>	238	224	240	252	262	248	243	246
zur Ernte (n.s.)								
Ø Pflanzenlänge cm (n.s.)	68	70	65	68	65	65	63	63
Lagerneigung	3	7	2	2	1	5	1	1
Zwiewuchs	1	5	3	3	1	3	1	3
Verzögerte Samenreife	2	5	2	2	1	5	1	3
Verzögerte Strohausreife	3	8	5	5	1	7	1	5
Ertrag dt/ha	12,3	16,1	13,4	13,9	20,4	23,8	18,3	19,9
	a	b	n.s	n.s	A	B	n.s	n.s.

Reihenabstand jeweils 45 cm, Saatstärke jeweils 40 kg/ha, \*Agrolab

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede,  $p \leq 0,05$ , n.s. = nicht signifikant, die Sorten und Jahre wurden getrennt verrechnet

Ein einheitliches Bild ergab die Analyse der Blausäuregehalte (HCN) in den Leinsamen der geprüften Sorten. Die Samen aus den N-gedüngten Varianten wiesen höhere HCN-Werte auf; bei `Lirina` waren diese signifikant höher als in der ungedüngten Variante (Abbildung 4.22).

Weniger deutlich waren die Effekte der N-Düngung auf den Öl-, Protein- und Ballaststoffgehalt. Lediglich 2022 war der Ölgehalt beider Sorten durch die Düngung deutlich reduziert (Tabelle 36) und der Proteingehalt tendenziell höher ( $p \leq 0,1$ ).

Tabelle 36: Mittlerer Nährwertgehalte der Leinsaat, Sorten `Lirina´ und `Kaolin´ ohne Düngung (0 N) und mit N-Düngung (60 kg N), Klein-Altendorf, 2021 + 2022

	2021				2022			
	Lirina		Kaolin		Lirina		Kaolin	
	0 N	60 kg N	0 N	60 kg N	0 N	60 kg N	0 N	60 kg N
Ölgehalt %	42,6	41,4	40,5	41,2	42,4 b	40,0 a	40,8 Y	38,8 x
Proteingehalt (g/100 g)	21,6	21,9	20,5	21,0	20,5 a	21,9 b	19,6a x	21,1 y
Ballaststoffgehalt (g/100 g)	30,5	29,2	31,2	31,4	28,5	28,8	29,4	30,2

unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikanten Unterschiede,  $p \leq 0,05$ , keine Buchstaben = nicht signifikant. Die Jahre wurden getrennt verrechnet

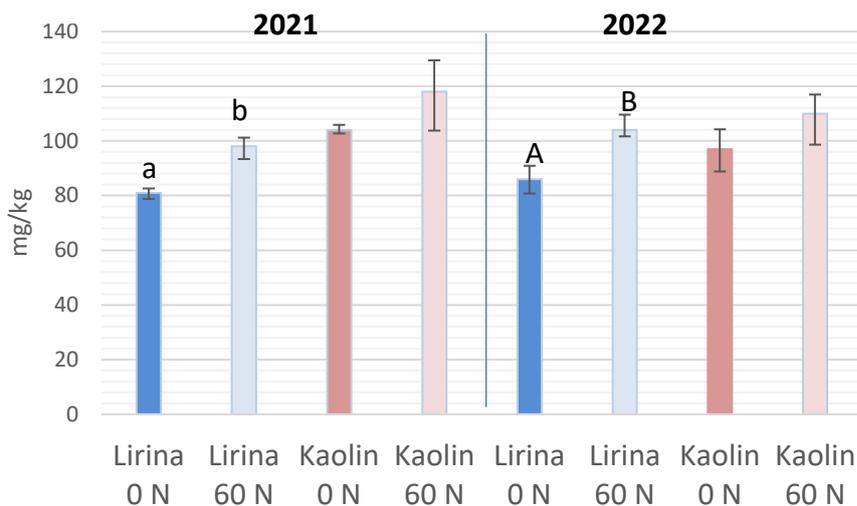


Abbildung 4.22 Mittlerer Blausäuregehalt (HCN, mg/kg) der Leinsorten `Lirina´ und `Kaolin´ ohne Düngung (0 N) und mit N-Düngung (60 kg N), Klein-Altendorf, 2021+2022. (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede,  $p \leq 0,05$ , keine Buchstaben = nicht signifikant, Die Jahre wurden getrennt verrechnet)

#### Winterlein:

In die N-Düngungsversuche zu Winterlein wurden die Sorten `Apalache´ und `Orival´ einbezogen, um Sorteneffekte in der N-Aneignung dokumentieren zu können Die N-Düngung wurde im März ausgebracht (Einarbeitung der Pellets mit einer Radhacke, Versuchsdurchführung: Tabelle 37).

Tabelle 37: Versuchsdurchführung, Variation Stickstoffdüngung bei Winterlein, Campus Klein-Altendorf 2021/2022

Sorte	Apalache	Orival
Saatstärke kg/ha	40	
Reihenabstand cm	45	
Saattermin	23.9.2021	
Feldaufgang (Pflanzen/m <sup>2</sup> )	238	250
Düngung	10.3.2021	
Nmin zu Versuchsbeginn	0-30 cm: 29	
10.9.2021	30-60 cm: 17	
NO <sub>3</sub> _N (kg/ha)*:	Gesamt: 46	

\*AgroLab

Die Leinpflanzen gingen mit einer mittleren Höhe von 10 cm in den Winter. Der Biomassezuwachs startete Mitte März und ab Anfang Mai kam es zu einer Differenzierung der Pflanzhöhe zwischen den Sorten aber auch den Varianten. `Apalache` N-Düngung zeigte ein deutlich stärkeres Höhenwachstum ( $p \leq 0,05$ ) als die ungedüngte Variante. Bei `Orival` waren die Unterschiede zur Ernte in der Pflanzhöhe nur marginal vorhanden (Abbildung 4.23). Sehr deutliche Effekte der N-Düngung zeigten beide Sorten in der Pflanzenentwicklung. Bei beiden Sorten blühte die gedüngte Variante 8-10 Tage später, es kam zudem zu einer deutlich schlechteren Strohausreife, mittel bis mittelstarkem Zwiewuchs, infolgedessen inhomogener Abreife der Kapseln und späteren Reifezeitpunkten (Tabelle 38).

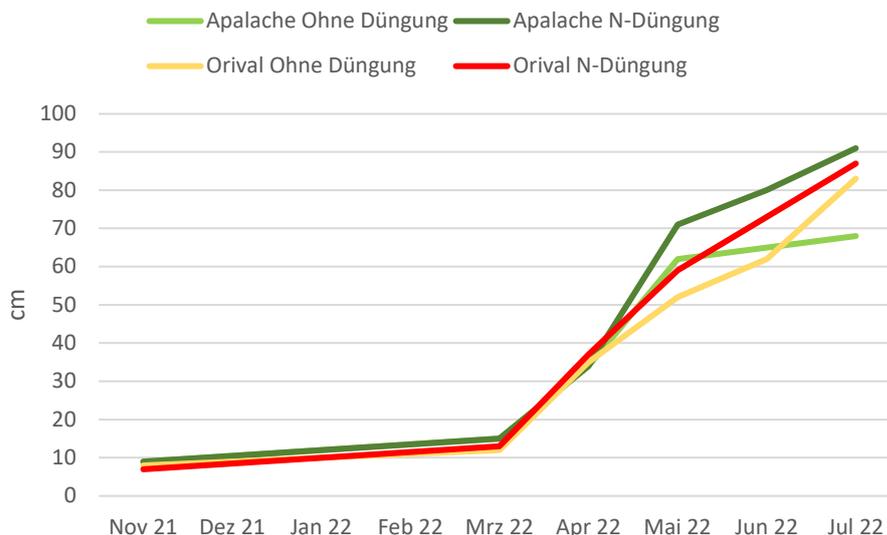


Abbildung 4.23: Pflanzhöhe (cm) Winterleinsorten `Apalache` und `Orival` in den Varianten Ohne Düngung und N-Düngung, Klein-Altendorf, 2021-2022

Tabelle 38: Pflanzenentwicklung und agronomische Merkmale der Winterleinsorten `Apalache´ und `Orival´ in den Varianten *Ohne Düngung* und *N-Düngung*, Klein-Altendorf, 2021-2022

(1 = fehlend, 2 = sehr gering, 3 = gering, 4 = gering bis mittel, 5 = Mittel, 6 = Mittel bis stark, 7 = stark, 8 = stark bis sehr stark, 9 = sehr stark)

	Ohne Düngung (0 N)		N-Düngung (60 kg N)	
	Apalache	Orival	Apalache	Orival
Lagerneigung	2	1	4	1
Zwiewuchs	3	3	5	7
Homogenität Samenabreife	7	7	4	5
Verzögerung Strohabreife	2	5	5	8
Blühbeginn	13.5.22	26.5.22	23.5.22	3.6.22
Reife	09.7.22	21.7.22	18.7.22	6.8.22

Bei `Apalache´ konnte durch die N-Düngung der Kornertrag signifikant erhöht werden. Ein gegenläufiger Effekt war bei `Orival´ zu beobachten. Durch den starken Zwiewuchs kam es in der N gedüngten Variante zu hohem Schmachtkornanteil, dadurch zu deutlich geringeren Erträgen (Abbildung 4.24), zudem wurden durch die schlechte Strohabreife Wickler beim Drusch hervorgerufen. In der Tausendkornmasse konnten keine Effekte der N-Düngung nachgewiesen werden. Diese lag einheitlich bei `Apalache´ bei 6,9 g und bei `Orival´ bei 5,4 g. Interessante Effekte waren bei den qualitätsbildenden und – mindernden Eigenschaften der Varianten zu sehen. Der Blausäuregehalt war in den Varianten 0 N bei beiden Sorten deutlich niedriger, dazu viel die große Streuung der Gehalte in den N-Varianten auf (Abbildung 4.25). Bei den anderen Parametern zeigten sich keine signifikanten Unterschiede (Tabelle 39).

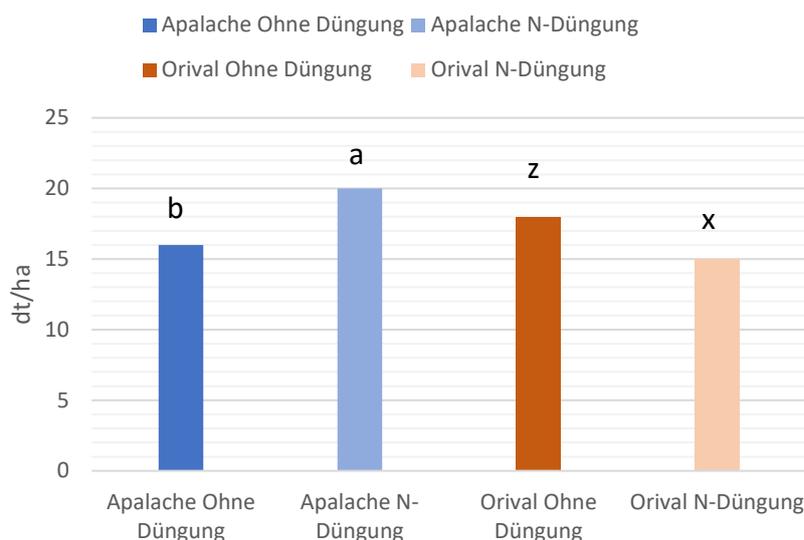


Abbildung 4.24: Kornertrag (dt/ha) bei den Winterleinsorten `Apalache´ und `Orival´ in den Varianten Ohne Düngung und N-Düngung, Klein-Altendorf, 2022. (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede,  $p \leq 0,05$ )

Tabelle 39: Qualitätsmerkmale der Leinsaat der beiden Winterleinsorten 'Apalache' und 'Orival' ohne Düngung und mit N-Düngung, Klein-Altendorf, 2022

	Ohne Düngung (0 N)		N-Düngung (60 kg N)	
	Apalache	Orival	Apalache	Orival
Ölgehalt (%)	41,4	42,1	41,8	42,0
Proteingehalt (g/100 g)	18,1	18,9	19,4	19,3
Ballaststoffgehalt (g/100 g)	24,5	28,0	24,2	28,2

keine signifikanten Unterschiede, Tukey,  $p \leq 0,05$

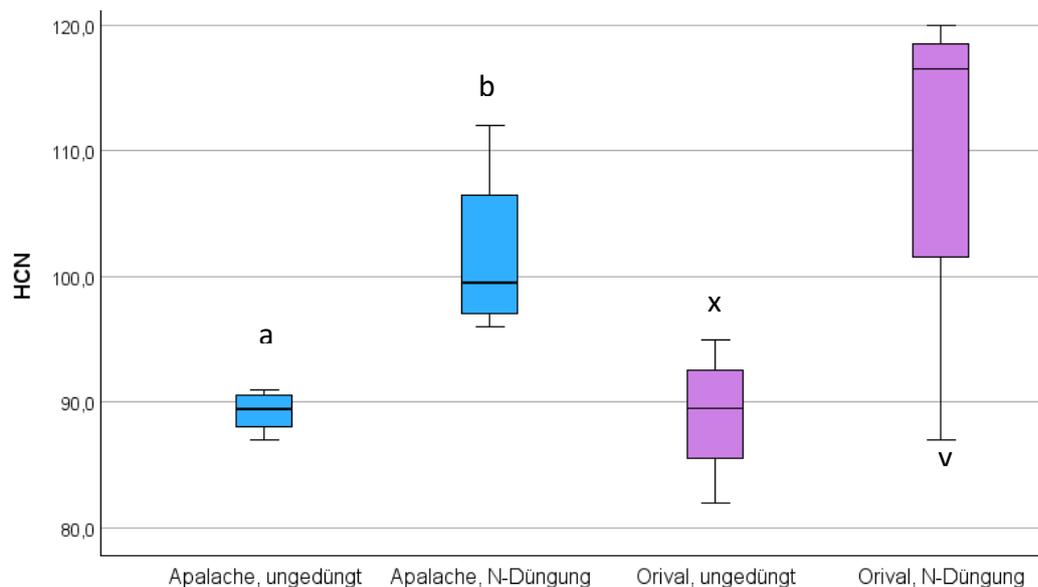


Abbildung 4.25: Blausäuregehalt (HCN mg/kg) in den Samen der Winterleinsorten 'Apalache' ( $p \leq 0,05$ ) und 'Orival' ( $p \leq 0,1$ ) in den Varianten Ohne Düngung und N-Düngung, Klein-Altendorf, 2022. (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen tendenziell signifikante Unterschiede)

### Fazit N-Düngung

Während zu Sommerlein zahlreiche Anbauempfehlungen vorliegen, die den Nährstoffentzug darstellen und unter Berücksichtigung des Bodenvorrates N-Gaben im Bereich von 20 bis 50 kg N/ha empfehlen (N-Sollwert 100 kg N/ha; [38]) arbeiten wir bei Winterlein mit den Angaben von Biertümpfel (2021) [50]. Das Anbautelegramm Winterlein [50] betrachtet ebenfalls eine N-Gabe von 20-50 kg/ha als ausreichend. Aufschlussreich sind weiterhin die Ergebnisse von Pellet et al. (2004) [47], die eindrücklich den Zusammenhang von N-Düngung und Lagerneigung bei Winterlein zeigen, der auch in den Versuchsergebnissen deutlich zu sehen war. Zu berücksichtigen sind weiterhin die Faktoren Wasserversorgung und Umsetzungsrate von organischen Düngern. In der relativ kurzen Kulturdauer des Sommerleins, kann eine verzögerte N-Freisetzung negative Effekte wie Zwiewuchs oder verzögerte Abreife provozieren.

Neben den direkten positiven Effekten einer gesteigerten N-Düngung auf den Samenertrag des Leins, den Ölertrag und Proteingehalt, werden von zahlreichen AutorInnengruppen die

negativen Effekte auf den Ölgehalt, die Ölzusammensetzung und pflanzenbauliche Eigenschaften angesprochen ([51], [52], [53], [54], [55], [56]).

In verschiedenen Untersuchungen wird der negative Zusammenhang einer N-Düngung mit dem Anteil an  $\alpha$ -Linolensäure im Öl beschrieben [52]. Sabyasachi et al. (2023) [57] zeigten beispielsweise eine signifikante Verringerung des  $\alpha$ -Linolensäureanteils im Öl ab einem bestimmten N-Versorgungsniveau bei ausgewählten Sorten. Bei den experimentellen Untersuchungen von Andruszczak et al. (2015) [58] sank der Anteil  $\alpha$ -Linolensäureanteils ab einer Düngegabe von 80 kg N/ha deutlich. Klare Effekte einer gesteigerten N-Versorgung sind nach Grant (2016) [56] nur auf unterversorgten Böden zu sehen. Aus den Untersuchungen von Herzog et al (2017) [55] konnten zwar ebenfalls negative Effekte höherer N-Gaben auf den  $\alpha$ -Linolensäureanteil abgeleitet werden, das Schweizer Team wies aber auf die teilweise dominanten Effekte von Sorte, Jahr und Standort hin.

Nach Oomah und Mazza (1992) [19] haben neben dem Sorteneinfluss und den Jahresanbaubedingungen auch die agronomischen Faktoren einen Effekt auf den Gehalt an cyanogenen Glycosiden in der Leinsaat. Näher quantifiziert wurde dieser Effekt nicht, es kann aber davon ausgegangen werden, dass auch die Stickstoffversorgung der Pflanzen an dem Wirkkomplex beteiligt ist.

Die Versuche zu Sommer- und Winterlein am Campus Klein-Altendorf zeigten starke Reaktion des Leins auf eine Stickstoffdüngung. Die teilweise höheren Erträge gingen mit ungünstigen pflanzenbaulichen Merkmalen einher. Bedeutsam waren die deutlich erhöhten Blausäuregehalte in den Leinsamen bei einer Stickstoffdüngung. Bislang wurden keine Untersuchungen zum Zusammenhang von Stickstoff (oder auch anderen Mikro- oder Makronährstoffen) auf die Ausbildung und den Gehalt an cyanogenen Glycosiden gefunden. Dieser Faktor sollte in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

#### 4.1.2.5 Ernteverfahren

##### Schwaddrusch oder Standdrusch?

Das zweiphasige Ernteverfahren bei Lein stellt besonders bei hoher Verunkrautung oder starker Spätverunkrautung, schlechter Strohreife, ungleichmäßiger Abreife der Kapseln und an sommertrockenen Standorten ein erfolgversprechendes Verfahren dar. Ernte- oder Qualitätsverluste (beschädigte Samen) durch das Schwadlegen sind stark von der zur Verfügung stehenden Technik abhängig. Das Monitoring des Leinanbaus in der Praxis (2020-2023) zeigte, dass bei der Leinernte circa 30 % der untersuchten Betriebe das zweiphasige Schwaddruschverfahren dem Standdrusch vorziehen.

Da die Leinkapseln wenig zum Ausfallen neigen, stellt der Schwaddrusch eine interessante Alternative dar bei

- extensiven Anbausystemen ohne Unkrautregulierung
- hoher Zwiewuchsneigung, schlechter Abreife von Stroh und Kapseln
- hohem Spätverunkrautungsgrad

Das Schwadlegen ist möglich, wenn die Samen schon braun-reif sind und in den Kapseln anfangen zu rascheln, die Stängel anfangen gelb zu färben und unterhalb der Kapsel eintrocknen.

Die Zeitspanne zwischen Schwadlegen und Drusch richtet sich nach der Witterung, dem Abtrocknen des Unkrautes und dem Ausreifen des Leinstrohs. Häufiger Wechsel zwischen Regen und starker Sonneneinstrahlung können zum Aufplatzen der Kapseln führen, unterstützen aber auch die Strohreife.

In der Praxis liegt der Abstand zwischen Schwaden und Drusch meistens bei 1 – 10 Tagen. Geeignete Schwadlege- und Aufnahmetechnik zu finden, stellt die Praxis vor große Herausforderungen, gerade beim kleinflächigen Anbau.

Am Campus Klein-Altendorf wurden in drei Versuchsjahren die Effekte beider Ernteverfahren auf die Inhaltsstoffe untersucht und Ertragsunterschiede bei Sommerlein ermittelt. In den Linovit Versuchen wurde das Augenmerk vor allem auf Qualität der Leinsaat gelegt, insbesondere den Blausäuregehalt der Leinsamen. Ein Technikvergleich wurde im Rahmen von Linovit nicht durchgeführt.

Verluste bei der Ernte waren vor allem technisch bedingt und traten sowohl beim Schwadlegen, als auch beim Aufnehmen des Schwades und beim Dreschen auf.

Versuchsvarianten

1. Schwadlegen früh, 7 - 9 Tage bis Drusch
2. Schwadlegen spät, 1 Tag bis Drusch
3. Standdrusch

Die Versuche wurden als Exaktversuche (vierfacher Wiederholung, Parzellengröße: 60 m<sup>2</sup>) mit der Sommerleinsorte `Lirina´ durchgeführt.

Verwendete Erntetechnik: Schwadleger, Eigenbau des Institutes für Landtechnik der Universität Bonn: Messerbalken in 1,50 m Breite, rotierenden Seitenscheiben die den Schwad unter dem Traktor zusammenführen, Drusch mit Parzellenmähdrescher, Firma Wintersteiger.

Tabelle 40: Übersicht der Versuche zum Ernteverfahren bei Lein am Campus Klein-Altendorf, 2021-2023

Versuchsjahr	Aussaat	Variante 1 Schwadlegen früh	Variante 2 Schwadlegen, spät	Standdrusch
<b>2021</b>	23.4.2021	16.8.2021	23.8.2021	24.8.2021
<b>2022</b>	24.3.2022	26.7.2021	2.8.2022	3.8.2022
<b>2023</b>	22.4.2023	2.8.2023	11.8.2023	12.8.2023

Reihenabstand: 45 cm, Saatstärke: 45 kg/ha

Der Gehalt an Blausäure in den Samen lag in drei Versuchsjahren bei der Variante Schwadlegen früh deutlich über den beiden anderen Varianten (Abbildung 4.26). Effekte des Ernteverfahrens auf den Öl-, Protein- oder Ballaststoffgehalt zeigten sich in keinem Versuchsjahr (Abbildung 4.27 und Anhang).

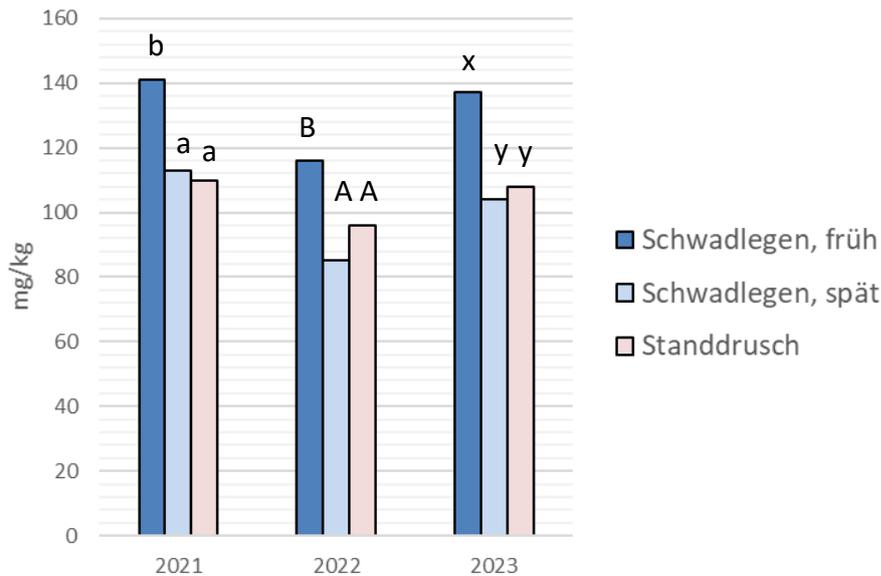


Abbildung 4.26: Mittlerer Gehalt an Blausäure (HCN, mg/kg) in den Leinsamen bei unterschiedlichen Ernteverfahren, 2021-2023, Campus Klein-Altendorf, Sorte Lirina (Labor: ifp Berlin), (Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Tukey,  $p \leq 0,05$  bei jahresgetrennter Datenverrechnung)

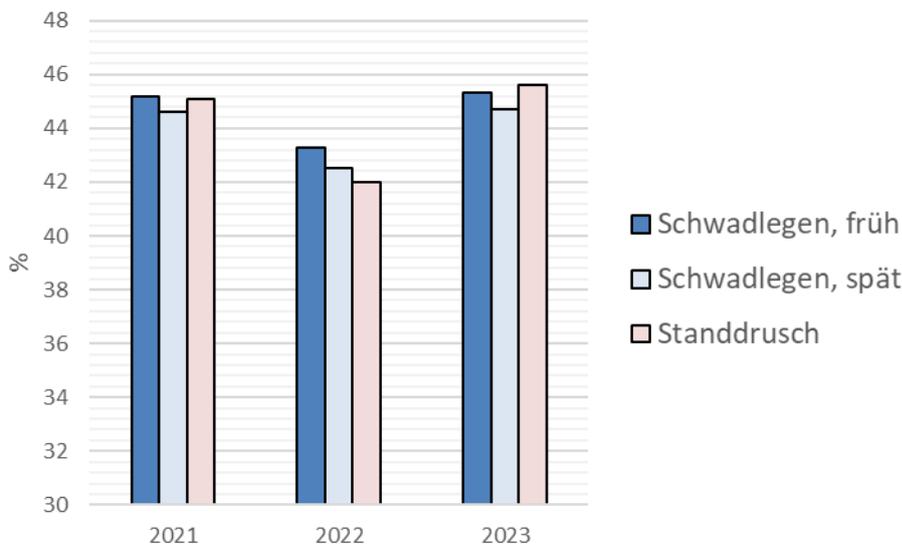


Abbildung 4.27: Mittlerer Ölgehalt (%) in den Leinsamen bei unterschiedlichen Ernteverfahren, 2021-2023, Campus Klein-Altendorf, Sorte Lirina (Labor: SGS Analytics, keine signifikanten Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ))

Bei den Untersuchungen von Ertrag und Tausendkornmasse (TKM) zeigten sich jahresbedingte Schwankungen in der TKM der Sorte 'Lirina' aber keine Effekte des Ernteverfahrens. So lag die TKM 2021 zwischen 5,7 und 5,9, im Jahr 2022 7,0 und 7,4. 2023 zeigten sich ebenfalls nur leichte Unterschiede in der TKM (5,5 – 5,8).

Die statistische Verrechnung der Kornerträge zeigte deutlich geringere Erträge bei einem frühen Schwadlegetermin, circa eine Woche vor dem Drusch (Abbildung 4.28), sodass sich für den Standort Klein-Altendorf entweder der Standdrusch oder das Schwadlegen kurz vor dem

Drusch empfiehlt. Vermutlich führen hohe Bodenfeuchten und/oder ungünstige Witterungsbedingungen zum Aufplatzen der Kapseln, wenn der Lein lange auf Schwad liegt. Starke Spätverunkrautung, Zwiewuchs oder mangelnde Strohreife könnten jedoch für das Schwadlegen sprechen. Dies trat in den drei Versuchsjahren nicht auf.

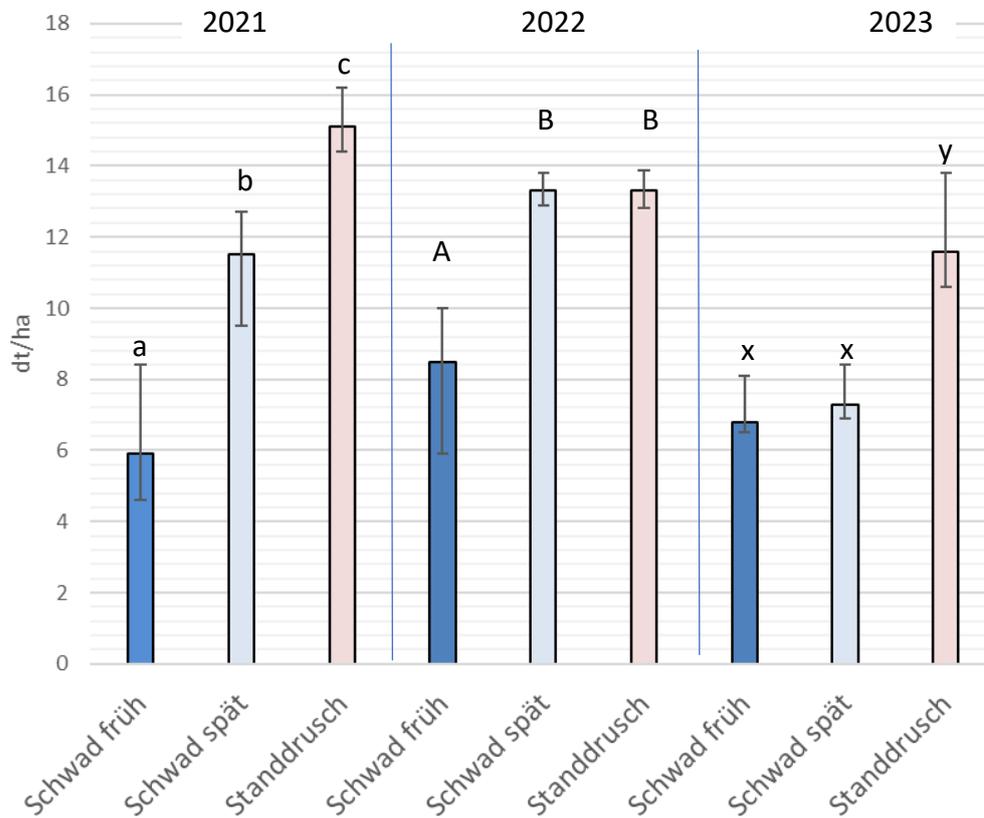


Abbildung 4.28: Mittlere Kornerträge (dt/ha) und ihre Streuung bei unterschiedlichen Ernteverfahren von Lein, Campus Klein-Altendorf, Sorte Lirina, 2021-2023 (Tukey,  $\leq 0,05$  bei jahresgetrennter Verrechnung, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede)

Der Restfeuchtegehalt des Erntegutes lag in allen Versuchen bei den Varianten Schwadfrucht tendenziell geringer als in Variante Standdrusch (Tabelle 41: Mittlere Restfeuchte (%) der gedroschenen Leinsaat aus den Versuchen zum Ernteverfahren bei Lein am Campus Klein-Altendorf, 2021-2023 (Tukey-Test, jahresgetrennte Verrechnung, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante bzw tendenzielle Unterschiede).

Tabelle 41: Mittlere Restfeuchte (%) der gedroschenen Leinsaat aus den Versuchen zum Ernteverfahren bei Lein am Campus Klein-Altendorf, 2021-2023 (Tukey-Test, jahresgetrennte Verrechnung, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante bzw tendenzielle Unterschiede)

Versuchsjahr	Variante 1 Schwad früh	Variante 2 Schwad spät	Standdrusch	
2021	7 a	7 a	11 b	p≤ 0,05
2022	5 A	6 A	9 B	p≤ 0,05
2023	6 x	7 x	9 y	p≤ 0,1

### Fazit

Aus dem Vergleich Schwadlegen und Standdrusch bei Lein lassen sich Effekte auf den Gehalt an Blausäure in der Leinsaat und dem Ertrag erkennen.

Untersuchungen von Oomah & Mazza [19] und Niedzwiedz-Siegien [46] beschäftigen sich mit der Veränderung des Musters an cyanogenen Glycosiden in der Leinpflanze während des Wachstums und des Reifeprozesses. Die cyanogenen Glycoside, CG in den Leinsamen werden mittels eines Enzyms zu Blausäure umgesetzt. Ausgereiften Leinsamen enthalten vorwiegend die CG Linustatin und Neolinustatin und beispielsweise geringe Gehalte des Monoglycosid Linamarin. Der Gehalt an CG nimmt mit der Reife der Leinsamen deutlich ab. Nach jetzigem Wissensstand würde das für die Wahl des Ernteverfahren bedeuten, das zur Vermeidung von hohen Blausäuregehalten in der Leinsaat ein Faktor die vollständige Ausreife der Samen zur Ernte ist – unabhängig vom technischen Verfahren der Ernte.

Das Schwadlegen sollte demnach erst zur Reife der Samen erfolgen und bei Beständen mit starkem Zwiewuchs sollte bis zur Reife der Samen gewartet werden. Untersuchungen zur Beschädigung der Leinsaat durch das Ernteverfahren und mögliche Auswirkungen auf den Blausäuregehalt liegen bislang nicht vor.

Luginbühl et al (2015) [59] beschreiben in ihren Untersuchungen zum Vergleich Schwadlegen und Standdrusch die Einsparung von Trocknungskosten durch das Schwaden. Ebenso wie in den hier beschriebenen Versuchen, stellten sie deutlich geringere Wassergehalte im Samen zum Drusch fest, wenn der Lein vorher auf Schwad lag.

Weitere Effekte des Ernteverfahrens auf die Inhaltsstoffe der Leinsaat ließen sich für den Protein-, Öl- und Ballaststoffgehalt in den Versuchen nicht nachweisen

## **4.2 AP 1: Analyse qualitätswirksamer Faktoren bei Leinsamen und dessen Verarbeitungsprodukte**

### **4.2.1 TVH I: Standortscreening**

Das Standortscreening wurde von der Universität Bonn, INRES Nachwachsende Rohstoffe in den Jahren 2020-2023 durchgeführt. Insgesamt wurden 104 Anbauflächen berücksichtigt (Rheinland-Pfalz: 8, Niedersachsen: 8, Thüringen: 11, Hessen: 9, Baden-Württemberg: 3, Bayern: 11, NRW: 21, Sachsen: 17, Sachsen-Anhalt: 14, Brandenburg: 2). Dabei handelte es sich um 15 Winterleinflächen und 89 Sommerleinflächen. Von den 104 Flächen wurden 14 konventionell bewirtschaftet.

Im Folgenden werden erst die Standortfaktoren aller Flächen und anschließend die Anbauverfahren von Sommer- und Winterlein getrennt vorgestellt.

### Standorte

Aus den Bodenuntersuchungsergebnissen der Leinpraxisflächen geht hervor, dass der Lein überwiegend auf Böden angebaut wurde die als schluffiger Lehm klassifiziert wurden (Tabelle 42). Die Analyse der Mikro- und Makronährstoffe der Böden zeigte eine überwiegend gute Grundversorgung der Böden. Auch bei der Zinkversorgung der Böden lagen die meisten Flächen in Versorgungsstufe E (Tabelle 43). Untersuchungen von Homayouni et al. (2013) [60] weisen darauf hin, dass Lein eine Zink-bedürftige Pflanze ist, die auf Mangel mit Pollensterilität, kleinen, verkümmerten und eventuell chlorotischen Blättern reagiert.

Tabelle 42 Bezeichnung der Bodenarten der Leinanbauflächen in der Praxis, 2020-2024 (n=104)

Bodenart	Kürzel	Anzahl Flächen
schluffiger Lehm	uL	84
sandiger Lehm	sl	10
schwach lehmiger Sand	IS	3
Sand	IS	7

Tabelle 43: Mikro- und Makronährstoffgehalte in den Böden der Praxisleinanbauflächen, 2020-2024 (n=104)

Anteil Flächen in den jeweiligen Versorgungsstufen in %					
Nährstoff	Versorgungsstufe				
	A	B	C	D	E
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	25	<b>42</b>	28	9
K <sub>2</sub> O	0	6	<b>50</b>	34	14
Mg	3	1	20	<b>43</b>	37
Cu (Kupfer)	9	-	<b>78</b>	-	17
B (Bor)	16	-	<b>74</b>	-	14
Na (Natrium)	24	<b>69</b>	8	2	1
Zn (Zink)	2	-	28	-	<b>74</b>
Mn (Mangan)	9	.	6	-	<b>89</b>
pH-Wert	5 - 5,9	6 -6,5	6,6 – 6,9	≥7	
	10	<b>30</b>	<b>30</b>	34	
Org. Substanz	1-2	2-3	3-4	≥4	
	26	55	17	6	

Da Lein in den Samen Schwermetalle stark akkumuliert wurden die Böden auf ihren Ausgangsgehalt an Cadmium untersucht (Abbildung 4.29). Diese reichten von 0,09 bis 0,7 mg/kg Boden.

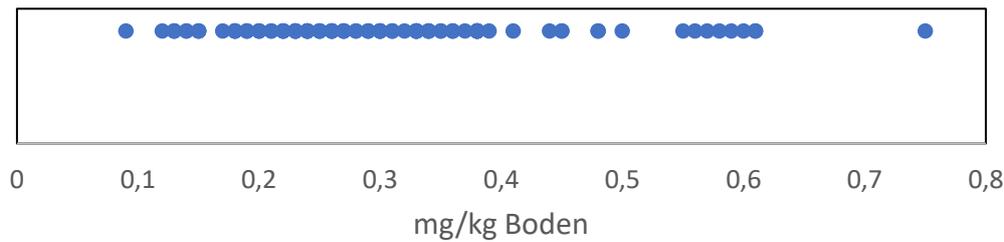


Abbildung 4.29: Cadmiumgehalte (mg/kg) in den Böden der Praxisleinanbauflächen, 2020-2024 (n=104)

#### 4.2.1.1 Monitoring Praxisanbau Sommerlein

##### Sorten

Von den 89 untersuchten Sommerleinflächen wurden auf 47 Schlägen braunsamige und auf 42 Schlägen gelbsamige Sorten angebaut. Insgesamt kamen 14 verschiedene Sorten in den Anbau. Bei den Gelbsamigen stellte `Goldstern` die Hauptanbausorte dar und bei den Braunsamigen `Lirina` (Abbildung 4.30). Zu den meisten im Anbau befindlichen Sorten liegen aktuelle Ergebnisse zu den agronomischen Merkmalen aus den Landessortenversuchen und aus den Sortenprüfungen im Rahmen von Linovit vor.

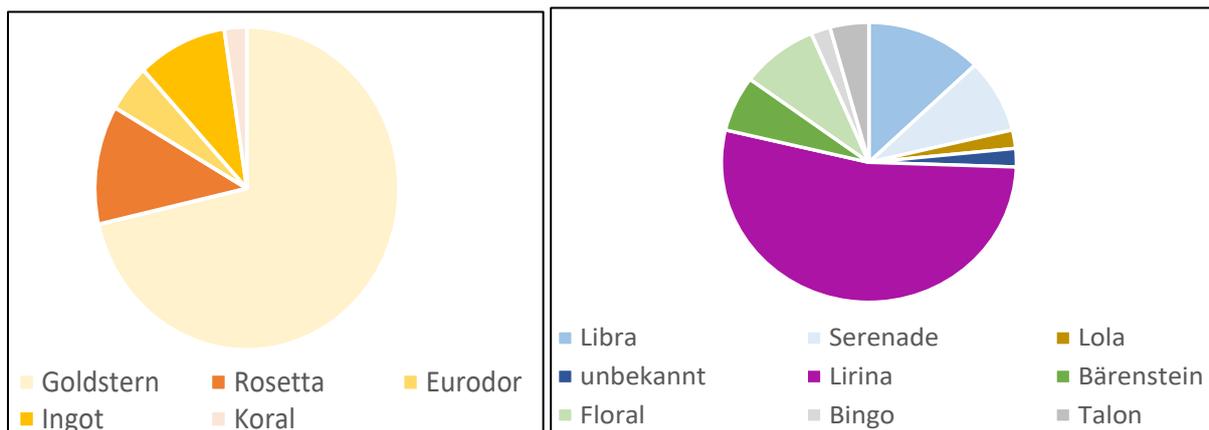


Abbildung 4.30: Angebaute Leinsorten, links: gelbsamig, rechts: braunsamig, Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023 (n=89)

##### Fruchtfolge

In dem Anbaumonitoring wurde die Vor- und die Zwischenfrucht direkt vor dem Lein erfasst. Vorrucht des Sommerleins war auf 70 Flächen von 89 Getreide, in den meisten Fällen Wintergetreide und hier allen voran Winterweizen vor Winterroggen. Nur auf 3 Flächen stand der Lein nach einer legumenen Vorrucht. Lediglich auf 12 Flächen wurde schon einmal Lein innerhalb der letzten 8 Jahren angebaut.

##### Aussaat

Lein hat ein Keimtemperaturminimum vom 3 °C und verträgt als Jungpflanze leichte Fröste. Die ausgesprochene Langtagpflanze bestockt im Kurztag und bildet im Langtag (>12 h Licht) Blüten aus. Bei späten Saatterminen verläuft die Entwicklung sehr schnell und die vegetative Phase gelangt nicht zur vollen Ausbildung [61]. Die Aussaattermine von Sommerlein in der

Praxis zogen sich von Mitte März bis Anfang Mai, mit leichten Jahresschwankungen und einem deutlichen Schwerpunkt der Saattermine Mitte April (Abbildung 4.31).

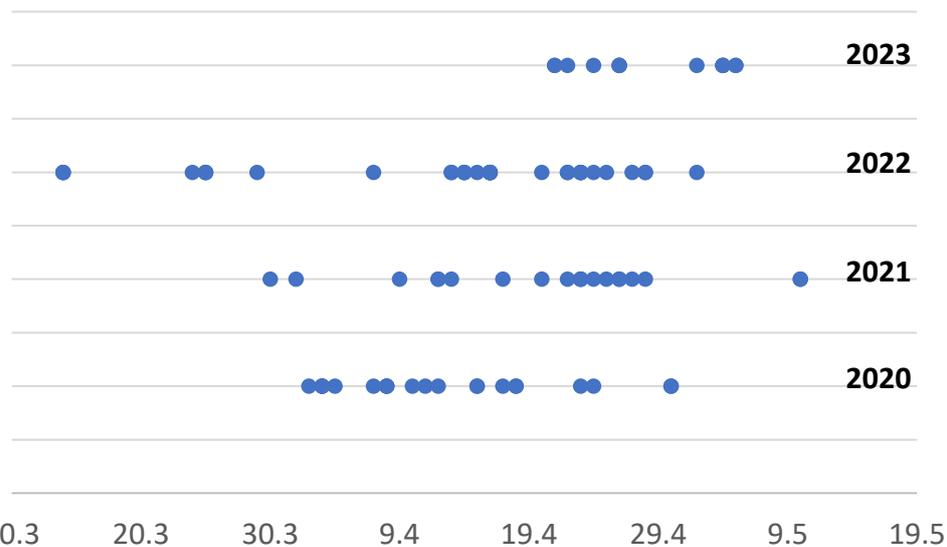


Abbildung 4.31 Saattermine von Lein, Praxismonitoring Sommerlein (n=89), 2020-2023

Die meisten Betriebe wählen eine Aussaatstärke im Bereich zwischen 40 und 50 kg/ha. Nur wenige Betriebe säen mit  $\geq 60$  kg/ha oder weniger als 40 kg/ha (Abbildung 4.32).

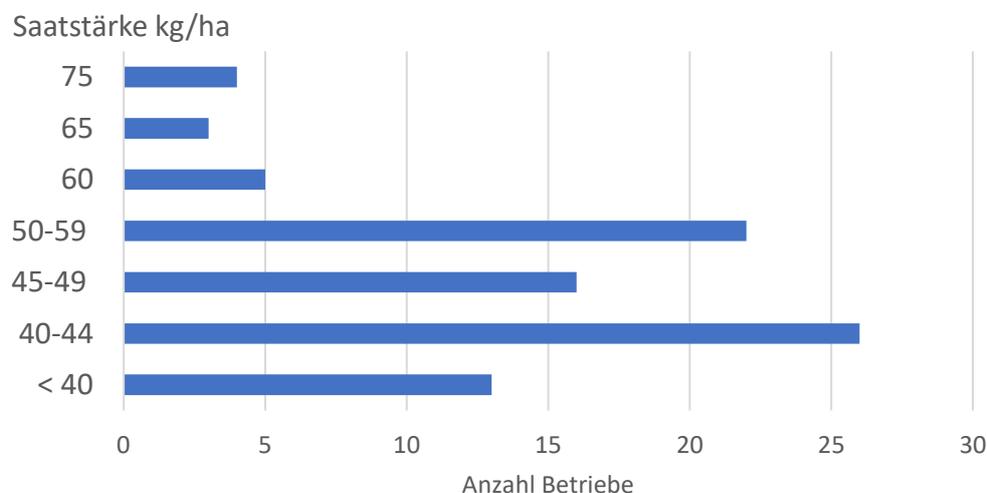
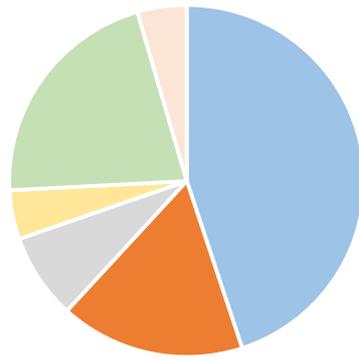


Abbildung 4.32 Aussaatstärke (kg/ha) Lein, Praxismonitoring Sommerlein (n=89), 2020-2022

#### Düngung, Reihenabstände und Unkrautregulierung

Auf 30 % der Leinflächen wurde direkt zur Leinkultur eine Düngung vorgenommen. Meist handelte es sich um Komposte, Mist, Gärsubstrat und nur in sehr wenigen Fällen um eine intensive Makro- oder Mikronährstoffdüngung. Die Reihenabstände betragen auf 40 Flächen 12,5 cm und auf 49 zwischen 15-45 cm (Abbildung 4.33).



■ 12,5 cm ■ 15-18,5 cm ■ 25 cm ■ 30 cm ■ 37,5 cm ■ 45 cm

Abbildung 4.33: Reihenabstände von Sommerlein in der Praxis, 2020-2023 (n=89)

Die meisten Leinflächen wurden mit einem Reihenabstand  $\geq 15$  cm angelegt und gehackt, teilweise in Kombination mit Striegeln. 42 % der untersuchten Flächen wurden gehackt, 37 % mindestens 1 x gestriegelt und auf 12 % der Flächen erfolgte keinerlei Unkrautregulierung (Abbildung 4.34). Auf diesen Flächen war der Reihenabstand  $< 15$  cm. Insgesamt kamen auf 8 % der Flächen Herbizide zum Einsatz, wobei auf 6 konventionell bewirtschafteten Flächen ausschließlich gehackt wurde.

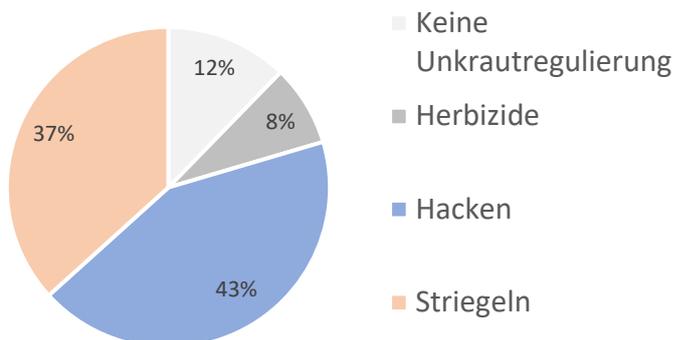


Abbildung 4.34: Unkrautregulierungsmaßnahmen in Lein, Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023 (n=89)

### Ernte

Die Sommerleinernte erfolgte in den Jahren 2020 bis 2023 im Zeitraum von 22.7. und 28.9. (Abbildung 4.35). 18 % der Flächen wurden auf Schwad gelegt und im Mittel nach 7 Tagen gedroschen (Min: 2, Max: 15 Tage).

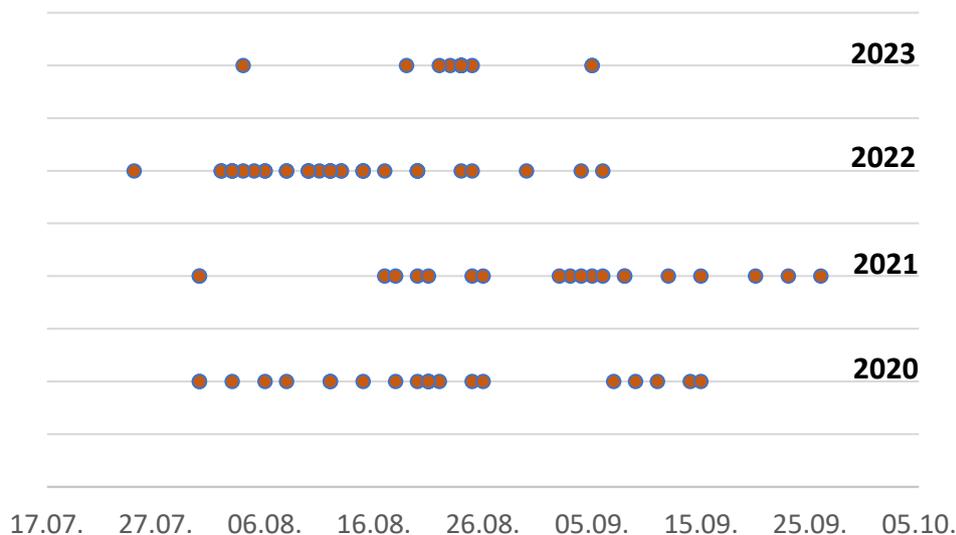


Abbildung 4.35: Erntetermine Sommerlein, Praxismonitoring, 2020-2023 (n=89)

### Vegetationsdauer

Im Mittel aller Flächen lag die Vegetationsdauer bei 126 Tagen (Min.: 96, Max.: 159). Dabei zeigten sich sowohl Unterschiede zwischen den Jahren, den Sorten (‘Goldstern’, ‘Lirina’) und auch den Regionen (NRW & Sachsen, Tabelle 44). Im Jahr 2021, mit den hohen Niederschlagsereignissen im Sommer, stand die Leinkultur im Mittel länger auf dem Feld als 2023. Die Vegetationsdauer in NRW war leicht höher als in Sachsen, wobei die regionalen Unterschiede gerader der erfassten Leinflächen sehr groß waren. Die Sorte ‘Goldstern’ zeigte eine etwas längere Kulturdauer als ‘Lirina’, was sich auch in den Sortenversuchen widerspiegelt.

Tabelle 44: Mittlere Vegetationsdauer (Ø VD) der Leinanbauflächen 2020-2023, In Klammer: n= Anzahl der Flächen)

Jahr	Ø VD	Bundesland	Ø VD	Sorte	Ø VD
2020 (n=21)	131	NRW (n=14)	126	Goldstern (n=29)	128
2021 (n=20)	134	Sachsen (n=13)	123	Lirina (n=24)	125
2022 (n=34)	121				
2023 (n=13)	116				

Ausgewählt wurden die Sorten und Bundesländer mit den meisten Flächen

### Leinsamen: wertgebende und wertmindernde Qualitätsparameter:

#### Tausendkornmasse (TKM)

Die Tausendkornmasse der Leinsaat schwankte zwischen den Proben einer Sorte teilweise erheblich (Abbildung 4.36). Gerade die Vielzahl an TKM-Messwerten von ‘Lirina’ und

‘Geldstern’ verdeutlicht dies. Bei ‘Goldstern’ schwankte das TKM zwischen 6 und 9,6 g. Bei ‘Lirina’ zwischen 4,7 und 7,8 g. Ein Jahres- und Standorteffekt ist zu vermuten.

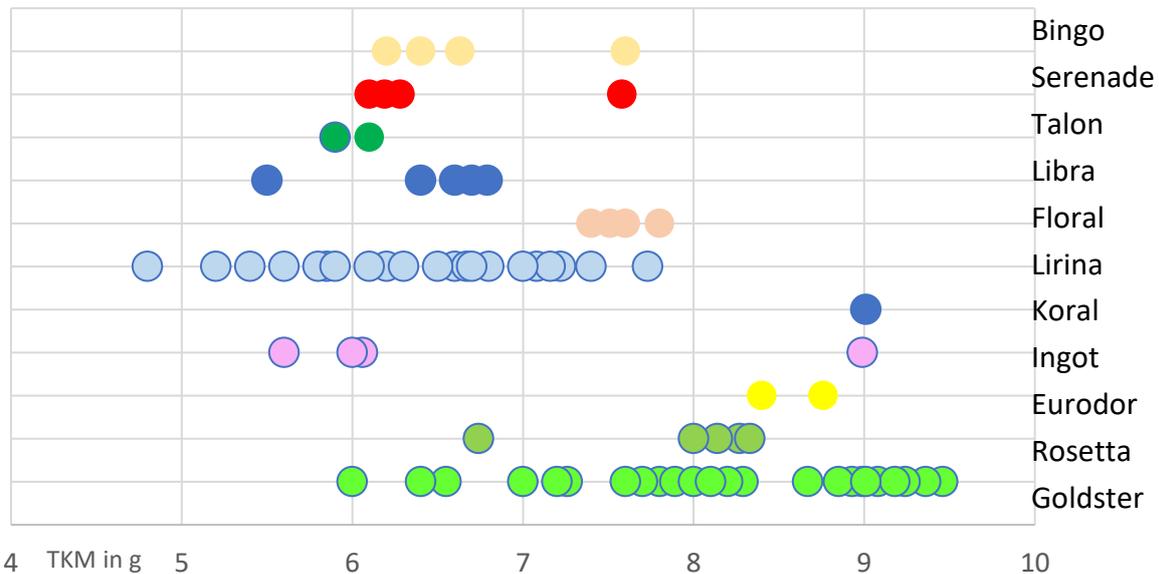


Abbildung 4.36: Tausendkornmasse (TKM, g) unterschiedlicher Leinsorten, Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023 (n=86)

**Cadmium:**

Der Cadmiumgehalt (Cd) in den Samen der Sommerleinproben lag im Mittel bei 0,366 und damit vergleichbar zu dem Cd-Gehalt in Winterlein (Abbildung 4.51). Gehalte über dem Grenzwert von 0,5 mg/kg Samen (Frischgewicht, Quelle: Verordnung (EU) 2021/1323) konnten bei 18 Proben gemessen werden (bezogen die Trockenmasse bei 21 %), das entspricht 18,5 % der Proben (Tabelle 45).

Tabelle 45: Cadmiumgehalte (Cd, mg/kg Saat) in Leinsamen, bezogen auf Frisch- (FM) und Trockenmasse (TM), 2020-2023 (Labor: sgs Analytics)

	Sommerlein (n=97)	Winterlein (n=15)
Ø Cd-Gehalt in Leinsamen mg/kg FM	0,33	0,36
Max.	1,2	0,93
Min.	0,08	0,19
≥ 0,5 mg-Grenzwert	18 (FM) 21 (TM)	1 (FM) 3 (TM)

**Quellzahl:**

Die Quellzahl als Maß für die Quellfähigkeit der Samen ist vor allem bei der medizinischen Nutzung der Samen als leichtes Abführmittel und zur Milderung von leichten Magen-Darm-Beschwerden von Bedeutung. Die Monographie (Lini semen) des Europäischen Arzneibuches (Ph. Eur. 10) schreibt eine Mindestquellzahl von 4 vor. Deutlich wurde in der Analyse der Samen aus dem Praxismonitoring, das einige Proben diesen Mindestgehalt nicht erreichen

und mit den gelbsamigen Sorten tendenziell höhere Werte erreicht werden. Bei einigen Sorten war die Quellzahl Zuchtziel (beispielsweise `Rosetta`).

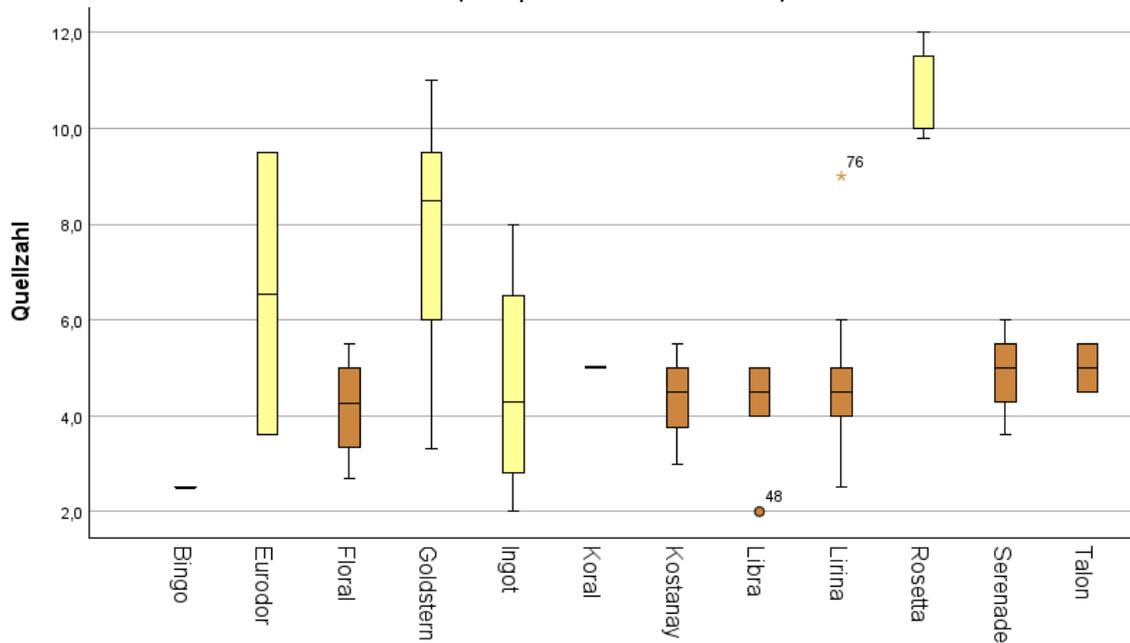


Abbildung 4.37: Quellzahl unterschiedlicher Leinsorten, Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023 (n=89)

#### Blausäure (HCN):

Überhöhte Blausäurewerte traten vor allem in den Proben aus dem Jahr 2020 auf. Von 21 Proben lagen 2020 alleine 10 über dem Grenzwert von 150 mg/kg Saat. In den kommenden drei Jahren waren es lediglich 2 Proben mit Gehalten über 150 mg. Insgesamt zeigten sich bei 12,5 % der untersuchten Proben erhöhte Blausäurewerte (gemessen als Cyanid in der FM, Abbildung 4.38).

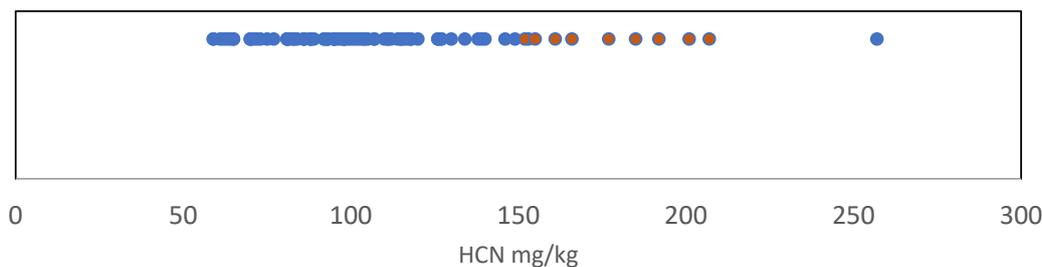


Abbildung 4.38: Mittlerer Gehalt an Blausäure (HCN, mg/kg FM) in Leinsamen. Praxismonitoring, 2020-2023 (n=89, Labor: ifp)

#### Ölgehalt

Mit einem mittleren Ölgehalt von 45 % wurden insgesamt hohe Ölgehalte erreicht (Maximalwert 52,2 %, `Lirina`, Abbildung 4.39). Sorteneffekte wurden leicht sichtbar und spiegeln die Ergebnisse der Landessortenversuche wider. Die Ölgehalte von Sommerlein waren höher als die von Winterlein (Ø 40,2 %, Abbildung 4.48).

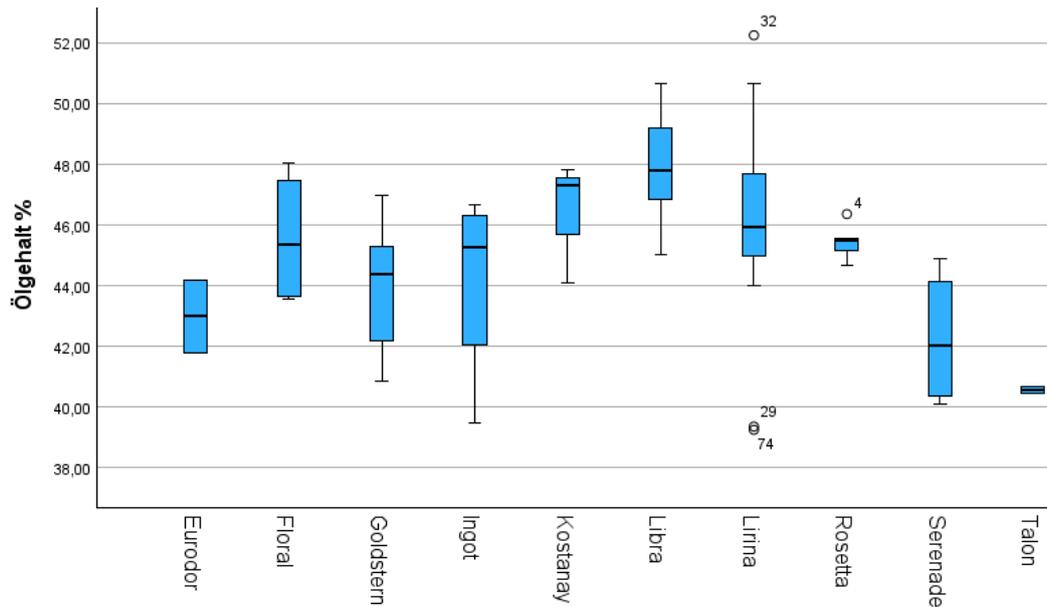


Abbildung 4.39: Mittlerer Ölgehalt (% , TM) in Leinsamen. Praxismonitoring, 2020-2023 (n=88, Labor: sgs Analytics)

#### Protein und Ballaststoffgehalt

Keine Sorteneffekte und eine große Streuung zeigten die Protein- und Ballaststoffgehalte der Leinsamenproben. Während der mittlere Proteingehalt bei 21,3 g/100 lag, wurde im Mittel ein Ballaststoffgehalt von 28,5 g/100 Samen (TM) erreicht (Abbildung 4.40).

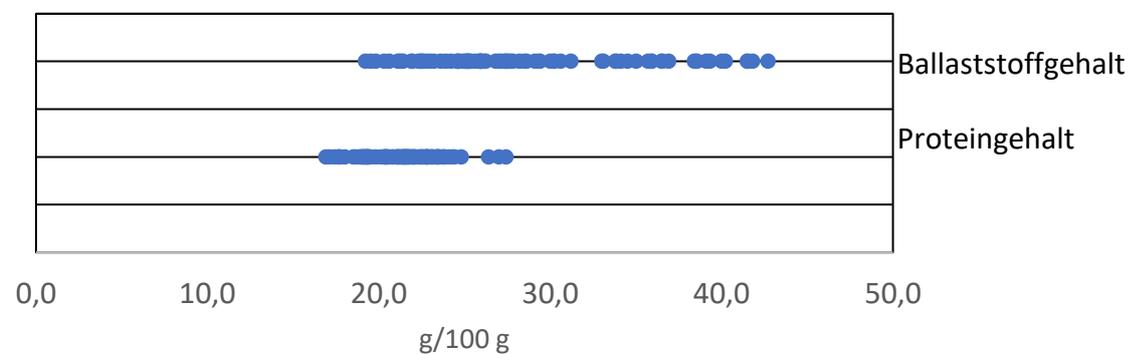


Abbildung 4.40: Mittlerer Gehalt an Ballaststoffen und Proteinen (g/100, TM) in Leinsamen. Praxismonitoring, 2020-2023 (n=88, Labor: sgs Analytics)

#### Alpha-Linolensäure

Der Anteil an  $\alpha$ -Linolensäure im Leinöl schwankte von 49 – 63 % (Abbildung 4.41). Den höchsten Wert mit 62 % erreichte 2020 die Sorte `Libra`. Es waren deutliche Sorteneffekte in den Gehalten an  $\alpha$ -Linolensäure erkennbar, aber auch jahres- und standortbedingte Unterschiede, wie die Streuung der Werte um den Median in Abbildung 4.42 zeigt. 56 % der Proben lagen unter dem Richtwert von 56 %  $\alpha$ -Linolensäure in Leinöl.

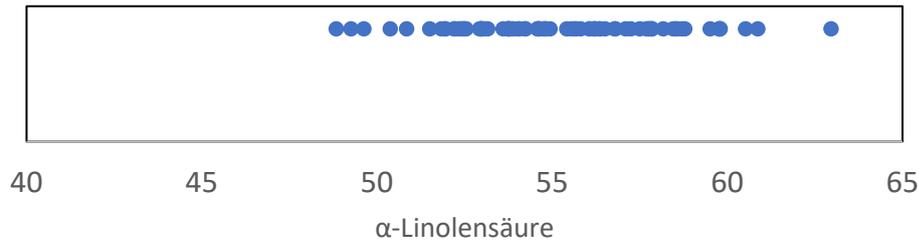


Abbildung 4.41: Anteil an  $\alpha$ -Linolensäure im Leinöl (%), Praxismonitoring, 2020-2023 (n=79, Labor: sgs Analytics)

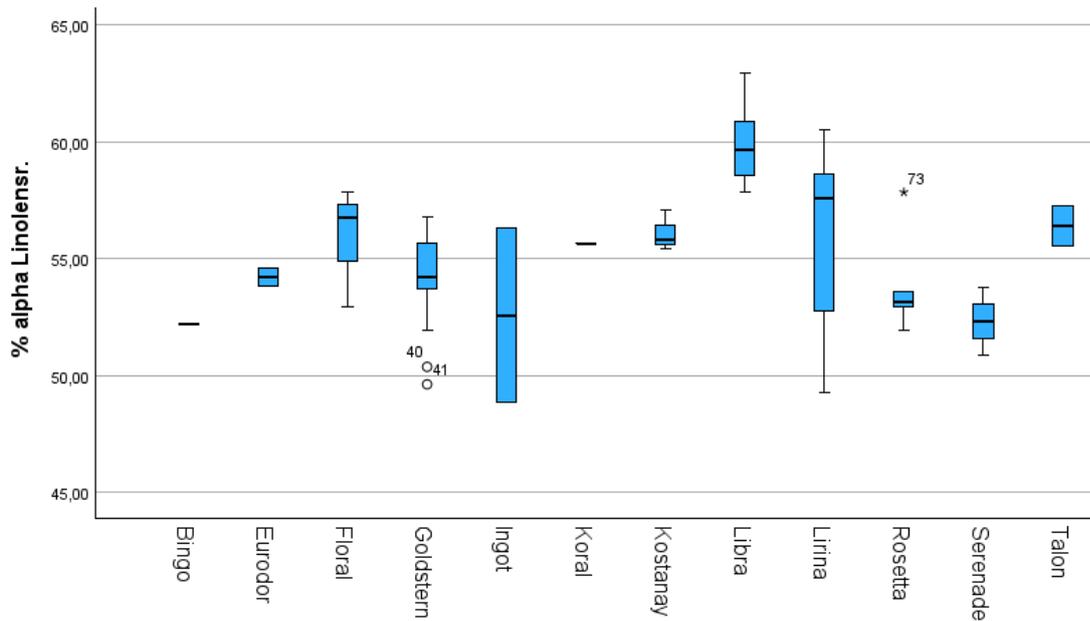


Abbildung 4.42 Anteil an  $\alpha$ -Linolensäure im Leinöl unterschiedlicher Leinsorten (%), Praxismonitoring, 2020-2023 (n=79, Labor: sgs Analytics)

#### 4.2.1.2 Praxisanbau Winterlein

Im Rahmen des Monitorings von Praxisanbauflächen wurden in den Jahren 2021-2023 in Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und NRW insgesamt 15 Anbauflächen mit Winterlein untersucht. Die braunsamige Sorte `Apalache´ wurde auf 86 % der Flächen kultiviert und die gelbsamige Sorte `Orival´ auf den restlichen Flächen. Der Winterlein stand auf 73 % der Flächen nach (Winter-) Getreide. Der früheste Saattermin war der 13.9.(2022), der späteste 17.10.(2021). Tendenziell lagen die Saattermine Anfang Oktober (Abbildung 4.43). Die Saatstärke schwankte nur geringfügig und lag in den meisten Fällen bei 45 kg/ha (Tabelle 46).



Abbildung 4.43: Saattermine von Winterlein in den Jahren 2021-2023 auf 15 Praxisflächen

Tabelle 46: Saatstärke (kg/ha) von Winterlein in der Praxis (Angaben der Betriebe in Korn/ha oder Einheiten wurden mit den Angaben des Saatguthändlers umgerechnet)

Saatstärke in kg/ha	Anzahl Flächen
32	2
35	1
40	1
45	9
50	1
55	1

Zur mechanischen Unkrautregulierung wurde auf 53 % der Flächen ein Reihenabstand  $\geq 30$  cm gewählt und die Kultur gehackt (Abbildung 4.44). Nur auf 10 % der gehackten Flächen erfolgte eine Hackmaßnahme vor Winter. Vorherrschende Unkrautarten auf den Flächen waren vor Winter Rote Taubnessel, Kamille, Kohlgänsedistel, Klatschmohn, Ehrenpreis, Bauernsenf, Klettenlabkraut, Erdrauch sowie Durchwuchs, beispielsweise von Getreide. Auf keiner Fläche wurde zum Boniturtermin *Bestandesetablierung* ein deutlicher Befall mit Erdflöhen erfasst.

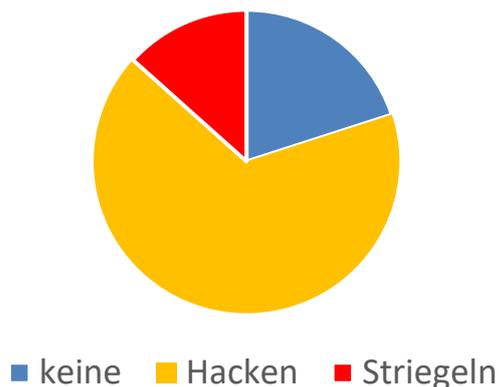


Abbildung 4.44: Unkrautregulierungsverfahren im Winterlein auf Praxisflächen (n=15, 2021-2023)

Die Vegetationsdauer betrug im Mittel der untersuchten Schläge 302 Tage (Abbildung 4.45). Die Druschtermine lagen auf den Praxisflächen zwischen 10.7.(2023) und 15.9.(2023), meistens Mitte/Ende Juli. Wurden Sommer- und Winterlein am selben Standort und im selben Jahr kultiviert, lag der Winterleindrusch im Mittel 34 Tage vor dem Sommerleindrusch. Auf 23 % der Flächen wurde der Winterlein auf Schwad gelegt und nach 3 bis 10 Tagen gedroschen. Die Angaben zu den Erträgen schwankten stark im Bereich von 8-20 dt/ha.

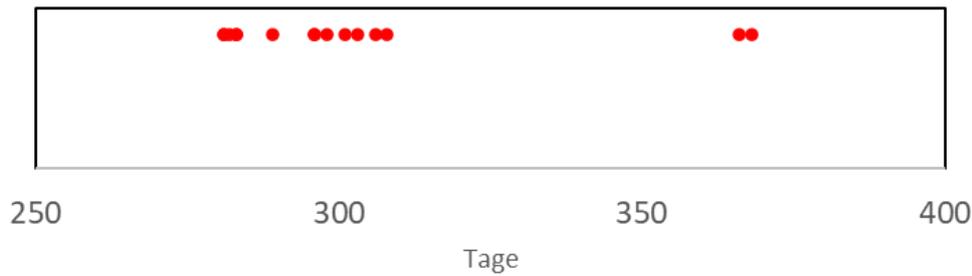


Abbildung 4.45: Vegetationstage im Praxiswinterleinanbau 2021-2023 (n=15)

Die Untersuchung der aufbereiteten Ernteprouben zeigte eine sehr schwankende Tausendkornmasse (TKM) der Leinsamen bei der Sorte `Apalache` ( $\bar{\varnothing}$  6,6 g). `Orival` hatte ein deutlich kleineres Korngewicht (Abbildung 4.46).

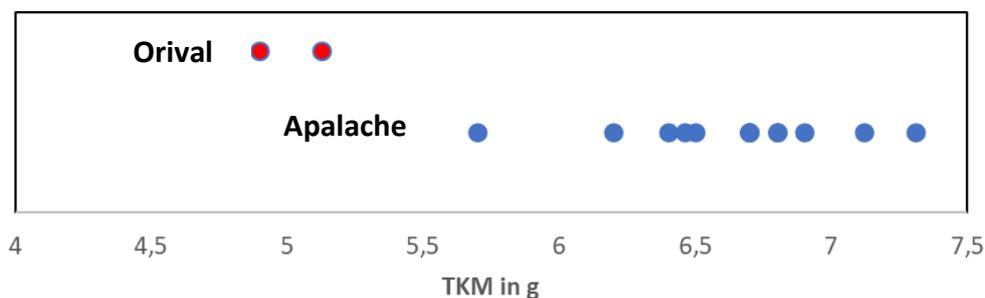


Abbildung 4.46: Tausendkornmasse (g) des aufbereiteten Erntegutes der Winterleinsorten Apalache und Orival (2021-2023, n=15)

Neben den qualitätsmindernden Eigenschaften der Leinsaat (Gehalt an Blausäure in den Samen) wurden auch die wertgebenden Inhaltsstoffe untersucht: Öl-, Protein- und Ballaststoffgehalt sowie der Anteil alpha-Linolensäure im Öl. In allen untersuchten Winterleinproben lag der Gehalt an Blausäure (HCN) unter dem Grenzwert von 150 mg/kg Leinsamen (Abbildung 4.47). Aufgrund der geringen Probenanzahl konnten keine deutlichen Muster, wie Jahreseffekte oder Standorteffekte erkannt werden.

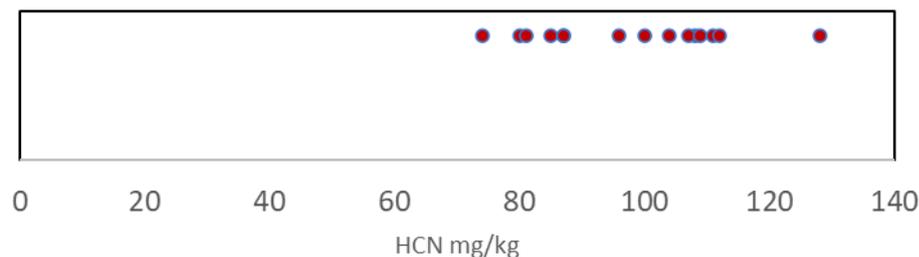


Abbildung 4.47: Mittlerer Gehalt an Blausäure (HCN, mg/kg) in den Leinsamen. Winterlein, 15 Praxisflächen, 2021-2023 (bezogen auf Frischmasse, Labor: ifp)

Der Ölgehalt in den Samen schwankte zwischen 37,9 und 42,8 % ( $\bar{\varnothing}$  40,2 %, Abbildung 4.48). Aus den Werten lassen sich keine deutlichen Effekte von Sorte, Jahr oder Standort erkennen.



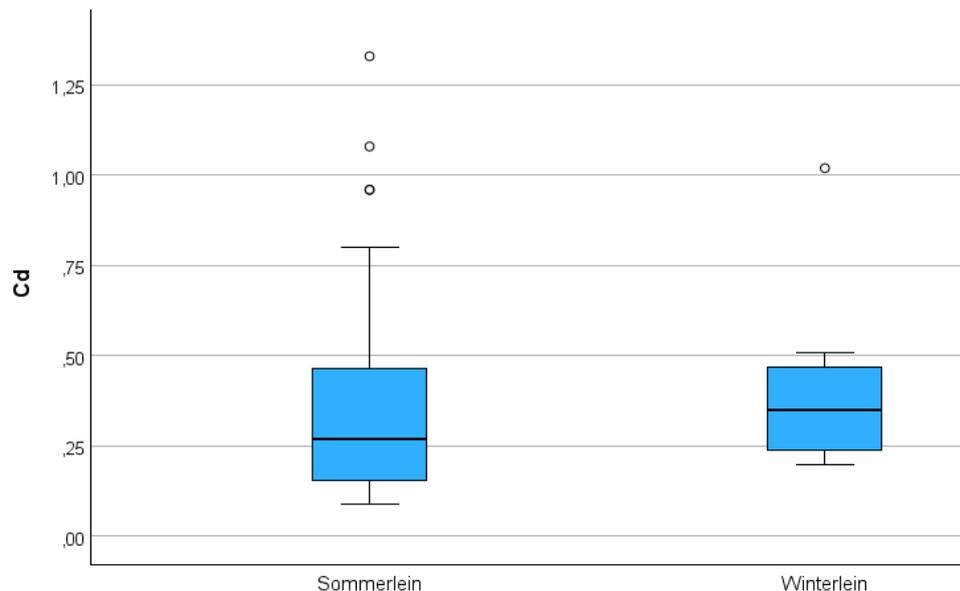


Abbildung 4.51: Cadmiumgehalt (mg/kg in TS) in Leinsamenproben von Praxisschlägen, 2021-2024, bei Sommerlein (n= 89) und Winterlein (n= 15; Labor: sgs Analytics)

#### Fazit Praxisanbau Winterlein

Der Anbau von Lein als Winterung ist in Deutschland bislang noch wenig verbreitet. Innerhalb des Linovit-Praxismonitorings konnten jedoch im Laufe der Projektjahre einige Flächen mit untersucht, ein erfolgreicher Anbau dokumentiert und das zunehmende Interesse der Betriebe wahrgenommen werden. Die größten Probleme werden in der Praxis in der Bestandesetablierung und der Unkrautregulierung gesehen. Bis auf Untersuchungen aus Thüringen ([50]; [62]) liegen in Deutschland bislang keine praxisnahen Informationen oder Forschungsberichte zum Winterleinanbau vor.

Die im Anbautelegramm Winterlein des Thüringer Landesamtes für Landwirtschaft und Ländlichen Raum [50] angesprochene stärkere Lagerneigung von Winterlein aufgrund der höheren Pflanzenlänge kann von den Linovit-Dokumentationen bestätigt werden.

Schwabe & Guddat (2013) [62] beschreiben für kahl- und spätfrostgefährdeten Standorte eine Auswinterungsgefahr. Keine Auswinterungsschäden traten in den Jahren 2021-2012 am Standort Dornburg, Thüringen auf. Die beschriebenen mittleren Kornerträge von Winterlein (21,5 dt/ha) lagen in den Versuchsjahren unter denen von Sommerlein (Mittel: 22,9, dt/ha) und waren gekennzeichnet von stärkeren Schwankungen als die Erträge bei Sommerlein. In den Untersuchungen aus Thüringen wird ein Entwicklungsvorsprung des Winterleins zu Sommerlein im Bereich von 11 – 34 Tagen angegeben. Die Spannweite zeigt den starken Witterungseinfluss auf das Reifeverhalten des Leins. Umfangreiche Untersuchungen zum Winterleinanbau sind von Pellet et al. (2004) [47] veröffentlicht. In den Jahren 1994 bis 1999 wurden vom Agroscope in Changins Versuche durchgeführt. In Höhenlagen von 420 m wurde erfolgreich Winterlein kultiviert. Aussaattermine lagen wie in der Kulturanleitung der TLLR Mitte September [50]. In den schweizer und deutschen Publikationen wird auf die stärkere Bestockung des Winterleins hingewiesen, die wiederum eine geringer Saatsärke rechtfertigt

([47]: Winterlein: 350-400 Körner/m<sup>2</sup> mit Zielgröße 100 – 200 Pflanzen/m<sup>2</sup>; Sommerlein 600 – 650 Körner/m<sup>2</sup> mit Zielgröße 300 Pflanzen/m<sup>2</sup>). Pellet et al. (2004) [47] stellen allerdings einen geringen Einfluss der Saatstärke auf den Ertrag fest. Sie beschreiben zu dem das Pflanzenentwicklungsstadium Kriechwuchs als optimales Überwinterungsstadium. In den schweizer Untersuchungen wird deutlich auf den Zusammenhang von N-Düngung und Lagerneigung hingewiesen und die enorme Pflanzenhöhe von Winterlein (74-80 cm). In den schweizer Untersuchungen konnten sortenbedingte Unterschiede der Winterhärte nachgewiesen werden. In zahlreichen Untersuchungen zum Lein wird auf den hohen Wasserbedarf der Pflanzen während im Blühzeitraum und die Ertragswirksamkeit der Wasserversorgung hingewiesen. Der hohe Wasserbedarf ergibt aus dem starken Biomassezuwachs des Leins während der Blüte. Der Winterlein blüht Ende Mai und nutzt demnach noch die restliche Winterfeuchte aus.

#### 4.2.1.3 Standortscreening: wertgebende und wertmindernde Qualitätsmerkmale

Nur wenige Studien unter mitteleuropäischen Klimabedingungen beschäftigen sich mit dem komplexen Zusammenwirken unterschiedlicher Faktoren auf die Ertrags- und Qualitätsausbildung bei Lein. Hervorzuheben sind die Studie von Savoie et al. (2015) [63], Ceh (2020) [64], Zare et al. (2023) [65], die abiotischen Faktoren wie Klimadaten oder Umweltbedingungen einbeziehen. Leider wurden in den Forschungsgruppen die cyanogenen Glycoside nicht berücksichtigt. Diese wurden in den verschiedenen Forschungsarbeiten von Oomah (1992) [19] und Zuk (2020) [14] fokussiert.

Im Rahmen von Linovit war keine umfassende Auswertung der wissenschaftlichen Literatur zu Lein vorgesehen, daher werden die Ergebnisse aus Linovit vorwiegend mit den oben erwähnten Studien diskutiert. Weiterführende Literatur bis 2017 ist unter anderem in Klein et al. (2017) [36] zusammengetragen. Die statistische Verrechnung der Faktoren wurde vorwiegend für Sommerlein durchgeführt, da bei Winterlein nur eine geringe Fallzahl vorlag.

#### Blausäure

Bei der Analyse der Faktoren des Blausäuregehaltes in den Leinsamen wurden zunächst mittels einer Korrelationsanalyse signifikante Zusammenhänge einzelner Parameter ermittelt. Es zeigten sich bei Winterlein andere mögliche Faktoren als bei Sommerlein. Neben den Bodenparametern (Mn, Na, Zn, Cu) waren es bei Winterlein vorwiegend Anbaumaßnahmen (Ernteverfahren, Reihenabstand, Düngung), die aber aufgrund der geringeren Fallzahl (n=15) und der begrenzten Anzahl an unterschiedlichen Betrieben hinter dieser Fallzahl, unter einer starken einzelbetrieblichen Anbausituation zu sehen sind. Unter den Witterungsfaktoren stellten sich der Faktor Niederschlag im Mai (=Blüte) und die Temperatur vor der Saat als signifikante Faktoren heraus. Neben einem starken Jahres- und Sorteneinfluss traten bei Sommerlein die stärksten (überwiegend negativen) Zusammenhänge bei den Faktoren Niederschlag Mai, Niederschlag in den letzten zwei Maiwochen, Temperatur im Mai und Tausendkornmasse auf (Tabelle 47).

Tabelle 47: Signifikante Korrelationen des Blausäuregehaltes in Leinsamen (mg/kg) mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern bei Winterlein (n=15) und Sommerlein (n=87), Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

	Sommerlein	Winterlein		Sommerlein	Winterlein
Samenfarbe (1=braun, 2=gelb)	-,247*	n.s.	Reihenabstand	n.s.	-,518*
Ernteverfahren (1=Drusch, 2=Schwaden)	n.a.	-,706**	Düngung (1=keine Düngung, 2=Düngung)	n.s.	-,627*
TKM	-,222*	n.s.			
<b>Boden</b>					
Mg	n.s.	n.s.	Cu	n.s.	-,586*
Mg, Stufe	-,226*	n.s.	Zn	n.s.	-,623*
Mn	n.s.	-,586*	Na, Stufe	n.s.	-,561*
Cadmium, Boden	-,264*	-,577*			
<b>Witterung</b>					
Niederschlag 2 Wochen vor Saat	-,314**	n.s.	Temperatur 2 Wochen vor Saat	n.s.	-,565*
Niederschlag 2 Wochen vor Ernte	,275**	n.s.	Temperatur Blüte	-,378**	n.s.
Niederschlag 2 Wochen nach Saat	-,263*	n.s.	Temperatur Juni	-,231*	n.s.
Niederschlag Blüte	-,245*	n.s.	Temperatur Mai, letzte 2 Wochen	-,260*	n.s.
Niederschlag Mai, letzte 2 Wochen	-,408**	n.s.	Temperatur Mai	-,437**	n.s.
Niederschlag Mai	-,340**	-,538*			

\*\* signifikante Korrelation auf Niveau 0,01 (2-seitig), \* 0,05 (2-seitig)

Niederschlag und Temperatur in der Phase vor Blühbeginn (Mai) sowie die Tausendkornmasse (TKM) waren die Faktoren mit dem stärksten Einfluss auf den Blausäuregehalt in den Samen bei Sommerlein und zeigten jeweils einen negativen Zusammenhang. Mit Hilfe von Streudiagrammen und dem Kurvenanpassungs-Tool von SPSS wurden Scheinkorrelationen ausgeschlossen und die Linearität der Zusammenhänge festgestellt. Die drei Parameter wurden mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse in einem Modell zusammengefasst (Tabelle 48).

Tabelle 48: Signifikante Faktoren des Blausäuregehaltes in den Samen von Sommerlein, Beta-Werte<sup>1</sup> und Signifikanzniveau vom multiplen Regressionsmodell,  $r^2=0,331$

	Beta <sup>1</sup>	Signifikanzniveau
Temperatur Mai	-,477	<,001
Niederschlag Mai	-,221	,017
TKM	-318	<,001

<sup>1</sup>standardisierte Gewichtung der Faktoren (je näher an 0 umso geringer die Gewichtung)

Mit den Residuen des Modells wurden Korrelationsanalysen durchgeführt und bei Kategorien nichtmetrischer Parameter Boxplots erstellt, um weitere mögliche Faktoren zu identifizieren. Aufgrund der Faktoren, die in dem Regressionsmodell berücksichtigt wurden, sind einige der ursprünglichen in der Korrelationsanalyse signifikanten Faktoren bei der Verwendung der Residuen nicht signifikant. Signifikante Zusammenhänge zeigten sich für die Parameter Magnesium und Cadmiumgehalt im Boden, Anzahl Tage über 25 °C sowie Strahlung im Mai (Tabelle 49). Die Boxplots deuten an, dass Jahreseffekte, welche über die Faktoren Niederschlag und Temperatur im Mai hinaus gehen, in Zusammenhang mit dem Blausäuregehalt stehen. Abbildung 4.52 zeigt, dass auch unter Einbeziehung der sortentypischen Tausendkornmasse ein weiterer Effekt des Faktors Sorte auf den Blausäuregehalt zu vermuten ist. Da es sich bei den Praxisflächen nicht um vergleichende Sortenversuche handelt und teilweise nur geringe Fallzahlen hinter den einzelnen Sorten stehen, sollte der genotypische Einfluss in weiteren Sortenversuchen überprüft werden.

Tabelle 49: Signifikante Korrelationen der Blausäuregehalts-Residuen (siehe Text) in Leinsamen von Sommerlein (mg/kg) mit Boden-, und Witterungsparametern, Korrelationskoeffizient r, (n=87), Praxismonitoring 2020-2023

	Korrelationskoeffizient r
Magnesium Stufe, Boden	-,312**
Cadmium Boden	-,281**
Tage über 25 °C	,310*
Strahlung, Mai	-,321**

\*\*Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\*Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Bei Verwendung der Residuen – unter Einbeziehung der oben genannten Faktoren – verringern sich die Streubreiten der Blausäuregehalte innerhalb einzelner Jahre und Sorten (Abbildung 4.52 und Abbildung 4.53).

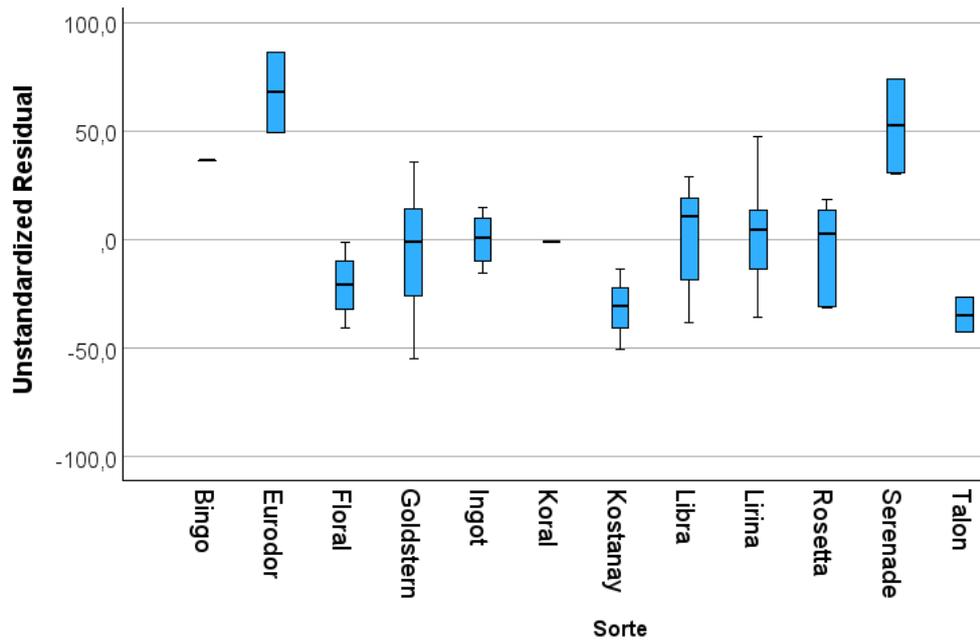


Abbildung 4.52: Streubreite der sortenbedingten Blausäuregehalte (Residuen eines Regressionsmodells, siehe Text). Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

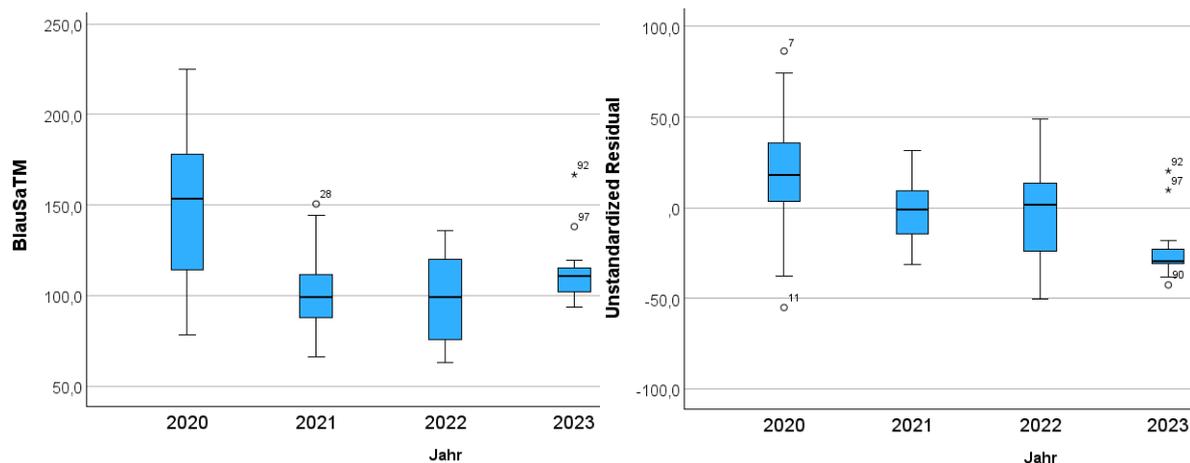


Abbildung 4.53: Streubreite der jahresbedingten Blausäuregehalte (links) und der Residuen eines Regressionsmodells (rechts, siehe Text) unter Verwendung der Residuen (rechts) und ohne (Links). Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

Im Rahmen der Sortenversuche von Linovit wurden die genotypischen und Jahreseffekte belegt. Die Auswertung der LSV Sortenversuche an insgesamt 7 Umwelten (=Jahr & Standort) bestätigten einen negativen Zusammenhang des Ölgehaltes mit dem HCN-Gehalt, allerdings zeigte sich keine signifikante Korrelation mit dem Proteingehalt wie von Oomah & Mazza (1998) [46] beschrieben. Im Praxismonitoring ergaben sich keine Korrelationen von Öl- oder Proteingehalt. Die deutlichen Hinweise aus den Anbauversuchen eines Zusammenhangs von Stickstoffdüngung und Ernteverfahren konnten im Praxismonitoring nicht dargestellt werden, da keine präzisen Angaben zu Stickstoffdüngung auf den Betrieben erhoben wurden und die Anzahl der Betriebe die den Lein auf Schwad legen zu gering ist.

Die Ergebnisse aus Linovit bestätigen tendenziell die Untersuchungen von Oomah et al. [19] wonach Sorte, Standort und Anbaujahr Effekte auf den Gehalt an bestimmten cyanogenen Glycosiden (CG) in Lein haben, wobei der Genotyp als Hauptfaktor beschrieben wird. Genotypische Unterschiede im Gesamtgehalt der CG beschreiben auch Russo & Reggiani [16], die zudem genotypische Effekte auf einzelne CG nachweisen konnten und spezielle Zuchtprogramme vorschlugen.

Die Ergebnisse des Praxismonitorings deuten darauf hin, dass den Witterungsfaktoren eine wichtige Bedeutung bei der Ausbildung der cyanogenen Glycoside zukommt. Stärkste Faktoren waren der negative Zusammenhang von Niederschlag im Mai und zur Blüte (Juni) sowie der ebenfalls negative Zusammenhang zwischen Temperatur zur Blüte. Die Veränderungsprozesse vor und nach der Blüte im Gehalt an CG schauten sich Zuk et al. (2020) [14] in ihren experimentellen Untersuchungen an. Sie zeigten, dass die Blütezeit etwa 50 Tage nach der Keimung beginnt und dauert circa 15 Tage. Diese Phase lässt sich in vier Unterphasen gliedern: Knospenbildung, Kapselentwicklung, Samenentwicklung und Samenreifung. Der gesamte Prozess von der Blüte bis zur Samenreifung dauert etwa 30 Tage. Vor der Blüte erreicht der Gehalt an cyanogenen Monoglycosiden seinen Höhepunkt, ist jedoch zum Zeitpunkt der Knospenbildung signifikant reduziert. Nach der Blüte werden die cyanogenen Glycoside verstärkt glykosyliert und in der Pflanze gespeichert [14]. Die Veränderung des CG-Gehaltes und die Zusammensetzung untersuchten Feng et al. (2003) [23]. So veränderte sich die CG-Zusammensetzung beispielsweise im Wachstumsverlauf der Pflanze und endet mit einer Dominanz der cyanogenen Diglycoside Linustatin und Neolinustatin, welche im Endosperm des Samens eingelagert werden. Feng et al. belegten, dass in der ersten Wachstumsphase des Leins (bis Blüte) der Gehalt an Diglycosiden wieder abnimmt, während der Monoglycosidgehalt ansteigt, sich dieses Verhältnis im reifen Samen wieder ändert.

### Cadmium

Erwartungsgemäß ergab sich bei der Analyse der Faktoren des Cadmiumgehaltes in den Leinsamen ein signifikant positiver Zusammenhang mit dem Cadmiumgehalt im Boden. Bei Sommerlein zeigten sich weiterhin negative Zusammenhänge mit weiteren Bodenparametern, Lufttemperatur und Strahlung sowie positive Zusammenhänge mit der Vegetationsdauer und dem pH-Wert. Bei Winterlein waren es lediglich der Gehalt organischer Substanz im Boden sowie die Anzahl Tage über 25 und 27 °C, für die ein Zusammenhang angedeutet wurde (Tabelle 50).

Tabelle 50: Signifikante Korrelationen des Cadmiumgehaltes in Leinsamen (mg/kg) mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern, Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

	Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)		Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)
Vegetationszeit	,281**	n.s.			
<b>Boden</b>					
pH-Wert	-,416**	n.s.	Mangan	-,291**	n.s.
P2O5	-,308**	n.s.	Bor	-,339**	n.s.
Cadmium Boden	,317**	,702**	Org. Substanz	n.s.	,672**
<b>Witterung</b>					
Niederschlag Saat bis Ernte	,275**	n.s.	Temperatur 2 Wochen vor Ernte	-,346**	n.s.
Niederschlag 2 Wochen nach Saat bis Ernte	,304**	n.s.	Temperatur 3 Wochen vor Ernte	-,312**	n.s.
Niederschlag 2 Wochen vor Saat	259*	n.s.	Temperatur 4 Wochen vor Ernte	-,326**	n.s.
Niederschlag Blüte	,256*	n.s.	Temperatur 2 Wochen nach Saat	-,242*	n.s.
Niederschlag Mai	,285**	n.s.	Strahlung Saat bis Ernte	-,269*	n.s.
Tage über 27 °C	-,213*	,553*	Strahlung Blüte	-,269*	n.s.
Tage über 25 °C	n.s.	,597*	Strahlung Juni	-,326**	n.s.
Tage über 20 °C	-,313*	n.s.	Strahlung letzte 2 Maiwochen	-,301*	n.s.

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Mit Hilfe von Streudiagrammen und dem Kurvenanpassungs-Tool von SPSS wurden Scheinkorrelationen ausgeschlossen und die Linearität der Zusammenhänge festgestellt. Aus den zur Verfügung stehenden Parametern mit dem höchsten  $r^2$  wurde ein multiples Regressionsmodell mit einem möglichst hohen  $r^2$  abgeleitet (Tabelle 51). Die mit den Residuen des Modells durchgeführte Korrelationsanalyse ergab keine weiteren signifikanten Zusammenhänge mit dem Cadmiumgehalt im Leinsamen. Ein Jahreseffekte war im Boxplot nicht erkennbar, allerdings zeigte sich trotz großer Streubreite der Werte ein Sorteneinfluss.

Tabelle 51 Signifikante Faktoren des Cadmiumgehaltes von Sommerleinsamen, Beta-Werte<sup>1</sup> und Signifikanzniveau vom multiplen Regressionsmodell,  $r^2=0,553$

	Beta <sup>1</sup>	Signifikanzniveau
Cadmium Gehalt Boden	,447	<,001
pH-Wert Boden	-,312	<,001
Regressionsfaktor <sup>2</sup>	,389	<,001
Mangan Gehalt Boden	-,335	<,001
P2O5 Gehalt Boden	-,149	,066
Nt-Gesamtstickstoff Boden	-,226	,004

<sup>1</sup> standardisierte Gewichtung der Faktoren (je näher an 0 umso geringer die Gewichtung)

<sup>2</sup> Regressionsfaktor: mit Hilfe der Faktorenanalyse wurden die Parameter Niederschlag 2 Wochen nach Saat bis Ernte, Niederschlag Blüte und Temperatur 4 Wochen vor Ernte zusammengefasst (siehe Tabelle 50)

Bei Verwendung der Residuen – unter Einbeziehung der oben genannten Faktoren – verändert sich die Streubreiten der Cadmiumgehalte innerhalb der einzelnen Sorten, die Unterschiede zwischen den Sorten verändern sich hingegen kaum (Abbildung 4.54).

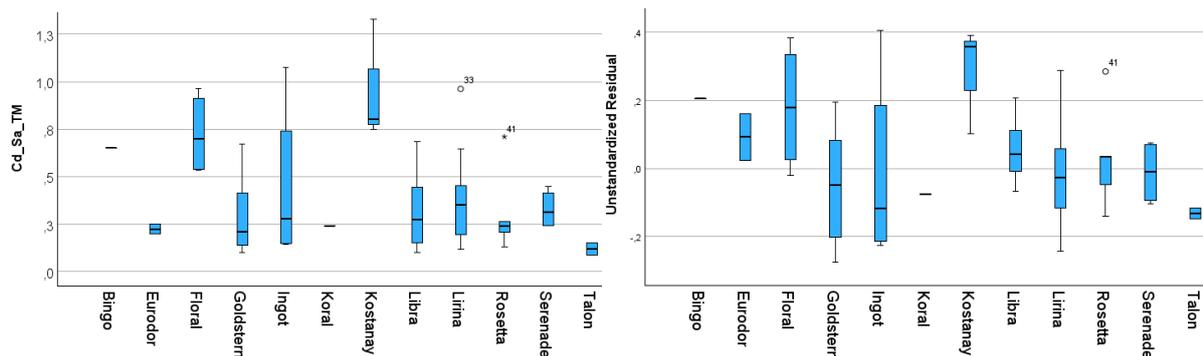


Abbildung 4.54: Streubreite der sortenbedingten Cadmiumgehalte (mg/kg, links) und unter Verwendung der Residuen (rechts). Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass neben den bekannten Faktoren (steigendem Cadmium-Gehalt im Boden in Verbindung mit abnehmendem pH-Wert = höherer Cd-Gehalte im Boden) Witterungseinflüsse welche generell die Biomassezunahme (Wurzel & oberirdisch) des Leins fördern (ausreichend Niederschläge, gemäßigte Temperaturen) eine Cd Aufnahme aus dem Boden fördern. Der positive Zusammenhang von Cd und Vegetationsdauer unterstützt diese Annahme. Dazu kommen unter passenden Bedingungen sortenbedingte Aneignungspotentiale. Hocking & McLaughlin [37] zeigten ebenfalls ein genotypisches Cd Aufnahmepotential bei Lein, allerdings keine Unterschiede zwischen brauner oder gelber Leinsaat. Sorteneffekte wurden auch in den Linovit Versuchen nachgewiesen (Tabelle 18).

### Alpha-Linolensäure im Öl

Bei den im Rahmen des Praxismonitorings erhobenen Faktoren zeigten sich sowohl bei Sommer- als auch bei Winterlein Zusammenhänge von Witterungsfaktoren mit dem Gehalt an

$\alpha$ -Linolensäure im Leinöl. Es gab allerdings keinerlei identische Zusammenhänge bei den beiden Anbauformen (Tabelle 52).

Tabelle 52: Signifikante Korrelationen des  $\alpha$ -Linolensäuregehaltes in Leinöl (%) mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern bei Winterlein (n=15) und Sommerlein (n=87), Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

	Sommerlein	Winterlein		Sommerlein	Winterlein
TKM	n.s.	,652**	Samenfarbe (1=braun, 2 =gelb)	-,370**	n.s.
<b>Witterung</b>					
Niederschlag Blüte	n.s.	,579*	Temperatur 3 Wochen vor Ernte	-,241*	n.s.
Niederschlag Mai, letzte 2 Wochen	-0,205	n.s.	Temperatur 4 Wochen vor Ernte	-,227*	n.s.
Temperatur 2 Wochen vor Saat	n.s.	,739**			
Niederschlag Mai	n.s.	,589*	Tage über 27 °C	-,225*	n.s.

\*\* signifikante Korrelation auf Niveau 0,01 (2-seitig), \* 0,05 (2-seitig)

Mit einer Korrelationsanalyse wurden die Faktoren identifiziert, die mit dem Gehalt an  $\alpha$ -Linolensäure im Leinöl zusammenhängen. Grundsätzlich wird von einem starken Sorteneffekt ausgegangen, da der Gehalt an  $\alpha$ -Linolensäure mittlerweile ein wichtiges Zuchtziel darstellt. Diese Neuzüchtungen sind allerdings bislang nur vereinzelt im Anbau zu finden, teilweise auch nur im Vertragsanbau. Das Praxismonitoring zeigte, dass im Anbau vorwiegend ältere Sorten ausgewählt werden (Abbildung 4.10), daher war es für die vorliegende Auswertung interessant weitere Faktoren auf den  $\alpha$ -Linolensäuregehalt zu prüfen. Nachdem in der Korrelationsanalyse vorwiegend Witterungsparameter und das TKM signifikant waren, wurden folgende Faktoren mit dem stärksten Einfluss auf den  $\alpha$ -Linolensäuregehalt von Sommerlein identifiziert:

- Temperatur 4 Wochen vor Ernte
- Temperatur 2 Wochen nach Saat
- Tausendkornmasse

Mit Hilfe von Streudiagrammen und dem Kurvenanpassungs-Tool von SPSS wurden Scheinkorrelationen ausgeschlossen und die Linearität der Zusammenhänge geprüft. Nachdem bei Temperatur 4 Wochen vor Ernte und Tausendkornmasse festgestellt wurde, dass diese nicht linear verliefen, wurde jeweils auf einen Bereich fokussiert, ab dem eine Linearität gegeben war. Bei der Temperatur 4 Wochen vor Ernte lag dieser ab Werten über 19 °C, bei der Tausendkornmasse ab TKM 6 g. Die drei Parameter wurden mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse in einem Modell zusammengefasst (Tabelle 53).

Tabelle 53: Signifikante Faktoren des Linolensäuregehaltes im Öl von Sommerlein, Beta-Werte<sup>1</sup> und Signifikanzniveau vom multiplen Regressionsmodell,  $r^2=0,257$

	Beta <sup>1</sup>	Signifikanzniveau
Temperatur 4 Wochen vor Ernte ab 19 °C	-,434	<,001
TKM ab 6 g	-,288	,004
Temperatur 2 Wochen nach Saat	-,275	,009

<sup>1</sup>standardisierte Gewichtung der Faktoren (je näher an 0 umso geringer die Gewichtung)

Mit den Residuen des Modells wurden Korrelationsanalysen durchgeführt und keine weiteren Korrelationen unter den im Rahmen des Monitorings erfassten Parametern gefunden. Ein deutlicher Jahreseffekt wurde im Boxplot nicht festgestellt. Der Sorteneffekt in Verbindung mit den Residuen war vergleichsweise gering, da über die TKM im Residuen-Modell bereits sortentypische Effekte erfasst wurden. Abbildung 4.55 deutet unter Einbeziehung der Tausendkornmasse bei den untersuchten Sorten einen Einfluss auf den  $\alpha$ -Linolengehalt im Öl an. Da es sich bei den Praxisflächen nicht um vergleichende Sortenversuche handelt und teilweise nur geringe Fallzahlen hinter den einzelnen Sorten stehen, sollte der genotypische Einfluss in weiteren Sortenversuchen überprüft werden.

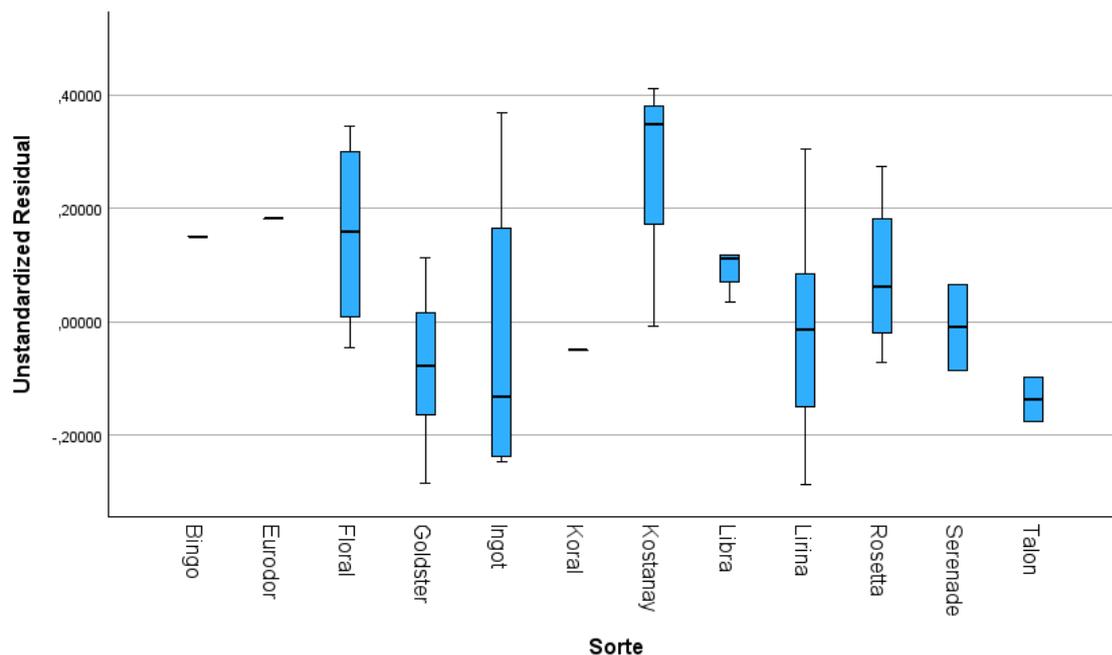


Abbildung 4.55: Streubreite der sortenbedingten Gehalte an  $\alpha$ -Linolensäure in Leinöl unter Verwendung der Residuen. Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

In den Sortenversuchen (Tabelle 22) wurden die hohen  $\alpha$ -Linolensäure-Gehalte, die neue Sorten mit speziellem Zuchtziel hoher Omega-3-Fettsäuren erreichen deutlich, während ältere Sorten überwiegend unter 60 %  $\alpha$ -Linolensäure liegen. Viele Proben aus den Sortenversuchen aber auch aus dem Praxismonitoring erreichten den gewünschten Gehalt von 56 % nicht. Neben den Sorteneffekten, leichten Jahres-, Standort- und Witterungseffekten deuteten in

den Versuchen keine anderen Faktoren wie Samenfarbe oder Anbaumaßnahmen auf einen Zusammenhang mit dem  $\alpha$ -Linolensäure-Gehalt hin. Aus den eher allgemeinen Angaben zur Nährstoffversorgung im Praxismonitoring konnten keine weiterführenden Parameter abgeleitet werden, welche mit den in Kapitel 4.1.2.4 beschriebenen Ergebnisse anderer Forschungsteams, die speziell den Zusammenhang einer Stickstoffdüngung auf die Ölzusammensetzung betrachteten, diskutiert werden könnten (Marquardt et al. 1984; Sabyasachi et al. 2023; Andruszczak et al. 2015; Grant 2016). Die Linovit-Auswertungen deuten neben dem negativen Zusammenhang der  $\alpha$ -Linolensäure und Tausendkornmasse auf die negativen Zusammenhänge mit Witterungsbedingungen hin. Nykter (2006) [42] verwies in ihren Publikationen zur Leinölqualität auf Studien, welche die Veränderungsprozesse der Ölausbildung und -zusammensetzung im Reifeprozess der Leinsamen zeigten. Der Ölgehalt nahm in den 30 Tagen nach der Blüte deutlich zu (3,4 % pro Tag) und die Ölzusammensetzung änderte sich besonders stark 10-20 Tage nach der Blüte. Im Kontext der Ergebnisse von Linovit ist die Zusammenstellung von Nykter [42] zu den klimawirksamen Effekten auf die Bildung mehrfach ungesättigter Fettsäuren (PUFA) wichtig. Nykter zitierte Quellen, die eine Zunahme der PUFA bei gemäßigten Temperaturen im Reifeprozess des Samens belegen. So lag der Gehalt bei den meisten PUFA bei 15 °C im Reifeprozess nach der Blüte deutlich höher als bei 30 °C. Auch hier wurden sortenspezifische Effekte beobachtet.

Savoire et al. [63] stellten in ihren Untersuchungen in Frankreich ebenfalls einen starken Einfluss von Sorte, Jahr und Witterung auf den  $\alpha$ -Linolensäuregehalt fest. Deutliche Jahreseffekte erklärte das ForscherInnenteam vor allem mit den unterschiedlichen Niederschlagsmengen und den vorherrschenden Temperaturen. Wie bei Nykter (2006) [42] wurde auch von Savoire [63] ein starker positiver Zusammenhang niedriger Temperaturen und dem Gehalt an Omega-3-Fettsäuren beschrieben, da unter diesen Bedingungen die Transkription der Fettsäure-Desaturase-Gene (FAD) induziert werden. Zitiert wurden von Savoire et al. in diesem Zusammenhang Untersuchungen an Leindotter, bei denen gezeigt wurden, dass niedrige Temperaturen und hohen Niederschlägen während der Samenreife die Produktion von  $\alpha$ -Linolensäuren verschiedener Leindotter-Genotypen deutlich zunahm. Die von Savoire geprüften Genotypen reagierten in unterschiedlichen Intensitäten auf Umweltfaktoren. Auf Züchtungsaktivitäten in Richtung hoch  $\alpha$ -Linolensäurehaltiger Leinsorten wiesen neben Nykter et al. [42] auch Zare et al. [65] und Wittkop et al. (2009) [66] hin. Für den Verwendungszweck Leinöl, insbesondere Leinöle mit gesundheitsbezogener Aussage, wird intensivere Züchtungsarbeit empfohlen, um die Effekte von Witterung und Anbaumanagement ausgleichen zu können. Zare et al. [65] betrachteten in experimentellen Untersuchungen die Zusammenhänge der Ausbildung unterschiedlicher Inhaltsstoffe in Abhängigkeit von Samenfarbe und unterschiedlichen Umweltbedingungen, am Beispiel von Wasserstress. Bei einer normalen Wasserversorgung zeigten die braunsamigen Genotypen die höhere  $\alpha$ -Linolengehalte, während die gelbsamigen bei Wasserstress eine höhere Konzentration an  $\alpha$ -Linolen aufwies.

### Tausendkornmasse (TKM)

Die Analyse der Faktoren der Tausendkornmasse zeigte einen starken negativen Zusammenhang mit der Bodenart bei Winter- und Sommerlein, wobei die vorherrschenden Bodenarten der Praxisflächen (schluffiger Lehm: uL, sandiger Lehm: sL, Sand: S, lehmiger Sand: IS) wie folgt codiert waren: 1 = uL, 2 = sL, 3 = S, 4 = IS. Im Boxplot wurde ein Unterschied zwischen Bodenart 1 = uL zu den anderen drei Bodenarten festgestellt und deshalb zwei Kategorien gebildet (Kategorie 1 = Bodenart 1, Kategorie 2 = Bodenarten 2-4). Es deutete sich an, dass die Tausendkornmasse auf den leichteren Böden abnahm. Bei Sommerlein wurden hohe  $r^2$ -Werte weiterhin für die Mangan-Stufe der Böden, Niederschlag, Strahlung und Temperatur festgestellt (Tabelle 54). Neben dem starken Sorteneinfluss, welcher als Kategorie im Boxplot dargestellt wurde (Abbildung 4.56), traten die stärksten Zusammenhänge bei den Faktoren Niederschlag Juni, Temperatur 2 Wochen vor Saat und der Mangan-Stufe (Mn-Stufe) auf.

Tabelle 54: Signifikante Korrelationen der Tausendkornmasse von Leinsamen (g) mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern, Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

		Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)		Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)
<b>Boden</b>						
Bodenart	1=uL, 2=sL, 3=S, 4=IS	-,239*	-,615*	Mangan, Stufe	-,245*	n.s.
Zink		n.s.	,543*			
<b>Witterung</b>						
Niederschlag	2 Wochen nach Saat bis vor Ernte	,322**	,578*	Temperatur	-,242*	-,538*
Niederschlag	Blüte	,375**	n.s.	Temperatur	-,275**	n.s.
Niederschlag Juni		,482**	n.s.	Temperatur Mai	-,250*	n.s.
Strahlung	Mai letzten beiden Wochen	-,371**	n.s.	Temperatur 2 Wochen nach Saat bis vor Ernte	-,237*	n.s.
Strahlung	Saat bis Ernte	-,354**	n.s.	Tage über 20 °C	-,266*	n.s.
Strahlung	Mai	-,422**	n.s.			

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Die Bodenartkategorie 1 sowie die signifikanten Faktoren Niederschlag Juni, Mn-Stufe und die Temperatur 2 Wochen vor Saat wurden mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse in einem Modell zusammengefasst (Tabelle 55).

Tabelle 55: Signifikante Faktoren der Tausendkornmasse der Samen von Sommerlein, Beta-Werte<sup>1</sup> und Signifikanzniveau vom multiplen Regressionsmodell,  $r^2=0,397$

	Beta <sup>1</sup>	Signifikanzniveau
Bodenartkategorie 1 (uL) Bodenartkategorie 2 (sL, S, IS)	-,335	<,001
Niederschlag Juni	,429	<,001
Mangan, Stufe	-,316	<,001
Temperatur 2 Wochen vor Saat	-,264	,004

<sup>1</sup>standardisierte Gewichtung der Faktoren (je näher an 0 umso geringer die Gewichtung)

Mit den Residuen des Modells wurden Korrelationsanalysen durchgeführt und als weitere signifikante Korrelationen lediglich der Faktor Niederschlag 2 Wochen vor Saat identifiziert. Schwere Böden und hohe Niederschläge während der Blühphase scheinen demnach allgemein das Wachstum des Leins und damit die Ausbildung einer höheren TKM zu fördern.

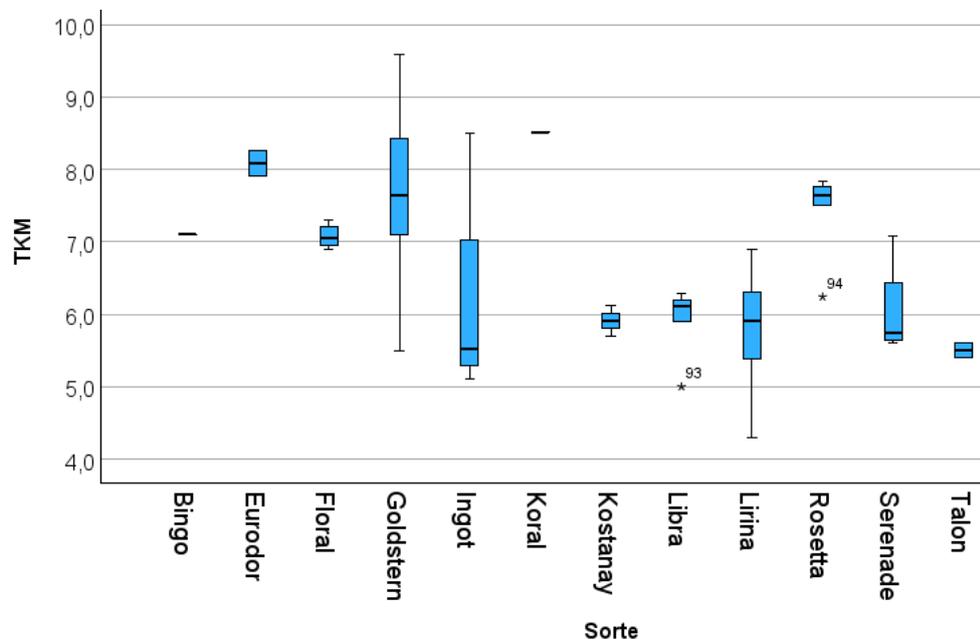


Abbildung 4.56: Streubreite der Tausendkornmasse (g) unterschiedlicher Leinsorten. Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

Neben den sortenbedingten Unterschieden in der Tausendkornmasse, waren es die für Lein günstigen Wachstumsbedingungen: schwere Böden, gemäßigte Temperaturen und ausreichend Niederschlag, die einen signifikanten Zusammenhang mit TKM zeigten. Diederichsen & Raney (2006) [67] stellten in ihren Untersuchungen Zusammenhänge zwischen Samenfarbe, TKM und Ölgehalt bei einer Großkollektion von Leinakzessionen fest. Das kanadische Forschungsteam um Diederichsen konnten nachweisen, dass gelbsamige Sorten ein höheres TKM besitzen und einen höheren Ölgehalt. Dies konnte in den vorliegenden Untersuchungen im Rahmen von Linovit nicht bestätigt werden.

## Quellzahl

Die Quellzahl beschreibt die Quellfähigkeit der Leinsamen. Bei Zugabe von Wasser entsteht der Leinsamenschleim (Mucilage), der aus verschiedenen Polysacchariden besteht und vor allem therapeutisch aber auch aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften lebensmitteltechnologisch genutzt wird. Die Schleimstoffe sind in der äußeren Samenschale lokalisiert. Pavlov et al. (2014) [68] beschreiben die natürlich-intelligenten Funktionen der Schleimstoffe für den Leinsamen, wie beispielsweise Samenverbreitung oder Wasserdepot. Bei der Analyse der Quellzahlen mit den im Rahmen des Praxismonitorings erhobenen Parametern zeigten sich völlig unterschiedliche Korrelationen bei Winter- und Sommerlein. Während sich bei Winterlein vorwiegend statistische Beziehungen mit Bodenparametern (P205, Mg, Zn und K20) ergaben, traten bei Sommerlein signifikante Korrelationen einzelner Witterungsparameter mit der Quellzahl auf. Diese deuten damit auf einen witterungsbedingten Jahreseffekt hin, welcher im Boxplot beispielhaft für die Sorte 'Goldstern' dargestellt ist (Abbildung 4.57). In (Tabelle 56) sind positive Korrelationen zwischen Quellzahl und Niederschlag zu sehen und negative mit Strahlung und Temperatur. Effekte von Sorte und Samenfarbe wurden bereits in Abbildung (Abbildung 4.37) vorgestellt. Eine positive Korrelation ergab sich für die Tausendkornmasse (TKM).

Tabelle 56: Signifikante Korrelationen der Quellzahl von Leinsamen mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern, Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

	Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)		Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)
TKM	,622**	n.s.	Samenfarbe (1=braun, 2=gelb)	,683**	
<b>Boden</b>					
P205	n.s.	-,683**	Mg	n.s.	,525*
K20 Stufe	n.s.	-,565*	Zn	n.s.	-,537*
<b>Witterung</b>					
Strahlung Saat bis Ernte	-,310*	n.s.	Temperatur 2 Wochen vor Saat	-,216*	n.s.
Strahlung Blüte	-,298*	n.s.	Temperatur Mai	-,381**	n.s.
Strahlung Juni	-,290*	n.s.	Temperatur Blüte	-,253*	n.s.
Niederschlag Blüte	,213*	n.s.	Temperatur Saat bis Ernte	-,288**	n.s.
Niederschlag Juni	,285**	n.s.	Temperatur 2 Wochen nach Saat bis Ernte	-,330**	n.s.
Tage über 27 °C	n.s.	-,600*	Tage über 25 °C	-,308*	n.s.

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

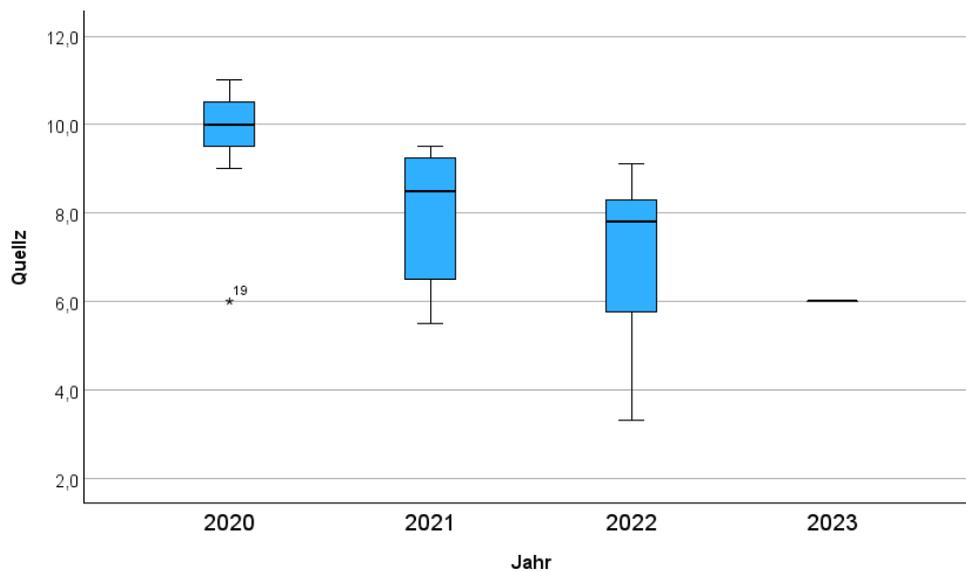


Abbildung 4.57: Streubreite der Quellzahlen der Leinsorte Goldstern. Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

Von Pavlov et al. [68] wurden Effekte der Vegetationsdauer auf die Tausendkornmasse und die Menge an Schleimstoffen identifiziert. Fokus der Forschungsarbeiten lagen zudem auf dem Verhältnis unterschiedlicher Polysaccharidgruppen in Abhängigkeit von Genotyp und Samenfarbe. Da sich genotypische Unterschiede nachweisen ließen, plädierten Pavlov et al. [68] die hohe genetische Variabilität für gezielte Züchtungsarbeit zu nutzen. Entgegen den oben dargestellten positiven Korrelationen von Niederschlag und Quellzahl zeigten Zare et al. [65], dass Wasserstress positive Effekte auf den Gehalt an Schleimstoffen in den Leinsamen hat, die Pflanze die Schleimstoffe quasi als Schutzfunktion gegen Trockenheit ausbildet. In ihren Untersuchungen belegt sie zudem nachweisbar höhere Quellzahlen gelber Leinsorten, was sich nur teilweise mit den Linovit-Ergebnissen deckt. In den Sortenversuchen zu Winterlein konnten keine Unterschiede zwischen gelb- und braunsamigen Sorten festgestellt werden. Bei Sommerlein zeigte lediglich die Sorte `Goldstern` eine deutlich höhere Quellzahl, was vermutlich im Züchtungsprozess bereits als Zuchtziel definiert wurde. Zare et al. [65] schlussfolgerten aus ihren Ergebnissen, dass sich gelbsamige Leinsorten möglicherweise für andere Klimaregionen eignen als braunsamige.

Nährwerte: Ölgehalt

Insgesamt zeigten sich nur wenige Zusammenhänge zwischen den Faktoren und des Ölgehaltes (Tabelle 57). Bei Winterlein ergaben sich bei dem Niederschlag in den letzten zwei Maiwochen positive Zusammenhänge, bei Sommerlein trat der höchste Zusammenhang bei der Samenfarbe auf, weiterhin bei der Bodenart sowie negative Korrelationen bei Strahlung und Temperatur vor Ernte. Es deutete sich kein Effekt der TKM an aber im Boxplot konnten Sortenunterschiede gezeigt werden (Abbildung 4.58).

Tabelle 57: Signifikante Korrelationen des Ölgehaltes von Leinsamen mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern, Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

	Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)		Sommerlein (n=87)	Winterlein (n=15)
Samenfarbe	-,294**	n.s.	Bodenart	,229*	n.s.
<b>Witterung</b>					
Temperatur 2 Wochen vor Ernte	-,252*	n.s.	Strahlung Mai letzte 2 Wochen	-,258*	n.s.
Temperatur 3 Wochen vor Ernte	-,228*	n.s.	Strahlung Mai	-,247*	n.s.
Niederschlag letzten 2 Wochen im Mai	n.s.	,571*	Temperatur 4 Wochen vor Ernte	-,228*	n.s.

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Ein multiples Regressionsmodell konnte nicht erstellt werden, da unter den metrischen Faktoren keine ausreichend signifikanten Faktoren auf den Ölgehalt ermittelt werden konnten. In der kritischen Phase der Samenreife wurden mögliche Faktoren mit Kurvenanpassung geprüft, es zeigten sich jedoch keine signifikanten Effekte. Ein Jahreseffekt konnte ausgeschlossen werden.

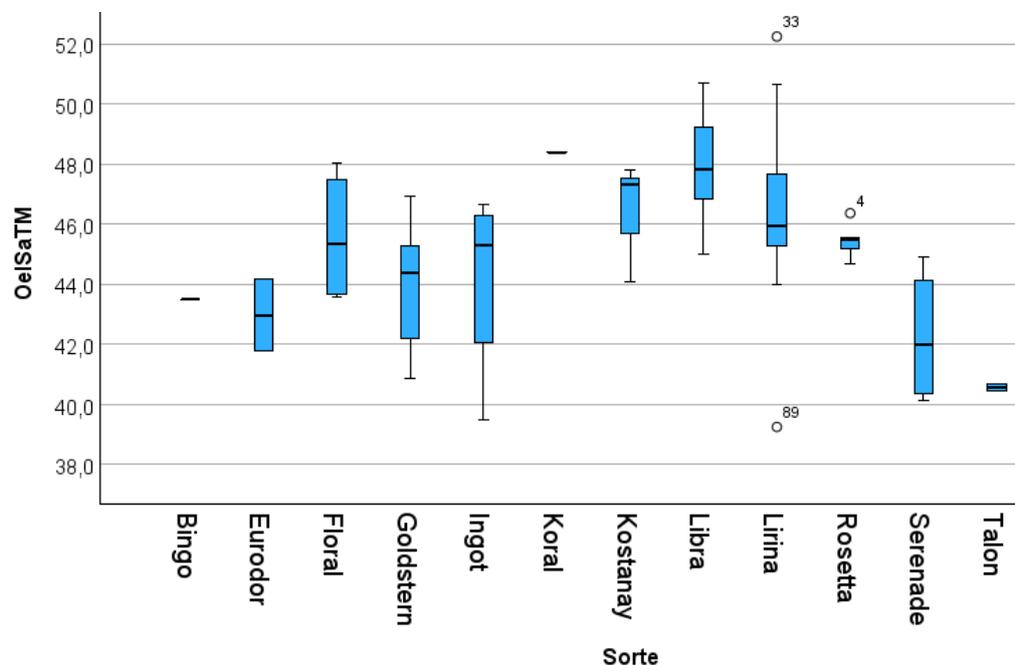


Abbildung 4.58: Streubreite des Ölgehaltes (% in TM) unterschiedlicher Sommerleinsorten. Praxismonitoring Sommerlein, 2020-2023

Einen Effekt der Samenfarbe auf den Ölgehalt wiesen Diederichsen & Raney [67] in ihren Untersuchungen nach. Während im Linovit Praxismonitoring die Braunsamigen höhere

Ölgehalte zeigten, waren es bei Diederichsen & Raney [67] die gelbsamigen Sorten. Auch der von ihnen verdeutlichte positive Zusammenhang der TKM mit dem Ölgehalt konnten weder in den Ergebnissen des Praxismonitorings noch in den Sortenversuchen bestätigt werden. Savoie et al. [63] sahen den Haupteinflussfaktor auf den Ölgehalt bei der Sorte, konnten aber auch einen Jahreseffekt nachweisen. Korrelationen des Ölgehaltes mit Umwelt- und Witterungsfaktoren wurden von ihnen ebenfalls nicht gefunden. Canvin [45] untersuchte den Effekt von Temperatur auf den Ölgehalt der Leinsaat. Bei den Prüfvarianten 10, 16, 21, and 26.5 °C in der Phase der Samenentwicklung wurden die höchsten Ölgehalte bei 10 °C erreicht. Ceh et al. [64] zeigten in ihren experimentellen Untersuchungen in Slowenien, dass Witterung, Standort und Sorte den größten Einfluss auf den Ertrag und den Ölgehalt von Lein haben und unter den Witterungsbedingungen der stärkste negative Zusammenhang zwischen geringem Niederschlag mit hohen Temperaturen nach der Blüte bestand. Untersuchungen aus Italien von Fila et al. (2024) [69] wiederum benennen die Sorte als Haupteinflussfaktor auf den Ölgehalt, Witterungsbedingungen als stärkster ertragswirksamer Faktor. In diesem Zusammenhang verwiesen sie auf die höheren Erträge, die mit dem Anbau von Winterlein im Vergleich zu Sommerlein erzielt wurden.

Die Korrelationsanalyse aller Inhaltsstoffe zeigte einen negativen Zusammenhang von Blausäure mit TKM sowie einen positiven Zusammenhang mit den Ballaststoffen (Tabelle 58). Die von Oomah & Mazza (1998) [46] dargestellte Korrelation des Protein- und des Ölgehaltes mit dem Gehalt von cyanogenen Glycosiden, konnte im Praxismonitoring nicht bestätigt werden.

Tabelle 58: Korrelation der Inhaltsstoffe von Sommerlein (n=86) untereinander, Praxismonitoring 2020-2023

Korrelationskoeffizient	Blausäure	Quellzahl	TKM	Öl	Proteine	Ballaststoffe	α-Linolensäure	Gesamt-tocopherole
Blausäure	1	-0,099	-,222*	0,104	-0,167	,350**	0,101	-0,065
Quellzahl	-0,099	1	,622**	-0,170	0,057	0,201	-0,169	-0,030
TKM	-,222*	,622**	1	-0,106	,226*	0,179	-0,096	0,027
Öl	0,104	-0,170	-0,106	1	-,456**	0,144	,570**	-0,214
Proteine	-0,167	0,057	,226*	-,456**	1	-,237*	-,337**	0,111
Ballaststoffe	,350**	0,201	0,179	0,144	-,237*	1	0,145	-0,081
α-Linolensäure	0,101	-0,169	-0,096	,570**	-,337**	0,145	1	-,234*
Gesamt-tocopherole	-0,065	-0,030	0,027	-0,214	0,111	-0,081	-,234*	1

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

## Ertrag

Ertragsmessungen wurden innerhalb der Projektarbeiten auf den Praxisflächen nicht durchgeführt, ebenso keine Quantifizierung der Düngemaßnahmen oder des N-Vorrates im

Boden. Demnach fehlen entscheidende, ertragswirksame Parameter, die Zusammenhänge bei der Ertragsbildung erklären können. Der Analyse der Ertragsdaten liegen die Angaben der Betriebe zugrunde. Die Darstellung der Erträge in den Kategorien Sorte, Anbauform und Jahr zeigen deutliche sortenbedingte Ertragsunterschiede (Abbildung 4.59). Teilweise wurden die Sorten nur auf sehr wenigen Flächen angebaut oder eine Sorte nur an einem Standort, sodass ein Vergleich der Erträge mit den Ergebnissen beispielsweise der Landessortenversuche erfolgen muss. Der Vergleich Winterlein/Sommerlein deutet leicht höhere Erträge des Winterleins an. Die Jahreseffekte fielen geringer aus als erwartet (Abbildung 4.60). Deutliche Ertragsvorteile des Direktdruschs gegenüber des Schwaddrusch können aufgrund der geringen Fallzahl in dieser Kategorie nicht abschließend beurteilt werden. Bei der Korrelationsanalysen der erhobenen Daten fiel der positive Zusammenhang mit pH-Wert und TKM auf. Bei der Korrelationsanalyse der Faktoren zeigten sich bei Sommer- und Winterlein nur sehr wenige signifikante Zusammenhänge, jedoch jeweils unterschiedlich bei Sommer- und Winterlein. Von den Boden- und Witterungsparameters deuten nur sehr wenige Faktoren Zusammenhänge mit dem Ertrag an.

Signifikante Korrelationen des Ertrages von Lein (dt/ha) mit Boden-, Anbau- und Witterungsparametern, Korrelationskoeffizient r, Praxismonitoring 2020-2023

	<b>Sommerlein</b> (n=87)	<b>Winterlein</b> (n=15)		<b>Sommerlein</b> (n=87)	<b>Winterlein</b> (n=15)
pH-Wert	,288*	n.s.	TKM	,314*	n.s.
Boden			Witterung		
Na	,330*	n.s.	Tage über 20	n.s.	,619*
OS	-,271*	n.s.	Strahlung Juni	-,327*	n.s.

\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

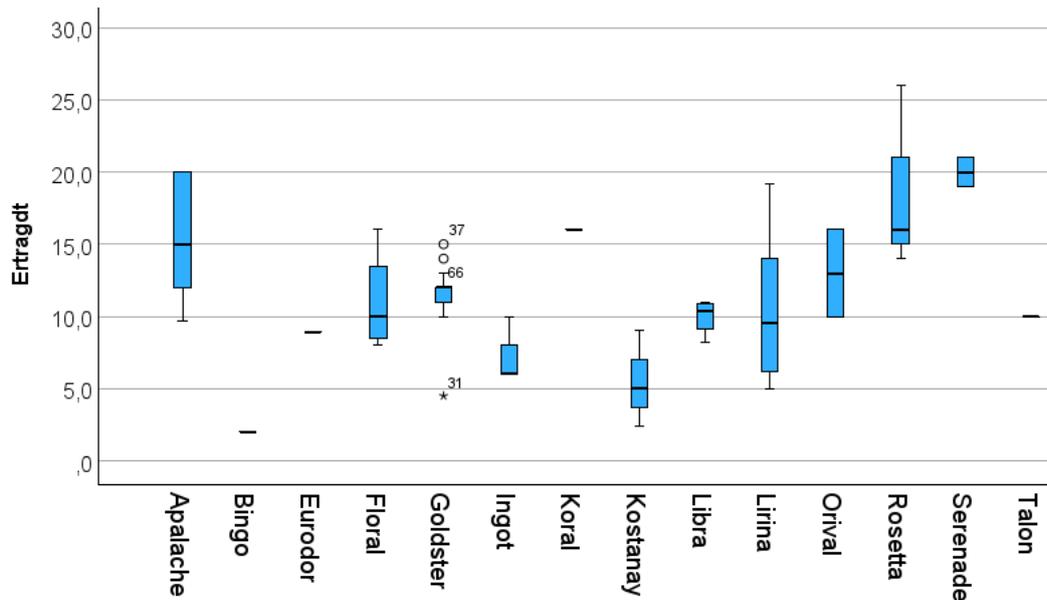


Abbildung 4.59: Streubreite des sortenbedingten Ertrags (dt/ha) von Lein, Praxismonitoring Sommer- und Winterlein, 2020-2023

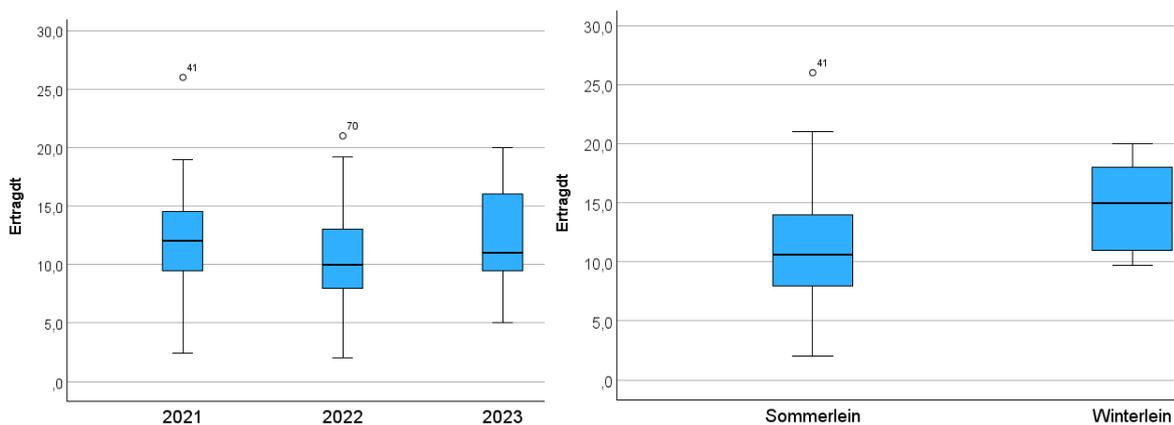


Abbildung 4.60: Streubreite des jahresbedingten Leinertrages (dt/ha, links) und des Ertrages bei Sommer- und Winterlein (rechts), Praxismonitoring, 2020-2023

Zur Klärung der ertragswirksamen Parameter im Anbau sollten weitere Forschungsarbeiten unter heimischen Klimabedingungen durchgeführt werden sowie eine aktuelle Literaturübersicht.

#### 4.2.2 TVH II: Verarbeitung und Analytik von Leinsamen zu Öl und Presskuchen (ÖM)

Aus den Anbauversuchen wurden 67 braune Leinsamensorten und 47 gelbe Leinsamensorten zu Öl und Presskuchen weiterverarbeitet. Die häufigste braune Leinsamensorte war Lirina, welche eine Ölausbeute von durchschnittlich 25 % aufwies. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich manche Proben gar nicht pressen ließen und manche dagegen eine Ölausbeute von 40 % aufwiesen. Ähnlich verhielt es sich bei der häufigsten gelbsamigen Sorte Goldstern, die eine mittlere Ölausbeute von 29 % aufweist. Über mehrere Proben haben sich die Sorten Apalache,

Libra, Rosetta und Koral mit einer Ölausbeute von 27-30 % ebenfalls als gute Ölsaatsorten herausgestellt (s. Tabelle 59).

Tabelle 59: Ölausbeute in % verschiedener Leinsamensorten

Saatfarbe und Sorte	Anzahl Sorte	Mittelwert Ölausbeute	Min. Ölausbeute	Max. Ölausbeute
<b>braun</b>	<b>67</b>	<b>24%</b>	<b>0%</b>	<b>49%</b>
Apalache	10	29%	13%	49%
Bingo	3	13%	0%	25%
Justess	6	17%	0%	33%
Kaolin	3	25%	23%	27%
Libra	6	29%	23%	40%
Lirina	23	25%	0%	40%
Paltin	5	24%	7%	41%
Serenade	7	22%	0%	38%
Sideral	2	10%	5%	15%
Talon	2	22%	17%	27%
<b>gelb</b>	<b>47</b>	<b>28%</b>	<b>0%</b>	<b>40%</b>
Eurodor	2	31%	31%	32%
Goldstern	23	29%	12%	39%
Ingot	5	22%	0%	39%
Koral	7	27%	12%	36%
Orival	4	26%	10%	39%
Rosetta	6	30%	19%	40%
<b>Gesamtergebnis</b>		<b>25%</b>	<b>0%</b>	<b>49%</b>

In Bezug auf die Blausäurewerte im Leinpresskuchen lässt sich feststellen, dass alle Sorten über dem untersten Grenzwert von 150 mg HCN/kg (Limit food 1) liegen (s. Abbildung 4.61). Dem Grenzwert von 250 mg HCN/kg (Limit food 2) entsprechen 44 % der Sorten. Damit eignen sich 37 % nur als Futtermittel (Limit food 3 = 350 mg HCN/kg) und 19 % der Sorten können gar nicht zur Ernährung weiterverwendet werden. Besonders die Sorte Justess weist einen sehr hohen Blausäuregehalt auf.

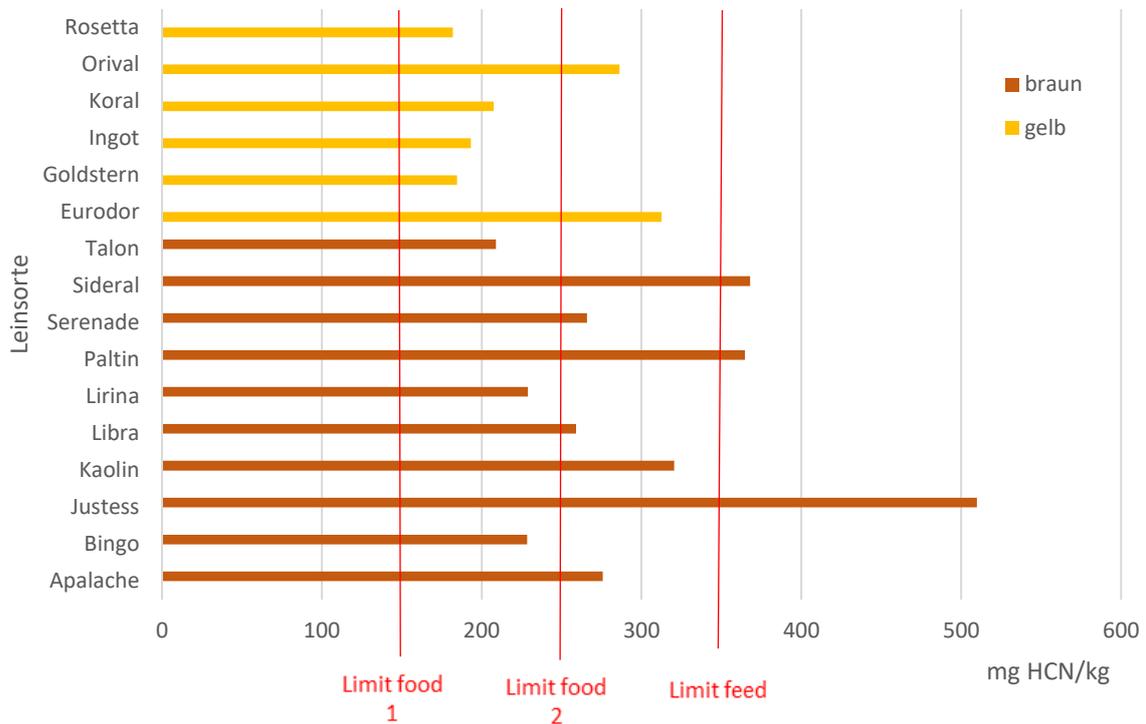


Abbildung 4.61: Mittlere Blausäurewerte (mg HCN/kg) in Leinpresskuchen nach Leinfarbe und -sorte inkl. Grenzwerten

Der Gehalt an Omega-3 liegt über alle Sorten zwischen 51-63 % des Gesamtfettes. Besonders hohe Werte sind in den Sorten Apalache (max.61 %), Libra (max. 63 %) und Lirina (max. 61 %) zu finden.

Die Analysewerte des Protein-, Ballaststoff- und Fettgehaltes sind abhängig von dem Erfolg der Ölausbeute. Der Proteingehalt der Proben beträgt im Mittel 29 g/100 g, der Ballaststoffgehalt 33 g/100 g und der Fettgehalt 24 g/ 100 g. Bei einer industriellen Pressung liegen der Protein- und Ballaststoffgehalt etwas höher und der Fettgehalt bei max. 12 g/100 g (Erfahrungswerte Ölmühle Moog).

Bei der Auswertung des Omega-3 und Blausäuregehalts über die Projektjahre (2020-2023) von neun Leinsorten fällt auf, dass sich der Gehalt an Omega-3 weder pro Sorte noch über die Jahre merklich verändert hat. Beim Blausäuregehalt ist jedoch ein leichter Trend hin zu höheren Werten über die letzten vier Jahre zu beobachten (s. Abbildung 4.62).

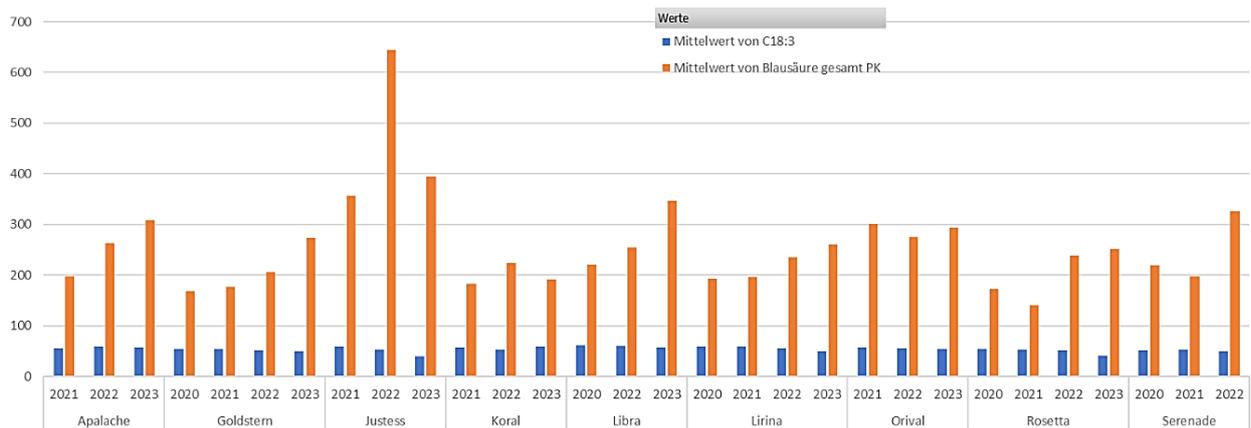


Abbildung 4.62: Omega-3 und Blausäuregehalt über die Projektjahre (2020-2023) von neun Leinsorten

### 4.2.3 TVH III: Sensorik (ÖM)

#### 4.2.3.1 Sensorik der Leinöle und Presskuchen

Die wichtigsten sensorischen Attribute bei Leinsamen sind sautig, brotig, nussig und bitter. Demnach wurden alle Leinproben auf diese Attribute vom sensorischen Panel der Ölmühle Moog bewertet. Wie anhand Abbildung 4.63 zu sehen, unterscheiden sich die Attribute im Öl nur geringfügig zwischen den beiden Saatfarben. Vergleichbar verhält es sich innerhalb der verschiedenen Sorten.

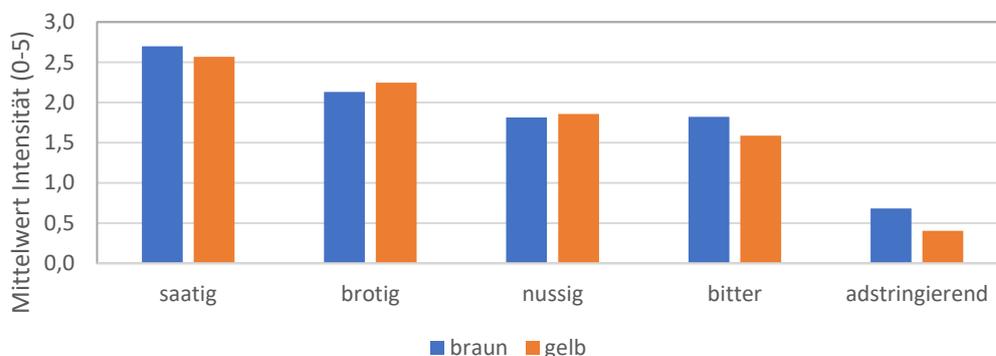


Abbildung 4.63: Sensorische Attribute Leinöl

Auch bei der Gesamtbewertung der Leinöle und -presskuchen sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Die meisten Proben erhielten die Bewertung IN oder JUST IN, was nur auf geringe sensorische Unterschiede hinweist. Einen Einfluss auf die Sensorik hatte der Besatz der Saatprobe: war ein hoher Besatz festzustellen, so ließ sich der Geschmack dieses in der Probe wahrnehmen (z.B. grün/grasig, erbsig, heuig, blumig, unrein).

#### 4.2.3.2 Verbraucherakzeptanztest

Aus den einzelnen Bewertungen lässt sich schlussfolgern, dass beide Produkte die Probanden nicht überzeugen konnten. Das Sonnenblumenextrudat (SE) überzeugt pur etwas mehr (Aussehen, Geruch, Geschmack), jedoch liegen die Bewertungen im Durchschnitt bei „weder gefällt noch missfällt“ (s. Abbildung 4.64).

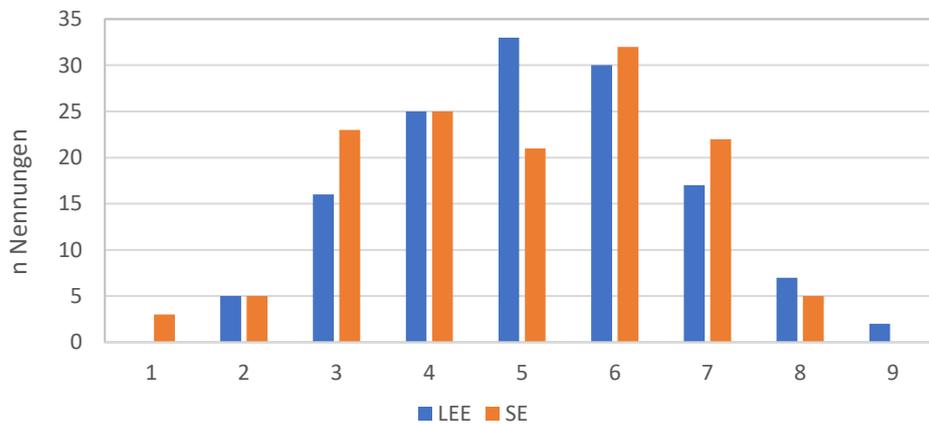


Abbildung 4.64: Bewertung Geschmack der Extrudate pur

Geschmacklich wird das SE als etwas nussiger/saatiger bewertet, gleichzeitig scheint es aber auch herber/bitterer zu sein als das Lein-Erbsen-Extrudat (LEE). Bei der Größe könnte laut den Probanden das SE etwas größer sein und das LEE etwas kleiner. Farblich wird das SE als etwas zu hell bewertet, während das LEE eine die Probanden ansprechende Farbe aufweist.

Als Anwendung in der Bolognese wurde das LEE etwas besser bewertet. Beide Extrudate wurden als etwas gummiartig/schwammig bewertet, wobei das SE etwas besser in der Konsistenz bewertet wurde (s. Abbildung 4.65).

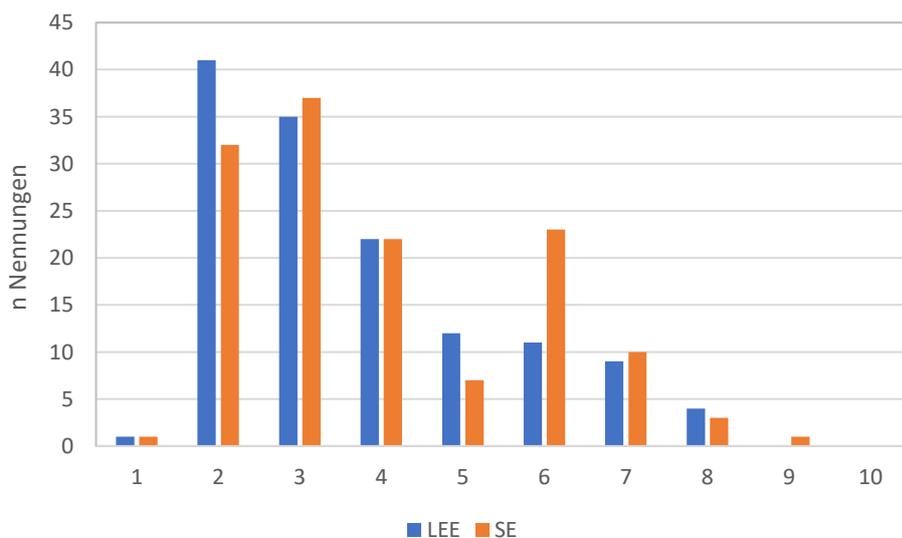


Abbildung 4.65: Bewertung Geschmack der Extrudate als Bolognese

Bei der Frage, welche der beiden Proben insgesamt besser gefallen hat, entscheiden sich 56 % für das SE und 44 % LEE.

Bei der Frage nach dem Kaufinteresse wurde für beide Produkte am häufigsten „eher nicht kaufen“ gewählt. Jedoch jeweils fast 30 % haben ebenfalls „eher kaufen“ und „bin unsicher“ gewählt.

Die abschließende Frage, ob die Probanden generell pflanzliches Hack aus Lein und Erbse kaufen würden beantworten die meisten mit „eher kaufen“ und jeweils ca. 20 % mit „sicher kaufen“ und „bin unsicher“ (s. Abbildung 4.66).

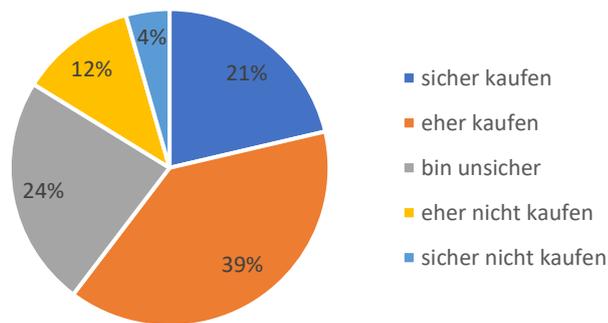


Abbildung 4.66: Generelles Kaufinteresse an pflanzlichem Hack aus Lein und Erbse

## 4.3 AP 2: Technologische Ansätze zur Minimierung der Blausäure in Leinsamen und Weiterverarbeitungsprodukten

### 4.3.1 TVH I: Vorbehandlung von Leinsamen und Presskuchen (DIL) und TVH II: Abtrennung von Blausäure (DIL)

#### 4.3.1.1 Versuche im Labormaßstab maximal 10 g Leinsamenpresskuchen

In einem ersten Screening wurden in der Literatur publizierte Verfahren zur Reduktion von Blausäure auf Leinsamenpresskuchen im Labor am DIL übertragen und angewendet (Abbildung 4.67). Verschiedene Methoden wie Quellen, enzymatische Behandlungen, thermische Verfahren und nicht-thermische Ansätze wie die Anwendung von Pulsed Electric Fields wurden untersucht. Die Verfahren und die erreichte Reduktion sind in Abschnitt 3.4.1 Tabelle 9 genau beschrieben.

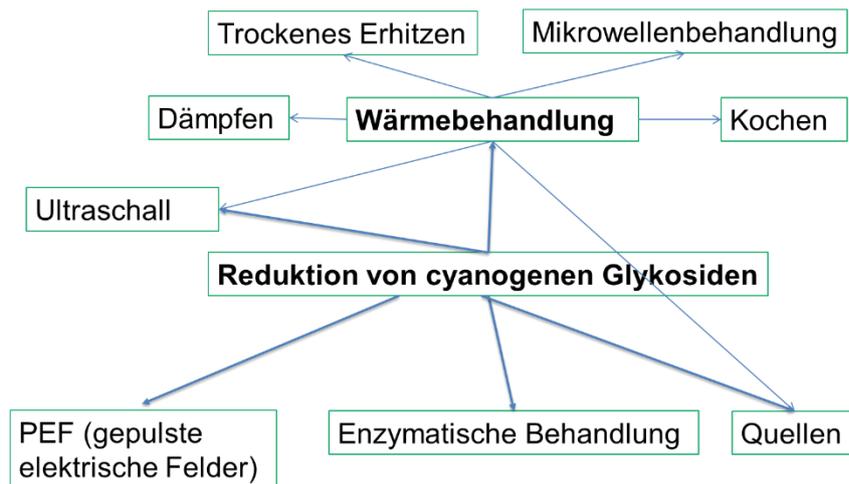


Abbildung 4.67: Untersuchte Methoden zur Behandlung von Leinsamenpresskuchen zur Reduktion von Blausäure

### Quellen

Das Screening ergab, dass das Quellen von LSPK in Wasser oder einem Säuregemisch, gefolgt von einer anschließenden Trocknung, den Blausäuregehalt um 29 % bzw. 21 % reduzierte. Der ursprüngliche Blausäuregehalt des unbehandelten Presskuchens lag bei 371 mg HCN/kg. Diese Methode erzielte somit die geringste Effektivität zur Reduktion von Blausäure und ist daher nur in Kombination mit anderen Verfahren zur Erreichung eines ausreichend niedrigen Blausäuregehalts empfehlenswert.

### Enzymatische Behandlung

Die Kombination von LSPK mit frischen Leinsamen, inkubiert mit Wasser bei 30 °C und einer anschließenden Bedampfung bei 120 °C nach der Methode von Yamashita et al. [24] (Variante 1) erwies sich als effektivstes Verfahren mit einer Reduktion von 99,5 % auf ca. 1,9 mg HCN/kg. Die Variation der Bedampfungstemperatur auf 40 °C führte zu einer Blausäurereduktion von 86 % (ca. 52 mg HCN/kg), was zeigt, dass eine niedrigere Bedampfungstemperatur ebenfalls eine signifikante Reduktion bewirken kann, allerdings weniger effektiv ist. Ohne Bedampfung war die Reduktion geringer, mit einem Restgehalt von 116 mg HCN/kg, was die Bedeutung des Dämpfens hervorhebt.

Enzymatische Methoden, die nur eine Inkubation ohne frische Leinsamen nutzten (nur mit wässrigen Überstand aus gelöster  $\beta$ -Glucosidase aus der isolierten Inkubation), zeigten im Vergleich tendenziell höhere Restgehalte an Blausäure (Variante 3). Die Methoden, die auf einer sauren Extraktion basierten (pH 5), erzielten eine höhere Reduktion (ca. 20 mg HCN/kg in Probe nachweisbar) als die reine Wasserextraktion.

### Thermische Behandlung

Die thermischen Methoden zeigten ebenfalls überzeugende Ergebnisse. Das Kochen nach Madhusudhan und Singh [35] im Verhältnis von 1:20 (LSPK zu Wasser) mit anschließender Zentrifugation und Trocknung (Variante 1) erreichte eine Blausäurereduktion von 97 %. Durch Reduktion der Wassermenge auf ein Verhältnis 1:7 (LSPK zu Wasser) (Variante 2) konnte eine Reduktion von 92 % verzeichnet werden. Aufgrund der geringeren Wasserzugabe war diese

Methode etwas weniger effektiv in der Reduktion, da der Austausch der  $\beta$ -Glykosidase mit den cyanogenen Glykosiden eingeschränkt war.

Besonders wirksam war das Dämpfen bei 120 °C über 6 Stunden, das eine Reduktion von 98 % (auf 8 mg HCN/kg) ermöglichte (Methode Dämpfen Variante 2). Dämpfen bei 40 °C (Variante 1) reduzierte den Gehalt um etwa 95 %. Es zeigt sich daher, dass höhere Temperaturen die Effizienz der Reduktion steigern können.

#### Mikrowellenbehandlung

Die Mikrowellenbehandlung erreichte eine moderate Reduktion von etwa 50 %. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn der LSPK vor der Behandlung in Wasser eingeweicht wurde, wodurch der Blausäuregehalt auf 185 mg HCN/kg sank. Ohne Einweichen war der Effekt deutlich geringer. Die Mikrowellenbehandlung war im Vergleich zu thermischen und enzymatischen Verfahren weniger effektiv und konnte keine vergleichbare Blausäurereduktion erzielen. Wasser als Lösungsmittel führte durch seinen höheren dielektrischen Verlust zu einer stärkeren Erwärmung, was zu einer geringfügig besseren Blausäurereduktion führte im Vergleich zum Einsatz einer 0,4 % (w/v) Zitronensäurelösung.

#### Ultraschallbehandlung

Die Ultraschallbehandlung des LSPKs führte zu einer moderaten Reduktion des Blausäuregehalts, wobei die besten Ergebnisse bei der direkten Ultraschallbehandlung des LSPKs erreicht wurden. Diese Methode (Variante 1) verringerte den Blausäuregehalt um 85 % auf 55,3 mg HCN/kg im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Durch eine zusätzliche Bedampfung bei 40 °C für 6 Stunden (Variante 2) konnte die Reduktion nur marginal verbessert werden.

Die Kombination der Ultraschallbehandlung von zerkleinerten Leinsamen mit einer nachfolgenden Inkubation zusammen mit LSPK (Variante 3) führte zu einer geringeren Reduktion (199 mg HCN/kg).

Im Vergleich zu den thermischen Methoden war die Ultraschallbehandlung weniger effektiv, zeigte jedoch ähnliche Ergebnisse wie die enzymatischen Verfahren ohne zusätzliche Bedampfung. Dies deutet darauf hin, dass Ultraschall primär eine unterstützende Rolle spielt, beispielsweise zur Vorbehandlung von Leinsamen, um Zellstrukturen aufzubrechen und damit die Verfügbarkeit von Enzymen zu verbessern.

#### PEF-Behandlung

Die Behandlung des LSPKs mit gepulsten elektrischen Feldern führte zu einer gewissen Reduktion des Blausäuregehalts von 73 – 83 % im getesteten Mischungsverhältnis von 1:0,5 (Presskuchen zu Wasser). Jedoch traten technische Schwierigkeiten auf, da Lufteinschlüsse in der Batchzelle zu Überschlügen führen konnten, was die geplanten spezifischen Energieeinträge von 20 und 30 kJ/kg erschwerten. Ein Mischungsverhältnis der LSPK-Proben mit Wasser von 1:3 führte zu unerwarteten Messergebnissen. Die Kontrollproben wiesen geringere Blausäuregehalte auf als die behandelten Proben. Eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wäre notwendig, um die tatsächliche Effizienz der PEF-Behandlung zu bestimmen. Variationen im spezifischen Energieeintrag führten hier zu keinen signifikanten Unterschieden in der Blausäurereduktion.

Die Methode der PEF-Behandlung zur Blausäurereduktion erwies sich als ungeeignet, um ohne zusätzliche Verfahren eine signifikante Reduktion zu erzielen, und sollte in Kombination mit anderen Ansätzen wie Erhitzen oder enzymatischer Behandlung eingesetzt werden.

#### Diskussion:

Die verschiedenen am DIL getesteten Methoden zur Reduktion von Blausäure im Leinsamenpresskuchen zeigten eine deutlich unterschiedliche Effektivität. Die enzymatische Behandlung Variante 1 (siehe Tabelle 9), bei der LSPK mit frischen Leinsamen zusammen mit Wasser bei 30 °C inkubiert, anschließend bedampft bei 120 °C und bei 30 °C getrocknet wird, erwies sich als besonders wirkungsvoll, insbesondere bei höheren Bedampfungstemperaturen. Die Methode profitierte von der Aktivität der frischen Leinsamen, die die Verfügbarkeit von  $\beta$ -Glykosidase erhöhte und so eine tiefgehende Hydrolyse der cyanogenen Glykoside ermöglichte. Auch die thermischen Verfahren wie das Dämpfen bei 120 °C und das Kochen im Verhältnis 1:20 lieferten überzeugende Ergebnisse, da durch hohe Temperaturen und ausreichend Wasserzugabe die flüchtige Blausäure wirksam entfernt werden konnte. Im Vergleich dazu schnitten die Mikrowellen- und Ultraschallbehandlungen weniger gut ab und erreichten nur eine moderate Reduktion der Blausäure. Auch die PEF-Behandlung konnte zwar eine gewisse Reduktion erzielen, war jedoch im Vergleich zu den anderen Methoden klar unterlegen. Zudem wurde bei den Versuchen die Effektivität durch technische Herausforderungen wie Lufteinschlüsse in der Batchzelle eingeschränkt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine Kombination von enzymatischen und thermischen Verfahren am vielversprechendsten ist, um eine maximale Blausäurereduktion zu erreichen. Die Möglichkeit, die Methoden im großtechnischen Maßstab anzuwenden, sowie ihre Anpassung an die jeweiligen Produktionsbedingungen sind dabei entscheidende Faktoren für ihre praktische Umsetzbarkeit.

#### 4.3.1.2 Scale-up der Screeningversuche auf 150 g Leinsamenpresskuchen

Abbildung 4.68 zeigt die im Screening geeignetsten Methoden zur Reduktion von Blausäure in Leinsamenpresskuchen im Scale-up auf einen Ansatz mit 150 g LSPK. Besonders geeignet waren das Kochen (Verhältnis 1:7), die enzymatische Behandlung unter der Zugabe von frischen Leinsamen und anschließendem Dämpfen bei 120 °C für sechs Stunden sowie das Dämpfen von Leinsamenpresskuchen bei 120 °C sowie 40 °C für jeweils sechs Stunden.

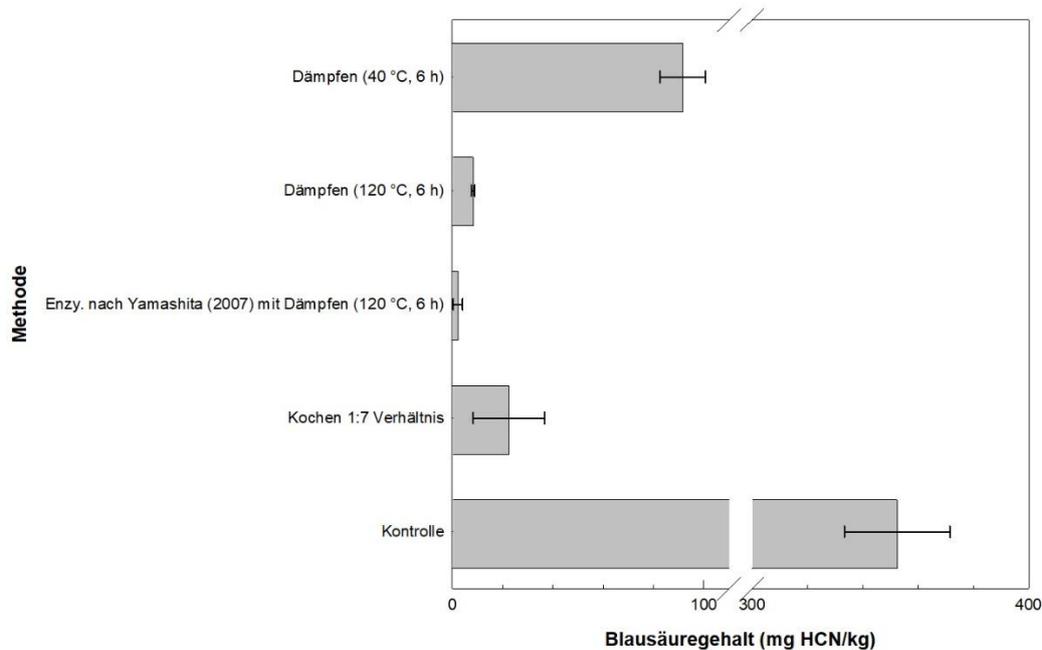


Abbildung 4.68: Ergebnisse der Blausäureanalytik von Leinsamenpresskuchen, Behandlung mittels verschiedener Methoden im Scale-up (Kochen, enzymatisch mit anschließenden Dämpfen bei 120 °C, Dämpfen bei 120 °C und Dämpfen bei 40 °C) im Vergleich zur Kontrolle;  $P < 0,005$  \*\*;  $P < 0,05$  \*

Die getesteten Methoden führten zu einer deutlichen Blausäurereduktion. Die enzymatische Methode erzielte mit einer fast vollständigen Reduktion den geringsten Blausäuregehalt im Presskuchen und zeigte, ähnlich wie das Dämpfen bei 120 °C, eine signifikante Reduktion im Vergleich zur Kontrolle. Nach dem Kochen blieben etwa 20 mg HCN/kg zurück, was einer Reduktion von 94 % entspricht. Im Gegensatz zu den Screening-Ergebnissen führte das Dämpfen bei 40 °C im Scale-up nicht zur erwarteten Reduktion, was auf eine ungleichmäßige Dampfverteilung im Kombidämpfer durch die größere Probenmenge zurückzuführen sein könnte.

Während des Scale-ups zeigten die Proben nach dem Trocknen Farbunterschiede (Abbildung 4.69). Alle behandelten Proben waren brauner als die unbehandelte Kontrollprobe, besonders die Proben, die hohen Temperaturen ausgesetzt waren. Die Probe nach Dämpfen bei 40 °C hatte die ähnlichste Farbe zur Kontrolle. Höhere Temperaturen und längere Behandlungszeiten führten vermehrt zu Maillard-Reaktionen, was auch mit den Beobachtungen von Feng et al. [23] übereinstimmt.



Abbildung 4.69: Leinsamenpresskuchen nach der Behandlung zur Blausäurereduktion: 1: Kontrolle (unbehandelt); 2: Kochen (Variante 2); 3: Enzymatisch (Variante 1) und Dämpfen (120 °C, 6 h); 4: Dämpfen (120 °C, 6 h); 5: Dämpfen (40 °C, 6 h)

Die Analyse der Big 8 der Proben aus dem Scale-up-Versuch mit 150 g LSPK zeigte jedoch keine signifikanten Änderungen in der Zusammensetzung der behandelten Proben zu der unbehandelten Probe an Leinsamenpresskuchen. Lediglich der Zuckergehalt reduzierte sich bei der Methode des Kochens signifikant, aufgrund der Wasserlöslichkeit von Zucker.

#### 4.3.1.3 Optimierung der enzymatischen Methode

##### Zugabe von frischen Leinsamen

Für die systematische Untersuchung der enzymatischen Methode Variante 1 wurde die Methode noch einmal mit und ohne Zugabe von frischen Leinsamen getestet sowie die einzelnen Teilschritte. Dabei wurde der LSPK bei 30 °C für 18 h inkubiert, danach für 6 h bei 120 °C bedampft und anschließend bei 30 °C getrocknet. Die Referenz hatte einen Blausäuregehalt von  $406,15 \pm 19,09$  mg HCN/kg. Mit Zugabe von frisch gemahlenem Leinsamen vor der Inkubation konnte der Blausäuregehalt nach der Trocknung auf  $2,30 \pm 1,34$  mg HCN/kg reduziert werden. Ohne den Einsatz von frischen Leinsamen wurde der Blausäuregehalt bei der gleichen Methode auch auf  $3,32 \pm 0,07$  mg HCN/kg reduziert. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung erzielte die Zugabe von frischen Leinsamen daher keine Verbesserung der Reduktion im Vergleich zu dem Verzicht auf die Samen. Der Inkubationsschritt inklusive Trocknen erzielte einen Blausäuregehalt von  $53,90 \pm 0,57$  mg HCN/kg und das Dämpfen inklusive Trocknen von  $9,42$  mg HCN/kg. Es ist zu erkennen, dass die Kombination der Inkubation und Dämpfens notwendig ist, um eine höhere Reduktion erzielen zu können.

## Blausäurereduktion in Abhängigkeit der Inkubationszeit, Dauer und Temperatur des Dämpfens

In Abbildung 4.70 ist der Blausäuregehalt in Abhängigkeit von der Inkubationszeit, der Zeit des Dämpfens und der Temperatur des Dämpfens dargestellt. Die Versuche erfolgten ohne Zugabe von frischen Leinsamen.

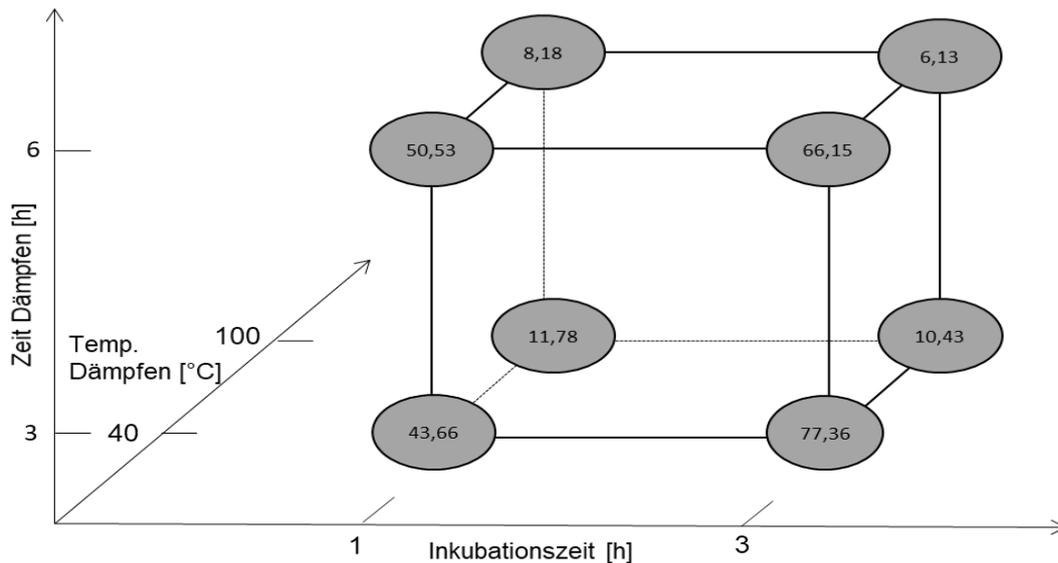


Abbildung 4.70: Darstellung der Ergebnisse des statistischen Versuchsplanes. Blausäuregehalt [mg HCN/kg] von Leinsamenpresskuchen in Abhängigkeit der Inkubationszeit (bei 30 °C), Bedampfungszeit und Bedampfungstemperatur. Blausäuregehalt von unbehandeltem Leinsamenpresskuchen:  $414,78 \pm 12,20$  mg HCN/kg.

Die Optimierungsversuche ergaben, dass die höchste Blausäurereduktion von 98,6 % auf 6,13 mg HCN/kg in Verbindung mit einer Inkubationszeit von 3 h bei 30 °C und einer Bedampfungszeit von 6 h mit einer Bedampfungstemperatur von 100 °C erzielt werden konnte. Es ist zu erkennen, dass die Inkubationszeit und Bedampfungszeit einen geringeren Einfluss auf die Blausäurereduktion haben als die Bedampfungstemperatur.

Für die zeitliche Optimierung der Methode ist jedoch eine Inkubation von 1 h bei 30 °C mit einer Bedampfungszeit von 3 h bei 100 °C ausreichend, um einen niedrigen Blausäuregehalt von 11,78 mg HCN/kg zu erreichen, wodurch diese Einstellung als geeignet definiert wurden.

### Notwendigkeit der Inkubation und Optimierung der Trocknungsbedingungen

Im Rahmen einer weiteren Versuchsreihe wurde die Notwendigkeit des Inkubationsschritt noch einmal überprüft. Der Leinsamenpresskuchen wurde zunächst fein vermahlen (feines Pulver mit 75 µm), ggf. inkubiert, gedämpft (3 h, 100 °C) und anschließend getrocknet (60 °C oder 100 °C). Abbildung 4.71 zeigt den Unterschied im Blausäuregehalt bei Proben mit und ohne Inkubation (30 °C, 1 h), die nach dem Dämpfen bei 60 °C und 100 °C für 24 h getrocknet wurden. Der Blausäuregehalt lag nach dem Trocknen bei 60 °C ohne Inkubation bei 24 mg/kg TS, wohingegen der LSPK bei vorheriger Inkubation einen Blausäuregehalt von 106 mg/kg TS nach der Behandlung aufwies. Bei einer Trocknungstemperatur von 100 °C lagen

der Blausäuregehalt ohne vorherige Inkubation bei rund 11 mg/kg TS und mit Inkubation bei 107 mg/kg TS. Unabhängig von der Trocknungstemperatur hat die Inkubation daher keinen Einfluss auf die Blausäurereduktion. Im Gegenteil, die inkubierten Proben weisen höhere Blausäuregehalte auf als die nicht inkubierten Proben. Daher wurde in den nächsten Schritten auf den Inkubationsschritt vorerst verzichtet. Außerdem wurde die Trocknungstemperatur auf 60 °C für 24 h festgelegt, da hierbei eine ausreichende Reduktion des Blausäuregehaltes auf unter 25 mg/kg TS erzielt werden konnte und somit der gesetzlich festgelegte Grenzwert von 150 mg/kg bereits deutlich unterschritten wurde. Zudem ist die Trocknung bei 60 °C auch vor dem Hintergrund der Energieeffizienz vorteilhafter.

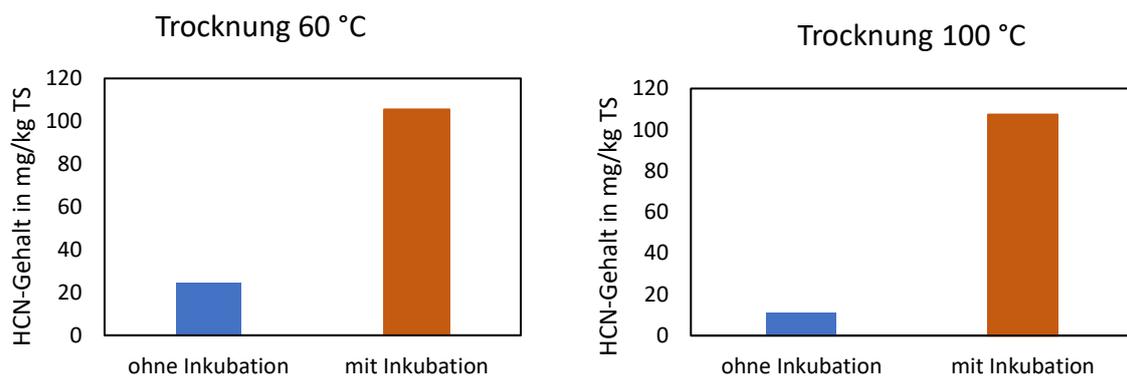


Abbildung 4.71: Blausäuregehalt in mg/kg TS (bezogen auf Trockensubstanz) in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur (60°C und 100 °C, 24 h) mit und ohne vorheriger Inkubation bei 30 °C für 1 h und anschließender Dampfbehandlung (3 h, 100 °C) im Kombidämpfer.

#### 4.3.2 TVH III: Fermentation (DIL)

Neben den thermischen und mechanischen Verfahren zur Reduktion von Blausäure aus Leinsamenpresskuchen sollte eine Fermentation mit dem Einsatz von Laktobazillen als Starterkulturen als Methode getestet werden.

##### 4.3.2.1 $\beta$ -Glucosidase-Aktivität der Stämme

In einem ersten Schritt wurden die Stämme aus Tabelle 11 hinsichtlich ihrer  $\beta$ -Glucosidase-Aktivität untersucht, um interessante Kandidaten für die Fermentation des Leinsamenpresskuchens zu identifizieren.  $\beta$ -Glucosidasen sind eine Enzymgruppe, die  $\beta$ -glykosidische Verbindungen spalten können und umfassen auch das Enzym Linamarase. Linamarasen spalten Cyanid-haltige Verbindungen und sind bei der Entstehung von Blausäure beteiligt.

Das Screening zeigte, dass *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281, *Lactobacillus plantarum* DSM 20174 und *Lactobacillus cellobiosus* DSM 20055 die höchste  $\beta$ -Glucosidase-Aktivität aufwiesen. Diese Stämme wurden zusammen mit dem aus dem Leinsamenpresskuchen isolierten *Pediococcus acidilactici*-Stamm für die Fermentation weiter untersucht.

#### 4.3.2.2 Hintergrundmikrobiota

Um eine effiziente Umsetzung des Substrates durch die Fermentation zu erreichen, muss sichergestellt werden, dass sich der inokulierte Stamm gegenüber der autochthonen Mikrobiota des Leinsamenpresskuchens durchsetzen kann. Durch die Zugabe von Wasser zum Leinsamenpresskuchen wird nicht nur das Wachstum der Milchsäurebakterien mit  $\beta$ -Glucosidase-Aktivität ermöglicht, sondern auch das Wachstum unerwünschter Keime, die sich auf den Leinsamenpresskuchen befinden.

Voruntersuchungen der Ölmühle Moog zeigten das Vorhandensein von (präsumptiven) *Bacillus cereus* mit durchschnittlich  $10^2$  KBE/g in unfermentierten Leinsamenpresskuchen. Insgesamt war der Presskuchen mit  $10^2$  bis  $10^4$  KBE/g aerob mesophilen Keimen belastet.

Die Keimzahlentwicklung unter aeroben und anaeroben Bedingungen war ähnlich. Die Fermentation des Leinsamenpresskuchens ohne Zugabe von spezifischen Milchsäurebakterien zeigte, dass die Keimzahl im Laufe der drei Tage von anfänglich  $10^2$  KBE/g auf  $10^7$  bzw. bis  $10^8$  KBE/g stieg. Die Mikroorganismen wurden bis zur Gattungs- und Speziesebene identifiziert, darunter *Bacillus* sp., *Enterococcus* sp., *Pantoea* sp., und *Micrococcus luteus*. Dies zeigte, dass die autochthone Mikrobiota auch ohne gezielte Zugabe von Milchsäurebakterien in der Lage war, sich unter den gegebenen Bedingungen zu vermehren.

#### 4.3.2.3 Fermentation von ausgewählten Stämmen

Die Zugabe der vier ausgewählten Stämme *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281, *Lactobacillus plantarum* DSM 20174, *Lactobacillus cellobiosus* DSM 20055 und *Pediococcus acidilactici* stieg die Keimzahl von ca.  $10^6$  KBE/g auf etwa  $5 \times 10^8$  bis  $10^9$  KBE/g innerhalb von 24 Stunden. Der pH-Wert sank dabei von 6,0 auf durchschnittlich 4,3. Obwohl die Hintergrundmikrobiota während der Fermentation vorhanden war, konnten sich die inokulierten Stämme dennoch durchsetzen und die Fermentation dominieren. Das Auftreten von Fremdkeimen wurde jedoch bei der Fermentation mit *Pediococcus acidilactici* beobachtet.

#### 4.3.2.4 Blausäuregehalt im fermentierten Leinsamenpresskuchen

Überraschenderweise zeigte sich ein Anstieg des Blausäuregehalts in den fermentierten Proben, statt der erwarteten Reduktion. Während zu Beginn der Fermentation (T0) die Blausäure-Konzentration bei 9,8 -11,8 mg/kg lag, stieg sie nach einem Tag Fermentation bei 30 °C auf 35,6 - 45,5 mg/kg und erreichte nach zwei Tagen 42,6–56,7 mg/kg. Die niedrigsten Werte wurden in den Proben mit *Pediococcus acidilactici* gemessen, während *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281 die höchsten Werte zeigte (Abbildung 4.72).

Die Kontrollansätze ohne Inokulation zeigten hingegen nach 2 Tagen bei 30 °C eine ähnliche Blausäure-Konzentration wie zu Beginn der Inkubation (durchschnittlich 11,3 mg/kg).

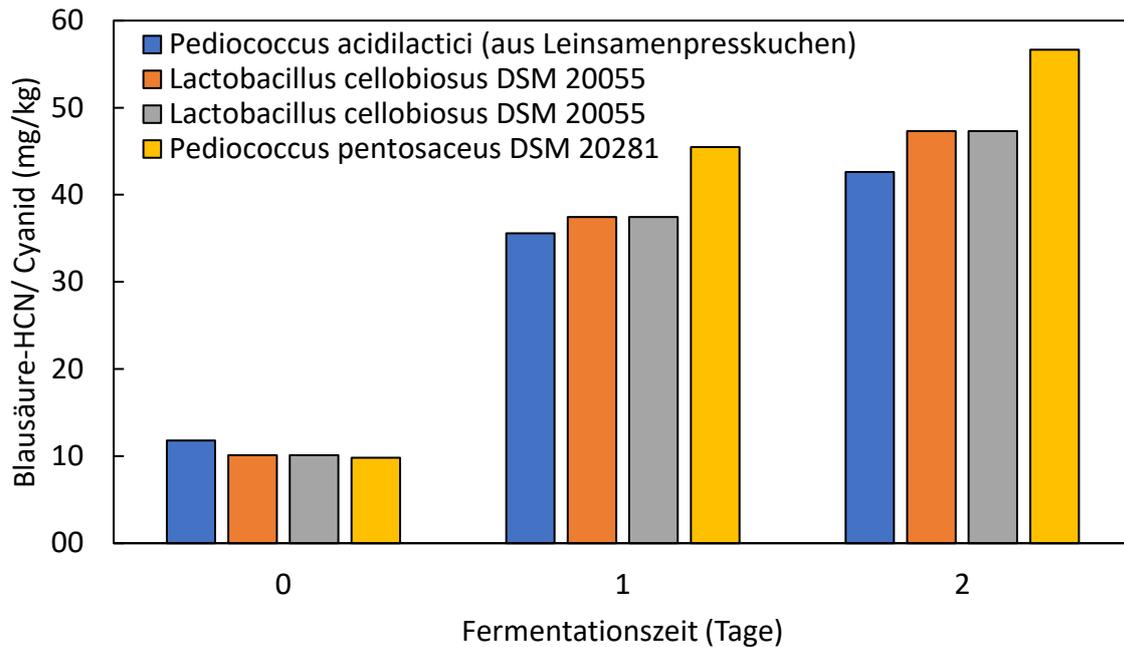


Abbildung 4.72: Blausäuregehalt in mit *Pediococcus acidilactici* (Isolat aus Leinsamenpresskuchen) oder *Lactobacillus cellobiosus* DSM 20055 oder *Lactobacillus plantarum* DSM 20147 oder *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281 fermentierten Leinsamenpresskuchen nach 0, 1 oder 2 Tagen.

#### 4.3.2.5 Weitere Versuche zur Erklärung des Blausäureanstieges während der Fermentation

Bei allen vier untersuchten Stämmen zeigte sich ein unerwartetes Phänomen: Der Blausäuregehalt des Leinsamens war vor der Inkubation sehr niedrig (10-12 mg/kg) und nahm über den Verlauf der Fermentation zu (41-57 mg/kg). Unbehandelter Leinsamenpresskuchen wies einen Blausäure-Gehalt von etwa 300 mg/kg.

Zwei Hypothesen wurden zur Erklärung der Ergebnisse aufgestellt:

1. Die Fermentation könnte zur Freisetzung cyanogener Verbindungen geführt haben, die zuvor nicht erfasst wurden.
2. Während der Probenvorbereitung und Trocknung könnte es zu einem Verlust der flüchtigen Blausäure gekommen sein, was den niedrigen Ausgangswert erklärt.

Die Versuche mit Dampf vorbehandeltem Leinsamenpresskuchen und sterilfiltriertem Kulturüberständen ergaben interessante Hinweise zur Freilegung cyanogener Verbindungen.

Der Blausäure-Gehalt lag im Ansatz mit aktiver Kultur und in der Kontrolle mit Wasser zu Beginn zwischen 4,0 und 4,8 mg/kg, also sehr niedrig, stieg dann allerdings deutlich auf Werte zwischen 15,75 mg/kg und 23,5 mg/kg nach der Inkubation bei 30 °C. Im Ansatz mit sterilem Kulturüberstand lag der Ausgangsgehalt der Blausäure etwas höher als bei den Kontrollen, obwohl dasselbe Material verwendet wurde; es wurden 8,5 mg/kg und 15,7 mg/kg nachgewiesen. Am Ende der Inkubation wurde in beiden Ansätzen mit Kulturüberstand etwas weniger Blausäure als zu Beginn nachgewiesen; 6,9 mg/kg und 9,1 mg/kg. Die Werte liegen

etwas höher als die in den Kontrollansätzen mit Fermentationskultur oder Wasser nach der zweitägigen Inkubation.

Dies deutet darauf hin, dass die Fermentation durch die intakten Milchsäurebakterien eine stärkere Freilegung von cyanogenen Verbindungen begünstigt. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Bakterien während der Fermentation cyanogene Verbindungen freilegen, die bei der Vorbehandlung des Leinsamenpresskuchens nicht zugänglich waren. In der Kontrolle mit nur Wasser blieben die Blausäurewerte konstant niedrig, was darauf hinweist, dass die Freilegung dieser Verbindungen hauptsächlich durch die metabolische Aktivität der Bakterien bedingt ist.

### **4.3.3 TVH V: Orientierende Versuche zur Maßstabsübertragung (DIL)**

Um den entwickelten Behandlungsprozess auf Pilotmaßstab sowie einen industriellen Maßstab zu skalieren, erfolgten Schritt für Schritt Anpassungen der einzelnen Prozessschritte.

#### **4.3.3.1 Maßstabsübertragung des Prozessschrittes Dämpfen**

##### Erhitzen im Lödige-Mischer

Im Labormaßstab wurde zur Bedampfung des LSPK ein Kombidämpfer bei 100 °C eingesetzt. Aufgrund der schwankenden Bedampfungstemperatur und der ungenauen Dampfzufuhr war die Methode im Labormaßstab jedoch schwer reproduzierbar. Dies führte zu stark variierenden Blausäuregehalten im behandelten Presskuchen, die zwischen 25,6 mg/kg und 93,3 mg/kg bei identischen Prozesseinstellungen schwankten. Um die Reproduzierbarkeit im Pilotmaßstab zu verbessern, wurde der Kombidämpfer durch einen Pflugscharmischer der Firma Lödige mit einem Fassungsvermögen von 50 Litern ersetzt. Hierbei wurde Dampf über einen externen Dampferzeuger in den Doppelmantel der Innenkammer eingeleitet, sodass das LSPK-Wasser-Gemisch bei 100 °C unter kontinuierlichem Rühren gleichmäßig indirekt erhitzt werden konnte, was zu reproduzierbaren Ergebnissen führte. Die Erwärmung des Presskuchens erfolgte somit nicht mehr durch direkten Dampf, sondern durch die indirekte Wärmeübertragung über den Doppelmantel.

Für eine Versuchsreihe wurden 2 kg LSPK mit 18 kg Wasser im Verhältnis 1:9 im Pflugscharmischer bei 100 °C erhitzt und gemischt, anschließend bei 60 °C für 12 Stunden getrocknet. Dieser Prozessschritt entspricht zwar eher einem Kochprozess als einer klassischen Bedampfung, führte jedoch ebenfalls zu einer signifikanten Reduktion des Blausäuregehalts, wie in Abbildung 4.73 dargestellt. Der Blausäuregehalt nahm mit zunehmender Erhitzungszeit ab. Bereits nach 30 Minuten Erhitzung bei 100 °C konnte eine deutliche Reduktion auf etwa 20 mg/kg erreicht werden. Da dieser Wert deutlich unter dem gesetzlichen Grenzwert liegt, ist eine Verkürzung der Erhitzungsdauer auf 30 Minuten möglich.

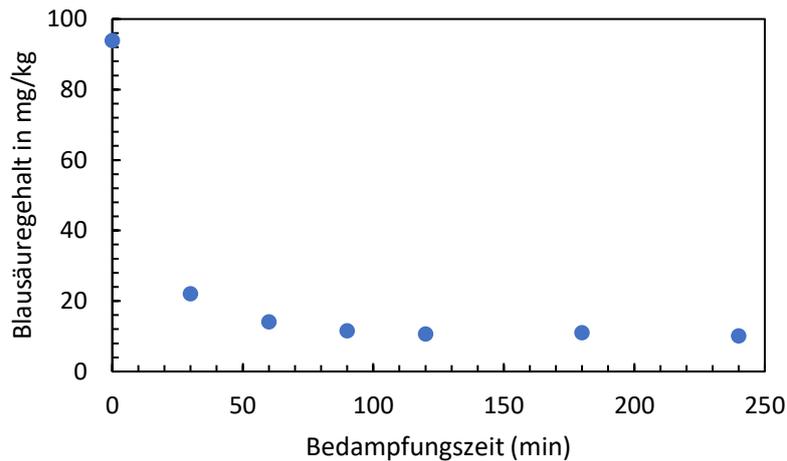


Abbildung 4.73: Blausäuregehalt [mg/kg HCN] in Abhängigkeit von der Erhitzungszeit (indirekt im Mischer) bei 100 °C, anschließende Trocknung bei 60 °C.

#### Dämpfen im VAS-Mischer

Für eine Maßstabsübertragung der direkten Dampfbehandlung wurden Versuche mit einem VAS Mischer bei der Firma Glatt durchgeführt. In der Probenreihe 1 wurde LSPK, der einen Blausäuregehalt von 313 mg/kg aufwies, mit Wasser vermengt (Verhältnis 1:8) und die Proben mit direktem Dampf bei variierender Behandlungsdauer behandelt (Tabelle 60). Bereits nach 15 min konnte der Blausäuregehalt der LSPK-Suspension auf unter 2 mg/kg reduziert werden bzw. auf 16,4 mg/kg bezogen auf die Trockenmasse. Auffällig ist, dass der HCN-Wert direkt zu Beginn bereits unter 2 mg/kg lag. Grund dafür könnte sein, dass die Bedampfungszeit erst gestartet wurde, nachdem der LSPK zusammen mit Wasser homogen vermischt wurde und der Vorgang des Aufheizens bis auf 95 °C abgeschlossen wurde. Es ist anzunehmen, dass in dieser „Vorbereitungs-Phase“ bereits eine signifikante HCN-Reduktion stattgefunden hat. In der 2. Versuchsreihe wurde der Einfluss einer Vorvermahlung untersucht. Aus Tabelle 60 ist zu entnehmen, dass dies keinen erheblichen Einfluss auf die Blausäure hatte. Um Kosten und Zeit zu sparen, kann daher eine direkte Vermahlung im VAS Mischer in Betracht gezogen werden. Der Nachteil dabei wäre allerdings eine größere Partikelgröße des Endproduktes, wodurch eventuell eine Nachvermahlung notwendig wäre (Abbildung 4.74).



Abbildung 4.74: Leinsamenpresskuchen, zerkleinert in Stiftmühle (links) und zerkleinert im VAS Mischer (rechts)

Durch die Vermischung von LSPK und Wasser mit anschließender Dampfbehandlung wäre ein zusätzlicher Trocknungsschritt nach dem Prozess notwendig. Daher wurde in einer weiteren Versuchsreihe geprüft, welche minimale Wassermenge für den Dampfprozess notwendig ist, um die Folgekosten für die Trocknung gering zu halten. Ziel sollte es sein, den LSPK ohne die zusätzliche Zugabe von Wasser zu bedampfen, sodass dem LSPK lediglich die Menge Wasser aus dem Dampf zugeführt wird. Dazu wurde der LSPK im Mischer zunächst zerkleinert und anschließend direkt mit Dampf behandelt, sodass am Ende ein befeuchtetes Pulver entstand. Das Verhältnis von Wasser zu LSPK betrug dabei 1:7,5. In Tabelle 61 sind die Ergebnisse dargestellt, woraus zu erkennen ist, dass während des Mischvorganges und Dämpfens der Wassereintrag durchs Dämpfen ausreichend ist, um den Blausäuregehalt bezogen auf die Trockenmasse auf unter 40 mg/kg TS zu senken. Eine zusätzliche Wasserzugabe ist daher nicht notwendig. Eine anschließende Trocknung des LSPKs ist dennoch nötig.

Tabelle 60: Prozesseinstellungen und Blausäuregehalt in mg/kg von Versuchsreihen im VAS Mischer. Es wurde der Einfluss von Zeit, Vermahlungsgrad und Vakuum auf die HCN-Reduktion untersucht. Blausäuregehalt unbehandelter LSPK: 313 mg/kg.

Parameter	LSPK vermahlen Probenreihe 1 Zeiteffekt				LSPK unvermahlen Probenreihe 2 LSPK Mahlgrad Effekt				LSPK vermahlen Probenreihe 3 Vakuum Effekt		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Menge LSPK (kg)	6	6	6	6	12	12	12	12	6	6	6
Menge Wasser (kg)	48	48	48	48	0	0	108	108	6	6	6
Menge Wasser aus Dampf (kg)	0	6	12	12	0	6	12	12	0	6	8
Bedampfungstemperatur (°C)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Bedampfungszeit (min)	0	15	30	30	0	5	15	30	0	15	20
Vakuum (mbar)	0	0	0	600	0	0	0	0	0	0	600
Gesamtmenge Wasser (Zugabe+Dampf) (kg)	48	54	60	60	0	6	108	108	6	12	14
TS-Gehalt (g/100g)	9,6	9,45	9,4	9,5	9,3		9		84,58	73,7	80,3
HCN Gehalt (mg/kg)	1,97	1,55	1,42	1,7	1,51		1,39		6,3	5,47	5,58
HCN-Gehalt (mg/kg TS)	20,52	16,40	15,11	17,89	16,24		15,44		7,45	7,42	6,95

Tabelle 61: Prozesseinstellungen und Blausäuregehalt in mg/kg von Versuchsreihen im VAS Mischer. Es wurde der Einfluss der zugegebenen Wassermenge und Vakuum untersucht.

Parameter	1	2 A	2 B	3	4 A	4 B
Menge LSPK (kg) unvermahlen	10	15	15	10	15	15
Menge Wasser zugegeben (kg)	15	0	0	15	0	0
Menge Wasser aus Dampf (kg)	5	2	2	5	2	6
Bedampfungstemperatur (°C)	95	95	95	95	95	95
Bedampfungszeit (min)	15	15	+9	15	15	+9
Vakuum (mbar)	0	0	-800	-150	-150	-800
Menge Wasser Gesamt (kg)	20	2	2	20	2	6
Verhältnis Wasser:LSPK	2:1	1:7,5	1:7,5	2:1	1:7,5	1:2,5
TS-Gehalt (g/100g)	32,2	84,95	88,4	31,25	79,85	71,43
HCN Gehalt (mg/kg)	10,35	19,95	19,2	10,3	13,6	13,35
HCN-Gehalt (mg/kg TS)	32,14	23,48	21,72	32,96	17,03	16,07

#### 4.3.3.2 Maßstabsübertragung der Trocknung

##### Sprühtrocknung

Um den Trocknungsschritt auf einen industriefähigen Maßstab zu übertragen, wurde die Sprühtrocknung als Methode in Betracht gezogen. Erste Tests wurden an der Uni in Wien durchgeführt. Die Leinsamenpresskuchen-Suspension (Wasser:LSPK = 9:1) wurde im Lödige-Mischer zunächst 30 min bei 100 °C erhitzt und im Sprühtrockner bei 180-200 °C für wenige Sekunden getrocknet, sodass ein feines Pulver entstand. Der Blausäuregehalt konnte erfolgreich auf unter 9 mg/kg reduziert werden. Allerdings kam es durch die Sprühtrocknung zu einem hohem Materialverlust. Aufgrund der hohen Viskosität der Suspension sind die Leitungen des Sprühtrockners häufig verstopft.

Um die Methode weiter zu optimieren, wurde ein weiterer Sprühtrocknungsversuch mit einem größeren Trockenturm durchgeführt. Dafür wurden 150 kg LSPK an das HBLFA Francisco Josephinum in Wieselburg geschickt. Bereits im Testdurchlauf traten Schwierigkeiten auf, da die Partikel im hochviskosen LSPK-Slurry zu Blockaden im Leitungssystem der Sprühtrocknungsanlage führten. Auch in den Versuchen am Josephinum zeigte sich, dass ein Wasserzusatz von 40 % notwendig war, um eine pumpfähige Masse zu erhalten. Dennoch kam es zu starken Verklebungen an den Wänden des Trockenturms, was zu einer geringen Produktausbeute von nur 1,7 kg führte und letztlich zum Abbruch des Versuchs.

Die Analyse des Blausäuregehalts im sprühgetrockneten Presskuchen zeigte zwar eine erfolgreiche Reduktion auf 26,05 mg/kg, dennoch erwies sich die Sprühtrocknung aufgrund der technischen Herausforderungen und der geringen Ausbeute als ungeeignetes Verfahren für die Trocknung von behandelten LSPK.

##### Walzentrocknung

Für die Walzentrocknung bei der Firma VITAM wurde der LSPK im Stephan Mischer mit Wasser auf einen Feststoffgehalt von 10 % verdünnt, um die erforderliche Konsistenz für die Walzenapplikation zu erreichen. Diese Verdünnung war notwendig, um einen gleichmäßigen Film auf der Walze zu bilden, der während der Trocknung Flocken erzeugt. Eine geringere Verdünnung hätte dies nicht ermöglicht, da der Slurry erst ab einem Verhältnis von 1 Teil LSPK zu 9 Teilen Wasser pumpfähig genug war, um auf der Walze aufgetragen zu werden. Im Mischer wurde der LSPK bei 80 °C ohne direkte Dampfeinwirkung gerührt, was eher einem Inkubations- oder Erhitzungsschritt entspricht als einer klassischen Bedampfung. Anschließend erfolgte die Trocknung des LSPK-Slurrys mittels Walzentrocknung.

In Tabelle 62 sind die Versuchseinstellungen sowie der resultierende Blausäuregehalt des nassen Presskuchens vor der Trocknung dargestellt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Inkubationstemperatur auf 95 °C angepasst, entsprechend den Versuchen im VAS-Mischer bei der Firma Glass. Dabei zeigte sich, dass eine höhere Temperatur (von 80 auf 95 °C) trotz kürzerer Inkubationszeit (15 statt 20 Minuten) zu einer Reduktion des Blausäuregehalts im nassen LSPK führte. Dennoch blieben die erzielten Reduktionen weit hinter den Ergebnissen im VAS-Mischer zurück, was möglicherweise auf die

fehlende direkte Dampfbehandlung bei den Versuchen im Stephan Mischer oder auch auf Unstimmigkeiten und fehlende Vergleichbarkeit der Analysemethoden der Blausäure zurückzuführen ist.

Tabelle 62: Prozesseinstellungen des Inkubationsschrittes im Stephan Mischer und der resultierende Blausäuregehalt in mg/kg (bestimmt vom externen Labor SGS) von den Versuchen bei der Vitam Hefeprodukte GmbH.

Parameter	Versuche bei VITAM		
	1	2	3
Menge LSPK (kg)	12	12	12
Menge Wasser (kg)	108	108	108
Inkubationszeit [min]		30	30
Inkubationstemperatur [°C]		30	30
Menge Wasser aus Dampf (kg)	0	0	0
Temperatur (°C)	80	95	95
Erhitzungszeit (min)	20	15	15
Vakuum (mbar)	0	0	0
Gesamtmenge Wasser (Zugabe+Dampf) (kg)	120	120	120
Anteil LSPK an Gesamtmenge	10,00%	10,00%	10,00%
HCN-Bestimmung bei SGS			
Trockenmasse (g/100g) SOP M 3920, berechnet	8,5		
Blausäure HCN gesamt (nasse Probe) VDLUFA Methodenbuch Bd. III 16.3.2, mod.	29,9	23,6	16,4
Blausäure HCN gesamt bezogen auf TS in (mg/kg TS) VDLUFA Methodenbuch Bd. III 16.3.2, mod.	352	236	194

Aufgrund der hohen Blausäuregehalte des behandelten Presskuchens wurden Vergleichsmessungen am DIL durchgeführt (Tabelle 63). Dabei ergab sich, dass der Blausäuregehalt der im Stephan Mischer inkubierten Probe am DIL mit 52,1 mg/kg TS (Trockensubstanz) bestimmt wurde, während SGS einen deutlich höheren Gehalt von 351,76 mg/kg TS analysierte. Bei der walzengetrockneten Probe ergab die Messung am DIL einen Blausäuregehalt von 16,5 mg/kg TS, während SGS 302,02 mg/kg TS feststellte. Diese erheblichen Diskrepanzen konnten nicht unmittelbar erklärt werden. Daher wurde im Laufe des Projekts ein Round Table organisiert, um die Unstimmigkeiten zwischen den Messergebnissen der verschiedenen Labore zu besprechen.

Tabelle 63: Blausäureanalyse am DIL und bei SGS im Vergleich von zwei Proben aus den Versuchen bei Vitam Hefeprodukte GmbH

Bezeichnung	Messung am DIL				Messung bei SGS		
	Trocken- masse	Blausäure HCN gesamt	Blausäure HCN gesamt	Blausäure HCN gesamt	Trocken- masse	Blausäure HCN gesamt	Blausäure HCN gesamt
	103°C DIL256-1 2011-3	ASU F 0093 2013-04	ASU F 0093 2013-05	ASU F 0093 2013-05	SOP M 3920, berechnet	VDLUFA Methoden buch Bd. III 16.3.2, mod.	VDLUFA Methoden buch Bd. III 16.3.2, mod.
	g/100g	mg/kg	mg/kg TM	∅ mg/kg TM	g/100g	mg/kg	mg/kg TM
LSPK erhitzt im Stephan Mischer VITAM	8,5 8,4	4,57 4,23	53,8 50,4	52	8,5	29,9	352
LSPK nach Walzentrocknung VITAM	67,5 67,4	11,1 11,2	16,4 16,6	17	83,8	253	302

Sowohl die Sprühtrocknung als auch die Walzentrocknung erwiesen sich als unpraktikabel, da der behandelte Leinsamenpresskuchen für die Trocknung zunächst mit einem hohen Wasseranteil angereichert werden muss, um eine ausreichende Pumpfähigkeit der Masse zu gewährleisten. Diese Anreicherung ist wirtschaftlich ineffizient, da das hinzugefügte Wasser im anschließenden Trocknungsprozess wieder vollständig entfernt werden muss. Zudem stellt der hohe Wasseranteil von bis zu 90 % bei der erforderlichen Zwischenlagerung oder dem Transport des Presskuchens vor dem Trocknungsschritt ein erhebliches Risiko dar, das die Lebensmittelsicherheit und die Haltbarkeit des Produkts negativ beeinflussen kann.

#### Wirbelschichttrocknung

Die Wirbelschichttrocknung kann als separater, nachgeschalteter Prozess zur thermischen Behandlung des Presskuchens genutzt werden, ist jedoch nicht für den viskosen LSPK-Slurry geeignet. Daher muss der Presskuchen einen ausreichend niedrigen Wassergehalt aufweisen, um rieselfähig zu bleiben.

In einer Versuchsreihe wurde ein Trocknungstest mit einem Ventilex-Wirbelschichttrocknung durchgeführt, bei dem 12 % Wasser mit vorzerkleinertem LSPK vermischt wurden. Da lediglich die Effektivität der Trocknung getestet werden sollte, wurde der Presskuchen zuvor nicht thermisch behandelt, um die Blausäure abzutrennen. Bereits nach 20 Minuten erreichte der Presskuchen eine Restfeuchte von 7,4 %, was die Wirbelschichttrocknung als vielversprechende Methode für eine gleichmäßige und effiziente Trocknung bestätigt.

Allerdings kann der LSPK mit dieser Methode nicht im viskosen Zustand getrocknet werden, was Anpassungen und Optimierungen der Behandlung erforderlich machte. Ziel dieser Überlegungen war es, eine effektive Aufschließung der cyanogenen Glykoside und

Abtrennung der Blausäure zu erreichen, dabei die Wasserzugabe so gering wie möglich zu halten, sodass der behandelte LSPK weiterhin rieselfähig bleibt.

#### 4.3.3.3 Dry Extrusion als Behandlungsschritt für Leinsamenpresskuchen

##### Ermittlung der Wasserzugabe

Für die Extrusion des LSPK für die Herstellung von TVP (Dry Extrusion) wird ein rieselfähiger Rohstoff zur Dosierung in den Extruder benötigt. Daher wurde zunächst untersucht, welche minimale Wassermenge möglich ist, um den LSPK noch dosieren zu können, jedoch eine ausreichende Blausäurereduktion zu erzielen. Somit wurde der Einfluss von 30 %, 50 %, 70 % und 90 % Wasserzugabe zum LSPK mit anschließender 30-minütigen Inkubation bei 30 °C auf die Rieselfähigkeit und Blausäurereduktion untersucht (Abbildung 4.75). Die Ergebnisse zeigten, dass der Blausäuregehalt des LSPKs mit steigender Wasserzugabe leicht abnahm, die Reduktion jedoch bei allen Proben gering blieb und weiterhin deutlich über dem gesetzlichen Grenzwert an Blausäure in Leinsamen lag. Der Wassergehalt hatte somit nur einen geringen Einfluss auf die Blausäurereduktion. Da der Presskuchen bei einer Zugabe von 30 % Wasser noch rieselfähig war (Abbildung 4.76), wurde diese Menge für die weiteren Extrusionsversuche verwendet.

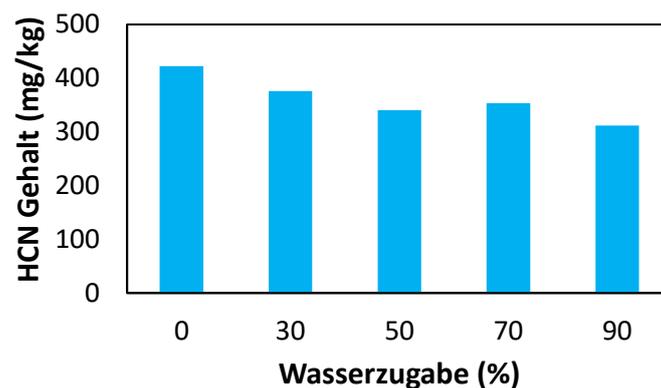


Abbildung 4.75: Blausäuregehalt (mg/kg) in Abhängigkeit von der zugegebener Menge Wasser. Der Leinsamenpresskuchen wurde anschließend bei 30 °C für 30 min im Trockenschrank inkubiert.



Abbildung 4.76: Fotos von Leinsamenpresskuchen mit verschiedenen Anteilen an Wasserzugabe von 30 % bis 90 %.

### Ermittlung der Inkubationszeit

Zunächst wurden 10,5 kg LSPK im Lödige-Mischer mit 4,5 L Wasser vermischt und bei 40 °C inkubiert, wobei die Temperatur über einen Dampferzeuger reguliert wurde. Die entstehenden Blausäuredämpfe wurden über eine Absaugung oberhalb des Mixers abgeführt und ein Gaswächter zwischen Mischer und Absaugung überwachte die Blausäurekonzentration in der Luft (Abbildung 4.77).



Abbildung 4.77: Inkubation des Leinsamenpresskuchens im Lödige-Mischer mit installierter Absaugung und Gaswächter für Blausäure.

Im ersten Versuch wurde der Blausäuregehalt des Presskuchens in Abhängigkeit von der Inkubationszeit über 2 Stunden ermittelt. Bereits nach 1 Stunde und 20 Minuten stieg bereits in der Luft die Blausäurekonzentration, gemessen am Gaswächter, auf 50 ppm an, fiel jedoch nach dem Stoppen des Mischvorgangs auf 20 ppm und darunter. Dies deutet darauf hin, dass die kontinuierliche Umwälzung während der Inkubation die Freisetzung von Blausäure fördert. Die Entwicklung des Blausäuregehalts im ungetrockneten Presskuchen (bezogen auf die Trockensubstanz) während der Inkubation ist in Abbildung 4.78 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Blausäuregehalt im LSPK nur sehr langsam abnimmt und ein Erhitzungsschritt auf 40 °C allein, wie bereits in den Screeningversuchen ermittelt, nicht ausreicht. Vielmehr dient dieser Schritt der Aktivierung der Beta-Glycosidasen zur Aufspaltung der cyanogenen Glycoside. Daher wurde in den folgenden Versuchen die Inkubationszeit auf 30 min festgelegt.

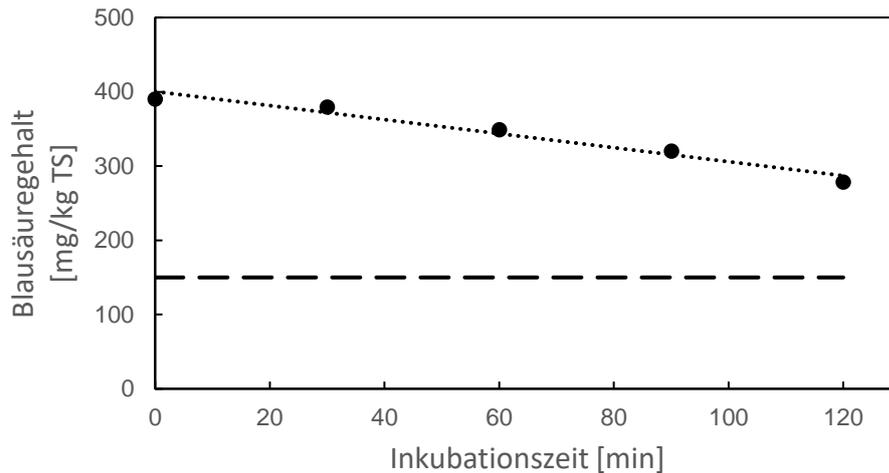


Abbildung 4.78: Entwicklung des Blausäuregehaltes (mg/kg TS, bezogen auf Trockensubstanz) im Leinsamenpresskuchen während der Inkubation. Der festgelegte Grenzwert für Leinsamenprodukte liegt bei 150 mg/kg.

#### Erzielte Blausäurereduktion durch Inkubation, Extrusion und Trocknung

In einer Versuchsreihe wurde der LSPK (10,5 kg) wie zuvor beschrieben mit 4,5 L Wasser im Lödige-Mischer vermengt und 30 Minuten bei 40 °C inkubiert. Eine zweite Versuchsreihe umfasste zusätzlich einen Erhitzungsschritt im Mischer bei 100 °C für weitere 30 Minuten nach der Inkubation. Anschließend wurden die Proben extrudiert und im Wirbelschichttrockner bei 70 °C getrocknet.

Wie in Abbildung 4.79 zu sehen ist, nahm der Blausäuregehalt in den Proben mit jedem Prozessschritt weiter ab. Der größte Abbau erfolgte während der Extrusion, da hierbei der Großteil der Blausäure freigesetzt wurde. Das anschließende Trocknen zeigte hingegen keinen nennenswerten Einfluss mehr auf den Blausäuregehalt, was auch durch die fehlende Detektion von Blausäure in der Luft durch den Gaswächter während der Trocknung bestätigt wurde. Der zusätzliche Erhitzungsschritt nach der Inkubation führte lediglich zu einer minimalen weiteren Reduktion der Blausäure, sodass aus wirtschaftlichen Gründen auf diesen zusätzlichen Schritt verzichtet werden kann.

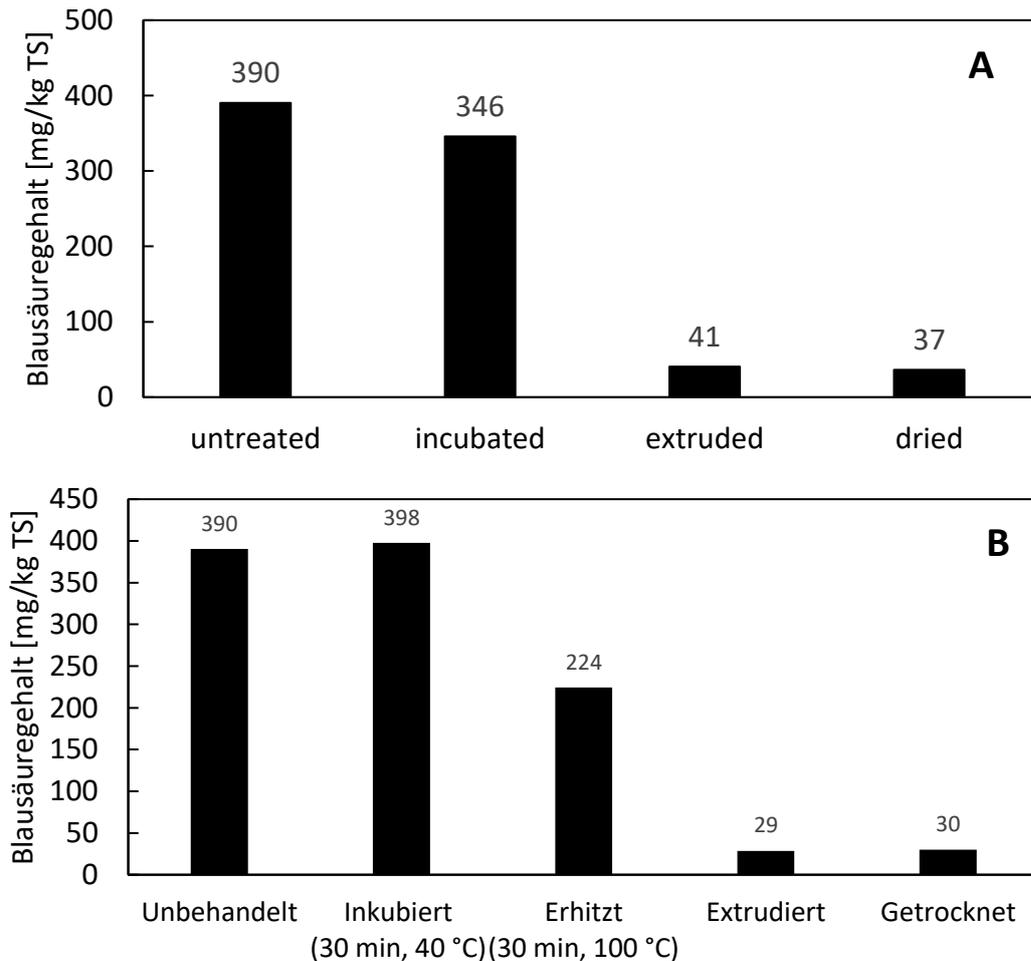


Abbildung 4.79: Entwicklung des Blausäuregehaltes (mg/kg TS, bezogen auf Trockensubstanz) in Leinsamenpresskuchen durch die Behandlungsschritte:

**A:** Inkubation (30 min, 40 °C), Extrusion und Trocknung im Wirbelschichttrockner bei 70 °C und **B:** mit zusätzlichem Erhitzungsschritt nach der Inkubation für 30 min bei 100 °C.

Das DIL hat den Blausäuregehalt vor der Behandlung des Presskuchens auf 361 mg/kg (auf Feuchtmasse bezogen) bestimmt, beziehungsweise 390 mg/kg TS (bezogen auf die Trockensubstanz). Eine externe Analyse durch das Labor SGS ergab einen Blausäuregehalt von 404 mg/kg (auf Feuchtmasse bezogen). Durch die Behandlung aus Inkubation, Extrusion und Trocknung konnte der Blausäuregehalt auf 30 bis 40 mg/kg TS (bezogen auf die Trockensubstanz) reduziert werden (gemessen am DIL), was unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 150 mg/kg liegt.

#### Produktentwicklung mit Zusatz von Soja, Erbse und Ackerbohne

Um sowohl die Bitterkeit zu reduzieren als auch die fleischartige Textur zu verbessern, wurden nach der Inkubation verschiedene Proteine zum LSPK beigemischt. Erbsen-, Ackerbohnen- und Sojaprotein wurden in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen mit dem LSPK extrudiert und anschließend die getrockneten Extrudate hinsichtlich der Expansion, Optik und Geschmack bewertet. In Abbildung 4.80 sind die erzeugten Extrudate im Vergleich zu einem kommerziell verfügbaren Extrudat auf Basis von Sonnenblumenprotein dargestellt. Die

Abbildung zeigt, dass durch die Zugabe eines zusätzlichen Proteins die Textur der Extrudate lockerer und aufgerissener wird, was für die Anwendung als Fleischersatz vorteilhaft ist.

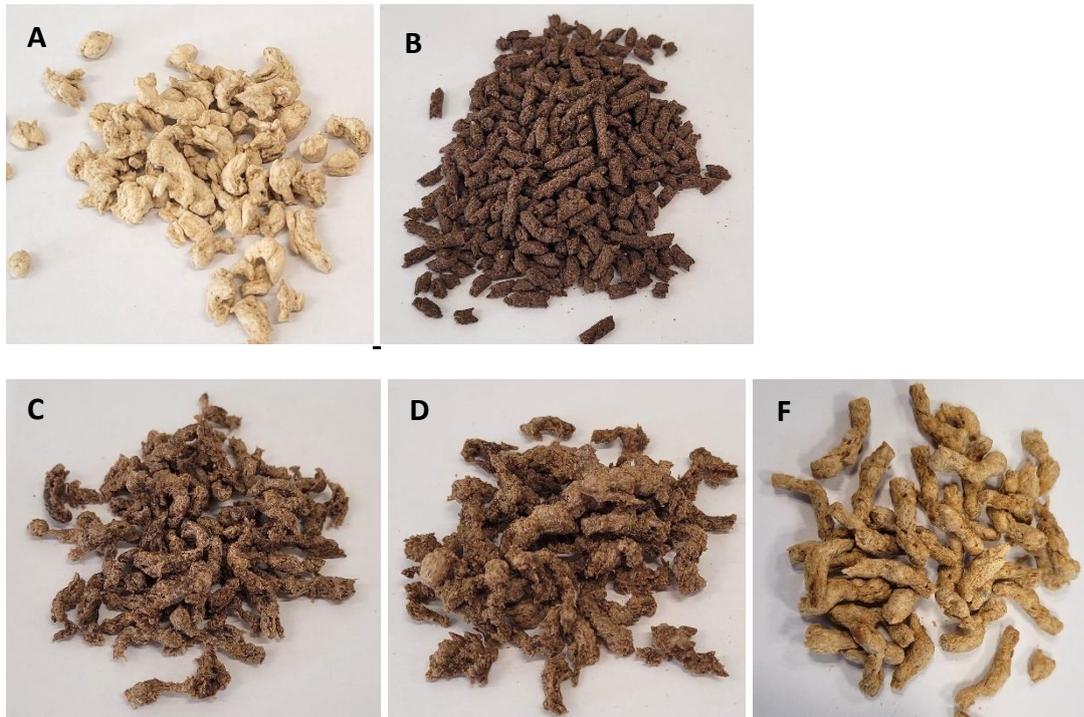


Abbildung 4.80: Extrudate; A: Referenz: SonnenblumenHack HO von SunflowerFamily GmbH; B: Leinsamenpresskuchen (100 %) C: Leinsamenpresskuchen mit Sojaprotein, D: Leinsamenpresskuchen mit Erbsenprotein, F: Leinsamenpresskuchen mit Ackerbohnenprotein

Durch Mischung des LSPK zusammen mit Soja oder Erbse im Verhältnis 30:70 (LSPK zu pflanzlichem Protein) konnte der Blausäuregehalt des Extrudates (nach Inkubation, Extrusion und Trocknung) auf 9 mg/kg TS (mit Soja) und 11,4 mg/kg TS (mit Erbse) reduziert werden. Der Blausäuregehalt des LSPK ohne Zugabe von einem weiteren pflanzlichen Protein lag bei 37 mg/kg TS.

#### 4.3.3.4 High Moisture Extrusion als Behandlungsschritt für Leinsamenpresskuchen

Inkubierter LSPK wurde mit Erbsenproteinisolat im Mischungsverhältnis 20:80 und 30:70 extrudiert und in einer angeschlossenen Kühldüse texturiert. Während der Versuche konnte am offenen Gehäusesegment ein Austritt an Blausäure verzeichnet werden (Versuch A in Abbildung 4.81). Die resultierende Extrudate zeigten eine fasrige Struktur, waren jedoch etwas teigig.



Abbildung 4.81: High Moisture Extrudate;

A: Extrusion mit offenem Gehäusesegment, Mischung aus 70 % Erbsenprotein + 30 % LSPK;

B: Extrusion mit geschlossenem Gehäusesegment, Mischung aus 70 % Erbse + 30 % LSPK;

C: Extrusion mit geschlossenem Gehäusesegment, Mischung aus 80 % Erbse + 20 % LSPK

Tabelle 64: Blausäuregehalt der Nassextrudate, gemessen am DIL

Bezeichnung	Trocken- masse TM  g/100g	Blausäure gesamt DIL  mg/kg	Blausäure bezogen auf TS DIL mg/kg TM
LSPK nach Inkubation 30 min, 40 °C (vor Extrusion, ohne Trocknung)	68,82	29,4	42,7
Nassextrudat, LSPK 30/70 mit Erbse, extrudiert mit offenem Barrel	44,08	0,96	2,2
Nassextrudat, LSPK 30/70 mit Erbse, extrudiert mit geschlossenem Barrel	43,56	0,95	2,2
Nassextrudat, LSPK 20/80 mit Erbse, extrudiert mit geschlossenem Barrel	44,81	0,68	1,5

Der Blausäuregehalt der Nassextrudate ist in Tabelle 64 dargestellt. Auffällig ist, dass der inkubierte LSPK vor der Extrusion bereits einen Blausäuregehalt von nur 42,7 mg/kg aufwies, während dieser in früheren Messungen bei etwa 350 mg/kg TS lag. Die Nassextrudate zeigten Blausäuregehalte zwischen 1,5 und 2,2 mg/kg TS, was als sehr niedrig einzustufen ist. Es ist jedoch anzunehmen, dass der tatsächliche Gehalt höher liegt und die Differenz auf Unstimmigkeiten in der Messmethode zurückzuführen ist. Für eine weiterführende Produktentwicklung sollte der Blausäuregehalt durch mindestens zwei unabhängige Labore überprüft werden. Dennoch lässt sich feststellen, dass die High Moisture Extrusion eine wirksame Methode zur Reduktion des Blausäuregehalts darstellt, wie der Vergleich zwischen der inkubierten Probe und den extrudierten Proben zeigt. Aufgrund der sehr niedrigen

Blausäuregehalte konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchen mit offenem und geschlossenem Extrudersegment zur zusätzlichen Entgasung während der Extrusion festgestellt werden.

#### **4.3.4 TVH IV: Versuche mit besten Rohstoffen (DIL)**

Durch die ersten Extrusionsversuche konnte der Blausäuregehalt im Leinsamenpresskuchen deutlich reduziert werden. Der ursprüngliche Blausäuregehalt des LSPKs, der am DIL bestimmt wurde, lag bei 390 mg/kg TS (Trockensubstanz) bzw. 361 mg/kg bezogen auf die Feuchtmasse, was einem hohen Blausäuregehalt entspricht. Durch die Behandlungsschritte – Inkubation, Extrusion und Trocknung – konnte dieser erfolgreich auf 37 mg/kg TS bzw. 35 mg/kg (bezogen auf die Feuchtmasse) gesenkt werden, womit der Wert unter dem gesetzlichen Grenzwert liegt

In weiteren Versuchen sollte ein Leinsamenpresskuchen mit einem bereits geringen Blausäuregehalt als Ausgangsrohstoff verwendet werden, der anschließend mit einem Verfahren behandelt wird, das den Blausäuregehalt weiter deutlich senkt. Es handelte sich wiederum um die braunsamige Sorte Lirina, die am häufigsten in der Speiseölverarbeitung verwendet wird. Der Blausäuregehalt wurde vom externen Labor SGS auf 209 mg/kg (Feuchtmasse) bestimmt, während das DIL einen Gehalt von nur 39,9 mg/kg (Feuchtmasse) ermittelte.

Für den Behandlungsprozess wurde der Extrusionsprozess als erfolgreiche Methode zur Reduktion des Blausäuregehalts ausgewählt, der aus den Schritten Inkubation (30 min bei 40 °C), Extrusion und anschließender Trocknung (70 °C) besteht. Die Ergebnisse der Kombination aus Leinsamenpresskuchen mit niedrigem Blausäuregehalt und der effektiven Methode zur Blausäurereduktion sind in Tabelle 65 zusammengefasst. Zusätzlich wurden für eine Produktentwicklung LSPK nach der Inkubation mit Erbsenprotein (Firma Roquette) oder Ackerbohnenprotein (Vestkorn) in Verhältnis 30:70 oder 40:60 (LSPK zu Protein) vermischt und gemeinsam extrudiert und getrocknet.

#### Optimierung des Extrusionsprozesses

Die ersten Extrusionsversuche wurden mit einem niedrigen Durchsatz von 6-9 kg/h auf einem Doppelschneckenextruder ZSK 27 durchgeführt. Um einen optimalen Füllgrad des Extruders zu erreichen, war jedoch ein höherer Durchsatz erforderlich. Durch eine Erhöhung des Durchsatzes konnten zudem die Voraussetzungen für ein Upscaling auf größere Extruder geschaffen werden. Im Rahmen der Optimierung wurden die Prozesseinstellungen angepasst, um den Durchsatz zu steigern und gleichzeitig die Produktqualität zu gewährleisten. Dabei wurde überprüft, ob auch bei erhöhtem Durchsatz eine ausreichende Reduktion des Blausäuregehalts erzielt werden konnte. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 65 zusammengefasst als LSPK „optimiert“ bzw. „maximaler Durchsatz“.

Tabelle 65: Blausäuregehalt von Leinsamenpresskuchen (LSPK) durch die Behandlung bestehend aus Inkubation (30 min, 40 °C), Extrusion und Trocknung (70 °C) im Vergleich zur Referenz (unbehandelter LSPK);

Bezeichnung	Durchsatz Extrusion kg/h	Trocken- masse TM g/100g	Blausäure gesamt DIL mg/kg	Blausäure bezogen auf TS DIL mg/kg TM	SGS mittels Titration mg/kg	Eurofins mittels NMR mg/kg
LSPK unbehandelt	-	91,9	39,9	43,6	209	-
LSPK behandelt	6	91,1	6,9	7,6	-	-
LSPK behandelt, optimiert	13	86,6	6,5	7,5	-	-
LSPK behandelt, max.	40	90,0	6,1	6,7	-	-
Durchsatz						
LSPK nicht inkubiert, jedoch extrudiert und getrocknet	8,58	92,9	9,4	10,2	-	-
Durchsatz						
LSPK 30/70 mit Erbse	8,75	93,8	3,9	4,2	92,4	63
LSPK 30/70 mit Erbse, optim.	17,5	91,1	3,3	3,6	75,5	67
LSPK 40/60 mit Erbse	17,5	87,2	3,7	4,2	89	93
LSPK 40/60 mit Erbse, max.	40	80,3	2,0	2,5	-	-
Durchsatz						
LSPK 30/70 mit Ackerbohne	8,75	87,4	2,2	2,5	-	-
LSPK 30/70 mit Ackerbohne, optimiert	17,5	93,6	2,1	2,3	-	-
LSPK 40/60 mit Ackerbohne	17	93,4	2,8	3,0	-	-
LSPK 30/70 mit Ackerbohne, max. Durchsatz	25,5	93,1	2,9	3,1	-	-

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass der Blausäuregehalt aller Proben, einschließlich des unbehandelten LSPK, bereits unter dem gesetzlichen Grenzwert von 150 mg/kg liegt – zumindest laut den Analysen des DIL. Um die Ergebnisse zu validieren, wurden Vergleichsmessungen in zwei weiteren Laboren (SGS und Eurofins) durchgeführt. Dabei ergab die Analyse von SGS für den Ausgangsgehalt des unbehandelten LSPK einen Wert von 209 mg/kg. Trotz dieser Abweichung belegen die Ergebnisse vom DIL, dass der Blausäuregehalt durch die Behandlung des LSPK erheblich reduziert werden konnte. Dies gilt auch für optimierte Extrusionsbedingungen mit höheren Durchsätzen von 13 kg/h sowie den maximalen Durchsatz des verwendeten Setups und Extruders von 40 kg/h. Eine Mischung aus LSPK mit Erbsen- oder Ackerbohnenprotein und anschließender gemeinsamer Extrusion führte zu einer weiteren Reduktion des Blausäuregehalts. Vergleichsmessungen bei SGS und Eurofins ergaben für LSPK-Erbsen-Extrudate bei einem Durchsatz von 17,5 kg/h Blausäuregehalte von 76 mg/kg (SGS) bzw. 67 mg/kg (Eurofins) bei einem Mischungsverhältnis von 30:70 (Presskuchen zu Erbse) und 89 mg/kg (SGS) sowie 93 mg/kg (Eurofins) bei einem Verhältnis von 40:60. Diese Werte liegen unterhalb des gesetzlichen Grenzwerts und ermöglichen den Einsatz der Produkte, zum Beispiel als TVP als Fleischersatz.

Die Messergebnisse des DIL zeigten jedoch bei LSPK, der ohne vorherige Inkubation extrudiert und getrocknet wurde, einen ungewöhnlich niedrigen Blausäuregehalt von 9,4 mg/kg (bezogen auf Feuchtmasse). Da die anderen Messergebnisse aus dieser Versuchsreihe

deutlich von denen der beiden akkreditierten Labore abweichen, sollte der Blausäuregehalt in einer erneuten Untersuchung überprüft werden, bevor eine Schlussfolgerung zur Notwendigkeit der Inkubation getroffen werden kann.

#### Problematik der Ergebnisse

Das DIL hat eine eigene Methode zur Blausäureanalytik auf Basis der amtlichen Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 64 LFGB F0093 etabliert, die in Laborvergleichen (siehe Abschnitt 4.5 Round Table) bestätigt wurde. Bei ganzen Leinsamen und Leinsamenpresskuchen waren die Messergebnisse des DIL mit denen von SGS vergleichbar. Allerdings sind die zuletzt ermittelten Blausäuregehalte in der Versuchsreihe zur Extrusion kritisch zu betrachten, da auffallend niedrige Werte gemessen wurden. Fehler in der Analytik selbst konnten ausgeschlossen werden, da kontinuierlich eine Referenzprobe mitgeführt wurde, die reproduzierbare und präzise Ergebnisse lieferte. Trotz dieser internen Validierung konnten die beobachteten Diskrepanzen im Projektverlauf nicht vollständig geklärt werden. Das Forschungsprojekt Linovit setzt sich daher weiterhin dafür ein, dass in Deutschland eine standardisierte Analyseverfahren etabliert wird, die auch komplexe Ausgangsmaterialien wie Leinsamenpresskuchen zuverlässig und genau messen kann.

### **4.4 AP 3: Nutzung von Reststoffen aus der Ölpresung für innovative und funktionelle Lebensmittel aus Leinsamen**

#### **4.4.1 TVH I: Wirtschaftliche Abschätzung der Verfahren (DIL)**

Das entwickelte Verfahren aus Inkubation, Extrusion und Trocknung erwies sich als geeignet für die Reduktion von Blausäure von Leinsamenpresskuchen. Zur Vorbereitung einer Implementierung im industriellen Maßstab für einen Extrusionsdurchsatz von 500 bis 1000 kg/h sollen die wirtschaftlichen Aspekte für die einzelnen Verfahrensschritte betrachtet werden:

#### Investitionskosten:

**Vermahlung:** Für die Verarbeitung des Leinsamenpresskuchens ist eine Vermahlung erforderlich, um das Material für die Extrusion dosierbar zu machen. Die Vermahlung wurde im Projekt extern mittels Stiftmühlen durchgeführt, wobei Kosten von 1,90 €/kg zuzüglich Versand anfielen.

**Inkubation:** Die Inkubation wurde am DIL in einem doppelwandigen Pflugscharmischer durchgeführt. Hierbei wurde der Leinsamenpresskuchen mit 30 % Wasser versetzt und bei einer Temperatur von 40 °C homogenisiert. Die Schüttdichte des zerkleinerten Presskuchens beträgt 0,499 g/cm<sup>3</sup>, was für die Verarbeitung von 500 kg bzw. 1000 kg ein Behältervolumen von 1000 Litern bzw. 2000 Litern erforderlich macht.

Mögliche Maschinenoptionen: Geeignete Pflugscharmischer der Firma Gebr. Loedige Maschinenbau GmbH umfassen das Modell FKM 1200 mit einem maximalen Arbeitsvolumen von 1000 Litern und einem Preisrahmen von 88.000 € bis 210.000 €, je nach Spezifikation. Für höhere Anforderungen bietet sich das Modell FKM 2400 mit einem maximalen

Arbeitsvolumen von 2000 Litern an, das je nach Ausstattung zwischen 130.000 € und 280.000 € liegt.

**Extrusion:** Die Extrusionsversuche wurden mit einem Doppelschneckenextruder ZSK 27 der Firma Coperion durchgeführt, der für Durchsatzbereiche von 10 bis ca. 120 kg/h ausgelegt ist, je nach Prozessanforderungen. Für den industriellen Einsatz sind jedoch größere Doppelschneckenextruder erforderlich, die vom Hersteller speziell auf den gewünschten Durchsatzbereich angepasst werden müssen. Ein geeignetes Modell ist beispielsweise der Polytwin BCTG der Firma Bühler AG.

Die Investitionskosten für eine komplette Extrusionsanlage, inklusive Rohstoffhandling, Mahlung, Siebung, Abfüllung sowie passender Trocknungstechnologie zur Produktion von TVP, liegen bei rund 3 Millionen Euro. Da während des Extrusionsprozesses toxische Blausäuredämpfe austreten, ist zudem eine spezielle Absauganlage erforderlich, die zusätzliche Budgetmittel beansprucht.

**Trocknung:** Abhängig vom gewählten Extruderhersteller kann bereits ein Trockner im Lieferumfang für die Extrusionsanlage integriert sein. Andernfalls ist der Kauf eines separaten Trockners erforderlich. Im Forschungsprojekt kamen ein Chargen-Wirbelschichttrockner der Firma Glatt für kleinere Durchsatzbereiche von 3 kg pro Batch sowie ein kontinuierlicher Wirbelschichttrockner der Firma Ventilex für den industriellen Maßstab zum Einsatz. Ein Wirbelschichttrockner ist aufgrund seiner Effizienz und gleichmäßigen Trocknungseigenschaften zu empfehlen. Für ein solches System sollten Investitionskosten von bis zu 300.000 € eingeplant werden.

**Alternative Behandlung:** Für die alternative Behandlung des Leinsamenpresskuchens, bestehend aus Mischen, Bedampfung und Trocknung, bietet sich ein VAS-Mischer der Firma Glass GmbH & Co. KG an. Erste Versuche im kleineren Maßstab mit dem Modell VAS 150 zeigten vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Reduktion des Blausäuregehalts. Der vielseitige High-Speed-Mixer ist in größeren Modellen mit einem Fassungsvermögen von 1000 bis 1500 Litern erhältlich und ermöglicht eine effiziente Prozessführung. Die Kosten für ein VAS Mischer 1000 liegen derzeit inklusive Dosierung und Steuerung bei ca. 350.000 €. Ein größerer Mischer, VAS 1500, bei ca. 420.000 €. Nach dem Mischprozess ist eine abschließende Trocknung mittels Wirbelschichttrockner erforderlich, um den gewünschten Trocknungsgrad zu erreichen.

### Kosten und Wirtschaftlichkeit

Der Behandlungsprozess für LSPK zur Blausäurereduktion umfasst die Schritte Zerkleinerung, Inkubation, Extrusion und Trocknung und ist semi-kontinuierlich angelegt. Während Vermahlung, Extrusion und Trocknung kontinuierlich ablaufen können, erfolgt die Inkubation in Batch-Prozessen. Die Investitionskosten für eine vollständige Anlage belaufen sich auf bis zu 3,3 Mio. Euro, zusätzlich sind Kosten für eine Abluftreinigungs- und Sicherheitsausstattung einzuplanen. Die Zerkleinerung kann entweder extern durchgeführt oder in die Anlage integriert werden, was zusätzliche Investitionskosten erfordert.

Der Prozess mit einem VAS-Mischer und anschließender Wirbelschichttrocknung erfordert geringere Investitionskosten, läuft jedoch überwiegend im Batch-Betrieb ab und ist damit weniger kontinuierlich als der entwickelte Prozess bestehend aus Extrusion. Die Effektivität der Blausäurereduktion sollte in weiteren Versuchen überprüft werden, um die Eignung dieses Verfahrens zu bestätigen.

Eine Alternative zur Anschaffung eigener Maschinen zur industriellen Blausäurereduktion könnte die Auslagerung an einen Lohnproduzenten darstellen, wodurch hohe Investitionskosten vermieden würden. Eine Herausforderung dabei sind jedoch die entstehenden toxischen Blausäuredämpfe. Viele Lohnproduzenten im Bereich Extrusion verfügen zwar über Abluftsysteme, jedoch sind diese häufig nicht für den Umgang mit hochtoxischen Stoffen wie Blausäure ausgelegt. Ein zusätzlicher Aufwand zur Anpassung oder Nachrüstung der Abluftreinigung könnte daher notwendig sein, was die Kosten und Umsetzbarkeit beeinflussen könnten.

Ein mögliches Endprodukt aus Leinsamenpresskuchen, das im Projekt entwickelt und verkostet wurde, ist ein texturiertes Pflanzenprotein (TVP) mit Erbsenprotein, das als Fleischersatz verwendet werden kann. Ein Referenzprodukt wie das "Sunflower Family Bio Sonnenblumen Hack" ist im Einzelhandel, etwa bei Rewe, zu einem Preis von 4,49 € für 76 g erhältlich. Dies entspricht einem Kilopreis von 59,08 €. Zieht man die Handelsspanne sowie die erforderliche Gewinnmarge des produzierenden Unternehmens ab, ergibt sich ein Zielpreis für die Herstellungskosten von etwa 40 % des Endverkaufspreises. Daraus folgt, dass sich die Herstellkosten des Produkts inklusive Rohstoff, Verpackungs- und Lieferkosten auf rund 23,63 €/kg belaufen sollten, um wettbewerbsfähig zu sein.

Die Herstellungskosten am DIL für den Prozess aus externer Vermahlung, Inkubation im Lödige-Mischer (10,5 kg LSPK plus 4,5 kg Wasser), Extrusion mit einem Durchsatz von 6 kg/h (ohne weitere Pflanzenproteine) und anschließender Trocknung im Batch-Betrieb im Wirbelschichttrockner belaufen sich auf 15,09 €/kg (einschließlich Personalkosten, Wasser und Strom, jedoch ohne Gewinnaufschlag). Optimierungen im industriellen Maßstab könnten die Produktionskosten weiter reduzieren. Da jedoch am DIL keine geeignete Ablufttechnik vorhanden ist, ist eine sichere Blausäurereduktion im größeren Maßstab hier aktuell nicht möglich.

#### **4.4.2 TVH II: Prüfung des Leinmehls in Bestandsrezepturen (ÖM)**

Das ursprüngliche Ziel war es, das Leinmehl in den Bestandsrezepturen zu testen. Da die entsprechenden Produkte jedoch zu Beginn des Projekts eingestellt worden sind, konnte dieser Test nicht durchgeführt werden.

Stattdessen wurde das Leinmehl in verschiedenen anderen Anwendungen/Produkten getestet.

- Vegane Mayonnaisen
- Rote Grütze
- Pflanzen Drink

- Pudding
- Fruchtkonfekt
- Eiscreme
- Nudeln
- Brot

Bei den Versuchen wurde die emulgierende, verdickende und bindende Eigenschaft des Produkts ausgenutzt. In der veganen Mayonnaise und den Nudeln wurde das Leinmehl als Ei-Ersatz eingesetzt.

Weitere Anwendungstests/Produktentwicklungen in Zusammenarbeit mit dem DIL waren die TVP-Produkte aus Lein und Erbse (Abschnitt 4.3.3.3) sowie die HME (Abschnitt 4.3.3.4).

Anwendung Leinmehl in verschiedenen Produkten:



Abbildung 30: Veganes Erdbeer- und Schokoeis



Abbildung 31: Vegane Tomaten-Mayonnaise



Abbildung 32: Leinsamennudel



Abbildung 33: Brot mit Leinsamenmehl

### **4.4.3 TVH III: Funktionalität, Lebensmittelsicherheit und Qualität von behandeltem Presskuchen (ÖM, DIL)**

#### **4.4.3.1 Funktionalität von im Labormaßstab behandelten sowie von sprühgetrockneten Leinsamenpresskuchen (DIL)**

Um die Auswirkungen der Blausäurereduktion auf die funktionellen Eigenschaften von LSPK zu untersuchen, wurden verschiedene physikalische Analysen durchgeführt. Dazu zählten die Bestimmung der Emulgierkapazität, Schaumbildungseigenschaften, Wasserbindungs- und Wasserimmobilisierungskapazität.

In den ersten Versuchen wurde unbehandelter LSPK als Referenz mit behandelten Proben verglichen. Die behandelten Proben umfassten LSPK, der im Labormaßstab durch Inkubation (1 h, 30 °C), Dämpfen (3 h, 100 °C) und Trocknen (48 h, 30 °C) aufbereitet wurde, sowie LSPK, der im industriellen Maßstab durch Erhitzung im Lödige-Mischer (3 h, 100 °C) und anschließende Sprühtrocknung behandelt wurde.

#### Emulgierkapazität

In Abbildung 4.71 wird die Emulgierfähigkeit von unbehandeltem und behandeltem LSPK verglichen. Der unbehandelte LSPK konnte 70 % Öl bei Raumtemperatur und 67,5 % Öl bei 60 °C emulgieren. Der im Labormaßstab behandelte LSPK (inkubiert, gedämpft und getrocknet) emulgierte 65 % Öl bei Raumtemperatur und 60 % Öl bei 60 °C. Der sprühgetrocknete LSPK, der zuvor erhitzt wurde, zeigte die beste Emulgierfähigkeit und konnte 75 % Öl bei Raumtemperatur und 72,5 % Öl bei 60 °C aufnehmen. Diese verbesserte Emulgierkapazität nach der Sprühtrocknung ist besonders vorteilhaft für verschiedene Produktanwendungen, etwa als Ei-Ersatz oder in Milchprodukten mit hohem Fettgehalt wie Sahneersatz.

Der geringere Ölanteil in der im Labormaßstab behandelten Probe lässt sich durch den Erhitzungs- und Dämpfungsschritt erklären, der die Eigenschaften der Lösung verändert und die Menge an löslichem Protein verringert, die eine Emulsion bilden können. Dennoch ist die Emulgierfähigkeit aller Proben im Vergleich zu anderen Lebensmitteln wie Ei (71 % Öl) und Erbsenprotein (69 % Öl) bemerkenswert. Die behandelten LSPK zeigen auch bei einer geringfügigen Abnahme der Emulgierfähigkeit weiterhin großes Potenzial für den Einsatz in verschiedenen Lebensmittelanwendungen.

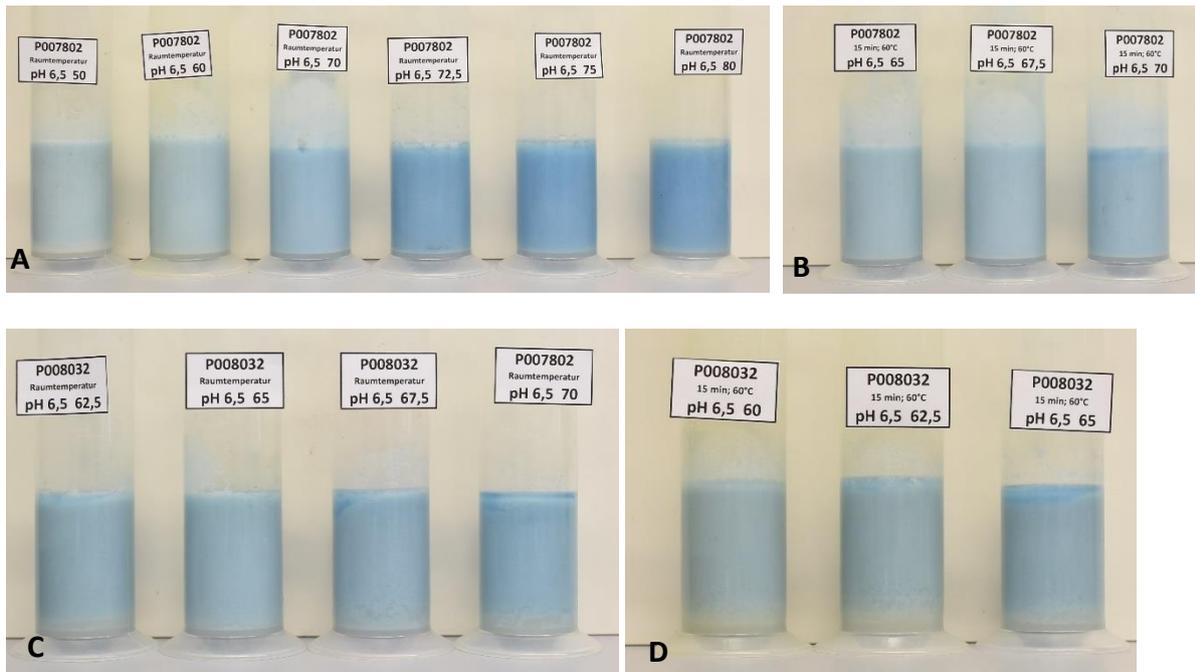


Abbildung 4.82: Emulgierfähigkeit von Leinsamenpresskuchen

**A:** LSPK unbehandelt bei Raumtemperatur **B:** LSPK unbehandelt bei 60 °C

**C:** LSPK behandelt (Inkubation (1 h, 30 °C), Dämpfen (3 h, 100 °C) und Trocknen (48 h, 30 °C) bei Raumtemperatur

**D:** LSPK behandelt (analog zu C) bei 60 °C

### Schaumbildung

Die Schaumbildungseigenschaften von LSPK wurden untersucht, um deren Eignung für verschiedene Lebensmittelanwendungen zu bestimmen.

Die Ergebnisse zeigen (Abbildung 4.83), dass das Schaumvolumen aller Proben zeitabhängig war und nach 15 Minuten auf 0 ml abnahm. Unbehandelter und behandelten LSPK, untersucht bei Raumtemperatur, wiesen niedrigere Schaumvolumen auf, als ihre bei 60°C erhitzten Replikate, die während der ersten 15 Minuten eine langsamere Abnahme des Schaumvolumens aufzeigten. Das Erhitzen der Proben auf 60°C verbesserte die Schaumstabilität, wahrscheinlich aufgrund der Veränderung der Proteinkonfiguration. In erhitzten Proben entfalten sich die Aminosäureketten, was mehr Raum für Luftblasen schafft und somit eine bessere Schaumbildung ermöglicht.

Insgesamt hatten alle Proben aus Leinsamenpresskuchen jedoch schwache Schaumbildungseigenschaften im Vergleich zu anderen Samen und Hülsenfrüchten wie Sojabohnen und Sonnenblumenkernen. Behandelte LSPK ist daher nicht geeignet für Lebensmittel, die gute Schaumbildungseigenschaften erfordern, wie z.B. Eiscreme. Ein Einsatz als Milchersatz ohne Schäumungsfunktion ist möglich, aber nicht als Barista-Milchersatz.

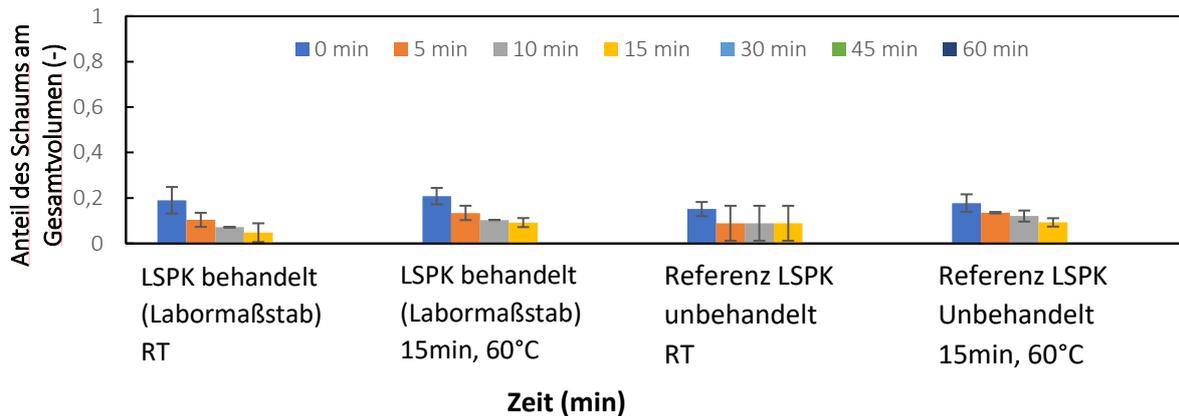


Abbildung 4.83: Schaumbildungseigenschaften von Leinsamenpresskuchen (LSPK) bei Raumtemperatur (RT) und bei 60 °C; behandelter LSPK: Inkubation (1 h, 30 °C), Dämpfen (3 h, 100 °C) und Trocknen (48 h, 30 °C) im Vergleich zur Referenz unbehandelt

### Wasserimmobilisierung

Die Wasserimmobilität beschreibt den Anteil des Wassers in einem Material, der nicht frei verfügbar ist und festgehalten wird. Dieses Wasser steht nicht für Reaktionen oder als Lösungsmittel zur Verfügung, da es in der Materialstruktur eingeschlossen ist.

Die Ergebnisse der Wasserimmobilisierung sind in Abbildung 4.84 dargestellt. Bei einer Zentrifugationsbeschleunigung von 2000 g lag der Anteil des freigesetzten Wassers bei allen Proben bei 0 g/100g. Mit steigender Beschleunigung erhöhte sich der Anteil des abzentrifugierbaren Wassers bei den unbehandelten und behandelten LSPK-Proben bei Raumtemperatur. Das geringste Wasser konnte bei unbehandeltem LSPK bei 60 °C sowie bei sprühgetrockneten Proben abgetrennt werden, was auf die besten Wasserimmobilisierungseigenschaften hinweist, da weniger freies Wasser vorhanden ist, das für Quellungen, Lösungsvorgänge und enzymatische Reaktionen genutzt werden kann.

Insgesamt wiesen jedoch alle Proben gute Wasserimmobilisierungseigenschaften auf. Gute Wasserimmobilität ist besonders wichtig für Lebensmittelanwendungen, bei denen die Textur und Struktur stabil bleiben sollen, auch bei längerer Lagerung. Beispiele hierfür sind Bindemittel und Verdickungsmittel in Saucen, Suppen und Dressings, wo eine gleichmäßige Konsistenz wichtig ist. Ebenso ist es für Backwaren wie Brot von Bedeutung, um die Feuchtigkeit zu halten und eine saftige Krume sowie eine längere Frischhaltung zu gewährleisten.

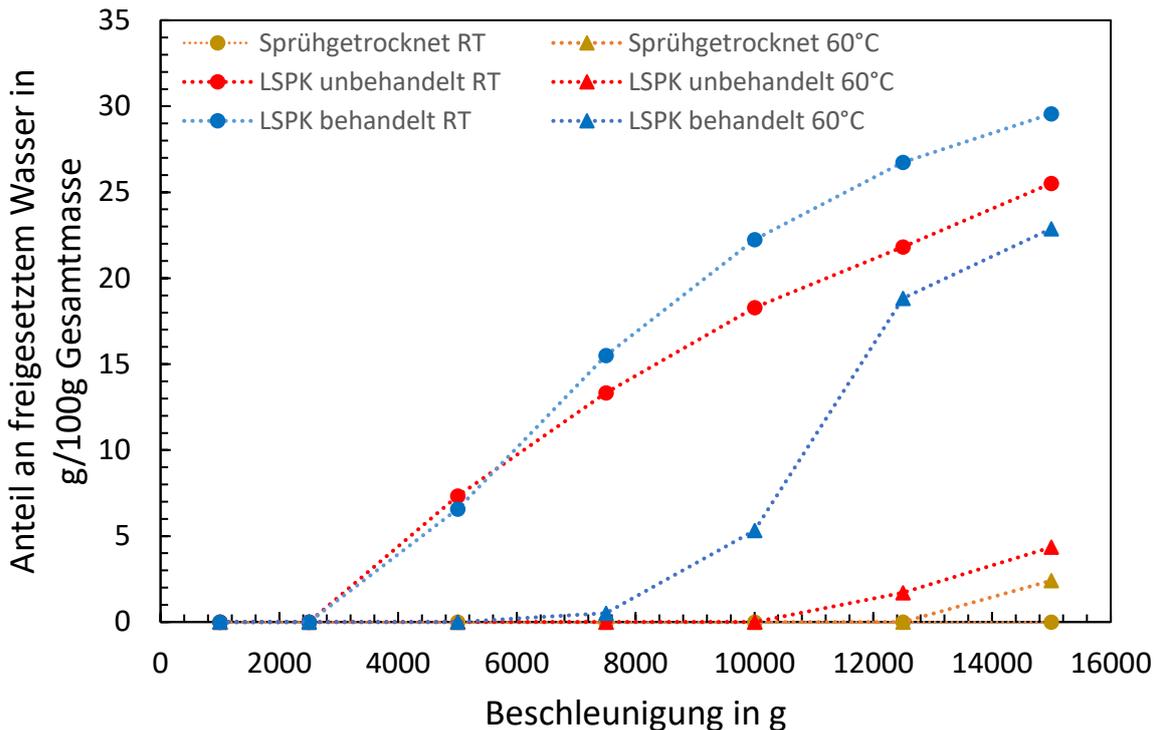


Abbildung 4.84: Anteil an abzentrifugiertem/freigesetztem Wasser (g/100 g Gesamtmasse) von Leinsamenpresskuchen (LSPK) in Abhängigkeit der Beschleunigung bei der Zentrifugation

### Wasserbindung

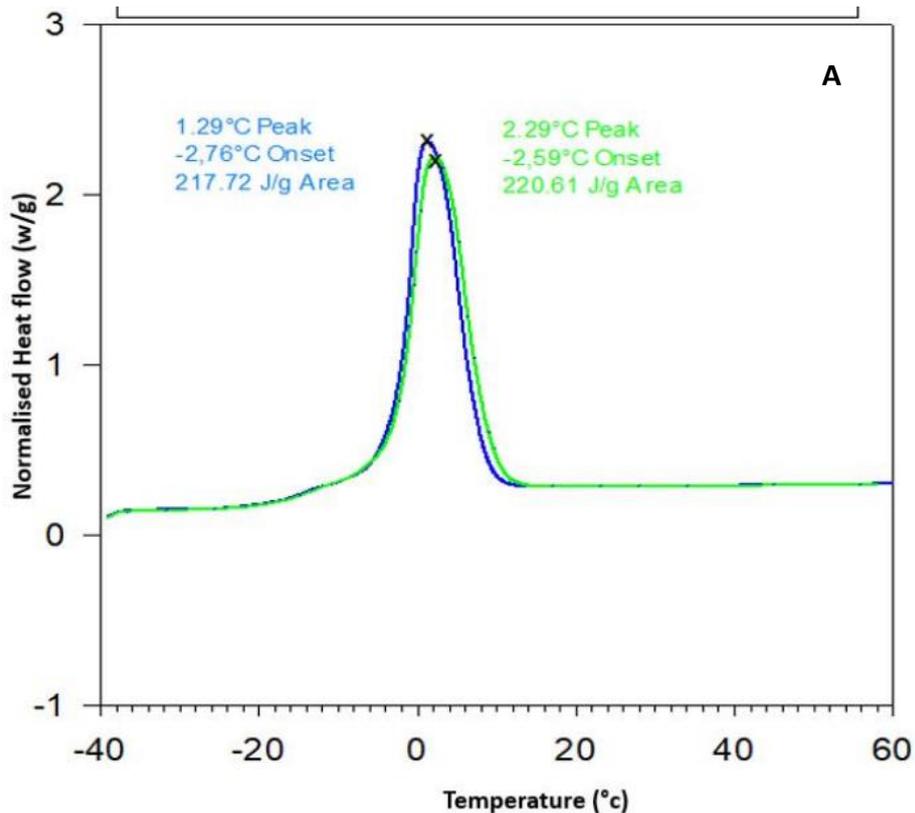
Die Wasserbindung beschreibt die Fähigkeit eines Materials, Wasser aufzunehmen und zu halten. Das gebundene Wasser kann in chemischen oder physikalischen Wechselwirkungen mit dem Material stehen, wie z.B. durch Wasserstoffbrücken oder van-der-Waals-Kräfte. Diese Eigenschaft ist entscheidend für viele Lebensmittelanwendungen, da sie die Textur, Konsistenz und Haltbarkeit der Produkte beeinflusst.

Die Analyse der Wasserbindung erfolgte durch eine DSC-Messung (Abbildung 4.85). Hierbei wurden die gefrorenen Proben langsam aufgetaut, und der gemessene Peak in der DSC-Kurve zeigt den Phasenübergang des Wassers von festem Eis zu flüssigem Wasser. Anschließend nahm der Wärmestrom wieder ab. Die Fläche unter dem Peak stellt die benötigte Enthalpie (Wärmemenge) dar, die erforderlich ist, um den Phasenübergang zu ermöglichen. Die Höhe der Enthalpie dient als Indikator für den Anteil des freien Wassers in einer Probe: Eine geringere Enthalpie deutet darauf hin, dass weniger Energie benötigt wird, um den Aggregatzustand zu ändern, was bedeutet, dass weniger freies Wasser und mehr gebundenes Wasser in der Probe vorhanden ist. Freies Wasser bildet eher Eiskristalle bei niedrigen Temperaturen, während gebundenes Wasser weniger leicht kristallisiert.

Die ermittelte Enthalpie lag bei unbehandeltem LSPK bei 219 J/g, bei dem behandeltem LSPK im Mittel bei 225 J/g und bei der sprühgetrockneten Probe bei 262 J/g. Der unbehandelte LSPK benötigte somit eine geringere Enthalpie für den Übergang von fest zu flüssig als die behandelten Proben. Dies deutet darauf hin, dass der unbehandelte LSPK eine etwas bessere Wasserbindungskapazität aufweist, da weniger Energie erforderlich war, um das Wasser zu schmelzen. In dieser Probe wurden weniger Eiskristalle gebildet, was auf eine bessere Bindung

des Wassers hinweist. Dennoch zeigten auch die behandelten Proben gute Wasserbindungseigenschaften.

Gute Wasserbindung ist entscheidend für Lebensmittel, die viel Wasser aufnehmen und halten sollen, um ihre Masse und Textur zu verbessern. Beispiele hierfür sind Fleischersatzprodukte, wo eine fleischartige Textur und Saftigkeit erreicht werden soll, sowie Teige für Gebäck und Pasta, wo ein hohes Wasseraufnahmevermögen zu einer besseren Teigausbeute und Verarbeitung führt.



B

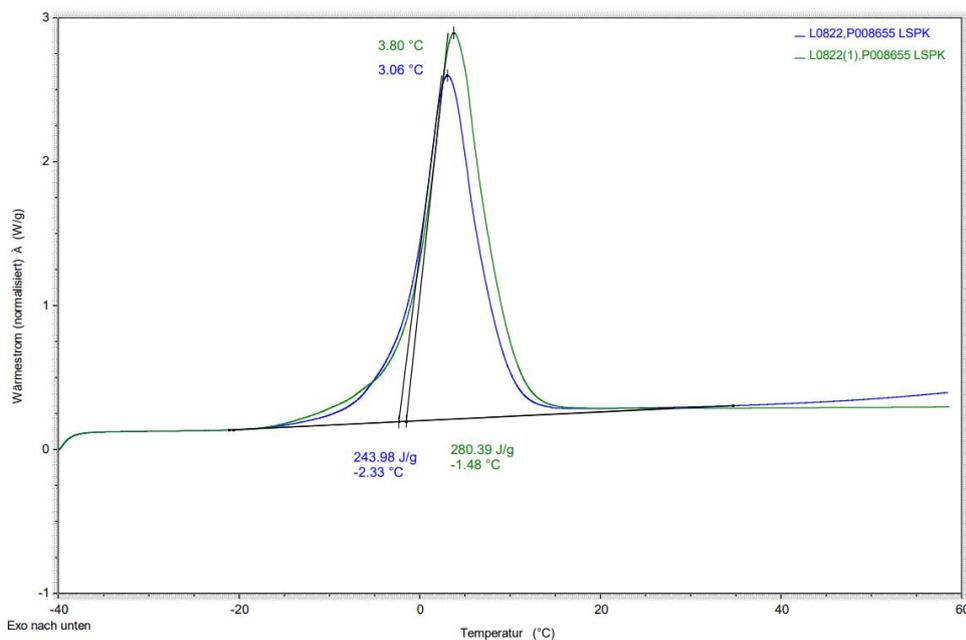
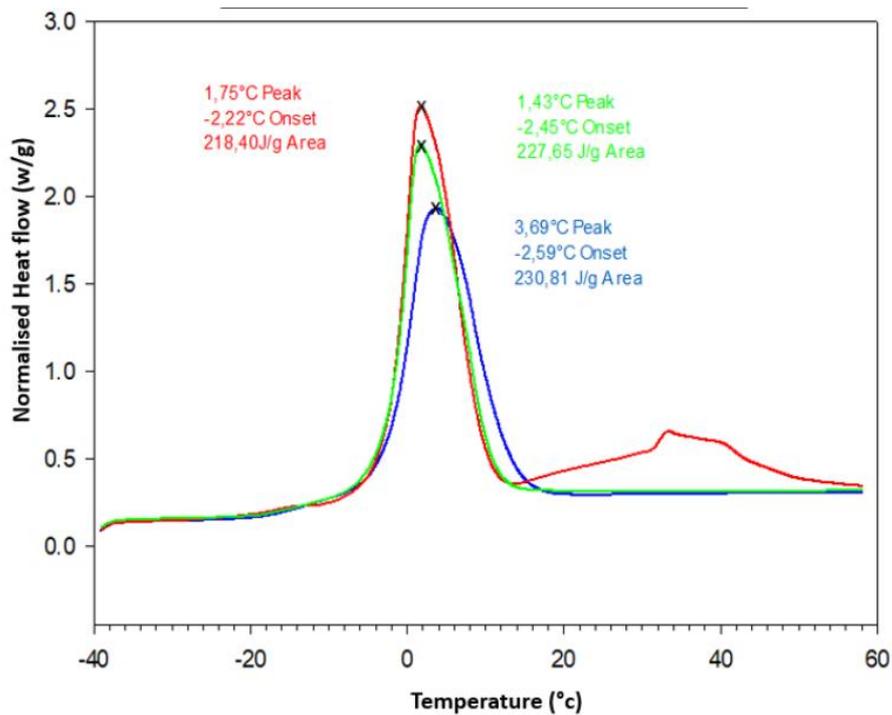


Abbildung 4.85: DSC-Messung für unbehandelten LSPK (A), behandelten LSPK (B) (Inkubation (1 h, 30 °C), Dämpfen (3 h, 100 °C) und Trocknen (48 h, 30 °C)) und sprühtrockneten LSPK (C) (Erhitzung 3 h, 100 °C, anschließend Sprühtrocknung)

#### 4.4.3.2 Funktionalität von extrudierten Leinsamenpresskuchen (DIL)

Zusätzlich wurde der Einfluss der Extrusion auf die funktionellen Eigenschaften von Leinsamenpresskuchen untersucht. Hierzu wurde LSPK im Lödige-Mischer mit Wasser inkubiert (30 min, 40 °C, unter Rühren), anschließend extrudiert (Durchsatz 6 kg/h, Schneckendrehzahl: 500 U/min, ohne zusätzliche Wasserzugabe) und im

Wirbelschichttrockner bei 70 °C getrocknet. Diese extrudierten Proben wurden mit unbehandeltem LSPK verglichen (siehe Abbildung 4.79, Ergebnisse Blausäure).

Tabelle 66 fasst die Ergebnisse der chemischen Analytik zusammen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der Protein- und Fettgehalt der behandelten und extrudierten LSPK-Proben vergleichbar ist. Geringfügige Unterschiede lassen sich vermutlich auf Messungenauigkeiten und die Inhomogenität der Proben zurückführen.

Tabelle 66: Chemische Analyse von extrudiertem und unbehandeltem Leinsamenpresskuchen (LSPK)

Bezeichnung	Parameter	Verfahren	Einheit	Messwert
LSPK unbehandelt	Rohprotein	VDLUFA III 4.1.1 1993	g/100g	34,0
	Fett	VDLUFA III 5.1.1 B 1988	g/100g	8,46
	Ballaststoffe gesamt	ASU L00.00-18 2017-10	g/100g	**
LSPK extrudiert	Rohprotein	VDLUFA III 4.1.1 1993	g/100g	34,9
	Fett	VDLUFA III 5.1.1 B 1988	g/100g	9,71
	Ballaststoffe gesamt	ASU L00.00-18 2017-10	g/100g	33,2

Des Weiteren wurden die im LSPK enthaltenen Ballaststoffe genauer untersucht, insbesondere der Gehalt an  $\beta$ -Glucanen und Pentosanen (Tabelle 67).  $\beta$ -Glucane sind überwiegend wasserlösliche Ballaststoffe, die aus Glucoseeinheiten bestehen und gesundheitliche Vorteile bieten. In den untersuchten Proben zeigten sich keine signifikanten Unterschiede im Gehalt an  $\beta$ -Glucanen zwischen extrudierten und nicht extrudierten Proben, was darauf hinweist, dass der Verarbeitungsprozess den Anteil dieser Ballaststoffe kaum beeinflusst hat. Im Vergleich zu Gerste und Hafer ist der  $\beta$ -Glucan-Gehalt in LSPK jedoch relativ gering.

Pentosane, eine Untergruppe der Hemicellulosen, bestehen vorwiegend aus Pentosezuckern wie Arabinose und Xylose und kommen in löslicher und unlöslicher Form vor. Diese können Wasser binden und tragen zur Feuchtigkeit in Backwaren bei. Sie verbessern zudem die Konsistenz von Soßen und Suppen sowie die Stabilität von Emulsionen, jedoch weniger effektiv als die in Leinsamen enthaltenen Schleimstoffe. Diese Schleimstoffe werden auch als Leinsamengummi bezeichnet und sind lösliche Ballaststoffe, die in der Samenschale konzentriert sind. Sie machen etwa ein Drittel der Gesamtballaststoffe aus und besitzen sowohl neutrale als auch saure Fraktionen.

Der Gehalt an Pentosanen lag bei der extrudierten Probe etwas höher als beim unbehandelten LSPK.

Tabelle 67: Analytik der Ballaststoffe von extrudiertem und unbehandeltem Leinsamenpresskuchen (LSPK)

	LSPK, unbehandelt	LSPK extrudiert	Einheit	Methode
Trocknungsverlust (103°C)	7,6	3,4	g/100g	ASU L 17.00-1, Pkt. 7.2.2:
β-Glucangehalt	0,8	0,7	% i.T.	PA_A-027 (enz.Spaltg./HPLC)
Pentosane				
Gesamtpentosane	10,3	12,3	% i.T.	Photometrisch
lösliche Pentosane	2,2	5	% i.T.	Photometrisch
unlösliche Pentosane	8,1	7,3		Berechnet

### DSC-Analytik

Die DSC-Analyse wurde genutzt, um Veränderungen in der Proteinstruktur des LSPK zu erfassen und damit die Auswirkungen des Extrusionsprozesses auf die Denaturierung der Proteine zu untersuchen. Dafür wurden die Proben mit einer Heizrate von 5 K/min von 20 bis 100 °C erhitzt. Der relevante Temperaturbereich liegt bei beiden Proben gemäß Abbildung 4.86 zwischen 45 °C und 80 °C. Bei niedrigeren Temperaturen weist der Verlauf des Graphs auf eine mögliche Umsetzung von Fetten hin. Die Peaktemperatur für beide Proben, extrudiert und nicht extrudiert, beträgt 66 °C, was im Bereich der Protein-Denaturierung (bis etwa 80 °C) liegt.

Die extrudierte Probe benötigte jedoch eine geringere Energie für die Denaturierung mit Werten von 0,08 J/g und 0,05 J/g in der Doppelbestimmung, verglichen mit dem unbehandelten LSPK, der 0,13 J/g und 0,2 J/g erforderte. Dies deutet darauf hin, dass die Proteine in der extrudierten Probe bereits teilweise denaturiert wurden, möglicherweise infolge des Extrusionsprozesses.

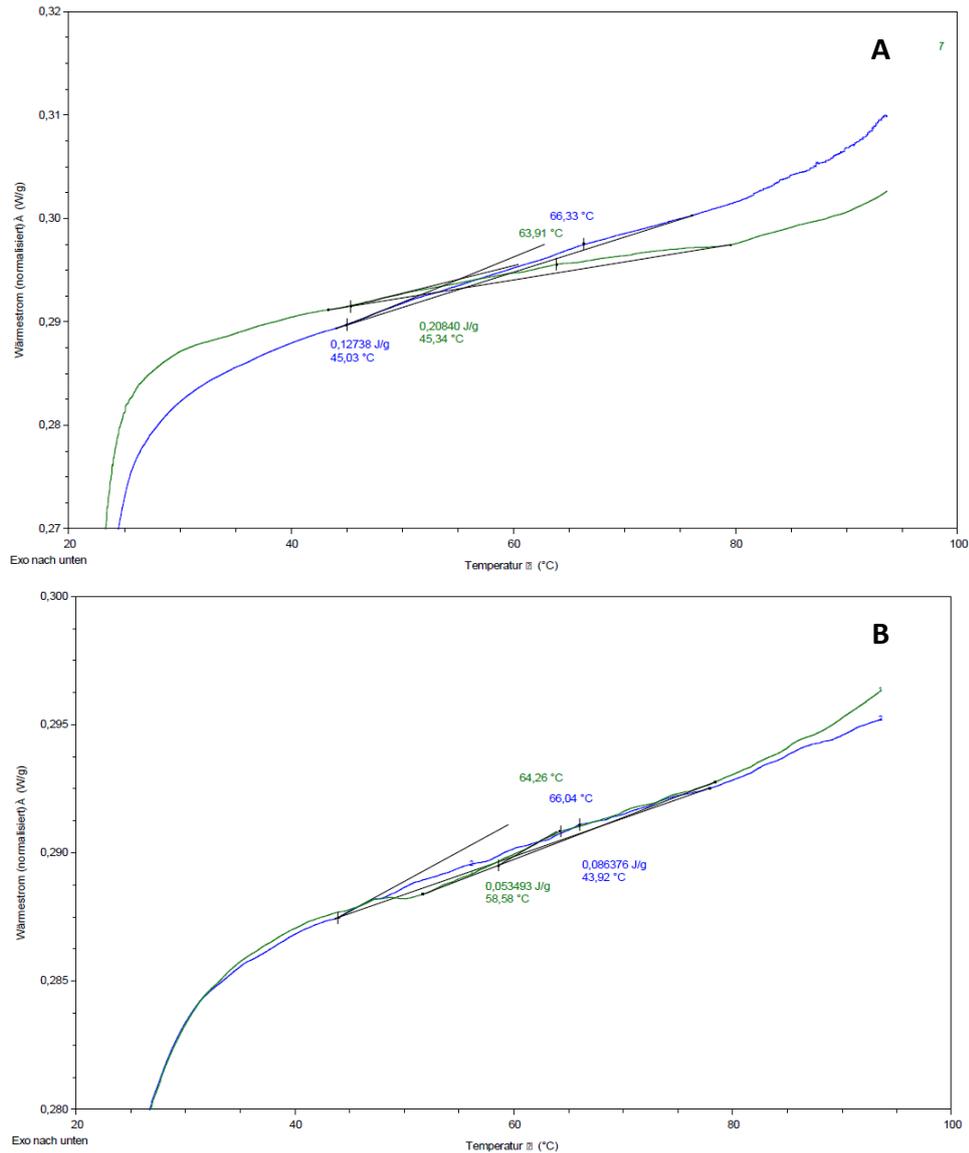


Abbildung 4.86: DSC-Analyse von Leinsamenpresskuchen; **A**: unbehandelter LSPK; **B**: behandelter LSPK (Inkubation (30 min, 40 °C), Extrusion und Trocknung (70 °C))

### Emulgierkapazität

Die Emulgierkapazität wurde sowohl für unbehandelten als auch für extrudierten LSPK untersucht (Abbildung 4.87). Der unbehandelte Presskuchen konnte, im Gegensatz zu vorherigen Analysen, bis zu 75 % Öl emulgieren, während in früheren Tests nur 70 % erreicht wurden (siehe Vergleich Abbildung 4.82). Der extrudierte Presskuchen hingegen zeigte deutlich schlechtere Emulgiereigenschaften: Er konnte kaum Öl emulgieren und bildete bei 10 bis 20 % Ölzugabe lediglich eine schmale, hellblaue Emulsionsschicht. Die Emulsion trennte sich schnell auf, was auf die veränderten Grenzflächeneigenschaften der extrudierten Probe hindeutet. Zur Verbesserung der Stabilität könnten Verdickungsmittel oder Stabilisatoren eingesetzt werden, um die Koaleszenz zu verlangsamen und die Emulsionsbildung zu unterstützen.

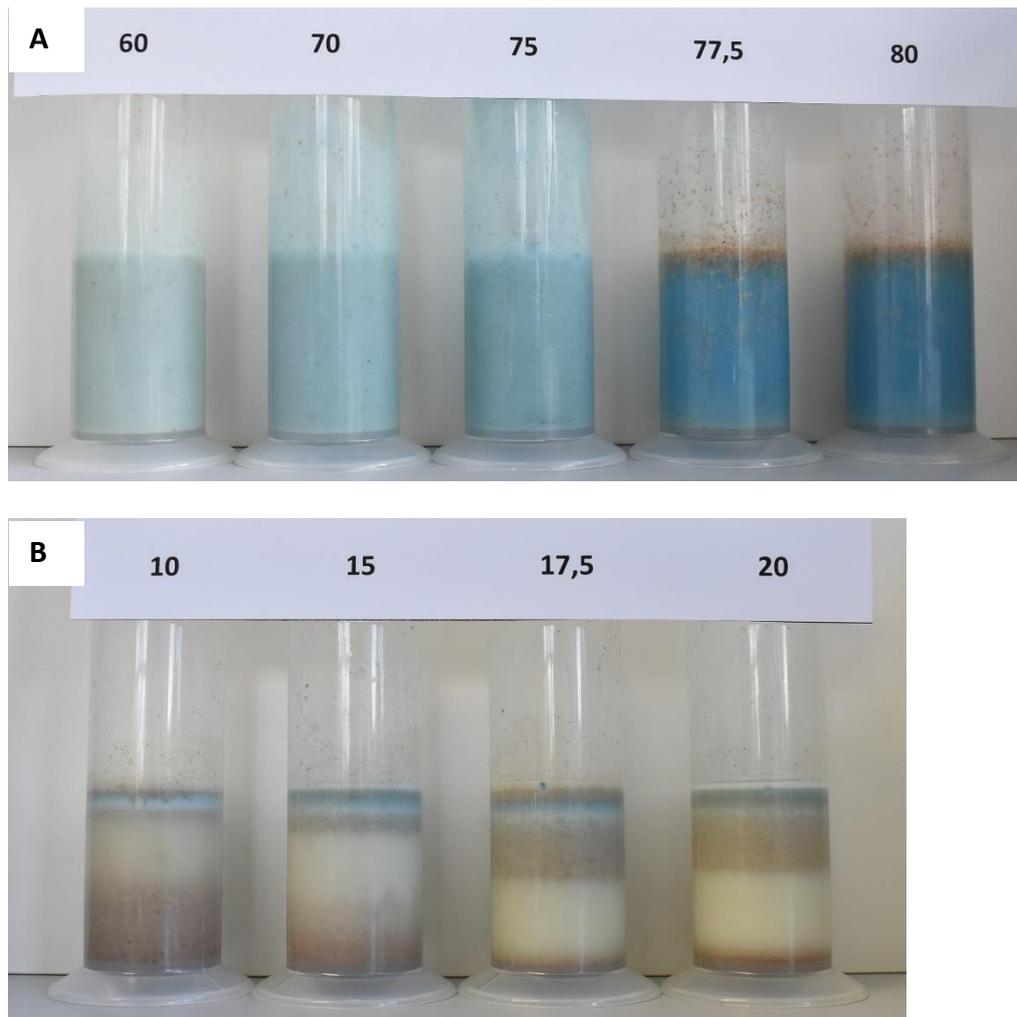


Abbildung 4.87: Emulgierfähigkeit von Leinsamenpresskuchen

**A:** LSPK unbehandelt bei Raumtemperatur **B:** LSPK behandelt (Inkubation (30 min, 40 °C), Extrusion und Trocknung (70 °C))

### Gelbildung

Die Gelbildung hängt stark von der Struktur und den Eigenschaften der Proteine und Polysaccharide in einer Probe ab. Die Untersuchung der Gelbildung erfolgte im Rheometer, wobei gemessen wurde, wie gut die Moleküle ein dreidimensionales Netzwerk bilden können, das Wasser bindet und Widerstand gegen Scherkräfte bietet. Eine höhere Schubspannung deutet darauf hin, dass die Probe ein stärkeres Netzwerk ausbildet, das gegenüber Verformung stabiler ist.

Für die Untersuchung der Leinpresskuchen wurde eine 5 %-ige Lösung des LSPK hergestellt und die Proben in einer Temperaturrampe von 20 bis 98 °C im Rheometer erhitzt. Abbildung 4.88 zeigt den Widerstand der Proben gegen die Scherkräfte. Der unbehandelte LSPK wies höhere Schubspannungen auf, was auf einen stärkeren Widerstand gegen Scherung hinweist. Im Gegensatz dazu zeigte die extrudierte Probe geringere Schubspannungen, was darauf schließen lässt, dass durch den Extrusionsprozess die Proteine und Polysaccharide teilweise denaturiert oder fragmentiert wurden. Das führte zu einer verminderten Fähigkeit, ein starkes dreidimensionales Netzwerk zu bilden, was in einer schwächeren Gelstruktur resultierte und damit zu einem geringeren Widerstand gegenüber mechanischer Beanspruchung.

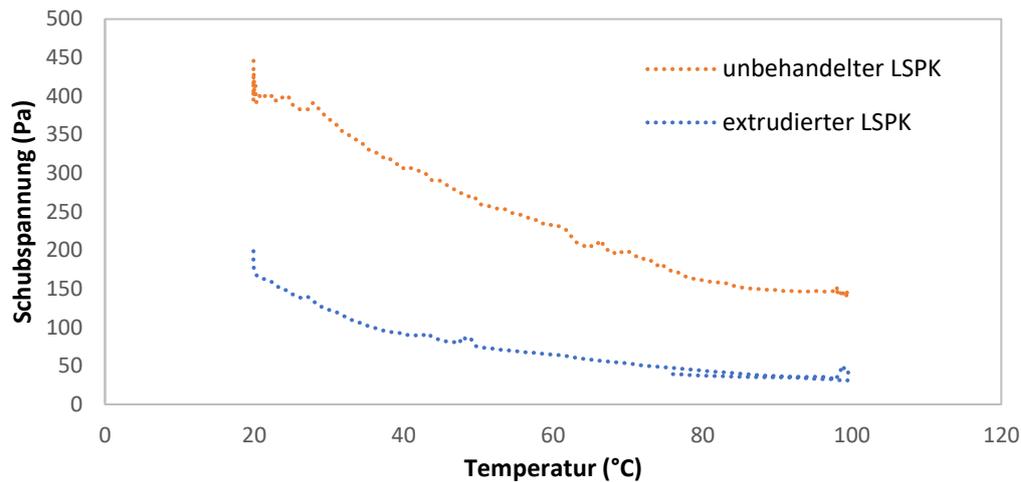


Abbildung 4.88: Rheologische Untersuchung der Gelbildung von unbehandeltem Leinsamenpresskuchen und behandeltem LSPK (Inkubation (30 min, 40 °C), Extrusion und Trocknung (70 °C))

#### Wasserimmobilisierung

Nach der Untersuchung des im Labormaßstab behandelten und sprühgetrockneten LSPKs wurde nun der Einfluss der Extrusion auf die Wasserimmobilisierung analysiert. Im Gegensatz zu den Probenanalysen aus Abbildung 4.84, bei denen eine 10%-ige Proteinlösung verwendet wurde, kam bei den neuen Analysen eine 5,56%-ige Proteinlösung zum Einsatz.

Abbildung 4.89 zeigt den Anteil des abzentrifugierten Wassers und damit die Wasserhaltefähigkeit der Proteine. Aufgrund des niedrigeren Proteingehalts setzten sowohl die extrudierte als auch die unbehandelte LSPK-Probe bei der Zentrifugation mehr Wasser frei als die Proben aus den vorherigen Analysen. Es zeigte sich jedoch, dass die extrudierten LSPK-Proben deutlich schlechter Wasser halten konnten. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass durch den Extrusionsprozess Proteine denaturiert und Hemicellulosen in ihrer ursprünglichen Struktur verändert wurden, wodurch die Wasserhaltefähigkeit reduziert wurde. Damit kann die Extrusion die Eignung von LSPK für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Wasserbindung etwas beeinträchtigen.

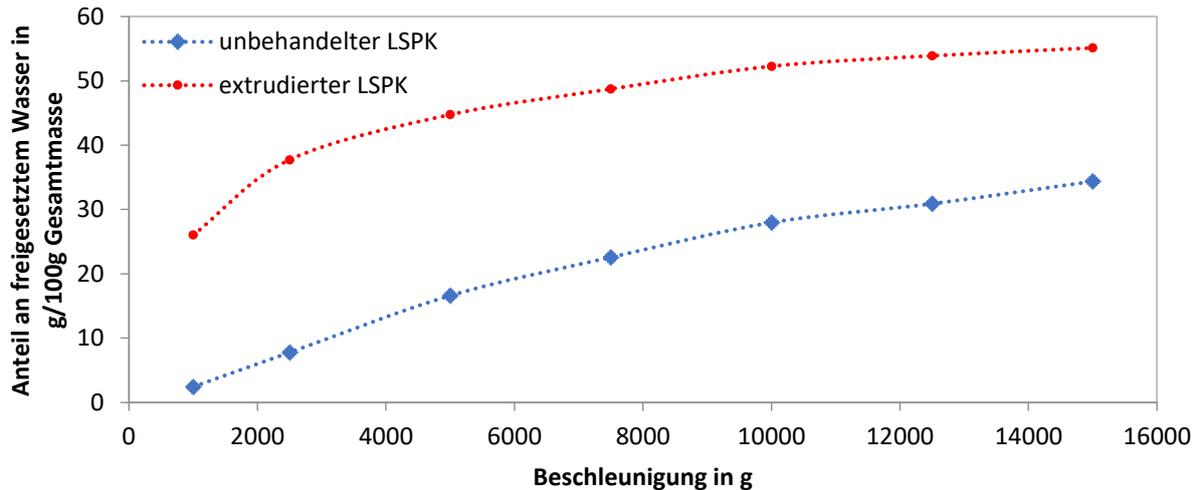


Abbildung 4.89: Anteil an abzentrifugiertem/freigesetztem Wasser (g/100 g Gesamtmasse) von Leinsamenpresskuchen (LSPK) in Abhängigkeit der Beschleunigung bei der Zentrifugation

#### 4.4.3.3 Besondere Nährwerteigenschaften von extrudiertem Leinsamenpresskuchen

Durch die Entfettung der Leinsamen wird einerseits der Ölgehalt des Produkts reduziert und andererseits die restlichen Nährstoffe aufkonzentriert. Das Leinsamenmehl (extrudierter, vermahlener Presskuchen) hat einen Fettgehalt von 7,1 g/100 g, wovon 3,14 g Alpha-Linolensäure ist. Laut VERORDNUNG (EG) NR. 1924/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Dezember 2006 über nährwert- und gesundheitsbezogene Angaben über Lebensmittel handelt es sich hierbei um ein Produkt „Mit einem hohen Gehalt an Omega-3-Fettsäuren“ (Grenzwert: 0,6 g Alpha-Linolensäure/100 g). Des Weiteren enthält es einen „hohen Proteingehalt“ mit 39 g Aminosäuren/100 g. Die Aminosäuren Asparaginsäure (3,84 g/100 g), Glutaminsäure (8,29 g/100 g) und Arginin (3,82 g/100 g) weisen die höchsten Gehalte in dem Produkt auf. Mit 33,2 g/100 g Ballaststoffen (s. Abschnitt 4.4.3.2) kann das Produkt zudem mit einem „hohen Ballaststoffgehalt“ (Grenzwert: 6 g/100 g) ausgelobt werden.

#### 4.4.3.4 Lagerstabilität (ÖM, DIL)

Die Untersuchung der Auswirkungen der Lagerung auf den Blausäuregehalt von Leinsamenpresskuchen wurde durchgeführt, indem Proben bei Raumtemperatur gelagert und dreimal innerhalb von fünf Monaten analysiert wurden. Die Analysen wurden vom Labor SGS durchgeführt. Zu Beginn der Lagerung wurde der Blausäuregehalt auf 370 mg/kg bestimmt. Nach zwei Monaten betrug der Gehalt 404 mg/kg und nach fünf Monaten 411 mg/kg.

Die Zunahme des Blausäuregehalts über die Zeit ist zu verzeichnen, jedoch ist der Anstieg nicht signifikant und könnte auch durch zufällige Schwankung in den Messwerten zu erklären sein und nicht durch eine echte Änderung im gemessenen Blausäuregehalt.

Durch den sehr geringen Wasser- und Fettgehalt des behandelten, extrudierten Leinsamenpresskuchens ist dieser in der Lagerung sehr stabil. Zudem bewirkt die thermische Behandlung des Ausgangsstoffes eine mikrobiologische Sicherheit des Endprodukts. Es ist davon auszugehen, dass die Produkte eine Mindesthaltbarkeit von einem Jahr aufweisen.

#### 4.4.3.5 Untersuchung auf Anreicherung von Sporen durch die Behandlung von Leinsamenpresskuchen (DIL)

Auf trockenem Leinsamenpresskuchen können Sporen von Bakterien und von Schimmelpilzen vorkommen. Sporen sind in der Regel hitzeresistenter und überstehen Bedingungen, die für vegetative Zellen tödlich sein könnten. Das Auskeimverhalten sowohl bakterieller als auch Schimmel-Sporen hängt stark von der Feuchtigkeit und der Nährstoffverfügbarkeit ab. Schimmelpilze wachsen tendenziell noch unter trockeneren Bedingungen, allerdings deutlich langsamer als Bakterien. Zudem bevorzugen Schimmelpilze eher niedrigere pH-Werte, während Bakterien sich eher bei neutralen pH-Werten wohlfühlen. Bei sehr niedrigen pH-Werten keimen bakterielle Sporen nicht mehr aus und wachsen auch nicht mehr.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde untersucht, ob die Behandlungsschritte des Leinsamenpresskuchens – bestehend aus Inkubation (30 min, 40 °C), Extrusion (Durchsatz 6 kg/h) und anschließender Trocknung (70 °C) – zu einer Anreicherung oder Reduktion möglicher sporenbildender Bakterien oder Schimmelpilze führen. Da der LSPK für die Inkubation eingeweicht wurde, stand genügend Wasser für das Auskeimen von bakteriellen Sporen zur Verfügung. Der neutrale pH-Wert und die schnellere Wachstumsrate von Bakterien im Vergleich zu Schimmelpilzen könnten ebenfalls zu einer bevorzugten bakteriellen Auskeimung führen. Die kurze Inkubationszeit lässt eine Zunahme der Keimzahl unwahrscheinlich erscheinen. Jedoch sind die Zellen nach der Auskeimung empfindlicher gegenüber Hitze, womit eine Abtötung der Sporenbildner durch die nachfolgenden Behandlungen erleichtert wäre.

Für die Analyse wurden die Gesamtkeimzahl sowie die Anzahl aerober Sporen, Hefen und Schimmelpilze im unbehandelten und extrudierten Presskuchen untersucht, einschließlich zusätzlicher Untersuchungen nach der Inkubation und nach der Extrusion (ohne Trocknung). Es kamen sowohl gefrorene als auch frische Proben zum Einsatz. Bei der Analyse gefrorener Proben ist zu bedenken, dass vegetative Zellen empfindlich reagieren und die Keimzahl nach dem Einfrieren möglicherweise geringer ausfällt.

Die Ergebnisse in Tabelle 68 zeigen, dass die Behandlung des Leinsamenpresskuchens zu einer Abnahme der Gesamtkeimzahl sowie der Anzahl aerober Sporen und Hefen führte, während die Anzahl der Schimmelpilze unverändert blieb. Die Inkubation erhöhte die mikrobielle Belastung leicht, welche durch die anschließende Extrusion wieder stark reduziert wurde. Da die Analyse der bakteriellen Sporenbildner ein Hitzeschritt von 10 min bei 80 °C einschließt, um vegetative Keime abzutöten, ist zu erkennen, dass auf dem trockenen LSPK hauptsächlich Sporen zu finden sind. Bei der Inkubation des eingeweichten LSPK hätten diese auskeimen und zu vegetativen Zellen werden können, welche dann empfindlicher gegenüber Hitze sind. Dies ist anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig abzuleiten. Die Anzahl der Sporen war nach der Inkubation (in der ungefrorenen Probe) niedriger, sodass anzunehmen ist, dass diese ausgekeimt sind. Die etwas höhere Gesamtkeimzahl in dieser Probe stützt diese Annahme. In den gefrorenen Proben ist dieser Effekt jedoch nicht zu beobachten. Es scheint jedoch, dass die Extrusion auch intakte Sporen abgetötet hat, da nach der Extrusion die Zahl der Sporenbildner unter  $<10^2$  Sporen/g lag.

Zusätzlich wurde unbehandelter LSPK untersucht, der bei Raumtemperatur gelagert wurde, im Vergleich zu LSPK, der gefroren gelagert wurde. Die Anzahl der Sporen wird vor und nach dem Einfrieren des trockenen LSPK wahrscheinlich nicht beeinflusst. Viele vegetative Keime (erfasst über die Gesamtkeimzahl) können allerdings in trockener Umgebung eine gewisse Zeit überleben. Sie reagieren jedoch empfindlich auf tiefe Temperaturen, denen sie beim Einfrieren der Probe ausgesetzt werden. Die Ergebnisse zeigten jedoch keine Unterschiede in der mikrobiellen Belastung.

Tabelle 68: Mikrobielle Belastung von behandeltem Leinsamenpresskuchen (LSPK) bestehend aus den Prozessschritten Inkubation, Extrusion und Trocknung im Vergleich zu unbehandeltem LSPK

Probe	Zustand der Probe	Gesamtkeimzahl [KBE/g]	Sporen aerob [KBE/g]	Hefen [KBE/g]	Schimmel [KBE/g]
LSPK unbehandelt	Gekühlt	1,80E+04	1,50E+04	<10 <sup>2</sup>	2,10E+04
LSPK nach Inkubation	Gekühlt	4,10E+05	2,50E+03	3,90E+02	2,20E+04
LSPK – inkubiert, Extrudiert ungetrocknet	Gekühlt	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	1,70E+04
LSPK – inkubiert, Extrudiert, getrocknet 70 °C	Ungekühlt	1,50E+03	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	2,30E+04
LSPK unbehandelt	Ungekühlt	1,70E+05	5,00E+02	9,00E+01	<10 <sup>2</sup>
LSPK unbehandelt	Gefroren	1,60E+05	7,50E+02	3,90E+02	<10 <sup>2</sup>
LSPK nach Inkubation	Gefroren	2,50E+05	9,50E+02	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>
LSPK – inkubiert, Extrudiert ungetrocknet	Gefroren	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>
LSPK – inkubiert, Extrudiert, getrocknet 70 °C	Ungekühlt	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>	<10 <sup>2</sup>

#### 4.4.4 TVH IV: Applikationsfelder von behandeltem Presskuchen (ÖM)

Um Applikationsfelder von behandeltem Leinpresskuchen aufzuzeigen, wurde eine Marktanalyse durchgeführt und die Ergebnisse aus den chemischen und physikalischen Analysen ausgewertet (Abschnitt 4.4.3.2). Leinmehl wird bereits in Pasta, Backwaren, Pizzaböden, Müslis, Proteinpulvern und Shakes eingesetzt. Anhand der Eigenschaften des Produkts wurden folgende Applikationsfelder identifiziert:

Tabelle 69: Applikationsfelder von behandeltem Leinsamenpresskuchen

Produktkategorie	Produkte	Anwendung
Back- & Nudelwaren	Brot, Brötchen, Gebäck, Pasta, Pizzaboden, Backmischungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ballaststoffreiche, pflanzliche Proteinquelle</li> <li>• vollständiger oder teilweiser Ersatz von anderen Mehlen</li> <li>• Ei-Ersatz</li> </ul>
Frühstücksprodukte	Müsli, Flakes, Porridge, Shakes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ballaststoffreiche, pflanzliche Proteinquelle</li> <li>• Bindemittel</li> <li>• Verdickungsmittel (Cremigkeit)</li> </ul>
Fleisch-/Fisch-/Ei- und Milchalternativen	Vegane Wurst, Veggie Hack, Gemüseburger, Bratlinge, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ballaststoffreiche, pflanzliche Proteinquelle</li> <li>• Emulgator</li> <li>• Verdickungsmittel/Bindemittel</li> <li>• Ei-Ersatz</li> <li>• Füllstoff</li> </ul>
Snacks	Proteinriegel, Müsliriegel, Knabbereien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ballaststoffreiche, pflanzliche Proteinquelle</li> <li>• Texturgeber</li> <li>• Füllstoff</li> </ul>
Saucen	Mayos, Dips, Saucen und Aufstriche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emulgator</li> <li>• Verdickungsmittel/Bindemittel</li> <li>• Ei-Ersatz</li> <li>• Füllstoff</li> </ul>

Einige dieser Anwendungen wurden bereits bei der Ölmühle Moog getestet (Abschnitt 4.4.2).

#### 4.5 Round Table

Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche Analysen der Blausäuregehalte von Leinsaat und Leinpresskuchen durchgeführt. Dabei stellte sich bei allen drei Projektpartnern heraus, dass die Labore unterschiedliche Analysemethoden verwendeten, was zu teils erheblich abweichenden Ergebnissen bei denselben Proben führte. Diese Unterschiede führten zu Unsicherheiten entlang der gesamten Vermarktungskette von Leinsamen und daraus hergestellten Produkten. Um diese Problematik zu adressieren, organisierte das LINOVI-Team einen Laborvergleich sowie einen Round Table mit acht verschiedenen Laboren.

Für den Laborvergleich wurden Proben an insgesamt 14 Analytiklabore geschickt, von denen 8 ihre Ergebnisse zur Blausäurebestimmung übermittelten. Die verschiedenen Methoden, die von den Laboren verwendet wurden, sind in Tabelle 16 aufgeführt. Die Ergebnisse (siehe Tabelle 71) variierten erheblich: Der gemessene Blausäuregehalt in Leinsamen schwankte zwischen <10 mg/kg und 206,7 mg/kg, während für Leinsamenpresskuchen der Gehalt zwischen <10 mg/kg und 416,0 mg/kg ermittelt wurden. Diese großen Abweichungen unterstreichen die Notwendigkeit, eine einheitliche Analysemethode zu etablieren.

Tabelle 70: Verwendete Methoden zur Analytik auf Blausäure von verschiedenen Laboren

<b>Methode</b>	<b>Modifikation</b>	<b>Proben-Zer- kleinerung</b>	<b>Partikel- größe vor der Einwaage</b>	<b>Messung</b>	<b>Spaltung der cyanogenen Glycoside durch:</b>
Haus-methode: Extraktion mit Phosphatpuffer, Hydrolyse mit beta- Glucosidase, Messung GC-MSD;		Messer- mühle	Nicht bestimmt	Gesamt- Blausäure (frei und cyanogen)	$\beta$ -Glucosidase, $\geq 4U/mg$
Hausmethode in Anlehnung an DIN EN 16160		Messer- mühle	< 1 mm	Gesamt- Blausäure (frei und cyanogen)	$\beta$ -Glucosidase
VDLUFA III 16.3.2	Titration per Automat, Destillation via Wasserdampfd estillation	Messer- mühle		Gesamt- Blausäure (frei und cyanogen)	Emulsin - Mandelschläm- me
ASU F0093 04-2013	Zur Destillation wird eine 0,75 M Natriumacetat- lösung mit einem pH-Wert von 5,0 anstatt 7,9 eingesetzt.  Gradient anstatt eines isokratischen Elutionssystem s.	Messer- mühle	Ca. 1 mm	Gesamt- Blausäure (frei und cyanogen)	beta- Glucosidase (aus Mandeln, erworben bei Sigma-Aldrich)
VDLUFA III 16.3.2	keine	Messer- mühle	< 3 mm	Gesamt- Blausäure (frei und cyanogen)	Süßmandel
NMR		Messer- mühle	< 1 mm	Messung der Cyanogenen Glykoside	ohne
<sup>1</sup> H-NMR		Messer- mühle	< 1 mm	Messung der Cyanogenen Glykoside	ohne
EN-16160		Zentrifuga- l-mühle	< 1 mm	Gesamt- Blausäure (frei und cyanogen)	Acid Extraction, incubation with B-glucosidase to form HCN, derivatisation taurine and NDA

Es zeigte sich jedoch, dass die am DIL etablierte Methode zur Ermittlung des Blausäuregehaltes von Leinsamen und von Leinsamenpresskuchen vergleichbar mit den Analyseergebnissen von SGS ist.

Tabelle 71: Ergebnisse des gemessenen Blausäuregehaltes von ganzen Leinsamen und Leinsamenpresskuchen (LSPK), im Linovit-Projekt wurden die Blausäuregehalte von den Laboren SGS und Eurofins ermittelt sowie mit der etablierten Methode am DIL

Labor	Methode	Leinsamen HCN mg/kg	z-Score	LSPK vermahlen HCN mg/kg	z-Score	Anmerkung
Eurofins	Hausmethode, NMR	202	0,4	397	2,4	
2	Hausmethode, HS-GC-MSD	203	0,5	416	3,2	
3	Hausmethode, Anl. an DIN EN 16160, HPLC	48	-10,4	320	-1,0	
4	VDLUFA Bd. III 16.3.3 mod., Photometrie	0	-13,8	0	-15,0	beide < 10 mg/kg
SGS	VDLUFA Bd. III 16.3.2 mod., Titrimetrie	207	0,8	332	-0,5	
DIL	ASU F 0093 / DIN EN 16160, HPLC	193	-0,2	345	0,1	
7	Hausmethode, Hydrolyse, Destillation, Titrimetrie	117	-5,6	366	1,0	
8	VDLUFA Bd. III 16.3.2. mod., Titrimetrie	128	-4,8	249	-4,1	
9	DIN EN 16160, HPLC	200	0,3	400	2,5	
10	ASU F 0093 / DIN EN 16160, HPLC	199	0,2	340	-0,1	
	AV	150		317		
	<b>Median</b>	<b>196</b>		<b>343</b>		
	SD	74,5		121,2		
	<b>RSD %</b>	<b>49,8</b>		<b>38,3</b>		
	<b>Ziel RSD Horwitz %</b>	<b>7,2</b>		<b>6,6</b>		
	Ziel RSD Horwitz	14,2		22,8		
	<b>Horrat Wert</b>	<b>6,9</b>		<b>5,8</b>		

Aus dem Round Table ergaben sich mehrere zentrale Erkenntnisse:

1. Leinsamen überschreiten häufig den Höchstgehalt von 150 mg/kg Blausäure, was sie für den Endverbraucher ungeeignet macht. Dies verursacht Unsicherheiten bei Herstellern und Verarbeitern, insbesondere aufgrund uneinheitlicher Messmethoden.
2. Bei Leinsamenpresskuchen überschreitet nahezu jede Probe den Grenzwert von 150 mg/kg, wobei die Messwerte zwischen den Laboren stark variieren. Dies deutet darauf hin, dass Anpassungen der Analysemethoden für diesen Rohstoff erforderlich sind, da er durch die Entölung höhere Ballaststoff- und cyanogene Glykosidgehalte aufweist.

3. Die teilnehmenden Labore nutzten acht verschiedene Methoden zur Quantifizierung der Blausäure, darunter Techniken wie NMR, HPLC und Titrimetrie.
4. Mehrere Faktoren beeinflussen das Messergebnis, darunter der Rohstoff, der Mahlgrad, die Bedingungen der Freisetzung der cyanogenen Glykoside, die Quelle und Aktivität der Beta-Glycosidase und die gewählte Detektionsmethode.
5. Es wurde empfohlen, die ASU-Methode als standardisierte Analysemethode zu etablieren.
6. Laut Art. 3 Abs. 3 der Verordnung (EG) 1881/2006 dürfen Lebensmittel mit einem zu hohen Blausäuregehalt nicht als Zutat in anderen Lebensmitteln verwendet werden, um den Höchstgehalt im Endprodukt zu umgehen. Eine Vermischung ist erst zulässig, wenn der überhöhte Gehalt erfolgreich reduziert wurde.

Im Round Table wurde deutlich, dass ein dringender Handlungsbedarf besteht, um eine standardisierte Methode gesetzlich zu verankern. Bis dahin müssen sich Auftraggeber auf die akkreditierten Methoden der Labore verlassen, um rechtliche Sicherheit zu gewährleisten. Eine spezifische Empfehlung zur besten Analysemethode ist im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht möglich. Dennoch leistet das Projekt einen wesentlichen Beitrag zur Sensibilisierung für diese Problematik und verdeutlicht den Bedarf an weitergehender Forschung sowie regulatorischen Anpassungen.

## **5 Diskussion der Ergebnisse**

### **5.1 GROW und Standortscreening**

#### **5.1.1 Standortscreening**

##### **Erreichte Meilensteine AP 1:**

Meilenstein 1.1: Identifizierung agronomischer und standortbezogener Einflussfaktoren auf die Innere Qualität der Leinsamen, mit Fokus auf der Blausäure.

Im Rahmen der Anbauversuche und mit Hilfe der statistischen Auswertung der Faktoren im Praxisanbau von Lein konnten wesentliche Hinweise auf Zusammenhänge qualitätsbildender Faktoren identifiziert werden. Insgesamt deuteten sich sehr komplexe und vielschichtige Zusammenhänge unter den ermittelten Faktoren an. Besonders im Bereich der Standortfaktoren und der Witterung zeigten sich sowohl in den sensiblen Zeiträumen zur Blüte und vor der Ernte signifikante Korrelationen als auch der Kultur vorgelagerte Bereiche, wie der Faktor 2 Wochen vor der Saat. Tabelle 72 stellt daher eine stark reduzierte Zusammenfassung der wirksamen Faktoren dar.

Tabelle 72: Zusammenfassende Einschätzung der Zusammenhänge von ertrags- und qualitätsbezogenen Faktoren von Sommerlein aus dem Praxismonitoring 2020-2023, +++

signifikante Korrelationen/Zusammenhang gefunden, + Korrelation/Zusammenhang gefunden, - kein Zusammenhang gefunden

	Sorte	Jahr	Anbaufaktoren, Standort & Boden	Temperatur	Niederschlag
Blausäure	+++	+	+	+++	+++
Cadmium	+	-	+++	-	-
$\alpha$ -Linolen	+++	-	+	+++	-
Tausendkornmasse	+++	+	+++	+	+++
Quellzahl	+++	+	+	+++	+++
Ölgehalt	+	-	+	+	+

Meilenstein 1.2: Identifizierung wertgebender und wertmindernder Inhaltsstoffe in den Verarbeitungsprodukten Leinöl und Leinpresskuchen.

Meilenstein 1.3: Beschreibung der sensorischen Eigenschaften der Verarbeitungsprodukte.

### 5.1.2 Grow

Meilenstein Grow 1: Hinweise zum Einfluss des Genotyps auf die wertgebenden und wertmindernden Inhaltsstoffe der Leinsaat und der Verarbeitungsprodukte und Meilenstein Grow 2: Überprüfung der Ergebnisse im 2. Versuchsjahr.

Die umfangreichen mehrortigen und mehrjährigen Sortenversuche lieferten eine fundierte Datengrundlage und geben Hinweise auf entscheidende Zusammenhänge von Genotyp auf Inhaltsstoffe.

Meilenstein Grow 3: Hinweise zur Anbaueignung von Winterlein und zur Ausbildung wertgebender/wertmindernder Inhaltsstoffe und Meilenstein Grow 4: Überprüfung der Ergebnisse in einem Projektverlängerungsjahr

Im Versuchsbetrieb und im Praxisanbau konnten umfangreiche Ergebnisse zur Anbaueignung und -optimierung sowie zu den Qualitätsmerkmalen des Winterleins erarbeitet werden.

Meilenstein 5: Darstellung von Effekten der Unkrautkonkurrenzsituation auf wertgebende/wertmindernde Inhaltsstoffe

Die Ertragsrelevanz der Begleitflora im Leinanbau konnte in Exakt- und Praxisversuchen erarbeitet werden. Effekte auf die wertgebende/wertmindernde Inhaltsstoffe waren nicht nachweisbar.

Meilenstein Grow 6: Quantifizierung der Ertragswirksamkeit unterschiedlicher Unkrautregulierungskonzepte

Mehrjährige Versuche im Versuchsbetrieb und auf Praxisflächen können erste Hinweise zur Ertragswirksamkeit unterschiedlicher Unkrautregulierungskonzepte geben.

Meilenstein Grow 7: Informationen zum Einfluss des Ernteverfahrens auf die wertgebenden/wertmindernden Inhaltsstoffe und den Ertrag liegen vor; Entscheidung ob einer Versuchswiederholung in 2023 notwendig ist.

Zur Absicherung der Daten zum Einfluss des Ernteverfahrens auf die wertgebenden Inhaltsstoffe und den Ertrag wurden diese mehrjährig wiederholt.

Meilenstein Grow 8: Faktoren zur Beeinflussung des Abreifeverhaltens können identifiziert werden.

In mehrjährigen Versuchsreihen zur Beeinflussung des Abreifeverhaltens bei Winter- und Sommerlein deuten sich relevante Faktoren an. Die Versuche werden in einer separaten Publikation veröffentlicht.

Meilenstein Grow 9: Es liegen Daten zur Anbauwürdigkeit von Öllein auf Grenzstandorten zur Verfügung und können auf andere Grenzstandorte übertragen werden.

Im Rahmen des Praxismonitorings konnten mehrjährige Daten zur Anbauwürdigkeit von Sommerlein auf Grenzstandorten erworben werden.

## **5.2 Blausäurereduktion**

### **5.2.1 Thermische und mechanische Verfahren**

Am DIL wurden verschiedene Verfahren entwickelt und getestet, um den Blausäuregehalt im LSPK zuverlässig unter den gesetzlichen Grenzwert von 150 mg/kg zu senken. Die Untersuchungen umfassen die Vorbehandlung des LSPK (TVH I), spezifische Methoden zur Blausäureabtrennung (TVH II), erste Skalierungsversuche (TVH V) sowie gezielte Versuche mit Leinsamenpresskuchen mit geringem Blausäuregehalt (TVH IV).

In den ersten Screening-Tests erwiesen sich thermische Verfahren wie Erhitzen, Kochen und Bedampfen als besonders effektiv zur Blausäurereduktion, wohingegen die Mikrowellenbehandlung, Ultraschallbehandlung sowie PEF sich im Vergleich als weniger effizient herausstellten und die Blausäure nur moderat reduzierten. Bei den thermischen Verfahren zeigte sich, dass hohe Temperaturen (120 °C) und eine ausreichende Wasserzugabe wesentliche Faktoren sind, um eine schnelle und gründliche Abtrennung der Blausäure zu ermöglichen. Niedrigere Temperaturen (z. B. 60 °C und 40 °C) führten hingegen zu geringeren Reduktionen, da die Freisetzung und Verdampfung der Blausäure verlangsamt wurde. Allerdings führte die Anwendung hoher Temperaturen und längerer Behandlungszeiten auch zu einer stärkeren Braunfärbung des Presskuchens, was mögliche sensorische Beeinträchtigungen nach sich ziehen könnte. Daher sollten die Prozesseinstellungen so weit optimiert werden, dass die Temperaturen und Behandlungszeiten minimal gehalten werden.

### Notwendigkeit der Inkubation

Die Rolle der Inkubation für die Hydrolyse der cyanogenen Glykoside und damit die Blausäurereduktion zeigte in den Versuchen gemischte Ergebnisse (Tabelle 73). Während eine Kombination aus Inkubation, Dämpfen/Extrusion und Trocknung in einigen Fällen zu einer deutlichen Blausäurereduktion führte, erwies sich der Inkubationsschritt in anderen Versuchen als überflüssig oder sogar nachteilig.

Tabelle 73: Gegenüberstellung von Versuchen am DIL mit und ohne Inkubation von LSPK

Versuchsmaßstab	Inkubation (Zeit und Temp.)	Dämpfen (Temp. und Zeit)	Extrusionsbedingungen	Trocknung (Temp.)	Blausäuregehalt	Bemerkung
Labormaßstab	18 h, 30 °C	6 h, 120 °C	-	30 °C	3,32 mg/kg	Bessere Reduktion
	keine	6 h, 120 °C	-	30 °C	9,42 mg/kg	durch Inkubation
Industrieller Maßstab	30 min, 40 °C	-	Durchsatz 6 kg/h, Wasserzugabe nur bei Inkubation, Temp. Masse Extruderaustritt: 135 °C	70 °C	7,6 mg/kg TS (gemessen am DIL)	Bessere Reduktion durch Inkubation
	keine	-	6 kg/h Durchsatz an LSPK + 2,58 kg/h Wasser im Extruder, Temp. Masse Extruderaustritt: 130 °C		10,2 mg/kg TS (gemessen am DIL)	
Pilotmaßstab	1 h, 30 °C	100 °C, 3 h	-	60 °C	106 mg/kg TS	Inkubation erhöhte Blausäuregehalt
	keine	100 °C, 3 h	-	60 °C	24 mg/kg TS	
Pilotmaßstab	1 h, 30 °C	100 °C, 3 h	-	100 °C	107 mg/kg TS	Inkubation erhöhte Blausäuregehalt
	keine	100 °C, 3 h	-	100 °C	11 mg/kg TS	
Industrieller Maßstab	30 min, 30 °C	-	Durchsatz 5 kg/h, Wasserzugabe nur bei Inkubation, Temp. Masse Extruderaustritt: 126 °C	100 °C	28,9 mg/kg TS	Mit Inkubation und höherer Trocknungstemperatur höherer Blausäuregehalt
	keine	-	3,5 kg/h Durchsatz an LSPK + 1,5 kg/h Wasser im Extruder, Temp. Masse Extruderaustritt: 120 °C	60 °C	22,85 mg/kg TS	
Industrieller Maßstab	keine	-	Versuche mit und ohne Entgasung, Durchsatz LSPK 9 – 11 kg/h + 4 -6 kg/h Wasser, Temp. Masse Extruderaustritt: 111-124 °C	50 °C	170 – 358 mg/kg (gemessen bei SGS)	Durch Extrusion ohne Inkubation konnte nur geringfügige Blausäurereduktion erreicht werden

In einer Reihe von Versuchen führte die Kombination aus einer 18-stündigen Inkubation bei 30 °C, gefolgt von Dämpfen (6 h bei 120 °C) und anschließender Trocknung (30 °C), zu einer besonders niedrigen Blausäurekonzentration von 3,32 mg/kg. Im Vergleich dazu erreichte das

Dämpfen und Trocknen ohne vorherige Inkubation eine Reduktion auf 9,42 mg/kg. Bei Extrusionsversuchen zeigte der LSPK nach einer 30-minütigen Inkubation bei 40 °C mit anschließender Extrusion und Trocknung niedrigere Blausäuregehalte (7,6 mg/kg TS) als ohne Inkubation (10,2 mg/kg TS). Zwar fielen die am DIL gemessenen Blausäuregehalte in dieser Messreihe allgemein niedrig aus, doch deutet die Tendenz auf eine leicht verbesserte Reduktion durch die Inkubation hin.

Andere Versuche lassen jedoch vermuten, dass die Inkubation nicht unbedingt erforderlich ist: So erreichte der LSPK nach Dämpfen (100 °C, 3 h) und Trocknung bei 60 °C ohne Inkubation einen Blausäuregehalt von 24 mg/kg TS, während mit Inkubation sogar ein höherer Gehalt von 106 mg/kg TS gemessen wurde. Ähnliche Ergebnisse wurden bei Trocknungstemperaturen von 100 °C beobachtet. In anderen Extrusionsversuchen konnte durch eine direkte Erhitzung, anschließender Extrusion und Trocknung, ohne vorherige Inkubation, der Blausäuregehalt erfolgreich auf 22,82 mg/kg TS gesenkt werden. Jedoch zeigte eine zu Beginn des Projektes durchgeführte Versuchsreihe mit LSPK, dass eine ausschließliche Extrusion und Trocknung des LSPKs (ohne Inkubation) den Blausäuregehalt kaum reduziert. Diese Ergebnisse wurden vom Labor SGS bestimmt.

Zusammenfassend lässt sich die Notwendigkeit der Inkubation nicht eindeutig bestätigen. Die Inkubation kann ggf. in einigen Fällen die Hydrolyse der cyanogenen Glykoside unterstützen und somit die Blausäurereduktion fördern. Im industriellen Maßstab sollte jedoch noch einmal geprüft werden, ob eine ausreichende Reduktion auch ohne diesen zusätzlichen Schritt erzielt werden kann. Eine anfängliche Durchfeuchtung des LSPK mit Wasser oder Dampf, wie sie aktuell teilweise durch die Inkubation erfolgt, kann ggf. von Vorteil sein.

#### Skalierung und Prozessoptimierung

In den Scale-up-Versuchen erwies sich die indirekte Erhitzung des LSPK als praktikable Alternative zur direkten Bedampfung. Sie kann gleichzeitig als Inkubationsschritt für eine nachfolgende Extrusion dienen und beispielsweise durch den Einsatz eines doppelwandigen Pflugscharmischers (z. B. von der Firma Lödige) realisiert werden. Für die Inkubation war die Zugabe von 30 % Wasser zum LSPK erforderlich. Die Pflugscharschaufeln im Mischer gewährleisten eine gleichmäßige Durchmischung des Presskuchens mit Wasser und fördern die Freisetzung der Blausäure durch Hydrolyse der cyanogenen Glykoside.

Falls statt der indirekten Erhitzung eine Dampfbehandlung des LSPKs im industriellen Maßstab bevorzugt wird, könnte ein Schnellmischer mit Dampfanschluss (z. B. VAS-Mischer von der Firma Glass) eingesetzt werden. Dieser ermöglicht eine gleichmäßige Erwärmung des LSPK durch kontinuierliches Rühren und gezielten Dampfeintrag. Dieser ermöglicht durch kontinuierliches Rühren und gezielten Dampfeintrag eine gleichmäßige Erwärmung des LSPK. Erste Analysen am DIL zeigen, dass eine Dampfbehandlung ohne zusätzliche Wasserzugabe und eine anschließende Trocknung im Wirbelschichttrockner den Blausäuregehalt auf ein sicheres Niveau senken könnten. Zusätzlich könnte der VAS-Mischer für eine direkte Vermahlung des LSPK genutzt werden, wodurch eine Vorvermahlung entfallen könnte. Allerdings würde dies zu einer gröberen Partikelstruktur des Endprodukts führen, was möglicherweise eine Nachvermahlung erforderlich macht.

Die Blausäuregehalte der am DIL analysierten Proben nach Behandlung im VAS-Mischer waren insgesamt sehr niedrig. Daher wird empfohlen, diese Ergebnisse durch zusätzliche Messungen in externen Laboren zu überprüfen, um die Skalierbarkeit und Reproduzierbarkeit der Blausäurereduktion durch die Dampfbehandlung sicherzustellen.

Ergänzend wurden Scale-up-Versuche bei der Firma VITAM durchgeführt, bei denen LSPK im Stephan-Mischer mit Wasser auf einen Feststoffgehalt von 10 % verdünnt und anschließend auf 80 bzw. 95 °C für 20 bzw. 15 Minuten erhitzt wurde. Diese Behandlungsweise führte jedoch zu hohen Blausäuregehalten von 200–350 mg/kg TS (gemessen durch SGS, die Analysen-Ergebnisse des DIL wiesen niedrigere Werte auf). was darauf hindeutet, dass eine reine Erhitzung ohne Dampf nicht ausreichend ist. Dies deutet darauf hin, dass eine reine Erhitzung ohne Dampfeintrag nicht ausreicht, um die Blausäuregehalte ausreichend zu senken. Diese Methode entspricht vielmehr einem Inkubationsschritt, der als Vorbehandlung des LSPK dienen könnte.

Die anschließende Walzentrocknung reduzierte den Blausäuregehalt laut SGS-Analysen ebenfalls nicht unter den gesetzlichen Grenzwert, während die DIL-Analysen eine Reduktion unter die Grenzwerte zeigten. Diese Diskrepanz sowie die Tatsache, dass die Behandlungen – abgesehen von der Dampfbehandlung im VAS-Mischer (Glass) und der Erhitzung ohne Dampf (VITAM) – ansonsten relativ vergleichbar sind, unterstreichen die Notwendigkeit, die Ergebnisse der Dampfbehandlung im VAS-Mischer genauer zu überprüfen. Dies ist entscheidend, um die tatsächliche Effektivität dieser Methode bei der Blausäurereduktion abschließend bewerten zu können.

### Trocknungsverfahren

Alle am DIL optimierten Verfahren zur Reduktion der Blausäure erfordern eine abschließende Trocknung des behandelten LSPK. Aufgrund der hohen Viskosität und Verklebungen des LSPK erwiesen sich Sprüh- und Walzentrocknung als ungeeignet, während die Wirbelschichttrocknung Potenzial zeigte, sofern der Wassergehalt im Presskuchen niedrig gehalten wird und das Material rieselfähig bleibt. In den DIL-Versuchen lag die maximale Wasserzugabe zum LSPK bei 30 %, sodass das Material noch rieselfähig war und somit gleichmäßig und schonend getrocknet werden konnte.

### **5.2.2 Fermentationsverfahren**

Zusätzlich zu den thermischen und mechanischen Verfahren wurde auch die Fermentation als potenzieller Ansatz zur Blausäurereduktion untersucht.

Die Ergebnisse der Fermentation widersprechen jedoch der ursprünglichen Hypothese, dass die Milchsäurebakterien den Blausäuregehalt im Leinsamenpresskuchen durch  $\beta$ -Glucosidase-Aktivität senken würden. Stattdessen führte die Fermentation zu einem erhöhten gemessenen Blausäuregehalt in den Proben. Es deutet darauf hin, dass durch die metabolische Aktivität der Bakterien während der Fermentation cyanogene Verbindungen freigelegt werden, die zuvor nicht mit der verwendeten Methode zur Blausäureermittlung erfasst werden konnten.

Der Anstieg des Blausäuregehaltes war besonders deutlich in den Proben mit *Pediococcus pentosaceus* DSM 20281 zu verzeichnen, während der isolierte *Pediococcus acidilactici* vergleichsweise niedrige Werte zeigte. Dies könnte auf Unterschiede in der Enzymausstattung und der metabolischen Aktivität der Bakterienstämme hinweisen.

Die Ergebnisse legen nahe, dass eine direkte Anwendung der untersuchten Bakterienstämme für die Blausäurereduktion in Leinsamenpresskuchen ohne weitere Optimierungen oder weiteren Nachbehandlungen zur nachträglichen Austreibung der Blausäure nicht sinnvoll ist. Zukünftige Arbeiten könnten sich darauf konzentrieren, den Einsatz von Kulturüberständen oder spezifischen Enzymen wie Linamarase zu optimieren, um eine effektive Reduktion der cyanogenen Verbindungen zu erreichen. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz im Forschungsprojekt Linovit nicht bis zu den Scale-up-Versuchen weiterverfolgt.

### **5.2.3 Erreichte Meilensteine**

Folgende Meilensteine sollten im Arbeitspaket 2 erreicht werden:

- Meilenstein 2.4: Ermittlung geeigneter Vorbehandlungsschritte für Samen und Presskuchen.
- Meilenstein 2.5: Erfolgreiche Abtrennung der Blausäure aus Samen und Presskuchen.
- Meilenstein 2.6: Größte Blausäurereduktion von Leinsamen und Presskuchen durch Kombination geeigneter Sorten und technologischer Verfahren wurde erreicht.
- Meilenstein 2.7: Industrielles Verfahren zur Blausäurereduktion wurde ermittelt und Vortests durchgeführt.

Durch die am DIL durchgeführten Untersuchungen und entwickelten Methoden zur Blausäurereduktion im LSPK konnten die Projektmeilensteine erreicht werden.

In den Screening-Versuchen und anschließenden Tests im Labormaßstab wurden die geeigneten Vorbehandlungsschritte für LSPK ermittelt (Meilenstein 2.4). Dabei erwiesen sich thermische Verfahren wie Bedampfung und Inkubation als effektiv, ergänzt durch die indirekte Erhitzung, die sich als praktikable Alternative für eine gleichmäßige Vorbehandlung im größeren Maßstab herausstellte.

Die erfolgreiche Abtrennung der Blausäure (Meilenstein 2.5) konnte mithilfe dieser Verfahren sowie durch nachfolgende Extrusion und Trocknung erreicht werden. Die größte Blausäurereduktion wurde durch die Kombination von LSPK mit niedrigem Blausäuregehalt und dem Verfahren aus Inkubation, Extrusion und Trocknung unter optimierten Prozessbedingungen erzielt, sodass der Blausäuregehalt im LSPK unter den gesetzlichen Grenzwert von 150 mg/kg gesenkt werden konnte und somit auch Meilenstein 2.6 erreicht wurde.

Für eine Umsetzung im industriellen Maßstab wurden verschiedene Maschinen identifiziert, darunter ein Pflugscharmischer zur Inkubation, ein Doppelschneckenextruder oder ein großer VAS-Mischer zur Zerkleinerung und Dampfbehandlung sowie ein Wirbelschichttrockner für

die abschließende Trocknung. Damit wurde auch Meilenstein 2.7 erreicht und der Prozess ist grundsätzlich für eine großtechnische Anwendung geeignet.

Nach der Implementierung des Verfahrens zur Blausäurereduktion im industriellen Maßstab ist eine Überprüfung der Blausäuregehalte durch Analysen in mehreren Laboren empfehlenswert, um sicherzustellen, dass der Blausäuregehalt auch im größeren Maßstab zuverlässig reduziert wird. Insbesondere die im VAS-Mischer ermittelten Ergebnisse zur Blausäurereduktion sollten nochmals überprüft werden, um die Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität zu gewährleisten.

### 5.3 Produktentwicklung

Der extrudierte Leinsamenpresskuchen kann nach der Trocknung je nach gewünschter Anwendung entweder als texturiertes Pflanzenprotein verwendet oder mithilfe von Mühlen zu Leinmehl zerkleinert werden. Im Projekt wurde der Presskuchen zudem für den Extrusionsprozess mit anderen Pflanzenproteinen wie Erbsen- oder Sojaprotein gemischt und gemeinsam extrudiert, um eine stärkere Expansion zu erzielen.

Die Kombination von Leinsamenpresskuchen mit Erbsen- oder Sojaprotein trägt zur Verbesserung des Aminosäureprofils bei, da die Proteinquellen unterschiedliche Aminosäurespektren aufweisen. Erbsen- und Sojaprotein sind reich an Lysin, während Erbsenprotein wenig Methionin und Cystein enthält. Sojaprotein bietet zwar etwas mehr Methionin und Cystein, ist jedoch ebenfalls nicht vollständig ausgewogen. Leinsamen hingegen sind eine gute Quelle für Methionin und Cystein, enthalten jedoch weniger Lysin. Durch die Kombination dieser Proteine werden Defizite ausgeglichen, sodass ein ausgewogenes Aminosäureprofil entsteht (siehe Tabelle 74).

Tabelle 74: Vergleich dreier Aminosäuren in Leinsamen-, Erbsen- und Sojaprotein

Aminosäure	Gehalt in Leinsamen nach [70] in [g/100g Protein]	Gehalt in verwendeten Erbsenprotein Nutralys F85M von Roquette in [g/100g Protein] laut Spezifikation	Gehalt in verwendeten Sojaprotein Acron SM von ADM in [g/100g Protein] laut Spezifikation
Cystein	3,8	1,0	1,3
Lysin	4,1	7,1	6,6
Methionin	2,2	1,1	1,4

#### 5.3.1 Einfluss der Behandlung zur Blausäurereduktion auf Leinsamenpresskuchen

Die funktionellen Eigenschaften des LSPKs wurden umfassend analysiert, um die Auswirkungen der verschiedenen Behandlungsverfahren zur Blausäurereduktion zu

bewerten. Dabei standen insbesondere die Emulgierfähigkeit, Schaumbildung, Wasserimmobilisierung, Wasserbindung und Gelbildung im Fokus.

**Emulgierfähigkeit:** Die Emulgierkapazität variierte je nach Behandlung. Der unbehandelte LSPK konnte etwa 70 % Öl emulgieren, während der im Labormaßstab behandelte LSPK (Inkubation, Dämpfen, Trocknung) eine leicht geringere Emulgierkapazität zeigte. Die beste Emulgierfähigkeit wies der sprühgetrocknete LSPK auf, der 75 % Öl emulgieren konnte. Die Extrusion hingegen führte zu einer deutlichen Reduktion der Emulgierfähigkeit (10 – 20 % Öl), was auf die veränderten Grenzflächeneigenschaften und Proteinstrukturen zurückgeführt werden kann.

**Schaumbildung:** Die Schaumbildungseigenschaften des LSPK waren allgemein schwach. Erhitzte Proben zeigten eine leicht verbesserte Schaumstabilität durch die Veränderung der Proteinkonfiguration, jedoch blieb das Schaumvolumen im Vergleich zu anderen Hülsenfrüchten niedrig. Der behandelte LSPK eignet sich daher eher für Anwendungen ohne hohe Schaumanforderungen.

**Wasserimmobilisierung:** Die Wasserimmobilisierungseigenschaften des unbehandelten LSPK waren gut und blieben nach verschiedenen Behandlungen weitgehend erhalten. Der im Labormaßstab behandelte LSPK (Inkubation, Dämpfen, Trocknung) zeigte eine ähnlich geringe Menge an abzentrifugierbarem Wasser wie der unbehandelte Presskuchen, sodass nur wenig freies Wasser für Reaktionen oder Quellvorgänge verfügbar bleibt. Sprühgetrockneter LSPK wies sogar eine noch höhere Wasserimmobilisierung auf. Die Extrusion wirkte sich hingegen negativ auf diese Eigenschaft aus: Extrudierte Proben setzten deutlich mehr Wasser frei, was darauf hinweist, dass durch den Extrusionsprozess Proteine denaturiert und die Struktur der Hemicellulosen verändert wurde, was letztlich die Wasserhaltefähigkeit reduzierte.

**Wasserbindung:** Die Wasserbindungskapazität des LSPKs war bei unbehandelten Proben etwas höher als bei den behandelten (Inkubation, Dämpfen, Trocknung) und sprühgetrockneten Proben. Dennoch wiesen alle Proben gute Wasserbindungseigenschaften auf, die besonders für Produkte von Bedeutung sind, bei denen eine stabile Textur und ein hohes Wasserhaltevermögen erforderlich sind, wie z. B. in Teigen.

**Gelbildung:** In Bezug auf die Gelbildung zeigte der unbehandelte LSPK eine höhere Schubspannung und damit eine stabilere Gelstruktur. Die extrudierte Probe wies eine schwächere Gelstruktur auf, was vermutlich auf die Fragmentierung und Denaturierung von Proteinen und Polysacchariden während des Extrusionsprozesses zurückzuführen ist.

Zusammenfassend zeigen die Analysen, dass die verschiedenen Behandlungsverfahren die funktionellen Eigenschaften des LSPK unterschiedlich stark beeinflussen. Sprühgetrockneter LSPK wies vorteilhafte Emulgier- und Wasserbindungseigenschaften auf, während die Extrusion tendenziell nachteilige Effekte auf Emulgierfähigkeit, Wasserimmobilisierung und Gelbildungskapazität hatte.

Je nach gewünschter Endanwendung des behandelten LSPK kann die Dampfbehandlung im VAS-Mischer von Vorteil sein, da sie zumindest im Labormaßstab vergleichsweise geringere

negative Auswirkungen auf die funktionellen Eigenschaften zeigte als die Extrusion. Eine gezielte Dampfbehandlung könnte sich besonders eignen, wenn der LSPK beispielsweise für die Backwarenindustrie verwendet werden soll, wo gute Wasserbindung und Strukturstabilität wichtig sind.

Für den Einsatz in TVP-Produkten haben die funktionellen Eigenschaften des extrudierten LSPK jedoch ausgereicht, um in Kombination mit anderen Pflanzenproteinen einen qualitativ hochwertigen Fleischersatz herzustellen.

### **5.3.2 Applikationsfelder**

Als Applikationsfelder für behandelten Leinsamenpresskuchen konnten folgende Produktgruppen identifiziert werden: Back- & Nudelwaren, Frühstücksprodukte, Fleisch-/Fisch-/Ei- und Milchalternativen, Snacks und Saucen.

Über verschiedene Versuche konnte bestätigt werden, dass sich der Leinpresskuchen mit geringerem Blausäuregehalt als Zutat für verschiedene Anwendungen wie Mayonnaise, Backwaren oder Fleischersatzprodukte eignet.

Ein Ziel der Ölmühle Moog ist, dass Unternehmen verschiedene Zutaten wie Verdickungsmittel, Emulgatoren, Mehl oder Füllstoffe durch das Leinmehl ersetzen. Dadurch kann eine Anreicherung des Produkts mit Protein und Ballaststoffen stattfinden. Allerdings muss die genaue Menge, die mit dem Leinmehl bei gleichen physikalischen Eigenschaften ersetzt werden kann, individuell getestet werden, was eine Produktentwicklung im Unternehmen erfordert. Zudem ist zu beachten, dass das Leinmehl eine dunkelbraune Farbe und einen satigen, nussigen, brotigen und leicht herben Geschmack aufweist.

Meilenstein 3.8: Leinpresskuchen mit geringerem Blausäuregehalt wurde erfolgreich in bestehenden Rezepturen getestet.

## **6 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse aus den Anbauversuchen und dem Praxismonitoring liefern wichtige Informationen für die (a) Anbaupraxis, (b) die Fachberatung, die (c) Agrarforschung und die (d) Lebensmittelverarbeitungsunternehmen.

(a) Das große Engagement der Betriebe im Projekt zeigte die Notwendigkeit und das Interesse an praxisnaher Forschung zur Kultur Lein. Die beteiligten Betriebe haben alle betriebsspezifischen Ergebnisse in Form von Jahresberichten zur Verfügung gestellt bekommen, sodass sie Informationen zum eigenen Standort, zur Qualität der Leinsamen und möglichen Einflussfaktoren sowie zu generellen Zusammenhängen von Qualität und Anbaufaktoren erhalten haben. Durch das Projekt wurde eine gute Vernetzung der Betriebe erreicht, dadurch ein wertvoller Austausch und kollegiale Beratung ermöglicht. Über die im Rahmen des Projektes eingeführte Kategorie Ölsaaten in der Biowarenbörse wurden zudem neue Marktzugänge eröffnet. Mit dem Merkblatt Winterlein werden Wissenslücken zum

Anbau geschlossen. Durch die Beteiligung an einem Praxisforschungsprojekt konnte die Beziehung von Praxis und Forschung weiterentwickelt sowie fachliches und methodisches Wissen gegenseitig ausgetauscht werden.

(b) Der Fachberatung werden mit den Projektergebnisse Kennzahlen und Entscheidungshilfen für den qualitätsorientierten Anbau von Lein zur Verfügung gestellt. Über die Beteiligung der Gää im Projekt wurde eine gute Vernetzung mit der Fachberatung erreicht.

(c) Im Bereich Agrarforschung werden grundlegende Informationen zur Interaktion von Pflanze-Umweltfaktoren-Anbauverfahren im Hinblick auf ertrags- und qualitätswirksame Faktoren bereitgestellt. Die Ergebnisse können in weiterführende Untersuchungen einfließen.

(d) Lebensmittelverarbeitungsunternehmen können mit den Projektergebnissen Informationen zum Status-Quo der heimischen Leinsaat erlangen. In der Zusammenarbeit wurden neue Marktpartnerschaften geschlossen und eine Vernetzung innerhalb der Wertschöpfungskette ermöglicht.

Im Projekt wurden praxisrelevante Ergebnisse erzielt, die sowohl für die Industrie als auch für die Forschung direkt anwendbar sind. Die entwickelten Verfahren zur Blausäurereduktion in LSPK bieten der Industrie praktikable Ansätze, um LSPK sicher und vielseitig nutzbar zu machen. Thermische Verfahren bestehend aus Inkubation, Bedampfung oder Extrusion mit anschließender Trocknung zeigten, dass die Blausäuregehalte erfolgreich unter den gesetzlichen Grenzwert von 150 mg/kg gesenkt werden können, was eine sichere Grundlage für die Verwendung von LSPK in Lebensmittelprodukten schafft.

Bezüglich der Verarbeitung der Leinsamen zu Öl und Presskuchen konnte gezeigt werden, dass sich manche Leinsamensorten weniger für diesen Industriezweig eignen. Sensorisch konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Zudem wurde die Vielfältigkeit der Anwendungsmöglichkeiten von Leinsamenpresskuchen in Lebensmitteln aufgezeigt, wodurch das Nebenprodukt der Ölpressung ein wirtschaftliches Upgrade erfahren kann.

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts ein Round Table zur Blausäureanalytik organisiert, um die Relevanz und die Herausforderungen einer korrekten Analyse der Blausäuregehalte zu diskutieren und das Bewusstsein für die genaue Analytik zu schärfen. Dies ist besonders wertvoll, da die präzise Bestimmung des Blausäuregehalts in LSPK für die Lebensmittelsicherheit unerlässlich ist und Unterschiede in den Messmethoden erheblichen Einfluss auf die Qualitätssicherung haben können.

Für die Forschung eröffnen die Ergebnisse neue Ansätze zur Optimierung der Blausäurereduktion und zur Verbesserung der Funktionalität von LSPK durch unterschiedliche Behandlungsverfahren. Die Ergebnisse sind ein wertvoller Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung industriell einsetzbarer Technologien und fördern die gezielte Anpassung der Prozessparameter, um Lebensmittelsicherheit und Produktqualität gleichermaßen zu gewährleisten.

## **7 Gegenüberstellung des ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen und Hinweise auf weiterführende Fragestellungen**

Die von der Universität Bonn geplanten Projektziele wurden weitgehend erreicht. Die Versuche zum Vergleich unterschiedlicher Erntetechnik in der Praxis konnten aus methodischen Gründen nicht realisiert werden. Weiterführende Fragestellungen ergeben sich im Bereich des Zusammenwirkens von Mikro- und Makronährstoffen auf Ertrag und Qualität. Für eine multivariate Statistik standen für Winterlein nicht genügend Fälle (=Praxisschläge) zur Verfügung. Nicht berücksichtigt werden konnte die Frage der Cyclolinopeptide als potenzielle Ursache der Bitterkeit des Leinöles. Aus Zeitgründen nicht realisiert werden konnte ein von der Universität Bonn und Projektpartner Gaa e. V. geplantes Folgeprojekt im Bereich der ökonomischen Betrachtung des ökologischen Leinanbaus.

Von Seiten Ölmühle Moog wurden ebenfalls die geplanten Projektziele weitgehend erreicht. Das Vorhaben, das blausäureabgereicherte Leinmehl durch das DIL in Bestandsrezepturen der Ölmühle Moog zu testen, konnte nicht umgesetzt werden, da die entsprechenden Produkte eingestellt wurden. Aus diesem Grund wurden andere Anwendungen getestet. In Bezug auf die Funktionalität des Leinmehls sind einige Einschränkungen durch den stark beanspruchenden Prozess zu verzeichnen, sodass hier eine Prozessoptimierung wünschenswert wäre. Bezüglich des Verbraucherakzeptanztests ergab sich die Testung eines innovativen, vom DIL produzierten TVP aus Lein- und Erbsenproteinmehl im Vergleich zu am Markt bestehenden Sonnenblumenhack. Für die Marktreife müsste eine weitergehende Produktentwicklung vorgenommen werden.

Die geplanten Ziele des DIL wurden ebenfalls weitgehend erreicht. Ein zentraler Schwerpunkt war die Entwicklung eines Prozesses zur Blausäurereduktion in Leinsamenpresskuchen. Der entwickelte dreistufige Prozess – bestehend aus Inkubation, Extrusion und anschließender Trocknung – konnte erfolgreich implementiert werden und führte zu einer signifikanten Reduktion des Blausäuregehalts, sodass der Presskuchen für Lebensmittelanwendungen nutzbar wurde. Die gesetzlichen Grenzwerte wurden unterschritten, und der Prozess zeigte sich als skalierbare Grundlage für die industrielle Anwendung. Allerdings wurden im Rahmen des Projekts auch Herausforderungen identifiziert. Der Abreicherungsprozess führt aufgrund der hohen Temperaturen während der Extrusion zu einer Beeinträchtigung der Proteinfunktionalität, was insbesondere die Nutzung in bestimmten Anwendungen einschränkt. Eine weitere Optimierung der Prozessparameter wäre notwendig, um den Prozess schonender zu gestalten und funktionelle Eigenschaften besser zu erhalten.

Weiterführende Fragestellungen im Zusammenhang der Blausäurereduktion wären:

Sicherheitsaspekte im industriellen Maßstab:

Der kontinuierliche Austritt von toxischer Blausäure während des Prozesses erfordert eine sichere Gestaltung der Produktionsumgebung. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um

Konzepte für eine effektive Absaugung und Reinigung der Abluft zu entwickeln, die den Anforderungen der Arbeitssicherheit und des Umweltschutzes gerecht werden.

Prozessoptimierung:

Zusätzliche Versuche könnten darauf abzielen, die Bedingungen während der Inkubation, Extrusion und Trocknung weiter zu verbessern (z. B. Reduktion der Temperaturen). Ziel wäre es, den Blausäuregehalt weiterhin zuverlässig zu reduzieren, dabei jedoch die Denaturierung der Proteine zu minimieren und die funktionellen Eigenschaften des Presskuchens besser zu erhalten.

Inkubation und direkte Bedampfung:

Die Rolle der Inkubation könnte durch weitere Versuche im Hinblick auf die bessere Hydrolyse der cyanogenen Glycoside genauer untersucht werden. Auch die direkte Bedampfung sollte erneut evaluiert werden, um ihren Einfluss auf die Blausäurereduktion und die Proteinfunktionalität besser zu verstehen.

Diese Fragestellungen bieten wichtige Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten, die sowohl wissenschaftliche als auch praxisorientierte Ziele verfolgen können.

## **8 Zusammenfassung**

Das Standortscreening im Rahmen des Projekts Linovit lieferte über vier Jahre hinweg eine Vielzahl von Daten zu ertrags- und qualitätswirksamen Faktoren von Lein, wobei der Schwerpunkt auf Sommerlein lag. Das komplexe Zusammenwirken von Sorte mit den Anbau-, Standort- und Klimabedingungen zeigte für viele Faktoren die oftmals begrenzten Handlungsoptionen der Praxis. Dennoch kann über eine gezielte Sorten- und Standortwahl teilweise auf die Parameter Blausäure- und Cadmiumgehalt der Leinsaat Einfluss genommen werden. Die Analysen der Leinsaat unterstreichen das große Potenzial des heimischen Leinanbaus. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den zahlreichen Versuchen zu verschiedenen Anbaumaßnahmen und Sortenprüfungen bieten Landwirten praxisnahe Entscheidungshilfen. Der Anbau von Winterlein wird als erfolgversprechende Alternative zum Anbau von Sommerlein für bestimmte Klimaregionen und Betriebssysteme gesehen.

Im Bereich der technologischen Verarbeitung wurde ein Verfahren zur Reduktion von Blausäure im Leinsamenpresskuchen erfolgreich entwickelt. Der dreistufige Prozess umfasst die Inkubation des Presskuchens mit Wasser, die Extrusion bei Produkttemperaturen von mindestens 150 °C und eine abschließende Trocknung im Wirbelschichttrockner. Diese Methode senkt den Blausäuregehalt zuverlässig unter die gesetzlichen Grenzwerte und ermöglicht die Nutzung des Presskuchens in der Lebensmittelindustrie. Die Analyse der funktionellen Eigenschaften zeigte leichte Beeinträchtigungen der Proteinfunktionalität durch den Prozess. Dennoch erwies sich der extrudierte Presskuchen, insbesondere in Kombination mit anderen pflanzlichen Proteinen wie Erbsen-, Ackerbohnen- oder Sojaprotein, als gut geeignet für die Entwicklung von Fleischersatzprodukten.

Neben den technologischen Fortschritten leistete das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Sensibilisierung für die Herausforderungen der Blausäureanalytik. Im Rahmen eines Round Tables wurden Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Bereichen zusammengebracht, um die Problematik der Analytik in komplexen Matrices wie Leinsamenpresskuchen zu erörtern. Dabei wurde die Notwendigkeit betont, harmonisierte Analysemethoden zu etablieren, um verlässliche Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Projektergebnisse bieten wertvolle Impulse sowohl für die landwirtschaftliche Praxis als auch für die industrielle Verarbeitung. Sie eröffnen neue Möglichkeiten für eine nachhaltige und vielseitige Nutzung von Leinsamen und Leinsamenpresskuchen als Rohstoffe in der Lebensmittelindustrie.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] 'Markt für Leinsamen - Anteil, Größe & Wachstum'. Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/flaxseeds-market>
- [2] M. Rubilar, C. Gutiérrez, M. Verdugo, C. Shene, and J. Sineiro, 'FLAXSEED AS A SOURCE OF FUNCTIONAL INGREDIENTS'.
- [3] K. Mueller, P. Eisner, Y. Yoshie-Stark, R. Nakada, and E. Kirchhoff, 'Functional properties and chemical composition of fractionated brown and yellow linseed meal (*Linum usitatissimum* L.)', *J Food Eng*, vol. 98, no. 4, pp. 453–460, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.01.028.
- [4] M. Imran, F. M. Anjum, M. S. Butt, M. Siddiq, and M. A. Sheikh, 'Reduction of cyanogenic compounds in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) meal using thermal treatment', *Int J Food Prop*, vol. 16, no. 8, pp. 1809–1818, 2013, doi: 10.1080/10942912.2011.608914.
- [5] C. Gutiérrez, M. Rubilar, C. Jara, M. Verdugo, J. Sineiro, and C. Shene, 'FLAXSEED AND FLAXSEED CAKE AS A SOURCE OF COMPOUNDS FOR FOOD INDUSTRY'.
- [6] H. N. Rabetafika, V. Van Remoortel, S. Danthine, M. Paquot, and C. Blecker, 'Flaxseed proteins: Food uses and health benefits', Feb. 2011. doi: 10.1111/j.1365-2621.2010.02477.x.
- [7] M. W. Y. Chung, B. Lei, and E. C. Y. Li-Chan, 'Isolation and structural characterization of the major protein fraction from NorMan flaxseed (*Linum usitatissimum* L.)', *Food Chem*, vol. 90, no. 1–2, pp. 271–279, Mar. 2005, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2003.07.038.
- [8] C. Sanmartin *et al.*, 'Flaxseed cake as a tool for the improvement of nutraceutical and sensorial features of sourdough bread', *Foods*, vol. 9, no. 2, 2020, doi: 10.3390/foods9020204.

- [9] M. Matusiewicz, I. Kosieradzka, M. Zuk, and J. Szopa, 'Effect of Dose and Administration Period of Seed Cake of Genetically Modified and Non-Modified Flax on Selected Antioxidative Activities in Rats', *International Journal of Molecular Sciences* 2015, Vol. 16, Pages 14259-14275, vol. 16, no. 6, pp. 14259–14275, Jun. 2015, doi: 10.3390/IJMS160614259.
- [10] B. Tanwar and A. Goyal, 'Oilseeds: Health Attributes and Food Applications', *Oilseeds: Health Attributes and Food Applications*, pp. 1–516, Jan. 2020, doi: 10.1007/978-981-15-4194-0/COVER.
- [11] K. Abraham, T. Buhrke, and A. Lampen, 'Bioavailability of cyanide after consumption of a single meal of foods containing high levels of cyanogenic glycosides: a crossover study in humans', *Arch Toxicol*, vol. 90, no. 3, pp. 559–574, 2016, doi: 10.1007/s00204-015-1479-8.
- [12] D. Schrenk *et al.*, 'Evaluation of the health risks related to the presence of cyanogenic glycosides in foods other than raw apricot kernels', *EFSA Journal*, vol. 17, no. 4, p. e05662, Apr. 2019, doi: 10.2903/J.EFSA.2019.5662.
- [13] W. L. B. White, D. I. Arias-Garzon, J. M. McMahon, and R. T. Sayre, 'Cyanogenesis in Cassava: The Role of Hydroxynitrile Lyase in Root Cyanide Production', *Plant Physiol*, vol. 116, no. 4, pp. 1219–1225, Apr. 1998, doi: 10.1104/PP.116.4.1219.
- [14] M. Zuk, K. Pelc, J. Szperlik, A. Sawula, and J. Szopa, 'Metabolism of the cyanogenic glucosides in developing flax: Metabolic analysis, and expression pattern of genes', *Metabolites*, vol. 10, no. 7, pp. 1–13, Jul. 2020, doi: 10.3390/metabo10070288.
- [15] P. Kajla, A. Sharma, and D. R. Sood, 'Flaxseed—a potential functional food source', Apr. 01, 2015, *Springer India*. doi: 10.1007/s13197-014-1293-y.
- [16] R. Russo and R. Reggiani, 'Variation in the Content of Cyanogenic Glycosides in Flaxseed Meal from Twenty-One Varieties', *Food Nutr Sci*, vol. 05, no. 15, pp. 1456–1462, 2014, doi: 10.4236/fns.2014.515159.
- [17] H. Rosling, 'Cyanide exposure from linseed', *The Lancet*, vol. 341, no. 8838, p. 177, Jan. 1993, doi: 10.1016/0140-6736(93)90040-N.
- [18] V. M. Mandokhot and N. Singh, 'Studies on linseed (*Linum usitatissimum*) as a protein source. 2. Evidence of toxicity and treatments to improve quality.', 1983.
- [19] B. D. Oomah, G. Mazza, and E. O. Kenaschuk, 'Cyanogenic Compounds in Flaxseed', *J Agric Food Chem*, vol. 40, no. 8, pp. 1346–1348, Aug. 1992, doi: 10.1021/JF00020A010/ASSET/JF00020A010.FP.PNG\_V03.
- [20] F. Halstrøm and K. O. Møller, 'The Content of Cyanide in Human Organs from Cases of Poisoning with Cyanide taken by Mouth. With a Contribution to the Toxicology of

- Cyanides', *Acta Pharmacol Toxicol (Copenh)*, vol. 1, no. 1, pp. 18–28, 1945, doi: 10.1111/j.1600-0773.1945.tb02560.x.
- [21] *EU-Verordnung 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006*. 2023. Accessed: Aug. 29, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32023R0915>
- [22] A. J. A. Essers, R. M. Van Der Grift, and A. G. J. Voragen, 'Cyanogen removal from cassava roots during sun-drying', *Food Chem*, vol. 55, no. 4, pp. 319–325, Apr. 1996, doi: 10.1016/0308-8146(95)00098-4.
- [23] D. Feng, Y. Shen, and E. R. Chavez, 'Effectiveness of different processing methods in reducing hydrogen cyanide content of flaxseed', *J Sci Food Agric*, vol. 83, no. 8, pp. 836–841, Jun. 2003, doi: 10.1002/jsfa.1412.
- [24] T. Yamashita, T. Sano, T. Hashimoto, and K. Kanazawa, 'Development of a method to remove cyanogen glycosides from flaxseed meal', *Int J Food Sci Technol*, vol. 42, no. 1, pp. 70–75, 2007, doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.01212.x.
- [25] Chou-Fei Wu, 'Construction of recombinant *Pichia* strain GS115-Ch-Glu expressing  $\beta$ -glucosidase and cyanide hydratase for cyanogenic glycosides detoxification', *Afr J Biotechnol*, vol. 11, no. 19, Mar. 2012, doi: 10.5897/ajb11.3439.
- [26] C. F. Wu *et al.*, 'An efficient fermentation method for the degradation of cyanogenic glycosides in flaxseed', *Food Additives and Contaminants - Part A*, vol. 29, no. 7, pp. 1085–1091, 2012, doi: 10.1080/19440049.2012.680202.
- [27] R. K. Chadha, J. F. Lawrence, and W. M. N. Ratnayake, 'Ion chromatographic determination of cyanide released from flaxseed under autohydrolysis conditions', *Food Addit Contam*, vol. 12, no. 4, pp. 527–533, 1995, doi: 10.1080/02652039509374341.
- [28] K. T. MADHUSUDHAN, H. P. RAMESH, T. OGAWA, K. SASAOKA, and N. SINGH, 'Detoxification of Commercial Linseed Meal for Use in Broiler Rations', *Poult Sci*, vol. 65, no. 1, pp. 164–171, Jan. 1986, doi: 10.3382/PS.0650164.
- [29] P. M. Ganorkar and R. Jain, 'Effect of microwave roasting on cyanogenic glycosides and nutritional composition of flax seed', *BIOINFOLET - A Quarterly Journal of Life Sciences*, 2014.
- [30] H. Yang, Z. Mao, H. Tan, and F. C. Laurier, 'Determination and Removal Methods for Cyanogenic Glucoside in Flaxseed Written for presentation at the 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE/CSAE', 2004.

- [31] M. Wu *et al.*, 'Extrusion detoxification technique on flaxseed by uniform design optimization', *Sep Purif Technol*, vol. 61, no. 1, pp. 51–59, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.seppur.2007.09.016.
- [32] E. Q. Xia, X. X. Ai, S. Y. Zang, T. T. Guan, X. R. Xu, and H. Bin Li, 'Ultrasound-assisted extraction of phillyrin from *Forsythia suspensa*', *Ultrason Sonochem*, vol. 18, no. 2, pp. 549–552, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.ULTSONCH.2010.09.015.
- [33] T. K. Varga and L. L. Diosady, 'Simultaneous Extraction of Oil and Antinutritional Compounds from Flaxseed', 1994.
- [34] J. P. D. Wanasundara and F. Shahidi, 'Alkanol-ammonia-water/hexane extraction of flaxseed', 1994.
- [35] K. T. Madhusudhan and N. Singh, 'Effect of Detoxification Treatment on the Physicochemical Properties of Linseed Proteins', 1985.
- [36] J. Klein, S. Zikeli, W. Claupein, and S. Gruber, 'Linseed (*Linum usitatissimum*) as an oil crop in organic farming: abiotic impacts on seed ingredients and yield', *Organic Agriculture*, vol. 7, no. 1, pp. 1–19, Mar. 2017, doi: 10.1007/S13165-016-0146-6/METRICS.
- [37] P. J. Hocking and M. J. McLaughlin, 'Genotypic variation in cadmium accumulation by seed of linseed, and comparison with seeds of some other crop species', *Crop Pasture Sci*, vol. 51, no. 4, pp. 427–433, 2000, doi: 10.1071/AR99124.
- [38] A. ; H. R. , G. T. Biertümpfel, 'Qualitätsparameter von Speiselein in Abhängigkeit von Sorte und Standort. Poster, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft', 2005.
- [39] P. Kajla, A. Sharma, and D. R. Sood, 'Flaxseed—a potential functional food source', *J Food Sci Technol*, vol. 52, no. 4, pp. 1857–1871, Apr. 2015, doi: 10.1007/S13197-014-1293-Y/METRICS.
- [40] B. D. Oomah and G. Mazza, 'Flaxseed proteins—a review', *Food Chem*, vol. 48, no. 2, pp. 109–114, Jan. 1993, doi: 10.1016/0308-8146(93)90043-F.
- [41] C. Qiu *et al.*, 'Comparison of fatty acid composition, phytochemical profile and antioxidant activity in four flax (*Linum usitatissimum* L.) varieties', *Oil Crop Science*, vol. 5, no. 3, pp. 136–141, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ocsci.2020.08.001.
- [42] M. Nykter, H. R. Kymäläinen, F. Gates, and A. M. Sjöberg, 'Quality characteristics of edible linseed oil', *Agricultural and Food Science*, vol. 15, no. 4, pp. 402–413, Jan. 2006, doi: 10.2137/145960606780061443.
- [43] A. Diederichsen and J. P. Raney, 'Pure-lining of flax (*Linum usitatissimum* L.) genebank accessions for efficiently exploiting and assessing seed character diversity', *Euphytica*, vol. 164, no. 1, pp. 255–273, Nov. 2008, doi: 10.1007/S10681-008-9725-2/METRICS.

- [44] J. Hiltbrunner, T. Hebeisen, H.-R. Hunziker, and C. Herzog, 'Eignung von neuen Sommeröleinsorten für den Ökolandbau im Schweizer Mittelland', 2009.
- [45] D. T. Canvin, 'THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE OIL CONTENT AND FATTY ACID COMPOSITION OF THE OILS FROM SEVERAL OIL SEED CROPS', <https://doi.org/10.1139/b65-008>, vol. 43, no. 1, pp. 63–69, Jan. 2011, doi: 10.1139/B65-008.
- [46] B. D. Oomah and G. Mazza, 'Compositional changes during commercial processing of flaxseed', *Ind Crops Prod*, vol. 9, no. 1, pp. 29–37, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0926-6690(98)00010-7.
- [47] Pellet D.; Vullioud P., 'Winter- und Sommerlein: eine bemerkenswerte Kultur. Agrarforschung Schweiz 11 (8), 1–8.', 2004.
- [48] R. Casa *et al.*, 'Environmental effects on linseed (*Linum usitatissimum* L.) yield and growth of flax at different stand densities', *EuJAg*, vol. 11, no. 3, pp. 267–278, Nov. 1999, doi: 10.1016/S1161-0301(99)00037-4.
- [49] D. Pageau, J. Lajeunesse, and J. Lafond, 'Effect of seeding rate and nitrogen fertilization on oilseed flax production', *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 86, no. 2, pp. 363–370, 2006, doi: 10.4141/P05-078/ASSET/P05-078.FP.PNG\_V03.
- [50] A. Biertümpfel, 'Anbautelegramm Winterölein (*Linum usitatissimum* L.). Herausgeber: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum', 2021. [Online]. Available: [www.tlllr.thueringen.de](http://www.tlllr.thueringen.de)
- [51] J. Klein, S. Zikeli, W. Claupein, and S. Gruber, 'Linseed (*Linum usitatissimum*) as an oil crop in organic farming: abiotic impacts on seed ingredients and yield', *Organic Agriculture*, vol. 7, no. 1, pp. 1–19, Mar. 2017, doi: 10.1007/S13165-016-0146-6/METRICS.
- [52] R. Marquard, L. Schmidt, and A. Vömel, 'Der Einfluß gesteigerter Stickstoffdüngung und Wasserversorgung auf Ertrag und Samenqualität von Lein (*Linum usitatissimum* L.)', *Fette, Seifen, Anstrichmittel*, vol. 86, no. 4, pp. 139–145, Jan. 1984, doi: 10.1002/LIPI.19840860402.
- [53] J. A. Zemolin, A. D. Lúcio, J. C. Cassol, D. N. Follmann, M. Nardino, and V. S. Marchioro, 'Development of Flaxseed Submitted to Nitrogen Doses<sup/>', *Revista Ceres*, vol. 70, no. 5, p. e70501, Oct. 2023, doi: 10.1590/0034-737X202370050001.
- [54] A. Dilenssie, T. Desalegn, and H. Ashagre, 'Effect of Nitrogen Fertilizer Rates on Seed Yield and Oil Quality of Linseed (*Linum Usitatissimum* L.) Varieties in Welmera District, Central Highland of Ethiopia', *Journal of Science and Sustainable Development*, vol. 8, no. 2, pp. 62–73, Jul. 2020, doi: 10.20372/AU.JSSD.8.2.2020.0150.

- [55] C. Herzog, J. Anderegg, C. Luginbühl, P. Stettler, and J. Hiltbrunner Agroscope, 'Stickstoffdüngung von Öllein beeinflusst Samenertrag und Ölqualität', 2017.
- [56] C. A. Grant, D. McLaren, R. B. Irvine, and S. D. Duguid, 'Nitrogen source and placement effects on stand density, pasmo severity, seed yield, and quality of no-till flax', *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 96, no. 1, pp. 34–47, Feb. 2016, doi: 10.1139/CJPS-2014-0425/ASSET/IMAGES/LARGE/CJPS-2014-0425TAB13.JPEG.
- [57] S. Mitra *et al.*, 'Changes in seed yield and oil quality of flax (*Linum usitatissimum* L.) for industrial use in response to nitrogen and potassium fertilization', *Arch Agron Soil Sci*, vol. 69, no. 15, pp. 3619–3636, Sep. 2023, doi: 10.1080/03650340.2023.2271402.
- [58] S. Andruszczak, U. Gawlik-Dziki, P. Kraska, E. Kwiecińska-Poppe, K. Różyło, and E. Pałys, 'Yield and quality traits of two linseed (*Linum usitatissimum* L.) cultivars as affected by some agronomic factors', <https://pse.agriculturejournals.cz/doi/10.17221/120/2015-PSE.html>, vol. 61, no. 6, pp. 247–252, 2015, doi: 10.17221/120/2015-PSE.
- [59] Luginbühl C.; Herzog Ch; Stettler P; Hiltbrunner J., 'Ansätze zur Optimierung des Ölleinanbaus in der Schweiz Agroscope, Institut für Pflanzenbauwissenschaften IPB, 8046 Zürich, Agrarforschung Schweiz 6 (7–8): 304–311, 2015', 20215.
- [60] G. Homayouni, M. Souri, and M. Zarein, 'Effects of Zinc and Nitrogen on Yield Components of Five Flax Genotypes', 2013.
- [61] Gerhard. Geisler, 'Pflanzenbau: ein Lehrbuch-Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion', p. 479, 1980, Accessed: Dec. 18, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.com/books/about/Pflanzenbau.html?hl=de&id=D9rJAAACAAJ>
- [62] C. ; Guddat and I. Schwabe, 'Allgemeine Auswirkungen des Klimawandels auf den Pflanzenbau in Thüringen. In: Ökolandbau in Thüringen 2013 "Entwicklung und Ergebnisse" Schriftenreihe Heft 5/2013 Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen', 2013.
- [63] R. Savoie *et al.*, 'Environmental and varietal impact on linseed composition and on oil unidirectional expression process', *OCL*, vol. 22, no. 6, p. D605, Nov. 2015, doi: 10.1051/OCL/2015016.
- [64] B. Čeh, S. Štraus, A. Hladnik, and A. Kušar, 'Impact of Linseed Variety, Location and Production Year on Seed Yield, Oil Content and Its Composition', *Agronomy 2020, Vol. 10, Page 1770*, vol. 10, no. 11, p. 1770, Nov. 2020, doi: 10.3390/AGRONOMY10111770.
- [65] S. Zare, A. Mirlohi, M. R. Sabzalian, G. Saeidi, M. Z. Koçak, and C. Hano, 'Water Stress and Seed Color Interacting to Impact Seed and Oil Yield, Protein, Mucilage, and Secoisolariciresinol Diglucoside Content in Cultivated Flax (*Linum usitatissimum* L.)', *Plants 2023, Vol. 12, Page 1632*, vol. 12, no. 8, p. 1632, Apr. 2023, doi: 10.3390/PLANTS12081632.

- [66] B. Wittkop, R. J. Snowdon, and W. Friedt, 'Status and perspectives of breeding for enhanced yield and quality of oilseed crops for Europe', *Euphytica*, vol. 170, no. 1, pp. 131–140, Oct. 2009, doi: 10.1007/S10681-009-9940-5/METRICS.
- [67] A. Diederichsen and J. P. Raney, 'Seed colour, seed weight and seed oil content in *Linum usitatissimum* accessions held by Plant Gene Resources of Canada', *Plant Breeding*, vol. 125, no. 4, pp. 372–377, Aug. 2006, doi: 10.1111/J.1439-0523.2006.01231.X.
- [68] A. Pavlov, F. Paynel, C. Rihouey, E. Porokhvinova, N. Brutch, and C. Morvan, 'Variability of seed traits and properties of soluble mucilages in lines of the flax genetic collection of Vavilov Institute', *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 80, pp. 348–361, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.PLAPHY.2014.04.020.
- [69] G. Fila, M. Montanari, C. Maestrini, and M. Bagatta, 'Bayesian analysis of cultivar and climate effects on seed and oil production in linseed', *Ind Crops Prod*, vol. 218, p. 118883, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.INDCROP.2024.118883.
- [70] R. S. Bhatti and P. Cherdkiatgumchai, 'Compositional analysis of laboratory-prepared and commercial samples of linseed meal and of hull isolated from flax', *J Am Oil Chem Soc*, vol. 67, no. 2, pp. 79–84, Feb. 1990, doi: 10.1007/BF02540631/METRICS.

## 10 Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt, bisher und geplante Aktivitäten zur Verarbeitung der Ergebnisse

In Tabelle 75 sind die alle Aktivitäten der gesamten Linovit-Projektlaufzeit aufgeführt von Seiten DIL und Ölmühle Moog aufgelistet.

Tabelle 75: Übersicht über die Aktivitäten zur Veröffentlichung der Projektergebnisse von Ölmühle Moog und DIL

Veröffentlichung/Aktivität	Art der Veröffentlichung	Projekt-partner	Datum
Cereal Technology - INGER Verlagsgesellschaft mbH	Bericht	DIL	In Planung für 2025
DIL Jahresbericht	Bericht	DIL	Planung 2025
DIL Technology Days	Präsentation und Poster	DIL	Juni 2024
Feldtag in Klappendorf	Poster	ÖM	Juni 2024
Sitzung des DGF Arbeitskreis „Produkte und Produktsicherheit“ und „Native Öle und Olivenöl“	Vortrag	ÖM	April 2024
Lebensmitteltechnik	Zeitschriftartikel	DIL	Dezember 2023
Process Net	Poster	DIL	September 2023
Roundtable HCN Analyse	Veranstaltung mit verschiedenen Labors	DIL, ÖM, UB	September 2023
125. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Fettwissenschaft e.V.	Vortrag	ÖM	September 2023
International Conference on Environmental Footprints and Sustainable Development (ICEF) in Nantes	Poster	DIL	Juli 2023
Feldseminar	Vortrag	ÖM	Juli 2023
Projektwerkstatt Ernährungswirtschaft	Vortrag	ÖM	März 2023
Proteina in Magdeburg	Vortrag	DIL	November 2022
DIL Jahresbericht 2022	Bericht	DIL	2022
DIL Jahresbericht 2021	Bericht	DIL	2021
DIL Jahresbericht 20/21	Bericht	DIL	2020/21

Außerdem erfolgten diverse Veröffentlichungen durch den Projektpartner Uni Bonn:

Studentische Abschlussarbeiten:

Veronika Schiller (2021): Analyse von Standort- und Bewirtschaftungseffekten auf die wertgebenden und wertmindernden Inhaltsstoffe von Leinsamen und deren Verarbeitungsprodukten, Masterarbeit Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Daniel Ulhaas (2021): Verbraucherakzeptanz und sensorische Charakterisierung verschiedener Leinöle mittels Home-Use Test. Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Johanna Kirsch (2024): Einfluss von Saattermin, Saatstärke und Reihenabstand auf das Überwinterungsverhalten und die Winterverunkrautung von Winterlein (*Linum usitatissimum* L.). Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Julian Büscher (2023): Der Einfluss des Genotyps auf den Gehalt von cyanogenen Glycosiden in Leinsaat. Bachelorarbeit Universität Kassel

Lena Pollul (2023): Untersaaten (Erdklee, Rotschwingel, Kümmel) im Leinanbau zur Verbesserung des Abreifeverhaltens. Masterarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Vorträge, Feldtage und Treffen zum Erfahrungsaustausch der Praxis:

Fachtagung Sommerfeldtag, ökologischer Ackerbau – Anbau, Kulturführung und Wertschöpfung in speziellen Ackerbausystemen, 29.6.2023. Sommerleinsortenvorstellung und Versuchsergebnisse

Erfahrungsaustausch zum ökologischen Öllein-Anbau im Rahmen des Projektes Linovit Grow am Dienstag, 22. März 2022, Gää e.V. und Universität Bonn

Winterlein – Anbau und Sorten: Anbauer\*innentreffen, Betrieb Behrens, Bismark, Sachsen-Anhalt

Feldbegehung ökologischer Ölleinanbau, 16.5.2022, Betrieb Voigt in Leisnig (Gää und Uni Bonn)

Feldbegehung ökologischer Ölleinanbau, 15.7.2021, Betrieb Voigt in Leisnig (Gää und Uni Bonn)

Fachtages Ökologischer Ölpflanzenanbau mit der Ölmühle Moog, 18.6.2020 (Gää)

ONLINE Erfahrungsaustausch ökologischer Ölleinanbau 22.03.2022 (Gää und Uni Bonn)

Praktikertag (Bioland) „Speiseleinanbau – Bio-Kultur mit Marktpotential“ 2.12.2022 Weil der Stadt, Vortrag Ölleinanbau (Hanna Blum)

Ökologischer Ölleinbau, Ökoplant Fachseminar, 2023 (Hanna Blum)

Praktikertag (Bioland), Ölleinbau, 2.12.22, Hanna Blum Vortrag Innovative Ansätze zum Umgang mit qualitätsbildenden und qualitätsmindernden Inhaltsstoffen von Lein (Hanna Blum)

Feldtag ökologischer Ölleinbau mit Maschinenvorführung mit den Schwerpunkten Anbau, Schwadmähtechnik, Vermarktung, 19.08.2019 Gut Oelbergen, Betrieb Haake (Uni Bonn)

#### Posterbeiträge:

Blausäuregehalte in Leinsamen – was kommt auf die Anbaupraxis zu? Bernburger Winterseminar, 2023

Winterlein – Vorteile im heimischen Anbau von Lein (*Linum usitatissimum*)? Bernburger Winterseminar, 2024.

#### Warenbörse

Eröffnung von Marktpotentialen und zur Vernetzung von Anbaubetrieben und Weiterverarbeitern durch die Einrichtung einer Kategorie Ölsaaten in der BioWarenbörse unter: <https://www.biowarenboerse.de/kategorien/konsumware/oelsaaten/>

#### Veröffentlichungen:

Betriebsberichte: Die Betriebe erhielten jeweils Ende des Jahres einen ausführlichen Bericht mit den Daten zu ihren Flächen und Saaten.

Infobriefe: In unregelmäßigen Abständen erschienen 14 Infobriefe mit Ergebnissen aus den Versuchen für die Praxis aufbereitet

## **11 Danksagung**

Wir möchten uns herzlich bei Herrn Ulf Müller von der Gää e. V. und den zahlreichen Praxisbetrieben bedanken, die das Projekt mit ihrer engagierten Mitarbeit unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt den Betrieben für die Bereitstellung zahlreicher Leinsamenproben sowie den wertvollen fachlichen Austausch und die konstruktive Zusammenarbeit.

Herzlichen Dank an die Durchführenden der Öko-Landessortenversuche an den Standorten Görzdorf und Nossen, Bernburg und Mittelsömmern sowie Wolfgang Karalus, Ines Schwabe und Familie Marold für die freundliche Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Proben.

Das Projektteam bedankt sich ferner bei ZüchterInnen und Saatgutfirmen für die Bereitstellung von Saatgut und Sortenmaterial: Frau Edith von Bourscheidt, Firma Agrande, Saatbau Linz, Herrn Detlef Schmude, OBEG, Sativa, DSV und Freudenberger.

Unser Dank gilt außerdem dem versuchstechnischen Team des Campus Klein-Altendorf für die zuverlässige Unterstützung bei der Durchführung der Experimente.

Nicht zuletzt danken wir dem Team des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL) für die fachliche und organisatorische Begleitung des Projekts sowie Melanie Baumgart und Carolin Bommers für die intensive Projektbegleitung.

## **Anhang**

### **Anhang I: Erfolgskontrollbericht**

### **Anhang II: Merkblatt mit den Projektergebnissen**

- 1) Praxismerkblatt Pflanze: Winterleinanbau in der Praxis
- 2) Praxismerkblatt Lebensmittel: Reduktion von Blausäure in Leinsamenpresskuchen

**Tabelle A:** Agronomische und qualitative Eigenschaften sowie Merkmale unterschiedlicher Sommerleinsorten am Standort Klein-Altendorf, 2022 und 2023. Statistisch verrechnet wurden 2023 der Ertrag (nicht signifikant, Tukey  $\leq 0,05$ ), die Tausendkornmasse (TKM, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistische Unterschiede,), Quellzahl (<sup>1</sup><sub>IGV TestLab</sub>), 1=fehlend, 2=sehr gering, 3=gering, 4=gering bis mittel, 5=mittel, 6=mittel bis stark, 7=stark, 8=stark bis sehr stark, 9=sehr stark

Sorte	2022		2023						
	Lirina	Kaolin	Lirina	Goldstern	Talon	LS Koral	Blaues Wunder	Omegalin	Kaolin
Aussaat	24.3.22		22.4.2023						
Feldaufgang	5.4.22	5.4.22	2.5.23	6.8.23	2.5.23	4.5.23	2.5.23	2.5.23	2.5.23
Blühbeginn	1.6.22	1.6.22	11.6.23	18.6.23	11.6.23	10.6.23	10.6.23	11.6.23	14.6.23
Blühende	15.6.22	15.6.22	20.6.23	28.6.23	20.6.23	16.6.23	18.6.23	18.6.23	22.6.23
Reife	18.7.22	18.7.22	5.8.23	16.8.23	5.8.23	10.8.23	10.8.23	5.8.23	10.8.23
Tage Aussaat bis Aufgang	12	12	10	14	10	12	10	10	10
Tage Aussaat bis Blühbeginn	68	68	50	57	50	49	49	50	53
Tage Aussaat bis Reife	116	116	105	116	105	110	110	105	110
Ernte	3.8.22		10.8.23	16.8.23	10.8.23	10.8.23	10.8.23	10.8.23	10.8.23
Pflanzenlänge zur Ernte (cm)	65	65	55	65	49	51	50	54	49
Pflanzenzahl/m <sup>2</sup> zur Ernte	170	132	264	144	261	242	280	294	253
Ertrag gereinigte Ware dt/ha	22,7	19,5	9,2	7,2	8,3	7,6	9,3	9,1	8,2
TKM (g)	6,8	6,4	5,4 a	7,4 c	5,7 a	7,4 c	7,0 c	6,4 b	6,4 b
Quellzahl! <sup>1</sup>	5	4,5	4,1	7,5	4,5	4,5	5,5	4	4,5
Gleichmäßig Abreife	8	8	6	5	6	8	8	6	6
Befall mit E. Mehltau	1	1	1	1	3	8	2	4	4
Zwiewuchs	1	1	3	2	3	8	1	2	3
Verzögerte Strohausreife	2	2	2	3	2	5	1	1	1