

**Anbauoptimierung durch Mischanbau und
inhaltsstoffliche sowie sensorische Qualitätseigenschaften
morphinarmer Winter- und Sommermohnsorten
(*Papaver somniferum* L.)**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktorin der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Katharina Luhmer

aus

Wachtberg

Bonn, 2021

Referent: Prof. Dr. Ralf Pude

Koreferent: Prof. Dr. Thomas Döring

Tag der mündlichen Prüfung: 16.04.2021

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn

Teil C: Reproduced in part with permission from Journal of Agricultural and Food Chemistry, submitted for publication. Unpublished work copyright 2021 American Chemical Society

Inhaltsverzeichnis

I Zusammenfassung	5
II Summary	6
III Abkürzungsverzeichnis	7
Teil A: Mohnpflanze und Mohnanbau	9
1.0 Allgemeine Einleitung und Problemstellung	9
1.1 Historie	10
1.2 Biologie der Mohnpflanze	11
1.3 Mohnanbau	12
1.4 Nutzung von Mohnsamen und -öl	15
Teil B: Versuche zur Anbauoptimierung durch Misanbau	17
2.0 Mohn im Misanbau	17
3.0 Hypothesen	20
4.0 Material/Methoden	22
4.1 Versuchsaufbau	22
4.2 Standortbeschreibung	25
4.3 Vegetationsparameter	26
4.4 Ernteparameter	30
4.5 Statistik	32
5.0 Ergebnisse und Diskussion	33
5.1 Entwicklungsverläufe	33
5.1.1 Entwicklung der oberirdischen Biomasse	33
5.1.2 Entwicklung der Pflanzenhöhe	40
5.1.3 Entwicklung der Blattfläche	45
5.2 Nährstoffversorgung	52
5.2.1 Stickstoff und Kohlenstoff in der Pflanze	52
5.2.2 Mineralisch verfügbarer Stickstoff (N_{\min}) im Boden	65
5.2.3 Sensorbasierte Messungen (SPAD und NDVI)	69
5.3 Unkrautentwicklung	78
5.3.1 Bodenbedeckung und Unkrautdeckungsgrad	78
5.3.2 Unkrautanzahl und Unkrautbiomasse	83
5.3.3. Unkrautarten	84
5.4 Erträge	86
5.4.1 Mohnerträge	86
5.4.2 Sommergerstenerträge	92
5.4.3 Land Equivalent Ratio	96
5.4.4 Competitive Ratio	97

5.4.5 Proteingehalt der Sommergerste	99
5.5. Schlussfolgerung für den Mischanbau	101
Teil C: Inhaltsstoffliche und sensorische Qualitätsanalysen von Mohnsamen und Mohnöl	106
7.0 Notwendigkeit der Qualitätssicherung	106
7.1 Inhaltsstoffe und sensorische Eigenschaften des Mohns.....	108
7.2 Sensorische Grundlagen	112
8.0 Hypothesen.....	115
9.0 Material und Methoden	116
9.1 Probenmaterial	116
9.2 Anbauggebiete	117
9.3 Verwendete Chemikalien.....	120
9.4 Probenaufbereitung und -lagerung	120
9.5 Chemische Analysen.....	121
9.5.1 Analyse des Ölgehalts	121
9.5.2 Analyse des Fettsäuremusters.....	121
9.5.3 Analyse des Tocopherolgehalts	122
9.5.4 Analyse der flüchtigen Verbindungen.....	123
9.6 Sensorische Prüfmethode n	127
9.6.1 Panelschulung	127
9.6.2 Einfach beschreibende Profilprüfung.....	135
9.6.2 Quantitative sensorische Profilprüfung.....	138
9.7 Statistik.....	140
10.0 Ergebnisse und Diskussion	141
10.1 Ergebnisse der chemischen Analytik	141
10.1.1 Ölgehalt	141
10.1.2 Fettsäuremuster.....	142
10.1.3 Tocopherole.....	144
10.1.4 Flüchtige Verbindungen	146
10.2 Sensorische Auswertungen	155
10.2.1 Geruch und Flavor	155
10.2.2 Nachgeschmack	165
10.2.3 Aussehen/Farbe.....	166
10.2.3 Textur	168
10.2.4 Korrelationen in der Sensorik.....	169
10.3 Verbindung von analytischen und sensorischen Daten.....	174
10.4 Schlussfolgerung zur Qualitätsanalyse	177
11.0 Gesamtfazit	180

12.0 Finanzierung.....	181
13.0 Referenzen.....	181
14.0 Abbildungsverzeichnis.....	195
15.0 Tabellenverzeichnis.....	198
16.0 Anhang.....	202
Danksagung.....	235

I Zusammenfassung

Der Anbau und die Vermarktung von Mohnsamen aus regionalem Anbau bieten Chancen, eine alte Kulturpflanze in moderne Agrarökosysteme und Betriebskonzepte zu integrieren und diese ökologisch wie ökonomisch aufzuwerten. Infolgedessen werden mit dieser Arbeit wichtige Impulse zur Ertragsstabilisierung durch die Integration von Sommermohn in Mischanbausysteme gegeben und es erfolgt mit nachgelagerten inhaltsstofflichen sowie sensorischen Qualitätsanalysen eine umfassende Charakterisierung der Wintermohnsorte `Zeno Morphex´ und der Sommermohnsorten `Viola´, `Borowski´ und `Mieszko´.

Die Sommermohnsorte `Viola´ wurde in einem dreijährigen Feldversuch (2018 – 2020) gemeinsam mit Weißklee, der zu zwei verschiedenen Saatzeitpunkten etabliert wurde, und Sommergerste, die in drei unterschiedlichen Saatstärken gesät wurde, angebaut. Hier wurden Effekte auf Pflanzenwachstum, Unkrautunterdrückung und Ertragsbildung analysiert. In Kombination mit Weißklee ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in den gemessenen Entwicklungsparametern der Mohnpflanzen und im Mohnertrag, der in Reinsaat und mit Klee 799 – 1.293 kg ha⁻¹ betrug. In Mischung mit Sommergerste wurden in zwei von drei Jahren Erträge zwischen 696 und 919 kg ha⁻¹ und Flächenproduktivitäten (LER) von 1,11 – 1,84 erreicht, wohingegen in einem Jahr (2019) Mohnwachstum und -erträge in Mischung mit Sommergerste stark rückläufig waren (<362 kg ha⁻¹; LER<0,99). Der Erfolg des Mischanbaus hing primär von Saatzeiten und Witterungsbedingungen und weniger von der Saatstärke der Sommergerste ab.

Des Weiteren wurden Winter- (`Zeno Morphex´) und Sommermohnsorten (`Viola´, `Mieszko´, `Borowski´) aus der Ernte 2019 hinsichtlich ihrer inhaltsstofflichen Zusammensetzung und ihrer sensorischen Eigenschaften untersucht. Der Ölgehalt der 13 Samenproben sowie die Fettsäurezusammensetzung, Tocopherolgehalt und flüchtige Verbindungen der jeweiligen Öle wurden analysiert und sensorische Profile von Samen und Ölen erstellt. Linolsäure war mit 70,7% – 75,2% die häufigste Fettsäure im Öl. Es wurden signifikant höhere γ -Tocopherolgehalte in der Sorte `Viola´ festgestellt (287 \pm 34 mg kg⁻¹), wohingegen δ -Tocopherol nur bei `Zeno Morphex´ (3,9 \pm 0,6 mg kg⁻¹) detektiert wurde. Die häufigsten flüchtigen Verbindungen waren Hexansäure (1,4 – 148 μ g g⁻¹), Hexanal (0,9 – 15,2 μ g g⁻¹), 1-Hexanol (0,3 – 20,1 μ g g⁻¹), Limonen (1,3 – 9,4 μ g g⁻¹) und 2-Pentylfuran (1,0 – 7,8 μ g g⁻¹). Sensorisch unterschieden sich die Proben hauptsächlich durch fettig/ölige, ranzige, süße und grüne Attribute, wobei das grüne Aroma mit drei Methoxypyrazinen korrelierte, die nur im Sommermohn vorkamen. Die inhaltsstoffliche und sensorische Qualität der Mohnsamen und -öle im Zusammenhang mit einer transparenten Wertschöpfungskette belegen das hohe Potenzial des Anbaus regionaler Sorten. Der Mischanbau bietet dabei die Möglichkeit, neue Anbaupotenziale bei möglichst geringem Anbaurisiko auszuschöpfen.

II Summary

Cultivating poppy locally in Germany creates opportunities of integrating a traditional crop in modern agroecosystems and thereby improving farm management concepts ecologically and economically. This work offers new evidence towards securing poppy yields by integrating poppy in an intercropping system. Furthermore, chemical and sensory analyses allow a comprehensive characterization of the winter poppy variety 'Zeno Morphex' and the summer poppy varieties 'Viola', 'Borowski' and 'Mieszko'.

An intercropping trial with summer poppy variety 'Viola' was conducted over a three-year period (2018 – 2020) including summer barley, sown at three different seeding densities, and white clover, sown on two different seeding dates, as intercropping partners. Plant development and yield formation were measured as well as weed suppression by the intercrop. Poppy growth was not affected by intercropping with white clover, the yields of poppy alone or intercropped with clover being 799 – 1293 kg ha⁻¹. The poppy yield in combination with barley reached a level of 696 – 919 kg ha⁻¹, which was similar to sole cropped poppy. It resulted in LERs of 1.11 – 1.84 in two of three years but poppy growth was inhibited by barley in the third year (2019). The success of poppy intercropping depended mainly on seeding dates and climatic conditions and less on sowing densities of barley.

Winter ('Zeno Morphex') and summer ('Viola', 'Mieszko', 'Borowski') poppy varieties of 2019 harvest were analyzed for chemical composition and sensory properties. Oil content of the 13 seed samples as well as fatty acid composition, tocopherol content and volatile compounds of the oils were analyzed and sensory profiles of the seeds and oils were established. Linoleic acid was the most abundant fatty acid in the oil (70.7% – 75.2%). Significantly higher γ -tocopherol contents were determined for variety 'Viola' (287 ± 34 mg kg⁻¹) while δ -tocopherol was only detected in 'Zeno Morphex' samples (3.9 ± 0.6 mg kg⁻¹). The most abundant volatiles were hexanoic acid (1.4 – 148 μ g g⁻¹), hexanal (0.9 – 15.2 μ g g⁻¹), 1-hexanol (0.3 – 20.1 μ g g⁻¹), limonene (1.3 – 9.4 μ g g⁻¹) und 2-pentylfuran (1.0 – 7.8 μ g g⁻¹). The sensory panel distinguished samples in particular by fatty/oily, rancid, sweet and green attributes, the green aroma being correlated to three methoxypyrazines only present in summer poppy.

The composition and sensory quality of the poppy seeds and oils along a transparent supply chain prove the high potential of regional poppy cultivation. In this regard, growing poppy as an intercrop is an opportunity to access new cultivation benefits while reducing the risk of total crop failure.

III Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
P	Sommernohn-Reinsaat
B1	Sommergerste 135 Körner m ⁻²
B2	Sommergerste 270 Körner m ⁻²
B3	Sommergerste 450 Körner m ⁻²
C1	Weißklee-Frühsaat
C2	Weißklee-Spätsaat
PB1	Sommernohn + Sommergerste 135 Körner m ⁻²
PB2	Sommernohn + Sommergerste 270 Körner m ⁻²
PB3	Sommernohn + Sommergerste 450 Körner m ⁻²
PC1	Sommernohn + Weißklee Frühsaat
PC2	Sommernohn + Weißklee Spätsaat
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BFI	Blattflächenindex
C/N Verhältnis	Verhältnis von Kohlenstoff (%) zu Stickstoff (%)
CR	Competitive Ratio
LER / pLER	Land Equivalent Ratio / partieller Land Equivalent Ratio
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
N _{min}	mineralisch verfügbarer Stickstoff
TCD	Thermal Conductivity Detector
TM	Trockenmasse
Z1	Wintermohn `Zeno Morpex´, Standort Wiesengut
Z2	Wintermohn `Zeno Morpex´, Standort Friedenfels
Z3	Wintermohn `Zeno Morpex´, Standort Campus Klein-Altendorf
Z4	Wintermohn `Zeno Morpex´, Standort Immichenhain
Z5	Wintermohn `Zeno Morpex´, Standort Dudensen
V1	Sommernohn `Viola´, Standort Campus Klein-Altendorf
V2	Sommernohn `Viola´, Standort Friedenfels
V3	Sommernohn `Viola´, Standort Immichenhain
V4	Sommernohn `Viola´, Standort Dudensen
M1	Sommernohn `Mieszko´, Standort Campus Klein-Altendorf
M2	Sommernohn `Mieszko´, Standort Friedenfels
M3	Sommernohn `Mieszko´ Nachbau, Standort Friedenfels

B1	Sommermohn `Borowski`, Standort Campus Klein-Altendorf
EFSA	Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit
FAME	Fettsäuremethylester
FID	Flammenionisationsdetektor
GC	Gaschromatografie
GPA	Generalized Procrustes Analysis
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatografie
MS	Massenspektrometrie
PANOVA	Procrustes Analysis of Variance
RI	Retentionsindex
SPME	Solid Phase Microextraction

Teil A: Mohnpflanze und Mohnanbau

1.0 Allgemeine Einleitung und Problemstellung

Mohn ist eine der ältesten in Europa genutzten Kulturpflanzen, was Samenfunde aus der Jungsteinzeit belegen¹. In der traditionellen sowie modernen Medizin wurden und werden die verschiedenen aus dem Schlafmohn (*Papaver somniferum* L.) gewonnenen Alkaloide therapeutisch genutzt. Jedoch war der Mohn bereits im neolithischen Zeitalter Bestandteil der menschlichen Ernährung². Auch in Deutschland ist der Bedarf an Mohnsamen zur Nutzung in Backwaren oder als Speiseöl hoch und wird auf etwa 10.000 t pro Jahr³ beziffert. Der Anbau von heimischem Mohn ist in Deutschland durch das Betäubungsmittelgesetz geregelt. Dies sieht unter anderem vor, dass nur morphinarme Sorten für den Anbau zugelassen werden, was zurzeit die Wintermohnsorte `Zeno Morphex´ und die beiden Sommermohnsorten `Mieszko´ und `Viola´ umfasst. Die genannten Sorten zählen zu den Blaumohnsorten, die eine blaugraue bis schwarze Samenfarbe aufweisen. Daneben gibt es unter anderem auch Graumohn und Weißmohn, wie beispielsweise die Weißmohnsorte `Borowski´². Neben der Samenfarbe unterscheiden sich die Sorten auch in ihrer Verwendung, da dunkel gefärbte Mohnsamen im deutschen Kulturraum von Verarbeitern und Verbrauchern stärker nachgefragt werden². Der Weißmohn wird von österreichischen Anbauern als etwas milder und nussiger im Geschmack beschrieben, liegt im Ertrag jedoch unterhalb des Blaumohns⁴.

Morphinarme Sorten machen einen geringen Anteil der weltweit angebauten Mohnsorten aus, da in den meisten Anbauländern die Alkaloidproduktion im Vordergrund steht. Es liegen daher nur wenige Informationen zur optimalen Anbaupraxis der hiesigen Sorten vor. Dies trifft insbesondere für die Sorte `Viola´ zu, die als Neuzüchtung aus Österreich erst seit 2017 für den deutschen Anbau zugelassen ist. Um den regionalen Anbau zu unterstützen, müssen daher einige Fragen geklärt werden, die zur Optimierung der Mohnkultivierung unter mitteleuropäischen Klimabedingungen beitragen. Daher wurde die Sommermohnsorte `Viola´ in einem Mischanbauversuch zusammen mit Sommergerste und Weißklee angebaut und Effekte auf Pflanzenwachstum (Pflanzenhöhe, Biomasse, Blattfläche, Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt, SPAD-Werte, NDVI), Ertrag und Unkrautunterdrückung gemessen. Ziel war die Ausnutzung von Vorteilen des Gemengeanbaus wie Ertragsstabilisierung und Erhöhung der Flächenproduktivität, Senkung des Anbaurisikos, Erosionsminderung, Unkrautregulierung oder Erhöhung von Biodiversität und Bodenfruchtbarkeit. Mit dem Mischanbau sollen daher neue Anbauverfahren für den Mohn ermöglicht werden, die eine Integration in die Fruchtfolge erstrebenswert machen.

Neben dem Anbau stellt auch die Sicherung der Vermarktung der Rohware einen zentralen Punkt in der Wertschöpfungskette dar. Differenziertes Wissen über die sensorischen und inhaltsstofflichen Qualitäten der hiesigen Sorten kann deren Anbau attraktiver machen,

da insbesondere die undurchsichtigen Handelswege importierter Ware häufig zu morphinbelasteter oder sensorisch minderwertiger Ware führen^{5,6}. Im Gegensatz zur Importware ist für den regionalen Mohnanbau in Deutschland eine Rückverfolgung der Rohware über Sortenwahl, Anbau und Verarbeitung möglich. Die qualitativen Eigenschaften der zugelassenen Winter- und Sommermohnsorten sind jedoch bislang nicht ausreichend beschrieben, weshalb in dieser Arbeit über inhaltsstoffliche und sensorische Analysen der Mohnsamen und -öle von `Zeno Morphex`, `Viola` und `Mieszko` Argumente für deren Anbauwürdigkeit gefunden werden sollen. Die Analyse der Sorte `Borowski` diene als zusätzlicher Vergleich zu einer weißsamigen Sorte, um herauszufinden, ob die über die Samenfarbe erkennbaren optischen Unterschiede zu den übrigen Blaumohnsorten auch das inhaltsstoffliche und sensorische Profil beeinflussen.

Wenn es also erfolgreicher gelingt, Speisemohn regional zu erzeugen und die Erträge zu stabilisieren, können die transparente Herkunft und zusätzliches Wissen über Qualitätsmerkmale dazu beitragen, den Mohn als hochwertigeres Nahrungsmittel in Deutschland zu produzieren. Im Rahmen dieser Arbeit stehen deshalb zwei Kernthemen zur Verbesserung der Mohnanbausituation in Deutschland im Fokus: die Anbauoptimierung von Sommermohn durch Mischanbau und die Qualitätsanalyse hiesiger Mohnsorten im Hinblick auf ernährungsphysiologische und sensorische Aspekte.

1.1 Historie

Der Ursprung der Kulturform des Mohns ist vermutlich in Vorderasien zu finden^{1,7}. Samenfunde aus der Jungsteinzeit und dem Neolithikum dokumentieren die bereits sehr frühe Kultivierung, auch sind verschiedene Überlieferungen zum Kulturmohnanbau aus Polen, Spanien oder Griechenland bereits einige Jahrhunderte v. Chr. bekannt^{1,8}. Mit der Expansion des römischen Reiches breitete sich der Mohnanbau verstärkt in Asien und Europa aus. Im Laufe der nachfolgenden Jahrhunderte bildeten sich unterschiedliche Schwerpunkte, sodass im asiatischen Raum die Opiumproduktion in den Vordergrund rückte, während im westlichen Anbaugbiet Samen- und Ölproduktion im Fokus blieben⁹. In Europa war Ende des 18. bis Anfang des 19. Jahrhunderts die Mohnsamenproduktion auf ihrem Höhepunkt, geriet später jedoch immer mehr in Vergessenheit, bis der Mohn hauptsächlich industriell genutzt wurde⁹. 2019 betrug die Anbaufläche in Deutschland rund 570 ha¹⁰. Die Mohnsamenproduktion in Europa findet vor allem in Ländern wie der Tschechischen Republik, der Türkei und Spanien statt¹¹. Weltweit werden etwa 100.000 t Mohnsamen produziert, wobei die Tschechische Republik und die Türkei 68% des weltweiten Bedarfs decken¹². Zu den Hauptanbauländern weltweit zählen daneben auch Indien, Australien, Frankreich, Spanien, Ungarn und China¹².

1.2 Biologie der Mohnpflanze

Der Mohn gehört zur Familie der Mohngewächse (*Papaveraceae*) und lässt sich in die Unterarten *P. somniferum somniferum* und *P. somniferum setigerum* unterteilen. Die Subspezies *setigerum* steht für den Borstenmohn, eine Wildart, wohingegen die Subspezies *somniferum* den Kulturmohn bezeichnet². Dieser ist eine einjährige, krautige Pflanze, mit Milchröhren durchzogen, die eine Höhe von 70 bis 120 cm erreicht². Der Mohn bildet eine Pfahlwurzel aus und symmetrische vierblättrige Blüten, in deren Mitte die Kapsel heranreift¹³. Hauptsächlich ist der Mohn selbstbestäubend, es gibt jedoch auch Hinweise, dass Insektenbestäubung zu gesteigerten Erträgen führt¹⁴. Um von der vegetativen in die generative Phase überzugehen, braucht der Mohn den Langtag. Dessen nötige Dauer ist abhängig von der Herkunft⁹. Die meisten Sorten haben geschlossene Kapseln und gehören zu den Schließmohnsorten, im Gegensatz zum Schüttmohn, der bei Reife die Samen aus Löchern in der Samenkapsel verliert, vergleichbar mit dem Klatschmohn. Reife Mohnsamen sind schwarz gefärbt und nierenförmig mit einer Größe von 0,5 – 1,3 mm und einem Tausendkorngewicht von 0,4 – 0,6 g^{2,15}. Für eine medizinische Nutzung können der Milchsaft und die darin enthaltenen Alkaloide aus der unreifen Kapsel geerntet werden. Die Samen sind zunächst alkaloidfrei, wenn es nicht zu Kontaminationen während der Ernte kommt. Damit ist theoretisch eine Doppelnutzung möglich². Die wichtigsten im Mohn vorkommenden Alkaloide sind Morphin, Codein, Thebain, Papaverin, Oripavin und Noscapin⁶. Morphin ist für seine betäubende und schmerzstillende Wirkung bekannt, greift jedoch massiv in das Zentralnervensystem ein und kann narkotisierend bis hin zum Atemstillstand wirken. Daher wurde von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) eine Tageshöchstdosis von 10 µg Morphin pro kg Körpergewicht festgelegt. Die Codeinkonzentration wird mit einem Faktor von 0,2 in Morphinäquivalente umgerechnet und muss zusammen mit Morphin unter der genannten Tageshöchstdosis bleiben⁶. Thebain wird ebenfalls als potenziell gesundheitsgefährdend eingeschätzt, doch liegen bislang noch keine Grenzwerte vor⁶. Im Gegensatz zum restlichen Europa sind in Deutschland nur morphinarme Sorten für den Anbau zugelassen. Morphinarm bedeutet, dass die Mohnsorten einen Maximalgehalt von 200 ppm Morphin in der Gesamtpflanze aufweisen dürfen, was für die in dieser Studie verwendeten Winter- (‘Zeno Morphex’) und Sommermohnsorten (‘Viola’ und ‘Mieszko’) zutrifft.

1.3 Mohnanbau

Mohnanbau ist auch unter den klimatischen Gegebenheiten Mitteleuropas möglich¹². Die Bestandsetablierung bildet dabei die kritischste Phase. Aufgrund der kleinen Samen muss bei der Aussaat auf ein sorgfältig vorbereitetes feines Saatbett geachtet werden, sodass die Körner nicht zu tief abgelegt werden^{13,16}. In der Literatur werden Ablagetiefen zwischen 7,5 und 15 mm angegeben^{2,7,12}. Grobe Kluten erschweren die Keimung und können zu einem unregelmäßigen Feldaufgang führen. Die Feinsämerei wird am besten mit einer Drillmaschine oder mit einer Einzelkornsämaschine für Feinsaaten ausgebracht. Dabei kann abgetötetes Saatgut oder Gries beigemischt werden, um die Saatchichte zu verringern^{2,13}. Als Aussaatstärke kann von 700 – 1.000 g ha⁻¹ ausgegangen werden, abhängig vom Reihenabstand und den Bodenbedingungen².

Für eine optimale Bestandesdichte sind unterschiedliche Zahlen von 40 bis 100 Pflanzen m⁻² in der Literatur zu finden^{2,12,13}. Grundsätzlich bildet der Mohn bei weniger Pflanzen m⁻² mehr Triebe und größere Kapseln pro Pflanze aus, sodass sich die Erträge unter Umständen ausgleichen können¹⁶. Zu hohe Pflanzdichten können allerdings die intraspezifische Konkurrenz stark erhöhen und zu dünnen, eintriebigen Pflanzen mit sehr kleinen Kapseln führen¹⁶. Insbesondere bei begrenzter Nährstoffverfügbarkeit, z. B. im ökologischen Anbau, werden nur bei geringerer Bestandesdichte kräftige Pflanzen ausgebildet. Bei ungünstigen Aussaatbedingungen (z. B. über Winter) oder hohem Unkrautdruck, der durch Striegeln oder Hacken reguliert werden muss, empfehlen sich jedoch höhere Saatstärken, da es zu Pflanzenverlusten kommen kann¹⁶.

Optimale Anbauflächen sind nährstoff- und humusreiche Böden in wärmeren Lagen, wobei der Mohn laut Literatur ein hohes Anpassungspotenzial auch für Grenzlagen besitzt^{7,12}. Dieses Anpassungspotenzial wird jedoch von Dobos et al. (2013) infrage gestellt, die weder staunasse noch zu trockene Böden für den Mohnanbau für geeignet halten². Ebenso erschweren besonders schwere oder sehr sandige Böden das Wachstum¹². Zu nasse Böden und geringe Durchlüftung können Erkrankungen und Wurzelfäulnis fördern, auch kann es bei geringen (< 500 mm pro Jahr) oder ungünstig verteilten Niederschlägen zu Ertragsausfällen kommen². Hohe Erträge lassen sich daher auf Böden ab Ackerzahlen >50 erwarten².

Der Wasserbedarf des Mohns wird in Regionen mit etwa 600 – 700 mm pro Jahr gut gedeckt¹². Besonders wichtig ist eine ausreichende Bodenfeuchte zur Keimung, wohingegen häufige Niederschläge zur Blüte die Bestäubung erschweren¹². Im Zeitraum der Samenreife können feuchte Witterungsbedingungen zudem Pilzinfektionen verursachen, insbesondere mit Falschem Mehltau (*Peronospora arborescens*)¹². Für die Ertragsbildung und die Ölausbeute sind die Witterungsbedingungen während der Samenreife entscheidend. Ideale Reifebedingungen für diesen Zeitraum sind sonniges Wetter und Temperaturen >20°C¹².

Was die Nährstoffversorgung betrifft, ist Stickstoff ein ertragsrelevanter Faktor, der ausreichend ($50 - 100 \text{ kg ha}^{-1}$) und insbesondere bei Wintermohn möglichst früh zur Verfügung stehen sollte^{2,13,17,18}. Zum Einsetzen des Längenwachstums ist der Bedarf an Stickstoff am höchsten, weshalb entsprechend vorher gedüngt werden sollte¹³. Ebenso konnten Ertragssteigerungen durch eine aufgeteilte N-Düngung zum Anfang der Wachstumsperiode sowie zum Zeitpunkt der Blüte hervorgerufen werden¹⁹. Optimal ist es, wenn der Stickstoff in schnell löslicher Form vorliegt und beispielsweise mit einem Striegel- oder Hackgang eingearbeitet wird². Auch auf organische Dünger reagiert der Mohn positiv, bei diesen muss jedoch die längere Umsetzungszeit berücksichtigt werden. Stallmist sollte beispielsweise gut in den Boden eingearbeitet und bereits ein bis zwei Jahre vor der Mohnfrucht ausgebracht werden^{2,12}. Da eine mineralische Düngung im ökologischen Landbau nicht möglich ist, kann auch über den Anbau von Leguminosen in der Fruchtfolge die Stickstoffverfügbarkeit verbessert werden².

Die Entzüge der Gesamtpflanze im Vegetationsverlauf wurden für die Makronährstoffe Phosphor und Kalium bei $27 - 50$ bzw. $93 - 185 \text{ kg ha}^{-1}$ angegeben^{17,20}. Für Calcium und Magnesium wurden die Entzüge auf $82 - 155$ und $15 - 31 \text{ kg ha}^{-1}$ beziffert¹⁷. Positive Ertragseffekte wurden auch bei einer Düngung mit Schwefel gemessen, die Wirkung des Schwefels ist jedoch an eine ausreichende Stickstoffversorgung gekoppelt^{21,22}. Eine wichtige Rolle spielt auch das Spurenelement Bor, da der Mohn empfindlich auf Bormangel reagiert, beispielsweise durch Chlorosen, Einrollen der Blätter, Verformung von Stängeln und Kapseln und demzufolge keine oder verkümmerte Samenbildung^{2,23}. Für Bor wurden in der Literatur Entzüge in Höhe von $23 - 113 \text{ g ha}^{-1}$ genannt^{12,17}. Hierbei spielt wiederum die Verfügbarkeit eine Rolle, da bei hohen pH Werten der Böden die Verfügbarkeit von Bor begrenzt ist¹².

Zentrales Augenmerk muss auf die Unkrautregulierung gelegt werden, da der Mohn durch die langsame Jugendentwicklung erst spät Konkurrenzkraft gegenüber Unkräutern entwickelt^{2,16,20}. In der Fruchtfolge kann der Mohn nahezu überall integriert werden, da er mit keiner anderen Ackerkultur näher verwandt ist¹⁶. Vorteilhaft sind Vorfrüchte mit geringem Unkrautdruck, beispielsweise Getreide. Der Mohn ist ebenso selbst eine gute Vorfrucht, da unter anderem die Pfahlwurzeln die Bodengare verbessern^{2,7}. Unkrautregulierung erfolgt im besten Fall mechanisch durch mehrmaliges Striegeln oder Hacken, insbesondere während der Jugendentwicklung des Mohns^{2,12}. Da der Mohn häufig ökologisch angebaut wird, sind weite Reihenabstände für eine optimale Hackarbeit üblich. Die Hacke dient neben der Unkrautbekämpfung auch dem Aufbrechen verkrusteter Bodenoberflächen und sorgt für eine verbesserte Durchlüftung des Bodens, die das Wachstum beschleunigt².

Im konventionellen Anbau sind auch einige wenige Herbizide zugelassen, die im Vor- oder Nachauflauf angewandt werden können und einen Anbau auch bei geringeren Reihenabständen ermöglichen².

Neben dem Unkraut treten Krankheiten und Schädlinge an den Mohnpflanzen auf, die sich negativ auf Quantität wie Qualität des Samenertrags auswirken können. Häufige Mykosen sind der Falsche Mehltau (*Peronospora arborescens*), der Echte Mehltau (*Erysiphe betae*) oder die Schwarzfäule (*Stemphylium botryosum*)². Bei den tierischen Schaderregern verursachen beispielsweise Drahtwürmer (*Agriotes* sp.), der Mohnkapselrüssler (*Neoglocianus macula alba*) und die Schwarze Bohnenblattlaus (*Aphis fabae*) Schäden an Blättern, Kapseln oder Wurzeln². Die Bekämpfungsmöglichkeiten sind begrenzt, weshalb über diversifizierte Fruchtfolgen und Anbaupausen präventive Maßnahmen ergriffen werden sollten¹². Als alternative Anbausysteme kommen in diesem Zusammenhang auch Formen des Misanbaus infrage, die sich positiv auf den Krankheits- und Schädlingsdruck auswirken, beispielsweise über räumliche Abstände zwischen gleichen Kulturpflanzen²⁴.



Abb. 1 Blüte der Wintermohnsorte `Zeno Morphex` (links) und der Sommermohnsorte `Viola` (rechts)

Typischerweise wird zwischen Sommer- und Wintermohnsorten unterschieden (Abb. 1), wobei die Wintermohnsorten besser an kalte Temperaturen angepasst sind. Die Aussaat des Wintermohns findet zwischen Anfang September und Mitte Oktober statt, allerdings sollten die Pflanzen für eine optimale Überwinterung vor dem Winter nicht zu üppig wachsen. Eine Überwinterung im Rosettenstadium mit 6 – 8 Blättern gilt als optimal¹². Der Sommermohn wird so früh wie möglich bis Ende April ausgesät, sobald die Bodenbedingungen im Frühjahr es zulassen. Je früher die Aussaat, desto länger ist die vegetative Phase bevor der Langtag einsetzt und der Mohn zu blühen beginnt. Infolgedessen steigt auch das Ertragsniveau bei früher Aussaat¹².

Durch die längere Vegetationsperiode des Wintermohns ergeben sich, ähnlich wie beim Getreide, Ertragsvorteile der Herbstsaussaaten im Vergleich zur Frühljahrsaussaat. Auch muss nicht auf günstige Aussaatbedingungen im Frühjahr gewartet werden und die Winterfeuchte kann optimal ausgenutzt werden². Es bleiben allerdings die Gefahren der Auswinterung und Verunkrautung über Winter.

Die Samenerträge sind meist hohen jährlichen Schwankungen unterworfen. Heeger und Poethke (1947)⁷ bezifferten diese auf 10-18 dt ha⁻¹ mit Maximalerträgen von etwa 20 dt ha⁻¹. Neuere Anbauversuche in der Schweiz zeigten Erträge zwischen 2 und 17 dt ha⁻¹, wobei ein Ertragsniveau von mindestens 10 dt ha⁻¹ anzustreben ist^{13,20}. Zwischen 2008 und 2018 betragen die Mohnerrträge in Europa im Schnitt 8,3 dt ha⁻¹¹¹. Geerntet wird der Mohn mit dem Mähdröschler, es muss jedoch auf schonenden Drusch geachtet werden, um die Samen nicht zu schädigen und Ölaustritt zu vermeiden¹³. Der richtige Erntezeitpunkt liegt vor, wenn der Bestand vollständig abgereift ist und keine grünen oder weichen Kapseln mehr vorhanden sind². Dann wird auch eine Feuchte unterhalb von 10% erreicht, die für eine stabile Lagerung der Samen notwendig ist².

1.4 Nutzung von Mohnsamen und -öl

Der Großteil der weltweiten Mohnproduktion findet zur Alkaloidgewinnung für medizinische Zwecke statt^{8,12}. Aus dem Milchsaft der Pflanzen wird Rohopium gewonnen, aus dem unter anderem seit 1804 Morphin isoliert werden kann, das immer noch eins der wichtigsten Betäubungsmittel in der Medizin darstellt¹². In Deutschland wird Mohn heutzutage hauptsächlich in Backwaren oder als hochwertiges Speiseöl genutzt. Der Presskuchen findet aufgrund des hohen Eiweißgehalts unter anderem als Tierfutter Verwendung². Die Mohnsamen werden beispielsweise unverarbeitet als Belag auf Brötchen oder verarbeitet in Mohnmassen in Kuchenzubereitungen oder Spezialitäten wie Mohnstrudel oder Mohnknödeln eingesetzt^{2,8}. Verarbeitet wird der Mohn durch Mahlen, Quellen, Dämpfen oder Brühen und anschließend zu Backmassen zubereitet. Das Mahlen zielt beispielsweise darauf ab, das Aroma zu verbessern²⁵. Auch das Rösten von Mohnsamen ist ein gängiges Verarbeitungsverfahren, das jedoch auch zu Veränderungen des Mohnaromas führen kann²⁶.

Auch die optische Erscheinung der Mohnsamen stellt ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar, da insbesondere in der Backindustrie das Aussehen der Mohnsamen Bedeutung für die Vermarktbarkeit der Produkte hat. Gleichmäßig dunkelblaue Samen mit rauer, grobkörniger Textur werden dabei gegenüber feinkörnigen, dunkelschwarzen oder mischfarbigen Samen bevorzugt²⁷.

Da die meisten Mohnsorten Alkaloide produzieren und im Ausland auch zur Opiumproduktion eingesetzt werden, kommt in einigen Fällen auch eine Doppelnutzung infrage. Dabei werden die Samen zur Nahrungsmittelproduktion und die Kapseln und das Stroh für die medizinische Nutzung geerntet⁸. Dadurch entsteht ein Risiko des Imports von morphinbelasteter Rohware, die bei der Ernte kontaminiert wurde²⁸. Durch Waschen, Erhitzen oder Dämpfen können Morphinanhaftungen an den Samen verringert werden²⁹. Bei Wasserbehandlung muss jedoch auf ausreichende Trocknung geachtet werden, um Pilzbefall oder die Bildung von Fehlparfums zu vermeiden²⁵. Diese Schritte entfallen bei Anbau und Verwendung morphinarmer Sorten, wie sie in Deutschland ausschließlich zugelassen sind und betreffen somit nicht die in dieser Studie untersuchten Sorten `Zeno Morphex`, `Viola` und `Mieszko`.

Die Verwendung des Öls umfasst einen deutlich geringeren Anteil an der Nutzung des Mohns. Aufgrund des hohen Anteils ungesättigter Fettsäuren und des aromatischen Geschmacks wird Mohnöl als hochwertiges Speiseöl eingesetzt, sollte jedoch nicht über 170°C erhitzt werden¹. Dies begrenzt seine Nutzung in der Küche, insbesondere, da weitere Pflanzenöle von vergleichbarer (Sonnenblumenöl) oder höherer (Leinöl) ernährungsphysiologischer Wertigkeit zu teils niedrigeren Preisen zur Verfügung stehen⁸. Für Speisezwecke eignet sich vornehmlich kalt gepresstes Mohnöl, warm gepresst kann es jedoch auch als technisches Öl oder zur Herstellung von Malerfarben genutzt werden^{1,2}. Weitere Anwendungsgebiete finden sich in der Kosmetik zur Seifenherstellung oder aufgrund seiner schnellen Trocknungsfähigkeit zur Holz- und Lederpflege¹. Auch in der Medizin besteht neben den Alkaloiden eine Verwendung für das Mohnöl. Beispielsweise wird jodiertes Mohnöl als diagnostisches Hilfsmittel beim Röntgen, im Rahmen von Chemotherapien oder bei der Sonografie eingesetzt¹.

Teil B: Versuche zur Anbauoptimierung durch Mischanbau

2.0 Mohn im Mischanbau

Das Ziel aller nachhaltigen Anbaustrategien ist eine sichere Nahrungsmittelproduktion mit stabilen Erträgen und hoher Qualität bei möglichst schonender Ressourcennutzung. Häufig ist in der modernen Landwirtschaft jedoch eine hohe Produktivität an den Anbau ertragsstarker Monokulturen geknüpft, mit der Folge, dass zwar ein maximaler Ertrag von der Fläche geerntet werden kann, jedoch Böden und Umwelt darunter leiden³⁰⁻³². Um langfristig die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten, müssen andere Ziele als ein kurzfristiger maximaler Gewinn im Vordergrund stehen. Eine verbesserte Bodenfruchtbarkeit sowie vermehrte Unkrautunterdrückung und Ertragsabsicherung können beispielsweise über eine Erhöhung der Biodiversität auf dem Feld erreicht werden^{24,33}. Das Anbaurisiko auf mehrere Feldfrüchte zu verteilen, erhöht zudem die Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Umwelteinflüssen, was insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel immer wichtiger wird³³.

Ein Konzept, um die Resilienz von Anbausystemen zu erhöhen, ist der Gemengeanbau, der besonders häufig im ökologischen Anbau anzutreffen ist^{30,34}. Der Gemengeanbau bezeichnet den gleichzeitigen Anbau von zwei oder mehr Kulturen auf derselben Fläche zur selben Zeit^{30,31,35,36}. Synonym wird in dieser Arbeit auch der Begriff Mischanbau verwendet. Man könnte bei der Einsaat von Weißklee und Sommergerste in den Mohnbestand auch von einer Untersaat sprechen, im Hinblick auf eine einheitliche Bezeichnung wird der Begriff Mischanbau in dieser Arbeit jedoch für die Benennung beider Anbausysteme bevorzugt. Potenzielle Vorteile einer gemeinsamen Kultivierung mehrerer Feldfrüchte sind unter anderem erhöhte Unkrautunterdrückung sowie natürliche Krankheits- und Schädlingsregulation, was insbesondere im ökologischen Landbau großen Nutzen zeigt, wo auf chemischen Input größtenteils verzichtet wird^{30,33}. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel kann auch die Konservierung von Bodenfeuchte durch erhöhte Bodenbedeckung im Gemenge noch wichtiger werden, wenn Niederschläge abnehmen oder unregelmäßiger verteilt auftreten³⁰. Allgemein steigt vor dem Hintergrund einer langfristigen Nahrungsmittelsicherung das Interesse an selbstregulierenden Anbausystemen, die mit wenig externem Input auskommen, wozu die Kulturpflanzenbiodiversität einen wertvollen Beitrag leisten kann²⁴.

Durch Mischanbau können Ressourcen oft vorteilhafter genutzt werden, da die einzelnen Kulturarten unterschiedlichen Ressourcenbedarf haben. Diese Unterschiede können zeitlich (z. B. unterschiedliche Zeitpunkte des maximalen Wachstums) oder räumlich (z. B. unterschiedliche Wurzelverteilung) sein und somit eine intensivere Ausschöpfung der Ressourcen sowie erhöhte Erträgen begünstigen^{24,30,31,33,35-38}. Damit diese Ausschöpfung optimal funktioniert, sollten Gemengepartner gewählt werden, die sich in ihren ökologischen Nischen ergänzen, um eine starke interspezifische Konkurrenz zu vermeiden^{31,38,39}.

Die genauen Interaktionen zwischen den Kulturen sind häufig jedoch nur rudimentär bekannt, weshalb die Auswahl der Pflanzenarten keine einfache Aufgabe ist³⁰.

Neben möglichen Ertragsvorteilen kann durch Gemengeanbau auch ein Unkraut unterdrückender Effekt erzielt werden³³. Beliebte Mischungen sind Kombinationen von Getreide und Leguminosen, die in mehreren Studien bereits einen geringeren Unkrautbesatz aufwiesen als die jeweiligen Reinsaaten^{33,40-43}. Die exakten Mechanismen der Unkrautregulierung durch Gemengeanbau sind nur teilweise klar, es ändert sich beim Eintritt einer zweiten Kultur in das Anbausystem in jedem Fall die Konkurrenz um Ressourcen wie beispielsweise Licht^{24,33,36,40}. Dabei ist das Zusammenspiel der Mischungspartner meist auf zwei Hauptprinzipien zurückzuführen, die Vandermeer (1989)³⁶ als „Resource Partitioning“ und „Resource Facilitation“ bezeichnet. Während „Partitioning“ die Aufteilung von Ressourcen zwischen zwei Gemengepartnern aufgrund von Konkurrenz und der Besetzung leicht unterschiedlicher ökologischer Nischen bezeichnet, ermöglicht „Facilitation“ dem einen Gemengepartner aufgrund der Anwesenheit des anderen einen besseren Zugang zur benötigten Ressource³⁶. Dazu zählt beispielsweise die Bereitstellung von Stickstoff durch die Wahl einer Leguminose als Gemengepartner.

Es existieren auch Studien, die keine verbesserte Unkrautunterdrückung des Gemenges im Vergleich zum Reinanbau belegen⁴⁴. In den meisten Fällen trifft aber für mindestens eine der Reinsaaten zu, dass im Gemengeanbau weniger Unkraut vorkommt²⁴. Es kann auch sein, dass der Mischanbau keinen direkten Unkraut unterdrückenden Effekt aufweist oder dieser nur teilweise höher ist als im Reinanbau. Der Unkrauteffekt des Gemenges kann dennoch aus ökonomischer Sicht ausreichend sein, wenn ihm die Kosten für Herbizide, mechanische oder manuelle Unkrautbekämpfung gegenübergestellt werden²⁴.

Im Mohnanbau stellt eine mögliche Verunkrautung ein zentrales Problem dar, da nach der Saat ein langer Zeitraum mit nur minimaler Bodenbedeckung herrscht, in dem das Mohnwachstum zunächst langsam verläuft^{13,16}. Im ökologischen Mohnanbau werden zudem meist weite Reihenabstände gewählt, um Unkraut mechanisch regulieren zu können. Der blanke Boden bietet dabei ein hohes Erosions- und Unkrautpotenzial. Auch die Spätverunkrautung kann zur Ernte problematisch werden, wenn Unkrautpflanzen, wie beispielsweise *Chenopodium album* L., eine Höhe erreichen, die den Drusch der Mohnpflanzen behindert. Gelangen grüne Pflanzenteile ins Erntegut, kann zudem ein Feuchteproblem der Rohware auftreten. Die Trennung der Samen von *Chenopodium album* L. vom Mohn ist außerdem nicht trivial, da beide Samen ähnlich klein und dunkel sind. Infolgedessen erscheint eine Form des Gemengeanbaus mit Mohn interessant, um durch erhöhte Bodenbedeckung auch eine erfolgreichere Unkrautkontrolle zu ermöglichen.

Zusätzlich ist durch den Gemengeanbau auch ein positiver Einfluss auf die Biodiversität sowie den Schädlings- und Krankheitsdruck belegt worden⁴⁵⁻⁴⁷. Der Mohn an sich stammt aus der Pflanzenfamilie der *Papaveraceae*, die in klassischen mitteleuropäischen Fruchtfolgen mit keiner anderen Art vertreten wird, weshalb eine Integration des Mohns in die Fruchtfolge eher unproblematisch ist¹⁶.

Der Gemengeanbau dient neben den ackerbaulichen Vorteilen auch der Risikoabsicherung, da durch die Kulturvielfalt die Gefahr eines vollständigen Ernteausfalls minimiert werden kann⁴⁸. Die Kombination mit einer Co-Kultur könnte damit auch der Risikominimierung des Mohnanbaus dienen, insbesondere, wenn bisher noch wenig Anbauerfahrungen mit der Kultur vorliegen. Liebmann und Dyck (1993) teilen den Gemengeanbau in zwei Kategorien: Gemengeanbau mit Fokus auf der Hauptkultur, in dem die Zweitfrucht hauptsächlich Vorteile in Bezug auf Erosionsminderung, Bodenfruchtbarkeit und Unkrautregulation und nur marginalen ökonomischen Nutzen bietet²⁴. Alternativ können zwei Kulturen mit gleichwertigem Nutzungspotenzial angebaut werden, die auch beide beerntet werden können. In dieser Studie liegt der Fokus auf der Anbauoptimierung des Speisemohns, somit entspricht das Anbausystem eher der ersten Kategorie, in der die Gemengepartner als unterstützende Zweitfrüchte die Vorteile des Mischanbaus mitbringen, ohne zwingend selbst in höherem Maß direkt ökonomisch nutzbar sein zu müssen.

Der Mischanbau mit Mohn als einem der Gemengepartner ist heutzutage kaum verbreitet, es gibt jedoch Hinweise aus hauptsächlich älterer Literatur, nach denen Versuche zur Kombination von Mohn mit anderen Feldfrüchten Erfolgs versprechend waren. Es wird beispielsweise eine Kultivierung mit Möhren, durch Beimischung von 3 – 5% Mohnsaatgut beschrieben, alternativ auch der Anbau mit Rüben oder Kartoffeln, wobei in diesen Fällen nicht der Mohn die Hauptkultur war^{7,49}. Heeger und Poethke (1947) geben allerdings auch an, dass Mohn und Kümmel erfolgreich gemeinsam kultiviert werden konnten, da der Erntezeitpunkt des Kümmels erst im darauffolgenden Jahr liegt. Auch gibt es Hinweise auf Mohnanbau mit Kleeuntersaaten^{7,50}. Ein großer Vorteil des Mohns liegt in der Abreife, da die Samen von den Kapseln gut geschützt werden und die reifen Kapseln noch einige Zeit auf dem Feld verbleiben können, ohne dass Samen ausfallen¹³. So bleibt beispielsweise beim gemeinsamen Anbau mit Getreide Spielraum, um eine ausreichende Reife des Getreides abzuwarten und beide Kulturen gemeinsam ernten zu können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Mischanbauvarianten getestet, die als additive Gemenge verstanden werden können. Dies bedeutet, dass die Saatstärken der Reinsaaten beibehalten und in Mischung kombiniert werden, wohingegen bei substitutiven Gemengen die Saatstärken der einzelnen Kulturen entsprechend angepasst werden, sodass keine höhere Pflanzendichte in der Mischung als in Reinsaat entsteht³⁶.

3.0 Hypothesen

Im vorliegenden Versuch wurden die Gemengepartner in erster Linie im Hinblick darauf ausgewählt, das Anbaurisiko des Mohns durch Vorteile des Gemengepartners zu minimieren. Als Hauptfrucht wurde die Sommermohnsorte (*Papaver somniferum* L.) `Viola´ (Zeno Projekte, Österreich) verwendet. Die Sommergerstensorte (*Hordeum vulgare* L.) `Laureate´ (Syngenta, Deutschland) sowie die Weißkleeorte (*Trifolium repens* L.) `SW Hebe´ (Camena Samen, Deutschland) wurden jeweils als Gemengepartner ausgesucht. Beiden gemeinsam ist das Ziel einer erhöhten Bodenbedeckung, die im besten Fall erosionsmindernd und Unkraut hemmend wirkt. Im Fall der Sommergerste kann neben der Bodenbedeckung zusätzlich noch ein Ertrag erwirtschaftet werden, indem beide Feldfrüchte gemeinsam gedroschen werden. Dies minimiert das Anbaurisiko, das im Mohnanbau aufgrund der hohen Anforderungen an Saatbettvorbereitung und Bestandesetablierung generell erhöht ist. Daneben soll die vergrößerte Bodenbedeckung insbesondere der Spätverunkrautung durch weißen Gänsefuß (*Chenopodium album* L.) entgegenwirken. Dieser Effekt wird auch hauptsächlich vom Weißklee erwartet, der zu einer vermehrten Bodenbedeckung führen, aber keinen direkten Mehrertrag liefern soll. Durch den im Vergleich zum Getreide verminderten Wuchs wird auch von einer geringeren Konkurrenzwirkung gegenüber dem Mohn ausgegangen. In Studien mit Weißklee als Untersaat in Lauchgemüse wurde bereits belegt, dass dieser einen guten Kompromiss zwischen ausreichender Unkrautunterdrückung und geringer Ertragsdepression der Hauptfrucht darstellt⁵¹. Zusätzlich können die weiteren positiven Effekte einer Leguminosenuntersaat, wie die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und die Stickstofffixierung aus der Luft, genutzt werden, was insbesondere für die Nachfrucht einen wirksamen Effekt haben könnte, aber auch schon im Mischanbau mit Mohn die Konkurrenz um Stickstoff vermindern soll⁵¹.

Mit dem Mohn-Mischanbauversuch soll primär gezeigt werden, wie sich der Mohn in Konkurrenz zu den gewählten Mischungspartnern verhält und welche Varianten dabei Potenzial für eine Doppelnutzung aufweisen. Verschiedene Saatstärken der Sommergerste sollen dabei die Schwelle ermitteln, ab der eine ausreichende Unkrautunterdrückung und Gerstenertragsausbildung gewährleistet sind, ohne die Pflanzenentwicklung des Mohns zu sehr zu beeinträchtigen. Beim Weißklee dient der Vergleich einer frühen oder späten Einsaat hauptsächlich dazu, sich dem optimalen Zeitpunkt anzunähern, zu dem eine ausreichende Weißkleeentwicklung zur Verminderung der Spätverunkrautung erfolgen kann und gleichzeitig die Konkurrenz zum Mohn so gering wie möglich gehalten wird. Ein später Saatzeitpunkt ermöglicht dem Mohn zudem einen Entwicklungsvorsprung, weshalb die Sommergersteneinsaat auch erst zum späten Kleesaatzeitpunkt erfolgte.

Die Hypothesen lauten deshalb wie folgt:

1. Die Mohnerträge erreichen im Mischanbau mit Weißklee oder Sommergerste ein ähnliches Niveau wie in Reinsaat und durch die Kombination mit Sommergerste kann ein Mehrertrag (positiver LER) auf der Fläche erwirtschaftet werden.
2. In Kombination mit Sommergerste treten nur minimale Konkurrenzeffekte auf, die sich bei erhöhter Saatstärke der Gerste verstärken.
3. In Kombination mit Weißklee treten nur minimale Konkurrenzeffekte auf, die sich bei früherer Kleeaussaat verstärken.
4. Beide Mischanbauverfahren (Mohn + Weißklee und Mohn + Sommergerste) führen zu erhöhter Unkrautunterdrückung im Vergleich zur Mohn-Reinsaat.

4.0 Material/Methoden

4.1 Versuchsaufbau

Der Mischanbauversuch wurde im Freiland als Blockversuch mit vierfacher Wiederholung jeder Variante angelegt. Die Parzellen besaßen eine Größe von 30 m² (3 m x 10 m) und waren vollständig randomisiert angeordnet. Tab. 1 zeigt die elf Versuchsvarianten, die Parzellenpläne der einzelnen Jahre finden sich im Anhang (Abb. A1). Die Kulturen wurden mit den Abkürzungen codiert, die sich aus der Übersetzung ins Englische ergaben, weshalb P für Poppy (Mohn), B für Barley (Sommergerste) und C für Clover (Weißklee) steht.

Tab. 1 Varianten des Mischanbauversuchs am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Kurzcode	Variante
P	Sommermohn-Reinsaat
B1	Sommergerste 135 Körner m ^{-2*}
B2	Sommergerste 270 Körner m ⁻²
B3	Sommergerste 450 Körner m ⁻²
C1	Weißklee Frühsaat
C2	Weißklee Spätsaat
PB1	Sommermohn + Sommergerste 135 Körner m ^{-2*}
PB2	Sommermohn + Sommergerste 270 Körner m ⁻²
PB3	Sommermohn + Sommergerste 450 Körner m ⁻²
PC1	Sommermohn + Weißklee Frühsaat
PC2	Sommermohn + Weißklee Spätsaat

*nur 2019 und 2020

Die Aussaat des Sommermohns (‘Viola’) erfolgte drei bis sechs Wochen vor der Aussaat der Sommergerste (‘Laureate’) und der späten Weißkleesaat (‘SW Hebe’), um dem konkurrenzschwachen Mohn einen Entwicklungsvorsprung zu gewähren. Die frühe Weißkleesaat (‘SW Hebe’) wurde dagegen bereits vier Tage nach der Mohnaussaat eingebracht, um möglichst schnell einen Bodenschluss zu erreichen. Geerntet wurden Sommergerste und Mohn gemeinsam, wohingegen der Weißklee auf dem Feld verblieb. Eine Übersicht über die einzelnen Saat- und Erntetermine der Varianten in den jeweiligen Jahren gibt Tab. 2.

Tab. 2 Saat- und Erntezeitpunkte von Sommermohn, Sommergerste und Weißklee am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020

Kulturpflanze	2018		2019		2020	
	Aussaat	Ernte	Aussaat	Ernte	Aussaat	Ernte
Sommermohn (P)	20.04.	20.08.	05.04.	13.08.	24.03.	12.08.
Weißklee (C1)	24.04.	-	09.04.	-	28.03.	-
Weißklee (C2)	24.05.	-	24.04.	-	07.05.	-
Sommergerste (B1, B2, B3)	24.05.	20.08.	24.04.	13.08.	07.05.	12.08.

Der Sommermohn wurde mit einer Einzelkornsämaschine für Feinsämereien (MiniAir, Kverneland, Deutschland) mit einer Saatstärke von 1,1 kg ha⁻¹ ausgebracht. Der Reihenabstand betrug 45 cm (bzw. 50 cm in 2018), sodass in jeder Parzelle sechs Mohnreihen standen. Sommergerste und Weißklee wurden mit pneumatischen Parzellensämaschinen im Drillverfahren ausgebracht (2018: Hege 80; 2019/2020: Zürn D82PN, Schöntal-Westernhausen, Deutschland). Der Reihenabstand der Mischungspartner betrug 11 cm untereinander bzw. 11,5 cm zur Mohnreihe, wobei die Mohnreihen durch Hochbinden einzelner Schare und Auffangen des Saatguts dadurch ausgespart wurden. Infolgedessen beinhalteten die Mischungspartellen sechs Reihen Mohn und 16 Reihen Zweitfrucht (Abb. 2). In der Reinsaat wurden dieselben Reihenabstände verwendet und die Mischungspartner entsprechend ausgelassen.

Ausgesät wurde der Weißklee in einer Saatstärke von 5,3 kg ha⁻¹. Die höchste Saatstärke der Sommergerste wurde auf 450 Körner m⁻² festgelegt (Variante B3), sodass 60% dann 270 Körner m⁻² (B2) und 30% 135 Körner m⁻² ergaben. Die geringste Saatstärke wurde ab 2019 ergänzt, um die Konkurrenz zum Mohn weiter zu verringern.

Da unter anderem der Effekt des Gemengeanbaus auf die Unkrautsituation analysiert werden sollte, wurde auf Unkrautregulierung weitestgehend verzichtet. Weil 2019 vor der Saat bereits starke Probleme mit Durchwuchsgetreide aus dem Vorjahr auftraten, wurde vor dem ersten Feldaufgang der Bestand mit dem Grasherbizid Fusilade mit einer Aufwandmenge von 1 l ha⁻¹ behandelt. 2018 und 2020 wurde der Bestand zudem vor der Aussaat der Sommergerste und des späten Weißkleees maschinell gehackt, mit Ausnahme der Weißklee-Frühsaat-Parzellen, die zu diesem Zeitpunkt bereits aufgelaufen waren. 2019 war aufgrund geringer Unkrautentwicklung bis zum zweiten Saattermin keine maschinelle Unkrautregulierung erforderlich. Nach der zweiten Gemengepartnereissaat wurden keine weiteren Unkrautregulierungsmaßnahmen ergriffen. 2018 wurde der Weißklee in Reinsaat (beide Saatzeitpunkte) einmalig (13.07.2018) gemäht, um eine ganzflächige Verunkrautung zu vermeiden.

2019 wurde der Bestand am 23.05. einmalig gegen Blattläuse behandelt (Karate Neon, 0,075 l ha⁻¹). Eine Düngung erfolgte 2018 nicht, 2019 und 2020 wurden jeweils vor Beginn des Längenwachstums (30.04.2019; 16.04.2020) 30 kg N ha⁻¹ in Form von Hornmehl (14% N) manuell auf allen Parzellen ausgebracht. Um die Fläche vor Fraßschäden durch Niederwild zu schützen, wurde nach dem jeweils letzten Saatvorgang der Bestand mit einem mobilen Elektro-Schafsdraht eingezäunt.

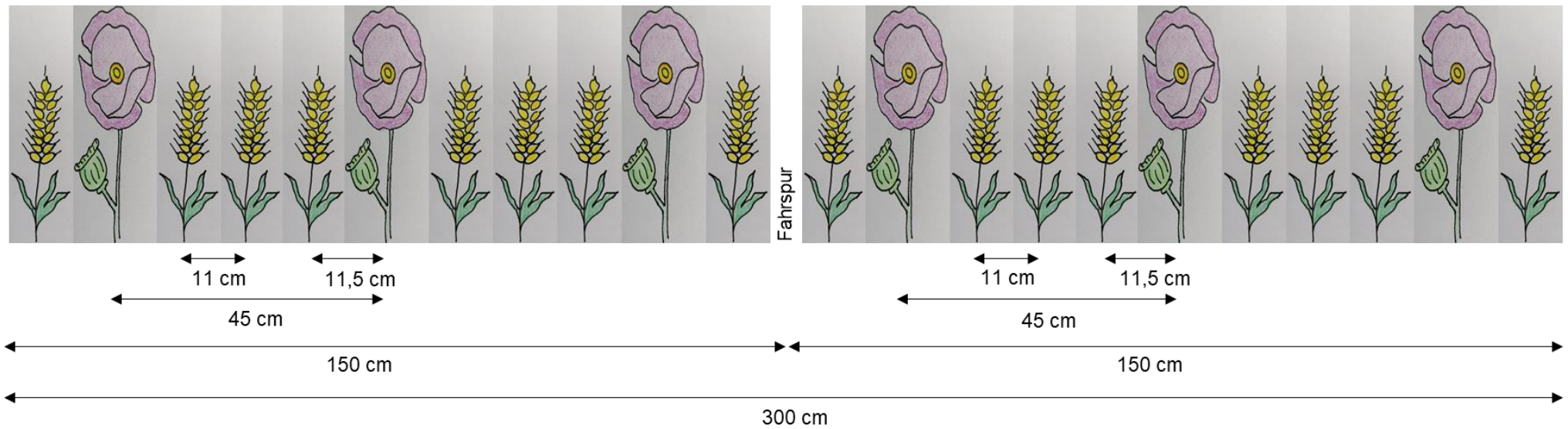


Abb. 2 Aussaatschema und Reihenabstände der Mohnpflanzen und Mischungspartner am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. 2018 betrug der Reihenabstand zwischen den Mohnpflanzen 50 cm, sodass der Abstand zwischen Mohn und Mischungspartner 12 cm betrug. Die Sommergerste wurde als Symbolbild gewählt, der Weißklee wurde nach demselben Schema gesät (Schemazeichnung: Inga Becker)

4.2 Standortbeschreibung

Versuchsstandort war der Campus Klein-Altendorf (CKA), Außenlabor der Universität Bonn. Der Campus Klein-Altendorf liegt in der Nähe der Stadt Rheinbach auf der ehemaligen Hauptterrasse des Rheins und ist von atlantischem Klima geprägt. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 9,4°C bei einem mittleren Niederschlag von 603 mm. Dabei dauert die Vegetationsperiode etwa 165 – 170 Tage an. Die Böden bestehen hauptsächlich aus fruchtbarem Löss vom Bodentyp Parabraunerde, so auch die Versuchsfelder des Gemeindeversuchs mit einer Ackerzahl von 93. Für die einzelnen Versuchsjahre sind die mittleren Temperaturen und Niederschläge für den Vegetationszeitraum März bis August in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3 Mittlere Tagestemperatur (°C) und Niederschlagssumme (mm) für den Zeitraum März bis August am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 im Vergleich zum jeweils langjährigen Mittel

Monat	Temperatur (°C)				Niederschlag (mm)			
	2018	2019	2020	LM ¹	2018	2019	2020	LM ¹
März	4,3	7,4	6,7	5,5	35,8	63,9	39,0	40,5
April	12,9	10,0	11,7	8,7	40,8	26,7	5,4	43,3
Mai	16,1	11,3	13,1	12,8	34,9	75,8	18,1	57,5
Juni	18,0	19,7	17,3	15,7	47,1	25,5	66,3	65,7
Juli	21,4	19,5	18,4	17,4	22,8	55,0	27,1	65,8
August	20,2	19,4	21,0	17,0	19,7	69,6	83,6	67,2

¹Langjähriges Mittel 1956 – 2019

Winterweizen war die Vorfrucht in den Jahren 2018 und 2019, 2020 folgte der Mohn auf Sommergerste. Zur Stoppelbearbeitung wurden die Flächen geegelt und anschließend mit dem Pflug bearbeitet. Vor der Saat im Frühjahr erfolgte eine Aufbereitung des Bodens mit der Kreiselegge. Jeweils im Frühjahr vor Versuchsbeginn wurde für Bodenuntersuchungen eine Mischprobe aus fünf Einstichen pro Versuchsfeld in 30 cm Tiefe mit einem Bohrstock entnommen und auf die Grundbodenparameter pH-Wert, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalt untersucht (AGROLAB, Landshut, Deutschland). Da der Mohn empfindlich gegenüber Bormangel ist, wurde 2019 exemplarisch auch der Borgehalt der Böden überprüft. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4 Bodenparameter der Versuchsflächen am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 vor Experimentbeginn. VS: Versorgungsstufe

Jahr	Boden-art	pH	P mg 100 g ⁻¹	VS	K mg 100 g ⁻¹	VS	Mg mg 100 g ⁻¹	VS	B mg kg ⁻¹	VS
2018	uL	7,0	19	D	10	C	7,8	D	n.b.*	
2019	uL	6,5	14	C	15	C	12,1	E	0,46	C
2020	uL	6,9	22	D	16	C	8,2	D	n.b.*	

*nicht bestimmt

Neben den genannten Nährstoffen wurde auch der Gehalt an mineralischem Stickstoff (N_{\min}) des Bodens an zwei (2020) bzw. drei (2018, 2019) Terminen pro Versuchsjahr analysiert. Der erste Termin lag im Frühjahr vor der Aussaat und war ebenfalls eine Mischprobe aus fünf Beprobungen, verteilt über das Versuchsfeld. Diese wurden bis zu einer Tiefe von 90 cm erhoben. Der zweite Termin war kurz vor der Blüte und ein dritter Beprobungstermin lag kurz nach der Ernte. Zu den beiden letzten Terminen wurde der Versuch parzellenweise beprobt und aus jeder Parzelle wurden je vier Bohrkerne in den Tiefen 0 – 30, 30 – 60 und 60 – 90 cm entnommen. Der Bohrstock wurde dabei genau neben der mittleren Mohnreihe einer 1,5 m Spur eingeschlagen. Aufgrund der großen Trockenheit zum Erntezeitpunkt konnten die Proben zu diesem Zeitpunkt nur bis zu einer Tiefe von 60 cm entnommen werden. Bis zur Extraktion und Analyse wurden sie bei -20°C eingefroren gelagert.

Die N_{\min} -Analytik der Proben erfolgte am Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) – Professur Pflanzenernährung der Universität Bonn mittels Kaliumsulfat-Extraktion und anschließender Messung am Autoanalyzer 3 (AA3, Bran & Luebbe, Norderstedt, Deutschland). Für die Extraktion wurden je 25 g homogenisierte Bodenprobe mit 100 ml einprozentiger K_2SO_4 Lösung (10 g $\text{K}_2\text{SO}_4/\text{L H}_2\text{O}$) versetzt und eine Stunde mit dem Überkopfschüttler geschüttelt. Der Extrakt wurde anschließend über Faltenfilter (MN261G1/4, Macherey-Nagel, Düren, Deutschland) mit 10 ml Vorlauf in 100 ml PE-Flaschen filtriert und das Filtrat bis zur Messung bei -20°C eingefroren. Parallel wurden 25 g homogenisierter Boden für 24 h bei 105°C im Trockenschrank getrocknet, um den Wassergehalt der Proben zu bestimmen. Die Ergebnisse des Autoanalyzers wurden in mg l^{-1} angegeben und mithilfe von Einwaagemengen, Volumen der Extraktionslösung, Trockensubstanz und Lagerungsdichte des Bodens zur Angabe kg ha^{-1} verrechnet.

4.3 Vegetationsparameter

Während der Wachstumsperiode wurden verschiedene invasive und nicht-invasive Messungen an den Pflanzen durchgeführt. Die Parzellen wurden dazu in zwei Hälften aufgeteilt, sodass eine 1,5 m x 10 m Spur unberührt blieb und final mit dem Mähdrescher beerntet wurde (s. Kapitel 4.4.). Die manuellen Ernten sowie die übrigen invasiven Messungen im Vegetationsverlauf wurden auf der anderen Spur (1,5 m x 10 m) der jeweiligen Parzelle durchgeführt, aus der auch Zeiternten entnommen werden konnten. Die Beprobungen fanden in regelmäßigen Intervallen (ein bis zwei Wochen) in Abhängigkeit vom Mohn-Entwicklungsstadium statt. Der genaue Zeitplan ist im Anhang (Tab. A1 – A3) zu finden. Für die Beprobung wurden stets die mittleren Reihen einer Spur betrachtet, um Randeffekte auszuschließen.

Soweit nicht anders benannt, erfolgten die Messungen am Standort Campus Klein-Altendorf innerhalb des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) – Professur Nachwachsende Rohstoffe der Universität Bonn.

Bestandesdichte nach Feldaufgang

Um die Bestandesdichte zu Versuchsbeginn zu ermitteln, wurden die Kulturpflanzen nach der Keimung (BBCH 10 – 12) ausgezählt. Dazu wurde in jeder Parzelle dreimal die Pflanzenzahl pro laufendem Meter bestimmt. Beim Mohn wurde dafür die mittlere Reihe einer 1,5 m Spur ausgezählt. Für Weißklee und Sommergerste wurden jeweils die von der Mitte dieser Spur aus gesehen zweite Reihe links oder rechts der Mohnreihe ausgewählt und jeweils dreimal 1 m ausgezählt.

Entwicklungsstadium

Die Pflanzenentwicklungsstadien des Mohns, der Sommergerste und des Weißkleees wurden anhand ihrer BBCH-Stadien beschrieben. Für die Sommergerste wurde dazu die erweiterte BBCH Skala für Getreide genutzt⁵². Da für Mohn und Weißklee keine eigenen BBCH-Skalen existieren, wurde für Weißklee die allgemeine erweiterte BBCH-Skala verwendet und nur die Makrostadien bestimmt. Der Mohn wurde in Anlehnung an die BBCH-Skala für Raps bewertet, die an einigen Stellen modifiziert wurde. Ähnlich wie beim Raps fällt die Bestockung/Seitensprossbildung (Makrostadium 2) insbesondere bei dichten Beständen gering aus und fällt zeitlich mit dem Längenwachstum zusammen. Daher folgt auf das Rosettenstadium (BBCH 1) das Stadium 3 mit Längenwachstum und Schossen des Haupttriebs. Während des Längenwachstums beginnt auch die Entwicklung der Blütenanlage, weshalb Makrostadium 3 direkt in 5 (Entwicklung der Blütenanlage des Hauptsprosses) übergeht. Danach folgen Blüte (BBCH 6), Fruchtbildung (BBCH 7), Ausreifen (BBCH 8) und Absterben (BBCH 9). Notiert wurde das BBCH-Stadium am jeweiligen Boniturtermin als ein repräsentativer Wert jeder einzelnen Parzelle für Mohn, Sommergerste und Weißklee jeweils separat. Die für Mohn adaptierte BBCH Skala findet sich im Anhang (Tab. A 14).

Pflanzenhöhe

Die Pflanzenhöhe der drei Kulturen wurde zu den jeweiligen Boniturterminen anhand von fünf Pflanzen pro Kultur und Parzelle bestimmt. Dazu wurde die Höhe von fünf zufällig ausgewählten Pflanzen der Parzelle mittels Gliedermessstab vermessen.

SPAD-Messung

Mit dem SPAD-502 Plus (Konica Minolta, Japan) können SPAD-Werte erhoben werden, die mit dem Chlorophyllgehalt des Blattes korrelieren. Dafür wird die Lichtabsorption im Wellenlängenbereich 650 nm (rot) und 940 nm (infrarot) gemessen und ein SPAD-Wert generiert, der sich in Beziehung zum Chlorophyll- und damit auch Stickstoffgehalt des Blattes setzen lässt⁵³. Die SPAD-Werte wurden im Versuch an drei Pflanzen pro Kultur pro Parzelle erhoben. Dabei wurde ein Mittelwert aus fünf Messungen pro Pflanze generiert und jeweils die jüngsten vollausgebildeten Blätter der Pflanze vermessen.

Lichtreflektion

Die Lichtreflektionsspektren der Pflanzen können auch Auskunft über Stress geben, da sich die Absorptions- und Reflektionsraten mit der Blattzusammensetzung ändern, beispielsweise unter anderem abhängig vom Chlorophyllgehalt. Deshalb wurde das PolyPen RP 400 (Photon Systems Instruments, Tschechische Republik) verwendet, um Reflektionsspektren im Bereich von 380 bis 780 nm aufzunehmen. Aus den Spektren berechnet das PolyPen auch eine Reihe verschiedener Vegetationsindizes, die unterschiedliche Auskünfte über den Zustand der Pflanze geben. Die Messungen wurden jeweils an drei Pflanzen pro Kultur pro Parzelle erhoben und jeweils eine Messung im oberen, eine im mittleren und eine im unteren Bereich der Pflanze an der Blattoberseite eines vollentwickelten Blattes vorgenommen. Ein ausgegebener Messwert des PolyPens entsprach dabei dem Mittelwert 5 interner Messungen des Geräts an derselben Stelle. Ein Beispiel für einen prominenten Index ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), der oft verwendet wird, um die Vitalität von Pflanzenbeständen abzuschätzen. Der NDVI berechnet sich nach dem Schema:

$$\text{NDVI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}})$$

wobei R_{NIR} die Reflektion im Wellenlängenbereich bei 780 nm und R_{RED} die Reflektion bei 630 nm angibt.

Oberirdische Biomasse

Für die Bestimmung von Frisch- und Trockenmasse wurden regelmäßige Zeiternten aus jeder Parzelle entnommen. Mithilfe des Göttinger Zähl- und Schätzrahmens wurden dazu alle Pflanzen auf einer definierten Fläche von 0,1 m² oberirdisch abgeerntet. Der Rahmen wurde dabei mittig auf die mittlere Mohnreihe einer Spur gesetzt und auch in den Parzellen ohne Mohn an der gleichen Stelle platziert, um gleichmäßig viele Reihen Sommergerste bzw. Weißklee einzufassen. Es wurde jeweils das gesamte oberirdische Pflanzenmaterial (Stroh und zur Ernte auch die Kapseln bzw. Ähren) geerntet. Anschließend wurden die Pflanzen nach Kulturen sortiert, gezählt, Wurzelreste abgeschnitten und die Frischmasse gewogen. Danach wurden sie im Trockenschrank bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und abermals gewogen, um die Trockenmasse zu erhalten.

Blattflächenindex

Der Blattflächenindex gibt Auskunft über die Fläche, die von Blattmasse bedeckt wird, im Verhältnis zur darunter liegenden Bodenfläche und lässt sich als einheitsloser Index wie folgt berechnen:

$$\text{BFI} = \text{Blattfläche (cm}^2\text{)} / \text{Bodenfläche (cm}^2\text{)}$$

Um die Blattfläche in cm² zu bestimmen wurden die frischen Biomasseproben verwendet, die mittels Göttinger Zähl- und Schätzrahmen auf einer definierten Fläche von 1.000 cm² entnommen wurden. Vorbereitend wurden die Blätter der Proben dann einzeln von den Stängeln abgetrennt, bevor sie mit dem Blattflächenmessgerät Li-Cor 3100C (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA) vermessen werden konnten. Es wurden alle nach Kulturpflanzen getrennten Blätter einer Probenfläche nacheinander durch das Gerät geschoben, sodass sich ein gemeinsamer Wert pro Kultur für die Gesamtblattfläche auf 1.000 cm² ergab und der Blattflächenindex entsprechend kalkuliert werden konnte.

Stickstoff und Kohlenstoff

Die getrockneten Biomasseproben wurden weiter dazu verwendet, Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte in der Pflanze zu bestimmen. Dafür musste das Pflanzenmaterial zunächst zerkleinert werden. Mit einer Schneidmühle (SM 300, Retsch, Haan, Deutschland) wurden die einzelnen trockenen Proben am Campus Klein-Altendorf bei 3.000 rpm durch ein 0,25 mm Sieb vollständig zermahlen. Proben vom Vegetationsbeginn, die eine zu geringe Masse für eine Zerkleinerung mit der Schneidmühle aufwiesen, wurden mit einer Kugelmühle (MM 400, Retsch, Haan, Deutschland) bei 3.000 rpm für 30 Sekunden pulverisiert. Das zermahlene Material wurde anschließend für eine Verbrennung und gaschromatografische Analyse im EA 3000 Elementaranalyser (HEKAtech, Wegberg, Deutschland) am Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES – Professur Pflanzenernährung) der Universität Bonn vorbereitet. Dazu wurden jeweils 6 mg Probenmaterial in kleine Zinn cups eingewogen und verschlossen, die anschließend mittels Autosampler dem Gerät zugeführt wurden. Das Material wurde daraufhin bei 1.050°C unter Sauerstoffdruckinjektion mit Helium als Trägergas verbrannt und mittels GC-Säule aufgetrennt. Die entstandenen Signale wurden mittels TCD-Element aufgeschlossen und die entstandenen Datenpeaks zur Quantifizierung mittels Callidus 5.1 Software (EuroVector Redavalle, Italien) integriert. Die Angabe der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte erfolgte in Prozent.

Unkraut

Das Unkrautwachstum wurde anhand von Deckungsgrad, Anzahl, Arten und Biomasse dokumentiert. Der Unkrautdeckungsgrad, sowie der Deckungsgrad von Mohn und Gemengepartnern wurden mithilfe des Göttinger Zähl- und Schätzrahmens auf einer Fläche von 0,1 m² geschätzt. Dieser wurde dreimal pro Parzelle mittig auf einer der beiden Spuren platziert und der Deckungsgrad der jeweiligen Pflanzen (Mohn, Sommergerste, Weißklee oder Unkraut) in Prozent geschätzt. Auch die Anzahl der im Rahmen befindlichen Unkräuter sowie die Unkrautarten und deren Entwicklungsstadium wurden notiert. Im Jahr 2019 wurde aus einem der platzierten Rahmen, im Jahr 2020 aus allen drei Rahmen, pro Parzelle das Unkraut oberirdisch entnommen und dessen Frisch- und Trockenmasse analog zur Biomasse der Kulturpflanzen ermittelt.

4.4 Ernteparameter

Der Kornertrag wurde sowohl für den Mohn als auch für die Sommergerste manuell erfasst. Für die Ernte wurden jeweils drei laufende Meter aus der mittleren Mohnreihe der Beprobungsspur entnommen und analog drei laufende Meter Sommergerste aus einer der übernächsten benachbarten Reihen links oder rechts der Mohnreihe entnommen. Pro laufendem Meter wurden die Pflanzen- sowie die Kapsel-, bzw. Ährenzahl notiert. Dann wurden die Kapseln und Ähren vom Stroh getrennt und das Stroh im Trockenschrank bei 104°C für 24 h getrocknet, um die Trockenmasse zu ermitteln. Die Mohnkapseln wurden gewogen, anschließend mit einer Bügelsäge aufgesägt und die Samen eines laufenden Meters gewogen. Die Tausendkornmasse wurde anhand von 1.000 abgezählten Körnern bestimmt, diese wurden mit dem 5-Kanal-Körnerzählgerät Contador 2 (Pfeuffer, Kitzingen, Deutschland) mit Zufuhrbehälter Nummer 4 (Feinsaaten) ausgezählt. Die Ähren der Sommergerste wurden mit dem Laborährendrescher Wintersteiger LD 180 (Wintersteiger, Ried, Österreich) ausgedroschen. Auch die Tausendkornmasse der Sommergerste wurde mittels Abzählung von 1.000 Körnern mit dem 5-Kanal-Körnerzählgerät und Zufuhrbehälter 2 (Getreide) sowie anschließender Wiegung bestimmt.

Nach der Reinigung der Sommergerste wurden deren Feuchte- und Proteingehalte mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) (DA 7250™, Perten Instruments GmbH, Hamburg, Deutschland) bestimmt. Dazu wurde jeweils eine Teilprobe jeder Sommergerstenparzelle in die vorgesehene Probenschale gefüllt, bis diese gestrichen voll war, und anschließend unter dem Sensor platziert. Die Angabe von Proteingehalt und Feuchte erfolgte in Prozent.

Zusätzlich zur manuellen Ernte wurde jeweils eine Spur (1,5 m x 10 m) einer Parzelle mit dem Parzellenmähdrescher Elite (Wintersteiger, Ried, Österreich) bei niedriger Trommeldrehzahl schonend ausgedroschen. Die mit hohen Kapsel- und Grannenanteilen versehenen Proben wurden dann mittels Siebung und Windsichtung (MP 200, SAMATEC Saatguttechnik & Maschinenbau GmbH, Bad Oeynhausen, Deutschland) gereinigt. Für die Mohn- und Gemengeproben wurde ein 2,2 mm Langlochsieb verwendet und der Wind gering dosiert (Einstellung 1) bei einer Siebgeschwindigkeitseinstellung von 91 und starker Rüttlereinstellung. Der Mohn wurde jeweils anschließend nochmals durch ein manuelles 1 mm Rundlochsieb gesiebt. Für die Geste wurde ebenfalls das 2,2 mm Langlochsieb bei einer Windeinstellung von 1,5, Siebgeschwindigkeit von 85 und mittlerer Rüttlerstärke eingesetzt.

Die (manuell bestimmten) Erträge des Mischanbaus von Mohn und Sommergerste wurden mit den Erträgen der jeweiligen Kultur in Reinsaat verglichen. Dazu wurde der Land Equivalent Ratio (LER) nach Mead und Willey (1980)⁵⁴ berechnet:

$$LER = pLERa + pLERb = \frac{Ya}{Sa} + \frac{Yb}{Sb}$$

mit Ya = Ertrag von Kultur a im Gemenge, Yb = Ertrag von Kultur b im Gemenge, Sa = Ertrag von Kultur a im Reinanbau, Sb = Ertrag von Kultur b im Reinanbau.

Der LER gibt die relative Fläche an, die benötigt würde, um denselben Ertrag im Reinanbau zu produzieren⁵⁴. Ein $LER > 1$ bedeutet beispielsweise, dass das Gemenge auf derselben Grundfläche mehr Ertrag liefert, als es eine Einzelfrucht tun würde. $pLERa$ und $pLERb$ sind die partiellen LERs jeder der beiden Mischungspartner und beschreiben die Konkurrenzfähigkeit der einzelnen Kulturen.

Ein weiterer Parameter zur Abschätzung der Konkurrenzfähigkeit der beiden Mischungspartner ist der Competitive Ratio (CR). Dieser beschreibt, wie konkurrenzstark die eine Kultur gegenüber der anderen ist, indem das Verhältnis angegeben wird, in dem eine Kultur der anderen überlegen ist. Berechnet wird der CR nach Willey und Rao (1980)⁵⁵ wie folgt:

$$CRa = \left(\frac{Ya}{Sa} : \frac{Yb}{Sb} \right) \times \left(\frac{Zba}{Zab} \right)$$

mit Ya = Ertrag von Kultur a im Gemenge, Yb = Ertrag von Kultur b im Gemenge, Sa = Ertrag von Kultur a als Reinsaat, Sb = Ertrag von Kultur b als Reinsaat, Zba = Anteil der Fläche von Kultur a im Mischanbau, Zab = Anteil der Fläche von Kultur b im Mischanbau.

4.5 Statistik

Die Versuchsanlage war ein einfaktorieller Feldversuch mit vollständig randomisierten Parzellen. Der Vergleich über die drei Versuchsjahre wurde anhand eines linearen Modells mit Variante und Versuchsjahr als festen Faktoren berechnet. Die drei Kulturen wurden dabei getrennt betrachtet, sodass für Mohn die Variante P, PC1, PC2, PB1, PB2 und PB3 miteinander verglichen wurden. Für Sommergerste waren es B1, B2, B3, PB1, PB2 und PB3 sowie für Weißklee C1, C2, PC1 und PC2. Aufgrund von häufigen Interaktionen zwischen Variante und Versuchsjahr wurden die einzelnen Versuchsjahre anschließend getrennt ausgewertet. Vergleiche mittels Akike'schem Informationskriterium von linearen Modellen, in denen die Saatstärke der Sommergerste oder der Saatzeitpunkt des Klees als zweiter Faktor (zusätzlich zum Faktor „Mischanbau“) mit aufgenommen wurden, zeigten keine deutliche Modellverbesserung. Daher wurden die Daten pro Kultur und Jahr, nach Tests auf Normalverteilung und Varianzhomogenität, mittels einfaktorieller Varianzanalyse (ANOVA) mit Variante als festem Faktor verrechnet. Wo möglich, wurden Post-hoc-Vergleiche mittels Tukey-HSD-Tests ($p < 0,05$) durchgeführt, mit Ausnahme der Unkrautdaten, für die eine Verrechnung mit dem Scheffé-Test gewählt wurde. Die varianzanalytischen Berechnungen wurden mit SPSS 26 durchgeführt, das Akike'sche Informationskriterium wurde mit R (Version 1.2.1335) berechnet. Abbildungen wurden mit Microsoft Excel 2019 erstellt.

5.0 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Entwicklungsverläufe

Um die Effekte des Misanbaus auf die Pflanzenentwicklung nachvollziehen zu können, wurden Trockenmasse, Pflanzenhöhe und Blattfläche der drei eingesetzten Kulturen vom Beginn des Wachstums bis zur Ernte bestimmt.

5.1.1 Entwicklung der oberirdischen Biomasse

Sommernohn

Die Entwicklung der oberirdischen Biomasse aller Kulturen wurde anhand der Trockenmasse nachvollzogen. Sie wurde anhand von Zeiternten bis zur Kapselreife des Mohns ermittelt, da ab diesem Zeitpunkt die Blätter verbräunten und abfielen. Die Entwicklung der Trockenmasse der Jahre 2018 – 2020 ist in Abb. 3a dargestellt. Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich im Anhang (Tab. A4 – A6). Wie sich die Mischung mit Sommergerste und mit Weißklee in der Bestandesetablierungsphase sowie zum Erntezeitpunkt auf dem Feld entwickelte, ist in Abb. 4 dargestellt.

Die Mohnbiomasse nahm bis zur Samenreife zu und wurde insgesamt kaum von der Weißkleeunter Saat beeinflusst. Die Konkurrenzsituation mit der Sommergerste war in einem der drei Versuchsjahre so ausgeprägt, dass die Mohn-Trockenmasse gegenüber der Kontrolle signifikant abnahm.

Unterschiede zwischen der Mohn-Trockenmasse in Reinsaat verglichen mit dem Misanbau mit Weißklee bestanden zu keinem Zeitpunkt. Auch der Aussaattermin des Weißklees zeigte keine signifikanten Auswirkungen auf die Mohn-Trockenmasse, obwohl die Mohnbestände bei früher Aussaat des Weißklees (PC1) die geringsten Trockenmassen entwickelten. Dies bedeutet, dass eine Kombination mit Weißklee das Mohnwachstum nicht negativ beeinflusste, unabhängig von Jahr und Aussaatzeitpunkt. Die Trockenmasse der Mohnpflanzen in Reinsaat im Vergleich zur Mischung mit Sommergerste zeigte in den Jahren 2018 und 2020 ein einheitliches Bild, wohingegen im Jahr 2019 deutliche Unterschiede in der Trockenmasseentwicklung zwischen den Varianten zu erkennen waren.

2018 wurden zunächst keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten analysiert. Zur letzten Messung (BBCH 85) wiesen allerdings die Varianten P ($941,5 \pm 67,9 \text{ g m}^{-2}$) und PC2 ($1.086,9 \pm 176,3 \text{ g m}^{-2}$) signifikant mehr Trockenmasse auf als PB3 ($596,7 \pm 121,8 \text{ g m}^{-2}$). Im Jahr 2020 traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten auf, die Mohn Reinsaat erreichte jedoch tendenziell die höchsten Werte mit einer Trockenmasse von $1.728,9 \pm 502,2 \text{ g m}^{-2}$ zu BBCH 85.

Das Ausnahmejahr war 2019, hier traten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten schon ab BBCH 30 auf. Zu diesem Zeitpunkt war die Mohn-Trockenmasse in den Varianten P ($163,8 \pm 23,3 \text{ g m}^{-2}$) und PC2 ($168,2 \pm 15,7 \text{ g m}^{-2}$) signifikant größer als in Variante PB3 ($94,6 \pm 8,2 \text{ g m}^{-2}$). Dieser Trend setzte sich bis BBCH 81 fort. Dort lag ebenfalls die Trockenmasse von P, PC1 und PC2 ($955,1 - 1.260,8 \text{ g m}^{-2}$) signifikant über der Trockenmasse der Mohn-Sommergerste-Mischungen ($241,5 - 343,6 \text{ g m}^{-2}$). Die Entwicklung der Trockenmasse verdeutlicht, dass 2019 die Konkurrenzeffekte durch die Sommergerste schon sehr früh auftraten, etwa zum Beginn des Längenwachstums des Mohns (BBCH 30). Aufgrund des schnellen Wachstums der Sommergerste nach der Keimung, ist sie in der Lage schon früh Konkurrenzeffekte auf die zweite Kultur auszuüben⁵⁶, was 2019 am stärksten der Fall war. Diese Einflüsse verstärkten sich im Laufe der Vegetationszeit, weshalb anhand der Trockenmasse deutlich sichtbar wurde, dass Sommergerste die konkurrenzstärkere Kultur in diesem Jahr war, wohingegen in den beiden anderen Jahren der Mohn mehr Biomasse ausbildete.

Der starke Einfluss des Anbaujahres auf die Ausprägung des Mohnwachstums in Kombination mit Sommergerste ist hauptsächlich auf die Unterschiede in der Witterung in Kombination mit den Saatzeitpunkten zurückzuführen, da insbesondere die Jahre 2018 und 2020 überwiegend heiß und vor allem trocken waren (Tab. 3). Gerste reagiert besonders empfindlich auf Wassermangel und Hitze⁵⁷, was erklärt, warum der Bestand in den Jahren 2018 und 2020 geschwächt war. Mohn wurde in jedem Jahr drei bis sechs Wochen früher als die Sommergerste gesät und profitierte von den noch feuchten Böden im März und April, wohingegen die Sommergerste vor allem auf eine feuchte Ackerkrume im Mai angewiesen war. Für eine optimale Ertragsbildung benötigt die Sommergerste etwa 150 l m^{-2} Wasser innerhalb der Vegetationszeit⁵⁸. Darum war 2019 aus Sommergerstenperspektive vorteilhafter, da in den Monaten März bis Mai insgesamt etwa $166,4 \text{ mm}$ Niederschlag fielen, deutlich mehr als in den anderen beiden Jahren (2018: $114,5 \text{ mm}$; 2020: $62,5 \text{ mm}$). Die Böden des Campus Klein-Altendorfs sind tiefgründige Parabraunerden aus Löss, weshalb ertragsrelevanter Wassermangel selten auftritt⁵⁹. Nichtsdestotrotz neigt die lehmige Bodenart zu Verschlammung und Verkrustung, weshalb die Wachstumsbedingungen sich sowohl unter starken Niederschlägen als auch bei lang anhaltender Trockenheit insbesondere in der Ackerkrume negativ verändern können. Der Wasserverbrauch von Pflanzen hängt dabei nicht nur von der Wasserverfügbarkeit, sondern auch von der eingestrahnten Sonnenenergie ab und erhöht sich dementsprechend⁶⁰. Steigende Transpiration bedingt dabei, wenn andere Wachstumsfaktoren nicht im Mangel sind, auch einen höheren Ertrag, ebenso spielt die Bodentemperatur eine Rolle für das Pflanzenwachstum^{61,62}.

Ein weiterer Punkt, der 2019 das Wachstum begünstigte, ist der Aussattermin der Sommergerste, der mit Ende April 2019 früher lag als 2018 und 2020 und damit vermutlich bedeutsam zu einer deutlich höheren Konkurrenzkraft der Sommergerste in diesem Jahr beitrug.

» Große Abstände zwischen der Mohn- und der Gerstenaussaat förderten die Konkurrenzkraft des Mohns. Der Saattermin des Klees hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Mohntrockenmasse. Hohe Niederschläge förderten die Konkurrenzkraft der Gerste. Aufgrund der Tatsache, dass das Bestandesmanagement und die Umweltbedingungen einen großen Einfluss auf die Entwicklung des Gemenges haben^{63,64}, scheint es notwendig, den Mohn durch frühe Saattermine zu unterstützen, um die Konkurrenzstärke zu erhöhen.

Sommergerste

Die Trockenmasse der Sommergerste spiegelte die Trockenmasse-Entwicklung des Mohns in entgegengesetzter Art und Weise (Abb. 3b). Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in Tab. A4 – A6 im Anhang.

Die Trockenmasse der Sommergerste entwickelte sich 2019 deutlich stärker als in den anderen beiden Versuchsjahren und wies grundsätzlich etwas höhere Biomassen in Reinsaat im Vergleich zur Mischung mit Mohn auf.

2019 war die Sommergerste zum Zeitpunkt der ersten Biomasse-Evaluation bereits in Entwicklungsstadium 21, zu dem der Mohn erst BBCH 16 erreicht hatte. Zum Vergleich: In den Jahren 2018 und 2020 konnte die Sommergerste zur ersten Bonitur noch keine messbaren Trockenmassewerte liefern. Zu den zwei Hauptursachen zählen die verfrühten Saatzeitpunkte beider Mischungspartner und die höheren Niederschläge im Frühjahr 2019, von denen die Sommergerste am meisten profitierte. In Untersuchungen zu Sommergerste in Litauen wurde der höchste Biomassezuwachs zum Zeitpunkt des Ährenschiebens dokumentiert, der mit Niederschlagsereignissen einherging⁶⁵. Stärkere Niederschläge könnten somit ein Grund für die erhöhte Biomasse-Akkumulation der Sommergerste im Jahr 2019 gewesen sein, mit Werten zwischen $790,2 \pm 248,7$ (PB2) und $1.373,2 \pm 427,5$ (B1) g m⁻² zum Reifezeitpunkt (BBCH 78). Im Mischbau mit Raps und Erbse erreichte die Sommergerste den höchsten Anteil an der Gesamtbiomasse⁶⁶. Dies lässt vermuten, dass die Sommergerste auch den Mohn in der Biomasse dominiert hätte, wenn dieser keinen Vorsprung durch den Saatzeitpunkt gehabt hätte, und betont die Wichtigkeit einer gezielten Saattermin-Auswahl.

In jedem Jahr war die Tendenz zu beobachten, dass alle reingesäten Sommergerstenvarianten mehr Biomasse bildeten als die jeweiligen Mischsaaten und dies signifikant von der zweiten Biomasse-Evaluation (BBCH 13 – 22) an.

Dies zeigt, dass der Mischanbau einen Einfluss auf das Sommergerstenwachstum hatte, auch im konkurrenzstarken Jahr 2019.

Die schon früh sehr ausgeprägten Trockenmassen der Sommergerstenvarianten im Jahr 2019 erklären wiederum, warum der Mohn in diesem Jahr unter der Konkurrenzsituation am stärksten litt. Dabei war der Einfluss der Saatstärke deutlich geringer als der Einfluss durch den Mischungspartner, den Saatzeitpunkt oder die Witterung. In der Literatur wird im Gegensatz zu diesen Erkenntnissen der Saatstärke ein hoher Einfluss auf die Biomassebildung zugeschrieben, da mit erhöhter Saatedichte auch größere Lichtkonkurrenz einhergehe und die einzelnen Triebe weniger Biomasse bildeten⁶⁶. Dies kann jedoch neben der intraspezifischen Konkurrenz auch eine Erklärung für die geringere Biomasse in der Mischung mit Mohn sein, da durch den Mohn zusätzliche Konkurrenz um Licht entsteht.

»» Dies bedeutet, dass beim Mischanbau von Mohn mit Sommergerste die Aussaattermine und Witterungsbedingungen das Zusammenspiel und die Konkurrenz zwischen beiden Kulturen stark determinieren und dass die Konkurrenz durch die Sommergerste durch eine hohe Biomasseausbildung gekennzeichnet ist. Damit sich die Sommergerste als Mischungspartner eignet, müssen daher Eingriffe in das Mischanbausystem vorgenommen werden, wie beispielsweise versetzte Saatzeitpunkte, um dem Mohn einen Wachstumsvorsprung zu ermöglichen.

Weißklee

Die Trockenmasse des Weißklee zeigte in jedem Jahr signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Dies war hauptsächlich auf die versetzten Saatzeitpunkte der frühen (C1) und späten (C2) Varianten zurückzuführen. Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich im Anhang (Tab. A4 – A6).

Im Allgemeinen konnten die späten Weißkleeaussaaten weniger Biomasse als die früher gesäten Varianten ausbilden. Dieser Unterschied war besonders groß in den Jahren 2018 und 2020 (Abb. 3c). Die Trockenmasse des Weißklee in Mischung mit Mohn war zudem meist geringer als in Reinsaat.

2018 und 2020 wurden die Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischanbau in der frühen Weißkleeaussaat ab BBCH 5 (C1) signifikant. Beispielsweise konnten zu BBCH 6 in 2018 in der C1-Reinsaat $674,8 \pm 118,9 \text{ g m}^{-2}$ geerntet werden, was deutlich mehr als in PC1 war ($342,1 \pm 73,7 \text{ g m}^{-2}$). Ähnliche Unterschiede wurden auch beim späten Weißklee erfasst, der in Reinsaat stets mehr Biomasse bildete als in Mischung mit Mohn (C2: $149,8 \pm 42,6 \text{ g m}^{-2}$; PC2: $19,3 \pm 4,2 \text{ g m}^{-2}$ zu BBCH 5 (C2)). Die Trockenmasse von PC2 war in beiden Jahren beinahe irrelevant, da sie final nur $17,7 \pm 14,2$ (2018) bzw. $7,8 \pm 8,6$ (2020) g m^{-2} erreichte.

2019 lag die Trockenmasse von C1 von BBCH 4 an signifikant über der Trockenmasse der übrigen Varianten ($211,6 \pm 22,9$ im Vergleich zu $<100 \text{ g m}^{-2}$). Trotzdem erreichten auch die später gesäten Weißkleeparzellen Trockenmassen bis zu $71,7 \pm 24,0$ (PC2) und $441,1 \pm 76,8 \text{ g m}^{-2}$ (C2) zum BBCH 6 (C2). Ein Hauptgrund für die höheren Biomassen der spät gesäten Weißkleevarianten im Jahr 2019 kann in den Aussaatterminen gefunden werden, da die spätere Aussaat deutlich näher an der Mohnaussaat lag als in den übrigen Jahren (Tab. 2). Aufgrund der ebenfalls spärlicheren Biomassezunahme in der Reinsaat bei Aussaaten ab dem späten April kann davon ausgegangen werden, dass eine Ausbringung des Weißklee Ende April/Anfang Mai zu spät ist, um ausreichend bodenbedeckende Bestände zu bilden. Dass frühe Untersaaten begünstigend auf das Weißkleewachstum wirken, zeigte auch eine Studie von Gerhards et al. (2018). Dort wurde Weißklee mit Sommergetreide kombiniert und gleichzeitig sowie etwa 30 Tage später ausgesät. Daraufhin entwickelte sich die Trockenmasse zum 95. Tag nach Aussaat des früh gesäten Weißkleees zu 8 g m^{-2} , während der späte Weißklee nur $2 - 3 \text{ g m}^{-2}$ erreichte⁶⁷. Auch wenn die Trockenmassen in der genannten Untersuchung generell deutlich geringer ausfielen, zeigte sich derselbe Trend einer stark reduzierten Biomasse bei den spät gesäten Varianten. Während die späte Weißklee Reinsaat noch Bestände ausbildete, wurde der späte Weißklee in der Mischung mit Mohn in zwei von drei Jahren stark unterdrückt.

» Die Trockenmasse des Weißkleees war generell höher in der Reinsaat als in der Mischung, was die Unterlegenheit des Weißkleees gegenüber dem Mohn belegt. Frühe Aussaaten sichern dabei die Biomasseausbildung des Weißkleees auch in der Mischbauvariante.

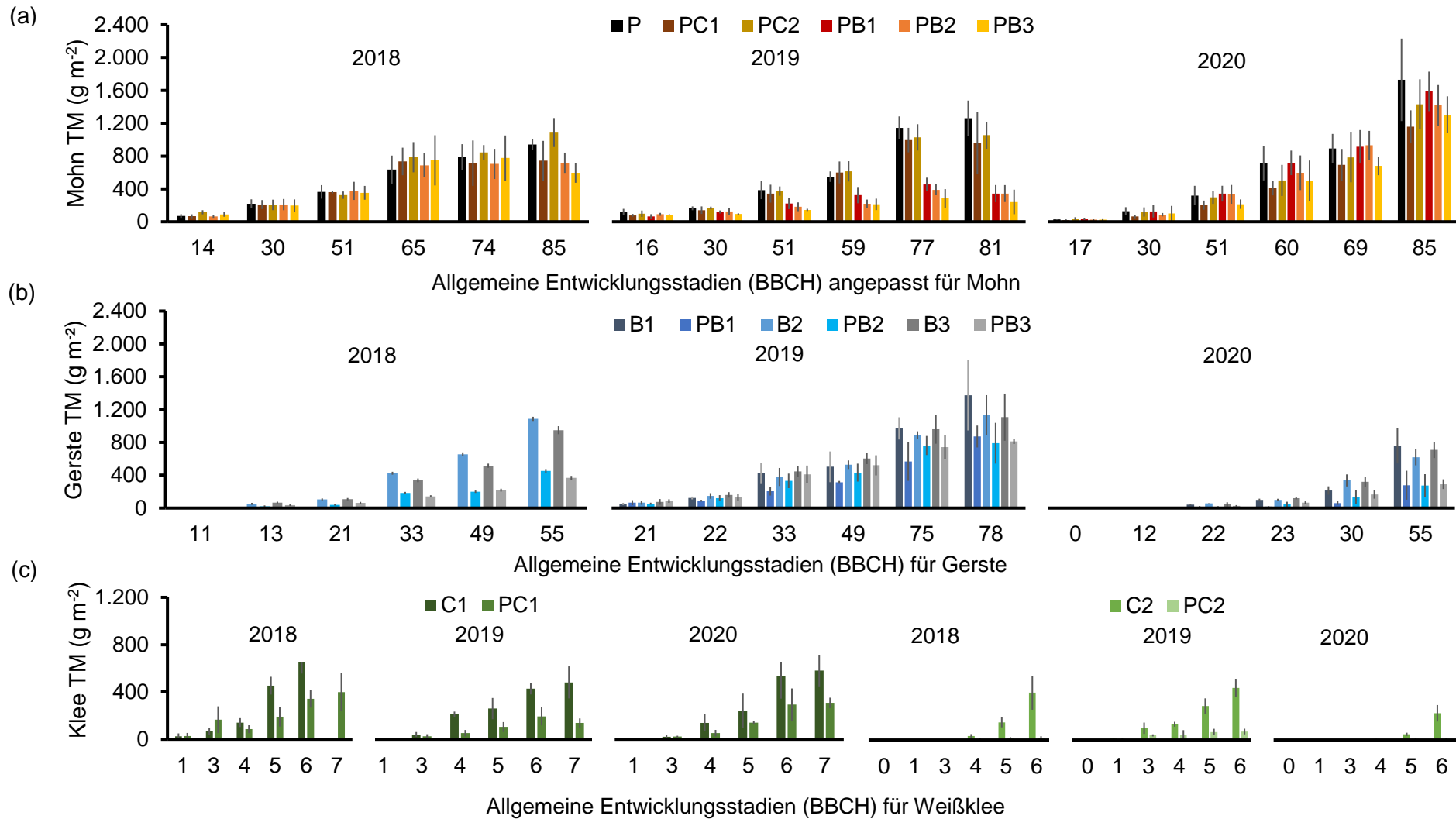


Abb. 3 Trockenmasse (g m⁻²) von (a) Sommermohn in Reinsaat (P) und in Mischung mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1, PB2, PB3) sowie Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2), (b) Sommergerste in Reinsaat in drei Saatstärken (B1, B2, B3) und in Mischung mit Sommermohn (PB1, PB2, PB3) und (c) Weißklee-Frühsaat in Reinsaat und Mischung (C1, PC1) sowie Weißklee-Spätsaat in Rein- und in Mischsaat (C2, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

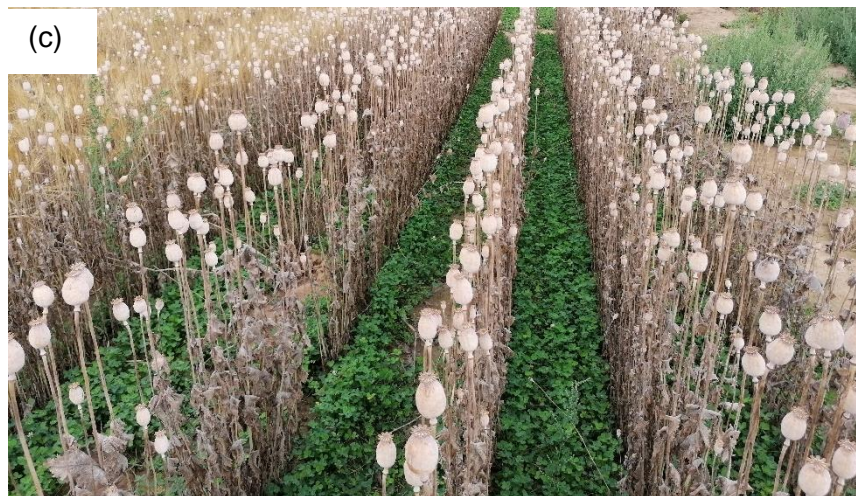


Abb. 4 (a) Sommermohn in Mischung mit Weißklee (PC1) 55 Tage nach Mohnaussaat, (b) Sommermohn in Mischung mit Sommergerste (PB1) 55 Tage nach Mohnaussaat, (c) Sommermohn in Mischung mit Weißklee (PC1) zum Erntezeitpunkt, (d) Sommermohn in Mischung mit Sommergerste (PB1) zum Erntezeitpunkt am Campus Klein-Altendorf 2019

5.1.2 Entwicklung der Pflanzenhöhe

Sommernohn

Die Pflanzenhöhe des Mohns zeichnete im Wesentlichen die Entwicklung der Biomasse nach. Grundsätzlich folgte das Mohnwachstum einer Sättigungskurve mit dem größten Längenwachstum zwischen BBCH 30 und 60 (Abb. 5). Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in den Tab. A7 – A9 im Anhang. Das Wachstum stagnierte ab dem Blütezeitpunkt. Dabei erreichten die Pflanzen maximale Wuchshöhen von 102 (2018), 118 (2019) und 130 (2020) cm. Die Wuchshöhen von Mohn werden von Dobos et al. (2013) bei 70 – 120 cm angegeben². Die in diesem Versuch ermittelten Höhen liegen somit am oberen Rand dieser Angabe, im Regelfall erreichen auch Wintermohnsorten aufgrund des verlängerten Wachstumszeitraums deutlich größere Höhen als Sommernohnsorten wie die hier verwendete `Viola`. Der starke Wuchs kann jedoch auch ein Hinweis auf die Bodenfruchtbarkeit sein, da der Versuch auf lössreicher Parabraunerde mit Ackerzahlen über 90 Punkten angebaut wurde, was optimale Ausgangsbedingungen für hohes Wachstum bot.

Das Höhenwachstum des Mohns wurde vom Mischungspartner Weißklee kaum beeinflusst, wohingegen die Sommergerste in einem von drei Versuchsjahren das Höhenwachstum des Mohns signifikant reduzierte, was durch hohe Saatstärken zusätzlich begünstigt wurde.

Signifikante Unterschiede im Wachstum der verschiedenen Varianten traten nur 2019 und 2020 auf. 2018 wuchs der Mohn gleichmäßig in Reinsaat sowie in den Mischungen mit Weißklee und Sommergerste. Auch 2020 wurde bis zur Blüte ein gleichmäßiges Höhenwachstum gemessen. Im Gegensatz dazu differenzierte sich 2019 das Wachstum von Mohn in Reinsaat und Mohn in Mischung mit Weißklee von den Mischungen mit Sommergerste, sodass ab BBCH 51 die Mohnpflanzen in den Varianten P, PC1 und PC2 (53,1 – 54,9 cm) signifikant größer waren als die Varianten PB1, PB2 und PB3 (41,4 – 42,9 cm). Diese Differenzierung blieb bis zur Ernte bestehen. Der Einfluss der Sommergerste als Mischungspartner war demzufolge unabhängig von der Saatstärke deutlicher als der Einfluss des Weißklees.

Im Jahr 2020 traten ab BBCH 60 auch Unterschiede zwischen Variante PC2 (86,3 cm) und den übrigen Varianten (77,6 – 83,0 cm) auf. Da in dieser Variante kaum Weißklee gewachsen war, lässt sich dieser Unterschied am ehesten durch die fehlende Konkurrenz erklären. Ähnlich zur Biomasse entwickelte der Mohn in Kombination mit früh gesättem Weißklee 2020 auch die niedrigste Pflanzenhöhe. Diese Unterschiede zur Reinsaat waren allerdings nicht signifikant. Im Allgemeinen verdeutlichte die Pflanzenhöhenentwicklung im Jahr 2019 das schwache Wachstum der Mohnpflanzen, die der Konkurrenz mit der Sommergerste unterlagen.

Diese negative Entwicklung wurde anhand der Biomasse bereits sichtbar. Grundsätzlich war der Einfluss des Weißklee deutlich geringer ausgeprägt als der der Sommergerste. Saatstärken und Saatzeiten spielten ebenfalls die untergeordnete Rolle.

Die geringen Wuchshöhen des Weißklee bei später Aussaat in zwei von drei Jahren in Kombination mit geringer Biomasseentwicklung sprechen für einen möglichst frühen Aussaattermin des Weißklee, um dessen Auflaufen zu sichern, auch wenn dadurch die Konkurrenzsituation leicht verschärft wird. Die Ertragsdaten können Hinweise geben, ob ein leicht vermindertes Höhenwachstum und reduzierte Biomasseakkumulation des Mohns durch frühe Weißkleeaussaat in Kauf genommen werden können. Grundsätzlich scheint sich die Kombination einer hoch wachsenden Druschfrucht wie dem Mohn mit niedrigwachsenden Leguminosen wie dem Weißklee zu eignen, um die Konkurrenz um Ressourcen wie Licht, Wasser und Nährstoffe zu minimieren³⁵. Die Wahl geringer Saatstärken des Mischungspartners Sommergerste bedeutete geringere Pflanzendichten m^{-2} , die zu verminderter Ressourcenkonkurrenz führen⁶⁶. Daraus ergaben sich in einem der drei Versuchsjahre (2019) leichte Vorteile im Höhenwachstum des Mohns in der Variante PB1. Bei grundsätzlich konkurrenzstarken Mischungspartnern wie der Sommergerste sollte daher in Kombination mit Mohn auf eine möglichst geringe Saatstärke geachtet werden.

» Für ein gleichmäßiges Mohn-Höhenwachstum empfehlen sich niedrig wachsende Kulturen wie der Weißklee als Mischungspartner, die räumlich weniger stark um Ressourcen wie Licht, Wasser und Nährstoffe konkurrieren. In Kombination mit konkurrenzstarken Pflanzen wie der Sommergerste sollte durch Reduzierung der Saatstärke oder Verzögerung der Aussaat die Konkurrenzsituation entschärft werden.

Sommergerste

Die Sommergerste wuchs in allen drei Jahren mit nur geringen Unterschieden zwischen den Varianten auf und erreichte dabei eine maximale Höhe von 73 bis 78 cm (2018 – 2020, Abb.5). Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in den Tab. A7 – A9 im Anhang.

Rückschlüsse auf die Konkurrenzsituation zum Mohn lassen sich durch das Höhenwachstum der Sommergerste nicht abbilden, da auch im Jahr 2019, das von der Sommergerste dominiert wurde, keine insgesamt größeren Pflanzenhöhen als in den übrigen Jahren ermittelt wurden.

Dass die Wuchshöhe der Sommergerste trotz Konkurrenz mit dem Mohn so gleichmäßig ausfiel, lässt eine starke genetische Verankerung des Größenwachstums vermuten. In der beschreibenden Sortenliste wird die Wuchshöhe der Sorte `Laureate´ mit 3 bepunktet⁶⁸, was eher kurzes Längenwachstum bedeutet und von den ermittelten Höhen von unter 80 cm bestätigt wird.

Es fällt jedoch auf, dass 2018 und 2019 die Sommergerste bereits bis BBCH 60 des Mohns eine Höhe von über 60 cm erreicht hatte, wohingegen dies 2020 erst zum Mohn-BBCH 85 der Fall war. Die verschärfte Konkurrenzsituation zum Mohn im Jahr 2019 wirkte sich demzufolge zwar negativ auf die Wuchshöhen des Mohns aus, zeigte bei der Sommergerste jedoch nur eine Verfrühung von Biomasse- und Höhenentwicklung, aber keine Zunahme der maximalen Wuchshöhe.

» Fehlende Unterschiede im Höhenwachstum der Gerste verdeutlichten den geringen Einfluss des Misanbaus auf diesen Wachstumsparameter.

Weißklee

Beim Weißklee traten deutliche Unterschiede im Höhenwachstum zwischen früh und spät gesäten Varianten in allen drei Jahren auf (Abb. 5). Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in den Tab. A7 – A9 im Anhang. Der früh gesäte Weißklee war zu jeder Bonitur etwa ein BBCH Stadium weiter entwickelt als der später gesäte Weißklee, was sich auch im Höhenwachstum bemerkbar machte. Dabei wurden maximale Wuchshöhen von 22 bis 31 cm erreicht.

Grundsätzlich nahm das Höhenwachstum des Weißklees bis zur Blüte zu und stagnierte dann. Dieser Zeitpunkt lag beim spät gesäten Weißklee etwa zehn Tage später als beim früh gesäten. Daher war der früh gesäte Weißklee meist höher als die späte Aussaat. Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischung traten in zwei von drei Jahren auf.

2018 und 2020 entwickelten sich C1 und PC1 zunächst gleichmäßig und wuchsen stets signifikant höher als die Varianten C2 und PC2. Der spät gesäte Weißklee fiel durch insgesamt äußerst schwachen Wuchs von maximal 12 cm (C2 und PC2 im Jahr 2018) und 11 cm (PC2 im Jahr 2020) auf. 2020 konnte die spät gesäte Reinsaat im Wachstum aufholen, sodass die Varianten C1, PC1 und C2 im August Höhen zwischen 20 und 23 cm erreichten. 2019 lag die Aussaat des späten Termins bereits Ende April, weshalb zwar die frühen Weißkleeausaaten einen Wachstumsvorsprung zeigten, dieser jedoch ab BBCH 6 (C1) nicht mehr signifikant war. Der starke Einbruch im Wachstum der C1-Reinsaat 2018 nach dem 14.06. lässt sich durch eine nur in den Reinsaaten erfolgte Mahd erklären, auf die in den Folgejahren verzichtet wurde.

Zusätzlich traten 2018 und 2020 Konkurrenzeffekte durch den Mohn auf, weshalb das Höhenwachstum des Weißklees in der Mischung 2018 tendenziell und 2020 auch signifikant geringer ausfiel als in Reinsaat. Beispielsweise wurden $21,6 \pm 4,8 \text{ g m}^{-2}$ (C2) gegenüber $12,2 \pm 2,5 \text{ g m}^{-2}$ (PC2) zu BBCH 8 (2020) gemessen. Ein Konkurrenzeffekt durch den Mohn war 2019 nicht sichtbar, es entwickelten sich sowohl die frühen als auch die späten Weißkleeaufwüchse in Reinsaat gleichmäßig zu den Mischsaaten.

Somit waren die Unterschiede zwischen den Saatzeitpunkten deutlicher ausgeprägt als die Unterschiede aufgrund des Mischanbaus. Das Höhenwachstum des Weißklees in der Mischung wurde zwar tendenziell vom Mohn beeinflusst, verursachte insbesondere bei frühen Saatzeitpunkten jedoch nur minimale Unterschiede. Die geringen Wuchshöhen des spät gesäten Weißklees in zwei der drei Jahre deuten an, dass der späte Saattermin das Weißkleewachstum grundsätzlich hemmt und die Konkurrenz durch den Mohn dies noch verstärkt. Dies stimmt auch mit den ebenfalls geringeren Trockenmassezunahmen der C2-Varianten überein.

In Experimenten mit verschiedenen Weißkleearten als Untersaat in Lauch war die maximale Bestandeshöhe der Untersaat der Hauptfaktor, der die Ertragsverluste der Hauptfrucht determinierte⁵¹. Dabei war die Höhe der Untersaat negativ mit dem Ertrag der Hauptfrucht korreliert. Durch seine maximale Wuchshöhe von 31 cm war der Weißklee in dem im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experiment etwa halb so groß wie die Sommergerste. Dies könnte bedeuten, dass auch in diesem Fall die niedrig wachsende Kultur den geringeren Konkurrenzeffekt auf die Hauptfrucht ausübte. Aufgrund dessen kommen höchstwahrscheinlich auch andere niedrig wachsende Zweitfrüchte wie beispielsweise alternative Kleesorten als Mischungspartner für den Mohn infrage. Allerdings muss bei geringem Konkurrenzdruck gegenüber der Hauptfrucht auch von geringerer Konkurrenzstärke gegenüber Unkräutern ausgegangen werden, was von den Hollander et al. (2007)⁵¹ auch für den Weißklee belegt wurde.

»» Bei ungünstigen Aussaatbedingungen (Trockenheit) und Konkurrenz durch den Mohn wird der Weißklee zu späteren Zeitpunkten stark im Wachstum gehemmt. Daher eignen sich frühe Aussaattermine, um das Wachstum des Weißklees in der Mischung zu sichern. Grundsätzlich eignet sich der Weißklee aufgrund des niedrigen Wuchses gut für den Mischanbau mit Mohn, was sich höchstwahrscheinlich auch auf andere niedrig wachsende Leguminosen übertragen lässt.

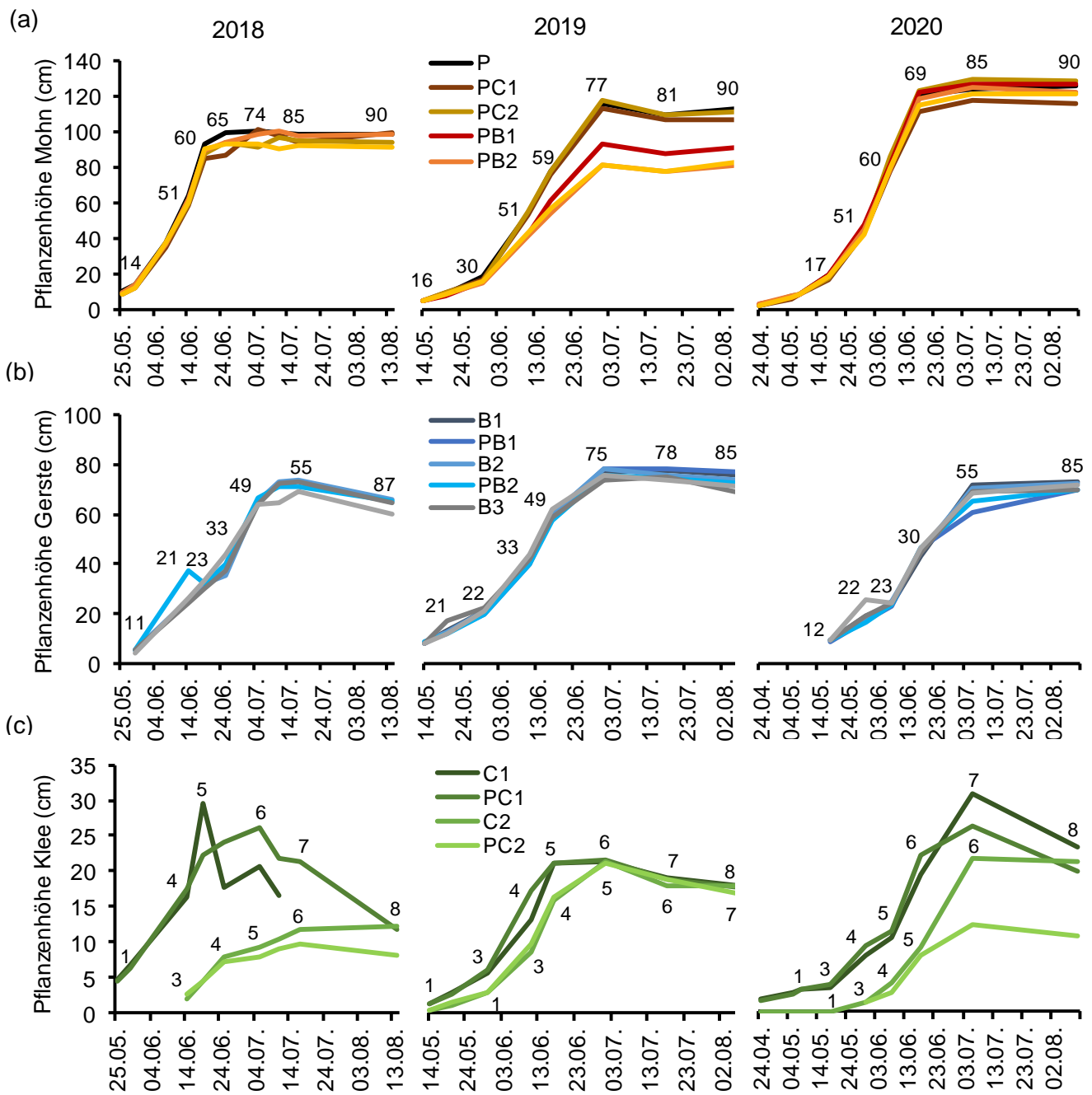


Abb. 5 Höhenwachstum (cm) von (a) Sommermohn in Reinsaat (P) und in Mischung mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1, PB2, PB3) sowie Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2), (b) Sommergerste in Reinsaat in drei Saatstärken (B1, B2, B3) und in Mischung mit Sommermohn (PB1, PB2, PB3) und (c) Weißklee-Frühsaat in Reinsaat und Mischung (C1, PC1) sowie Weißklee-Spätsaat in Rein- und in Mischsaat (C2, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee). Die adaptierten Entwicklungsstadien (BBCH) sind für die jeweilige Kultur als zweistellige Zifferncodes in den Abbildungen zu jedem Probenahmedatum hinterlegt

5.1.3 Entwicklung der Blattfläche

Sommernohn

Die Blattfläche der Mohnpflanzen wurde ab dem Jahr 2019 vermessen (Tab. 5). Der Blattflächenindex (BFI) nahm 2019 und 2020 kontinuierlich bis zur Blüte zu. Dabei war der BFI 2020 grundsätzlich größer und erreichte einen maximalen BFI von 7,4 für den Mohn in Reinsaat zum BBCH 60. 2019 waren es 4,9 zum BBCH 59. In einem Experiment von Yadav et al. (1984) erreichten die Mohnpflanzen einen maximalen BFI von 4,0, was zu den Ergebnissen von 2019 passt⁶⁹. Nach der Blüte fiel der BFI ab, was insbesondere 2019 besonders schnell geschah, sodass der BFI zu BBCH 77 schon unter 3,0 lag. Während der Kapselausreifung beginnen die Mohnblätter sich braun zu färben und abzufallen, was 2019 zügiger voranschritt als 2020 und den höheren BFI-Rückgang im Jahr 2019 erklärt.

Dass die Biomasse keinen so starken Rückgang wie der Blattflächenindex zeigte, lässt sich damit erklären, dass in die Trockenmasseberechnungen stets die Gesamtpflanze einbezogen wurde, während der BFI sich nur auf die Blattorgane bezieht. Es gab jedoch 2019 ebenso signifikante Unterschiede im BFI zwischen den Varianten, wie sie für die Biomasseentwicklungen ermittelt wurden.

Die Blattfläche des Mohns nahm bis zum Blütezeitpunkt zu. In den Varianten, die mit Sommergerste gemeinsam angebaut wurden, war die Blattfläche durchgängig geringer als die der Mohn-Reinsaat und der Mohn-Weißklee-Kombinationen.

Diese Differenzierung begann zu einer frühen Entwicklungsphase und resultierte zu BBCH 59 2019 in signifikant höheren BFIs der Varianten P, PC1 und PC2 (4,8 – 5,1) gegenüber den Varianten PB1, PB2 und PB3 (1,4 – 2,5). Willey et al. (1990)³⁵ untersuchten die Unterschiede in der Lichtausnutzung einer aufrechten und einer niedrig wachsenden Kultur (Hirse und Erdnuss). Die Lichtausnutzung wurde nicht im Gesamten erhöht, aber die Mischbauvariante produzierte dennoch höhere BFIs, was bedeutet, dass dieselbe Lichtmenge effizienter zwischen beiden Komponenten aufgeteilt wurde, indem die aufrechte Pflanze höhere und die niedrig wachsende Pflanze geringere Lichtintensitäten nutzte³⁵. Im vorliegenden Fall wuchsen Mohn und Sommergerste eher aufrecht, wohingegen sich der Klee niedrig über dem Boden befand, was vermutlich die Lichtausnutzung in der Mohn-Weißklee-Mischung erleichterte und zu mehr Lichtkonkurrenz zwischen Mohn und Sommergerste führte.

Unter den verschiedenen Saatstärken der Sommergerste war in beiden Jahren die Tendenz zu erhöhten Mohn-Blattflächen bei niedrigerer Sommergerstendichte zu beobachten. Dieser Trend war jedoch nicht signifikant. Es ist dennoch plausibel, dass höhere Saatstärken auch meist höhere Blattflächen bedeuten⁷⁰ und in diesem Fall die Sommergerste die Mohnblattfläche stärker verdrängte.

Tab. 5 Blattflächenindizes (BFI) von Sommermohn in Reinsaat (P) sowie in Mischung mit Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2) und Sommergerste zu drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (BBCH) am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Jahr	Variante	BFI zum jeweiligen Mohn- Entwicklungsstadium (BBCH)			
		BBCH 30 ¹	BBCH 51 ²	BBCH 59 ³	BBCH 77 ⁴
2019	P	4,0 a ± 0,8	4,5 a ± 1,4	4,9 a ± 0,8	2,5 a ± 0,6
	PC1	3,0 abc ± 0,8	3,8 ab ± 1,2	4,8 a ± 0,8	2,2 a ± 0,6
	PC2	3,1 ab ± 0,4	4,2 ab ± 0,5	5,1 a ± 0,8	2,3 a ± 0,6
	PB1	1,5 d ± 0,4	2,3 bc ± 0,6	2,5 b ± 1,2	0,7 b ± 0,3
	PB2	1,6 cd ± 0,9	1,7 c ± 0,5	1,7 b ± 0,4	0,6 b 0,3
	PB3	1,8 bcd ± 0,5	1,4 c ± 0,1	1,4 b ± 0,3	0,5 b ± 0,5
2020	P	2,1 a ± 0,8	4,4 a ± 1,9	7,4 a ± 2,7	6,4 a ± 1,6
	PC1	1,0 a ± 0,5	2,5 a ± 0,8	3,2 a ± 1,0	4,5 a ± 1,4
	PC2	1,8 a ± 0,8	4,0 a ± 1,3	4,9 a ± 1,5	6,2 a ± 3,2
	PB1	2,0 a ± 1,2	4,6 a ± 1,5	6,7 a ± 1,6	6,7 a ± 1,6
	PB2	1,5 a ± 0,5	4,3 a ± 1,6	5,3 a ± 2,0	6,1 a ± 1,2
	PB3	1,6 a ± 1,5	2,6 a ± 0,9	4,4 a ± 2,9	4,3 a ± 1,2

Generell waren die Unterschiede in der Mohnblattfläche zwischen den Varianten 2019 stärker ausgeprägt als 2020, jedoch schien 2020 die Variante PC1 die geringste Blattfläche auszubilden. Der BFI des Mohns aus PC1 zeigte durchgängig die niedrigsten Werte mit einem Maximum von 3,2 zur Blüte, wohingegen die übrigen Varianten zu diesem Zeitpunkt Werte über 4,0 aufwiesen. Diese Tendenz wurde auch in der Biomasse sowie der Höhe des Mohns deutlich, die für PC1 auch eher niedrig ausfiel. Trotzdem war dieser Effekt nur andeutungsweise zu sehen und nicht signifikant, deutet aber daraufhin, dass in diesem Jahr der früh gesäte Weißklee eine dominantere Wirkung als in den übrigen Jahren und zumindest einen leichten Einfluss auf das Mohnwachstum hatte.

»» Insgesamt wurde die Blattfläche des Mohns von beiden Untersaaten beeinflusst, was bedeutet, dass mit dem Misanbau auf eine Maximierung des Mohn-BFIs verzichtet werden muss. Die Konkurrenz um Licht war im Misanbau mit dem Weißklee vermutlich geringer.

Sommergerste

Die Entwicklung der Blattflächenindizes der Sommergerste ist in Tab. 6 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Mohnblattflächen wurden die BFI Werte der Sommergerste in Abhängigkeit der Mohn- sowie der Gersten-BBCH-Stadien dargestellt.

Der Blattflächenindex der Sommergerste lag in der Mischung meist niedriger als in Reinsaat und erhöhte sich mit zunehmender Saatstärke.

Der größte Unterschied zwischen 2019 und 2020 zeigte sich darin, dass durch den früheren Saattermin der Sommergerste im Jahr 2019 auch deren Entwicklung zum jeweiligen Mohn-BBCH-Stadium deutlich weiter fortgeschritten war als 2020. Dies drückte sich bereits durch die Trockenmasse- und die Höhenentwicklung aus, die 2019 deutlich früher einsetzte als in den übrigen Jahren. Beispielsweise wurde 2019 ein maximaler BFI zwischen Entwicklungsstadium 33 und 49 der Sommergerste erreicht, während der Mohn in BBCH 51 – 59 war. Im Vergleich dazu gelangte 2020 die Sommergerste ins Entwicklungsstadium 30 erst zu BBCH 69 (Ende der Blüte) des Mohns.

Die Blattfläche der Sommergerste in Mischung war tendenziell in beiden Jahren geringer als in Reinsaat. Der Unterschied zwischen Mischung und Reinsaat wurde zu BBCH 30 (Sommergerste) in 2020 besonders deutlich, da die BFI-Werte der Mischungen zwischen 0,8 und 1,8 lagen, wohingegen in der Reinsaat Werte zwischen 2,4 und 3,5 erreicht wurden. Der höchste BFI wurde 2019 zum BBCH 33 in der Variante B3 (4,2) gemessen im Vergleich zu 2,0 in der Variante PB1 zu diesem Zeitpunkt. Da im Jahr 2020 zum Ende der Messungen (Mohn BBCH 69) die Sommergerste erst in Entwicklungsstadium 30 war, lagen die BFI-Werte bei maximal 3,5 (B2). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass diese sich im weiteren Wachstum noch etwas erhöhten.

Dass 2019 keine signifikanten Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischung auftraten, lässt sich anhand der Dominanz der Sommergerste in der Mischung erklären. Wie aus den Biomasse- und Höhenmessungen ersichtlich, gelang es dem Mohn in diesem Jahr nicht, sich in der Mischung mit Sommergerste zu etablieren. Die größere Konkurrenzkraft der Sommergerste zeigte sich dann auch in der Blattfläche, die in der Mischung mit Mohn kaum geringer war als in Reinsaat. Grundsätzlich kann Sommergerste BFI-Werte von bis zu 4,5 erreichen, in einem Vergleich zwischen konventionellem und Low-Input-Anbau lagen die Werte des letzteren jedoch bei maximal 2⁶⁵. Als Low-Input-System wurde in der zitierten Studie der Verzicht auf Düngung und Pestizide bezeichnet.

Demzufolge befinden sich die in Mischung ermittelten BFI-Werte des vorliegenden Feldversuchs eher auf vergleichbarem Niveau mit dem des genannten Low-Input-Systems, was in diesem Fall durch die Konkurrenz mit dem Mohn verursacht wurde. Die Reinsaaten lassen sich jedoch mit Maximalwerten über 3 mit einem gewöhnlichen konventionellen Sommergerstenbestand vergleichen.

Die Saatstärke der Sommergerste hatte auch einen Einfluss auf den BFI, der wiederum 2019 nur tendenziell und 2020 signifikant messbar wurde. Mit höherer Saatstärke, also auch höherer Anzahl Pflanzen auf dem Feld, erhöhte sich der Blattflächenindex sowohl in Reinsaat als auch in der Mischung, was in der Literatur ebenfalls festgestellt wurde⁷⁰. Diese Ergebnisse zeigen auch das gegenteilige Verhältnis zur Mohnblattfläche, die mit abnehmender Sommergerstensaatsstärke zunahm. Als signifikantes Beispiel kann BBCH 22 aus dem Jahr 2020 gelten, da dort B3 einen signifikant höheren BFI von 0,9 gegenüber B1 und den Mischungsvarianten ($\leq 0,6$) zeigte. In der Mischung wurde dies weniger stark deutlich, grundsätzlich zeigte aber in beiden Jahren die Variante PB1 die geringsten Blattflächen.

Tab. 6 Blattflächenindizes (BFI) von Sommergerste in Reinsaat (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) sowie in Mischung mit Sommermohn (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (BBCH) des Mohns am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Jahr	Variante/BBCH	Blattfläche der Sommergerste zum jeweiligen Entwicklungsstadium (BBCH)			
		30	51	59	77
2019	BBCH Mohn	30	51	59	77
	BBCH Sommergerste	22	33	49	75
	B1	2,2 ± 0,6 a	3,1 ± 1,5 a	3,4 ± 1,4 a	1,7 ± 0,1 a
	B2	2,7 ± 0,9 a	3,5 ± 1,2 a	3,5 ± 0,5 a	1,7 ± 0,6 a
	B3	2,4 ± 0,5 a	4,2 ± 0,8 a	4,2 ± 1,1 a	2,1 ± 0,6 a
	PB1	1,3 ± 0,7 a	2,0 ± 0,4 a	2,3 ± 0,5 a	1,2 ± 0,6 a
	PB2	1,8 ± 0,6 a	3,3 ± 1,0 a	2,9 ± 0,6 a	1,4 ± 0,2 a
	PB3	1,7 ± 0,5 a	3,5 ± 1,2 a	3,8 ± 1,0 a	1,5 ± 0,4 a
2020	BBCH Mohn	30	51	60	69
	BBCH Sommergerste	12	22	23	30
	B1	0,1 ± 0,0 ab	0,6 ± 0,3 bc	1,3 ± 0,1 ab	2,4 ± 0,5 ab
	B2	0,2 ± 0,1 ab	0,9 ± 0,0 ab	1,3 ± 0,1 ab	3,5 ± 0,7 a
	B3	0,2 ± 0,1 a	0,9 ± 0,1 a	1,5 ± 0,2 a	3,3 ± 0,8 a
	PB1	0,1 ± 0,0 b	0,3 ± 0,2 c	0,3 ± 0,1 d	0,8 ± 0,4 c
	PB2	0,1 ± 0,1 b	0,3 ± 0,1 c	0,6 ± 0,4 cd	1,6 ± 0,8 bc
	PB3	0,2 ± 0,1 ab	0,5 ± 0,2 c	0,9 ± 0,2 bc	1,8 ± 0,5 bc

Zusammengefasst lässt sich zur Blattfläche der Sommergerste sagen, dass diese 2019 weniger vom Mischungspartner Mohn beeinflusst wurde, sich 2020 aber signifikant höhere Blattflächen in Reinsaat als in der Mischung messen ließen.

»» Der Mischanbau führte zu verringerten Blattflächen bei der Sommergerste im Vergleich zur Reinsaat, wobei bei höherer Konkurrenzkraft (2019) diese Unterschiede deutlich geringer ausfielen. Für den Mischanbau mit Mohn sind geringere Blattflächen und Biomassen der Sommergerste vorteilhafter, da sie die Konkurrenzsituation entschärfen.

Weißklee

Die Entwicklung der Blattflächenindizes des Weißkleees ist in Tab. 7 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Mohnblattflächen wurden die BFI-Werte des Weißkleees in Abhängigkeit der Mohn- sowie der Weißklee-BBCH-Stadien dargestellt.

Insgesamt wurde deutlich, dass die früh gesäten Weißklee-Reinsaaten in beiden Jahren durchgängig die höchste Blattfläche bildeten. Zusätzlich wurde mehr Weißklee-Blattfläche in Reinsaat als in der Mischung gemessen.

Die Überlegenheit der frühen gegenüber den späteren Saatzeitpunkten wurde während der gesamten Vegetationsperiode in beiden Jahren deutlich. So lagen 2019 die BFIs der Variante C1 durchgängig signifikant über denen der Variante PC2 und von BBCH 51 des Mohns bis zur Ernte ebenfalls signifikant über denen von C2. Zur Ernte erreichten die früh gesäten Varianten 2019 BFI-Werte zwischen 1,2 und 2,4, wohingegen die später gesäten Weißkleevarianten BFI-Werte zwischen 0,6 und 1,9 annahmen. 2020 begann der zweite Saatzeitpunkt erst zur Blüte des Mohns so zu wachsen, dass eine Messung der Blattfläche erfolgen konnte. Dadurch waren die BFI Werte der Variante C1 durchweg signifikant höher als die von C2 und PC2 mit einem Wert von $4,4 \pm 1,7$ gegenüber $0,1 \pm 0,0$ (PC2) und $0,4 \pm 0,2$ (C2) zur Ernte. In der Variante PC1 lag der BFI bei $2,0 \pm 0,7$. In der Literatur wurden maximal erreichbare BFI-Werte für Weißklee von 5,5 determiniert⁷¹. Somit war nur C1 aus dem Jahr 2020 in der Lage, einen annähernd hohen Wert zu erreichen, was bedeutet, dass die übrigen Varianten durch den verspäteten Saatzeitpunkt oder die Mischsaat deutlich geschwächt wurden.

Es ließen sich demzufolge sowohl Unterschiede in der Weißklee-Blattfläche zwischen den Saatzeitpunkten als auch Differenzen zwischen Reinsaat und Mischsaat feststellen. Beispielsweise konnten zur Ernte 2019 C1 (2,4) und C2 (1,9) die tendenziell größeren BFI-Werte aufweisen als PC1 (1,2) und PC2 (0,6). Die sehr geringen BFI-Werte des zweiten Saatzeitpunkts von 2020 zeichnen das geringe Wachstum nach, was auch schon in der Weißklee-Biomasse dokumentiert wurde.

Somit ergaben sich hier zwar durchgängig signifikante Unterschiede zu C1, aber keine signifikanten Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischsaat. Diese traten jedoch ähnlich wie 2019 zwischen C1 und PC1 auf.

Die Entwicklung der Blattflächen des Weißklee zeigt, dass die Bodenbedeckung durch die Blattfläche eher bei den früh gesäten Weißkleevarianten eine Rolle spielte, was auch von den Biomassedaten gestützt wird. Des Weiteren wird die hohe Konkurrenzkraft des Mohns ersichtlich, die sich in den reduzierten BFI-Werten des Weißklee aus der Mohn-Weißklee Kombination spiegelt. Die stark negative Reaktion der Weißklee-Blattfläche aus der Mohn-Weißklee-Mischung ist damit zu erklären, dass die Blattflächenbildung des Weißklee stark von der zur Verfügung stehenden Lichtenergie abhängt, deren Verfügbarkeit wiederum durch die hoch wachsenden Mohnpflanzen eingeschränkt wird⁷¹. Ebenso führt Wassermangel bei Weißklee zu reduzierter Blattflächenausbildung⁷², weshalb die Konkurrenz mit dem Mohn um diese Ressource ebenfalls zu geringeren BFI-Werten in der Mischung beigetragen haben könnte.

Tab. 7 Blattflächenindizes (BFI) von Weißklee in Reinsaat zu zwei Aussaatzeitpunkten (C1, C2) sowie in Mischung mit Sommermohn (PC1, PC2) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (BBCH) des Mohns am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Jahr	Variante/BBCH	Blattfläche des Weißklee zum jeweiligen Entwicklungsstadium (BBCH)			
		30	51	69	77
2019	BBCH Mohn	30	51	69	77
	BBCH C1	3	4	6	7
	BBCH C2	1	3	4	5
	C1	0,30 ± 0,14 a	1,78 ± 0,34 a	1,96 ± 0,62 a	2,42 ± 0,64 a
	C2	0,14 ± 0,04 ab	0,89 ± 0,29 b	1,31 ± 0,29 ab	1,88 ± 0,30 ab
	PC1	0,12 ± 0,06 ab	0,49 ± 0,26 bc	0,82 ± 0,52 bc	1,24 ± 0,36 bc
	PC2	0,07 ± 0,06 b	0,32 ± 0,06 c	0,27 ± 0,15 d	0,55 ± 0,14 c
	2020	BBCH Mohn	30	51	69
BBCH C1		3	4	6	7
BBCH C2		1	3	4	5
C1		0,24 ± 0,12 a	1,21 ± 0,81 a	2,07 ± 1,31 a	4,36 ± 1,72 a
C2				0,11 ± 0,05 b	0,40 ± 0,16 b
PC1		0,23 ± 0,08 a	0,37 ± 0,25 a	1,53 ± 0,10 ab	2,05 ± 0,73 b
PC2				0,03 ± 0,02 b	0,05 ± 0,01 b

Es ließ sich also insgesamt feststellen, dass die Blattfläche der einzelnen Kulturen ähnliche Verhältnisse wie die Biomasse aufwies. Die Blattfläche des Mohns wurde vom Weißklee tendenziell nur von der frühen Aussaat negativ beeinflusst und höhere Saatstärken der Sommergerste schmälerten den BFI des Mohns ebenfalls tendenziell.

Die Blattfläche der Sommergerste war ebenfalls in der Mischung mit Mohn niedriger als in Reinsaat. Auch erreichten höhere Saatstärken der Sommergerste höhere Sommergersten-BFI-Werte, was die rückläufigen Mohn Blattflächen in diesem Zusammenhang erklärte.

»» Um den Mohn-BFI zu maximieren, erscheinen daher nur die Reinsaat oder die Mischung mit später Weißkleeaussaat geeignet. Da die späte Weißkleeaussaat jedoch aufgrund mangelnden Wachstums kaum vorteilhaft war, wäre es trotzdem zu überlegen, Mohn in Kombination mit biomassereicheren (frühe Weißkleeaussaat), aber auch ertragsstärkeren Kulturen (Sommergerste) anzubauen, da insbesondere letztere zwar zu einer Konkurrenzsituation beitragen, jedoch insgesamt die Flächenproduktivität erhöhen können.

Über Messungen wie Biomasse, Pflanzenhöhe und Blattfläche konnten Hinweise auf die Konkurrenzeffekte zwischen den Mischungspartnern gewonnen werden, die sich insbesondere um die Ressourcen Wasser und Licht drehten. Um die Konkurrenz um Nährstoffressourcen genauer zu beurteilen, wurden der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt in der Biomasse sowie die Stickstoffversorgung des Bodens analysiert.

5.2 Nährstoffversorgung

5.2.1 Stickstoff und Kohlenstoff in der Pflanze

Sommermohn – Stickstoff

Die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte im Pflanzenmaterial des Mohns veränderten sich in den Untersuchungsjahren stets nach demselben Muster, in dem die Stickstoffgehalte kontinuierlich über den Vegetationszeitraum ab- und die Kohlenstoffgehalte zunahmen (Abb. 6). Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in den Tab. A10 – A12 im Anhang.

Der Stickstoffgehalt des Mohns nahm im Vegetationsverlauf ab. Die Mohn-Reinsaat und die Mischungen mit Weißklee wiesen tendenziell höhere N-Gehalte auf als die Mischungen mit Sommergerste.

Die Abnahme des Stickstoffgehalts im Verlauf der Vegetationsperiode ist ein übliches Phänomen, beispielsweise wird in einer Studie zu Nährstoffentzügen des Mohns angegeben, dass der Blatt-Stickstoffgehalt der Mohnpflanzen zur Samenreife hin nur noch 54% des initialen Gehalts betrug¹⁷. Dieser Vorgang kann größtenteils durch die zunehmende N-Akkumulation in den Samen erklärt werden^{17,20}. Unabhängig davon schwankte der initiale N-Gehalt zwischen den Jahren und Varianten.

2018 lagen die anfänglichen Stickstoffgehalte zum BBCH 14 zwischen 3,00% und 3,40% und somit alle Varianten eher nah beieinander. Im weiteren Verlauf blieben PB2 und PB3 die Varianten mit den niedrigsten Stickstoffwerten, der Unterschied wurde allerdings nur zu BBCH 51 signifikant, da zu diesem Zeitpunkt die Mohn-Reinsaat mehr Stickstoff ($2,38\% \pm 0,15\%$) als der Mohn aus PB3 ($1,66\% \pm 0,14\%$) aufwies. Ähnlich dazu lagen die anfänglichen N-Gehalte 2020 zwischen 3,53% und 3,84% ohne signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.

Eine größere Diskrepanz in den Ausgangs-Stickstoffgehalten wurde 2019 gemessen. Schon zur ersten Bonitur (BBCH 16) wurde signifikant mehr Stickstoff in der Variante PC2 ($4,37\% \pm 0,48$) gegenüber PB3 ($2,49\% \pm 1,00\%$) festgestellt, und die übrigen Varianten waren dazwischen angesiedelt. Die Stickstoffgehalte von zur Opiumproduktion genutzten Mohnpflanzen wurden im Bereich von 4,76% – 4,93% im Blattrosettenstadium angegeben, die bis zur Blüte auf 1,83% – 2,47% in Abhängigkeit von der N-Düngung abnahmen¹⁹. Gegenüber anderen, nicht-legumen Pflanzen sind N-Gehalte von über 4% als relativ hoch einzustufen. Beispielsweise lag der N-Gehalt von Weidelgras, das mit Weißklee in Mischung angebaut wurde, 55 Tage nach Aussaat bei 3,07%⁵¹. Höhere N-Gehalte können auch von einer N-Düngung zum Zeitpunkt des Schossens herrühren²⁰. Die Düngung erfolgte in diesem Versuch mit 30 kg N ha⁻¹ Hornmehl zwar etwas früher, der Zeitpunkt der Umsetzung kann sich jedoch aufgrund der Wahl eines Feststoff-Düngemittels verzögert haben.

Aufgrund der niedrigen N-Dosis des Düngers war dessen Wirkung vermutlich begrenzt. Die Abnahme im Stickstoffgehalt war im vorliegenden Versuch weniger stark als bei Lošák and Richter (2004), und die Varianten glichen sich im Vegetationsverlauf immer mehr an. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Stickstoffversorgung vor allem zu Beginn der Wachstumsperiode entscheidend war.

Insbesondere 2019 wurde ein starker Unterschied im Stickstoffgehalt zwischen Reinsaat und Misanbau mit Weißklee gegenüber dem Misanbau mit Sommergerste festgestellt. Diese Unterschiede nahmen im Vegetationsverlauf ab, sodass sie ab BBCH 77 nicht mehr signifikant waren. Derselbe Trend ließ sich auch 2018 nachvollziehen, sodass insgesamt in beiden Jahren klar wird, dass die Konkurrenz um Stickstoff in der Mohn-Sommergersten-Kombination stärker war als in der Mohn-Weißklee-Mischung. Weißklee ist in der Lage, atmosphärischen Stickstoff durch die mit ihm in Symbiose lebenden Wurzelknöllchenbakterien zu fixieren, sodass er weniger auf den Bodenvorrat an Stickstoff angewiesen ist⁵¹. Der Mohn profitiert möglicherweise nicht direkt von der Stickstoff-Fixierung durch den Weißklee, da der N-Transfer meist erst für die Nachfrucht relevant ist³⁵, aber die Konkurrenz um den Stickstoff aus dem Boden ist durch diese alternative N-Quelle des Weißklees geringer.

Die geringere Konkurrenz ergab sich vermutlich auch durch die geringere Biomasse des Weißklees im Vergleich zur Sommergerste, sodass der Gesamtbedarf an Stickstoff in den Mohn-Weißklee-Varianten geringer ausfiel. Durch die Besetzung unterschiedlicher ökologischer Nischen in der N-Nutzung³⁰, ließ sich ein Wachstums- und somit Ertragsvorteil der Mohn-Weißklee-Mischung im Vergleich zur Mohn-Sommergerste-Kombination eher ermöglichen.

2020 wurden kaum Unterschiede zwischen der Mohn-Reinsaat und den verschiedenen Mischungsvarianten ermittelt. Eine Ausnahme bildete der Zeitpunkt Ende der Blüte (BBCH 69), zu dem der Mohn aus PC2 signifikant höhere N-Gehalte ($2,78\% \pm 0,57\%$) als PB1 und PB2 ($1,97\% - 2,00\%$) aufwies. Insgesamt war die Abnahme des Stickstoffs in allen Varianten geringer als in den vorherigen Jahren, sodass vor der Ernte noch über 1,95% N im Pflanzenmaterial analysiert wurden. Somit wurden 2020 keine Konkurrenzeffekte anhand der Stickstoffakkumulation in den Pflanzen sichtbar.

Sommermohn – C/N

Um den Nährstoffstatus und die Wuchskraft von Pflanzen zu beurteilen, ist die Bestimmung des Verhältnisses von Kohlenstoff zu Stickstoff hilfreich, um Einsicht in die Nährstoffbalancen der Pflanze zu erhalten⁷³.

Das C/N-Verhältnis der Mohnpflanzen entwickelte sich entgegengesetzt zum Stickstoff-Gehalt und stieg bis BBCH 65 (2018) bzw. 77 (2019) und 60 (2020) auf maximal 33,38% kontinuierlich an, blieb anschließend auf einer Plateauphase oder zeigte sogar einen leichten Rückgang (Abb. 6).

Die höchsten C/N Verhältnisse wurden 2018 zum BBCH 65 ermittelt mit 26,84 und 25,14 für PB3 und PB2. Obwohl signifikante Unterschiede 2018 nur zum BBCH 51 bestanden, war eine deutliche Tendenz zu weiteren C/N-Verhältnissen in den Mohn-Sommergerste-Varianten im Vergleich zu Mohn-Reinsaat und Mohn-Weißklee-Mischungen zu fast jedem Zeitpunkt erkennbar. 2019 waren die Unterschiede zwischen PB1, PB2, PB3 und P, PC1, PC2 dagegen bis zum BBCH 59 signifikant. Die höchsten C/N-Verhältnisse wurden in diesem Jahr zu BBCH 77 gemessen mit Werten zwischen 30,54 und 33,38 (PB1, PB2 und PB3) im Vergleich zu 23,91– 26,33 (P, PC1 und PC2).

Eine Erklärung für die steigenden C/N-Verhältnisse, die sich gegenläufig zum N-Gehalt verhielten, kann im Anstieg des Kohlenstoffgehalts gefunden werden, der in allen Jahren ähnlich war (s. Tab. A10 – A12). Daher lassen sich die Unterschiede, die im N-Gehalt ermittelt wurden, auch im C/N-Verhältnis abbilden. Grundsätzlich ist der Anstieg des C/N-Verhältnisses im Laufe der Vegetationszeit eine Folge der vermehrten Bildung von strukturreichem, kohlenstoffreichem Material in der Pflanze, was einen verdünnenden Effekt auf die übrigen Nährstoffe, wie Stickstoff, hat⁷⁴.

Demzufolge zeigten C/N-Verhältnis und Stickstoff-Gehalt von 2018 und 2019, dass Stickstoff ein limitierender Faktor im Mohn-Sommergerste-Gemenge sein kann. Die Mohnpflanzen in der Mischung mit Weißklee wiesen stets ähnliche N-Gehalte und C/N-Verhältnisse im Vergleich zur Mohn-Reinsaat auf, was verdeutlicht, dass sie in der Lage waren trotz Anwesenheit einer Co-Kultur ausreichend Stickstoff aufzunehmen. Grundsätzlich stärkt dies die Aussage, dass die Konkurrenzeffekte in Mischung mit Weißklee geringer ausfielen als in Mischung mit Sommergerste, was bereits durch die Messungen von Trockenmasse, Pflanzenhöhe und Blattfläche bestätigt wurde.

»» Insgesamt war der Einfluss der Zweitfrucht und des Anbaujahres auf Stickstoff und Kohlenstoff deutlich größer als die Unterschiede, die sich aufgrund unterschiedlicher Saatzeitpunkte oder Saatstärken der Mischungspartner ergaben. Geringere N-Gehalte und weitere C/N-Verhältnisse in den Varianten mit Sommergerste deuten auf eine Konkurrenzsituation um Stickstoff insbesondere zu Beginn der Vegetationsperiode hin. Zusätzlich zeigten die Mohnpflanzen in Kombination mit der höchsten Sommergersten-Saatstärke auch tendenziell die niedrigsten N-Gehalte und weitesten C/N-Verhältnisse.

In einem Experiment von Liebmann (1986) führte die Mischung von Senf und Gerste zu geringeren N-Konzentrationen in den Blättern des Senfs, während in der Kombination von Senf und Erbse kein solcher Effekt bewiesen werden konnte⁷⁵. Vergleichsweise beeinflusste die Sommergerste teilweise den Stickstoffgehalt in der Mohnpflanze, wohingegen der Weißklee, die Leguminose, dies nicht tat. Dies deutet daraufhin, dass die Konkurrenz zwischen den Kulturen verringert werden kann, wenn geringere Saatstärken der Sommergerste gewählt werden, oder fast vollständig vermieden werden kann, indem Weißklee als Mischungspartner ausgewählt wird. Alternativ könnte eine höhere Stickstoffdüngung eine Möglichkeit darstellen, den Mohn in der Konkurrenz zur Sommergerste zu stärken. Dies muss jedoch vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass die in dem Experiment eingesetzte Sommergerstensorte 'Laureate' eine Braugerste ist, bei der hohe Proteingehalte, bedingt durch zu viel Stickstoff, für den Brauvorgang unerwünscht sind. Es könnte aber durchaus sein, dass unter Bodenverhältnissen mit geringerer N-Versorgung diese Problematik deutlich schwächer ausgeprägt und eine N-Düngung trotzdem sinnvoll ist.

Im Allgemeinen scheint der N-Bedarf des Mohns insbesondere in den frühen Wachstumsphasen am höchsten zu sein, was durch die Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischungen mit Sommergerste zu Beginn des Wachstums 2018 und 2019 verdeutlicht wurde, die sich bis zur Kapselreife verringerten. Dass sich 2020 die N-Gehalte jedoch kaum zwischen den Varianten unterschieden, deutet daraufhin, dass N nicht immer der limitierende Wachstumsfaktor war.

»» In Kombination mit Sommergerste kann es zu erhöhter Konkurrenz um Stickstoff kommen, weshalb eine ausreichende N-Verfügbarkeit gewährleistet sein muss, wohingegen in der Kombination mit Weißklee am Standort Klein-Altendorf in allen drei Jahren keine Konkurrenz um Stickstoff nachgewiesen werden konnte. Daher sind geringere Sommergersten-Saatstärken oder die Wahl einer niedrig wachsenden Leguminose für eine verminderte Konkurrenz um Stickstoff vorzuziehen.

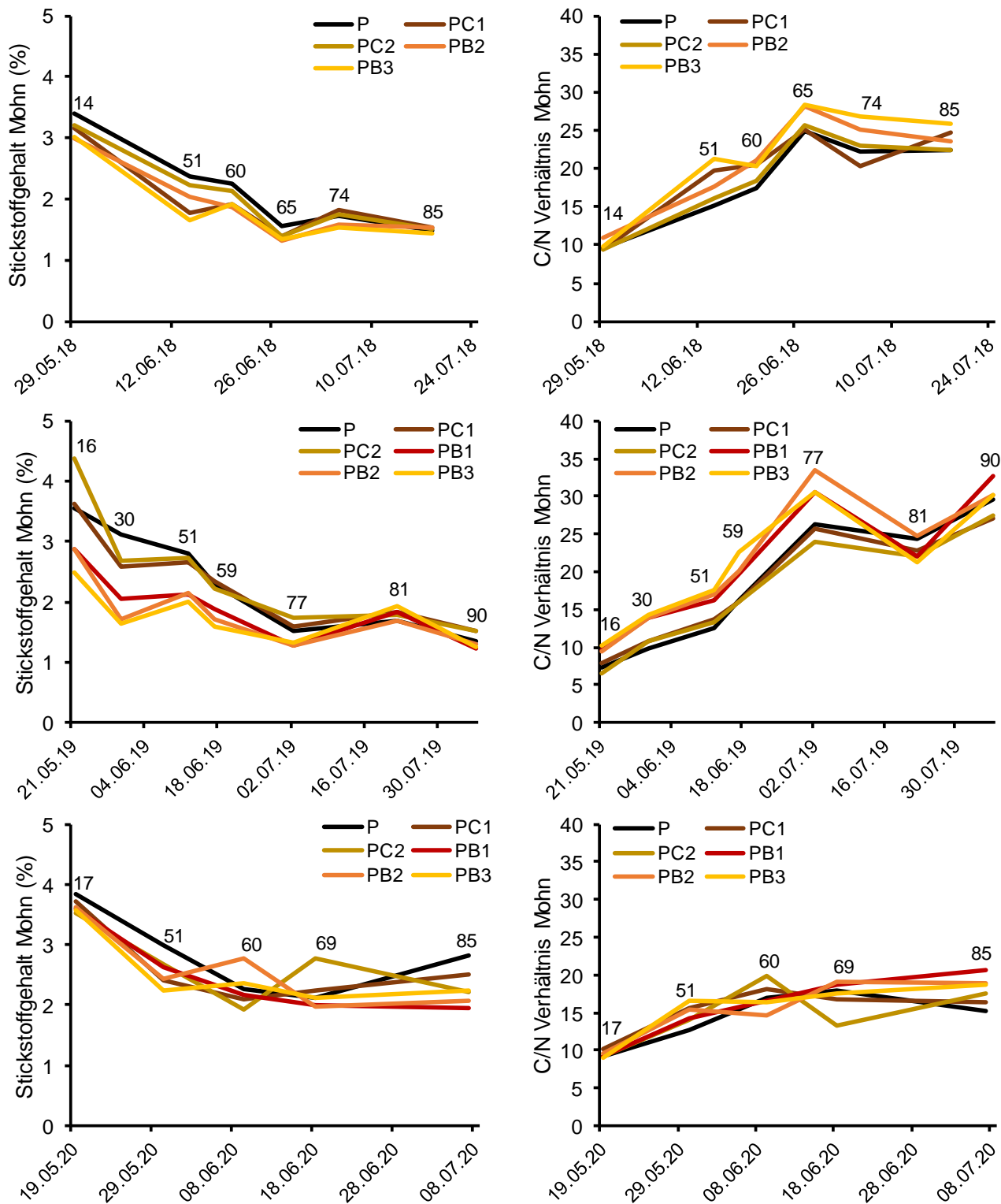


Abb. 6 Stickstoffgehalt (%) und C/N-Verhältnis der Sommermohnpflanzen in Reinsaat (P) sowie in Mischsaat mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1, PB2, PB3) und Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Die adaptierten Mohn-Entwicklungsstadien (BBCH) sind als zweistellige Zifferncodes in den Abbildungen zu jedem Probenahmedatum hinterlegt (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Sommergerste – Stickstoff

Die Entwicklung von Stickstoff- und Kohlenstoffgehalten der Sommergerste war ähnlich der des Mohns (Abb. 7). Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in den Tab. A10 – A12 im Anhang.

Der Stickstoffgehalt der Sommergerste nahm während der Vegetationsperiode kontinuierlich ab. Dabei zeigte die Reinsaat meist höhere Stickstoffgehalte als die Mischung mit Mohn und höhere Sommergerste-Saatstärken resultierten in tendenziell niedrigeren N-Gehalten.

Zu Beginn der Entwicklung lagen die N-Werte in der Sommergerste bei 2,35% – 5,40% und waren damit verglichen mit Mohn und Weißklee die höchsten unter den Kulturen. Die darauffolgende Abnahme des Stickstoffgehalts war in den Jahren 2018 und 2019 deutlich steiler als 2020 und resultierte in Stickstoffgehalten im Juli zwischen 1,12% und 1,73% (2018/2019), wohingegen 2020 nur eine Abnahme bis auf 2,01% – 2,45% erfolgte. Dass die Stickstoffgehalte im Laufe des Wachstums abnehmen, ist auch in der Literatur belegt und wird häufig einem Verdünnungseffekt durch schnelle Biomassebildung zugeschrieben^{65,76}.

2018 und 2020 traten die Konkurrenzeffekte mit dem Mohn hervor, die sich in höheren N-Gehalten der Sommergerste-Reinsaaten im Vergleich zum Mischanbau ausdrückten. Beispielsweise lag zu BBCH 23 in 2020 der N-Gehalt von B1, B2 und B3 zwischen 3,61% und 4,18% und war damit signifikant höher als der von PB1 und PB2 (2,62% – 3,19%). Gleichzeitig lag 2018 der Stickstoffgehalt der höheren Saatstärke (B3) auf einem geringeren Niveau als der der niedrigeren Saatstärke (B2). 2019 waren dagegen zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede zwischen den Varianten feststellbar. Dies spiegelt den Jahreseffekt, der auch für die Pflanzenwachstumsparameter (Trockenmasse, Pflanzenhöhe, Blattfläche) analysiert wurde. Durch den früheren Saatzeitpunkt in Kombination mit der feuchteren Witterung war die Sommergerste 2019 deutlich konkurrenzstärker. Infolgedessen schlugen sich die Konkurrenzeffekte um N in diesem Jahr besonders stark im Mohn, nicht aber in der Sommergerste nieder.

In den anderen beiden Jahren verdeutlichten die geringeren Stickstoffgehalte, dass es eine interspezifische Konkurrenz um den Wachstumsfaktor Stickstoff gab. Auch die intraspezifische Konkurrenz spielte eine Rolle, da unabhängig von Reinsaat oder Mischung die Sommergerste in höherer Saatstärke in beiden Jahren geringere N-Gehalte aufwies. In einem Experiment von Kostrzewska et al. (2017) wurde das Wachstum der Sommergerste in Mischung mit Weidelgras vor allem durch die Konkurrenz mit der Untersaat und durch Wassermangel begrenzt⁷⁶, was auch in dieser Studie die Haupteinflussfaktoren auf den Erfolg des Mischanbaus zu sein schienen.

Insgesamt zeichneten die Stickstoffgehalte der Sommergerste die Konkurrenzsituation mit dem Mohn nach und waren daher bei großer interspezifischer Konkurrenz in der Mischung niedriger als in der Reinsaat und bei höherer Saatstärke ebenfalls tendenziell geringer. Wären nur die N-Gehalte in der Gesamtpflanze relevant, könnten durch die Mischung sogar positive Ergebnisse erzielt werden, da geringere Proteingehalte die Braugerstenqualität erhöhen. Die in Abb. 7 gezeigten N-Gehalte wurden jedoch im gesamten Pflanzenmaterial bestimmt, wohingegen die Proteingehalte im Korn ein anderes, ebenfalls negatives Muster für die Mischungsvarianten zeigten (s. Kapitel 5.4.5.).

Sommergerste – C/N

Die C/N-Verhältnisse der Sommergerste zeigten einen stetigen Anstieg im Verlauf des Wachstums und verliefen damit gegenteilig zum Absinken des N-Gehalts. Insgesamt erreichten sie deutlich höhere Werte als Mohn oder Weißklee mit Maximalwerten von 27,43% – 44,43%.

Es ließen sich für das C/N-Verhältnis dieselben umgekehrten Tendenzen wie für den Stickstoffgehalt nachvollziehen, was sich vor allem dadurch ergab, dass keine signifikanten Unterschiede im Kohlenstoffgehalt auftraten (s. Tab. A. 10). Insofern war deutlich sichtbar, dass durch die Konkurrenz mit dem Mohn und auch durch höhere Saatstärken das C/N-Verhältnis aufgrund sinkender Stickstoffgehalte zunahm. 2020 waren die C/N-Verhältnisse insgesamt am geringsten und stiegen bis BBCH 55 auf maximal $17,54 \pm 1,42$ an. Wie auch 2018 waren die Werte der Sommergerste in der Mischung mit Mohn stets höher als in Reinsaat, beispielsweise lagen zu BBCH 23 in 2020 die C/N-Verhältnisse von PB1 ($14,66 \pm 3,02$) und PB2 ($12,64 \pm 1,80$) signifikant über denen von B1 ($8,36 \pm 0,43$). Dadurch wurden die Konkurrenzeffekte durch den Mohn sichtbar. Zusätzlich zeigten auch die hohen Saatstärken der Sommergerste die weitesten C/N-Verhältnisse.

2019 traten kaum signifikante Unterschiede zwischen den Varianten auf. Auffällig war dagegen der deutliche Anstieg der C/N Werte zum BBCH 75. Dass das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff zur Kornreife hin zunahm, lässt sich vor allem durch die Beendigung des vegetativen Wachstums und die Verlagerung von Stickstoff ins Korn erklären⁷⁷. Dass auch zu BBCH 85 relativ hohe C/N-Werte bestimmt wurden, spricht dafür, dass auch in den übrigen Jahren ein weiteres Ansteigen der C/N-Verhältnisse zu erwarten gewesen wäre.

Die C/N-Verhältnisse der Sommergerste verhielten sich insgesamt gegenläufig zu den absinkenden Stickstoffgehalten. Im konkurrenzstarken Jahr 2019 konnten daher keine Veränderungen des Stickstoff- oder Kohlenstoffgehalts durch den Mischanbau determiniert werden, diese traten jedoch 2018 und 2020 deutlicher auf und waren 2020 häufig auch signifikant.

Dass sich die Konkurrenz durch den Mohn auf die inhaltsstoffliche Zusammensetzung der Sommergerste so unterschiedlich auswirkte, zeigt, dass ein Eingriff in das Mischanbausystem durch Regulierung der Saatzeitpunkte und Saatstärken nötig ist, um die gegenseitigen Konkurrenzeffekte zu minimieren.

»» In zwei von drei Jahren führten geringere N-Gehalte im Pflanzenmaterial der Sommergerste, kombiniert mit geringerer Trockenmasse und Blattfläche, zu geringerer Konkurrenz mit dem Mohn, während hohe Werte für eine deutliche Unterdrückung des Mohnwachstums standen. Daher können im Mischanbau mit Mohn schwächere Sommergerstenpflanzen in Kauf genommen werden, da dieser durch die verminderte Konkurrenz um Stickstoff im Wachstum gefördert wird. Es gilt zu vermeiden, dass es bei einer Kombination mit grundsätzlich konkurrenzstarken Kulturen wie der Sommergerste zu hohen Nährstoffentzügen auf Kosten des Mohns kommt, beispielsweise durch große Abstände in den Aussaatterminen.

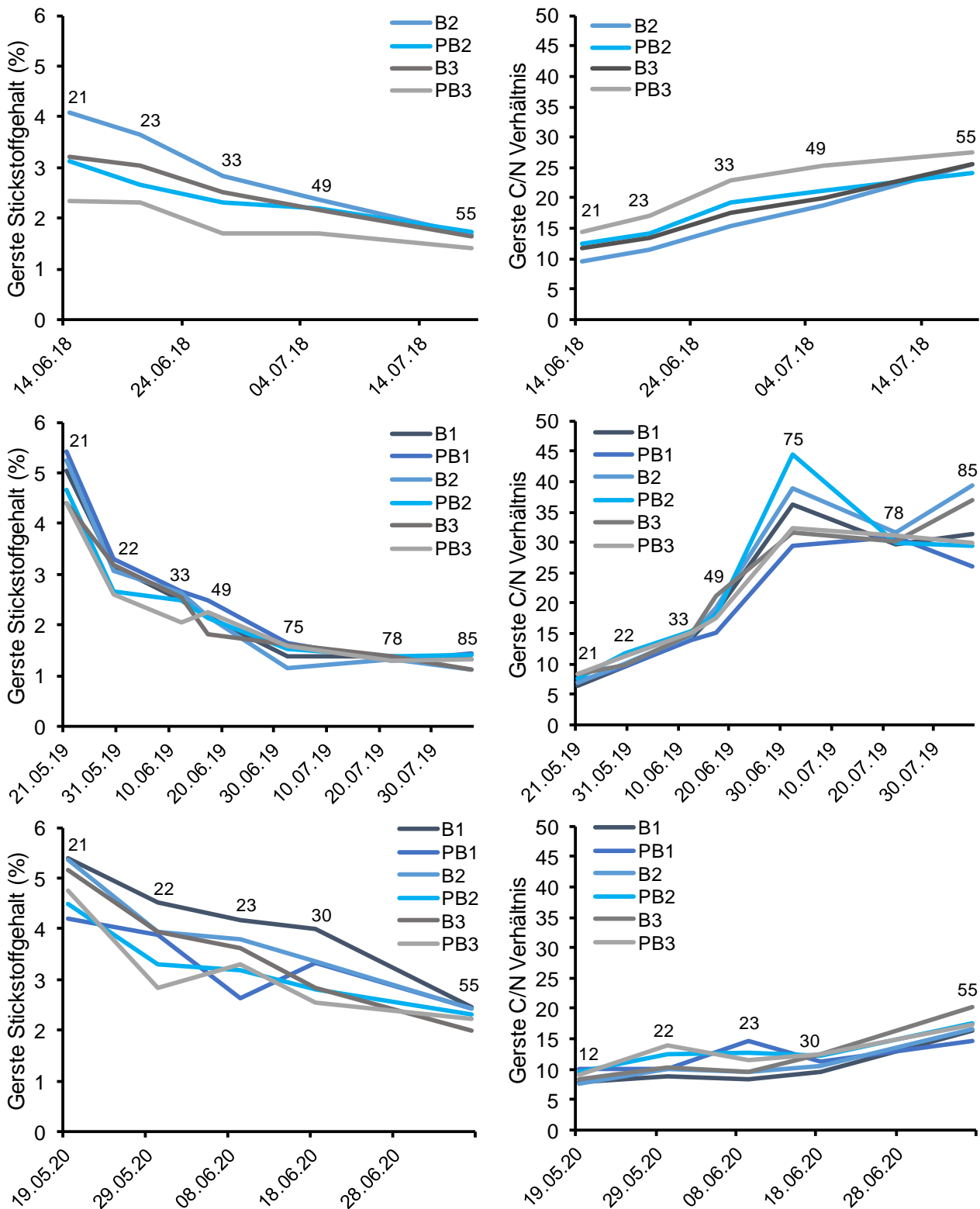


Abb. 7 Stickstoffgehalt (%) und C/N-Verhältnis der Sommergerstepflanzen in Reinsaat zu drei verschiedenen Saatstärken (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) und in Mischung mit Mohn (PB1, PB2, PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Die Ziffern über den jeweiligen Boniturtagen geben die BBCH Makrostadien der Sommergerste zu diesem Zeitpunkt an (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Weißklee – Stickstoff

Im Gegensatz zum Mohn und zur Sommergerste zeigten die Stickstoffgehalte im Weißklee kaum eine Reduktion im Vegetationsverlauf. Die initialen N-Werte lagen zwischen 2,39% und 3,48% und betrugen zur Ernte 1,13% – 4,19%. Eine Reduktion im N-Gehalt war nur 2018 erkennbar (Abb. 8). Die Veränderung des Stickstoffgehalts zeigte in jedem Jahr ein leicht unterschiedliches Muster zwischen den Varianten. Standardabweichungen und Signifikanzen finden sich in den Tab. A10 – A12 im Anhang.

Der Stickstoffgehalt des Weißklee sank nur minimal im Vegetationsverlauf ab. Grundsätzlich tendierten die in Reinsaat gesäten Weißkleepflanzen zu höheren N-Gehalten als die Mischvarianten mit Mohn, sodass ein deutlicher Konkurrenzeffekt sichtbar wurde.

Weißklee in Mischung mit Weidelgras entwickelte in einem Experiment von den Hollander et al. (2007) zwar deutlich mehr Biomasse in der Reinsaat, jedoch mit 2,72% nur geringfügig weniger Stickstoff als im Gemenge (2,86%, 55 Tage nach Aussaat)⁵¹. Das Niveau dieser Stickstoffgehalte im Weißklee war ähnlich zu den 2018 – 2020 ermittelten Gehalten von 2,41% – 3,63% für C1 zu einem vergleichbaren Zeitpunkt. Etwa 55 Tage nach Aussaat wurden im Gegensatz dazu im Weißklee C2 1,13% – 4,19% N ermittelt, was deutlich variabler war und auf die sehr unterschiedliche Entwicklung der C2-Varianten in den drei Versuchsjahren hinweist.

2018 und 2020 fielen Unterschiede zwischen den Saatzeitpunkten auf, außerdem ergaben sich Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischbau insbesondere bei später Weißkleeaussaat. So wies beispielsweise die Variante C2 Ende Juni 2018 (BBCH 5/4, s. Abb. 8) einen Stickstoffgehalt von 3,92% ± 0,38% auf, was über den Gehalten von C1, PC1 und PC2 (2,91% – 3,00%) lag. Auch im Jahr 2020 war der N-Gehalt der Variante C2 stets signifikant größer als der der übrigen Varianten. Dagegen traten zwischen Reinsaat und Mischung der frühen Weißkleesaat keine messbaren Unterschiede auf.

Die Hauptklärung für die deutlichen Unterschiede zwischen früh und spät gesättem Weißklee sowie Mischbau und Reinsaat lag in beiden Jahren in den versetzten Saatzeitpunkten und den dadurch ungünstigeren, durch geringeren Niederschlag und höhere Lichtkonkurrenz gekennzeichneten Wachstumsbedingungen für den spät gesäten Weißklee. Die Keimung von Weißklee wird unter trockenen und warmen Bodenbedingungen stark gehemmt⁷⁸, weshalb der Mangel an Bodenwasser ein limitierender Wachstumsfaktor zu sein schien und insbesondere in den Parzellen mit Mohn zu höherer Konkurrenz um diese Ressource führte. Dadurch kamen sowohl der Effekt des Saatzeitpunktes als auch der Konkurrenzeffekt durch die Mischung zum Tragen.

Die überdurchschnittlich hohen Stickstoffgehalte der C2-Variante lassen sich am ehesten dadurch erklären, dass der Weißklee aufgrund des verspäteten und langsamen Wachstums noch wenig verholzt war und viel junge Blattmasse hatte, die generell höhere N-Gehalte aufweist⁷⁹.

Die N-Gehalte im Weißklee zeigten 2019 die geringsten Schwankungen und erreichten nach zwischenzeitlichem Abfall gegen Ende der Vegetationsperiode wieder ähnliche N-Gehalte wie anfangs. Ab Mitte Juni (BBCH 5/4) enthielten die Weißklee-Reinsaaten mehr Stickstoff als die jeweiligen Mischungen. Beispielsweise betrug der N-Gehalt von C1 und C2 zu BBCH 7/6 2,68% und 2,62%, was jeweils signifikant mehr war als 2,22% (PC1) und 2,18% (PC2). Die Diskrepanz zwischen den Mischbauvarianten und der Reinsaat war in diesem Jahr demzufolge größer als die Unterschiede, die sich durch die verschiedenen Saatzeitpunkte ergaben. Dies lag unter anderem daran, dass der Saatzeitpunkt des späten Weißklee mit Ende April innerhalb der drei Jahre der früheste unter den C2-Saatterminen war. Der C2-Weißklee konnte in diesem Jahr einen bodenbedeckenden Bestand erzeugen und gelangte, ähnlich wie C1, erst in der Konkurrenz mit dem Mohn in eine Mangelsituation an Nährstoffen, Licht und Wasser.

Weißklee – C/N

Die C/N-Verhältnisse im Weißklee wiesen ein unregelmäßiges Muster auf und unterschieden sich stark zwischen den Jahren. Die Weißkleepflanzen in Mischung mit Mohn tendierten zu erhöhten C/N-Verhältnissen.

2018 und 2019 gab es einen deutlichen Anstieg der C/N-Verhältnisse in allen Varianten bis Anfang Juli (BBCH 6/5) auf maximal $20,49 \pm 7,76$ (PC1 2018) bzw. $17,64 \pm 1,68$ (PC1 2019). Im Gegensatz dazu blieben die C/N-Verhältnisse 2020 während des gesamten Zeitraums auf einem relativ gleichmäßigen Niveau zwischen 6,86% und 13,28%. Umgekehrt zu den Stickstoffgehalten zeigten hier häufig die Weißkleepflanzen in Mischung mit Mohn die höheren C/N-Verhältnisse. Ebenso wie beim Mohn lässt sich dies hauptsächlich dadurch erklären, dass die Unterschiede im N-Gehalt sich auch im C/N-Verhältnis widerspiegeln. Dass die C/N-Verhältnisse sich hauptsächlich aufgrund der N Dynamik und weniger durch schwankende Kohlenstoffgehalte ändern, wurde auch in der Literatur gezeigt^{73,80} und wird durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt.

Der Kontrast zwischen Mischung und Reinsaat war im C/N-Verhältnis noch deutlicher sichtbar als nur im Stickstoffgehalt. In allen drei Jahren zeigten sich von BBCH 5/3 (2018), 3/1 (2019 bzw. 4/3 (2020) signifikante Unterschiede im C/N-Verhältnis, bei denen die Mischungsvarianten stets weitere C/N-Verhältnisse aufwiesen als die Reinsaaten.

2019 glichen sich die Verhältnisse jedoch bis zur Mohnernte soweit an, dass sich keine der Varianten mehr signifikant voneinander unterschied. 2019 traten zudem keine signifikanten Unterschiede im Kohlenstoffgehalt der Weißkleepflanzen auf, sodass das C/N-Verhältnis sehr exakt die Verläufe im Stickstoffgehalt wiedergab.

Das C/N-Verhältnis in den Mohnpflanzen in Mischung mit Weißklee unterschied sich nicht von dem in der Reinsaat. Dagegen gab es Unterschiede im C/N Verhältnis der Weißkleepflanzen in der Mischung im Vergleich zur Weißklee-Reinsaat, was verdeutlicht, dass in der Konkurrenz um die Ressource Boden-Stickstoff der Mohn konkurrenzstärker war. Zwar ist der Weißklee auch in der Lage Luftstickstoff zu nutzen, die Stickstoff-Fixierung von Leguminosen reduziert sich jedoch unter Wassermangel^{81,82}. Daher hatte in diesem Fall eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit auch eine eingeschränkte Nährstoffakkumulation zur Folge.

Der Peak in den C/N-Verhältnissen zum BBCH 6/5 sowohl 2018 als auch 2019 lässt sich nicht allein durch sinkende N-Gehalte erklären, da deren Abfall deutlich geringer ausfiel als der Anstieg des C/N-Verhältnisses. Luo et al. (2017) fanden für chinesische Graslandschaften heraus, dass mit steigender Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit die Wachstumsraten der Pflanzen stark anstiegen und sich durch die erhöhte Biomassebildung ein Verdünnungseffekt des Stickstoffs einstellte, der in höheren C/N-Verhältnissen mündete⁸⁰. Im Falle des Weißklees fand vegetatives Wachstum bis zur Blüte (BBCH 6) statt, weshalb sich auch die steigenden C/N-Verhältnisse bis zu diesem Zeitpunkt so erklären lassen. Dadurch, dass 2020 im Vergleich zu 2018 und 2019 kein deutlicher Peak zu BBCH 6/5 gemessen wurde, scheint die hohe Fluktuation in der inhaltsstofflichen Zusammensetzung des Weißklees jedoch primär von Umweltbedingungen beeinflusst zu sein. Dass die Verhältnisse von Kohlenstoff zu Stickstoff in den spät gesäten Varianten eher zugunsten höherer N-Gehalte ausfielen, lässt sich wiederum auf die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Weißklee-Saatzeitpunkte zurückführen, wodurch der früh gesäte Weißklee einen Wachstumsvorsprung hatte, der sich in weiteren C/N-Verhältnissen ausdrückte.

»» Für den Mischbau von Mohn mit Weißklee belegen die N-Gehalte und C/N-Verhältnisse, dass Konkurrenz um Stickstoff in der Mischung mit Mohn auftrat. Dies geschah unabhängig vom Saatzeitpunkt, weshalb in der Reinsaat stets höhere N-Gehalte und engere C/N-Verhältnisse auftraten. Dabei spielen die Keim- und Wachstumsbedingungen eine große Rolle, da nur bei ausreichender Wasserverfügbarkeit Nährstoffaufnahme und Wachstum des Weißklees erfolgen, was wiederum die Empfehlung zu frühen Weißklee-Saatzeitpunkten stützt.

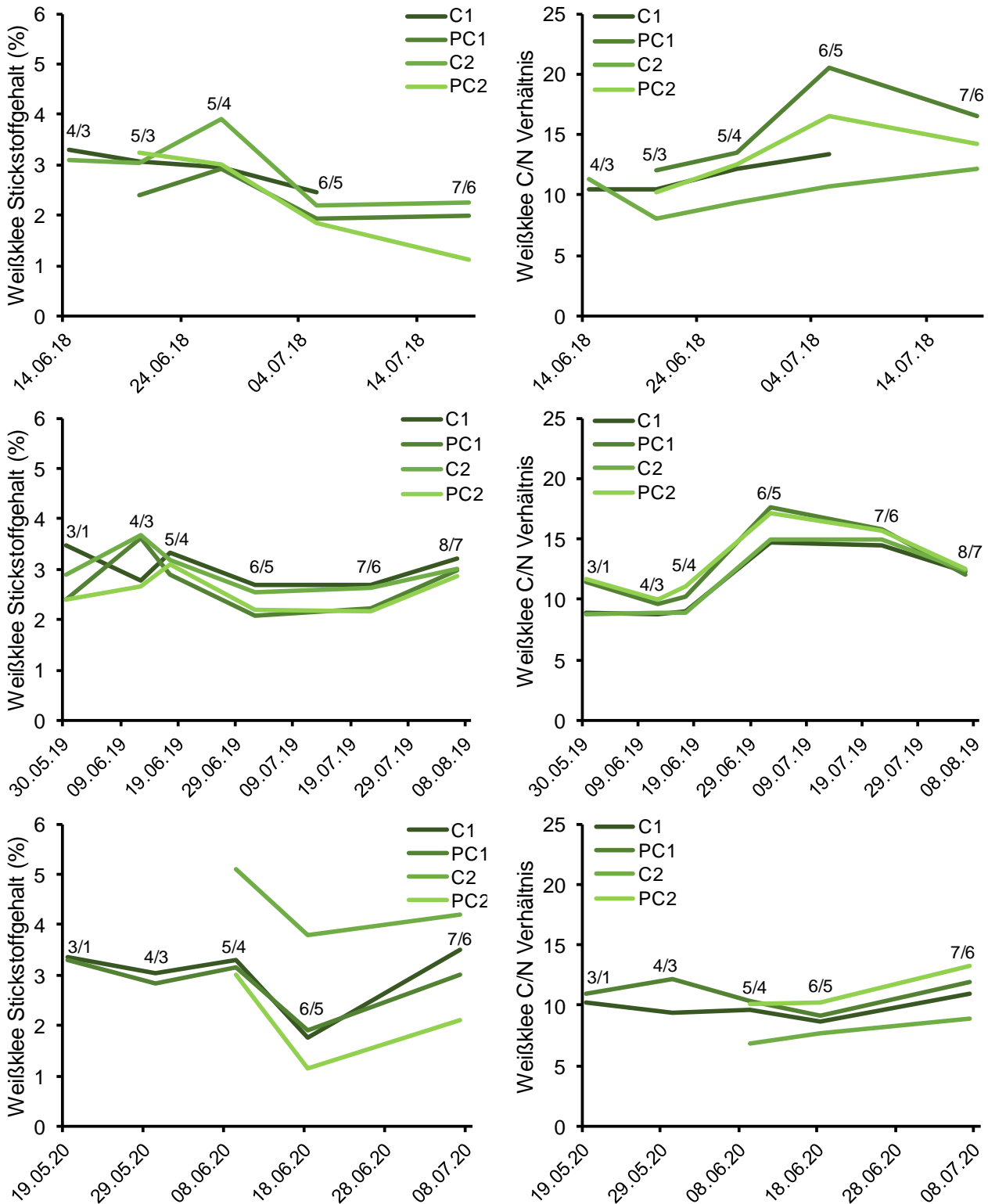


Abb. 8 Stickstoffgehalt (%) und C/N-Verhältnis der Weißkleepflanzen in Reinsaat zu zwei Saatzeitpunkten (C1, C2) und in Mischung mit Sommermohn (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Die Ziffern über den jeweiligen Boniturstagen geben die BBCH Makrostadien des Klee zu diesem Zeitpunkt an (C1/C2) (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Die Stickstoffgehalte in der Pflanze kommen (mit Ausnahme des Weißklees) durch Stickstoffaufnahme aus dem Boden zustande. Infolgedessen war es wichtig, die N-Versorgung des Bodens zu untersuchen, um Aussagen über eventuelle Mangelzustände treffen zu können.

5.2.2 Mineralisch verfügbarer Stickstoff (N_{\min}) im Boden

Die in der Bodenlösung vorhandenen Stickstoffverbindungen Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) wurden zu verschiedenen Zeitpunkten stichprobenartig auf den Versuchsflächen ermittelt und im Folgenden als mineralisch verfügbarer Stickstoff (N_{\min}) zusammengefasst. Der Großteil des Stickstoffs im Oberboden ist organisch gebunden, pflanzenverfügbar sind jedoch hauptsächlich NO_3^- und NH_4^+ , weshalb die Menge dieser Verbindungen ausschlaggebend für die Stickstoffversorgung der Pflanzen ist⁸³. Die initialen N_{\min} -Werte wurden als Mischprobe der gesamten Versuchsfläche untersucht (Tab. 8), wohingegen die Probenahmen im Vegetationsverlauf parzellenweise erfolgten (Abb. 9 + 10).

Der mineralisch verfügbare Stickstoff war initial 2018 und 2020 höher als 2019. Während die N_{\min} -Gehalte 2018 im Verlauf der Vegetationsperiode abnahmen, stiegen sie 2019, blieben jedoch auf einem insgesamt deutlich niedrigeren Niveau.

Grundsätzlich verändern sich die N_{\min} -Gehalte in der Bodenlösung innerhalb kurzer Zeiträume⁸³, weshalb die angegebenen Werte stets Momentaufnahmen darstellen. Trotzdem lassen sich Tendenzen zur Stickstoffversorgung der Pflanzen ableiten. So war zu Beginn der Versuchsjahre der N_{\min} -Gehalt in den oberen 30 cm des Bodens 2018 und 2020 mit 21 kg ha^{-1} identisch, wohingegen 2019 nur $2 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ analysiert wurden. Die N_{\min} -Werte in 30 – 60 und 60 – 90 cm Tiefe waren ebenfalls 2019 niedriger als in den übrigen beiden Jahren (Tab. 8), was für eine insgesamt geringere Stickstoffverfügbarkeit zu diesem Zeitpunkt spricht. Hohe Niederschläge im Winter führen zu stärkeren Auswaschungen von Nitrat und Ammonium, was auch ein Grund für die geringen N_{\min} -Gehalte Anfang 2019 gewesen sein könnte. Zwar verläuft die Auswaschung bei Böden mit hoher Feldkapazität wie den Parabraunerden nur langsam⁵⁹, die hohen Niederschläge im Dezember 2018 und Januar 2019 (zusammen 137 mm) könnten dies jedoch gefördert haben. Dies könnte auch dadurch beeinflusst worden sein, dass als Vorfrüchte Sommer- bzw. Winterweizen dienten und die Versuchsfläche jeweils über Winter brach lag.

Der Stickstoffbedarf des Mohns wird in der Literatur mit $50 - 80 \text{ kg N ha}^{-1}$ angegeben^{2,17}. Somit waren die Gehalte im Oberboden zu Beginn des Wachstums in allen drei Jahren zunächst zu gering für ausreichendes Wachstum.

Neben dem Mohn muss zusätzlich auch der Bedarf von Gerste (Braugerste etwa 90, Futtergerste bis 130 kg N ha⁻¹)⁸⁴ in den Mischvarianten berücksichtigt werden, der den Gesamtbedarf zusätzlich erhöhte. Stickstoff ist ein Makronährstoff und einer der wichtigsten, ertragsbestimmenden Wachstumsfaktoren, weshalb ein Mangel sich häufig in Ertragseinbußen niederschlägt⁸⁵. 2019 und 2020 erfolgte daher eine zusätzliche Stickstoffdüngung mit 30 kg N ha⁻¹ in Form von fein vermahlenem Hornmehl, was in Anbetracht der geringen Ausgangswerte sinnvoll erschien.

Tab. 8 Ausgangsgehalte an mineralisch verfügbarem Stickstoff (N_{min}) (kg ha⁻¹) auf den Versuchsflächen am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020

Datum	N _{min} (kg ha ⁻¹)		
	0 – 30 cm	30 – 60 cm	60 – 90 cm
05.03.2018	21	27	57
14.02.2019	2	12	46
19.02.2020	21	38	90

Die geringe Stickstoffversorgung des Oberbodens 2019 blieb im weiteren Vegetationsverlauf auf einem niedrigen Niveau und erreichte mit einmaliger Ausnahme nicht mehr als 30 kg N ha⁻¹ (Abb. 10). Ein Düngungseffekt wurde daher nicht sichtbar, zu beiden folgenden Probenahmen lagen die N_{min}-Gehalte von 2018 auf einem höheren Niveau als 2019. Die N_{min}-Werte von 2018 verhielten sich dabei gegenläufig zu 2019. Während 2018 im Oberboden der mineralisch verfügbare Stickstoff im Laufe der Vegetationsperiode abnahm, wurde 2019 im August tendenziell mehr N_{min} gemessen als im Juni.

Die geringen Stickstoffgehalte im Jahr 2019 können eine weitere Erklärung bieten, weshalb die Konkurrenzeffekte zwischen Mohn und Sommergerste in diesem Jahr besonders ausgeprägt waren. Insbesondere der Zeitpunkt der Verfügbarkeit könnte von Bedeutung gewesen sein, da die Mineralisation im Laufe der Vegetationsperiode zunahm, der Mohn jedoch bereits im April gesät wurde. Dies passt auch zu den N-Gehalten der Mohnpflanzen, die zu Beginn der Bonituren 2019 in der Mischung mit Sommergerste signifikant geringer waren als in Mohn-Reinsaat oder in der Mischung mit Weißklee. Inwiefern geringe Stickstoffgehalte im Boden und in der Pflanze eine Ursache für mangelndes Mohnwachstum darstellten oder ob sie die Auswirkung geschwächten Pflanzenwachstums durch Wassermangel oder Lichtkonkurrenz waren, lässt sich nicht genau nachvollziehen. Dass Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte und Nährstoffverfügbarkeit bestehen, ist jedoch bekannt⁸⁶ und könnte bedeuten, dass die Kombination aus Konkurrenz um Wasser und Stickstoff das Mohnwachstum in der Mischung mit Sommergerste stark hemmte, insbesondere bei der frühen Aussaat 2019.

Mangelnde Stickstoffverfügbarkeit könnte somit eine der Ursachen für die Unterdrückung des Mohns durch die Sommergerste 2019 gewesen sein. Gegen eine starke Beeinflussung des Wachstums spricht jedoch der Mangel an signifikanten Unterschieden im N_{\min} -Gehalt zwischen den Varianten. Dies trifft sowohl für den Oberboden (0 – 30 cm) als auch die darunter liegenden Schichten (bis 90 cm) zu. 2018 verhielten sich die N_{\min} -Werte zu allen Messzeitpunkten unauffällig und es konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Dasselbe galt für 2019 mit Ausnahme der Probenahme am 18.06., wo in 0 – 30 cm signifikant mehr N_{\min} in der Variante C2 ($38 \pm 9 \text{ kg N ha}^{-1}$) als in den übrigen ($6 - 15 \text{ kg N ha}^{-1}$) gemessen wurde. In 30 – 60 cm Tiefe war der N_{\min} -Gehalt der Variante C2 ($22 \pm 9 \text{ kg N ha}^{-1}$) ebenfalls den übrigen überlegen ($5 - 10 \text{ kg N ha}^{-1}$), mit Ausnahme von C1, wo ebenfalls erhöhte Werte ($17 \pm 11 \text{ kg N ha}^{-1}$) gemessen wurden.

Höhere Stickstoffgehalte im Boden der Weißklee-Varianten erscheinen plausibel, da die leguminösen Kleepflanzen durch die Symbiose mit Wurzelknöllchenbakterien die Möglichkeit der Stickstofffixierung aus der Luft besitzen⁵⁶. Trotzdem wird auch der Bodenvorrat an Stickstoff genutzt, sodass ebenfalls eine Beeinflussung des Bodenstickstoffgehalts durch N-Aufnahme in die Weißkleepflanzen erfolgte. Die geringere Ausbildung von Biomasse des spät gesäten Weißkleees könnte eine Begründung für einen ebenfalls geringeren Stickstoffbedarf und damit höhere N_{\min} -Gehalte des Bodens darstellen. Da die Unterschiede zu den übrigen Varianten jedoch nur zu einem Messzeitpunkt auftraten, scheinen die Auswirkungen durch andere N-Nutzung des Weißkleees auf den Bodenstickstoffgehalt zu den Messzeitpunkten insgesamt nur gering gewesen zu sein. Mögliche Effekte des Misanbaus auf die Nachfrucht wurden nicht erfasst, die N-Effekte für die Nachfrucht könnten jedoch größer sein, da ebenso die Kurzzeitwirkung der N-Freisetzung des eingesetzten Hornmehldüngers begrenzt ist⁸⁷.

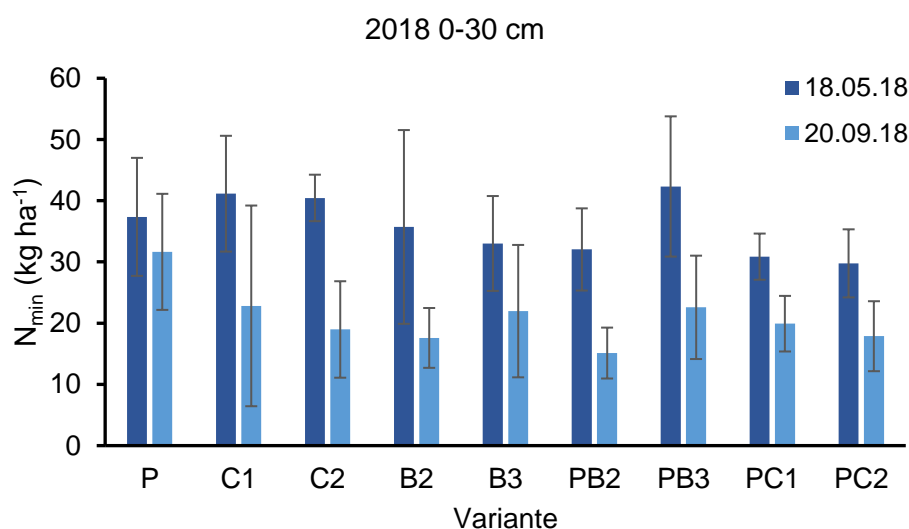


Abb. 9 N_{\min} -Gehalte (kg ha^{-1}) in 30 cm Tiefe der 11 Versuchsvarianten am Campus Klein-Altendorf zum 18.05. und 20.09.2018 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

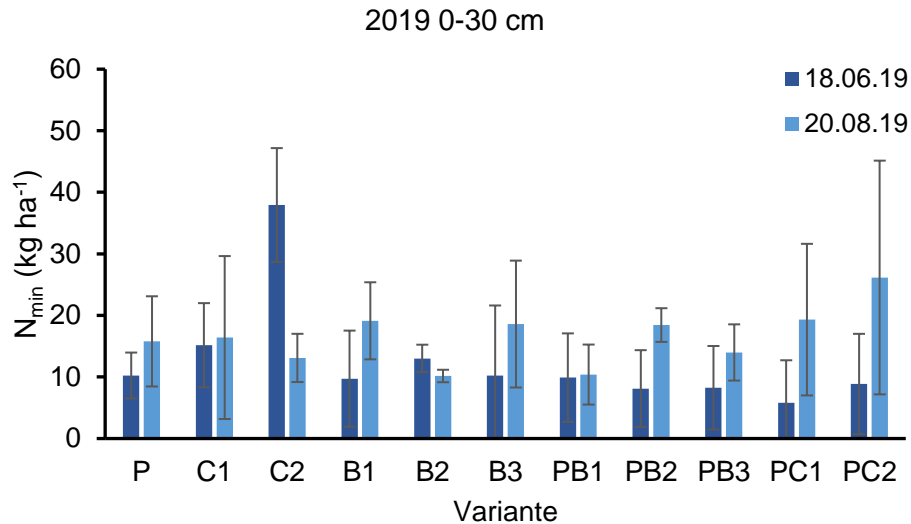


Abb. 10 N_{\min} -Gehalte (kg ha⁻¹) in 30 cm Tiefe der 11 Versuchsvarianten am Campus Klein-Altendorf zum 18.06. und 20.08.2019 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Im Jahr 2020 wurden die Stickstoffgehalte im Boden nur initial und als Mischprobe nach der Ernte bestimmt. Über die Entwicklung der N_{\min} -Gehalte im Wachstumsverlauf lässt sich daher kaum etwas sagen. Da das Wachstum, die Erträge und C/N-Verhältnisse des Mohns 2020 denen aus 2018 stark ähnelten und die initialen N_{\min} -Werte ebenfalls ähnlich hoch waren, lässt sich vermuten, dass die N-Verfügbarkeit 2020 ebenfalls auf einem vergleichbaren Niveau wie 2018 angesiedelt war. Auch ein gemessener mittlerer N_{\min} -Gehalt von 38 kg ha⁻¹ (in 0 – 30 cm) im August 2020 spricht gegen Stickstoffmangel in diesem Jahr.

Die N_{\min} -Daten belegen, dass Stickstoff neben Wasser und Licht ein weiterer begrenzender Wachstumsfaktor sein kann. Insgesamt geringere N_{\min} -Gehalte im Oberboden 2019 können die Konkurrenzsituation in der Mischung verstärkt haben, eine signifikante Abgrenzung der Varianten über die N_{\min} -Gehalte des Bodens war jedoch nicht möglich. Die Fruchtbarkeit der Böden kann dabei eine Rolle gespielt haben, da Parabraunerden aus Löss relativ hohe Nährstoffgehalte aufweisen und Wassermangel durch die hohe Feldkapazität erst nach einem relativ langen Zeitraum auftritt⁵⁹, was sich auch in den hohen Ackerzahlen von 93 Punkten ausdrückt. Eine Düngung mit Hornmehl hatte in diesem Versuch keinen messbaren Effekt, es lässt sich jedoch nicht nachvollziehen, inwieweit die N-Gehalte und das Wachstum sich ohne Düngung negativ verändert hätten. Ob über Düngung oder aus dem Bodenvorrat, die Verfügbarkeit des Stickstoffs ist entscheidend für das Pflanzenwachstum und bei der Wahl des Hornmehldüngers stark abhängig von dessen Mineralisierung.

»» Für den Mischanbau von Mohn im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Stickstoffmangel besonders bei nicht-legumen Kulturen wie der Sommergerste vor allem im frühen Vegetationsstadium vermieden werden sollte, um Konkurrenzeffekte um diese Ressource zu entschärfen. Insbesondere auf schlechter mit Nährstoffen versorgten Böden ist eine Kombination mit Weißklee oder anderen N-fixierenden Pflanzen ratsamer, da die Konkurrenz um Stickstoff geringer ausfällt.

Des Weiteren besteht über sensorbasierte Methoden die Möglichkeit den Stickstoffgehalt in der Pflanze indirekt über eine Abschätzung des Chlorophyllgehalts in den Blättern zu eruieren. Die aus den Reflektionsspektren der Blätter berechneten Vegetationsindizes geben dabei umfassend Auskunft über die Fitness oder den Stresszustand der Pflanzen, weshalb über Messungen mit SPAD-Meter und PolyPen ein noch tieferer Einblick in den Zustand der Kulturpflanzen in der Mischung gewonnen wurde.

5.2.3 Sensorbasierte Messungen (SPAD und NDVI)

SPAD Sommermohn

Die Messung der SPAD-Werte beschreibt näherungsweise den Chlorophyllgehalt der Blätter, da deren Berechnung auf der Transmission von Wellenlängen, die für Chlorophyll charakteristisch sind, basiert. Chlorophyll spielt eine zentrale Rolle für die Photosynthese und ermöglicht den Pflanzen die Energiegewinnung aus der Sonneneinstrahlung, da es als zentrales Rezeptormolekül für die Absorption der Strahlungsenergie fungiert⁸⁸. Da im Chlorophyllmolekül auch Stickstoff enthalten ist, lassen niedrige SPAD-Werte auf eine mangelnde Stickstoffversorgung und demzufolge schwächeres Pflanzenwachstum schließen.

Die Messungen der SPAD-Werte in den Jahren 2019 und 2020 an Blättern der Mohnpflanzen ergaben deutliche Unterschiede zwischen den Jahren (Abb. 11).

Allgemein wurden 2020 im Mohn höhere SPAD-Werte bis maximal 42,5 im Vergleich zu maximal 31,4 im Jahr 2019 gemessen. Signifikante Unterschiede traten hauptsächlich 2019 zwischen Mohn-Reinsaat und Mohn mit Weißklee gegenüber den Mischungen mit Sommergerste auf, deren Werte geringer ausfielen.

Insgesamt stiegen die SPAD-Werte im Vegetationsverlauf in beiden Jahren leicht an. Dies war ungewöhnlich, denn es wäre aufgrund der abnehmenden N-Gehalte im Vegetationsverlauf auch mit rückläufigen SPAD-Werten zu rechnen gewesen.

Andererseits beeinflussen neben Stickstoff auch andere Faktoren, wie die Chlorophyllverteilung in den Blättern in Reaktion auf Licht, die Bildung der SPAD-Werte. Auch ist die Beziehung der SPAD-Werte zum Chlorophyllgehalt nicht linear⁸⁹. Außerdem sanken N-Gehalt und SPAD-Wert bei Kaffeepflanzen erst ab einsetzender Seneszenz rapide⁹⁰, dieses Entwicklungsstadium lag jedoch nicht mehr im Messzeitraum der SPAD-Werte der Mohnpflanzen.

2019 lagen die SPAD-Werte der Mohn-Weißklee-Mischungen dabei durchgängig auf einem vergleichbaren Niveau zur Mohn-Reinsaat. Im Mischbau mit Leguminosen wurden bereits erhöhte SPAD-Werte in der Hauptfrucht bei Leguminosenuntersaat gemessen, beispielsweise wurden für Raps mit Weißklee-Untersaat höhere SPAD-Werte im Raps ermittelt⁹¹. Dieses Phänomen ließ ich im Falle der Kombination von Mohn mit Weißklee nicht nachvollziehen, die SPAD-Werte zeigten jedoch auch keinen nachteiligen Effekt der Mischbauvariante gegenüber der Mohn-Reinsaat. Dies könnte ebenfalls andeuten, dass die Mohnpflanzen in Kombination mit Weißklee keinen Stickstoffmangel aufwiesen. Die SPAD-Werte von Mohn in Kombination mit Sommergerste waren in beiden Jahren tendenziell bis signifikant geringer als in der Mohn-Reinsaat oder in der Mischung mit Weißklee. Beispielsweise betragen zum BBCH 51 2019 die SPAD-Werte für P und PC1 jeweils im Mittel 25,5 im Gegensatz zu 20,5 – 20,8 bei PB1, PB2 und PB3. 2020 lagen die SPAD-Werte kontinuierlich über 30 und somit insgesamt deutlich höher als 2019, zeigten jedoch dieselben Tendenzen zwischen den Varianten.

Die SPAD-Werte belegen, was bereits durch Biomasse, Pflanzenhöhe, Blattfläche und Stickstoffgehalte deutlich wurde: 2020 war die Konkurrenzsituation zwischen Mohn und beiden Mischungspartnern sehr gering, weshalb ebenso nur minimale Unterschiede in den SPAD-Werten auftraten. Generell spricht das im Vergleich zu 2019 höhere Niveau der SPAD-Werte im Jahr 2020 für insgesamt vitalere Mohnpflanzen, da höhere SPAD-Werte mit höherem Chlorophyllgehalt in Verbindung stehen^{89,90}. Da Stickstoff ein wesentlicher Baustein des Chlorophyllmoleküls ist, unterstützt dies die Schlussfolgerung, dass der Mohn 2020 nicht unter Stickstoffmangel litt. Dies wird durch die N-Gehaltsmessungen der Gesamtpflanze untermauert, die in Reinsaat ähnlich hoch wie im Mischbau waren (s. Abb. 6).

Im Gegensatz dazu verdeutlichen die geringeren SPAD-Werte der Mohnpflanzen in Mischung mit Sommergerste 2019 die hohe Konkurrenzsituation mit der Sommergerste in diesem Jahr, die sich auf alle Parameter niederschlug. Passend zu geringen N-Gehalten, weniger Biomasse und geringerer Pflanzenhöhe, waren auch die SPAD-Werte der Mischbauvarianten mit Gerste deutlich geringer als die der übrigen Varianten. Ein niedrigerer N-Gehalt in der Gesamtpflanze wurde diesen Varianten insbesondere zu Anfang der Bonituren bescheinigt, die sich im Laufe der Vegetationszeit anglichen.

Dasselbe Phänomen ließ sich auch in den SPAD-Werten nachvollziehen und zeigt die Verbindung von Stickstoffgehalt und SPAD-Wert. In Experimenten zum Streifenanbau von Weizen und Mais reagierte der Mais mit sinkenden SPAD-Werten im Vergleich zur Reinsaat, was hauptsächlich auf eine mangelnde Lichtinterzeption durch Schattenwurf der Weizenpflanzen zurückgeführt wurde⁹². Infolgedessen ergaben sich die niedrigen SPAD-Werte der Mohnpflanzen in Mischung mit Sommergerste vermutlich als multifaktorielles Ergebnis von Konkurrenz um Wasser, Licht und Stickstoff.

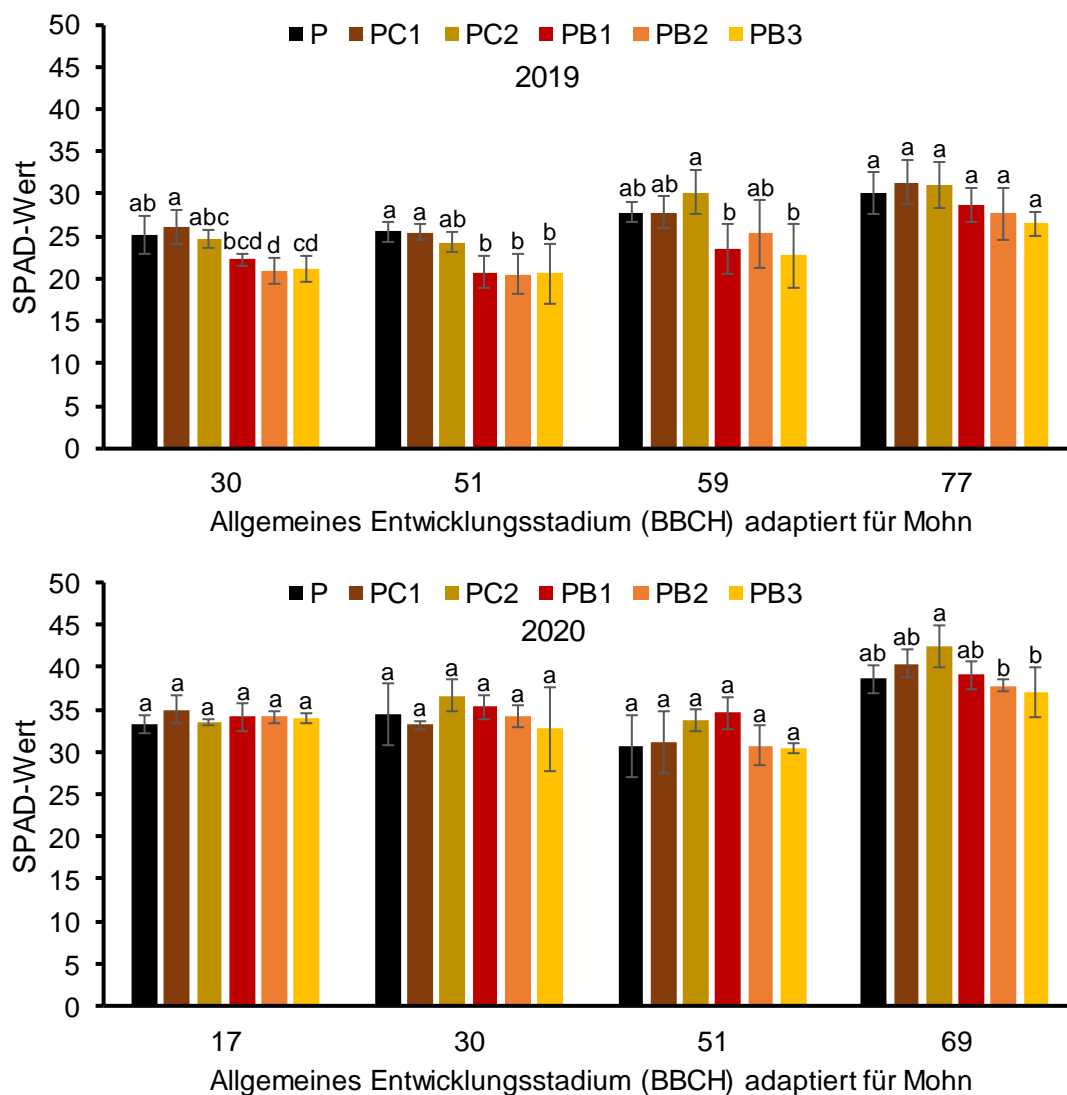


Abb. 11 SPAD-Werte der Sommermohnblätter zu den jeweiligen Entwicklungsstadien der Sommermohnpflanzen am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Alle Parameter weisen auf die deutlich geschwächten Mohnpflanzen 2019 in der Mischung mit Sommergerste hin und belegen außerdem, dass in der Kombination mit Weißklee keine messbare Entwicklungshemmung des Mohns zu sehen war.

Die Ermittlung der SPAD-Werte ist somit ein hilfreiches Werkzeug, um die Konkurrenzsituation der Mohnpflanzen zu beurteilen, ohne invasiv in den Bestand eingreifen zu müssen. Im Gegensatz zu aufwendigen analytischen Methoden der Pflanzeninhaltsstoffe, konnte die vorliegende Stresssituation auch über die SPAD-Werte der Blätter ansatzweise nachvollzogen werden. Ein Einfluss der Saatstärke der Sommergerste oder des Saatzeitpunkt des Weißklee auf die SPAD-Werte war kaum sichtbar. Tendenziell nahmen die SPAD-Werte des Mohns mit zunehmender Saatstärke der Sommergerste ab, dieser Effekt war jedoch nur minimal.

»» Anhand der SPAD-Werte wurden die durchgängig geringe Konkurrenz zwischen Mohn und Weißklee sowie die erhöhte Konkurrenz zwischen Mohn und Sommergerste in einem der beiden analysierten Jahre deutlich. Die Werte geben Hinweise auf eine mögliche Konkurrenz um Licht und Stickstoff, die den Weißklee weniger betrifft als die Sommergerste.

SPAD Sommergerste

SPAD-Werte wurden ebenfalls für die Kulturen Sommergerste und Weißklee ermittelt. 2019 lagen die SPAD-Werte für die Sommergerste zwischen 37,6 und 45,2 und 2020 zwischen 38,1 und 48,4.

Die SPAD-Werte der Sommergerste lagen auf einem insgesamt höheren Niveau als die des Mohns oder des Weißklee. Signifikante Unterschiede ergaben sich bis auf eine Ausnahme nicht.

Die Ausnahme bildete der 30.05.2019 (Mohn BBCH 30) zu dem ein signifikant höherer SPAD-Wert in der Variante B1 ($45,2 \pm 2,2$) gegenüber PB3 ($41,0 \pm 2,1$) und B3 ($41,2 \pm 1,2$) gemessen wurde. Dies betont die Tendenz zu etwas geringeren SPAD-Werten bei höherer Saatstärke und kann der geringeren N-Verfügbarkeit pro Pflanze zugeschrieben werden, die sich aufgrund höherer Pflanzenzahlen m^{-2} ergibt. Die Konkurrenzeffekte zum Mohn wurden jedoch in den SPAD-Werten nicht sichtbar. Im Gegensatz zum Mohn ließ sich in den SPAD-Werten der Sommergerste kein Hinweis auf N-Mangel aufgrund von interspezifischer Konkurrenz finden, was auch zu den N-Gehalten im Pflanzenmaterial passt, die ebenfalls kaum unterschiedlich waren.

Zwar zeigte die Biomasse der Sommergerste eine Reaktion auf den Mischbau, diese ließ sich jedoch nicht über Unterschiede im Chlorophyll- oder Stickstoffgehalt nachweisen. Die ermittelten SPAD-Werte der Sommergerste sind etwas höher als die von Giunta et al. (2002) ermittelten SPAD-Werte, die für 18 verschiedene Wintergerstensorten in einem Bereich zwischen 33,8 und 40,6. lagen⁹³. Grundsätzlich ermittelten Giunta et al. (2002)⁹³ einen hohen genetischen Einfluss auf die Ausprägung der SPAD-Werte und sowohl Sortenunterschiede als auch Unterschiede zwischen Gerste, Hartweizen und Triticale.

Dies könnte unter Umständen mit ein Grund sein, weshalb das Niveau der Mohn-SPAD-Werte grundsätzlich niedriger war als das der Sommergerste oder des Weißklee.

» Fehlende Unterschiede in den SPAD-Werten der Sommergerste sprechen für eine geringe Beeinflussung der Stickstoffkonzentration in den Blättern durch den Mischanbau. Dies betont die hohe Konkurrenzskraft der Sommergerste in Bezug auf die Stickstoffversorgung.

SPAD Weißklee

Beim Weißklee wurde ein ähnlich hohes Niveau der SPAD-Werte wie bei der Sommergerste festgestellt, denn sie lagen 2019 zwischen 31,7 und 45,9 und 2020 zwischen 34,3 und 44,2. Bei Inostroza und Acuna (2010) wurden SPAD-Werte zwischen 35,5 und 50,9 für verschiedene Weißkleepopulationen gemessen und lagen somit auf einem ähnlichen, tendenziell etwas höheren Niveau⁹⁴.

Die SPAD-Werte des Weißklee wiesen 2019 keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten auf. 2020 wurden tendenziell höhere Werte in den früh gesäten Varianten gemessen.

Insgesamt stiegen die SPAD-Werte 2019 im Laufe der Wachstumsperiode von 31,7 – 33,7 am ersten Messtag auf 41,8 – 45,9 am letzten Messtag an, wohingegen 2020 die Werte auf einem gleichmäßigen Niveau blieben. 2019 konnte auch der spät gesäte Weißklee einen bodenbedeckenden Bestand bilden. Die gleichmäßigen SPAD-Werte zwischen den Varianten bestätigen, dass weder durch den Saatzeitpunkt noch durch die Konkurrenzsituation mit dem Mohn eine Beeinflussung des Chlorophyllgehalts der Blätter stattfand. Auch die N-Gehalte und die Biomasse des spät gesäten Weißklee waren 2019 ähnlicher zu den früh gesäten, was die geringere Konkurrenzsituation mit dem Mohn in diesem Jahr untermauert. Die Unabhängigkeit des Weißklee vom Stickstoff in der Bodenlösung durch Möglichkeit der Stickstoff-Fixierung könnte dabei ebenso zu geringerer Konkurrenz mit dem Mohn um die Ressource Boden-Stickstoff und zu geringeren Unterschieden in den SPAD-Werten geführt haben.

Im Gegensatz zu 2019 wurden 2020 signifikante Unterschiede zwischen früher und später Kleesaat nicht nur im N-Gehalt, sondern auch in den SPAD-Werten detektiert, sodass zum BBCH 69 des Mohns die Varianten PC1 und C1 Werte von $42,3 \pm 1,1$ und $41,3 \pm 4,9$ gegenüber $36,3 \pm 2,0$ bei C2 aufwiesen. Die Variante PC2 war in diesem Jahr nur so schwach gewachsen, dass eine Messung der SPAD-Werte nicht erfolgen konnte. Der schwache Wuchs des spät gesäten Weißklee kann auch die primäre Begründung für die geringeren SPAD-Werte der Variante C2 sein, die in Reinsaat noch einen Bestand bilden konnte, in der Mischung mit Mohn der Konkurrenz durch den Mohn jedoch unterlag.

Die hohen Konkurrenzeffekte in der Kombination von Mohn mit spät gesättem Weißklee drückte sich in geringerer Weißklee-Biomasse, aber auch in hellgrünerem Blattwerk der PC2-Varianten aus. Vergleichsweise wurden hellgrünen, jungen Blättern von Mangostanbäumen geringere SPAD-Werte als dunkleren, etwas älteren Blättern attestiert⁹⁵.

»» Gelingt eine Bestandsetablierung des Weißklees, wird dessen Chlorophyllgehalt nicht von der Mischung mit Mohn beeinflusst, wohingegen bei später Aussaat ein schwacher Bestand sich auch in geringeren N-Gehalten und SPAD-Werten wiederfindet. Für den Mischanbau mit Mohn empfiehlt sich daher eine möglichst frühe Aussaat des Weißklees.

NDVI Sommermohn

Mit dem PolyPen wurden Reflektionsspektren der Blätter im Wellenlängenbereich zwischen 380 und 780 nm aufgenommen. Daraus lassen sich verschiedene Indizes berechnen, die unter anderem die Vitalität der Pflanze angeben wie beispielsweise der NDVI. Die NDVI Werte wurden für Mohn, Sommergerste und Weißklee 2019 und 2020 ermittelt. Grundsätzlich kann der NDVI wie in diesem Versuch an der Einzelpflanze bestimmt werden, es besteht aber auch die Möglichkeit, mittels Fernerkundung Flächen in ihrer Gesamtheit zu vermessen. Dann stehen höhere NDVI-Werte ähnlich der SPAD-Werte für grüne Biomasse bzw. für mehr Chlorophyll in den Blättern und erreichen bei dichten Beständen Werte bis maximal 0,9 – 1, die häufig auch mit einem hohen Blattflächenindex (>4) in Verbindung stehen⁹⁶. Dagegen ermöglichen NDVI Messungen an den Blättern eine genauere Beurteilung der Pflanzenentwicklung einzelner Varianten⁹⁷. Der NDVI auf Pflanzenniveau kann dabei auch als Indikator für Biomasse- und Ertragsentwicklung gesehen werden⁹⁷. Da sich bei den Messungen im Mischanbau-Versuch keine Hinweise auf Differenzierungen der gemessenen Werte in Abhängigkeit der Blattetage ergaben, wurden die Werte je Pflanze zusammengefasst.

Die NDVI-Werte des Mohns lagen in beiden untersuchten Jahren zwischen 0,47 und 0,65 und damit meist niedriger als die der Sommergerste und des Weißklees, die Werte zwischen 0,56 und 0,69 erreichten (Tab. 9). Im Vergleich zu den beiden Kulturen ist die Blattfläche eines einzelnen Mohnblatts wesentlich größer und es wurde bereits ein negativer Zusammenhang zwischen Blattfläche und Photosynthese (bei Erdnuss, Sojabohne und Süßkartoffel) festgestellt⁹⁸, in die auch Chlorophyll zentral involviert ist. Daher ist über den direkten Vergleich der NDVI-Werte zwischen den Kulturen zunächst keine Aussage über die Konkurrenzeffekte zu treffen.

Ein Effekt des Mischanbaus auf die NDVI-Werte wurde nur in dem Jahr beobachtet, in dem der Mohn in Konkurrenz durch die Sommergerste geschwächt wurde. Im Vergleich zur Mischung mit Weißklee traten in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede im NDVI auf.

2019 und 2020 konnten keine signifikanten Effekte des Mischanbaus mit Weißklee auf den NDVI gemessen werden.

Bei Trail et al. (2016) führte dagegen die Integration einer Leguminose in den Mischanbau mit Hirse sogar zu einer Erhöhung des NDVIs um bis zu 16%⁹⁹. Solch eine direkte Wechselwirkung zwischen Weißklee und Mohn konnte im vorliegenden Versuch nicht nachvollzogen werden.

2020 gab es ebenfalls keine signifikanten Unterschiede im NDVI der Mohn-Reinsaat verglichen mit der Mischung mit Sommergerste, dafür traten 2019 bereits zu BBCH 30 signifikant geringere NDVI-Werte in den Varianten PB2 und PB3 (0,49 – 0,50) im Vergleich zur Mohn-Reinsaat (0,57) auf. Dieser Unterschied blieb bis BBCH 51 bestehen und zeigte auch Richtung Erntereife des Mohns erhöhte Werte (0,55 – 0,56) in Reinsaat und mit Weißklee gegenüber den Sommergerstenvarianten PB1, PB2 und PB3 (0,47 – 0,51). Die NDVI-Werte belegen, ähnlich wie die Biomasse, die Stickstoffgehalte und die SPAD-Werte, ein weiteres Mal die geringere Vitalität der Mohnpflanzen in der Mischung mit Sommergerste 2019. Dass die Unterschiede zwischen Mohn-Reinsaat und Mohn mit Sommergerste bereits zu Beginn des Längenwachstums signifikant messbar waren, zeigt den frühen Zeitpunkt, zu dem sich die Konkurrenz negativ auf das Mohnwachstum auswirkte. Die Variante PB1 wies im Vergleich zu den anderen beiden Saatstärken der Sommergerste keine signifikant geringeren NDVI-Werte auf, zeigte aber dieselben negativen Tendenzen. Für den Mischanbau von Mohn mit Sommergerste kann dies jedoch bedeuten, dass geringe Saatstärken der Sommergerste die Gefahr erhöhter Konkurrenz verringern und eine komplette Unterdrückung des Mohns verhindern.

»» Der NDVI der Mohnpflanzen bildete insbesondere die starke Konkurrenzsituation mit der Sommergerste 2019 ab und eignet sich daher als Indikator zur Abschätzung von Konkurrenzeffekten zwischen den Kulturen.

Tab. 9 NDVI der Sommermohnblätter in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (BBCH) und Variante am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zum jeweiligen Messzeitpunkt (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Datum	NDVI Mohn					
	30.05.2019	11.06.2019	01.07.2019	08.05.2020	19.05.2020	18.06.2020
BBCH	30	51	77	17	30	69
P	0,57 ± 0,02 a	0,54 ± 0,01 a	0,55 ± 0,03 ab	0,56 ± 0,02 a	0,55 ± 0,01 a	0,63 ± 0,03 ab
PC1	0,55 ± 0,01 ab	0,53 ± 0,04 a	0,56 ± 0,02 a	0,54 ± 0,01 a	0,53 ± 0,02 a	0,62 ± 0,01 ab
PC2	0,57 ± 0,04 a	0,54 ± 0,02 a	0,55 ± 0,02 a	0,52 ± 0,06 a	0,55 ± 0,01 a	0,65 ± 0,01 a
PB1	0,54 ± 0,02 abc	0,49 ± 0,03 ab	0,51 ± 0,02 ab	0,55 ± 0,02 a	0,55 ± 0,01 a	0,64 ± 0,03 ab
PB2	0,49 ± 0,02 c	0,47 ± 0,03 b	0,49 ± 0,06 ab	0,55 ± 0,01 a	0,54 ± 0,01 a	0,64 ± 0,01 ab
PB3	0,50 ± 0,04 bc	0,47 ± 0,04 b	0,47 ± 0,05 b	0,55 ± 0,02 a	0,55 ± 0,01 a	0,60 ± 0,02 b

NDVI Sommergerste

Der NDVI der Sommergerste zeigte in keinem Entwicklungsstadium signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (Tab. 10).

Der NDVI der Sommergerste lag 2019 auf einem Niveau zwischen 0,56 und 0,64 und erreichte 2020 Werte zwischen 0,58 und 0,68. In Salzstressexperimenten mit Wintergerste lag der NDVI für ungestresste Pflanzen bei über 0,8 und nahm bei zunehmender Salzkonzentration bis unter 0,5 ab⁹⁷. Dass die im vorliegenden Versuch gemessenen Werte nicht unterhalb von 0,56 sanken, deutet auf ein eher moderates Stresslevel der untersuchten Pflanzen hin. Ähnlich wie beim Mohn wurden 2020 etwas höhere Werte erreicht, was einen umweltbedingten Einfluss in diesem Jahr vermuten lässt. Obwohl 2019 die Konkurrenzsituation mit dem Mohn von der Sommergerste dominiert wurde, ließ sich dies nicht im NDVI abbilden, ebenso traten keine Unterschiede bei stärkerer Mohnkonkurrenz (2020) auf. Dies besagt, dass die Sommergerste in keinem der untersuchten Zeiträume ein messbar schwächeres Wachstum aufgrund des Mischanbaus zeigte, obwohl die Ertragsergebnisse 2019 in der Reinsaat signifikant über denen der Mischung lagen.

»» Es kann daher für die Sommergerste kein Zusammenhang zwischen dem NDVI der Blätter und der Konkurrenzsituation mit dem Mohn hergestellt werden.

Tab. 10 NDVI der Sommergerstenblätter in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (BBCH) und Variante am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zum jeweiligen Messzeitpunkt (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Datum	NDVI Sommergerste				
	30.05.2019	11.06.2019	01.07.2019	19.05.2020	18.06.2020
BBCH	22	33	75	12	30
B1	0,63 ± 0,02 a	0,62 ± 0,01 a	0,60 ± 0,03 a	0,60 ± 0,03 a	0,66 ± 0,02 a
B2	0,64 ± 0,02 a	0,61 ± 0,02 a	0,62 ± 0,01 a	0,61 ± 0,01 a	0,65 ± 0,01 a
B3	0,64 ± 0,01 a	0,62 ± 0,03 a	0,56 ± 0,09 a	0,61 ± 0,01 a	0,68 ± 0,02 a
PB1	0,64 ± 0,01 a	0,63 ± 0,01 a	0,59 ± 0,02 a	0,60 ± 0,02 a	0,66 ± 0,04 a
PB2	0,62 ± 0,03 a	0,62 ± 0,02 a	0,59 ± 0,02 a	0,59 ± 0,01 a	0,63 ± 0,04 a
PB3	0,61 ± 0,06 a	0,63 ± 0,03 a	0,60 ± 0,01 a	0,58 ± 0,03 a	0,61 ± 0,04 a

NDVI Weißklee

Beim Weißklee wurden NDVI-Werte zwischen 0,64 und 0,71 im Jahr 2019 und 0,52 – 0,69 im Jahr 2020 gemessen (Tab. 11).

Es traten im NDVI des Weißkleees 2019 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten, 2020 jedoch zwischen den Saatzeitpunkten auf.

Die große Spannweite des NDVI im Jahr 2020 im Gegensatz zu 2019 ergab sich daraus, dass beide Saatzeitpunkte 2019 einen bodenbedeckenden Bestand ausbilden konnten, wohingegen 2020 insbesondere in der Variante PC2 kaum Weißklee vorhanden war. Demzufolge ergaben sich große Unterschiede in Höhenwachstum, Biomassenzunahme und Blattflächenentwicklung zwischen den Varianten im Jahr 2020 und führten dazu, dass beim spät gesäten Weißklee erst zum BBCH 5 ausreichend Blattmasse vorhanden war, um mit dem PolyPen Messungen durchführen zu können. Dass diese signifikant nach unten von denen der früh gesäten Varianten abwichen, ist daher nicht verwunderlich, betont allerdings die deutlichen Unterschiede zwischen den Saatzeitpunkten, da dem NDVI für Weißklee eine eher mäßige Beziehung zur Biomasseausbildung unterstellt wird¹⁰⁰. 2019 war das Wachstum des spät gesäten Weißklees stärker, was auch am früheren zweiten Saatzeitpunkt verglichen mit 2018 und 2020 lag. Dieser führte bei der Sommergerste zu hoher Konkurrenz mit dem Mohn, beim Weißklee schien jedoch ein möglichst früher Saatzeitpunkt notwendig, um überhaupt eine relevante Zweitfrucht zu etablieren.

» Die NDVI-Werte des Weißklees belegen, ähnlich wie die SPAD-Werte, das schwächere Wachstum des spät gesäten Weißklees 2020 und zeigten keine Schwächung der Kleepflanzen im Misanbau mit Mohn. Demzufolge war der Einfluss des Saatzeitpunkts auf das Weißkleewachstum stärker als der Einfluss des Mischungspartners.

Tab. 11 NDVI der Weißkleeblätter in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (BBCH) und Variante am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zum jeweiligen Messzeitpunkt (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Datum BBCH	NDVI Weißklee					
	30.05.2019 3/1	11.06.2019 4/3	01.07.2019 6/5	08.05.2020 1/0	19.05.2020 3/1	18.06.2020 6/5
C1	0,65 ± 0,02 a	0,64 ± 0,02 a	0,69 ± 0,02 a	0,58 ± 0,05 a	0,67 ± 0,02 a	0,68 ± 0,04 a
C2	-	0,67 ± 0,01 a	0,66 ± 0,05 a	-	-	0,65 ± 0,01 ab
PC1	0,64 ± 0,02 a	0,67 ± 0,03 a	0,71 ± 0,01 a	0,52 ± 0,08 a	0,64 ± 0,03 a	0,68 ± 0,02 a
PC2	-	0,65 ± 0,03 a	0,68 ± 0,05 a	-	-	0,63 ± 0,02 b

Die gemessenen Parameter verdeutlichen die positiven und negativen Auswirkungen des Misanbaus auf die Pflanzenentwicklung im Vegetationsverlauf. Da der Misanbau vorwiegend im ökologischen Anbau eingesetzt wird, ist eine herbizidlose Unkrautkontrolle wichtig, um Kulturpflanzenwachstum zu ermöglichen. Demzufolge wurde auch untersucht, inwieweit eine erhöhte Bodenbedeckung durch den Misanbau zur Unkrautregulierung beitragen kann.

5.3 Unkrautentwicklung

Die Unkraut regulierende Wirkung des Mischanbaus wird in der Literatur sehr unterschiedlich diskutiert, da die Effektivität der Unkrautunterdrückung von einer Reihe Faktoren abhängt, beispielsweise von der Wahl der Mischungspartner, Saatzeitpunkten und Saatstärken, der Vorfrucht, den Boden- und Witterungsbedingungen, dem Samenvorrat im Boden oder allgemeinen Managementfaktoren (Düngung, Bodenbearbeitung)^{24,33}. In dieser Studie wurden die Bodenbedeckung von Kulturpflanzen und Unkräutern, Unkrautanzahl, Unkrautbiomasse sowie Unkrautarten in regelmäßigen Abständen während der Vegetationszeit bestimmt. Die Unkrautregulierung im Mohn wird üblicherweise durch regelmäßiges maschinelles und manuelles Hacken durchgeführt². Im Mischanbau wäre dies nicht oder nur anfangs möglich, weshalb Arbeitszeit und somit Kosten eingespart werden könnten, sofern der Mischanbau für eine ausreichende Unkrautunterdrückung sorgt.

Die gesamten Unkrautdaten wiesen eine hohe Variabilität auf, was unter anderem an der unregelmäßigen Verteilung der Unkräuter auf dem Feld lag, aber auch auf den insgesamt eher niedrigen Unkrautdruck zurückzuführen ist.

Hoch wachsende und biomassereiche Unkräuter wie *Chenopodium album* L. können Probleme insbesondere bei der Mohnernte hervorrufen, wenn deren grünes Pflanzenmaterial zusammen mit den trockenen Mohnkapseln geerntet wird und das Erntegut verunreinigt¹⁰¹. Dies spielt vor allem beim Sommermohn eine Rolle, da *Chenopodium album* L. aufgrund seiner Hauptkeimzeit von April bis Mai vorzugsweise in Sommerungen vorkommt¹⁰². Nachgelagert müssen dann Trocknungs- und Reinigungsschritte erfolgen, um handelsfähige Mohnrohware zu erhalten. Eine Trennung von *C. album* Samen von den Mohnsamen ist aufwendig, da sie eine ähnlich dunkle Farbe und geringe Größe (0,7 – 1,5 mm) aufweisen¹⁰². Aus diesem Grund stand die Unkrautsituation zum Erntezeitpunkt besonders im Fokus der Arbeit und wird im Folgenden hauptsächlich dargestellt.

5.3.1 Bodenbedeckung und Unkrautdeckungsgrad

Die Bodenbedeckung durch Unkräuter sowie durch die einzelnen Kulturpflanzen zum Erntezeitpunkt ist in Abb. 12 zu sehen. Die kumulierte Bodenbedeckung (ohne Unkräuter) zur Ernte war in den Mohn-Reinsaaten wie erwartet am geringsten und reichte von 55,9% ± 4,3% 2018 zu 68,3% ± 17,8% 2020. Nur die spät gesäte Weißklee-Reinsaat (PC2) zeigte 2018 ähnlich geringe Werte, da sie äußerst spärlich wuchs.

Der gewünschte Effekt einer erhöhten Bodenbedeckung durch den Mischanbau wurde von den Varianten PC1, PB1, PB2 und PB3 erreicht.

Die Kombination von Mohn mit jeglicher Saatstärke der Sommergerste sowie mit früher Weißklee-Aussaat resultierte in einer Bodendeckung von über 90% in den Jahren 2019 und 2020 sowie über 80% im Jahr 2018. Der spät gesäte Weißklee bildete insbesondere 2018 und 2020 wenig Biomasse und konnte daher nur 2019 zu einer Bodenbedeckung von insgesamt 97% in Variante PC2 beitragen.

Es konnte aufgrund hoher Standardabweichungen in den einzelnen Varianten kein signifikanter Unkraut unterdrückender Effekt der Mischanbausysteme im Vergleich zur Mohn-Reinsaat ermittelt werden. Die Sommergerste in Reinsaat sowie in Mischung mit Mohn wies tendenziell die geringste Unkrautdeckung auf.

Die ungleichmäßige räumliche Verteilung von Unkräutern ist ein bekanntes Phänomen und erschwert grundsätzlich die Erfassung belastbarer Daten bezüglich ihrer Regulierung¹⁰³. Diese Variabilität war vor allem in den Mohn-Reinsaaten hoch, die zur Ernte eine Unkrautdeckung von 1,3% – 20% im Jahr 2018, 4,5% – 43,3% im Jahr 2019 sowie 0% – 20% im Jahr 2020 aufwiesen. Dadurch, dass einzelne *C. album* Pflanzen strauchartig in die Höhe wachsen, verursachen bereits wenige Individuen hohe Deckungsgrade und Biomassen, was zur hohen Streuung der Daten beitrug. Auch wenn dadurch kein signifikanter Effekt der Mischbauvarianten auf den Unkrautdeckungsgrad bewiesen werden konnte, zeigen die geringeren Standardabweichungen der Mohn-Sommergerste-Varianten, die bei maximal 4,4% (PB3, 2020) lagen, dass in der Kombination von Mohn mit dem Mischungspartner Sommergerste geringere Schwankungen im Unkrautbesatz vorlagen als in der Mohn-Reinsaat.

»» Dem Mischbau wurde ein ertragsstabilisierender Effekt zugeschrieben^{56,104,105}. Die vorliegenden Daten legen nahe, dass auch ein stabilisierender Effekt in Richtung Unkrautdeckung erzielt werden kann, was bedeutet, dass größere Schwankungen im Unkrautdeckungsgrad durch Mischbau vermieden werden.

Gleichzeitig wurde im Mohn-Sommergerste-Gemisch ein etwas niedrigerer Unkrautdeckungsgrad im Vergleich zu den übrigen Varianten festgestellt, da im Mittel zur Ernte unter 4% Unkrautdeckung in jeglicher Mohn-Sommergerste-Kombination vorhanden waren, 2018 und 2019 waren es sogar nur unter 2%. Im Hinblick auf *C. album* bedeutete dies, dass weniger *C. album* Pflanzen in den Sommergerstenparzellen vorhanden waren, worauf auch die geringere Unkrautanzahl (s.u.) hinweist. In vielen Mischbauvarianten wird der Unkraut unterdrückende Effekt nur als Funktion der erhöhten totalen Pflanzendichte gesehen^{24,44}. Die Bestandesdichte lag in den hier untersuchten Varianten ebenfalls höher als in den Reinsaaten.

Trotzdem ergeben sich Hinweise, dass die Sommergerste selbst eine Unkraut unterdrückende Wirkung besitzt, da auch in den Sommergerste-Reinsaaten bis auf eine Ausnahme (B1, 2020) nicht mehr als 2% Unkrautdeckung gemessen wurde. Ähnlich wie beim Mohn wurden Bestandesdichten der Sommergerste von maximal 160 Pflanzen m⁻² gezählt. Deren räumliche Verteilung in der Reinsaat war allerdings breiter als die des Mohns, was wiederum einen Effekt auf die Unkrautentwicklung gehabt haben könnte. Die effektivste Unkrautregulierung zeigen Mischanbausysteme, die Pflanzen mit schnellem, initialem Wachstum beinhalten, die einen dichten Bestand bilden²⁴. Im Falle der Sommergerste werden alle drei genannten Faktoren erfüllt, die dem Unkraut weniger Raum und Zeit geben, sich zu entwickeln. Eine hohe Unkrautunterdrückung zu erzielen, ohne dabei den Ertrag der Hauptfrucht zu schmälern, ist jedoch eine komplexe Aufgabe⁵¹. Die Biomassedaten des Mohns zeigen, dass diese teilweise auch unter dem Einfluss der Sommergerste zurückgingen, da unter anderem die Entwicklung des Mohns initial deutlich langsamer verläuft.

»» Gemeinsam mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den Daten zu Biomasse, Pflanzenhöhe, Blattfläche und C/N-Verhältnissen, scheinen höhere Saatstärken der Sommergerste zwar die Konkurrenz zum Mohn zu erhöhen, verstärken aber auch die Konkurrenz mit dem Unkraut, weshalb nahezu unkrautfreie Bestände der Mischungen von Mohn mit Sommergerste auftraten.

Weißklee in Reinsaat war nicht in der Lage, Unkraut zu unterdrücken, insbesondere als Spätsaat. Der höchste Unkrautdeckungsgrad wurde in der Variante C2 mit 28,4% ± 18,6% (2018) und 45,8% ± 30,2% (2020) gemessen, was jeweils signifikant über der Unkrautdeckung der übrigen Varianten lag, auch 2019. Dazu trug vermutlich das geringe Wachstum der C2-Varianten bei. Ein ähnlich hohes Unkrautauftreten wurde nur für die Variante C2 2019 ermittelt, das bei 18,5% ± 7,5% lag, was ebenfalls signifikant mehr war als das der übrigen Varianten. In Kombination mit dem Mohn erzeugten PC1 und PC2 jedoch nur eine Unkrautdeckung von unter 5%. Eine Ausnahme davon bildete PC2 2020 mit deutlich höherem Unkrautbesatz, was aber wiederum dem geringen Weißkleeaufwuchs in diesem Jahr geschuldet war.

Gerhards et al. (2018) stellten keine Unterschiede in der Unkrautdichte zwischen früh und spät gesättem Weißklee fest, der als Untersaat in Getreide eingebracht wurde⁶⁷. Ähnlich dazu zeigten die Mohn-Weißklee-Mischungen keine Unterschiede in der Unkrautdeckung, wichen aber positiv von der hohen Unkrautdeckung in den Weißklee-Reinsaaten ab. Dass in der PC2-Variante insbesondere 2018 wenig Unkraut gemessen wurde, kann weniger auf die erhöhte Bodenbedeckung als auf den Effekt der Drillsaat zurückgeführt werden⁶⁷.

Durch die erneute Bewegung des Bodens bei der Weißkleeinsaat und den darauffolgenden heißen und trockenen Sommer, waren die Keimbedingungen sowohl für Weißklee als auch für das Unkraut erschwert. Bei Untersuchungen von den Hollander et al. (2007) wurden acht verschiedene Kleearten (u.a. Perserklee, Weißklee, Erdklee und Rotklee) als Untersaat in eine Hauptfrucht im Hinblick auf ihre Konkurrenzfähigkeit gegen Unkräuter getestet.

Dabei wurde der Klee gemeinsam mit oder bereits vor der Hauptfrucht (Lauch) ausgesät. Die Untersaat mit Weißklee stellte sich insgesamt als bester Kompromiss zwischen Unkrautunterdrückung und Ertragsminderung der Hauptfrucht heraus⁵¹. Allerdings erwies sich *C. album* als nahezu unbeeinflusst von jeglicher Kleespezies, was auch erklärt, warum der Unkraut unterdrückende Effekt des Weißkleees in der vorliegenden Studie eher gering war.

»» Trotz seiner schwachen Unkraut regulierenden Wirkung in Reinsaat, konnte der Weißklee tendenziell zu niedrigeren Unkrautdeckungsgraden in Mischung mit Mohn beitragen und das insbesondere, wenn er früh ausgesät wurde und ausreichend Biomasse bilden konnte.

Die Entwicklung des Unkrautdeckungsgrads im vorherigen Zeitverlauf zeigte in allen drei Jahren ähnliche Verhältnisse zwischen den Varianten, die sich zur Ernte hin zuspitzten. Beispielsweise lag der Unkrautdeckungsgrad der Weißklee-Reinsaaten in allen drei Jahren schon ab Mitte Juni über 10%, während die übrigen Varianten darunter blieben. Die Ausnahme bildete die Variante C1 2020, bei der durchgängig ebenfalls ein geringerer Unkrautdruck festgestellt wurde. Die Reinsaaten der Sommergerste sowie die Mischungsvarianten von Mohn mit Sommergerste und mit Weißklee blieben konstant unter 10% Unkrautdeckungsgrad, 2018 und 2019 sogar unter 5%. Im Gegensatz dazu wurde in der Mohn-Reinsaat ein kontinuierlicher Anstieg des Unkrautdeckungsgrads bis zur Ernte verzeichnet. Dieser Anstieg ging jedoch nicht weit über 10% hinaus.

Es muss beachtet werden, dass die Versuche zwar nach ökologischen Maßstäben durchgeführt, jedoch auf einem grundsätzlich konventionell bewirtschafteten Versuchsgut mit geringerem Unkrautdruck stattfanden. Aussagefähigere Erkenntnisse zu den Unkraut regulierenden Effekten ließen sich daher unter Bedingungen mit stärkerem Unkrautwachstum messen. Wichtig wäre daher die Überprüfung der Hypothese beispielsweise auf extensiv oder langjährig ökologisch bewirtschafteten Flächen. Zusätzlich könnten über angepasste Boniturtechniken, beispielsweise größere Boniturflächen oder gezielte Bonituren von *C. album*, die Variabilität der Daten verringert und Effekte des Mischanbaus auf das Unkrautvorkommen deutlicher gezeigt werden.

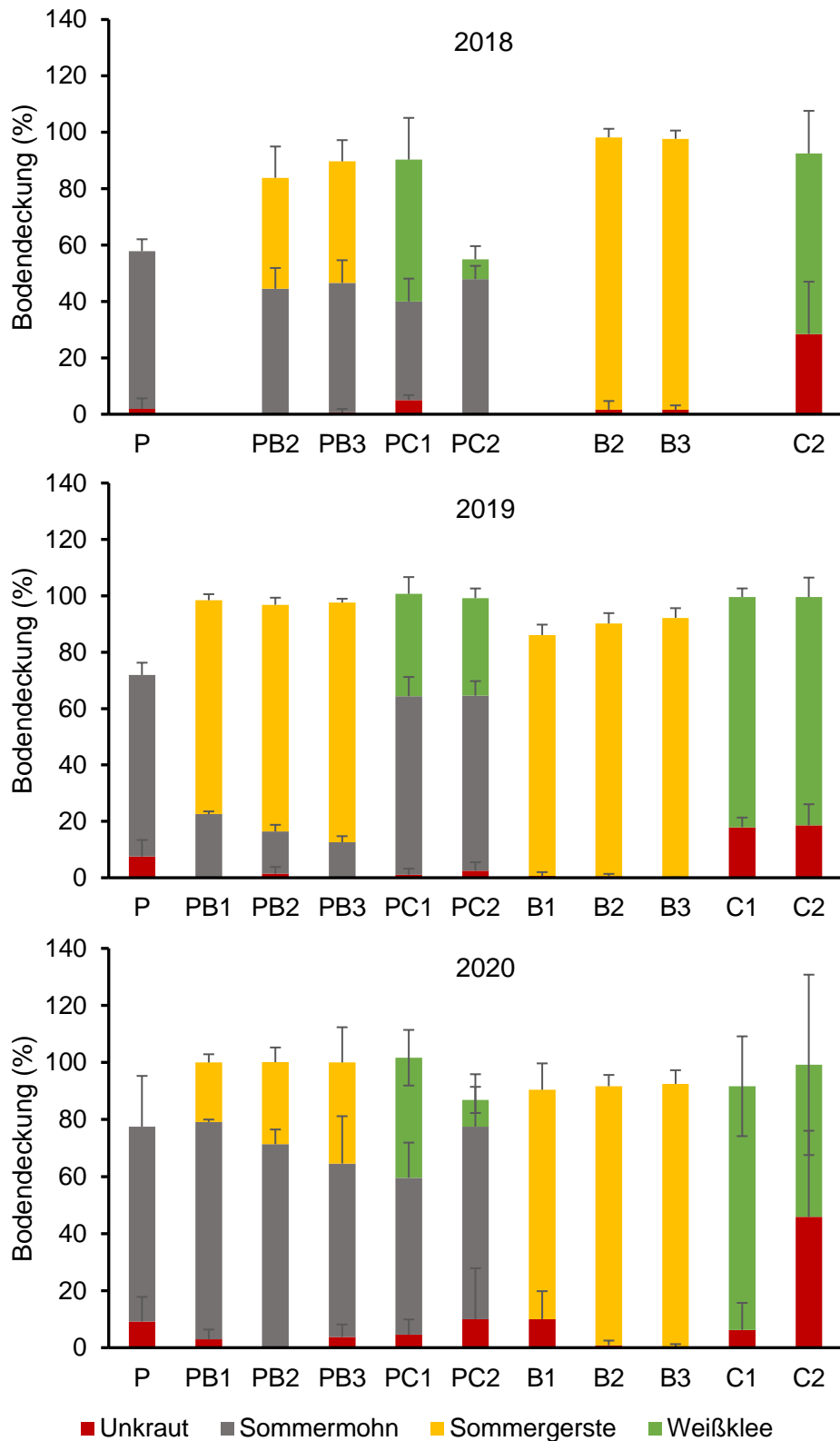


Abb. 12 Bodendeckungsgrad (%) von Unkraut, Sommermohn, Sommergerste und Weißklee in den jeweiligen Varianten zum Zeitpunkt kurz vor der Ernte am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

5.3.2 Unkrautanzahl und Unkrautbiomasse

Unkrautanzahl und Unkrautbiomasse wurden nur 2019 und 2020 ermittelt, zeigten jedoch dieselben Tendenzen wie die Unkrautdeckungsgrade. Es gab die Entwicklung zu erhöhten Unkrautanzahlen in den Parzellen der Varianten P, C1 und C2 2019, diese Tendenz war 2020 weniger stark ausgeprägt. Zur Ernte 2019 enthielten die Mohn-Reinsaaten 3,3 – 53,3, C1 6,6 – 30,0 und C2 13,3 – 26,7 Unkrautpflanzen m^{-2} im Vergleich zu keinerlei Unkraut in den Varianten PB1, PB3 und B3 und unter fünf Unkräutern pro m^2 in den übrigen Varianten. Aufgrund hoher Streuung in den Daten waren diese Unterschiede jedoch nicht signifikant. Vergleichbar waren die höchsten Unkrautzahlen 2020 bei 0 – 10 Unkräutern m^{-2} in Variante P und 3,3 - 10 in Variante C2 gegenüber keinerlei Unkraut bei PB2 und unter 5 Unkräutern m^{-2} in den übrigen Varianten. Die Unkrautbiomasse war durch ähnlich hohe Variabilität gekennzeichnet, die besonders hoch in den Reinsaaten verglichen mit den Mischbauvarianten war und eine hohe Diskrepanz zwischen den einzelnen Parzellen zeigte. In der Literatur wird eine Reduzierung der Unkrauttrockenmasse durch Weißkleeuntersaat in Weizen und anderen Sommergetreiden von 36% – 76% angegeben^{67,106}. Diese hohe Unkraut regulierende Wirkung des Weißkleees konnte nur ansatzweise für die Mischungen mit Mohn nachvollzogen werden. Szumigalski und van Acker (2005) experimentierten mit unterschiedlichen annualen Mischbauvarianten und zeigten, dass die Umweltbedingungen einen dominanten Effekt auf Unkrautdichte und -biomasse hatten, der stärker war als der Effekt des Mischbaus³³.

»» Die Variabilität in den Unkrautanzahl und -biomassedaten war insbesondere in der Mohn-Reinsaat hoch. Eine statistische Differenzierung gegenüber den Mischbauvarianten war nicht möglich. Nichtsdestotrotz tendierten die Mittelwerte von Unkrautdeckungsgrad, -anzahl und -biomasse der Mischbauvarianten (insbesondere mit Sommergerste) dazu, unter denen der Mohn-Reinsaaten zu liegen bei insgesamt geringeren Standardabweichungen, weshalb nur ein geringer aber dennoch positiver Einfluss des Mischbaus auf die Unkrautentwicklung festgehalten werden kann.

5.3.3. Unkrautarten

Es traten über die Jahre hinweg bestimmte charakteristische Unkrautarten auf und ihre Verteilung über die verschiedenen Varianten wurde kontinuierlich überprüft. Eine qualitative Übersicht über das Vorkommen der einzelnen Arten in den jeweiligen Varianten und Jahren gibt Tab. A13 im Anhang.

Neben *Chenopodium album*, waren die insgesamt häufigsten Unkrautarten über alle Varianten und Jahre hinweg *Cirsium arvense*, *Matricaria* sp. und *Solanum nigrum*.

Es fiel auf, dass der Weiße Gänsefuß (*Chenopodium album* L.) das dominante Unkraut in allen Versuchsjahren war und in jeder Versuchsvariante vorkam. Da er auch die höchste Unkrautzahl und -biomasse ausmachte, kann er als das problematischste Unkraut im Versuch angesehen werden. In einer Studie zu ungarischem Mohn wurde der Klatschmohn (*Papaver rhoeas* L.) als häufigste Unkrautart determiniert, aber *C. album* zählte ebenfalls zu den wichtigsten Unkräutern, die mit dem Sommermohn um Wasser und Nährstoffe konkurrierten¹⁰⁷. Obwohl der weiße Gänsefuß nahezu ubiquitär anwesend war, wurde er 2019 nicht in den Varianten PB1 und PB3 identifiziert. Dies passt zu den Unkrautdeckungsgrad-Daten, die für die Varianten mit Sommergerste am geringsten ausfielen. In den Reinsaaten der Sommergerste und des Mohns sowie in den Mischanbauvarianten wurden insgesamt 9 - 12 verschiedene Unkrautarten ermittelt. Im Gegensatz dazu traten in den Parzellen von C1 und C2 fast alle der insgesamt identifizierten Arten zu mindestens einem Zeitpunkt auf (15 verschiedene Arten).

Generell war 2018 das Jahr mit den geringsten Unterschieden zwischen den Versuchsvarianten, was die Diversität an Unkrautarten betrifft. Dafür wurde 2019 festgestellt, dass die Mischanbauvarianten mit Weißklee und Sommergerste weniger verschiedene Unkräuter aufwiesen als Mohn oder Weißklee in Reinsaat. 2020 gab es insgesamt die geringste Anzahl an Unkrautarten, davon waren die häufigsten *Chenopodium album*, *Solanum nigrum* und *Stellaria media*. Die Zusammensetzung der Unkrautarten im Mohn wird vor allem durch Managementfaktoren wie Vorfrucht, Herbizide und Düngung sowie Umweltbedingungen wie Temperatur, Bodenart und Bodengehalte an Magnesium und Calcium bestimmt¹⁰⁷. Im vorliegenden Fall unterschieden sich die Versuchsflächen nicht im Hinblick auf die Bodenbedingungen, weshalb der Haupteinfluss auf das Unkrautvorkommen bei anderen Faktoren wie der Vorfrucht, den unterschiedlichen Aussatterminen oder Witterungsunterschieden gesucht werden muss. Als Vorfrucht dienten zweimalig (2018 und 2019) Winterweizen sowie Sommerweizen 2020. Das Samenpotenzial von *Chenopodium album* schien unabhängig von der Vorfrucht hoch zu sein.

Dagegen war auffällig, dass 2020 (Vorfrucht Sommerweizen) weder *Matricaria* sp., noch *Cirsium arvense* oder *Senecio vulgaris* im Versuch erfasst wurden, wohingegen diese Arten 2018 und 2019 (Vorfrucht Winterweizen) zu den häufigsten Unkräutern zählten.

Ein Problem stellte 2018 und 2019 auch das gemeine Kreuzkraut (*Senecio vulgaris*) dar. *Senecio vulgaris* und *Solanum nigrum* können als Unkräuter nicht im Bestand toleriert werden, da sie toxische Alkaloide, wie Pyrrolizidinalkaloide (*Senecio vulgaris*) oder Solanidin (*Solanum nigrum*), produzieren, die die menschliche Gesundheit beeinträchtigen können^{108,109}. Beide traten vorwiegend in der Mohn-Reinsaat oder in Varianten mit Weißklee auf, beispielsweise wurde *Senecio vulgaris* 2019 nur in den Varianten P, C1, C2, PC1 und PC2 aber nicht in den Varianten mit Sommergerste gefunden. Dies könnte Bedeutung erhalten, wenn Mohn auf Böden angebaut wird, die ein hohes Wachstumspotenzial für diese Problemunkräuter besitzen, was beispielsweise durch Mohn-Sommergerste-Mischanbau verbessert werden kann.

»» Im Falle des Mohn-Sommergerste-Gemischs erwies sich Sommergerste als hohe und dichte Zweitfrucht, die große Konkurrenzskraft gegenüber den Unkräutern aber teilweise auch gegenüber dem Mohn zeigte, weshalb zwischen Unkrautunterdrückung und Ertragsminderung abgewogen und dementsprechend die Saatstärken und Saatzeitpunkte der Sommergerste gewählt werden müssen. Niedrig wachsende Untersaaten wie Weißklee können ebenfalls für ausreichend Bodenbedeckung sorgen, jedoch ist der Unkraut regulierende Effekt in der kurzen Kulturdauer des Sommermahns variabler. In jedem Fall sollte auf die Auswahl einer Fläche mit geringem Unkrautdruck geachtet werden¹³, um sicherzustellen, dass der Mischanbaueffekt ausreicht, da eine mechanische oder manuelle Unkrautregulierung durch die Zweitfrucht erschwert wird.

Die vorangegangenen Ergebnisse der Pflanzenentwicklung im Vegetationsverlauf deuten bereits an, dass sich eine hohe Abhängigkeit des Mischanbauerfolgs von Umwelt- und Managementfaktoren ergibt. Ausschlaggebend sind nichtsdestotrotz die Mohnsamen- und Gerstenkornerträge, die Auskunft über die Eignung der Mischungspartner geben und im Folgenden vorgestellt werden.

5.4 Erträge

5.4.1 Mohnerträge

Aus dem Pflanzenwachstum wurde ersichtlich, dass es deutliche jahresbedingte Unterschiede gab, diese fanden sich auch in den Erträgen wieder. Die Mohnerträge in Reinsaat lagen 2018, 2019 und 2020 jeweils bei 830, 1.293 und 909 kg ha⁻¹. Demzufolge orientieren sich die ermittelten Erträge aus dem Misanbau an jeweils unterschiedlichen Referenzniveaus abhängig vom Anbaujahr. Die Mohnerträge aus den Mischungsvarianten mit Weißklee (PC1, PC2) und Sommergerste (PB1, PB2, PB3) sind im Vergleich zu diesen Referenzerträgen der Reinsaat (P) in Abb. 13 dargestellt.

Hauptsächlich zeigten die Mohnertragsdaten, dass die Mischung von Mohn mit Weißklee kontinuierlich vergleichbare Erträge zur Mohn-Reinsaat produzierte, wohingegen Mohn in Kombination mit Sommergerste unterschiedlich jahresbedingt reagierte und nur in zwei von drei Jahren ähnlich hohe Erträge wie die Mohn-Reinsaat zeigte.

Zwischen den drei Versuchsjahren herrschten große Schwankungen im Ertragsniveau, dabei lagen die Reinsaat Mohnerträge jedoch immer etwas über dem zehnjährigen europäischen Mittel von 756 kg ha⁻¹ (2008 – 2018)¹¹. 2019 kann in dem Fall als ein überdurchschnittlich gutes Mohnjahr gesehen werden, da dort die Mohnerträge 1.293,1 ± 109,6 kg ha⁻¹ betragen.

In Mischung mit Weißklee konnten in allen Jahren ähnlich hohe Mohnerträge wie in Reinsaat erzielt werden, unabhängig davon, ob der Weißklee direkt mit dem Mohn oder später ausgesät wurde. 2018 und 2020 zeigte die Variante PC2 sogar die höchsten Erträge mit 1.005 und 942 kg ha⁻¹. Dass zwischen Mohn-Reinsaat und Mischung mit Weißklee keine signifikanten Unterschiede im Mohnsamenertrag messbar waren, deutet an, dass die Erträge unbeeinflusst von der Konkurrenz durch den Weißklee waren.

Ähnlich geringe Unterschiede zwischen Mohn-Reinsaat und Mischung mit Weißklee wurden bereits in den Pflanzenentwicklungsparametern deutlich. Beispielsweise gab es keine signifikanten Unterschiede in Trockenmasse, Höhenwachstum, Blattfläche oder Stickstoffgehalt zwischen Mohn in Reinsaat und Mohn mit Weißklee. Niedrig wachsende Mischungspartner wie der Weißklee sind in der Lage, die Erträge der Hauptfrucht zu senken, wenn Nährstoffe oder Wasser knapp sind und die Konkurrenz darum hoch²⁴. Die Mohnerträge reagierten nicht auf den Weißklee, was darauf hindeutet, dass die Konkurrenzsituation in Bezug auf die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit eher gering war. In einem vergleichbaren Experiment von Gerhards et al. (2018) mit Weißklee und Sommergetreide wurde der Weißklee ebenfalls zu verschiedenen Saatzeitpunkten (früh und 30 Tage nach Aussaat der Hauptfrucht) in den Bestand eingebracht und zeigte keinen Einfluss auf die Erträge der Hauptfrucht⁶⁷.

Dass der Saatzeitpunkt des Weißkleees weder bei Gerhards et al. (2018) noch in dieser Studie einen Effekt auf die Hauptfruchterträge zeigte, lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Zeitpunkt der Einbringung der Weißklee-Untersaat flexibel gewählt werden kann.

Mit dem Misanbau einen Ertragsvorteil zu generieren, gelingt dann, wenn die beiden Mischungspartner nicht dieselbe ökologische Nische besetzen und die interspezifische Konkurrenz schwächer ist als die intraspezifische³⁰. Im vorliegenden Fall war vermutlich die Überlappung der ökologischen Nischen von Mohn und Weißklee so gering, dass der Mohn sein volles Ertragspotenzial ausschöpfen konnte. Zusätzlich konnten durch den Weißklee die übrigen Vorteile des Misanbaus, wie Erosionsminderung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch erhöhte Bodenbedeckung oder Stickstoff-Fixierung ausgenutzt werden, ohne die Mohnerträge zu beeinflussen^{63,64,104}. Daraus lässt sich insgesamt schließen, dass Weißklee auf fruchtbaren Böden eine vielversprechende Co-Kultur für Sommermohn ist, da über den Misanbau ein (ökologischer) Mehrwert erreicht werden kann, ohne die Mohnerträge zu schmälern.

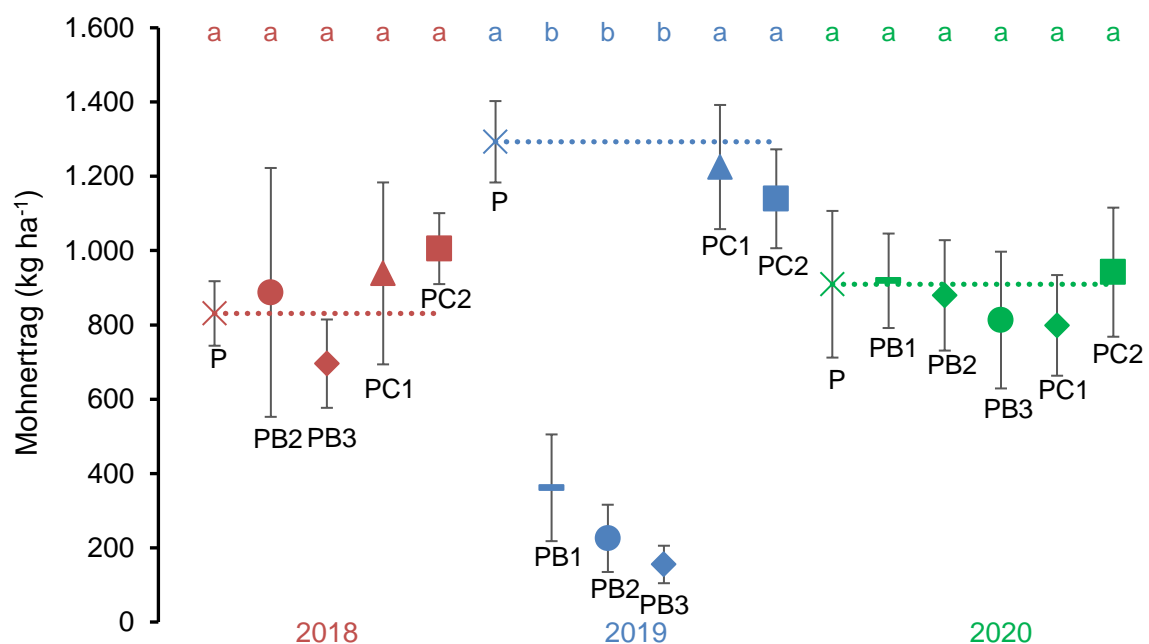


Abb. 13 Sommermohn Samenerträge (kg ha⁻¹) in Reinsaat (P) im Vergleich zur Mischsaat mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) und Weißklee zu zwei Aussaatzeitpunkten (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in jedem Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Im Misanbau von Mohn mit Sommergerste konnten in zwei von drei Jahren (2018 und 2020) vergleichbare Mohnsamenerträge in der Mischung im Verhältnis zur Reinsaat erreicht werden (Abb. 13). Dies ist ein vielversprechendes Ergebnis, da Gerste eine sehr konkurrenzstarke Zweitfrucht ist⁴², aber den Mohnertrag nur 2019 signifikant verringerte.

Im Jahr 2019 lagen die Mohnerträge in den Mischungen mit Sommergerste zwischen 155 (PB3) und 361 (PB1) kg ha⁻¹, was deutlich niedriger war als die Mohnerträge in Reinsaat mit 1.293 kg ha⁻¹. Neben den signifikanten Ertragseinbußen in der Mischung wurde tendenziell sichtbar, dass höhere Saatstärken bei der Sommergerste eine noch stärkere Verringerung der Mohnerträge verursachten, aber dieser Effekt war nicht so stark wie der Einfluss des Jahres. Trotzdem können auch geringfügige Mehrerträge eine ökonomische Bedeutung haben, weshalb im Hinblick auf die Sicherung der Mohnsamenerträge eine geringere Sommergersten-Saatstärke vorteilhaft zu sein scheint.

Dass das Jahr 2019 für den Mohn in Mischung mit Gerste im Vergleich zu den übrigen beiden Jahren deutlich schwächere Pflanzen ausbildete, wurde bereits in geringeren Biomassen, Pflanzenhöhen, N-Gehalten und Blattflächen deutlich. Wie beispielsweise für die Biomasse gezeigt, setzte die Konkurrenz bereits zu einem frühen Entwicklungsstadium ein und wirkte sich schließlich auch ertragsrelevant aus. Der frühe Saatzeitpunkt sowie die durch höhere Niederschläge gekennzeichneten Witterungsbedingungen förderten das Gerstenwachstum in diesem Jahr, was in deutlich stärkeren Konkurrenzeffekten gegenüber dem Mohn resultierte.

Demzufolge bestimmt das Zusammenspiel von Saatzeitpunkt und Klimafaktoren maßgeblich den Erfolg des Mohn-Sommergersten-Mischanbaus. Brooker et al. (2008) zeigten in ihrem Review, dass die vorherrschenden Umweltbedingungen eine zentrale Rolle in der Ausprägung der Interaktionen zwischen den einzelnen Pflanzen spielen¹¹⁰. Die Begriffe Competition und Facilitation wurden bereits von Vandermeer (1989) als fundamentale Prozesse in der Beziehung zwischen zwei Mischungspartnern definiert³⁶. Competition und Facilitation ändern sich in Abhängigkeit der Härte der Wachstumsbedingungen¹¹⁰, was unter anderem eine Erklärung dafür liefern kann, weshalb die Konkurrenz in den Jahren geringer ausfiel, in denen Wasser ein limitierender Wachstumsfaktor war. Der Mohn konnte jedoch trotz anfangs geringerer Wasserverfügbarkeit in den Jahren 2018 und 2020 (Tab. 3) normal wachsen. Dies deutet darauf hin, dass dieser anpassungsfähig an widrigere Wachstumsbedingungen ist, was im Hinblick auf die veränderten Witterungsbedingungen im Zeichen des Klimawandels von großer Relevanz sein kann.

2019 lagen die initialen Boden-Stickstoffgehalte vergleichsweise niedrig (s. Kapitel 5.2.2.). Nichtsdestotrotz lagen die Maximalerträge des Mohns 2019 bei über 1.000 kg ha⁻¹ und damit über denen von 2018 und 2020, was dafürspricht, dass Stickstoff kein stark begrenzender Wachstumsfaktor war. In der Kombination mit Sommergerste könnte Konkurrenz um Stickstoff jedoch zu einem verminderten Mohnwachstum beigetragen haben, da die Mohnpflanzen deutlich geringere Stickstoffgehalte aufwiesen (s. Kapitel 5.2.1.). Dies zeigt, dass bei hoher Konkurrenzkraft der Zweitkultur, die Konkurrenz um begrenzte Nährstoffressourcen im Mischanbau größer ist als in Jahren, in denen das Wachstum beider Mischungspartner

grundsätzlich limitiert ist. Diese Schlussfolgerungen müssen jedoch vor dem Hintergrund der vorherrschenden Bodenbedingungen gesehen werden, da die fruchtbaren Parabraunerden am Campus Klein-Altendorf in der Lage sind, Defizite in der Wasser- oder Nährstoffversorgung bis zu einem gewissen Grad abzupuffern. Auf anderen Standorten könnten geringe Stickstoffgehalte im Boden auch zu schlechterer Verfügbarkeit in der Reinsaat und insgesamt deutlich gehemmtem Wachstum des Mohns geführt haben.

Der Mohn-Strohertrag gab ein ähnliches Bild wie das der Samenerträge ab, da ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen P, PC1 und PC2 ermittelt werden konnten und das in allen drei Jahren (Tab. 12). Die Stroherträge aus der Mischung mit Sommergerste (PB1, PB2, PB3) lagen 2019 signifikant unter denen von Mohn und Mohn mit Weißklee, während dies in den anderen beiden Jahren nicht der Fall war. Die Tausendkornmasse des Mohns unterschied sich nicht signifikant zwischen den Varianten und lag zwischen 0,41 (PB3, 2019) und 0,49 (P und PB3, 2020). Dasselbe galt für die Kapselzahl pro Pflanze, die 2020 im Mittel $1,23 \pm 0,08$ betrug. 2019 lag sie bei nur $0,94 \pm 0,03$ und 2018 bei $1,02 \pm 0,09$. Mit etwa einer Kapsel pro Pflanze war die Bestockung der Mohnpflanzen eher gering. Dies hing insbesondere mit der hohen Saatedichte zusammen, die eine hohe Pflanzenzahl m^{-2} und wenig Platz zur Seitensprossbildung der Einzelpflanzen bedingte. Die Keimung erfolgte 2018 und 2019 gleichmäßiger als 2020, sodass in den ersten beiden Jahren im Mittel 202 ± 33 (2018) und 210 ± 28 (2019) Pflanzen m^{-2} nach Feldaufgang gezählt wurden, wohingegen es 2020 nur 69 ± 44 Pflanzen m^{-2} waren. Diese Unterschiede setzten sich bis zur Ernte fort, weshalb die Pflanzenzahl m^{-2} zur Ernte 2018 und 2019 in den meisten Varianten immer noch über 100 betrug (Tab. 12). Der Rückgang der Pflanzenzahl 2018 und 2019 von Aussaat bis Ernte lässt auf einen Ausdünnungsvorgang durch intraspezifische Konkurrenz schließen. Der Erhalt von etwa 65 – 69 Pflanzen m^{-2} von Aussaat bis Ernte 2020 deutet daraufhin, dass Bestandesdichten unter 100 Pflanzen m^{-2} nicht zu intraspezifischer Konkurrenz führen und trotzdem für die Ertragsbildung ausreichend sind.

Je niedriger die Pflanzenzahl m^{-2} , desto höher liegt die Kapselzahl pro Pflanze. Dies wurde beispielsweise 2020 ersichtlich mit im Mittel 65 Pflanzen m^{-2} bei 1,23 Kapseln pro Pflanze im Vergleich zu 0,94 Kapseln pro Pflanze bei 104 Pflanzen m^{-2} 2019. Nur 2019 wurden signifikante Unterschiede in der Kornzahl pro Kapsel zwischen den Varianten gemessen. Der Mohn litt in diesem Jahr im Mischbau unter der Konkurrenz der Sommergerste, weshalb deutlich weniger Pflanzen m^{-2} in den Mischungsvarianten PB2 und PB3 gezählt wurden im Vergleich zur Reinsaat und weniger als die Hälfte an Körnern pro Kapsel in PB3 (801,5) im Vergleich zur Mohn-Reinsaat (2.085,3). Hohe Kornzahlen pro Kapsel sprechen auch für dickere Kapseln, insbesondere 2020, was damit zusammenpasst, dass eine geringe Bestandesdichte die Ausbildung größerer Kapseln fördert¹⁶.

Tab. 12 Sommermohnertragsdaten in Reinsaat (P) im Vergleich zur Mischsaat mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) und Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für jeden Parameter in jeweiligen Versuchsjahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Jahr	Variante	Samen Ertrag (kg ha ⁻¹)	Stroh Ertrag (kg ha ⁻¹)	Tausend-kornmasse (g)	Pflanzen m ⁻²	Kapseln pro Pflanze	Samenzahl pro Kapsel
2018	P	830,8 a ± 86,9	2.748,2 a ± 418,6	0,44 a ± 0,03	156,2 a ± 18,1	1,00 a ± 0,05	1.245,3 a ± 286,9
	PB2	887,5 a ± 335,1	2.580,0 a ± 626,1	0,44 a ± 0,03	118,8 a ± 17,1	1,04 a ± 0,07	1.679,1 a ± 684,3
	PB3	695,6 a ± 119,0	2.392,5 a ± 285,9	0,44 a ± 0,02	128,5 a ± 37,1	0,98 a ± 0,05	1.347,3 a ± 506,9
	PC1	938,7 a ± 245,0	2.552,6 a ± 843,7	0,48 a ± 0,02	107,3 a ± 26,7	1,09 a ± 0,08	1.748,4 a ± 528,1
	PC2	1.005,4 a ± 95,5	2.822,8 a ± 191,4	0,45 a ± 0,01	132,8 a ± 15,6	0,96 a ± 0,15	1.778,5 a ± 353,4
2019	P	1.293,1 a ± 109,6	3.634,4 a ± 719,0	0,44 a ± 0,02	158,2 a ± 17,8	0,92 a ± 0,04	2.085,3 ab ± 257,0
	PB1	361,5 b ± 143,7	1.104,5 b ± 414,0	0,42 a ± 0,02	86,5 bc ± 41,4	0,91 a ± 0,11	1.204,0 cd ± 435,8
	PB2	225,3 b ± 90,6	601,7 b ± 273,2	0,43 a ± 0,01	52,5 c ± 30,3	0,97 a ± 0,15	1.349,8 bcd ± 637,9
	PB3	154,9 b ± 50,5	402,6 b 106,2	0,41 a ± 0,02	52,5 c ± 17,7	0,91 a ± 0,12	801,5 d ± 90,5
	PC1	1.225,0 a ± 167,1	2.880,1 a 387,7	0,43 a ± 0,03	118,5 ab ± 42,9	0,96 a ± 0,06	2.683,8 a ± 593,3
	PC2	1.139,6 a ± 133,1	3.042,1 a ± 247,9	0,44 a ± 0,02	149,7 a ± 9,6	0,93 a ± 0,02	1.878,6 abc ± 162,2
2020	P	909,4 a ± 197,4	2.552,2 a ± 431,0	0,49 a ± 0,03	65,3 a ± 22,1	1,40 a ± 0,19	4.277,0 a ± 557,1
	PB1	918,8 a ± 127,2	2.238,3 a ± 202,8	0,49 a ± 0,03	69,7 a ± 12,7	1,27 a ± 0,12	4.344,4 a ± 864,5
	PB2	879,5 a ± 148,7	2.161,7 a ± 338,1	0,50 a ± 0,01	67,0 a ± 28,0	1,45 a ± 0,51	4.140,9 a ± 476,6
	PB3	813,0 a ± 184,1	1.880,8 a ± 336,1	0,49 a ± 0,02	52,3 a ± 10,6	1,51 a ± 0,19	4.234,7 a ± 189,3
	PC1	798,7 a ± 135,5	1.844,2 a ± 367,1	0,48 a ± 0,03	65,5 a ± 26,1	1,42 a ± 0,31	3.853,6 a ± 572,4
	PC2	941,9 a ± 173,8	2.630,8 a ± 396,9	0,48a ± 0,03	68,3 a ± 15,2	1,35 a ± 0,16	4.370,7 a ± 303,7

»» Aus Mohnperspektive schien der Weißklee der geringere Konkurrent um die Ressourcen Wasser, Licht und Nährstoffe zu sein, was durch die stabilen Mohnerträge in der Mischung mit Weißklee in allen drei Versuchsjahren belegt wird. In der Mischung mit Sommergerste, limitierten die Wasserverfügbarkeit und späten Saatzeitpunkte das Sommergerstenwachstum in zwei von drei Jahren, jedoch wurden die Erträge des Mohns stark reduziert, wenn die Konkurrenz durch die Sommergerste hoch war.

Die dargestellten Mohnsamenerträge waren Resultate von Handbeerntungen, weshalb bei maschineller Ernte von Druschverlusten ausgegangen werden muss. Aufgrund von Bestandeslücken in den für den Drusch vorgesehenen Teilparzellen im Jahr 2020 und großen Unterschieden in den Druschverlusten 2018 und 2019 wurde auf einen direkten Vergleich der Druscherträge mit den manuellen Erträgen verzichtet. Grundsätzlich war eine Ernte von Mohn und Sommergerste mit dem Mähdrescher und eine anschließende Separierung von Mohnsamen und Gerstenkörnern aufgrund der unterschiedlichen Korngröße jedoch möglich. Die Abreife der Gerste, die rund 85 Tage nach Aussaat stattfindet¹¹¹, kann zudem durch den Aussaatzeitpunkt relativ genau gesteuert werden. Selbst bei Verzögerung der Abreife können die Mohnpflanzen bei trockener Witterung noch ein bis zwei Wochen auf dem Feld verbleiben, ohne dass Samen ausfallen, da die Kapseln im Gegensatz zum Klatschmohn geschlossen sind. Aufgründessen ist eine Übertragbarkeit auf größere Flächen im Hinblick auf die Erntetechnik gegeben.

5.4.2 Sommergerstenerträge

Die Sommergerstenerträge schwankten zwischen 980,6 und 3.834,3 kg ha⁻¹, abhängig von Jahr und Variante (Abb. 14).

Im Allgemeinen waren die Erträge der Sommergerste-Reinsaaten höher als die in der Mischung mit Mohn. Diese Unterschiede waren in den Jahren 2018 und 2019 auch signifikant. Ein Einfluss der Saatstärke der Sommergerste auf den Ertrag konnte nicht ermittelt werden.

Die höchsten Erträge, aber auch die größten Ertragsunterschiede zwischen den Varianten, wurden 2018 ermittelt, als B2 und B3 3.834 und 3.536 kg ha⁻¹ einbrachten und PB2 und PB3 nur 1.159 bzw. 981 kg ha⁻¹. Die Lücke zwischen Reinsaat- und Mischsaaterträgen war weniger ausgeprägt im Jahr 2019 und noch geringer im Jahr 2020, sodass 2020 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt wurden (Tab. 13). Dieses Phänomen ist vermutlich auf die schon erwähnten stark unterschiedlichen Witterungsbedingungen in Kombination mit den gewählten Saatzeitpunkten zurückzuführen.

Die Witterungsbedingungen sind ein dominanter Einflussfaktor auf die Sommergerstenerträge, beispielsweise dokumentieren Váňová et al. (2006) für Sommergerste, dass heiße und trockene Jahre signifikant geringere Erträge hervorriefen und, dass eine starke Beziehung zwischen den Parametern Kornertrag, Niederschlag und Temperatur vorlag⁵⁷. Ebenso sagten Povilaitis et al. (2017) in ihren Modellberechnungen eine Verminderung der Gerstenerträge um 5% bei einer Verringerung des Niederschlags um 10% voraus⁶⁵.

2018 wurde die Sommergerste erst im späten Mai gesät, was dem Mohn einen deutlichen Vorsprung verschaffte. Im Jahr 2019 gab es den meisten Niederschlag im Frühjahr und die Sommergerstenaussaat lag Ende April, was der Sommergerste deutliche Entwicklungsvorteile ermöglichte und die Mohnerträge schmälerte. Obwohl die Sommergerste in diesem Jahr die konkurrenzstärkere Kultur in der Mischung war, lagen die Erträge der Reinsaat (2.017 – 3.006 kg ha⁻¹) in den meisten Fällen noch signifikant über den Erträgen in der Mischung (1.099 – 1.753 kg ha⁻¹). Dies verdeutlicht, dass der Mischanbau auch in konkurrenzstarken Jahren einen hohen Effekt auf die Sommergerstenerträge hatte, auch wenn dies sich nicht in den meisten übrigen Parametern (N-Gehalt, SPAD-Werte, NDVI), jedoch in der Biomasse zeigte.

Es scheint so, dass eine optimale Mohn-Sommergerste-Kombination 2020 erreicht wurde, da in diesem Jahr weder die Mohn- noch die Sommergerstenerträge signifikant durch den Mischanbau beeinflusst wurden. Keine der beiden Kulturen war der anderen überlegen, sodass Mohn und Sommergerste beide gemäßigte Ertragsniveaus sowohl in der Rein- als auch in der Mischsaat erreichten.

In der Literatur gibt es ähnliche Beispiele, die belegen, dass unter widrigen Wachstumsbedingungen die Unterschiede zwischen der dominanten und der unterdrückten Kulturpflanze weniger intensiv ausfallen⁶³. 2020 lagen die Saatzeitpunkte für Mohn und Sommergerste zwar in beiden Fällen früh aber die eher trockenen Wachstumsbedingungen hinderten beide Kulturen daran, ihr volles Ertragspotenzial und ihre maximale Konkurrenzfähigkeit auszuschöpfen.

Das Ertragsniveau der Sommergerste war in allen drei Jahren eher gering, wenn es mit den mittleren Erträgen in Deutschland, die zwischen 2014 – 2019 erwirtschaftet wurden, verglichen wird, die bei 5.330 kg ha⁻¹ lagen¹¹. Dies ist zum Großteil durch die verspätete Aussaat zu erklären, die absichtlich so gelegt wurde, um dem Mohn einen Wachstumsvorsprung zu ermöglichen. Aufgrund der Witterungs- und Bodenbedingungen war es nicht möglich, identische Saattermine in allen drei Versuchsjahren zu etablieren.

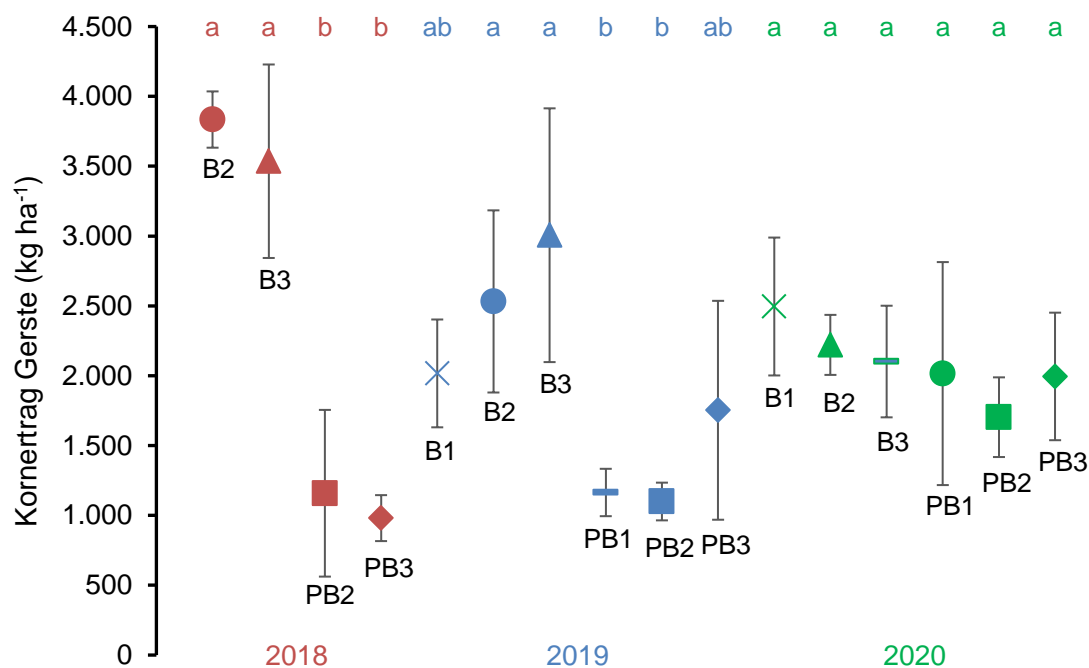


Abb. 14. Sommergerstenerträge (kg ha⁻¹) in Reinsaat in zwei (B1, B2; 2018) bzw. drei (B1, B2, B3; 2019 – 2020) verschiedenen Saatstärken verglichen mit denselben Saatstärken in Mischsaat mit Mohn (PB1, PB2, PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in jedem Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/Sommernohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

» Dies führte jedoch zu der wichtigen Erkenntnis, dass Saattermin und Witterungseinflüsse den größten Effekt auf das Mischanbausystem Mohn + Sommergerste hatten und unterstreicht die bedeutende Rolle der Umweltbedingungen, die primär die Leistungsfähigkeit der Mischung bestimmten^{56,63}. Frühe Aussaaten und ausreichend Niederschlag förderten die Sommergerstenerträge. Die Entwicklung der Biomasse gab dabei die größten Hinweise auf mögliche Ertragsdepressionen.

Die Unterschiede, die durch die verschiedenen Saatstärken hervorgerufen wurden, waren in der Mischung weniger relevant, da dort kein signifikanter Effekt auf den Sommergerstenertrag ermittelt werden konnte. In der Reinsaat führten 2019 die höheren Saatstärken tendenziell zu höheren Erträgen, dies war aber ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich. Höhere Bestandesdichten können Ertragsvorteile bieten, jedoch kann eine knappe Ressource durch die höhere Pflanzendichte auch schneller erschöpft sein. Dies könnte dafür gesorgt haben, dass nur unter erhöhter Wasserverfügbarkeit (2019) die höheren Sommergerstensaaststärken auch höhere Kornerträge hervorbrachten⁶³.

Der Strohertrag der Sommergerste war ähnlich dem Kornertrag und zeigte signifikante Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischsaaten 2018 und 2019, jedoch nicht 2020 (Tab. 13). Im Gegensatz dazu war die Tausendkornmasse 2018 und 2019 vergleichbar, jedoch 2020 signifikant höher für B1 (39,66 g) und B2 (38,64 g) verglichen mit PB1 (30,61 g) und PB2 (31,34 g). Die Ährenzahl m^{-2} war mit ansteigender Saatstärke leicht erhöht, unterschied sich aber nicht signifikant zwischen den Saatstärken.

Im Vergleich dazu war die Bestandesdichte nach Feldaufgang zwischen den drei Saatstärken signifikant unterschiedlich, sodass im Mittel 59 (B1), 117 (B2) und 163 (B3) Pflanzen m^{-2} gezählt wurden, unabhängig vom Jahr und ob in Mischung oder in Reinsaat. Dies war aufgrund der unterschiedlich gewählten Saatstärken ein gewünschtes Ergebnis. Es ließ sich jedoch ein Effekt des Mischanbaus auf die Ährenzahl m^{-2} 2018 und 2019 zur Ernte feststellen. 2018 stand die Anzahl Ähren m^{-2} im Zusammenhang mit der großen Ertragslücke zwischen Reinsaat und Mischsaat und war für die Reinsaaten (713 – 756 Ähren m^{-2}) höher als für Sommergerste in Mischung (273 – 293 Ähren m^{-2} ; Tab. 13). Auch 2019 wurde in den Reinsaatvarianten (B1, B2, B3) eine höhere Ährenzahl m^{-2} gezählt. Die Kornzahl pro Ähre war zwischen allen Varianten ähnlich und schwankte zwischen $10,59 \pm 1,28$ bei PB1 2019 und $15,17 \pm 1,84$ bei B1 2020, ohne größeren Einfluss des Mischanbaus auf diesen Parameter.

Tab. 13 Sommergerstenertragsdaten aus Reinsaat in drei Saatstärken (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) und in Mischsaat mit Sommermohn (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für jeden Parameter in jeweiligen Versuchsjahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Jahr	Variante	Sommergerste Ertrag (kg ha ⁻¹)	Stroh Ertrag (kg ha ⁻¹)	Tausend Kornmasse (g)	Ähren m ⁻²	Kornzahl pro Ähre
2018	B2	3.834,3 a ± 201,5	5.813,9 a ± 971,2	39,94 a ± 5,65	755,83 a ± 131,92	14,8 a ± 2,8
	B3	3.535,8 a ± 692,6	4.675,0 a ± 377,1	38,24 a ± 2,37	713,33 a ± 108,01	12,9 a ± 0,8
	PB2	1.158,5 b ± 596,8	2.324,9 b ± 937,3	39,23 a ± 7,43	272,50 b ± 71,82	11,3 a ± 4,2
	PB3	980,6 b ± 164,5	2.554,6 b ± 339,8	33,34 a ± 2,48	293,33 b ± 66,39	10,9 a ± 1,8
2019	B1	2.016,6 ab ± 386,0	5.849,3 a ± 821,3	32,16 a ± 1,54	528,89 ab ± 98,22	11,9 a ± 1,3
	B2	2.531,9 a ± 652,0	5.305,0 a ± 722,0	35,82 a ± 3,69	577,78 ab ± 112,50	11,7 a ± 1,5
	B3	3.006,0 a ± 908,4	5.442,5 a ± 913,8	35,02 a ± 3,91	682,22 a ± 150,67	12,5 a ± 0,8
	PB1	1.163,9 b ± 169,6	4.165,7 ab ± 627,5	30,71 a ± 0,98	360,00 b ± 49,56	10,6 a ± 1,3
	PB2	1.099,4 b ± 135,1	3.037,3 b ± 603,7	30,30 a ± 3,61	336,89 b ± 41,07	10,9 a ± 0,9
	PB3	1.752,5 ab ± 783,7	3.544,2 b ± 903,5	31,66 a ± 3,80	503,11 ab 156,12	10,7 a ± 1,0
2020	B1	2.495,5 a ± 493,6	4.238,1 a ± 729,1	39,66 a ± 3,03	418,67 a ± 86,38	15,2 a ± 1,8
	B2	2.220,8 a ± 214,9	4.066,8 a ± 494,8	38,64 a ± 1,58	460,89 a ± 43,87	12,5 a ± 0,7
	B3	2.101,6 a ± 399,6	3.871,6 a ± 495,8	33,85 ab ± 3,79	512,00 a ± 108,03	12,3 a ± 1,5
	PB1	2.015,3 a ± 798,3	2.748,0 a ± 1102,8	30,61 b ± 2,40	462,81 a ± 58,46	15,0 a ± 4,0
	PB2	1.703,1 a ± 285,3	3.917,9 a ± 12,5	31,34 b ± 1,24	451,56 a ± 22,20	12,0 a ± 1,9
	PB3	1.994,9 a ± 456,6	4.060,9 a ± 924,8	34,75 ab ± 2,91	558,22 a ± 132,62	10,8 a ± 3,8

Mohn- und Sommergerstenertrag können für sich allein betrachtet werden, die Kombination beider Ergebnisse erlaubt jedoch auch Aussagen über die Flächenproduktivität des Mischanbaus, die beispielsweise über den Land Equivalent Ratio ausgedrückt wird, der im folgenden Kapitel beschrieben wird.

5.4.3 Land Equivalent Ratio

Der Land Equivalent Ratio (LER) wurde für die Mohn-Sommergerste-Mischungen berechnet und lag in zwei von drei Versuchsjahren über 1 (Abb. 15). Dies bedeutet, dass mehr Land benötigt würde, um denselben Korn- bzw. Samenertrag mit den jeweiligen Kulturen in Reinsaat zu erreichen⁵⁴.

Die Land Equivalent Ratios (LERs) für Mohn und Sommergerste unterschieden sich anhand der Jahre und weniger zwischen den verschiedenen Saatstärken der Sommergerste. Dies unterstreicht den dominanten Effekt des Versuchsjahres, da in zwei von drei Jahren positive LERs in allen Varianten erreicht wurden.

Eine Ausnahme bildete das Jahr 2018, in dem der LER der Variante PB3 noch über dem von PB2 lag, was vor allem durch höhere Mohnerträge zustande kam. In Anbetracht der höheren Sommergerstensaatstärke in der Variante PB3 war dieses Ergebnis eher unerwartet. Vandermeer (1989) postulierte, dass die intraspezifische Konkurrenz oft höher als die interspezifische Konkurrenz sei³⁶, was bedeuten könnte, dass eine (zu) hohe Saatstärke die Sommergerste selbst beeinträchtigt hat. 2019 traten signifikante Ertragsdepressionen in der Mohn-Sommergerste-Mischsaat im Vergleich zur Mohn-Reinsaat auf, weshalb auch die Flächenproduktivität durch den Mischanbau abnahm (LERs<1). Die partiellen LERs aus den Jahren 2018 und 2020 zeigten eine deutliche Tendenz zu höheren Mohn-pLERs (>0,8), was darauf hinweist, dass der Mohn in beiden Jahren substantiell zu den erhöhten LERs von 1,11 (PB3) und 1,37 (PB2) 2018 und 1,73 (PB2), 1,82 (PB1) und 1,84 (PB3) 2020 beitrug. Die LER-Werte aus 2019 erreichten 0,72 (PB2), 0,86 (PB1) und 0,99 (PB3). Bybee und Finley (2018) bewerteten die Leistungsfähigkeit eines Gemenges schon als ausreichend, wenn ein ähnlich hohes Ertragsniveau in der Mischung im Vergleich zur Reinsaat vorlag, ohne dass ein Mehrertrag notwendig war³⁸. Die vorliegenden Ergebnisse gingen in zwei von drei Jahren über dieses Ziel hinaus. Die partiellen LERs der Sommergerste waren 2020 höher als 2018, weshalb in Kombination mit den hohen Mohn-pLERs 2020 die allgemein höchsten LER Werte auftraten.

»» Dies unterstreicht die Schlussfolgerung aus den Ertragsdaten, dass gemäßigte Erträge beider Kulturen die gesamte Flächenproduktivität stärker förderten im Gegensatz zu der Situation, in der eine Kultur die andere stark unterdrückt.

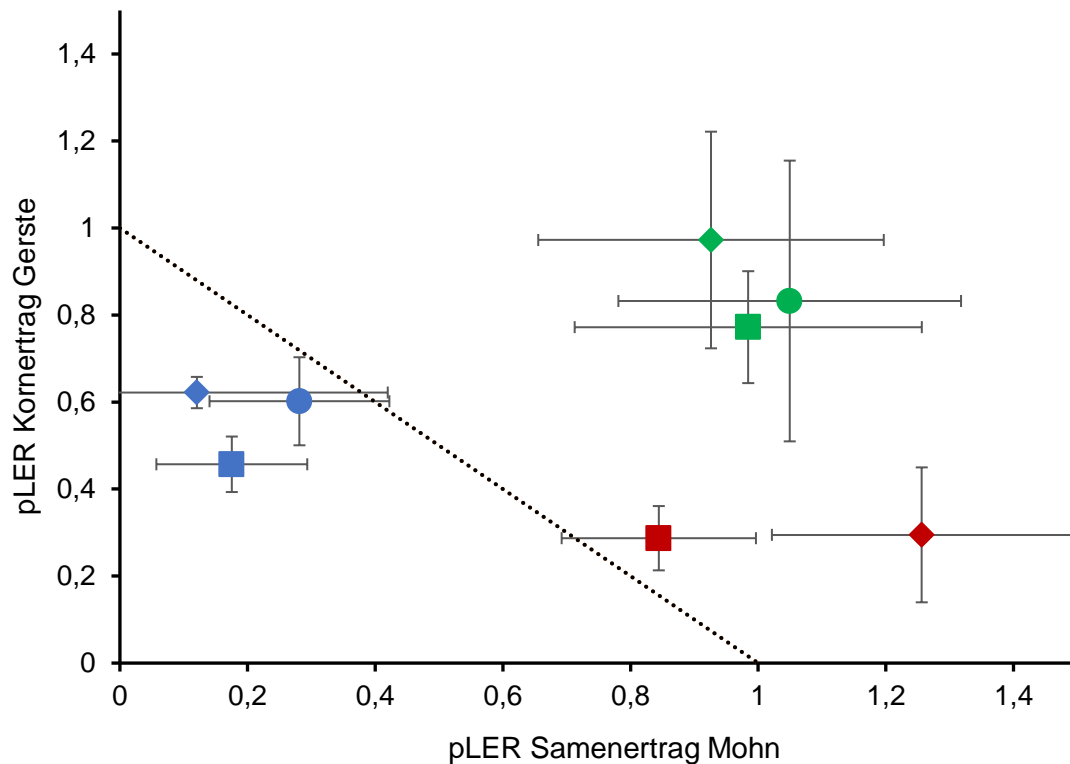


Abb. 15 Partielle LER (pLER) für die Mischungen von Sommermohn und Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2 und PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Bestandteil der LER Berechnungen sind die pLER Werte der einzelnen Kulturen, die sich mithilfe des Competitive Ratios zu Aussagen über die Konkurrenzkraft der einzelnen Mischungspartner verrechnen lassen.

5.4.4 Competitive Ratio

Die partiellen LERs geben den Beitrag der einzelnen Komponenten der Mohn-Sommergerste-Mischung zur Flächenproduktivität an, der Competitive Ratio (CR) stellt ergänzend die Konkurrenzkraft der Mischungspartner dar (Tab. 14). Die CR-Werte berechnen sich nach Willey und Rao (1980)⁵⁵ aus den pLER-Werten sowie dem Flächenanteil der einzelnen Komponenten der Mischung. Demzufolge beschreibt CRa, in welchem Verhältnis Mohn kompetitiver ist als Sommergerste, während CRb den Kehrwert darstellt und angibt, wie oft Sommergerste konkurrenzstärker ist als Mohn.

Die CR-Werte zeigten für Mohn eine höhere Konkurrenzkraft in zwei von drei Jahren, während die Sommergerste ähnlich hohe CR-Werte wie der Mohn 2019 erreichte. Dabei nahm die Konkurrenzstärke der Sommergerste mit erhöhter Saatstärke zu.

2018 war das Jahr mit den höchsten CRa-Werten, da der Mohn dort bis zu 11,37 mal kompetitiver als Sommergerste eingestuft wurde. 2020 wurden Werte zwischen 2,54 (PB3) und 3,40 (PB2) erreicht. Die hohen Werte sind ungewöhnlich, wenn sie mit Literaturwerten aus anderen Studien verglichen werden, in denen Sommergerste häufig die dominierende Kultur war und pLER-Werte $>0,5$ erreichte^{56,112}. Im Gegensatz dazu wurden jedoch auch CR-Werte von bis zu 25,12 für Ackerbohne im Gemenge mit Gerste bestätigt¹¹³. Dadurch, dass mit der Kalkulation des CR auch der Flächenanteil der Komponenten berücksichtigt wird, wird die Konkurrenzkraft des Mohns stark betont, da dieser den geringeren Flächenanteil besaß. Der große Einfluss des Flächenanteils auf die CR-Werte wurde unter anderem in der Studie von Dhima et al. (2018) zum Gemengeanbau von Ackerbohne mit Gerste belegt, da dort die CR-Werte mit zunehmendem Flächenanteil der einzelnen Kulturen abnahmen¹¹³.

Im Jahr 2019 stiegen die CR-Werte der Sommergerste bis 1,93 (PB3) an, was demzufolge fast doppelt so kompetitiv war wie der Mohn. Mit steigender Saatstärke erhöhte sich auch der CR-Wert der Sommergerste, dies ebenfalls am deutlichsten 2019. Die CR-Ergebnisse passen zu Erträgen und LER-Werten, in denen 2019 stets das Jahr war, was von der Sommergerste dominiert wurde. Im Allgemeinen wäre aufgrund des zügigen, initialen und insgesamt hohen Wachstums der Sommergerste von einer höheren Konkurrenzkraft auszugehen, da der Mohn im Gegensatz dazu auch eine äußerst langsame Jugendentwicklung zeigt^{56,2}. Die hohe Konkurrenzkraft der Sommergerste bestätigen CR-Werte aus anderen Mischbauexperimenten, beispielsweise war Gerste gegenüber Erbse die dominantere Kulturpflanze mit CR-Werten von 1.30 – 1.23¹¹⁴.

Tab. 14 Competitive Ratio (CR) für die Mischungen von Sommermohn mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2 und PB3) für Sommermohn (CRa) und Sommergerste (CRb) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/ Sommergerste)

Jahr	CR Wert ¹	Mischbau-Variante		
		PB1	PB2	PB3
2018	CRa		11,37	7,84
	CRb		0,09	0,13
2019	CRa	1,25	1,02	0,52
	CRb	0,80	0,98	1,93
2020	CRa	3,36	3,40	2,54
	CRb	0,30	0,29	0,39

»» Vermutlich trug der vorgezogene Saatzeitpunkt des Mohns, der ihm einen Wachstumsvorsprung ermöglichte, erheblich dazu bei, seine Konkurrenzfähigkeit zu erhöhen, weshalb von deutlich geringeren CR Werten auszugehen ist, wenn Mohn und Sommergerste simultan gesät würden.

Mittels Ertragserfassungen und Berechnungen der Flächenproduktivitäten konnten Aussagen zur quantitativen Ertragsbildung des Mischanbaus getroffen werden. Wichtig ist aber auch die qualitative Beurteilung des Ernteguts. Dies erfolgte für den Mohn in Teil C dieser Arbeit. Für die Sommergerste sind insbesondere die Proteingehalte wichtig, die im Folgenden vorgestellt werden.

5.4.5 Proteingehalt der Sommergerste

Mittels Nahinfrarotspektroskopie wurde der Proteingehalt der geernteten Sommergerstenkörner anhand der Mischanbauvarianten bestimmt. Die Sorte 'Laureate' wird üblicherweise als Braugerste verwendet. Der Proteingehalt ist dabei ein wichtiges Qualitätsmerkmal und sollte maximal 11,5%¹¹⁵ betragen.

Grundsätzlich lagen die Proteingehalte der untersuchten Proben mit 12,8% – 17,1% deutlich über den Qualitätsanforderungen an eine gute Braugerste.

Die niedrigsten Proteinwerte wurden 2018 mit einem Maximalwert von 12,9% ± 0,1% (G2) gemessen, was trotzdem noch oberhalb einer akzeptablen Braugerstenqualität liegt (Abb. 16). 2018 wurden keine Unterschiede zwischen Reinsaat und Mischsaat mit Mohn festgestellt, diese traten 2019 und 2020 verstärkt auf. Zwei Phänomene wurden in beiden Jahren sichtbar:

Mit zunehmender Saatstärke der Sommergerste sank allgemein der Proteingehalt. Der Proteingehalt der Mischsaat mit Mohn lag tendenziell über dem der Reinsaat.

2019 wurde in den Varianten PB1 und PB2 ein Proteingehalt von 17,1% und 16,1% gemessen, was signifikant über den Varianten B2 (14,2%) und B3 (14,0%) lag. 2020 erreichten die Varianten PB1 und PB2 Proteingehalte von 13,5% und waren signifikant höher als Variante B2 (12,4%). Somit lag die höchste Saatstärke in der Mischvariante auf einem vergleichbaren Proteinniveau wie die niedrigste Saatstärke in der Reinsaat.

Es scheint also, dass sich durch den Mischanbau die Braugerstenqualität messbar verschlechtert. Insbesondere mit niedrigen Sommergerste-Saatstärken wurden in zwei von drei Jahren Proteingehalte über 13% gemessen und auch in den Reinsaaten konnte in keinem Jahr ein Wert von unter 12% erreicht werden. Daher eignet sich die so erzeugte Sommergerste nicht für die Verwendung als Braugerste. Die Brauqualität hängt von vielen Faktoren ab, wird aber maßgeblich von der Genetik und den Umweltbedingungen bestimmt^{115,116}. Insbesondere die N-Versorgung spielt eine Rolle, da steigende Stickstoffdüngungen positiv mit dem Kornproteingehalt korrelieren¹¹⁷.

Vermutlich beeinflussten daher die grundsätzliche Bodensituation und die Düngung mit Hornmehl, die primär die Ressourcenkonkurrenz um Stickstoff verringern sollte, negativ die

Proteingehalte der Sommergerste. Dies ist umso wahrscheinlicher, da im ungedüngten Jahr 2018 die Proteingehalte der Sommergerste am geringsten ausfielen. Dass mit zunehmender Saatstärke die Proteingehalte abnahmen, ist höchstwahrscheinlich dem Verdünnungseffekt des verfügbaren Stickstoffs durch die höhere Anzahl Pflanzen zuzuschreiben. Dafür sprechen auch Literaturdaten, nach denen steigende Erträge mit sinkenden Proteingehalten in Verbindung stehen¹¹⁵.

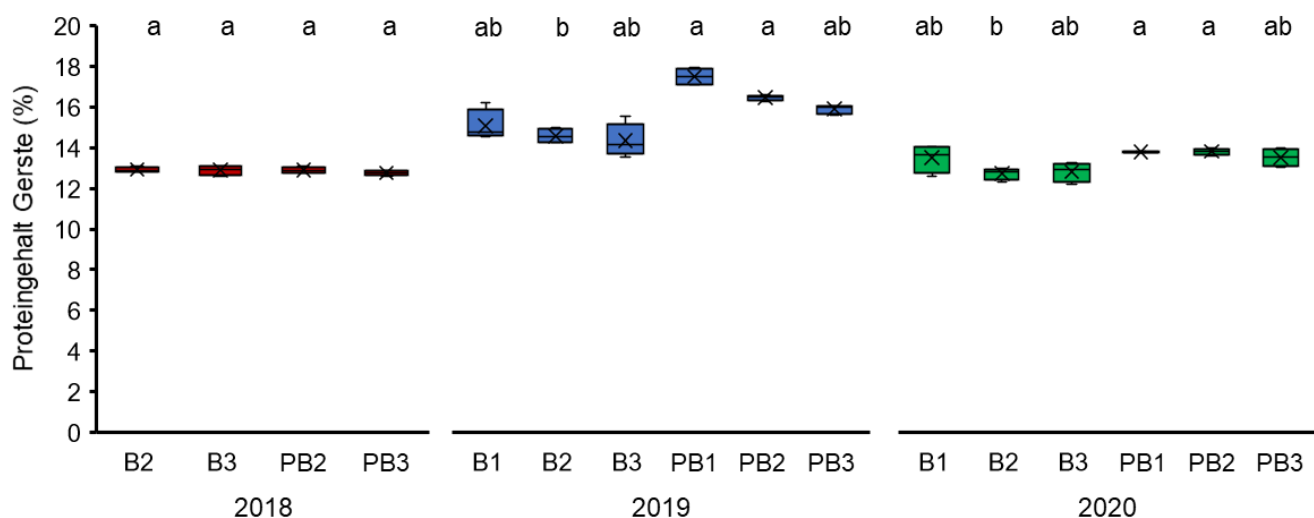


Abb. 16 Boxplots der mittels Nahinfrarotspektroskopie ermittelten Proteingehalte (%) der Sommergerste in drei verschiedenen Saatstärken (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) in Reinsaat und jeweils in Kombination mit Mohn zur Ernte am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Versuchsjahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommernohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Alternativ wäre angesichts der hohen Proteingehalte über eine Nutzung der Sommergerste als Futtermittel nachzudenken, auch wenn dies wirtschaftlich meist uninteressanter ist als die Vermarktung als Braugerste¹¹⁵. Eine weitere Option bestünde darin, statt der Sommergerste ein anderes Sommergetreide wie beispielsweise Hafer als Mischungspartner zu wählen, da Hafer als Futtermittel in der Tierfütterung einen hohen Stellenwert hat und zu den proteinreichsten Getreidearten zählt¹¹⁸. Somit wäre auch eine Stickstoffdüngung umsetzbar. Ebenso konnten bereits Unkraut unterdrückende Effekte von Hafer nachgewiesen werden, beispielsweise in Mischung mit Luzerne um bis zu 50%⁴¹.

» Bei der Kombination von Mohn mit Braugerste sollte auf eine Stickstoffdüngung verzichtet und durch die Wahl des Standorts und der Vorfrucht auf den Proteingehalt der Sommergerstenkörner geachtet werden.

5.5. Schlussfolgerung für den Mischanbau

Der Mischanbau von Mohn mit Weißklee und Sommergerste resultierte in der folgenden Beantwortung der zu Beginn aufgestellten Hypothesen.

1. Die Mohnerträge erreichen im Mischanbau mit Weißklee oder Sommergerste ein ähnliches Niveau wie in Reinsaat und durch die Kombination mit Sommergerste kann ein Mehrertrag (positiver LER) auf der Fläche erwirtschaftet werden.
 - »» Im Mischanbau mit Weißklee konnte in allen drei Versuchsjahren ein ähnlich hoher Ertrag im Vergleich zur Mohn-Reinsaat erzeugt werden. In Kombination mit Sommergerste gelang dies in zwei von drei Jahren mit deutlich höheren Konkurrenzeffekten. Ein Mehrertrag pro Fläche wurde in zwei von drei Jahren erreicht. Stabile Erträge konnten daher mit Weißklee zu beiden Aussaatzeitpunkten und mit Sommergerste dann, wenn deren Konkurrenzkraft niedrig war, erzielt werden, was durch späte Aussaaten begünstigt wurde.
2. In Kombination mit Sommergerste treten nur minimale Konkurrenzeffekte auf, die sich bei erhöhter Saatstärke der Sommergerste verstärken.
 - »» In der Mischung von Mohn mit Sommergerste waren die Konkurrenzeffekte stark abhängig vom Jahr. Während in zwei von drei Jahren beide Kulturen das Wachstum der jeweils anderen nicht gefährdeten, wurde in einem Jahr der Mohn fast vollständig von der Sommergerste unterdrückt. Insgesamt war der Effekt von Saatzeitpunkt, Witterung und Nährstoffverfügbarkeit größer als der der Saatstärke. Bei geringerer Wasserverfügbarkeit und mindestens vierwöchigem Wachstumsvorsprung des Mohns konnten positive Entwicklungen der Mohnpflanzen in der Mischung festgestellt werden.

In der Kombination mit Sommergerste konnten in zwei von drei Jahren stabile Erträge verglichen mit der Mohn-Reinsaat erzielt werden. Der Erfolg des Gemenges hing dabei primär vom Zusammenspiel zwischen Management (Saatzeitpunkt) und Umweltbedingungen (Niederschlag, Nährstoffe, Licht) ab. In den vorwiegend trockenen Jahren 2018 und 2020 war der Mohn konkurrenzstärker und konnte neben gleichwertigen Erträgen zur Reinsaat auch LERs über 1 in der Mischung mit Sommergerste erreichen. Im Gegensatz dazu förderten frühe Aussaattermine und ausreichend Niederschlag im Jahr 2019 die Sommergerstenentwicklung, sodass Mohnertrag, LER, CR, BFI, Biomasse und Pflanzenhöhe des Mohns zurückgingen. Die Konkurrenz um die Ressource Stickstoff war besonders in den frühen Wachstumsphasen hoch, was durch geringe N-Gehalte in den Mohnpflanzen in der Mischung mit Sommergerste sichtbar wurde. Höhere Saatstärken der Sommergerste verschärften tendenziell die Konkurrenzeffekte, jedoch war der Einfluss des Klimas und des Managements deutlich größer.

3. In Kombination mit Weißklee treten nur minimale Konkurrenzeffekte auf, die sich bei früherer Kleeaussaat verstärken.
 - »» Der Mischanbau von Mohn mit Weißklee zeigte nur eine minimale Beeinflussung der Mohnpflanzen, was sich in allen gemessenen Parametern niederschlug. Die Konkurrenzeffekte waren bei früherer Weißkleeaussaat nur tendenziell erhöht, wohingegen die späte Aussaat in zwei von drei Jahren keinen ausreichenden Bestand bildete und sich somit weder vor- noch nachteilig auf den Mohnbestand auswirkte. Eine Aussaat ab Ende April ist daher für eine erfolgreiche Mohn-Weißklee Kombination zu spät.

Der Mohn wurde in der Mischung mit Weißklee kaum beeinflusst, was sich in ähnlichen Mohnsamenerträgen, Trockenmassen der Gesamtpflanze, Blattflächen, Pflanzenhöhen sowie Stickstoff- und Kohlenstoffgehalten im Vergleich zur Mohn-Reinsaat zeigte. Dieser Effekt konnte hauptsächlich durch die geringere Konkurrenz um Wasser, Licht und bodenbürtigen Stickstoff erklärt werden. Der Mohn zeigte gegenüber dem Weißklee die größere Konkurrenzkraft und der Bedarf des Weißkleees bezüglich der Ausnutzung der Ressourcen Wasser, Licht und Stickstoff war aufgrund der geringeren Biomasse, geringeren Pflanzenhöhe und der Möglichkeit zur Stickstoff-Fixierung aus der Luft geringer. Der Saatzeitpunkt des Weißkleees nahm dabei kaum Einfluss auf die Entwicklung und Ertragsausbildung des Mohns. Allerdings sicherte der frühe Saatzeitpunkt, dass der Weißklee ausreichend Biomasse für eine hohe Bodenbedeckung bilden konnte. Dies ermöglichte die Ausschöpfung weiterer Vorteile des Mischanbaus wie Erosionsminderung und Erhöhung von Biodiversität und Bodenfruchtbarkeit, was vor allem auch den Nachfrüchten zugute kommt.

4. Beide Mischanbauverfahren (Mohn + Weißklee und Mohn + Sommergerste) führen zu erhöhter Unkrautunterdrückung im Vergleich zur Mohn-Reinsaat.
 - »» Unkrautanzahl, -biomasse und -deckungsgrad in den Mischanbauvarianten wichen bedingt durch große Streuung nicht signifikant von den Werten in Mohn-Reinsaat ab, schienen aber tendenziell niedriger als in der Reinsaat. Die Sommergerste bewies dabei tendenziell den höheren Unkraut regulierenden Effekt als der Weißklee.

Der Unkraut unterdrückende Effekt der Mohn-Mischanbauvarianten war aufgrund hoher Streuung in den Daten kaum messbar. Dies war hauptsächlich auf die unregelmäßige Unkrautverteilung im Feld und die allgemein eher geringe Unkrautbelastung zurückzuführen. *Chenopodium album* war das dominante Unkraut über alle drei Versuchsjahre hinweg, gefolgt von *Matricaria sp.*, *Cirsium arvense* und *Solanum nigrum*. Trotzdem ließ sich die Tendenz zu geringerem Unkrautauftreten in den Mischanbauvarianten erkennen. Da die Sommergerste auch in Reinsaat die geringste Unkrautdichte aufwies, scheint der Unkraut regulierende Effekt durch die Sommergerste der größte im Vergleich zu den anderen Kulturen zu sein.

Dies galt insbesondere für das Problemunkraut *Senecio vulgaris*, das deutlich weniger in Parzellen mit Sommergerste vorkam als in den übrigen Varianten. Eine höhere Pflanzendichte könnte auch der Grund für eine tendenziell verbesserte Unkrautunterdrückung in den Mohn-Weißklee-Mischungen gewesen sein. Generell erscheint es wichtig, Mohn auf eher unkrautarmen Flächen anzubauen, damit der Mischanbaueffekt auf das Unkrautwachstum ausreichend sein kann.

Umweltbedingungen, vor allem Boden und Witterung, waren die ausschlaggebenden Faktoren für das Gelingen des Mischanbaus mit Mohn. Additive Gemenge können unter generell ertragsreichen Bedingungen besonders produktiv sein⁶³, was durch die positiven LERs der Mohn-Sommergerste-Mischungen in zwei der drei Jahre am Campus Klein-Altendorf gezeigt werden konnte. Dafür sind Anpassungen der Saattermine nötig, um die Konkurrenzeffekte zwischen den eingesetzten Kulturen auszugleichen. Wasser und Stickstoff waren darüber hinaus die entscheidenden Faktoren, die das Wachstum begrenzten. Daher erscheinen niedrig wachsende, weniger konkurrenzstarke Kulturen wie der Weißklee passend, um die Mohnerträge zu stabilisieren, besonders wenn Wachstumsressourcen begrenzt verfügbar sind.

Eine Erhöhung der Flächenproduktivität kann durch die Integration von weiteren beerntbaren Pflanzen wie Sommergerste erreicht werden. Dies erfordert jedoch präzises, standortspezifisches Management und erhöht die Gefahr von Mohnertragsverlusten durch zu starke Konkurrenzeffekte. In diesem Fall könnte auch über eine weitere Reduzierung der Saatstärken beider Kulturen nachgedacht werden, um die Pflanzendichte m^{-2} gegenüber der Reinsaat beizubehalten (substitutives Gemenge). Da im Falle der Braugerste erhöhte Proteingehalte zu Qualitätsverlusten führen, kann alternativ über andere Standorte, die Nutzung als Futtergerste oder die Integration von proteinreichen Getreidearten wie Hafer in das Gemenge nachgedacht werden. Um die Vorteile des Weißklees und der Gerste zu kombinieren, könnte auch die Kombination von Mohn mit Druschleguminosen (z. B. Lupine, Linse, Sojabohne) wertvolle Synergieeffekte erzeugen, da die Konkurrenz um die Ressource Boden-Stickstoff, der insbesondere in frühen Wachstumsphasen des Mohns ausreichend benötigt wird, durch die Möglichkeit der N-Fixierung der Leguminose aus der Atmosphäre vermindert und trotzdem ein zusätzlicher Ertrag auf der Fläche generiert werden kann.

Im Allgemeinen muss ein Kompromiss zwischen höherer Unkrautunterdrückung durch stärkere Zweitfrüchte und potenziell dadurch verursachten Ertragsminderungen der Hauptfrucht geschlossen werden. Da die Unkrauthacke auch für die Durchlüftung des Bodens sorgt und ertragswirksam sein kann², müssen auch die durch den Verzicht auf die Hacke eingesparten Kosten gegen den eventuell dadurch verminderten Mohnertrag aufgewogen werden.

Dies ist jedoch standortabhängig und trifft insbesondere für schluffreiche Böden, die zur Verkrustung neigen (wie auch am Campus Klein-Altendorf), zu, bei denen der Hackeffekt besonders vorteilhaft sein kann.

Um das Anbaurisiko des Mohns in der Mischung zu minimieren, sind ein Vorsprung der Mohnsaat und geringe Saatstärken der Zweitkultur zu empfehlen, um die Konkurrenzfähigkeit des Mohns zu erhöhen. In Zukunft sollten daher die genauen Interaktionen der gemeinsam angebaute Kulturen näher betrachtet werden, um die Mechanismen etwa hinter einer verbesserten Unkrautunterdrückung zu verstehen, damit genauer vorhergesagt werden kann, wann und in welchem Umfang Veränderungen von Saatzeitpunkt, Saatstärke oder Pflanzenernährung notwendig für eine erfolgreiche Etablierung des Mischanbausystems sind.

Die hier dargestellten Ergebnisse sollten dabei stets vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass sie auf fruchtbaren, unkrautarmen, konventionell bewirtschafteten Böden gewonnen wurden. Veränderte Boden- und Anbauverfahren können daher zu deutlich anderen Ergebnissen führen. Insbesondere auf Grenzstandorten, auf denen der Mohnanbau grundsätzlich einem höheren Anbaurisiko ausgesetzt ist², könnte über Mischanbauverfahren das Risiko eines totalen Ernteausfalls abgemildert und so die Bereitschaft zur Etablierung der Kultur erhöht werden. Wichtig dabei ist jedoch, die Wachstumspotenziale der Böden einzuschätzen und auf ausreichende Nährstoffversorgung beider Kulturen zu achten, weshalb sich der Einsatz von Leguminosen als Mischungspartner günstig auswirken könnte. Auch die Wasserverfügbarkeit muss beachtet werden, da zwei Kulturen einen höheren Wasserverbrauch haben können als der Anbau in Reinsaat, der Mischanbau jedoch die Konservierung von Bodenfeuchte fördert³⁰. Ähnliche Experimente zum Mohn-Mischanbau unter einer größeren Bandbreite an Umweltbedingungen könnten daher das Potenzial der hier vorgestellten Verfahren und die Übertragbarkeit auf andere Anbauregionen besser einschätzen.

Nichtsdestotrotz bietet der Mischanbau im Hinblick auf den Klimawandel und sich verändernde, unvorhersehbare Wachstumsbedingungen die Möglichkeit, Anbaurisiken auf mehr als eine Kultur zu verteilen und stellt daher für die risikobehaftete Kulturpflanze Mohn eine vielversprechende Kultivierungsoption dar. Da der Mohn Wasserstress in einem gewissen Umfang zu tolerieren schien, spricht auch dies für ein zukünftig hohes Nutzungspotenzial der Pflanze. Auch der Wintermohn könnte vom Mischanbau profitieren, da die Zeit von der Keimung bis zum Beginn des Längenwachstums durch die Überwinterung deutlich länger ist und somit auch die Zeit der geringen Bodenbedeckung. Mithilfe von frosttoleranten, niedrig wachsenden Zwischenfrüchten könnte dort vor allem im Hinblick auf verminderte Nitrat-Auswaschung der Mischanbau zu einer Optimierung des Mohnanbaus beitragen.

Verminderte Nitratauswaschungen, Erosionsminderung, Erhöhung von Flächenproduktivität, Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität sind Bausteine nachhaltiger Anbauverfahren, die über den Mischanbau erreicht werden können^{31,37,63,64,110}. Sie sind gleichzeitig Bestandteil aktueller gesellschaftlicher und politischer Zielvorstellungen, die sich beispielsweise in Konzepten wie der nationalen Eiweißpflanzenstrategie oder der Ackerbaustrategie wiederfinden lassen¹¹⁹. Die Integration von Mohn-Mischanbausystemen in Ackerbaukonzepte lässt sich daher gut mit den Zielen erhöhter Kulturpflanzenvielfalt, erweiterter Fruchtfolgen, Bodenschutz und der Verringerung von Nährstoffüberschüssen vereinbaren. Die auffallende Blüte trägt dabei zusätzlich zu einer optischen Aufwertung des Landschaftsbildes bei.

Die Vorteile des Mischanbaus auszunutzen, bietet nicht nur im ökologischen Anbau Chancen zur Etablierung des Mohns. Agrarökosysteme ökologischer und nachhaltiger zu gestalten wird auch im Rahmen der europäischen Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) immer wichtiger, da die Förderungen der Landwirte stark an Maßnahmen zur Anbaudiversifizierung und der Etablierung von mindestens 5% ökologischer Vorrangflächen gekoppelt sind¹²⁰. Unter die sogenannten Greening-Maßnahmen fallen dabei auch der Einsatz von Untersaaten mit Leguminosen oder allgemein der Anbau stickstoffbindender Pflanzen wie Linsen, Lupinen, Erbsen oder Ackerbohnen. Die Kombination von Mohn mit Weißklee oder Körnerleguminosen könnte daher zur Erfüllung der Greening Auflagen beitragen und somit auch einen weiteren finanziellen Anreiz zur Etablierung solch eines Mischanbausystems bieten.

Offene Anbaufragen zu beantworten und Lösungsansätze zur Ertragsstabilisierung, wie das hier vorgestellte Mischanbauverfahren, zu finden ist dabei genauso wichtig wie der Blick auf die Vermarktung der heimischen Sorten. Das Wissen um die inhaltsstoffliche sowie sensorische Qualität der neuen Sommermohnsorte `Viola´ ist bislang begrenzt, ebenso fehlen belastbare Daten zu den anderen beiden Sommer- (`Mieszko´) und Wintermohnsorten (`Zeno Morphex´). Aufgrund dessen wurden die Sorten und die weißsamige Sorte `Borowski´ in einem zweiten Versuchsteil genauer auf Fettsäuremuster, Tocopherole, flüchtige Verbindungen sowie ihren visuellen, olfaktorischen und gustatorischen Eindruck hin analysiert.

Teil C: Inhaltsstoffliche und sensorische Qualitätsanalysen von Mohnsamen und Mohnöl

Reproduced in part with permission from Journal of Agricultural and Food Chemistry, submitted for publication: Luhmer, K., Schulze-Kaysers, N., Feuereisen, M., Wirth, L., Marezky, F., Wüst, M., Blum, H. and Pude, R. (2021). Fatty acid composition, tocopherols, volatile compounds and sensory evaluation of low morphine yielding varieties of poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds and oils. Unpublished work copyright 2021 American Chemical Society.

7.0 Notwendigkeit der Qualitätssicherung

Die Nutzung des Mohns als Nahrungsmittel hat lange Tradition, denn die ölhaltigen Samen, die natürlicherweise keine Alkaloide enthalten, weisen eine Vielzahl gesundheitsförderlicher Inhaltsstoffe auf und besitzen damit einen hohen ernährungsphysiologischen Wert. Sie enthalten einen hohen Anteil ungesättigter Fettsäuren, verschiedene Mineralstoffe und Vitamine, insbesondere einen hohen Gehalt an Vitamin E^{15,121,122}.

In Deutschland wird der Mohn vorwiegend als Backmohn im Kuchen oder Streumohn auf Brötchen verwendet. Alternativ kann aus den Mohnsamen hochwertiges Öl gewonnen werden⁵. Die Nachfrage nach Mohn ist daher nach wie vor hoch, sodass zusätzlich zum lokalen Anbau der größte Anteil an Mohnsamen importiert wird, um den Bedarf von rund 10.000 t im Jahr zu decken³. Die Anbaufläche in Deutschland betrug im Jahr 2018 275 ha¹⁰, weshalb bei einem durchschnittlichen Ertrag von etwa 1 t ha⁻¹ das Angebot aktuell deutlich geringer als die Nachfrage ist.

Probleme, die die importierte Ware mit sich bringt, sind häufig schwankende Qualitäten und mangelnde Informationen zu Herkunft, Sorten, Lagerung oder Verarbeitung. Lange Transportwege unter suboptimalen Lagerungsbedingungen erhöhen das Risiko von Schimmelbildung¹²³ und der Veränderung von sensorischen Eigenschaften des Mohns zu muffigen oder bitteren Produkten. Oftmals besteht auch das Risiko einer vorherigen Kontamination mit Alkaloiden, wenn Samen von Sorten verkauft werden, die auch der Alkaloidproduktion dienen. Geraten grüne Pflanzenteile oder Kapselreste bei der Ernte unter die Ware, werden die Samen unabsichtlich kontaminiert^{5,6}. Aufgrund der undurchsichtigen Wertschöpfungsketten geraten so aus unterschiedlichen Gründen häufig Proben von mangelnder Qualität nach Deutschland^{3,5,6}. Alternativ zum Import findet in geringem Maßstab auch Mohnanbau in Deutschland mit den zugelassenen morphinarmen Sommermohnsorten `Mieszko´ und `Viola´ und der Wintermohnsorte `Zeno Morphex´ statt. Im Gegensatz zum restlichen Europa, was länderspezifisch den Anbau von insgesamt über 60 Sorten ermöglicht, ist die Sortenwahl somit stark limitiert¹²⁴.

Gleichzeitig bedeutet dies auch, dass die Transparenz der Wertschöpfungskette für in Deutschland angebauten Mohn von vorneherein höher ist, da nur morphinararme Sorten infrage kommen und die Rückverfolgbarkeit zum Anbauer möglich ist. Insbesondere der Trend zu regional und ökologisch erzeugten Produkten kann auch eine Chance für den heimischen Mohnanbau bedeuten. Neben der niedrigen Morphingehalte ist allerdings wenig über die inhaltsstoffliche Zusammensetzung sowie die sensorischen Eigenschaften des Mohns und zum Einfluss der Standortbedingungen auf diese Parameter bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher Informationen über die Wintermohnsorte `Zeno Morphex´ und die beiden Sommermohnsorten `Viola´ und `Mieszko´ gesammelt, die eine Charakterisierung der ernährungsphysiologisch bedeutsamen Inhaltsstoffe erlauben sowie aromagebende Verbindungen und sensorische Merkmale definieren. Für die Praxis könnte eine breitere Informationsgrundlage zu den Qualitätsmerkmalen des heimischen Mohns auch der Entscheidung dienen, Winter- oder Sommermohn in die Fruchtfolge zu integrieren.

Bekannt ist, dass Wintermohn im Allgemeinen durch die längere Entwicklungszeit das größere Ertragspotenzial im Vergleich zu Sommermohn aufweist^{2,125,126}. Dobos et al. (2013) berichten auch von rund 5% mehr Ölgehalt im Wintermohn, wohingegen Kara (2017) keinen Einfluss der Anbauform darauf feststellen konnte. Allerdings wurden auch bei anderen Ölsaaten höhere Ölgehalte in den Winteranbauformen gefunden, beispielsweise 5 – 10% mehr Öl im Winterraps¹²⁷. Inwieweit andere Inhaltsstoffe, wie beispielsweise flüchtige Verbindungen, durch die Anbauform beeinflusst werden, ist beim Mohn noch ungeklärt.

Dies ist die erste Studie, die eine umfassende Charakterisierung der morphinarmen Blaumohnsorten `Viola´, `Mieszko´ und `Zeno Morphex´ und der Weißmohnsorte `Borowski´ auf Basis ihrer inhaltsstofflichen Zusammensetzung in Kombination zu sensorischen Eigenschaften vornimmt. In diesem Rahmen erfolgte Laboranalytik zu Fettgehalt, Fettsäurezusammensetzung, Tocopherolen und flüchtigen Verbindungen. Zusätzlich wurde mit Hilfe eines intensiv geschulten Sensorikpanels eine visuelle, olfaktorische und gustatorische Bewertung der Mohnproben vorgenommen. Im Gegensatz zu anderen Studien wurde nicht nur eine Seite der Produktqualität beleuchtet, sondern auch die Zusammenhänge zwischen chemischer Komposition und sensorischem Eindruck analysiert. Dadurch, dass sowohl Mohnsamen als auch die daraus gewonnenen Öle untersucht wurden, lassen sich zusätzlich Rückschlüsse von der Rohware auf das verarbeitete Produkt ziehen.

7.1 Inhaltsstoffe und sensorische Eigenschaften des Mohns

Der Ölgehalt des Mohns wird in der Mehrzahl der zwischen 1979 und 2019 veröffentlichten Studien auf rund 40% beziffert^{121,128-131}. Die Schwankungen reichen dabei von 21,9% bei Gewinnung durch Kaltpressung¹³² bis 55,0% durch Lösungsmittlextraktion¹³³. Grundsätzlich kann aber mit einer ähnlich hohen Ölausbeute wie bei anderen Ölsaaten gerechnet werden, diese liegen beispielsweise für Raps bei durchschnittlich 43%, für Sonnenblumen bei 38% und für Lein bei 41%¹³⁴. Das Öl ist gleichzeitig ernährungsphysiologisch hochwertig, da ungesättigte Fettsäuren einen Anteil von über 80% ausmachen¹³⁵. Den höchsten Anteil daran macht wiederum die zweifach ungesättigte Linolsäure (C18:2) aus, die 51,6%¹³⁶ bis 78%¹³⁷ der ungesättigten Fettsäuren darstellen kann. Linolsäure besitzt eine Reihe von Eigenschaften, die sich positiv auf die menschliche Gesundheit auswirken, das sind beispielsweise anticancerogene, antiatherogene und antiinflammatorische Wirkungen^{138,139}. Eine zu hohe Zufuhr an ω -6-Fettsäuren wie Linolsäure kann jedoch auch gegenteilige Wirkungen haben, weshalb ein ausgewogenes Verhältnis von ω -6- zu ω -3-Fettsäuren angestrebt wird¹⁴⁰. Neben Linolsäure kommen auch Ölsäure (C18:1), Palmitinsäure (C16:0) und Stearinsäure (C18:0) in höheren Mengen vor, sowie Linolensäure (C18:3) in geringem Anteil^{15,121,122,130,141-144}. Linolensäure ist aufgrund ihrer dreifachen Doppelbindung instabil und anfällig gegenüber Autoxidationsprozessen, weshalb ihr Vorkommen in höherer Konzentration in der Nahrungsmittelproduktion, aufgrund begrenzter Haltbarkeiten der Produkte, Schwierigkeiten verursacht^{137,141}. Trotzdem ist sie als ω -3-Fettsäure ernährungsphysiologisch wertvoll und wäre als Gegenpart zur ω -6 Fettsäure (Linolsäure) im Mohnöl in höheren Mengen wünschenswert.

Die Zusammensetzung des Mohnöls aus den einzelnen Fettsäuren kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden, beispielsweise durch den Genotyp, die Samenfarbe, den Reifegrad der Samen zur Ernte oder durch Umwelteffekte wie Trockenheit, Salz- oder Temperaturstress^{122,129,131,132,145-148}. Kälteeinwirkung kann beispielsweise den Gehalt ungesättigter Fettsäuren erhöhen^{122,129}. Zusammenhänge bestehen auch zwischen den einzelnen Fettsäuren untereinander. Linolsäure lässt sich von Ölsäure ableiten, weshalb negative Korrelationen im Gehalt dieser beiden Fettsäuren, aber beispielsweise auch zwischen Linolsäure und Linolensäure, gefunden wurden^{122,144,148}.

Bei einem Vergleich mit anderen Ölsaaten fällt auf, dass die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Fettsäurezusammensetzung hat. In Studien zu Sonnenblume, Raps und Lein wurde ein erhöhter Gehalt an Ölsäure bei gleichzeitiger Reduktion von Linolsäure festgestellt, wenn zur Phase der Samenreifung hohe Temperaturen vorherrschten^{134,149-152}. Dieser Effekt wurde hauptsächlich der geringeren Desaturaseaktivität zugeschrieben, ein Enzym, das unter kalten Bedingungen Linolensäure aus Ölsäure generiert¹⁵⁰.

Entsprechend wurde auch im Mohn, der in heißem, trockenem Klima angebaut wurde, eine geringere Linolsäurekonzentration im Vergleich zu Mohn aus kälterem Anbaugebiet festgestellt^{9,153,154}.

Neben den Fettsäuren weist das Mohnöl auch erhöhte Gehalte an Vitamin E auf. Vitamin E umfasst dabei die Tocopherole und Tocotrienole, die in vielen Pflanzenölen eine wichtige Rolle als Antioxidantien spielen^{141,155,156}. Im Mohnöl ist vor allem γ -Tocopherol vorhanden, dessen Gehalte zwischen 19,54 und 26,13 mg pro 100 g Öl angegeben werden^{121,141,155,157}. Auch α -Tocopherol wurde in Höhe von 2,20 – 5,53 mg pro 100 g Öl nachgewiesen^{121,130,141,145,155,157}. Alle Tocopherole wirken antioxidativ, α -Tocopherol wird darunter eine besonders hohe antioxidative Aktivität zugeschrieben, da es beispielsweise für eine hohe Stabilität von Olivenöl sorgt¹⁵⁸. Beeinflusst wird der Tocopherolgehalt hauptsächlich durch Sortenwahl, Reifestadium und die klimatischen Wachstumsbedingungen, beispielsweise hängen hohe Temperaturen auch mit einem erhöhten Tocopherolgehalt zusammen. Die Zusammensetzung der einzelnen Tocopherole wird eher vom Pflanzenorgan bestimmt, so kommt α -Tocopherol hauptsächlich in metabolisch aktivem Gewebe vor, während die übrigen Formen eher in Speicherorganen, wie den Samen von Ölsaaten, lokalisiert sind^{145,147}.

Das Aroma von Ölsaaten wird durch eine Vielzahl von Aromastoffen gebildet, die einer Reihe unterschiedlicher Stoffklassen angehören. Strukturell lassen sich diese vor allem den Aldehyden, Ketonen, Estern, Lactonen, Pyrazinen, Schwefelverbindungen, Phenylpropanoiden oder Terpenen zuordnen¹⁵⁹. Viele dieser Substanzen sind flüchtige Verbindungen, die insbesondere in kalt gepressten Ölen in hohen Mengen entstehen¹⁶⁰. Die Art und Menge der gebildeten Verbindungen hängt hauptsächlich von genotypischen Faktoren sowie Reifeprozessen und der Lagerung ab¹⁶¹. Mit den flüchtigen Verbindungen von Mohnölen haben sich bisher einige wenige Studien befasst und als Hauptkomponenten Hexanol, 2-Heptanon, 2-Pentanon, 2-Pentyl-Furan, α -Pinen, Limonen, 1-Pentanol, Hexanal und Hexansäure beschrieben, die sich im Kopfraum der Öle ansammeln und messen ließen^{1,26,162–164}. Viele dieser flüchtigen Verbindungen, wie Pentanal, Hexanal, 2-Heptanon oder Octanal, resultieren aus Oxidationsprozessen der Fettsäuren, insbesondere Linolsäure¹⁶³. Hexanal stellt dabei das Hauptoxidationsprodukt von Linolsäure dar und wurde daher in frisch kalt gepressten Pflanzenölen als dominante flüchtige Verbindung detektiert¹⁶⁵.

Auch Beschädigungen an den Samen können zu verstärkter Oxidation und damit der Akkumulation von Oxidationsprodukten führen. Zusätzlich verringert sich dadurch der Gehalt an antioxidativem γ -Tocopherol und somit auch die Haltbarkeit der Mohnsamen¹⁶⁶. Bestimmte Aromen entstehen erst im Rahmen von Verarbeitungsschritten. Diese Prozessaromen, die beim Kochen, Backen, Rösten, Dämpfen und ähnlichen Prozessen beispielweise durch Maillard-Reaktionen entstehen, sind daher nicht in unbehandelten Ölen zu finden¹⁵⁹.

Stoffklassen, die durch thermische Behandlung entstehen, sind beispielsweise die Pyrazinverbindungen^{26,162}.

Die einzelnen flüchtigen Verbindungen können nicht immer direkt mit einem bestimmten Geruch oder Flavor in Verbindung gebracht werden, da das Aroma häufig von einer Mischung an Komponenten bestimmt wird und die Geruchs- und Geschmacksschwellen, ab der eine Komponente wahrnehmbar wird, sich stark unterscheiden^{26,167}. Trotzdem wurden bereits einige Beziehungen zwischen chemischen Komponenten und spezifischen Aromen, die auch im Zusammenhang mit dem Mohnaroma stehen, identifiziert. Das typische Mohnaroma wird dabei mit 2-Pentylfuran und Pyrazinverbindungen in Zusammenhang gebracht^{162,163} und für ein nussiges, fettiges Aroma werden unter anderem 1-Pentanal, 1-Hexanal und Hexansäure sowie *trans*-2-Octenal verantwortlich gemacht^{163,164}. Fettige Geruchseindrücke im Mohn wurden auch den Verbindungen Nonanal, *trans-trans*-2,4-Nonadienal und Decanal zugeschrieben, die gleichzeitig auch einem Geruch nach Mohnsamen hervorriefen¹⁶³.

1-Hexanal, *trans*-2-Heptenal und 2-Pentylfuran wurden von Krist et al. (2005)¹⁶⁴ und Emir et al. (2014)²⁶ allerdings ebenso einer „grünen“ Geruchswahrnehmung zugeordnet, ebenso grün riechend sind 2-Hexenal, Hexanol oder *trans*-2-Octenal¹⁶³. Auch in Olivenöl sind Hexanal, Hexanol und verwandte C6-Verbindungen für den grünen Geruchseindruck verantwortlich¹⁶¹. Nah der „grünen“ Wahrnehmung ist das Attribut „heuartig“, was beispielsweise als Off-Flavor in getrockneter Petersilie auftritt und durch 3-Methyl-2,4-Nonadion hervorgerufen wird¹⁶⁸. Für einen süßen und fruchtigen Geruchseindruck im Mohnöl stehen nach Krist et al. (2005)¹⁶⁴ 1-Pentanol, 3-Octen-2-on und γ -Hexalacton. Eine hohe Geruchsaktivität in Mohnsamen wurde zudem den Verbindungen Limonen, Nonanal, 2-Pentylfuran, Pentanol und Hexanol zugeschrieben¹⁶³. Limonen und 3-Caren konnten von Krist et al. (2005) einem Zitrusgeruch zugeordnet werden.

Was den Geschmack betrifft, gibt es bisher vor allem Verbindungen zwischen Inhaltsstoffen und dem Bittergeschmack. Zum einen wird freier Linolsäure eine Rolle beim Bittergeschmack zugesprochen, die einen hohen Anteil der Fettsäuren im Mohnöl ausmacht und unter anderem eine niedrige Geschmacksschwelle besitzt¹⁶⁹. Produkte der Lipidoxidation, wie 9-Hydroxy-10,12-Octadecadiensäure, 13-Hydroxy-9,11-Octadecadiensäure und 12,13-Dihydroxy-(E)-9-Octadiensäure wurden von Grosch und Laskawy (1984) im Zusammenhang mit dem Bittergeschmack von Mohnsamen nachgewiesen¹⁶⁹. Dies wurde unter anderem auf die durch das Enzym Lipoxygenase katalysierte Oxidation der Linolsäure zurückgeführt. Auch jüngste Studien konnten einen Zusammenhang zwischen Linolsäure, Oxylipinen und dem Bittergeschmack bestätigen und zudem weitere Stoffe der Lipidoxidation ebenfalls dem bitteren Geschmack zuordnen¹⁷⁰.

In ihrer Untersuchung wiesen Lainer et al. (2020) nach, dass die Fettsäuren Palmitinsäure, Ölsäure, Linolsäure und α -Linolensäure mit bitterem Geschmack in Verbindung stehen¹⁷⁰. Außerdem konnten sie drei Monoglyceride, 2 Degradationsprodukte aus der Monoglyceridoxidation und 10 Lipidoxidationsprodukte, davon 6 aus der Oxidation von C18 Fettsäuren, extrahieren und dem Bittergeschmack zuordnen. Neben den von Grosch und Laskawy (1984)¹⁶⁹ nachgewiesenen Verbindungen waren dies unter anderem 13-Hydroperoxy-9,11-Octadecadiensäure, 9-Hydroxy-10E,12Z-Octadecadiensäure, 9,10,13-Trihydroxy-11-Octadecensäure oder Azelainsäure. Alle Verbindungen wiesen geringe Geschmacksschwellen von maximal 1,61 mmol L⁻¹ auf, insbesondere die aus einer Oxidation von C18-Lipiden entstandenen Stoffe.

Mohnsamen lassen sich anhand ihrer Farbe in Graumohn, Blaumohn und Weißmohn einteilen. Dabei spielt das Aussehen der Samen auch eine wichtige Rolle für die Nutzung in Backwaren. Was im Öl kaum eine Rolle spielt, ist für die Optik bspw. auf dem Brötchen umso wichtiger, weshalb großkörnige, raue, einheitlich gefärbte Samen besonders erwünscht sind²⁷. In den meisten Fällen wird in Europa dabei eine dunkelblaue Samenfarbe bevorzugt²⁷. Dabei werden den Mohnölen der verschiedenen Samenfarben auch leicht unterschiedliche Aromen zugeordnet. Krist et al. (2008)¹ charakterisieren die Öle wie folgt: Graumohnsamen mit leicht nussigem, süßlichem Geruch und schwachem, fettigem, nussigem, süßem Geschmack mit leichter Erdnusshautnote. Weißmohnsamen werden im Geruch mit leicht nussig, Mohngeruch, Haselnuss- und Erdnusnoten und geschmacklich mit fettig, ranzig, leicht nussig, weich und angenehm beschrieben. Die Blaumohnsamen werden von Krist et al. (2008) mit angenehm schwachem, leicht nussig und mildem Geruch sowie fettigem, starkem, vollen Geschmack mit Erdnusshautnote charakterisiert. Was die Gesamtzahl flüchtiger Verbindungen betrifft, konnten Kopunková et al. (2016)¹⁶³ deutlich mehr Verbindungen in Weißmohn detektieren. Auch die Geruchsintensität der Weißmohnsamen war stärker als die der Blaumohnsamen und wurde als reichhaltig, ausgewogen mit teilweise Walnussaromen beschrieben¹⁶³.

Wenn man die Informationen zu vorhandenen Aromastoffen mit Informationen zur Verbraucherakzeptanz in Verbindung setzt, gibt es in der Literatur Hinweise, dass die Vorlieben von Verbrauchern eher zu den Proben tendiert, die weniger flüchtige Verbindungen aufweisen¹⁶⁵. Bestimmte einzelne Verbindungen wie Heptanal, Octanal, Nonanal und Hexanal korrelierten dabei eng mit einer negativen Bewertung durch Konsumenten^{165,167}. Unter den Grundgeschmacksarten lassen sich laut Literatur bitter und süß am intensivsten im Mohn wahrnehmen, wobei ein starker Bittergeschmack Proben von mangelnder Qualität und süß eher der konsumgeeigneteren Ware zugeschrieben wird¹⁷⁰. Daneben treten weitere Flavoreigenschaften auf, die sich bei der Aufnahme der Samen durch den Mund als Zusammenspiel von geschmacklicher und retronasaler Wahrnehmung ergeben¹⁷¹.

Um daher Mohnproben möglichst umfassend durch ein Sensorikpanel beschreiben zu können, werden im Rahmen von Produktprüfungen Attribute ermittelt, die das gesamte Aroma am zutreffendsten beschreiben. Emir et al. (2014)²⁶ ermittelten beispielsweise 12 mohnbezogene Merkmalseigenschaften von Mohnsamen, die von einem Sensorikpanel in ihrer Intensität bewertet wurden, dies waren: mohnsamenartig, röstig, haselnussig, heuartig, adstringierend, wachstartig, fermentiert, scharf, erdig, bitter, süß-aromatisch und „throat-catching“. Anhand dieser Attribute stellten sie vor allem Unterschiede zwischen behandelten (gerösteten oder enzymatisch behandelten) im Vergleich zu unbehandelten Mohnsamen heraus, wohingegen die Mohnsorte einen geringen Einfluss auf die sensorischen Eigenschaften hatte²⁶. Insgesamt wird Mohn, der als bitter, fermentiert oder adstringierend beschrieben wird, negativ wahrgenommen, wohingegen Attribute wie mohntypisch, nussig oder röstig zu den positiven Merkmalen zählen^{1,26}.

7.2 Sensorische Grundlagen

Definition sensorische Analyse

Die sensorische Analyse ist ein wichtiger Baustein, um Lebensmittel umfassend in Aussehen, Geschmack, Geruch, Konsistenz und Textur zu charakterisieren¹⁵⁹. Dies kommt beispielsweise in der Produktentwicklung, Prozess- und Produktoptimierung und der Qualitätskontrolle in verschiedensten Bereichen der (Lebensmittel-) Industrie zum Einsatz und umfasst eine Reihe von wissenschaftlichen Methoden, die belastbare Messergebnisse für eine Produktbewertung liefern können¹⁷². Stone und Sidel (2004) definieren die sensorische Analyse wie folgt:

„Sensory Evaluation has been defined as a scientific method to evoke, measure, analyze, and interpret those responses to products as perceived through the senses of sight, smell, touch, and hearing“¹⁷³

Dabei spielt immer noch der Mensch die Rolle des wichtigsten Messinstruments, der mit dem Einsatz von Hörsinn, Geruchs-, Geschmacks- und Tastsinn einen umfassenden Eindruck des Produkts gewinnen kann¹⁷². Dies ist insbesondere wichtig, da der Gesamteindruck, den ein Lebensmittel vermittelt, vom Zusammenspiel aller sensorischen Eindrücke abhängt¹⁷³. Um die einzelnen Komponenten der verschiedenen Sinneseindrücke wahrzunehmen und präzise zu benennen und zu bewerten, macht es in den meisten Fällen Sinn, ein geschultes Sensorikpanel einzusetzen, was sich über die Auswahl und Bedeutung der genutzten Begriffe einig ist¹⁵⁹. Ziel ist eine möglichst objektive Bewertung, die das Produkt in den Intensitäten seiner Attribute beschreibt, aber keine persönliche Wertung vornimmt.

Alternativ, um beispielsweise Verbraucherpräferenzen zu bestimmen, können auch mit ungeschulten Prüfpersonen sogenannte hedonische Prüfungen durchgeführt werden, in denen der subjektive Eindruck eines Produkts im Vordergrund steht¹⁷². Die Fragestellung spielt somit eine entscheidende Rolle für die Auswahl der Prüfpersonen, aber auch für die Auswahl des passenden Tests.

Sensorische Prüfmethoden

Grundsätzlich wird zwischen analytischen und hedonischen Prüfverfahren unterschieden. Hedonische Tests beantworten Fragen nach Akzeptanz und Präferenz von Produkten beim Konsumenten, wohingegen analytische Prüfmethoden allgemeine (Diskriminierungstests) oder attributbezogene Unterschiede in Produkten (Deskriptive Tests) sichtbar machen sollen¹⁷⁴. Eine Kombination verschiedener Verfahren ist auch denkbar, um Verknüpfungen zwischen objektiven Produktbeschreibungen und Konsumentenpräferenzen herzustellen¹⁷². In dieser Studie werden deskriptive Testverfahren eingesetzt, um möglichst detaillierte Produktbeschreibungen zu erhalten, die eine Unterscheidung der Mohnsorten anhand der gewählten Attribute möglich machen.

Panelrekrutierung

Voraussetzung für die deskriptive Profilprüfung ist die Schulung eines Sensorikpanels, was mit allgemeinen sensorischen Prüfmethoden vertraut gemacht wurde sowie produktspezifische Merkmale bewerten kann. Im Rahmen von Eignungstests und Gruppengesprächen werden qualifizierte Prüfer geschult, die in der Lage sind einzelne Attribute zu erkennen und in ihrer Intensität zu bewerten. Dabei dienen unter anderem Referenzproben mit bestimmten Aromastoffen oder Lebensmitteln als Vergleich, um einen Konsens über die verwendeten Begriffe zu erhalten und das Panel so auf einen möglichst einheitlichen Standard zu kalibrieren¹⁷⁵. Die Schulungstests dienen hauptsächlich der Vorauswahl eines möglichst objektiven Panels und ermöglichen die Identifizierung von Personen, die nicht für die sensorischen Prüfungen geeignet sind¹⁵⁹. Da im Schulungsprozess für gewöhnlich ein größerer Teil der Teilnehmer aufgrund unzureichender sensorischer Fähigkeiten ausscheidet, sollte eine zwei- bis dreifach größere Menge zum Beginn der Prüferauswahl rekrutiert werden, sodass am Ende mindestens 10 qualifizierte Prüfer übrig bleiben (DIN EN ISO 8586:2014-05)¹⁷⁶. Nach Lawless und Heymann (2010)¹⁷⁴ ist eine geringe Prüfermenge (circa 12 Teilnehmer) aufgrund der ausführlichen Ausbildung und Kalibrierung für die deskriptiven Prüfverfahren ausreichend. Der Erfolg einer Prüferschulung lässt sich laut DIN EN ISO 8586:2014-05 danach definieren, ob ein Prüfer anschließend in der Lage ist, sensorische Eindrücke wahrzunehmen, zu erkennen, diese zu beschreiben und zu unterscheiden.

Die DIN EN ISO 8586:2014-05 unterscheidet dabei verschiedene Schulungskategorien:

1. Schulung von Farbe, Geruch, Geschmack und Textur
2. Schulung der Wahrnehmung und Erkennung spezieller Gerüche und Geschmacksarten
3. Schulung zur Anwendung von Skalen
4. Schulung zur Entwicklung und Verwendung von Deskriptoren
5. Produktspezifische Schulung

Zur Durchführung der Schulungen werden eine Reihe von Test-Verfahren angewandt, von denen eine Auswahl auch in dieser Studie zur Panelschulung eingesetzt wurden. Dies sind beispielweise Erkennungsprüfungen und Matching-Tests, Schwellenwertprüfungen, Rangordnungsprüfungen, Unterschiedsprüfungen und Beschreibende Prüfungen¹⁷⁶.

Deskriptive Profilprüfungen

Das Ziel der beschreibenden Profilprüfungen ist die quantitative Bewertung von Produkten anhand spezifischer Merkmale, um ein charakteristisches Produktprofil zu erstellen. Im Vorhinein ist dabei eine qualitative Erfassung der einzelnen Attribute notwendig, die als Grundlage der Bewertung dienen¹⁷⁵. Diese Attributzusammenstellung kann beispielsweise im Rahmen einer einfach beschreibenden Profilprüfung erfolgen (DIN 10964:2014-11)¹⁷⁷. Zu den Prüfungen der Intensitätsbewertung zählen unter anderem das Konsensprofil, das Konventionelle Profil, die Quantitative Deskriptive Analyse (QDA®) oder die Beschreibende Prüfung mit anschließender Qualitätsbewertung. Auch Verfahren, in denen die Prüfer individuelles Vokabular benutzen können, werden angewandt, wie das „Free Choice Profiling“ oder das „Flash Profiling“¹⁷⁵. Die Untersuchungen in dieser Studie erfolgten im Rahmen einer Beschreibenden Prüfung in Anlehnung an DIN 10969:2014-11, indem qualitativ ein Katalog von Merkmalseigenschaften erstellt wurde, die anschließend quantitativ in ihren Intensitäten bewertet wurden. Die Intensitätsbewertung erfolgt üblicherweise anhand einer Skala, auf der die Intensitäten der einzelnen Attribute angegeben werden¹⁷⁵.

8.0 Hypothesen

Ziel der Studie war die Schaffung einer grundlegenden Datenbasis, die die untersuchten morphinarmen Sorten umfassend hinsichtlich ihrer inhaltsstofflichen Zusammensetzung in Beziehung zu den sensorischen Eigenschaften charakterisiert. Demzufolge ergaben sich folgende Hypothesen, die im Zuge der Arbeit beantwortet werden sollten:

1. Es lassen sich Unterschiede in der inhaltsstofflichen Zusammensetzung der Mohnsamen und -öle feststellen, die sich aufgrund der Sorte oder des Anbaustandorts ergeben.
2. Es lassen sich Unterschiede in der sensorischen Charakterisierung der Mohnsamen und -öle feststellen, die sich aufgrund der Sorte oder des Anbaustandorts ergeben.
3. Es gibt einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Aromastoffen und der sensorischen Wahrnehmung der Proben.

9.0 Material und Methoden

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften (IEL) der Universität Bonn (Professuren Lebensmittelchemie und Molekulare Lebensmitteltechnologie) wurden der Ölgehalt der Samen sowie Fettsäurezusammensetzung, Tocopherolgehalt und flüchtige Verbindungen der Mohnöle analysiert und die Mohnsamen und -öle auf visuelle, olfaktorische und gustatorische Merkmale geprüft. Die Öl-Messdaten zu Fettsäuren, Tocopherolen und flüchtigen Verbindungen wurden im Rahmen der Masterarbeit von Lukas Wirth erhoben und die Durchführung der sensorischen Prüfungen fand in Zusammenarbeit mit der Masterarbeit von Elisa Dörr am IEL statt.

9.1 Probenmaterial

Für die inhaltsstofflichen Analysen sowie die sensorische Bewertung wurden 13 Mohnsamenproben und 13 daraus gewonnene Mohnöle verwendet. Die Proben stammten von fünf Betrieben aus vier unterschiedlichen Regionen Deutschlands aus ökologischem sowie konventionellem Anbau. Die Proben aus Nordrhein-Westfalen wurden auf den Versuchsgütern Wiesengut und Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn genommen. Mit fünf Wintermohnproben (‘Zeno Morphex’), sowie drei Proben ‘Mieszko’ und vier Proben ‘Viola’, beides Sommermohne, waren außerdem alle drei in Deutschland für den Anbau zugelassenen Sorten vertreten. Alle drei Sorten sind Blaumohnsorten.

Tab. 15 Übersicht über Anbauformen, Sorten, Anbaustandorte und Erntezeitpunkte der für die Inhaltsstoffanalytik und Sensorik verwendeten Mohnproben aus dem Erntejahr 2019 (CKA: Campus Klein-Altendorf)

Code	Anbauform	Sorte	Region	Standort	Erntedatum
Z1	Wintermohn	‘Zeno Morphex’	NRW*	Wiesengut	25.07.2019
Z2	Wintermohn	‘Zeno Morphex’	Bayern	Friedenfels	29.07.2019
Z3	Wintermohn	‘Zeno Morphex’	NRW	CKA	23.07.2019
Z4	Wintermohn	‘Zeno Morphex’	Hessen	Immichenhain	28.07.2019
Z5	Wintermohn	‘Zeno Morphex’	Niedersachsen	Dudensen	24.07.2019
V1	Sommermohn	‘Viola’	NRW	CKA	14.08.2019
V2	Sommermohn	‘Viola’	Bayern	Friedenfels	12.08.2019
V3	Sommermohn	‘Viola’	Hessen	Immichenhain	09.08.2019
V4	Sommermohn	‘Viola’	Niedersachsen	Dudensen	08.08.2019
M1	Sommermohn	‘Mieszko’	NRW	CKA	14.08.2019
M2	Sommermohn	‘Mieszko’	Bayern	Friedenfels	12.08.2019
M3	Sommermohn	‘Mieszko’	Bayern	Friedenfels	12.08.2019
B1	Sommermohn	‘Borowski’	NRW	CKA	14.08.2019

*Nordrhein-Westfalen

Zusätzlich gab es einmalig die weißsamige Sorte ‘Borowski’, die aus Forschungszwecken am Campus Klein-Altendorf angebaut wurde und zusätzliche Informationen zu Sorten- und Standortunterschieden liefern sollte.

Der Vergleich zu einer weißsamigen Probe sollte außerdem Auskunft geben, ob die Unterschiede hauptsächlich optisch bestehen oder ob es Differenzen zum Blaumohn in inhaltstofflicher Zusammensetzung und Sensorik gibt. Alle Samenproben stammten aus dem Erntejahr 2019 und wurden bis zur Analyse in Leinsäcken in einem fensterlosen Raum bei 4 – 6°C am Campus Klein-Altendorf gelagert. Die jeweiligen Öle wurden manuell fünf Monate nach der Ernte (Januar 2020) am Campus Klein-Altendorf manuell kalt gepresst (s. Kapitel 9.4). Eine Übersicht der Proben sowie deren Anbaustandorte gibt Tab. 15.

9.2 Anbauggebiete

Die verwendeten Mohnsamen stammten aus vier Anbaugebieten, die sich auf die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Hessen und Bayern verteilen und somit die wichtigsten deutschen Mohnanbauregionen abdecken. Durchschnittliche Tagestemperaturen und mittlere Niederschlagssummen an den jeweiligen Standorten sind in Tab. 16 dargestellt.

Nordrhein-Westfalen

Der Mohnanbau in NRW fand an zwei Versuchsstandorten der Universität Bonn statt, dem Wiesengut in Hennef und dem Campus Klein-Altendorf (CKA) in Rheinbach. Die Probe Z1 stammte vom Wiesengut, während die Proben Z3, V1, M1 und B1 am CKA geerntet wurden. Das schon langjährig ökologisch bewirtschaftete Wiesengut liegt in den Niederungen der Sieg bei etwa 65 mm über NN. Durch die Flussnähe sind die Böden schwankenden Grundwasserständen ausgesetzt und als lehmig-schluffige Auensedimentböden charakterisiert. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 10,3°C bei einem mittleren Jahresniederschlag von 840 mm. Die Anbaufläche des Wintermohns lag auf einem sandigen Lehmboden mit einer Ackerzahl von 62, die Vorfrucht war Hafer. Gedüngt wurde die Fläche mit rund 50 kg N ha⁻¹ in Form von Hornmehl im Frühjahr 2019.

Der Campus Klein-Altendorf liegt bei Rheinbach auf der Rhein-Hauptterasse mit hauptsächlich nährstoffreichen Lössböden. Es fallen dort im Mittel 603 mm Niederschlag bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9,4°C. Die Versuchsflächen lagen auf Böden vom Typ Parabraunerde und der Bodenart schluffiger Lehm mit einer Ackerzahl von 93. Die Vorfrucht war Winterweizen und gedüngt wurde nur der Wintermohn mit 50 kg N ha⁻¹ im Frühjahr 2019.

Bayern

Die Proben Z2, V2, M2 und M3 stammten aus ökologischem Anbau auf Flächen der Güterverwaltung Friedenfels in der Region Steinwald in Bayern. Im Steinwald finden sich hauptsächlich Böden aus Granitverwitterung. Die Ackerzahl beträgt dort 30 auf schluffigem Lehmboden und als Vorfrucht diente Winterweizen. Gedüngt wurden die Flächen 2019 nicht.

Hessen

In Hessen wurden sowohl Winter- als auch Sommermohn am Standort Immichenhain ökologisch angebaut. Die Fläche befand sich auf sandigem Lehmboden mit einer Ackerzahl von 80. Wintergetreide diente als Vorfrucht für den Wintermohn, der Sommermohn wurde nach Wintermohn in der Fruchtfolge angebaut. Gedüngt wurden die Flächen mit 80 kg N ha^{-1} Gärsubstrat.

Niedersachsen

Der Mohnanbaustandort in Niedersachsen lag bei Dudensen auf konventionell bewirtschaftetem sandigem Lehmboden. Als Vorfrucht für den Wintermohn diente Wintergerste, für den Sommermohn war es Mais. Der Wintermohn wurde mit 60 kg N ha^{-1} gedüngt und der Sommermohn mit 45 kg N ha^{-1} .

Die Temperaturen und Niederschläge für den Zeitraum zwischen Blüte und Samenreife von Winter- und Sommermohn (Ende Mai bis Mitte August 2019) sind in Tab. 16 dargestellt. Die Wetterdaten wurden von der lokalen Wetterstation am Campus Klein-Altendorf, der Wetterstation der Schlossbrauerei Friedenfels und für Immichenhain und Dudensen aus Daten der jeweils nächstgelegenen Wetterstation (Ottrau-Immichenhain; Essel) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zusammengefasst. Ausgangs-pH-Werte und Bodendaten für alle Standorte gibt Tab. 17 wieder. Zur Bestimmung von pH, P_2O_5 , K_2O , Mg und B an den Standorten Wiesengut und Campus-Klein-Altendorf wurden Mischproben der Versuchsflächen (5 Einstiche) aus dem Februar 2019 analysiert (Agrolab, Landshut, Deutschland). Die Daten der übrigen Standorte beruhen auf Mitteilungen der jeweiligen Anbaubetriebe.

Tab. 16 Mittlere Temperaturen und Niederschlagssummen für die vier Probenregionen im Zeitraum Ende Mai bis Mitte August 2019

2019 KW*	Nordrhein-Westfalen (CKA**)		Bayern (Friedenfels)		Hessen (Immichenhain)		Niedersachsen (Dudensen)	
	Ø T (°C)	NS (mm)	Ø T (°C)	NS (mm)	Ø T (°C)	NS (mm)	Ø T (°C)	NS (mm)
22	16,8	3,7	14,3	5,0	14,8	3,9	17,2	0,9
23	17,6	20,1	17,7	0,5	16,9	18,9	19,7	25,7
24	17,3	2,7	17,8	20,0	16,4	16,5	19,2	17,0
25	19,5	0,5	18,6	4,4	19,4	1,4	20,8	3,9
26	24,0	2,2	22,0	0,0	22,6	0,0	22,8	0,0
27	18,5	3,1	17,8	1,2	16,5	0,0	16,7	3,4
28	16,3	8,8	13,4	18,4	13,1	21,4	15,7	29,5
29	18,1	8,4	17,5	7,8	15,8	16,6	18,4	10,9
30	24,7	32,7	23,1	0,0	23,9	2,2	25,3	0,0
31	19,7	7,8	18,0	23,4	17,9	5,5	20,3	3,3
32	19,8	20,2	18,3	41,0	18,1	22,8	20,2	10,0
33	17,1	17,0	15,6	7,0	15,2	14,9	17,4	17,4
Ø T (°C)	19,1		17,8		17,6		19,5	
Summe NS		127,2		128,7		124,1		122,0

*Blaue Markierungen entsprechen Blüte und Erntezeitpunkten des Wintermohns, orange markiert sind Blüte und Erntezeitpunkt des Sommermohns; **Campus Klein-Altendorf

Tab. 17 Bodendaten der einzelnen Anbauflächen an den verschiedenen Standorten 2019

Probe	Standort	Ackerzahl	Bodenart*	pH				
					P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	B
					mg 100 g ⁻¹	mg 100 g ⁻¹	mg 100 g ⁻¹	mg kg ⁻¹
Z1	Wiesengut	62	sL	6.3	9	11	9.9	0.25
Z2	Friedenfels	30	sL	6.4	21	9	18	0.55
Z3	CKA**	93	uL	6.5	14	15	12.1	0.46
Z4	Immichenhain	80	sL	7.3	27	20	4	-
Z5	Dudensen	-	sL	5.7	7	6.9	4.6	-
V1	CKA	93	uL	6.5	14	15	12.1	0.46
V2	Friedenfels	30	sL	6.4	21	9	18	0.55
V3	Immichenhain	80	sL	7.3	27	20	4	-
V4	Dudensen	-	sL	5.6	-	-	-	-
M1	CKA	93	uL	6.5	14	15	12.1	0.46
M2	Friedenfels	30	sL	6.4	21	9	18	0.55
M3	Friedenfels	30	sL	6.4	21	9	18	0.55
B1	CKA	93	uL	6.5	14	15	12.1	0.46

*sL: sandiger Lehm, uL: schluffiger Lehm; **Campus Klein-Altendorf

9.3 Verwendete Chemikalien

Sowohl für die analytischen Untersuchungen als auch für die sensorische Panelschulung am Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften der Universität Bonn wurden verschiedene Chemikalien verwendet, über die im Folgenden eine Übersicht gegeben wird.

Analytik

Für die Tocopherol-Bestimmung mittel HPLC wurden verwendet: *n*-heptane $\geq 99,0\%$ (VWR International, Langenfeld, Deutschland), *Tert*-butyl methyl-ether $\geq 99,0\%$ (Alfa Aesar, Kandel, Deutschland), Tocopherol Set Calbiochem (Merck, Darmstadt, Deutschland), 2,2,4-Trimethylpentan $\geq 99,5\%$ (VWR International, Langenfeld, Deutschland). Für die Fettsäuremuster Bestimmung mittels GC-FID wurden verwendet: *Tert*-butyl methyl-ether $\geq 99,0\%$ (Alfa Aesar, Kandel, Deutschland), FAME Mix (Merck, Darmstadt, Deutschland), 0,25 M Trimethylsulfoniumhydroxid in Methanol (Fluka, Steinheim, Schweiz).

Sensorik

Für die Panelschulung verwendete Chemikalien: Sucrose (Caesar & Loretz, Hilden, Deutschland), Natriumchlorid (OMIKRO; Rietberg, Deutschland), Natrum-L(+)-glutamat (OMIKRON, Rietberg, Deutschland), Zitronensäure Monohydrat (Ferak Laborat, Berlin, Deutschland), Koffein (Caesar & Loretz, Hilden, Deutschland), Tanninsäure (OMIKRON, Rietberg, Deutschland), Chinolingelb (OMIKRON, Rietberg, Deutschland), Graphitpulver (MATADOR, Remscheid, Deutschland), Kartoffelstärke, *cis*-3-Hexenol (Dreidoppel, Langenfeld, Deutschland), *trans-trans*-2,4-Nonadienal (Silesia Gerhard Hanke, Neuss, Deutschland), 1-Octen-3-ol (Silesia, Gerhard Hanke, Neuss, Deutschland), 2,3,5-Trimethylpyrazin (Silesia, Gerhard Hanke, Neuss, Deutschland), 3-Methyl-2,4-Nonadion (Silesia, Gerhard Hanke, Neuss, Deutschland), *trans-trans*-2,4-Decadienal (Silesia, Gerhard Hanke, Neuss, Deutschland), Propylenglykol (Merck, Darmstadt, Deutschland).

9.4 Probenaufbereitung und -lagerung

Die Mohnsamen wurden im Spätsommer 2019 im schonenden Mähdrusch geerntet und anschließend betriebsspezifisch maschinell gereinigt, um Unkrautsamen und Kapselreste auszusortieren. Anschließend wurden die Mohnsamenproben am Campus Klein-Altendorf nochmals durch ein 1,8 mm Rundlochsieb (Retsch) gesiebt und in Leinsäcken verstaut.

Um das Öl aus den Samen zu gewinnen, wurden die Samen mittels einer manuell bedienbaren Schneckenpresse mit einer Kapazität von 3 kg h^{-1} (Kern Kraft, Reut, Deutschland) am Campus Klein-Altendorf zu Öl verpresst. Dazu wurde die Presse mittels Heizmanschette leicht angewärmt, um den Pressvorgang zu erleichtern, das Öl blieb dabei bei Temperaturen unter 30°C , was zu den Kaltpressverfahren zählt.

Nach und nach wurden insgesamt 4 – 5 kg der unbehandelten Samen pro Probe in den Fülltrichter der Presse gefüllt und kontinuierlich durch die Schneckenpresse befördert. Das zunächst noch mit einer gewissen Menge Restsamen vermischte Öl wurde in einer Keramikkanne aufgefangen und anschließend durch ein grobes Sieb von den Samen getrennt und dann in den Filterprozess gegeben.

Die Ölpresung und Filtrierung fand in einer Laborküche unter größtmöglichem Ausschluss von Tageslicht statt, um eine vorzeitige Photooxidation der Öle während der Filtrierung zu minimieren. Insgesamt erfolgten drei aufeinanderfolgende Filterungsschritte: Nachdem das Öl für 24 h durch einen groben Teefilter filtrierte wurde, schloss sich ein weiterer Filterungsschritt durch einen Kaffeefilter (Selex Selection Größe 4) für 12 h an. In einem letzten Schritt wurde ein Laborfaltenfilter (MN 614 ¼, Macherey-Nagel, Düren, Deutschland) verwendet, sodass ein klares, gelbes Öl ohne Trübungen entstand. Dieses Öl wurde in braune Glasflaschen abgefüllt und lichtgeschützt im Kühlschrank bei etwa 4°C bis zur weiteren Verwendung aufbewahrt. Die vom Öl im ersten Schritt abgetrennten Samen wurden ebenfalls 3-fach gefiltert, sodass das restliche an den Samen befindliche Öl ebenfalls verwendet werden konnte.

9.5 Chemische Analysen

9.5.1 Analyse des Ölgehalts

Der Ölgehalt der Samenproben wurde zweifach bestimmt. Das anfallende Öl aus der manuellen Schneckenpressung wurde am Campus Klein-Altendorf gewogen und der Anteil am Ausgangsgewicht der Proben festgehalten. Die Samenreste, die als Verlust bei der Ölpresung auftraten und nicht vollständig ausgepresst waren, wurden dazu vom Probenausgangsgewicht abgezogen. Nichtsdestotrotz konnte nicht ausgeschlossen werden, dass Ölreste in den Samen verblieben. Zusätzlich wurde der Ölgehalt der Samenproben im Labor (IGV, Nuthetal, Deutschland) mittels akkreditiertem Lösungsmittel-Extraktionsverfahren (ASU L 17.00-4: 2017-10)¹⁷⁸ bestimmt. Bis zu den folgenden Untersuchungen wurde das Öl im Kühlschrank bei 4°C aufbewahrt. Die Analytik fand direkt im Anschluss an die Pressung (Februar 2020) statt.

9.5.2 Analyse des Fettsäuremusters

Das Fettsäuremuster des Mohnöls wurde am Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften der Universität Bonn mittels kapillarer Gaschromatografie (GC) der Fettsäuremethylester (FAME) bestimmt und mittels Flammenionisationsdetektor (FID) (Varian, 450-GC FID, Varian, Walnut Creek, USA) detektiert. Bei der Gaschromatografie werden die Proben in einen Injektor gegeben und dort bei hoher Temperatur verdampft.

Mittels Trägergas wird das Stoffgemisch durch eine Trennsäule geleitet, mit der die einzelnen Stoffe in Wechselwirkung treten. Dadurch werden die verschiedenen Verbindungen aufgetrennt und zu unterschiedlichen Zeiten am Detektor erfasst. Diese Retentionszeiten dienen zur Identifizierung der im Gemisch enthaltenen Verbindungen, indem sie mit bekannten Retentionszeiten von Standardverbindungen verglichen werden.¹⁷⁹ Am FID werden die Stoffe mittels Luft-Wasserstoff-Flamme pyrolysiert. Aus organischen Verbindungen entstehen in diesem Prozess Ionen. Diese Ionen führen zur Änderung des elektrischen Potentials der im Detektor platzierten Elektronen. Aus diesen Änderungen des Elektrodenpotentials können die Konzentration der einzelnen Verbindungen abgeleitet werden.¹⁸⁰

Die Fettsäuren wurden mit Trimethylsulfoniumhydroxid (TMSH) verestert. Dazu wurden zunächst 4 mg der jeweiligen Mohnölprobe in 1000 µl *Tert*-Butylmethylether gelöst. 100 ml dieser Lösung wurden anschließend zu 50 µl TMSH hinzugefügt. Daraus wurde je 1 µl der jeweiligen Probe in die Gaschromatografie (GC) gegeben. Als Vergleichsstandard wurde 1 µl des 37 Komponenten umfassenden FAME Standards ebenfalls unverdünnt in die GC gegeben. Als Kapillarsäule diente Mega-10, 50 m Cyanopropyl Polysiloxan, ID 0,25 mm mit Wasserstoff als Trägergas bei einer Fließgeschwindigkeit von 1 ml min⁻¹ und einer Split-Rate von 1:20. Die Injektor- und Detektortemperaturen wurden auf 250°C festgelegt. Dabei wurde die GC Säule initial auf 60°C aufgeheizt und dort für 6 Minuten gehalten. Anschließend wurde die Säule bei einer Heizrate von 2°C pro Minute auf 230°C aufgeheizt. Die relativen Retentionszeiten der FAME der Proben wurden mit denen des Referenzstandards verglichen und die Peakflächen für eine Quantifizierung integriert. Die Chromatogramme der Referenzsubstanzen sind im Anhang (Abb. A2) zu finden.

9.5.3 Analyse des Tocopherolgehalts

Die Bestimmung der Tocopherole im Mohnöl erfolgte am Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften der Universität Bonn mittels Normalphasen-Hochleistungsflüssigkeitschromatografie (HPLC) (Varian Prostar 210, Varian, Walnut Creek, USA) und Fluoreszenz-Detektion (RF-10A XL, Shimadzu, Duisburg, Deutschland). Es wurden Stammlösungen der DL- α - β - γ - δ -Tocopherole (Tocopherol Set, Merck, Darmstadt, Deutschland) angesetzt. Die HPLC funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip wie die Gaschromatografie. Das zu analysierende Stoffgemisch wird mittels Trennsäule aufgetrennt und die einzelnen Verbindungen am nachfolgenden Detektor identifiziert. Während bei der GC ein Trägergas zum Transport der Stoffe durch die Säule eingesetzt wird, ist die mobile Phase bei der HPLC flüssig. Dazu werden die Analyten in einem Lösemittel gelöst und diese Gemische in die HPLC injiziert. Zur Detektion werden die Moleküle im Detektor durch Strahlung (Anregungswellenlänge) in einen angeregten Zustand versetzt. Wenn das Molekül wieder auf seinen ursprünglichen Zustand zurückfällt (Relaxation),

entsteht langwellige, fluoreszierende Strahlung (Emissionswellenlänge), die vom Detektor erfasst wird.¹⁸¹

Zur Herstellung von Standardlösungen wurden zunächst 50 mg jedes Tocopherols in 1 ml Isooctan gelöst. 100 µl jeder Lösung wurden weiter mit Isooctan aufgefüllt, bis zu einer Konzentration von 50 mg 100 ml⁻¹. Um die Standardlösungen zu identifizieren wurden 1 mg l⁻¹ jedes Tocopherols in *n*-Heptan gelöst und 30 µl davon in die HPLC injiziert. Es wurde eine Standardreihe mit 5 Standardmischungen, die jedes der Tocopherole (initiale Konzentration 10 mg l⁻¹) enthielten, vorbereitet und in der HPLC zwecks Kalibrierung getestet (Tab. 18). Von den hergestellten Standardmischungen wurden 30 µl in die HPLC injiziert.

Tab. 18 Standardkalibrierlösungen zusammengesetzt aus den Einzelstandards der Tocopherole in 1 ml HPLC-Vials

Standard- lösung	α-Tocopherol (µl)	β-Tocopherol (µl)	γ-Tocopherol (µl)	δ-Tocopherol (µl)	<i>n</i> -Heptan (µl)
1	10 [0,10 mg l ⁻¹]	2 [0,02 mg l ⁻¹]	100 [1 mg l ⁻¹]	2 [0,02 mg l ⁻¹]	886
2	15 [0,15 mg l ⁻¹]	4 [0,04 mg l ⁻¹]	150 [1,5 mg l ⁻¹]	4 [0,04 mg l ⁻¹]	827
3	20 [0,20 mg l ⁻¹]	6 [0,06 mg l ⁻¹]	200 [2 mg l ⁻¹]	6 [0,06 mg l ⁻¹]	768
4	25 [0,25 mg l ⁻¹]	8 [0,08 mg l ⁻¹]	250 [2,5 mg l ⁻¹]	8 [0,08 mg l ⁻¹]	709
5	30 [0,30 mg l ⁻¹]	10 [0,10 mg l ⁻¹]	300 [3,0 mg l ⁻¹]	10 [0,10 mg l ⁻¹]	650

Zur Analyse wurden je 50 mg pro Ölprobe in einen 10 ml Kolben gegeben und mit *n*-Heptan aufgefüllt. Das Injektionsvolumen der Proben war 30 µl, die im Autosampler platziert wurden (Varian 410, Varian, Walnut Creek, USA). Als Vorsäule wurde Lichrospher® Si 60 DIOL, 5 µm, 10 mm und als Hauptsäule Lichrospher® 100 DIOL 5 µm, 250 x 4,6 mm (Merck, Darmstadt, Deutschland) bei einer Fließgeschwindigkeit von 1 ml min⁻¹ bei 25°C verwendet. Die Fluoreszenzdetektion fand bei 295 nm Anregungswellenlänge und 330 nm Emissionswellenlänge bei einer Zeitkonstante von 1 s statt. Die Identifikation der Tocopherole erfolgte durch Vergleich der Retentionszeiten der Proben mit den Standardlösungen. Quantifiziert wurden die Tocopherole über Integration der Peakflächen der einzelnen über die Standards identifizierten Tocopherole. Chromatogramme der Standard-Tocopherole befinden sich im Anhang (Abb. A3).

9.5.4 Analyse der flüchtigen Verbindungen

Die Extraktion der flüchtigen Verbindungen aus dem Kopfraum der Mohnöle wurde in Anlehnung an Krist et al. (2005)¹⁶⁴ mit einigen Modifizierungen am Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften der Universität Bonn durchgeführt. Von jedem Öl wurde 1 mg in ein 10 ml Vial gegeben. Skatol diente als interner Referenzstandard, von dem 5 µl zu jedem Öl hinzugegeben wurde. Mittels Headspace Solid Phase Microextraction (SPME) wurden die volatilen Verbindungen aus dem Kopfraum der Öle an der SPME Faser gesammelt.

Bei der SPME werden flüchtige Verbindungen aus dem gasförmigen Kopfraum einer flüssigen Probe (wie die Mohnöle) an eine feste Phase (SPME Faser) adsorbiert. Anschließend wird die Faser in einen Injektor überführt und die adsorbierten Stoffe werden über einen Gaschromatografen aufgetrennt. Die Identifizierung der enthaltenen Verbindungen erfolgt mittels Massenspektrometrie, die ebenso eine Quantifizierung der Stoffe ermöglicht. ¹⁸²

Als SPME Faser wurde Supelco 1 cm, 50/30 mm DVB/Carboxen/PDMS Stable-Flex (Supelco/Sigma-Aldrich, München, Deutschland) verwendet. Die SPME Faser wurde direkt nach Adsorption in die GC-Massenspektrometrie (GC-MS) überführt (Varian 450-GC gekoppelt mit Varian 240-MS IT Massenspektrometer, Varian, Walnut Creek, USA). Dort betrug die Desorptionszeit 25 min bei einer Injektortemperatur von 270°C. Um die Sensitivität der Methode zu erhöhen wurden Agitortemperatur, Pre-Inkubationszeit (Zeit, in der das Öl ohne SPME Faser erhitzt wurde), Extraktionszeit, Fließgeschwindigkeit des Trägergases und Ofentemperatur variiert und schließlich die folgenden Einstellungen verwendet: Agitortemperatur: 85°C, Pre-Inkubationszeit: 20 min, Extraktionszeit: 20 min. Die initiale Ofentemperatur betrug 38°C und wurde zunächst bis 144°C in Heizraten von 1,5°C pro Minute hochgefahren und dort für 7 Minuten gehalten. Anschließend erfolgte ein weiterer Temperaturanstieg auf 300°C in Intervallen von 30°C pro Minute.

Die verwendete Säule war RTX®5, 30 m Diphenyl/Dimethylpolysiloxan (5%/95%), ID 0,25 mm (Restek, Bad Homburg, Deutschland). Die Split-Raten der GC waren 1:20 von Minute 0 – 0,01, aus für Minute 0,01 – 3, 1:100 für Minute 3 – 24 und 1:20 für Minute 25 bei einer Fließgeschwindigkeit von 1,2 ml min⁻¹ und Helium als Trägergas. Die Einstellungen der Massenspektrometrie waren: EI Full Scan bei 35 – 350 m/z für 70 Minuten und Scan aus für Minute 1 – 3. Die Identifizierung der volatilen Verbindungen erfolgte durch Vergleich der resultierenden Massenspektren und Retentionszeiten mit denen aus einer Referenzdatenbank (NIST). Die Referenzliteratur, charakteristischen Massen und R- und F-matches sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Tab. 19 Retentionsindizes und Massenspektrometrie-Daten zu den flüchtigen Verbindungen, die im Kopfraum der Mohnöle detektiert wurden im Vergleich zu in der Literatur angegebenen Retentionsindizes

Komp.	Flüchtige Verb.	RI ^a	RI Lit. ^b	charakteristische Massen	R. ^c	F. ^d
1	2-Hexanon	826	789 ¹⁸³	58,43	838	838
2	Hexanal	829	805 ¹⁸⁴	99,57,56,44,41	825	776
3	Isovaleriansäure	858	866 ¹⁸⁵	87,60,41	763	763
4	1-Hexanol	867	867 ¹⁸⁶	69,56, 55,43	816	781
5	2-Heptanon	881	890 ¹⁸⁷	58,43	745	745
6	Pentansäure	899	908 ¹⁸⁸	73,60	901	883
7	α-Pinen	915	930 ¹⁸⁹	93,92,77,39	839	746
8	2-Heptenal	945	964 ¹⁹⁰	83,69,55,41	823	815
9	2-Hepten-1-ol	961	e	81,57,41	841	813
10	1-Heptanol	962	969 ¹⁹¹	70,69,56,55,41	815	740
11	1-Octen-3-ol	970	975 ¹⁹²	57,43	887	887
12	2-Pentylfuran	980	989 ¹⁹³	138,82,81,53	801	765
13	Octanal	998	1004 ¹⁹⁴	69,57,53,41	830	781
14	3-Caren	1001	1007 ¹⁸⁹	93,91,79	885	885
15	L-Limonen	1031	1027 ¹⁹⁵	93,79,68,67,39	885	885
16	Hexansäure	1077	1036 ¹⁹⁶	73,60,43	883	813
17	2-Octenal	1097	1070 ¹⁹⁷	83,70, 55,41	798	788
18	2-Octen-1-ol	1109	1071 ¹⁹⁸	81,67, 57,41	828	828
19	1-Octanol	1109	1076 ¹⁹⁹	83,69,56,55,41	861	854
20	α-Terpinolen	1116	1088 ¹⁹⁴	136,121,105, 93,79	809	715
21	Fenchon	1117	1096,4 ²⁰⁰	91,69,41	836	836
22	2-Isopropyl-3-Methoxy-pyrazin	1124	1098 ²⁰¹	152,137,124	851	851

Komp.	Flüchtige Verb.	RI ^a	RI Lit. ^b	charakteristische Massen	R. ^c	F. ^d
23	2-Nonen-1-ol	1131	1171 ²⁰²	81,57,55,41	820	806
24	Heptansäure	1132	1078 ²⁰³	87,73,60,41	779	735
25	Menthol	1178	1173 ²⁰⁴	123,95,81,71,67	892	892
26	2-sec-Butyl-3-Methoxypyrazin	1179	1173 ²⁰⁵	151,138,124	874	869
27	2-Isobutyl-3-Methoxypyrazin	1185	1181 ²⁰⁶	151,124,94	919	919
28	Methylsalicylat	1193	1193 ²⁰⁷	152,121,120,92	814	769
29	Estragol	1197	1199 ¹⁹⁴	148,147,121,77	856	707
30	Octansäure	1200	1192 ²⁰⁸	73,60,55,41	824	815
31	Decanal	1204	1204 ²⁰⁹	82,70,57,55,41	824	815
32	D-Carvon	1241	1243 ²¹⁰	108,93,82,54,39	918	818
33	Anethol	1284	1285,5 ²¹¹	148,147,117,91,77	942	942
34	Pentylhexanoat	1288	1287 ²¹²	117,99,70,43	898	893
35	α -Gurjunene	1323	1382 ²¹³	204,189,161,119,105,41	820	762
36	unbekanntes Sesquiterpen (1)	1332	e	204,189,161,119,105,41	e	e
37	unbekanntes Sesquiterpen (2)	1370	e	189,161,133,119,91,41	e	e
38	2-Butyl-2-Octenal	1372	1367 ²¹⁴	161,133,91,69,41	903	887
39	β -Caryophyllen	1410	1416 ¹⁹⁴	182,139,111,69,55	902	902
40	α -Caryophyllen	1445	1442 ²¹⁵	121,93,80,67	864	803
41	β -Farnesen	1454	1458 ²¹⁶	133,93,69,41	878	861
42	unbekanntes Sesquiterpen (3)	1478	e	161,132,119,105,91,69,41	e	e
43	β -Bisabolen	1504	1506 ²¹⁷	119,93,79,69,63,41	816	801
44	β -Sesquiphellandren	1519	1524 ¹⁸⁹	204,161,133,105,91,69	719	694

^a Retentions-Index basierend auf RTC®-5 Säule; ^b Retentions-Index basierend auf der Literatur; ^c R-match; ^d F-match; ^e ohne Information

9.6 Sensorische Prüfmethoden

9.6.1 Panelschulung

Alle Samen- und Ölproben wurden in einer sensorischen Profilprüfung auf visuelle, olfaktorische und gustatorische Merkmale und Textur untersucht. Dazu fand zunächst eine mehrstufige Panelschulung statt, um ein ausgebildetes Prüferteam zusammenzustellen. Anschließend erfolgte die Verkostung und sensorische Charakterisierung der Samen- und Ölproben anhand vorher erstellter Attributenlisten in Form einer beschreibenden Profilprüfung. Ziel der beschreibenden Verfahren der sensorischen Analyse ist der Erhalt einer detaillierten Produktbeschreibung, die einen Vergleich zu anderen Produkten erlaubt und der Qualitätssicherung dienen kann¹⁷⁵. Die erhaltenen Informationen erlauben zudem eine Verbindung mit analytischen Messdaten im Rahmen von Korrelations- oder Regressionsanalysen¹⁷⁴.

Die Panelschulung wurde nach DIN EN ISO 8586:2014-05¹⁷⁶ und DIN ISO 3972:2013-12²¹⁸ mit wenigen Modifikationen durchgeführt. Gestartet wurde das Training mit 24 Freiwilligen mit durchmischter Geschlechts- und Altersstruktur. Wenn im Folgenden von Prüfern und Panelisten die Rede ist, dient das ausschließlich der besseren Lesbarkeit und schließt weibliche Prüfpersonen mit ein. Diese Personen durchliefen ein etwa zweimonatiges Training mit sieben Stufen, was im Sensoriklabor des Instituts für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften (IEL, Universität Bonn) stattfand. In diesem Food Grade Labor befanden sich Prüfkabinen, die dem Standard nach DIN EN ISO 8589:2014-10 entsprachen. Jeder Prüfer konnte so in einer Einzelkabine unter voreingestellten Lichtbedingungen die Proben störungsfrei bewerten.

Die Prüfer erhielten zusätzlich zu den Prüfungen Hinweise zum Verhalten vor und während einer Schulung (Anhang Formular F1). Für die einzelnen Schulungsschritte gab es festgelegte Schwellen, ab denen eine Prüfung als bestanden galt. Beim Nichtbestehen einer Schulungsprüfung konnte diese maximal zweimal an einem neuen Tag wiederholt werden. Ansonsten schied der Prüfer aus dem Panel aus. Schlussendlich konnten 14 Teilnehmer das Schulungstraining erfolgreich beenden, die dann die Profilprüfung der Proben vornahmen. Im finalen Panel befanden sich 4 Männer und 10 Frauen im Alter von 23 bis 58 Jahren. Tab. 20 beinhaltet eine Übersicht der verschiedenen Schulungsschritte.

Tab. 20 Reihenfolge der einzelnen Schulungstests im Rahmen der sensorischen Panelschulung

Testnummer	Test	Schulungsstufe
1	Farbsehtest (online)	Physiologische Beeinträchtigungen
2	Geschmackserkennungstest	Physiologische Beeinträchtigungen
3a	Gelbstufentest	Sensitivitätsschulung
3b	Graustufentest	Sensitivitätsschulung
4	Geruchserkennungstest	Physiologische Beeinträchtigungen
5a	Schwellenwertprüfung bitter	Sensitivitätsschulung
5b	Schwellenwertprüfung süß	Sensitivitätsschulung
6	Intensitätsprüfung Geruch	Sensitivitätsschulung
7	Einfach beschreibende Prüfung	Spezifische Produktschulung

Visuelle Schulung

Im ersten Schulungsschritt sollte ausgeschlossen werden, dass eine Farbsehschwäche bei einem der Panelteilnehmer bestand. Hierfür wurde der Ishihara Test nach DIN EN ISO 8586:2014-05 ausgewählt. Dieser besteht aus 17 Abbildungen, in denen Zahlen erkannt werden müssen, was bei einer ausgebildeten Farbsehschwäche nicht überall möglich ist. Wenn mindestens 15 von 17 Abbildungen richtig erkannt wurden, galt dieser Test als bestanden. Der Test wurde den Teilnehmern als PDF-Dokument per Mail, zusammen mit einem Word-Dokument zur Angabe der Antworten, zugesendet.

Es folgten zwei weitere Tests zur Schulung der visuellen Wahrnehmung in Form von Rangordnungsprüfungen nach DIN EN ISO 8586:2014-05. Insbesondere die Farberkennung und Wahrnehmung verschiedener Farbintensitäten sollte hierdurch trainiert werden. In beiden Tests mussten verschieden konzentrierte Farblösungen anhand ihrer Farbunterschiede von hell nach dunkel in die richtige Reihenfolge gebracht werden. Der erste Test diente zur Unterscheidung verschiedener Graustufen, was im Rahmen der visuellen Mohnsamenbewertung benötigt wurde. Für diese Rangordnungsprüfung wurden 10 unterschiedlich konzentrierte Graphit-Stärke Mischungen nach DIN EN ISO 8586:2014-05 angefertigt. Als Ausgangsmischung wurde eine Mischung aus 90% Speisestärke und 10% Graphitpulver hergestellt, auf deren Basis die 10 Prüfproben wiederum mit Speisestärke angemischt wurden (Tab. 21). Zur Prüfung wurden die Proben in Reagenzgläser abgefüllt und diese verschlossen.

Tab. 21 Mischungsverhältnisse der Graphit/Stärkemischungen des Graustufentests nach DIN EN ISO 8586:2014-05¹⁷⁶

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ausgangsmischung (g)	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
Speisestärke (g)	19,9	19,7	19,5	19,3	19,1	18,9	18,7	18,5	18,3	18,1

Auf ähnliche Art und Weise wurde ein Gelbstufentest im Hinblick auf die Farbe des Mohnöls durchgeführt. Die Stammlösung aus Chinolingelb in Leitungswasser ($0,5 \text{ g l}^{-1}$) wurde nach DIN ISO 8586:2014-05 angesetzt. Aus der Stammlösung wurden zunächst 10 verschiedene Verdünnungen mit Leitungswasser in verschließbaren Kolben hergestellt. Davon wurden zur Prüfung je 20 ml in ein Reagenzglas mit Schraubverschluss abgefüllt. In einem Vorversuch mit zwei unabhängigen Testpersonen stellte sich heraus, dass die Farbunterschiede zwischen den 10 Proben so gering ausfielen, dass eine fehlerfreie Sortierung unmöglich wurde. Aufgrund dessen wurde die Anzahl der Prüfproben für die Panelschulung auf die folgenden 6 verschiedenen Konzentrationen reduziert (Angaben in ml Stammlösung zu ml Leitungswasser): 4:196 / 6,2:193,8 / 9,8:190,2 / 15,2:184,8 / 23,8:176,2 / 29,8:170,2.

Um den jeweiligen Test zu bestehen, durften maximal zwei benachbarte Proben vertauscht werden. Codiert waren die Reagenzgläser mit dreistelligen Zufallscodes, sie wurden bei hellster und kältester Lichteinstellung der Prüfkabinen bewertet.

Gustatorische Schulung

DIN EN ISO 8586:2014-05 sieht für die Überprüfung einer möglichen Geschmacksblindheit einen Geschmackserkennungstest vor. Die Umsetzung dieses Tests erfolgte mit Prüflösungen, hergestellt nach DIN ISO 3972:2013-12²¹⁸, die die fünf Grundgeschmacksarten süß, bitter, sauer, salzig und umami abdeckten. Hierzu wurden Testlösungen mit Saccharose ($5,76 \text{ g l}^{-1}$), Koffein ($0,195 \text{ g l}^{-1}$), Zitronensäure ($0,28 \text{ g l}^{-1}$), Natriumchlorid ($1,19 \text{ g l}^{-1}$) und Mononatriumglutamat ($0,29 \text{ g l}^{-1}$) gelöst in Leitungswasser angesetzt. Zur Prüfung wurden den Panelisten 10 Proben auf Raumtemperatur gereicht, wovon je zwei Proben süß, sauer, salzig und bitter waren und eine Probe umami. Die fünfte Grundgeschmacksart umami wurde 1908 zum ersten Mal beschrieben und wird dem Geschmack nach Mononatriumglutamat zugeordnet²¹⁹. Die zehnte Probe entsprach neutralem Leitungswasser. Die Proben wurden in zufälliger Reihenfolge in 25 ml fassenden, undurchsichtigen Plastikbechern gereicht und die Lichteinstellung der Prüfkabinen wurde auf die hellste und kälteste Einstellung gesetzt, da die Lösungen farblos und somit optisch nicht unterscheidbar waren. Die Prüfer sollten die Proben einzeln nacheinander bewerten und keine Probe nochmals rückverkosten. Um den Test zu bestehen, mussten mindestens 8 von 10 Proben richtig erkannt und auf dem vorgegebenen Prüfbogen notiert werden.

Zusätzlich wurde neben dem Test eine Probe mit Tanninsäure (1 g l^{-1} nach DIN EN ISO 8586:2014-05) gereicht, um die Panelisten mit dem „adstringierenden“ Eindruck vertraut zu machen.

Ein weiterer Schritt bestand darin, die Wahrnehmung von Geschmacksunterschieden verschieden konzentrierter Lösungen einer Geschmacksart zu trainieren, sowie eventuelle Geschmacksblindheiten herauszufinden, was nach DIN EN ISO 8586:2014-05 in Form von Schwellenwertprüfungen überprüft werden kann. Umgesetzt wurde die Schwellenwertprüfung Geschmack auf Grundlage der DIN ISO 3972:2013-12 mit dem Ziel festzustellen, ab welcher Konzentration die Geschmacksarten süß und bitter richtig identifiziert werden konnten. Ausgewählt wurden die Grundgeschmacksarten süß und bitter, da diese beiden auch in Mohnsamen üblicherweise vorkommen können²⁶.

Im Rahmen der Prüfung wurden zwei Konzentrationsreihen der Geschmacksarten süß und bitter angesetzt, die jeweils in zufälliger Reihenfolge gereicht und von den Panelisten von schwacher zu hoher Geschmacksintensität geordnet werden sollten. Zum Ansetzen der Stammlösungen wurden auf Grundlage des Beiblatts 1 zur DIN ISO 3972:2013-12 48 g l^{-1} Saccharose, bzw. $1,35 \text{ g l}^{-1}$ Koffein in Leitungswasser gelöst. Zur optimalen Lösung wurden beide Stammlösungen im verschlossenen Kolben auf einem Rührer mit Heizplatte jeweils für 10 min bei 800 rpm gerührt, wobei die Lösungen auf 80°C erwärmt wurden. Wichtig war, dass das Ansetzen der Lösung mit Saccharose erst kurz vor der Prüferschulung stattfand, da diese binnen 24 h verwendet werden muss (DIN ISO 3972:2013-12). Anschließend wurden, ebenfalls auf Basis des Beiblatts 1 zur DIN ISO 3972:2013-12, 8 verschiedene Konzentrationen von Prüflösungen aus den Stammlösungen verdünnt mit Leitungswasser hergestellt und in undurchsichtige Plastikprüfbecher abgefüllt.

Zur Prüfung wurden die mit dreistelligen Zufallscodes beschrifteten Proben in geordneter Reihenfolge von schwach konzentriert bis hoch konzentriert gereicht, wobei die zweithöchste Konzentration doppelt vorhanden war, da eine Doppelreichung von 1 – 3 Proben auch von der DIN ISO 3972:2013-12 vorgesehen wird. Außerdem stellte die jeweils erste Probe eine Neutralprobe mit reinem Leitungswasser dar, weshalb sich insgesamt 10 Proben für den süßen und 10 Proben für den bitteren Geschmack ergaben. Die Prüfer wurden angewiesen die Proben in der vorgegebenen Reihenfolge zu verkosten und keine Rückverkostungen vorzunehmen. Die Geschmacksart wurde nicht vorgegeben und die Prüfer sollten notieren, ab welcher Probe die Geschmacksart erkannt wurde. Gleichzeitig sollte mit Hilfe von Strichlisten markiert werden, zwischen welchen Proben Konzentrationsunterschiede wahrgenommen wurden und entsprechend ein Strich ergänzt werden, wenn die Geschmacksintensität stärker wurde.

Bestanden war der Test, wenn beide Geschmacksarten richtig erkannt wurden und die Wahrnehmung bis spätestens zur zweithöchsten Konzentration erfolgte. In Tab. 22 sind die Konzentrationen der verwendeten Prüflösungen angegeben.

Tab. 22 Mischungsverhältnisse der Stammlösungen „süß“ und „bitter“ mit Leitungswasser zur Herstellung von je 1 Liter Prüflösung der Schwellenwertprüfung Geschmack

Prüflösung		süß		bitter	
Nr.	Stammlösung (ml)	Leitungswasser (ml)	Stammlösung (ml)	Leitungswasser (ml)	
1	250	750	200	800	
2	150	850	160	840	
3	90	910	128	872	
4	54	946	102	898	
5	33	967	82	918	
6	20	980	66	934	
7	12	988	52	948	
8	7	993	42	958	

Die Geschmacksbewertung der Mohnsamen und -öle umfasste neben den Grundgeschmacksarten bitter und süß auch verschiedene Flavorattribute wie „mohntypisch“, „nussig“ oder „erdig“ (Tab. 24). Anatomisch ist der Mensch nur in der Lage die fünf Grundgeschmacksarten salzig, süß, sauer, bitter und umami anhand von Molekülbindungen auf den Zungenpapillen zu identifizieren²²⁰. Trotzdem werden zahlreiche weitere Begriffe im Zusammenhang mit dem Geschmack von Lebensmitteln benutzt. Verursacht werden diese Geschmackseindrücke von einem Zusammenspiel zwischen Geschmackssinn und retronasaler Wahrnehmung, was Murphy et al. (1977) bereits Ende der 70er Jahre untersuchten²²¹. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass retronasale Eindrücke mit geschmacklichen verwechselt werden können und damit zu einem verstärkten Geschmackseindruck beitragen^{221,222}. Neuere Untersuchungen zeigten auch den umgekehrten Fall, dass insbesondere ein süßer Geschmack bestimmte Geruchswahrnehmungen verstärken kann²²³. In jedem Fall wird der Gesamteindruck, der bei oraler Aufnahme von Lebensmitteln entsteht unter dem Begriff Flavor zusammengefasst¹⁷¹. Die im Rahmen dieser Studie verwendeten Flavor-Attribute sind größtenteils identisch zu den verwendeten Geruchsattributen und aufgrund der geschilderten Zusammenhänge vermutlich auf dieselben aromagebenden Verbindungen zurückzuführen. Durch die Aufnahme der Samen in den Mundraum, die Zerkleinerung durch das Kauen und Vermischung mit Speichel, können trotzdem andere Intensitäten wahrgenommen werden¹⁷¹.

Olfaktorische Schulung

Zur Überprüfung der Geruchswahrnehmung und um die Panelisten an verschiedene, für Mohn relevante, Gerüche zu gewöhnen, wurde zunächst eine Geruchserkennungsprüfung nach DIN EN ISO 8586:2014-05 durchgeführt. Dies sollte zum einen Personen von der weiteren Schulung ausschließen, wenn diese nicht in der Lage wären, Gerüche zu identifizieren und zum anderen der intensiveren Auseinandersetzung mit dem eigenen Geruchssinn und dessen Sensitivierung dienen. Im Rahmen des Erkennungstests wurden dem Panel fünf Geruchsbeispiele gegeben, die anhand einer Liste dem entsprechenden Geruch zugeordnet werden mussten.

Die ausgewählten Aromen waren Zimtaldehyd (Zimtgeruch), *cis*-3-hexenol (grün, grasig), *trans-trans*-2,4-Nonadienal (fettig, ölig), 2,3,5-Trimethylpyrazin (nussig, röstig, erdig) und 1-Octen-3-ol (pilzartig, waldbodenartig)¹⁵⁹. Die letztgenannten vier Verbindungen repräsentieren Gerüche, die im Mohn verstärkt relevant sein können und zum Teil auch im Mohnöl nachgewiesen wurden^{26,164}. Zimtaldehyd diente zum Vergleich als produktfremder Aromastoff. Als Ausgangslösung wurden 10 µl jedes Aromastoffes in 990 µl Propylenglykol, einem geruchsfreien Verdünnungsmittel, gelöst. Vorversuche mit verschiedenen angesetzten Konzentrationen der Stoffe gelöst in Propylenglykol wurden gemäß DIN EN ISO 8586:2014-05 dazu genutzt, die Schwelle zu ermitteln, ab der ein Geruch eindeutig wahrnehmbar wurde, um so die Probenkonzentrationen für die Panelschulung auszuwählen. In der Panelschulung eingesetzt wurden schließlich *cis*-3-Hexenol in einer Konzentration von 20.000 ppm, *trans-trans*-2,4-Nonadienal und 1-Octen-3-ol mit 200 ppm und 2,3,5-Trimethylpyrazin mit 20 ppm. Die Konzentration der Zimtsäure war unbekannt, jedoch das Aroma leicht zu erkennen, weshalb diese in ihrer Ausgangsform in die Schulung übernommen wurde. Dazu wurden Prüfröhrchen mit 5 ml der Prüflösungen, was einem Drittel des jeweiligen Röhrchens entsprach, gefüllt und mit dreistelligen Zufallscodes beschriftet. Als Prüfröhrchen dienten Reagenzgläser mit Schraubverschluss, die hermetisch verschließbar waren, sodass sich die Geruchsmoleküle im Kopfraum des Glases anreichern konnten. Während der Prüfung sollten die Prüfer mit beiden Nasenlöchern am Gefäß riechen und zwischen den Proben den Geruchssinn durch Riechen an der Armbeuge oder dem Handrücken neutralisieren. Da sich im Laufe der Schulung herausstellte, dass die Probe „nussig, röstig, erdig“ (2,3,5-Trimethylpyrazin) deutlich schwerer zu erkennen war als die übrigen Proben, wurde die Mindestanforderung herabgesetzt, sodass insgesamt am Schulungstermin drei von fünf Proben dem richtigen Geruch zugeordnet werden mussten. Um die minimal gelblich eingefärbte Probe des Zimtaldehyds zu maskieren, wurde das Kabinenlicht maximal gedämmt und warm eingestellt.

Neben der Geruchserkennung spielt auch die Wahrnehmung von Geruchsintensitäten eine wichtige Rolle in der Beschreibung der Mohnproben. Die DIN EN ISO 8586:2014-05 sieht dafür eine Geruchsintensitätsschulung vor, die in Form einer Rangordnungsprüfung nach DIN ISO 8587:2010-08²²⁴ durchgeführt wurde. Ähnlich wie beim Geschmacksintensitätstest mussten hier Geruchsproben von schwach wahrnehmbar bis intensiv wahrnehmbar geordnet werden. Insgesamt waren es 6 Aromastoffe, die jeweils in drei verschiedenen Konzentrationen gereicht wurden. Ausgewählt wurden Aromen, die aus der Literatur und Vorversuchen mit dem Mohngeruch in Zusammenhang gebracht werden konnten.

In der Schulung wurden schließlich *cis*-3-hexenol, *trans-trans*-2,4-Nonadienal, 2,3,5-Trimethylpyrazin und 1-Octen-3-ol verwendet, Stoffe, die wie oben erwähnt zum Teil bereits als flüchtige Verbindungen im Mohnöl nachgewiesen wurden. Zusätzlich fiel die Wahl auf 3-Methyl-2,4-Nonadion und *trans-trans*-2,4-Decadienal, die sich mit den Attributen „heuartig, strohig“ und „fettig“ beschreiben lassen und laut DIN 10964:2014-11¹⁷⁷ und dem Praxisleitfaden zur Geruchs- und Aromaschulung in der Sensorik als Referenzsubstanzen zu diesen Gerüchen dienen können¹⁵⁹. Die für die Schulung ausgewählten Konzentrationen wurden in einem Vorversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 8586:2014-05 bestimmt. Hierzu wurden 5, 10, 20, 40, 100 und 500 ppm des jeweiligen Aromastoffs in Propylenglykol gelöst und in verschließbare Reagenzgläser abgefüllt. Im Fall von *cis*-3-Hexenol, was in unverdünnter Ausgangskonzentration vorlag, mussten aufgrund ansonsten zu kleiner Volumina Prüflösungen mit 100facher Konzentration hergestellt werden. Um Geruchsunterschiede zu verstärken, wurden im Fall von 2,3,5-Trimethylpyrazin eine weitere Lösung mit 60 ppm und von 3-Methyl-2,4-Nonadion eine zusätzliche Konzentration von 800 ppm angesetzt. Unter diesen Konzentrationen wurden jeweils 3 unterscheidbare Varianten ausgewählt. Tab. 23 stellt diese Auswahl der final eingesetzten Prüflösungen, sowie die Ausgangskonzentrationen der einzelnen Aromastoffe und deren Mischungsverhältnisse mit Propylenglykol dar.

Zur Schulungsprüfung wurden je 5 ml der ausgewählten Mischungen der Aromastoffe mit Propylenglykol in verschließbare Reagenzgläser abgefüllt, sodass diese jeweils zu etwa einem Drittel mit der Lösung befüllt waren. Die Probe mit 3-Methyl-2,4-Nonadion wies eine leichte Färbung auf, weshalb die Prüfröhrchen zusätzlich mit Alufolie umwickelt wurden, um den Geruchseindruck nicht durch visuelle Eindrücke zu verzerren. Gereicht wurden die Konzentrationsreihen jeweils in zufälliger Reihenfolge. Um den Geruchssinn nicht zu überlasten, wurde der Test an zwei Tagen mit jeweils drei Konzentrationsreihen pro Tag durchgeführt. Um die Schulung zu bestehen, mussten jeweils mindestens zwei von drei Konzentrationsreihen in die richtige Reihenfolge gebracht werden. Bei Nichtbestehen mussten zum Nachschulungstermin alle drei Konzentrationsreihen eines Tages wiederholt werden.

Tab. 23 Ausgangskonzentrationen und Mischungsverhältnisse mit Propylenglykol für 5 ml der in der Geruchsintensitätsprüfung verwendeten Aromalösungen

Aromastoff	Ausgangskonzentration (ppm)	Konzentration in der Prüflösung (ppm)	Aromastoff in 5 ml Prüflösung (µl)	Propylenglykol in 5 ml Prüflösung (µl)
<i>cis</i> -3-Hexenol	1.000.000	500	2,5	4.997,5
		2.000	10	4.990,0
		50.000	250	4.750,0
<i>trans-trans</i> -2,4-Nonadienal	10.000	5	2,5	4.997,5
		100	50	4.950,0
		500	250	4.750,0
1-Octen-3-ol	10.000	5	2,5	4.997,5
		100	50	4.950,0
		500	250	4.750,0
2,3,5-Trimethylpyrazin	1.000	5	25	4.975,0
		20	100	4.900,0
		60	300	4.700,0
3-Methyl-2,4-Nonadion	10.000	5	2,5	4.997,5
		200	20	4.980,0
		800	400	4.600,0
<i>trans-trans</i> -2,4-Decadienal	10.000	40	20	4.980,0
		100	50	4.950,0
		500	250	4.750,0

Alle Proben der Geschmacks- und Geruchsschulung waren mit dreistelligen zufälligen Nummerncodes versehen. Bis auf die Konzentrationsserien, die in vorgegebener Reihenfolge gereicht wurden, wurden die Proben randomisiert verteilt. Die einzelnen Tests wurden an mehreren Tagen über einen Zeitraum von zwei Monaten durchgeführt, sodass maximal zwei verschiedene Tests am selben Tag stattfanden. Zu jeder Schulungsaufgabe gab es sowohl mündliche als auch schriftliche Instruktionen und es konnten Rückfragen bei der Panelleitung gestellt werden. Die Antworten wurden von jedem Panelteilnehmer auf einem individuellen Antwortbogen festgehalten. Grundsätzlich standen zur Neutralisation zwischen den einzelnen Proben Leitungswasser und Weißbrot bereit.

9.6.2 Einfach beschreibende Profilprüfung

Die einfach beschreibende Profilprüfung diente der Zusammenstellung von relevanten Attributen für die finale Bewertung der Prüfproben in der Profilprüfung. Durchgeführt wurde die beschreibende Profilprüfung an zwei Tagen in Anlehnung an DIN 10964:2014-11¹⁷⁷. Alle Panelteilnehmer sammelten dazu zunächst gemeinsam Attribute zu Aussehen, Geruch, Geschmack und Textur von vier Referenzproben. Als Referenzproben dienten je zwei Mohnsamenproben und zwei Mohnölproben, die mit zufälligen dreistelligen Nummern codiert waren, sodass ein Erkennen der Proben ausgeschlossen wurde. Verwendet wurden die Proben Z1 und V1 jeweils als Samen- und Ölprobe, da sie auf den ersten Eindruck deutlich unterschiedlich wirkten und ein größtmögliches Spektrum an Attributen abdecken sollten. Als Prüfgefäße wurden Glasbecher, die mit einem Plastikdeckel verschlossen werden konnten, verwendet, um einem vorzeitigen Aromaverlust vorzubeugen.

Jeder Panelist erhielt einen eigenen Bewertungsbogen, auf dem jeder zunächst alle spontan mit den Proben assoziierten Begriffe festhalten sollte, getrennt nach Mohnsamen und Mohnölattributen in den Kategorien Aussehen, Geschmack, Geruch und Textur (Anhang Formulare F2 und F3). Anschließend wurden in einer vom Pannelleiter moderierten Gruppendiskussion die Attribute zusammengetragen und an einer Wandtafel gesammelt. Dabei wurden auch die Häufigkeiten notiert, mit der ein Attribut genannt wurde (Anhang Formulare F4 und F5). Begriffe, die keine objektive Beschreibung darstellten, wurden nicht mit aufgenommen. Gemeinsam mit dem Panel wurden die Definitionen einzelner Begriffe mit der Literatur (DIN 10964:2014-11) abgeglichen, über die Relevanz einzelner Attribute diskutiert, ähnliche Attribute zusammengefasst, sowie weniger bedeutsame Attribute ausgeschlossen.

Zum zweiten Termin wurde die finale Attributenliste vorgestellt, nochmals auf Vollständigkeit überprüft und offene Fragen geklärt. Um eindeutig die Attribute erdig, fettig/ölig und pilzartig zu definieren, wurden als Referenzsubstanzen gekochte und frische rote Bete (erdig) sowie Lösungen mit *trans-trans*-2,4-Decadienal (fettig/ölig) und 1-Octen-3-ol (pilzartig) angeboten. Außerdem wurde der Prüfbogen erläutert und der Ablauf der quantitativen Prüfung dargestellt. Wichtig war auch die Einigung der Panelteilnehmer auf eine Farbauswahl zur visuellen Beschreibung der Mohnsamen und -öle.

Mittels RAL Farbfächer (RAL – Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, Bonn, Deutschland) und den Referenzproben wurden infrage kommende Farben ausgewählt, die in der quantitativen Prüfung auf ihre Farbtintensität bewertet werden sollten. Für die Mohnsamen standen schließlich RAL 7000 (fehgrau) und RAL 7015 (schiefergaw), bzw. RAL 1001 (beige) zur Auswahl. Die Mohnölproben wurden mit RAL 1012 (zitronengelb) oder RAL 1018 (zinkgelb) beschrieben.

Zusätzlich wurde festgelegt, dass das Aussehen der Samenproben durch die Attribute „Homogenität der Farbe“ und „Homogenität der Größe“ bewertet werden sollte. Das Aussehen der Öle wurde neben der Farbe durch „Viskosität“, „Transparenz“ und „Homogenität“ beschrieben. Zur Bewertung im finalen Prüfbogen wurden 11 Geruchsattribute (mohntypisch, nussig, erdig, muffig, pilzartig, fettig/ölig, grün, heuartig, ranzig, süßlich, blumig) und 12 Flavorattribute (mohntypisch, süß, nussig, erdig, muffig, pilzartig, fettig/ölig, bitter, ranzig, grün, heuartig, adstringierend) festgelegt. Neben Farbe, Geruch und Geschmack wurde auch die Textur bewertet. Die Texturattribute der Samen waren „rau“, „knackig“ und „fest“, die der Öle „ölig“ und „viskos“. Süß stellt eine Grundgeschmacksart, hervorgerufen durch Zucker oder zuckerähnliche Verbindungen, dar, wurde vom Sensorikpanel jedoch ebenfalls als wichtiges Geruchsattribut genannt. Da Zucker kein Geruchsstoff ist, wurde die genannte süße Assoziation (bspw. durch Fruchtaromen hervorgerufen) als süßlich definiert, um eine Abgrenzung zum süßen Geschmack zu erhalten. Eine Übersicht der festgelegten Attribute sowie Referenzsubstanzen gibt Tab. 24. Die Beschreibungen wurden in Anlehnung an die DIN 10964 für Mohn angepasst.

Tab. 24 Übersicht der für die sensorische Analyse verwendeten Attribute zur Beschreibung der Mohnsamen und -öle in Anlehnung an DIN 10964:2014-11¹⁷⁷

Attribut	Prod. ^a	S.E. ^b	Beschreibung	Beispiele	Zusätzliche Referenzen
mohntypisch	S/O	G/F	Aroma von Mohnprodukten	Mohnpaste, Mohnfüllung	
nussig	S/O	G/F	an frische Speisennüsse erinnernd	Haselnüsse, Paranüsse, Walnüsse, natives Rapsöl, Nussöle	2,3,5-Trimethylpyrazin
fettig/ölig	S/O	G/F	Wahrnehmung von austretendem Fett	gebrochene Emulsion (Sauce Bernaise), ausölende Wurstwaren	<i>trans-trans</i> -2,4-Decadienal
ranzig	S/O	G/F	durch Oxidation von Ölen und Fetten ausgelöster Eindruck	überlagerte Speisefette und -öle (Butter, Olivenöl)	<i>trans-trans</i> -2,4-Nonadienal
grün	S/O	G/F	mit unreifem Pflanzenmaterial in Verbindung gebracht	frisch geschnittenes Gras, Olivenöl, grüne Bohnen, grünes Gemüse	<i>cis</i> -3-Hexenol
heuartig	S/O	G/F	Geruch nach gemähem und getrocknetem Gras	Heuboden, trockene Petersilie	3-Methyl-2,4-Nonadione
pilzartig	S/O	G/F	an Speisepilze erinnernd	frische Champignons, Tütensuppen	1-Octen-3-ol
muffig	S/O	G/F	Eindruck in Folge mangelnder Lüftung	altes Brot, alte Kartoffeln, alte Nüsse	
erdig	S/O	G/F	an feuchte Erde erinnernd	Rote Bete, frische Erde	rohe und gekochte Rote Bete
süß/süßlich	S/O	G/F	Grundgeschmacksart	Zucker, Zuckerwatte, Früchte, Honig	
blumig	S/O	G	an Blütenduft erinnernd	Rose, Lavendel, Veilchen, Orangenblüte	
bitter	S/O	F	Grundgeschmacksart	Chicorée, Hopfen, Lösungen von Koffein oder Chinin	
adstringierend	S/O	F	zusammenziehend, Zusammenziehen der Schleimhautoberfläche im Mund	gerbstoffreicher Wein, Schlehentannine, starker Schwarztee	
Farbe	S/O	A	visuell wahrgenommene Farbe	zitronengelb, zinkgelb, schiefergrau, fehgrau, beige	RAL Farbskala
Homogenität der Farbe	S/O	A	einheitliche Farbe, keine Phasenseparation	Mayonnaise, Kartoffelpüree	
Homogenität der Größe	S	A	einheitliche Partikelgröße	Nudeln	
Transparenz	O	A	durchsichtig, klar, ohne Trübung	Mineralwasser, klarer Apfelsaft	
viskos	O	A/T	zähflüssig, dickflüssig, Fließeigenschaft von Flüssigkeiten	Honig, Sirup	
rau	S	T	Produkt mit unebener Oberfläche	Panade bei Fleisch- oder Fischprodukten, Kekse, Knäckebrötchen	

knackig	S	T	Produkt, das zumindest beim ersten Bis mit stark hörbarem Bruch zerbricht	Knackwurst, frisches Obst, rohes Gemüse
fest	S	T	deutlicher bis hoher Widerstand beim Ausüben von Druck (z. B. beim Kauen)	Dunkle Schokolade, altes Brot, Gewürzgurken
ölig	O	T	an Speiseöl erinnernd, Produkt hinterlässt einen fettartigen Film	Speiseöle, Salatdressing

^a Produkt: S: Samen; O:Öl; ^b Sensorischer Eindruck: G: Geruch, F: Flavor, A: Aussehen; T: Textur

9.6.2 Quantitative sensorische Profilprüfung

Ziel der vorangegangenen Panelschulung und einfach beschreibenden Prüfung war die Vorbereitung des Sensorikpanels auf die Bewertung der Samen und Öle der in Kapitel 9.1 vorgestellten Proben. Die Intensitätsbewertung der einzelnen Mohnattribute erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 13299:2016-09²²⁵ im Rahmen einer Profilprüfung.

Insgesamt wurden 13 Mohnsamen und 13 Mohnöle verkostet, wobei jeweils eine Samen- und eine Ölprobe dreifach gereicht wurden, um die Bewertungspräzision des Panels überprüfen zu können. Codiert waren die Proben wiederum mit dreistelligen, zufälligen Nummerncodes und gereicht wurden sie in randomisierter Reihenfolge, sodass keine Zuordnung der Proben stattfinden konnte. Als Prüfgefäße dienten durchsichtige Glasbecher mit Deckel, die mit zwei Esslöffeln Samen bzw. 15 ml Öl befüllt wurden. Das Öl wurde mindestens eine Stunde vor Prüfbeginn abgefüllt, um ein Erwärmen auf Raumtemperatur zu ermöglichen. Dabei wurde darauf geachtet, dass kein Bodensatz mit ausgegossen wurde. Es wurden maximal drei Samen- und drei Ölproben am selben Termin verkostet, um einer Ermüdung von Geruchs- und Geschmacksnerven vorzubeugen und maximal zwei Termine konnten am selben Tag wahrgenommen werden. Dabei wurden zuerst die Mohnsamen und anschließend die Öle verkostet. Bewertet wurde jede Probe in Bezug auf die in der einfach beschreibenden Profilprüfung festgelegten Attribute in Aussehen, Geruch, Geschmack und Textur.

Verwendet wurde hierzu eine 5-stufige Skala, mit der jedes Attribut durch einen Wert von 1 (schwach wahrnehmbar) bis 5 (stark wahrnehmbar) bewertet wurde (Anhang Formulare F6 – F8). Zusätzlich sollte auch bewertet werden, ob die Probe einen Nachgeschmack aufwies. Mit dem Nachgeschmack wird der sensorische Eindruck beschrieben, der nach Entfernen der Probe aus dem Mundraum dort noch eine Zeit erhalten bleibt²²⁶. Falls ein Nachgeschmack vorhanden war, sollte dieser mit dem passendsten Attribut beschrieben und ebenfalls in seiner Intensität bewertet werden.

Zum Abgleich mit den Definitionen der einzelnen Attribute stand zudem die definierte Attributliste mit Attributsbeschreibungen sowie der RAL Farbfächer zur Farbidentifizierung zur Verfügung. Wiederum standen zur Geschmacksneutralisation Leitungswasser und Weißbrot bereit und die Geruchsneutralisation erfolgte durch Riechen des Handrückens oder der Armbeuge. Außerdem standen Speibecher bereit, falls die Proben nicht geschluckt werden sollten. Die Belichtung der Prüfkabine war auf maximale Helligkeit und Kühle eingestellt. Die verwendeten Prüfbögen sind im Anhang angefügt.

9.7 Statistik

Die inhaltsstofflichen Daten (Fettsäuremuster, Tocopherole, Flüchtige Verbindungen) basierten auf dreifachen Wiederholungen je Probe und wurden nach Tests auf Normalverteilung und Varianzhomogenität varianzanalytisch zwischen den Sorten verglichen (ANOVA). Wo möglich, wurden Post-Hoc-Vergleiche mittels Tukey-HSD-Tests durchgeführt und alle Berechnungen mit SPSS 26 kalkuliert. Vergleichsweise wurde der Anbaustandort als Faktor in die Analyse miteinbezogen, zeigte jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die gemessenen Parameter und wurde demzufolge wieder aus den Berechnungen ausgeschlossen. Für die Ölgehalte lagen nur einzelne Messwerte vor, die anhand der Sorten zusammengefasst varianzanalytisch verrechnet wurden (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$).

Das sensorische Datenset wurde mittels General Procrustes Analysis (GPA) evaluiert, um die Beziehungen zwischen Sorten und Attributen zu beurteilen und auch den Prüferinfluss zu berücksichtigen. Dabei wurde jede Samen- und Ölprobe von jedem der 14 Panelisten je einmal bewertet und zusätzlich eine der Probe dreifach wiederholt, um die Panelgenauigkeit einzuschätzen. Ein Ausreißer, der kontinuierlich sehr niedrige Scores vergab, wurde anschließend von der finalen Berechnung ausgeschlossen. Für die Kalkulation der GPA musste eine Attributreduktion stattfinden. Auf Grundlage von Varianzanalysen und t-Tests mit den Faktoren Sorte, Standort und Anbauverfahren (Winter- /Sommermohn) in verschiedenen Kombinationen wurden die Attribute ausgewählt, die eine größtmögliche Unterscheidung zwischen den Sorten zeigten. Ebenfalls wurden Attribute in die GPA aufgenommen, die zu den bestimmten flüchtigen Verbindungen passten, wohingegen Attribute, die von allen Panelisten durchgängig nur sehr schwach intensiv wahrgenommen wurden, von der GPA ausgeschlossen wurden, ähnlich wie bei Emir et al. (2014)²⁶, bei denen die Attribute bitter, adstringierend und fermentiert nur äußerst schwach ausgeprägt waren. Im Falle der in dieser Studie untersuchten Proben lässt sich dies hauptsächlich darauf zurückführen, dass die Verkostung der Mohnsamen und -öle sehr zeitnah zur Ernte bzw. Ölpressung stattfand. Infolgedessen war der Zeitraum, in dem Oxidationsprozesse und die Akkumulation von Abbauprodukten hätten stattfinden können, äußerst gering und somit auch die Wahrnehmung der dadurch gebildeten negativen Aromen. Heuartig war nur in den Mohnsamen mit höheren Intensitäten vorzufinden und wurde daher nur in die Samen-GPA mit einberechnet. Die GPA Analyse wurde mit der XLSTAT-Sensory Software berechnet.

Pearson-Korrelationskoeffizienten wurden unter den flüchtigen Verbindungen, zwischen flüchtigen Verbindungen und Tocopherolen und zwischen flüchtigen Verbindungen und sensorischen Bewertungen berechnet. Spearman-Korrelationen dienten zum Vergleich der sensorischen Bewertungen untereinander. Alle Korrelationsberechnungen wurden mit SPSS 26 durchgeführt. Abbildungen wurden mit Microsoft Excel 2019 erstellt.

10.0 Ergebnisse und Diskussion

Reproduced in part with permission from Journal of Agricultural and Food Chemistry, submitted for publication: Luhmer, K., Schulze-Kaysers, N., Feuereisen, M., Wirth, L., Maretzky, F., Wüst, M., Blum, H. and Pude, R. (2021) Fatty acid composition, tocopherols, volatile compounds and sensory evaluation of low 1 morphine yielding varieties of poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds and oils. Unpublished work copyright 2021 American Chemical Society.

10.1 Ergebnisse der chemischen Analytik

10.1.1 Ölgehalt

Der mittels Soxhlet-Extraktion im Labor ermittelte Ölgehalt der Mohnsamen lag zwischen $37,9\% \pm 3,5\%$ für `Mieszko´ und $43,4\% \pm 4,2\%$ für `Zeno Morphex´. `Viola´ wies einen mittleren Ölgehalt von $39,8\% \pm 2,45$ auf.

Damit wies der Wintermohn einen tendenziell höheren Ölgehalt als die geprüften Sommermohnsorten auf (Tab. 25).

Die Sorte `Borowski´, obwohl eine Sommermohnsorte, zeigte einen Ölgehalt von 44,2% und lag damit auf einem vergleichbaren Niveau wie der Wintermohn. Da dieser Wert eine Einzelbestimmung war, ist die Vergleichbarkeit mit dem Wintermohn weiter zu prüfen. Die Ölgehalte des Wintermohns stimmen mit den Literaturwerten überein, die grundsätzlich Ölgehalte im Mohn bei über 40% definieren^{128,129,131}, wohingegen die Ölgehalte der Sommermohnsorten darunter lagen. Die 4,4% mehr Öl, die in dieser Studie in `Zeno Morphex´ im Vergleich zu `Viola´ und `Mieszko´ detektiert wurden, passen zu den Ergebnissen von Dobos et al. (2013), die dem Wintermohn gegenüber dem Sommermohn einen um 5% höheren Ölgehalt attestierten². Auch in Studien zu anderen Ölsaaten wurde beispielsweise ein um 5-10% höherer Ölgehalt im Raps aus Herbstsaat verglichen mit einer Frühjahrssaat festgestellt¹²⁷. Im Gegensatz dazu konnte Kara (2017) keinen Einfluss des Saatzeitpunkts auf die Ölgehalte der Mohnpflanzen messen¹²⁵.

Tab. 25 Ölgehalte der Mohnproben, die mittels Soxhlet-Extraktion und durch manuelle Pressung ermittelt wurden

Sorte	Ölgehalt (%)	
	Extraktion	manuelle Pressung
`Zeno Morphex´	38,3 – 48,1	22,5 – 31,0
`Viola´	37,0 – 42,0	17,2 – 24,9
`Mieszko´	33,9 – 40,5	16,9 – 20,4
`Borowski´ ^a	44,2	26,6

^a Einzelbestimmung

Die manuelle Pressung und Auswiegung der Ölmengen führte zu insgesamt geringeren Ölgehalten, wies aber dieselben Tendenzen von mehr Öl im Wintermohn (22,5% – 31,0%) gegenüber `Viola´ und `Mieszko´ (16,9% – 24,9%) auf. Die manuellen Pressergebnisse erreichten nicht das Niveau der mittels Extraktion ermittelten Ölgehalte. Dies lässt sich auf die ineffizientere Methode zurückführen, da bei der manuellen Pressung Ölreste in den Samen verblieben.

10.1.2 Fettsäuremuster

Die häufigste Fettsäure im Mohnöl stellte Linolsäure (C18:2) dar, die zwischen 70,7% (M2) und 75,2% (V1) der Gesamtfettsäuren ausmachte (Tab. 26). Die Gehalte an Ölsäure (C18:1) lagen zwischen 11,2% (B1) und 14,9% (M2), wohingegen Stearin- (C18:0) und Palmitinsäure (C16:1) einen Anteil von 1,84% ($\pm 0,08\%$) und 0,17% ($\pm 0,02\%$) an den Gesamtfettsäuren hatten.

Grundsätzlich war das Fettsäuremuster der untersuchten Proben sehr ähnlich und wurde von Linolsäure dominiert.

Signifikante Sortenunterschiede wurden im Gehalt der gesättigten Palmitinsäure (C16:0) ermittelt, die stärker in `Zeno Morphex´ (11,97% $\pm 0,48\%$) als in `Viola´ (10,67% $\pm 0,67\%$) vertreten war. Im Gegensatz dazu waren die Gehalte der dreifach ungesättigten Linolensäure (C18:3) in den Sommermohnsorten tendenziell, aber nicht signifikant, gegenüber `Zeno Morphex´ erhöht (Tab. 26).

Das Fettsäuremuster stimmt grundsätzlich mit der berichteten Literatur überein, die Linolsäure, Öl- und Palmitinsäure als die häufigsten Fettsäuren im Mohnöl angibt^{141–144,227}. Linolensäure ist aufgrund der hohen Anzahl an Doppelbindungen anfällig für Autoxidationsprozesse, was negative Auswirkungen auf die Haltbarkeit des Mohnöls haben kann. Der Anteil an Linolensäure lag jedoch in allen untersuchten Mohnölen unter 1%, weshalb sich aus diesem Gesichtspunkt alle Öle zur Verwendung als Speiseöle eignen^{136,141,227}. Die Nutzung als hochwertiges Speiseöl wird allerdings durch das hohe ω -6 zu ω -3 Fettsäure-Verhältnis begrenzt, das durch die hohen Linolsäuregehalte im Vergleich zu den geringen Linolensäuregehalten entsteht. Hohe Gehalte an ω -6 Fettsäuren können Entzündungsprozesse verstärken, wohingegen ω -3 Fettsäuren gesundheitsfördernde Eigenschaften aufweisen, weshalb auf eine ausgewogene Zufuhr zu achten ist¹⁴⁰.

Tab. 26 Anteile der einzelnen Fettsäuren an der Zusammensetzung der Mohnöle. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Mohnsorten; n.s.: nicht signifikant (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0.05$)

Probe	C16	C16:1	C18	C18:1c	C18:2c	C18:3	ges. ^a	unges. ^b
Z1	11,84 ±0,55	0,17 ±0,02	1,96 ±0,07	13,10 ±0,16	72,39 ±0,50	0,55 ±0,03	13,80	86,20
Z2	11,34 ±0,17	0,16 ±0,01	1,80 ±0,05	12,38 ±0,38	73,66 ±0,49	0,66 ±0,08	13,14	86,86
Z3	11,76 ±0,87	0,15 ±0,02	1,98 ±0,10	13,56 ±0,20	71,95 ±0,69	0,61 ±0,09	13,73	86,27
Z4	12,39 ±1,22	0,16 ±0,02	1,87 ±0,06	12,40 ±0,59	72,62 ±0,77	0,56 ±0,04	14,26	85,74
Z5	12,50 ±0,15	0,19 ±0,00	1,85 ±0,04	12,12 ±0,52	72,77 ±0,67	0,57 ±0,03	14,35	85,65
V1	10,45 ±0,72	0,15 ±0,01	1,85 ±0,07	11,77 ±0,10	75,20 ±0,70	0,58 ±0,00	12,30	87,70
V2	11,62 ±0,91	0,17 ±0,02	1,84 ±0,06	12,45 ±0,55	73,20 ±0,31	0,72 ±0,08	13,46	86,54
V3	10,58 ±0,19	0,21 ±0,10	1,71 ±0,39	14,49 ±0,26	72,26 ±0,25	0,75 ±0,15	12,29	87,71
V4	10,05 ±0,38	0,15 ±0,01	1,86 ±0,03	13,10 ±0,11	74,19 ±0,25	0,66 ±0,01	11,91	88,09
M1	11,33 ±1,40	0,19 ±0,02	1,75 ±0,09	12,56 ±0,43	73,57 ±0,95	0,59 ±0,00	13,08	86,92
M2	11,64 ±0,26	0,17 ±0,01	1,85 ±0,02	14,91 ±0,34	70,72 ±0,36	0,71 ±0,07	13,49	86,51
M3	10,66 ±0,33	0,14 ±0,01	1,93 ±0,06	14,81 ±0,98	71,70 ±0,67	0,77 ±0,07	12,59	87,41
B1	12,22 ±0,80	0,16 ±0,01	1,73 ±0,05	11,21 ±0,14	74,11 ±0,72	0,58 ±0,01	13,95	86,05
Ø`Viola`	10,67 b ±0,67	0,17 n.s. ±0,03	1,82 n.s. ±0,07	12,95 n.s. ±1,16	73,71 n.s. ±1,27	0,68 n.s. ±0,08	12,49	87,51
Ø`Mieszko`	11,21 ab ±0,50	0,17 n.s. ±0,03	1,84 n.s. ±0,09	14,09 n.s. ±1,33	72,00 n.s. ±1,45	0,69 n.s. ±0,09	13,05	86,95
Ø`Zeno` Morphex`	11,97 a ±0,48	0,17 n.s. ±0,01	1,89 n.s. ±0,07	12,71 n.s. ±0,60	72,68 n.s. ±0,63	0,59 n.s. ±0,05	13,86	86,14

^a gesättigte Fettsäuren; ^b ungesättigte Fettsäuren

Der weißsamige Mohn (B1) tendierte verglichen mit den Blaumohnsorten zu höheren Palmitin- (12,22% ± 0,81) und Linolsäuregehalten (74,11% ± 0,72%) aber geringeren Stearin-, Öl- und Linolensäuregehalten. Ähnliche Verhältnisse wurden auch von Rokosik et al. (2020)²²⁸ belegt, die höhere Linolsäure- und geringe Ölsäurewerte im Weißmohn im Vergleich zu dunkleren Mohnsamen nachwiesen. Im Gegensatz dazu wurden von Hlinková et al. (2011) keine Hinweise auf Unterschiede gefunden, die sich aus der Samenfarbe ergaben¹³⁷.

Der Anbaustandort hatte keinen signifikanten Einfluss auf das Fettsäuremuster, obwohl in der Literatur den Umweltbedingungen ein hoher Effekt auf die Ölzusammensetzung zugeschrieben wird^{131,154}. In Untersuchungen zu Sonnenblume, Raps und Lein erhöhten hohe Temperaturen zum Zeitpunkt der Samenreife den Ölsäure- und senkten den Linolsäuregehalt^{134,149–152}. Für erhöhte Linolsäuregehalte im Vergleich zu geringeren Ölsäureanteilen wurde also hauptsächlich die Temperatur verantwortlich gemacht.

» Dass zwischen den untersuchten Proben keine signifikanten Unterschiede in der Fettsäurezusammensetzung auftraten, spricht für dominanter andere Einflüsse als den Standort. Daraus folgt auch, dass Mohnpartien aus unterschiedlichen Regionen hohe Ähnlichkeit besitzen und die Möglichkeit eines Verschnitts unterschiedlicher Rohwarenherkünfte ohne größeres Risiko für Qualitätsverluste besteht.

10.1.3 Tocopherole

In allen Mohnölen wurden Tocopherole als Teil des Vitamin E Komplexes nachgewiesen. Tocotrienole wurden nicht bestimmt, es gibt aber in der Literatur Hinweise, dass geringe Mengen von γ - und δ -Tocotrienol im Mohn vorhanden sein können^{155,229}.

Das dominanteste Tocopherol war γ -Tocopherol, dessen Gehalt in der Sorte `Viola´ signifikant höher lag als in den übrigen Sorten. Weiter wurden geringere Mengen α -Tocopherol und δ -Tocopherol detektiert, wobei letzteres nur im Wintermohn vorkam.

γ -Tocopherol kam in Gehalten zwischen 158 (± 3 ; M2) und 330 (± 13 ; V2) mg kg⁻¹ vor (Abb. 17), wobei `Viola´ deutlich mehr γ -Tocopherol enthielt (287 \pm 34 mg kg⁻¹) als `Mieszko´ (200 \pm 43 mg kg⁻¹) und `Zeno Morphex´ (185 \pm 6 mg kg⁻¹). Hohe Tocopherolgehalte wurden auch von Erinc et al. (2009) detektiert, die einen γ -Tocopherol zwischen 195 und 281 mg kg⁻¹ angaben¹⁴¹. Nergiz et al. (1994)¹²¹ und Bozan und Temelli (2008)¹⁵⁵ konnten dagegen nur Gehalte von 220 bzw. 217 mg kg⁻¹ in türkischen Mohnsorten finden. Im Gegensatz dazu wurden bis zu 403 mg kg⁻¹ von Aksolyu Özbek und Günc Ergönül (2020)²²⁷ im Mohnöl analysiert.

α -Tocopherol war das zweithäufigste nachgewiesene Tocopherol mit Gehalten zwischen 23 mg kg⁻¹ (± 2 ; Z5) und 56 mg kg⁻¹ (± 3 ; M3). Im Wintermohn `Zeno Morphex´ wurde ein mittlerer α -Tocopherol-Gehalt von 27 (± 4) mg kg⁻¹ gefunden, wohingegen die mittleren Werte bei `Viola´ um 41 (± 16) und bei `Mieszko´ um 38 (± 17) mg kg⁻¹ schwankten. Die Höhe der gemessenen α -Tocopherol-Gehalte lag ähnlich zu den Ergebnissen von Nergiz et al. (1994)¹²¹ und Erinc et al. (2009)¹⁴¹, die 40 mg kg⁻¹ bzw. 22 – 46 mg kg⁻¹ an α -Tocopherol nachweisen konnten.

Den geringsten Anteil an der Tocopherolzusammensetzung machte δ -Tocopherol aus, was nur in den Wintermohnproben Z1, Z3 und Z5 vorkam. Deren mittlerer δ -Tocopherol-Gehalt lag bei $3,9 (\pm 0,6) \text{ mg kg}^{-1}$. In der Literatur wurde δ -Tocopherol im Mohnöl fast nie identifiziert, Özcan und Atalay (2006)¹³⁰ konnten es jedoch mit einer Menge von $6,1 - 18,6 \text{ mg kg}^{-1}$ nachweisen.

Die weißsamige Sorte 'Borowski' betreffend waren die γ -Tocopherolgehalte bei 218 mg kg^{-1} zwischen 'Viola' und 'Mieszko' angesiedelt. Die α -Tocopherolgehalte waren im Sortenvergleich die geringsten (23 mg kg^{-1}). Dass die Sorte einen signifikanten Einfluss auf die Tocopherolgehalte im Mohnöl hat, wurde in einer Studie zu türkischen Mohnsorten bereits belegt²²⁷. In ähnlicher Weise wurden in der vorliegenden Studie signifikant höhere γ -Tocopherolgehalte in der Sorte 'Viola' detektiert und δ -Tocopherol nur bei 'Zeno Morphex' gefunden.

» Hohe Tocopherolgehalte, wie in den Mohnölproben festgestellt, können positiv zur oxidativen Stabilität der Öle beitragen, da ihre Menge negativ mit Autoxidationsprozessen korreliert¹⁶⁶. Allerdings sind nicht allein Tocopherole für die Haltbarkeit der Öle verantwortlich, dazu tragen weitere Substanzen wie beispielsweise Phenolsäuren bei, die in dieser Studie nicht untersucht wurden.

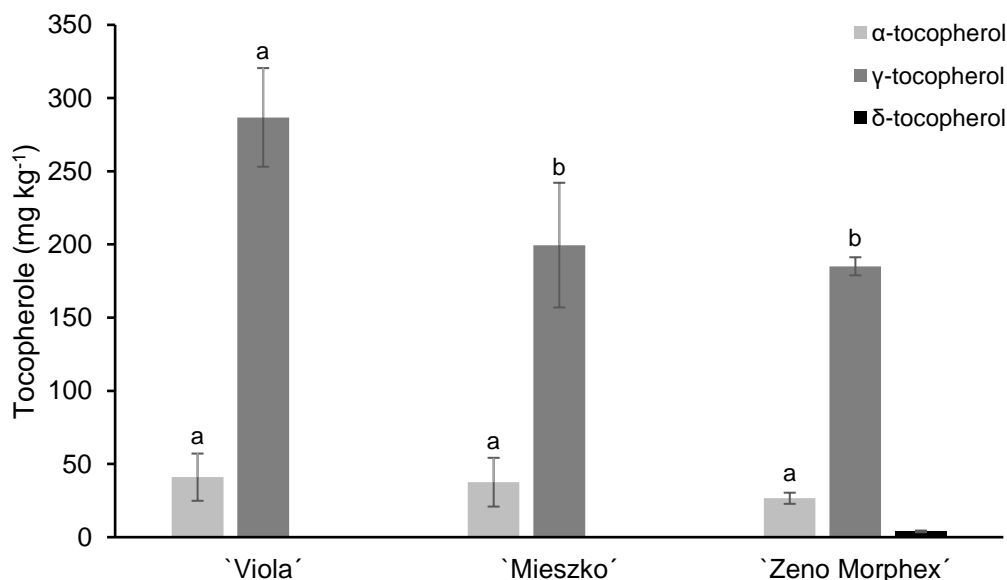


Abb. 17 Mittlere Tocopherolgehalte (mg kg⁻¹) der Mohnöle. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Sorten (ANOVA + Tukey-HSD, p<0.05)

10.1.4 Flüchtige Verbindungen

Insgesamt wurden 44 flüchtige Verbindungen im Kopfraum der Mohnöle identifiziert, die in Tab. 28 zusammengefasst sind. Am häufigsten wurden Hexanal, 1-Hexanol, Pentansäure, α -Pinen, 2-Heptenal, 1-Heptanol, 1-Octen-3-ol, 2-Pentylfuran, Limonen, Hexansäure, 2-Octenal, 2-Octen-1-ol, Fenchon, 2-Nonen-1-ol, Heptansäure, Estragol, Decanal, Anethol und 2-Butyl-2-Octenal detektiert.

Unterschiede im Profil der flüchtigen Verbindungen bestanden eher zwischen den individuellen Proben als zwischen den Sorten. Viele der identifizierten Verbindungen sind durch Oxidation ungesättigter Fettsäuren entstanden. Diese Abbauprodukte machen den Hauptanteil der flüchtigen Verbindungen im Mohnöl aus.

Hexanal wurde in anderen Mohnstudien als die häufigste volatile Verbindung im Mohnöl bestimmt^{162,163}. In der vorliegenden Studie war Hexansäure die dominante Verbindung in 12 von 13 Proben. Eine Ausnahme bildete Probe V4, die einen Gehalt von $1,4 (\pm 0,3) \mu\text{g g}^{-1}$ Hexansäure aufwies, während die übrigen Proben Werte bis zu $148 (\pm 20) \mu\text{g g}^{-1}$ erreichten. Aufgrund von starkem Fronting bei den Peaks der Carbonsäuren, vor allem bei Hexansäure, kann von noch höheren absoluten Werten ausgegangen werden. Hexansäure ist zusammen mit Octanal, Decanal und 2-Octenal für einen fettigen, öligen und nussigen Eindruck der Mohnölproben verantwortlich, wohingegen 1-Octen-3-ol und 2-Octenal auch für ein pilzartiges Aroma stehen^{164,230}.

Hexanal, als eins der wichtigsten oxidativen Abbauprodukte von Linolsäure, wurde in einem Bereich zwischen $0,9 (\pm 0,1; V4)$ und $15,2 (\pm 0,8; V2) \mu\text{g g}^{-1}$ nachgewiesen und war nach Hexansäure die zweithäufigste Verbindung in den Proben V2, M2 und V3. Der Geruchseindruck wird primär als nussig und fettig beschrieben, Hexanal gehört jedoch auch zu einer Gruppe flüchtiger Verbindungen, die über Lipxygenase-Aktivität entstehen und mit einem frischen, grünen Aroma beschrieben werden^{163,164,231}. Die Variabilität der flüchtigen Verbindungen zwischen den einzelnen Proben war sehr hoch, sodass keine signifikanten Sortenunterschiede ermittelt werden konnten. Trotzdem tendierten die Sommermohnsorten zu erhöhten Hexanalgehalten im Vergleich zu 'Zeno Morphex'. Nichtsdestotrotz konnten über Korrelationsanalysen keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den antioxidativ wirkenden Tocopherolen und den Oxidationsprodukten der Fettsäuren wie Hexanal detektiert werden.

Weitere häufige Abbauprodukte der Fettsäureoxidation, die im Mohnöl vorkamen, waren Aldehyde und Alkohole wie 2-Heptenal, Octanal, Decanal, 2-Octenal, 1-Hexanol, 1-Octen-3-ol und andere Verbindungen wie 2-Pentylfuran.

2-Pentylfuran wird mit vielseitigen Attributen charakterisiert, unter anderem metallisch, bohnenartig, grün oder leicht bitter und wird auch mit mohntypischem Aroma in Verbindung gebracht^{26,163}. Es wurde in allen Proben nachgewiesen, mit besonders hohen Gehalten in M3 ($7,8 \pm 0,3 \mu\text{g g}^{-1}$), Z3 ($4,9 \pm 0,4 \mu\text{g g}^{-1}$) und B1 ($4,3 \pm 0,5 \mu\text{g g}^{-1}$). Weiterhin fiel auf, dass Hexanal, Heptanon, 2-Heptenal, 1-Octen-3-ol, Octanal, 2-Octenal und Octansäure deutlich über den in der Literatur genannten ortho- und retronasalen Geruchsschwellen lagen und somit einen wichtigen Beitrag zum Gesamtaroma der Mohnölproben leisteten^{230,232}.

Viele der genannten Verbindungen aus dem Fettsäureabbau kamen häufig gemeinsam vor, was unter anderem durch hohe Korrelationskoeffizienten gezeigt werden konnte. Positive Pearson-Korrelationen konnten beispielsweise für Hexanal und 2-Heptenal (R: 0,908, $p < 0,01$), Hexanal und Octanal (R: 0,898, $p < 0,01$), 2-Heptenal und Octanal (R: 0,818, $p < 0,01$), 2-Octenal und Decanal (R: 0,724, $p < 0,01$) und andere (Tab. 27) gezeigt werden. 2-Pentylfuran war besonders hoch korreliert zu 2-Nonen-1-ol (R: 0,807, $p < 0,01$), Octanol (R: 0,804, $p < 0,01$) und Heptansäure (R: 0,802, $p < 0,01$).

Tab. 27 Pearson-Korrelationskoeffizienten der wichtigsten Oxidationsprodukte des Fettsäureabbaus im Profil der flüchtigen Verbindungen aller untersuchten Winter- und Sommermohnölproben

Komp. Nr.	2	8	12	13	16	17	23	24	30	31
Fl. Verbindung	Hexanal	2-Heptenal	2-Pentylfuran	Octanal	Hexansäure	2-Octenal	2-Nonenol	Heptansäure	Octansäure	Decanal
Hexanal	1	0,908**	0,292	0,898**	-0,027	0,751**	0,517	0,356	0,295	0,451
2-Heptenal	0,908**	1	0,322	0,818**	0,040	0,762**	0,512	0,351	0,354	0,550
2-Pentylfuran	0,292	0,322	1	0,475	0,620*	0,718**	0,807**	0,802**	0,655*	0,730**
Octanal	0,898**	0,818**	0,475	1	0,036	0,739**	0,701*	0,523	0,488	0,675*
Hexansäure	-0,027	0,040	0,620*	0,036	1	0,299	0,545	0,617*	0,441	0,381
2-Octenal	0,751**	0,762**	0,718**	0,739**	0,299	1	0,767**	0,684**	0,644*	0,724**
2-Nonen-1-ol	0,517	0,512	0,807**	0,701*	0,545	0,767**	1	0,858**	0,785**	0,905**
Heptansäure	0,356	0,351	0,802**	0,523	0,617*	0,684**	0,858**	1	0,826**	0,751**
Octansäure	0,295	0,354	0,655*	0,488	0,441	0,644*	0,785**	0,826**	1	0,746**
Decanal	0,451	0,550	0,730**	0,675*	0,381	0,724**	0,905**	0,751**	0,746**	1

*Die berechneten Korrelationen sind signifikant auf einem Niveau von $p < 0,05$; ** Die berechneten Korrelationen sind signifikant auf einem Niveau von $p < 0,01$

Ebenfalls aromaaktiv sind Monoterpene wie 3-Caren, α -Pinen und Limonen. α -Pinen und Limonen wurden bereits von Krist et al. (2005)¹⁶⁴ und Emir et al. (2014) im Mohnöl gefunden, wohingegen 3-Caren nur bei Krist et al. (2005)²⁶ detektiert wurde. 3-Caren und Limonen werden mit einem süßen und zitrus-ähnlichen Aroma beschrieben und α -Pinen wird als pinienartig und scharf definiert^{26,164}. Limonen zeigte bei einer gaschromatografisch-olfaktorischen Messung von Kopunková et al. (2016) die höchste Geruchsintensität verglichen mit den übrigen nachgewiesenen Molekülen¹⁶³. In den hier analysierten Proben fielen Z3 ($9,4 \pm 0,7 \mu\text{g g}^{-1}$) und Z2 ($8,1 \pm 0,6 \mu\text{g g}^{-1}$) durch hohe Limonengehalte auf, was einen Hinweis darauf gibt, dass Limonen einen stärkeren Einfluss auf das Aroma dieser Wintermohnproben hatte.

Moleküle, die zuvor nicht im Mohnöl beschrieben wurden, waren 2-Isopropyl-3-Methoxypyrazin, 2-sec-Butyl-3-Methoxypyrazin und 2-Isobutyl-3-Methoxypyrazin. Letzteres taucht normalerweise in Paprika auf und 2-Isopropyl-3-Methoxypyrazin in Kartoffeln oder Erbsen, wo beide für einen stark grünes und erdiges Aroma verantwortlich sind²³¹. Im Gegensatz zu anderen Pyrazinen entstehen die Methoxypyrazine nicht im Rahmen von Maillard-Reaktionen aufgrund von Überhitzung, sondern sind pflanzeigene Verbindungen, die aus Aminosäuren wie Leucin und Valin gebildet werden²³¹. Die drei genannten Stoffe fanden sich ausschließlich in `Viola` und `Mieszko` Proben, so lagen die Gehalte von 2-Isobutyl-3-Methoxypyrazin bei $0,6 (\pm 0,1; V1)$, $0,5 (\pm 0,1; V2)$, $0,7 (\pm 0,0; M1)$ und $0,1 (\pm 0,0; M2) \mu\text{g g}^{-1}$. Aufgrund ihrer äußerst geringen Geruchsschwellen²³², kann von einer hohen Geruchsaktivität im Mohnöl und damit einem wesentlichen Beitrag zur „grünen“ Wahrnehmung der Sommermohnproben ausgegangen werden.

Das volatile Profil der weißsamigen Sorte `Borowski` war ähnlich zu dem der Blaumohnsamen. Hauptbestandteile waren Hexansäure, 1-Hexanol, Hexanal, Pentansäure, 2-Octenal und D-Carvon. Weiterhin war es die einzige Probe, in der 2-Hepten-1-ol identifiziert wurde ($0,3 \pm 0,1 \mu\text{g g}^{-1}$). Verglichen mit den übrigen Proben war außerdem der Gehalt an 1-Hexanol erhöht ($16,3 \pm 2,1 \mu\text{g g}^{-1}$) und auch 2-Octenal kam in Höhe von $4,5 (\pm 0,7) \mu\text{g g}^{-1}$ vor, was den grünen aber auch fettigen und nussigen Charakter der Probe unterstrich.

Von Krist et al. (2005)¹⁶⁴ und Kopunková et al. (2016)¹⁶³ wurden 1-Pentanol, Hexanal, 1-Hexanol, 2-Pentylfuran und Hexansäure als häufigste flüchtige Verbindungen identifiziert, was mit den hier gezeigten Ergebnissen bis auf 1-Pentanol übereinstimmt, welches in keiner der untersuchten Proben vorzufinden war. Auch der Gehalt an Hexansäure war in den hier untersuchten Mohnölen deutlich höher als in vergleichbaren Studien^{163,164}. Kopunková et al. (2016)¹⁶³ berichten ebenfalls von hohen Gehalten an Pentanal und 2-Octenal. 2-Octenal war in den von uns analysierten Proben eine der häufigsten Verbindungen, wohingegen Pentanal nicht nachgewiesen werden konnte.

Auch Emir et al. (2014)²⁶ konnten kein Pentanal im Mohnöl detektieren. Zwischen 15 und 75 einzelne flüchtige Verbindungen werden in den unterschiedlichen Studien zum Mohnöl angegeben^{26,162-164}. Davon fanden Emir et al. (2014) die meisten, was vermutlich an den verschiedenen Vorbehandlungsverfahren der Samen vor der Ölpressung lag (Enzymbehandlung, Rösten). Beispielsweise das Rösten führt über Maillard-Reaktionen zu zusätzlichen Verbindungen mit eher Röst- und Karamellaromen²⁶. Etwa die Hälfte der 30 von Krist et al. (2004)¹⁶⁴ detektierten Verbindungen traten auch in den hier untersuchten Proben auf und von den von Kopunková (2016)¹⁶³ identifizierten Verbindungen wurden 8 gefunden. 18 Verbindungen waren gleich zu denen von Emir et al. (2014) bestimmten Komponenten²⁶. Neben offensichtlichen Gemeinsamkeiten wird deutlich, dass das Profil der volatilen Verbindungen der deutschen Mohnöle in Art und Abundanz der einzelnen Aromastoffe stärker von den Mustern der türkischen und österreichischen Untersuchungen abwich.

Eine weitere Besonderheit stellte Probe Z5 ('Zeno Morphex' aus Niedersachsen) dar, da dort 6 volatile Verbindungen auftraten, die in keiner weiteren Probe gefunden wurden. Dies waren α -Terpinolen, Methylsalicylat, α -Gurjunen, β -Bisabolen und zwei unbekannte Sesquiterpene. Zusätzlich wurde eine ungewöhnlich hohe Menge β -Farnesen detektiert ($50,5 \pm 0,6 \mu\text{g g}^{-1}$). Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass der Bestand, aus dem die Z5 Probe gewonnen wurde, während des Wachstums oder kurz vor der Ernte höchstwahrscheinlich starkem abiotischem Stress ausgesetzt war, da die genannten Sesquiterpene in Stressreaktionen der Pflanzen eingebunden sind²³¹. Methylsalicylat ist zudem ein Botenstoff, der systemisch in der Pflanze transportiert wird und so die Kommunikation zwischen einzelnen Gewebeteilen erleichtert, wenn die Pflanze mit abiotischem oder biotischem Stress konfrontiert wird²³³. Hohe Pearson-Korrelationskoeffizienten ($R > 0,9$, $p < 0,01$) zwischen Methylsalicylat und α -Terpinolen, α -Gurjunen, β -Farnesen, β -Bisabolene, β -Sesquiphellandren und den drei unbekanntem Sesquiterpenen unterstützen diese Hypothese.

In einer Studie zum Mandelaroma korrelierten die Verbindungen Heptanal, Octanal, Hexanal, 2-Octenal und 2-Pentylfuran stark negativ mit der Verbraucherakzeptanz der Mandeln¹⁶⁷. Die Proben V2 und M2 zeichneten sich durch die höchsten Gehalte an 2-Heptenal, Octanal und Hexanal aus, wohingegen M3 die höchsten Gehalte an 2-Octenal und 2-Pentylfuran zeigte. Dies würde dafürsprechen, dass die Proben V2, M2 und M3 in hedonischen Tests eher negativ bewertet würden. Dass M3 sich deutlich von M1 und M2 unterschied, wird auch bei anderen volatilen Verbindungen deutlich, unter anderem Pentylhexanoat, das in Höhe von $10,0 (\pm 0,3) \mu\text{g g}^{-1}$ gemessen wurde, was deutlich über den Gehalten in anderen Proben lag. Sein Aroma wird mit ananasartig beschrieben¹⁶³. Die Anzahl verschiedener Verbindung war tendenziell im Sommermohn etwas höher, dies galt jedoch nicht für den Gesamtgehalt an flüchtigen Verbindungen.

»» Insgesamt machten die Autoxidationsprodukte aus dem Fettsäureabbau den Hauptanteil der flüchtigen Verbindungen im Mohnöl aus. Daneben wurden Komponenten wie mehrere Methoxypyrazine und α -Caryophyllen mit einer Ausnahme nur in Sommermohnölproben gefunden, wohingegen Limonen in größerer Menge im Wintermohn auftrat. Omnipräsent waren unter anderem Verbindungen wie Hexansäure, Hexanal, 2-Pentylfuran, 2-Octenal, Limonen, die Variabilität im Gehalt jeder einzelnen Verbindung war zwischen den Proben jedoch sehr groß. Dies deutet daraufhin, dass nicht nur der Genotyp, sondern vor allem externe Einflussfaktoren wie Anbaubedingungen, Verarbeitungsprozesse oder abiotischer und biotischer Stress, verantwortlich für die Zusammensetzung der Aromakomponenten sind.

Tab. 28 Konzentrationen ($\mu\text{g g}^{-1}$), Retentionsindizes und Aromabeschreibung der im Kopfraum der Mohnöle detektierte flüchtige Verbindungen

N. ^b	Fl. Verbindung	RI ^c	Aroma/Flavor Beschreibung	D. ^d	Konzentration der jeweiligen flüchtigen Verbindungen ($\mu\text{g g}^{-1}$) ^a												
					Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	V1	V2	V3	V4	M1	M2	M3	B1
1	2-Hexanon	826	eterisch, brennend ²⁶	²⁶	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1,2 ±0,2	ND	ND	ND	ND
2	Hexanal	829	grasig, ölig, nussig, fettig, leicht bitter, grün ^{26,163,164}	^{26,162} ⁻¹⁶⁴	1,2 ±0,1	4,7 ±0,5	3,3 ±0,2	3,2 ±0,2	4,8 ±0,4	2,2 ±0,6	15,2 ±0,8	5,5 ±0,5	0,9 ±0,1	2,2 ±0,5	10,6 ±0,9	6,5 ±0,3	6,2 ±0,9
3	Isovaleriansäure	858	sauer, schweißig, käsige ^e		0,1 ±0,0	ND	ND	ND	ND	0,4 ±0,2	ND	ND	ND	0,2 ±0,0	ND	ND	0,5 ±0,1
4	1-Hexanol	867	süß, fruchtig, grün ²⁶	^{26,164}	5,7 ±0,5	2,6 ±0,2	0,8 ±0,1	0,6 ±0,1	20,1 ±1,4	0,3 ±0,2	1,7 ±0,1	0,6 ±0,0	4,4 ±0,7	0,5 ±0,0	1,9 ±0,2	6,8 ±0,3	16,3 ±2,1
5	2-Heptanon	881	cremig-käsige, grün, wachsartig ²⁶	^{26,164}	4,1 ±0,4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4,6 ±0,8	ND	ND	ND	ND
6	Pentansäure	899	käsige, ranzig ²⁶	^{26,164}	2,8 ±0,2	1,3 ±0,2	2,6 ±0,1	3,1 ±0,3	2,6 ±0,3	7,1 ±1,1	3,2 ±0,1	2,5 ±0,2	ND	2,3 ±0,2	1,8 ±0,1	4,5 ±0,2	5,1 ±0,9
7	α -Pinene	915	holzig, zitrus, scharf, pinienartig ^{26,164}	^{26,164}	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,1 ±0,0	0,2 ±0,0	0,1 ±0,0
8	2-Heptenal	945	frisch, grün, fettig ^e		0,6 ±0,2	1,2 ±0,1	0,8 ±0,0	0,8 ±0,0	0,6 ±0,1	0,7 ±0,1	1,5 ±0,1	0,9 ±0,1	0,5 ±0,1	0,5 ±0,1	1,3 ±0,1	1,1 ±0,0	1,1 ±0,2
9	2-Hepten-1-ol	961	stechend, fettig, grün ^e		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,3 ±0,1
10	1-Heptanol	962	muffig, kräuterartig, grün, fermentiert ^e		0,6 ±0,1	ND	ND	ND	0,8 ±0,0	0,2 ±0,1	0,4 ±0,0	0,1 ±0,0	0,3 ±0,0	0,1 ±0,0	0,3 ±0,0	0,7 ±0,0	0,6 ±0,0
11	1-Octen-3-ol	970	erdig, pilzartig, kräuterartig ^{26,163,164}	^{26,162} ⁻¹⁶⁴	0,9 ±0,1	0,9 ±0,11	0,5 ±0,0	0,5 ±0,0	1,5 ±0,1	0,6 ±0,0	1,9 ±0,1	0,8 ±0,0	0,4 ±0,1	0,2 ±0,0	0,6 ±0,0	0,6 ±0,0	0,8 ±0,1
12	2-Pentylfuran	980	grün, erdig, karamell, grüne Bohne, metallisch, bitter, mausartig, mohntypisch ^{26,164}	^{26,162} ⁻¹⁶⁴	3,5 ±0,3	2,3 ±0,3	4,9 ±0,4	3,1 ±0,2	4,4 ±0,3	4,1 ±0,4	4,3 ±0,2	2,8 ±0,3	1,7 ±0,2	1,0 ±0,0	3,1 ±0,3	7,8 ±0,3	4,3 ±0,5

N. ^b	Fl. Verbindung	RI ^c	Aroma/Flavor Beschreibung	D. ^d	Konzentration der jeweiligen flüchtigen Verbindungen (µg g ⁻¹) ^a												
					Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	V1	V2	V3	V4	M1	M2	M3	B1
13	Octanal	998	Zitrone, wachsartig ²⁶	²⁶	0,1 ±0,0	0,3 ±0,0	0,3 ±0,0	0,2 ±0,0	0,4 ±0,0	0,1 ±0,1	0,9 ±0,1	0,2 ±0,0	ND	0,1 ±0,0	0,8 ±0,1	0,7 ±0,0	0,1 ±0,0
14	3-Caren	1001	süß, zitrus ¹⁶⁴	¹⁶⁴	ND	ND	0,3 ±0,0	ND	ND	0,2 ±0,1	ND	ND	ND	0,2 ±0,0	ND	0,4 ±0,0	0,1 ±0,0
15	L-Limonen	1031	zitrus, süß, fruchtig, terpenisch, bitter ^{26,163,164}	^{26,163,164}	5,2 ±0,5	8,1 ±0,6	9,4 ±0,7	2,7 ±0,4	3,5 ±0,2	4,3 ±0,7	3,8 ±0,3	1,3 ±0,1	5,8 ±0,9	3,2 ±0,2	3,0 ±0,3	4,0 ±0,1	2,2 ±0,5
16	Hexansäure (Kapronsäure)	1077	fettig, nussig, sauer, käsig, schweißig, ranzig ^{26,163}	^{26,163,164}	62 ±4	66 ±3	141 ±8	127 ±9	90 ±5	148 ±20	84 ±4	105 ±5	1,4 ±0,3	59 ±5	36 ±4	131 ±6	95 ±12
17	2-Octenal	1097	Pflanzenöl, fettig, nussig, wachsartig grünes Blatt, kräuterartig ^{26,163,164}	^{26,163,164}	ND	2,4 ±0,1	2,7 ±0,2	1,9 ±0,1	2,9 ±0,2	1,2 ±0,2	5,5 ±0,1	2,3 ±0,2	1,1 ±0,1	0,5 ±0,1	3,0 ±0,3	5,9 ±0,3	4,5 ±0,7
18	2-Octen-1-ol	1109			0,2 ±0,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,4 ±0,1	1,8 ±0,2
19	1-Octanol	1109	grün, fettig, süß, fruchtig ^e		1,3 ±0,2	0,5 ±0,1	0,8 ±0,0	0,6 ±0,1	1,4 ±0,1	0,7 ±0,1	1,1 ±0,2	0,3 ±0,0	ND	0,6 ±0,1	0,6 ±0,1	1,9 ±0,1	1,5 ±0,2
20	α-Terpinolen	1116	frisch, holzig, süß, zitrus ^e		ND	ND	ND	ND	0,5 ±0,1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	Fenchon	1117	kampferartig, kräuterartig, balsamisch ^e		4,1 ±0,4	0,4 ±0,0	ND	1,5 ±0,1	ND	1,9 ±0,4	0,4 ±0,0	1,0 ±0,0	3,9 ±0,6	0,2 ±0,1	0,3 ±0,0	0,2 ±0,0	0,9 ±0,2
22	2-Isopropyl-3- Methoxypyrazin	1124	grün, erdig ²³¹		ND	ND	ND	ND	ND	0,3 ±0,0	ND	ND	ND	0,02 ±0,00	ND	ND	ND
23	2-Nonen-1-ol	1131	fettig, Gurke ^e		1,1 ±0,0	2,4 ±0,2	4,0 ±0,2	2,3 ±0,1	2,4 ±0,1	2,7 ±0,2	5,5 ±0,2	1,7 ±0,2	0,3 ±0,0	1,5 ±0,1	2,0 ±0,3	7,3 ±0,2	1,5 ±0,1
24	Heptansäure	1132	wachsartig, fermentiert, fruchtig, ranzig ²⁶	²⁶	ND	ND	1,2 ±0,1	1,5 ±0,2	0,9 ±0,1	1,2 ±0,2	1,7 ±0,2	1,5 ±0,3	ND	0,3 ±0,0	0,7 ±0,4	3,9 ±0,3	0,5 ±0,1
25	Menthol	1178	Minze ^e		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,2 ±0,0	0,3 ±0,0	ND	ND	0,04 ±0,01

N. ^b	Fl. Verbindung	RI ^c	Aroma/Flavor Beschreibung	D. ^d	Konzentration der jeweiligen flüchtigen Verbindungen (µg g ⁻¹) ^a												
					Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	V1	V2	V3	V4	M1	M2	M3	B1
26	2-sec-Butyl-3-Methoxypyrazin	1179	grün, Erbse, Paprika ^e		ND	ND	ND	ND	ND	0,5 ±0,1	0,4 ±0,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27	2-Isobutyl-3-Methoxypyrazin	1185	grün, erdig ²³¹		ND	ND	ND	ND	ND	0,6 ±0,1	0,5 ±0,1	ND	ND	0,7 ±0,0	0,1 ±0,0	ND	ND
28	Methylsalicylat	1193	wintergrün, Minze ^e		ND	ND	ND	ND	0,4 ±0,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	Estragol	1197	süß, würzig, kräuterartig, Anis ^e		1,3 ±0,1	0,7 ±0,1	ND	1,3 ±0,1	ND	1,5 ±0,2	1,3 ±0,1	1,4 ±0,2	1,1 ±0,1	0,4 ±0,0	1,3 ±0,1	0,9 ±0,1	0,7 ±0,0
30	Octansäure	1200	ranzig, Pflanzenöl ²⁶	26	ND	0,8 ±0,1	0,5 ±0,0	0,8 ±0,1	0,8 ±0,0	ND	0,8 ±0,1	0,8 ±0,1	ND	ND	ND	1,9 ±0,1	ND
31	Decanal	1204	fettig, wachsartig, Orange, leicht bitter, Mohnsamen ^{26,163}	26,162 ,163	0,2 ±0,0	0,6 ±0,0	0,4 ±0,0	0,3 ±0,0	0,3 ±0,0	0,3 ±0,1	0,6 ±0,0	0,1 ±0,0	ND	0,3 ±0,0	0,4 ±0,0	1,1 ±0,0	0,3 ±0,0
32	D-Carvone	1241	würzig, Minze, Kümmel ^e		10,2 ±0,6	2,3 ±0,1	3,2 ±0,1	3,4 ±0,1	ND	4,6 ±0,6	1,6 ±0,1	3,0 ±0,1	8,4 ±0,9	1,6 ±0,1	1,0 ±0,1	ND	4,0 ±0,6
33	Anethol	1284	süß, Anis ^e		3,0 ±0,1	1,9 ±0,1	0,6 ±0,1	4,4 0,1	0,2 ±0,0	3,9 ±0,3	0,9 ±0,1	2,6 ±0,1	2,7 ±0,1	0,9 ±0,3	0,7 ±0,1	0,2 ±0,0	1,7 ±0,2
34	Pentylhexanoat	1288	esterisch, Ananas ¹⁶³	163	ND	ND	0,2 ±0,0	ND	0,2 ±0,0	ND	0,4 ±0,0	0,1 ±0,1	ND	ND	ND	10,0 ±0,3	0,5 ±0,1
35	α-Gurjunene	1323	holzig, balsamisch ^e		ND	ND	ND	ND	0,3 ±0,0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
36	unbekanntes Sesquiterpen (1)	1332			ND	ND	ND	ND	2,5 ±0,1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
37	unbekanntes Sesquiterpen (2)	1370			ND	ND	ND	ND	1,5 ±0,1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
38	2-Butyl-2-Octenal	1372	grün, grasig, frisch ²⁶	26	15,2 ±0,9	1,6 ±0,2	6,8 ±0,5	5,3 ±0,2	1,1 ±0,2	3,5 ±0,6	2,5 ±0,1	2,4 ±0,3	13,8 ±1,4	1,1 ±0,2	0,2 ±0,1	12,4 ±0,3	2,0 ±0,2
39	β-Caryophyllen	1410	würzig, holzig ^e		0,4 ±0,1	0,8 ±0,1	ND	ND	8,7 ±0,3	2,2 ±0,4	2,1 ±0,1	1,6 ±0,1	ND	1,0 ±0,1	1,6 ±0,2	ND	0,6 ±0,1

N. ^b	Volatile	RI ^c	aroma/flavor description	D. ^d	concentration of volatile compounds ($\mu\text{g g}^{-1}$) ^a												
					Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	V1	V2	V3	V4	M1	M2	M3	B1
40	α -Caryophyllen	1445	holzig ^e		ND	ND	ND	ND	0,4 $\pm 0,0$	0,4 $\pm 0,1$	0,4 $\pm 0,0$	0,3 $\pm 0,0$	ND	0,2 $\pm 0,0$	0,3 $\pm 0,0$	ND	0,1 $\pm 0,0$
41	β -Farnesen	1454	holzig, Zitrus, kräuterartig, süß ^e		0,7 $\pm 0,4$	8,9 $\pm 0,1$	ND	0,2 $\pm 0,1$	50,5 $\pm 0,6$	ND	ND	0,5 $\pm 0,0$	ND	ND	2,5 $\pm 0,0$	1,1 $\pm 0,1$	ND
42	unbekanntes Sesquiterpen (3)	1478			ND	ND	ND	ND	0,9 $\pm 0,0$	ND	ND	ND	ND	ND	0,1 $\pm 0,0$	ND	ND
43	β -Bisabolene	1504	balsamisch, Zitrus, blumig ^e		ND	ND	ND	ND	0,5 $\pm 0,0$	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
44	β -Sesqui- phellandren	1519	süß, fruchtig, kräuterartig ^e		ND	0,4 $\pm 0,0$	ND	ND	0,9 $\pm 0,0$	ND	ND	ND	ND	ND	0,09 $\pm 0,01$	ND	ND

^a ND: nicht detektiert; ^b Nummer der flüchtigen Verbindung; ^c Retentionsindex basierend auf der RTX®-5 Säule; ^d Detektiert in anderen Mohnölen; ^e Aromabeschreibungen wurden gefunden auf: <http://www.thegoodscentscompany.com/index.html#>

10.2 Sensorische Auswertungen

10.2.1 Geruch und Flavor

Die Attribute, die im Vorlauf durch das Panel festgelegt wurden (Tab. 24), ähneln den von Emir et al. (2014)²⁶ für die Beschreibung von Mohnöl verwendeten Bezeichnungen sehr stark. Unter anderem wurden von Emir et al. (2014) Begriffe wie mohnsamenartig, haselnussartig, heuartig, adstringierend, erdig, bitter und süß aromatisch verwendet, die in ähnlicher Weise auch für die hier untersuchten Proben als passende Attribute ausgewählt wurden. Die Generalized Procrustes Analysis (GPA) wurde auf eine Auswahl der olfaktorischen und gustatorischen Daten, die aus der sensorischen Verkostung resultierten, angewandt (Abb. 18 – 21). Alle PANOVA (Procrustes Analysis of Variance) Tabellen zeigten einen höchst signifikanten Einfluss ($p < 0,0001$) der angewandten Transformationen (Skalierung, Rotation, Translation) und die Permutationstests bewiesen, dass die erreichte Konsens-Konfiguration ebenfalls effizient war und nicht auf Zufällen beruhte.

Im Ölgeruch wurden die Wintermohnproben hauptsächlich durch die Attribute fettig/ölig, ranzig sowie süß charakterisiert wohingegen die meisten Sommermohnöle ein grünes Aroma aufwiesen.

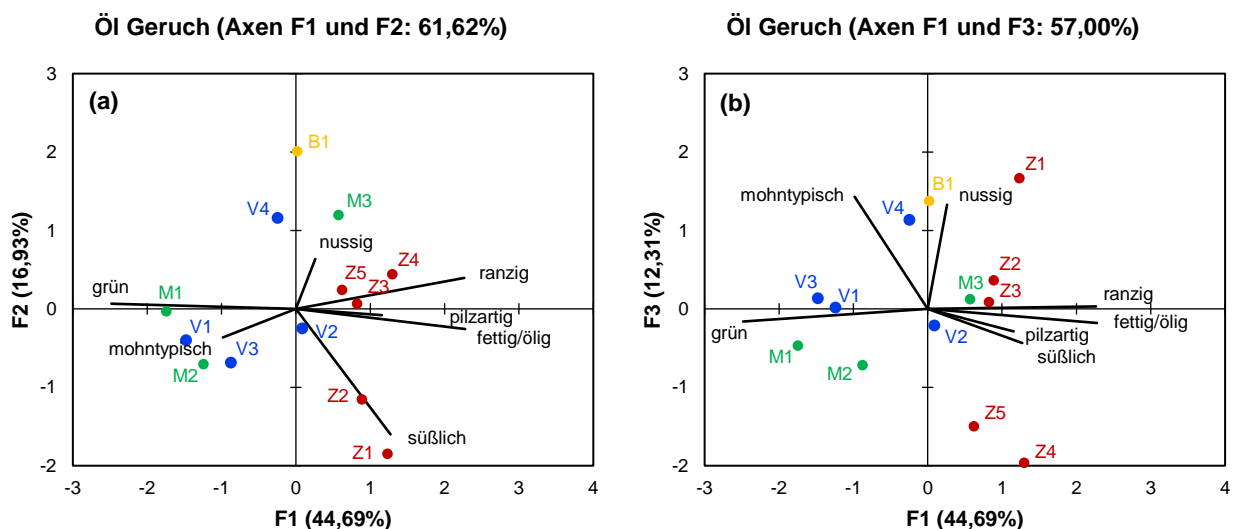


Abb. 18 Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 1 und 3 der Geruchsattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnölproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)

Der Dimensionstest der GPA ergab für die Geruchsattribute der Öle drei relevante Dimensionen, die zusammen 73,93% der Gesamtvariabilität der Daten erklärten (Abb. 18). Die Attribute fettig/ölig, süß und ranzig wurden durch Komponente 1 beschrieben, die Attribute grün und mohntypisch lagen genau entgegengesetzt. Mohntypisch und nussig wurden am besten von Dimension 3 erklärt (Abb. 18b).

Im ersten Biplot (Abb. 18a) lagen alle `Zeno Morphex` Proben gruppiert in den Quadranten 1 und 4, was bedeutet, dass das Wintermohnöl im Allgemeinen fettiger/ölicher und ranziger roch als die meisten Sommermohnöle. Die Proben Z1 und Z2 waren ebenfalls in Richtung des süßen Vektors platziert, der durch Dimension 2 und 3 vom nussigen und ranzigen Geruch differenziert wird. Per Headspace-Analyse (SPME) wurden wenig süßlich riechende Verbindungen identifiziert, allerdings wird Limonen ein süßes, zitrusähnliches Aroma zugeschrieben¹⁶³. Insbesondere in den Proben Z2 und Z3 trat es mit über $8,0 \mu\text{g g}^{-1}$ und in Z1 mit $5,2 \pm 0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ auf.

Im Gegensatz dazu waren zwei der drei `Mieszko`-Proben (M1 und M2) im negativen Bereich von Dimension 1 platziert, wo grün das dominierende Attribut darstellte. M3 lag höher auf Dimension 1 und 2, welche M3 als nussiger und Wintermohn-ähnlicher charakterisierten. Dass M3 geruchssensorisch so unterschiedlich zu M1 und M2 wahrgenommen wurde, kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass M3 aus mehrmaligem Nachbau des Original `Mieszko` Saatgutes stammte, was über die Generationen hinweg auch die sensorischen Eigenschaften verändert haben kann.

Auch das volatile Profil der M3 Probe unterschied sich stark von den übrigen Proben, da es den allgemein höchsten Gehalt an flüchtigen Substanzen und zusätzlich hohe Gehalte an 2-Pentylfuran, 2-Octenal und Decanal aufwies, die mit einem fettig/ölichen oder ranzigen Aroma in Verbindung gebracht werden, sowie stark erhöhte Gehalte an Pentylhexanoat zeigte. Die `Viola` Öle waren relativ uneinheitlich über die Dimensionen verteilt, jedoch lagen V1 und V3 ebenfalls in der Nähe des grünen Vektors. Dimension 3 erklärt hauptsächlich den mohntypischen und nussigen Geruch, der am stärksten in den Proben Z1, B1 und V4 ausgeprägt war. Weiße Mohnsamen werden in der Literatur mit einem Geruch von Walnuss, Haselnuss oder Erdnuss beschrieben¹⁶⁴. Dies erklärt, wieso B1 hohe Affinität zum nussigen Vektor zeigte. Bei den Blaumohnsamen entwickelten insbesondere Z1 und V1 einen stark mohntypischen und nussigen Geruch, beides positive Attribute, die eine erwünschte Produktbeschreibung darstellen^{1,26}.

Aus geruchlicher Sicht lassen sich die Mohnöle insbesondere durch Dimension 1 unterscheiden, die 44,69% der gefundenen Varianz in den Daten erklärt. Dort sind die Sommermohnvarianten besonders stark mit dem grünen Geruch assoziiert und die Wintermohnöle werden als fettig/ölig, süß und zum Teil ranzig charakterisiert.

Die sensorische Bewertung des Öl-Flavors war ähnlich der des Ölgeruchs, sodass die Sommermohnöle als besonders grün wahrgenommen wurden und die Wintermohnöle als fettig/ölig aber auch mohntypisch, nussig und süß.

Mit Hilfe von 4 Dimensionen der GPA ließen sich über 80% der totalen Varianz erklären (Abb. 19). Die erste Dimension wurde maßgeblich vom grünen Flavor bestimmt, der am prominentesten von den Proben M1, M2, V1 und V3 vertreten wurde. Diese Proben waren Sommermohnsorten, was gut zum Eindruck des Ölgeruchs passt, wo ebenfalls das grüne Aroma in den Sommermohnsorten dominierte. Auf der gegenüberliegenden Seite zu Dimension 1 in Abb. 19a lagen die Proben Z1, Z2 und Z4 in der Nähe des fettig/ölig und mohntypischen Vektors. Diese Proben lagen ebenfalls benachbart zum nussigen und süßen Flavor. Ein ranziger Flavor war am ehesten bei den Proben Z5, M3 und V2 angeordnet. Beide Öl-Flavor Biplots zeigen eine Gruppierung des mohntypischen mit dem fettig/öligem Flavor, der am ausgeprägtesten in den `Zeno Morphex` Proben war. Dimension 3 (Abb. 19b) ergänzt Informationen zum pilzartigen Flavor, der in den Proben M1, Z1 und V1 am meisten auffiel.

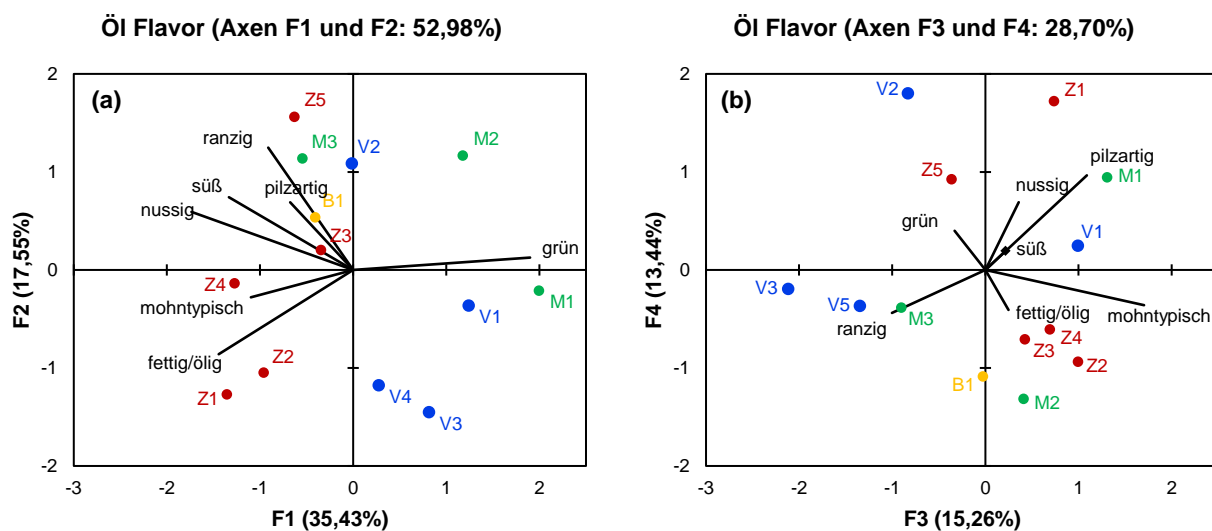


Abb. 19 Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 3 und 4 der Flavorattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnölproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)

Die sensorische Bewertung der Mohnsamens zeigte einen mit den Ölen in vielen Punkten vergleichbaren Output. Die `Zeno Morphex` Proben wiesen einen eher mohntypischen, nussigen und süßen Geruch auf, `Mieszko` wurde hauptsächlich als grün, pilz- und heuartig charakterisiert und die `Viola` Samen wurden meist ranzig sowie fettig/ölig bewertet.

Abb. 20a zeigt die ersten beiden Dimensionen der GPA, die 52,60% der Varianz im Mohnsamengeruch erklärten. Dimension 1 beschreibt den mohntypischen Geruch, der besonders charakteristisch für die Proben Z1 und Z2 sowie V1 war. Grundsätzlich waren die `Zeno Morphex` Proben eher Richtung Dimension 1 orientiert, die den süßen und nussigen Eindruck beinhaltet, ähnlich zu dem, was für das Mohnöl festgestellt werden konnte. Dimension 2 beschreibt die Attribute grün, pilzartig und heuartig besonders gut, in deren Nähe die beiden Original `Mieszko`-Proben (M1 und M2) platziert waren. Noch stärkere Orientierung in Richtung Dimension 2 zeigte die weißsamige B1 Probe sowie die Proben V1 und Z5. Die Attribute ranzig sowie fettig/ölig waren im dritten Quadranten platziert, gemeinsam mit V2, V3 und V4. Somit zeigten 3 von 4 `Viola`-Proben ein eher negatives Aroma. Mit Hilfe der dritten Dimension wurde der nussige und süßliche Geruch noch präziser definiert, bei dem M2 und Z4 die höchste nussige Ausprägung zeigten (Abb. 20b). Einen süßlichen Samengeruch zeigten vor allem die Proben V1 und M1.

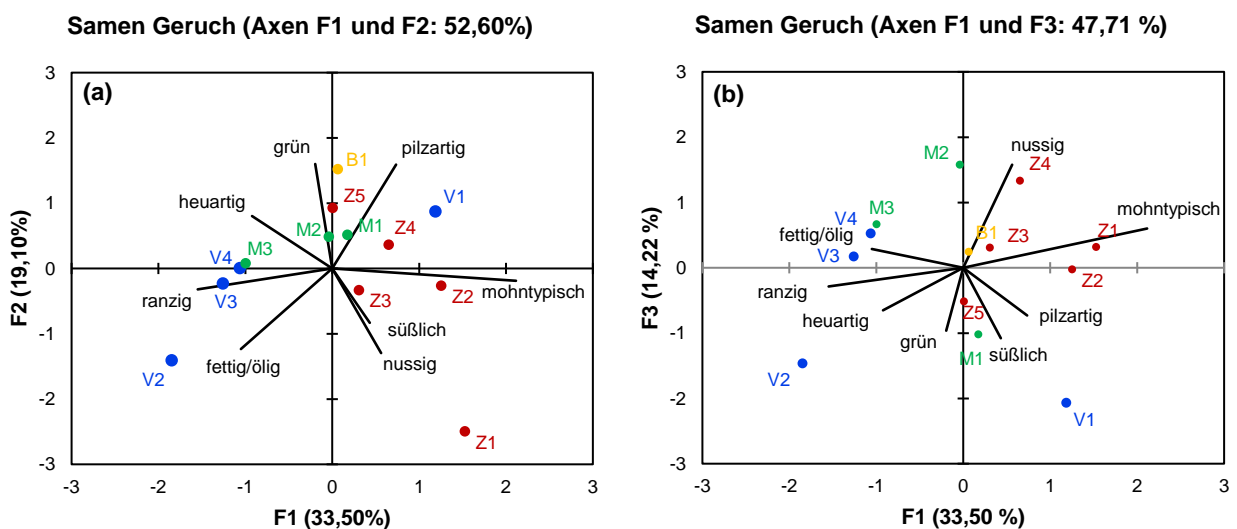


Abb. 20 Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 1 und 3 der Geruchsattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnsamenproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)

Der Samen Flavor wurde für Wintermohn als mohntypisch, fettig/ölig und nussig beschrieben und für `Mieszko` und `Viola` vor allem als grün und heuartig definiert.

Die Evaluierung des Samen Flavors zeigte eine vergleichbare Aufteilung wie der Samengeruch zwischen grün und heuartigem Flavor mit hohem Dimension 1 Score im Kontrast zum mohntypischen Flavor, der in die gegengesetzte Richtung orientiert war (Abb. 21). Süß und nussig sowie fettig/ölig waren Attribute, die hohe Werte in Dimension 2 erreichten. Dimension 1 und 2 erklären gemeinsam 59,49% der Varianz im Samen-Flavor.

Wiederum waren die Wintermohnproben in Richtung mohntypisch, fettig/ölig und nussig orientiert, Z5 war zusätzlich in Nähe des süßen Vektors platziert. Im Gegensatz dazu wurden die Proben M1, V1, V2, V3 und M2 am ehesten von Dimension 1 repräsentiert, die die Proben als grün und heuartig charakterisiert. M3, V4 und B1 wurden am ehesten einem süßen Flavor zugeordnet. Die vierte Dimension erklärt vor allem den pilzartigen Flavor, der am ausgeprägtesten in den Proben B1 und Z1 vorhanden war.

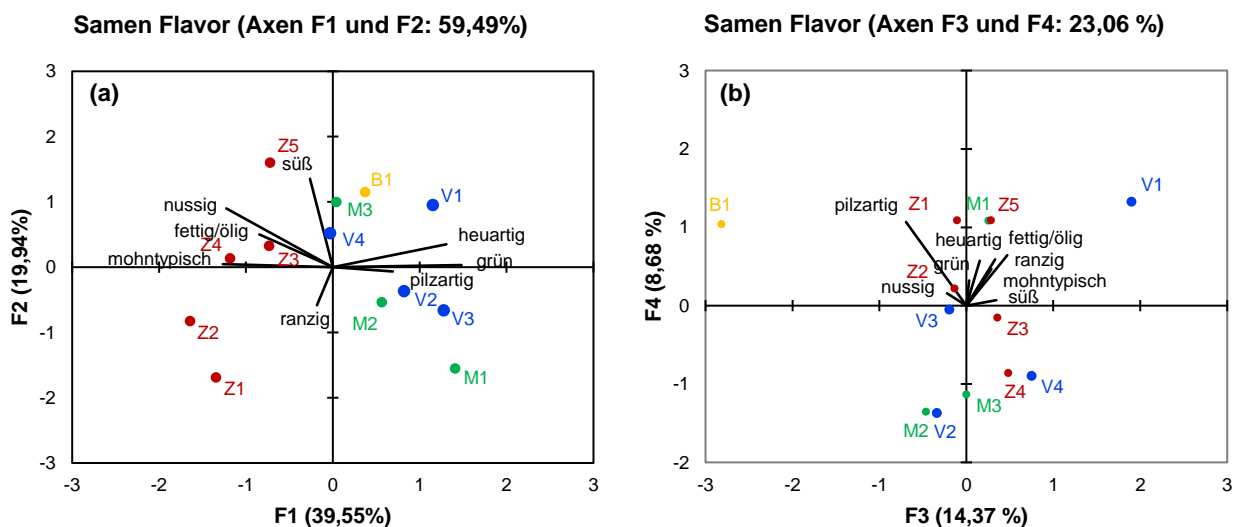


Abb. 21 Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 3 und 4 der Flavorattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnsamenproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)

»» Wenn man alle Öl- und Samenproben gemeinsam betrachtet, fallen große Ähnlichkeiten in der olfaktorischen und gustatorischen Bewertung auf. Emir et al. (2014) zeigten, dass in ihrer Studie der Sorteneinfluss kein maßgeblicher Grund für die sensorischen Unterschiede in den Mohnsamen war²⁶. Im Gegensatz dazu zeigt die vorliegende Untersuchung, dass `Zeno Morphex` Samen am deutlichsten durch einen mohntypischen, süßen, nussigen und fettig/öligem Geruch und Flavor gekennzeichnet waren, wohingegen die Öle mit ähnlichen Attributen inklusive eines eher ranzigen Aromas beschrieben wurden. Die `Mieszko` und `Viola` Proben wurden hauptsächlich als grün riechend und schmeckend eingestuft, sowohl in den Samen als auch im Öl. Während mohntypisch, süß und nussig eher positiv konnotierte Attribute sind, gelten grün und ranzig als Off-Flavor und sind dementsprechend eher unerwünscht¹⁵⁹. Neben dem grünen Eindruck vermittelten die `Mieszko` Samen auch ein heuartiges und pilzartiges Aroma, bei dem sich M1 und M2 ähnlicher waren im Vergleich zu M3. `Viola` Samen wiesen einen grünen sowie heuartigen und fettig/öligem Geruch und Flavor auf, wohingegen die Öle unter anderem auch als mohntypisch charakterisiert wurden. Die einzige weißsamige `Borowski` Probe wurde sowohl als süß, nussig und pilzartig als auch als grün bewertet.

Mit Hilfe der GPA Analyse wurden Sortenunterschiede deutlich sowie Zusammenhänge zwischen Rohware und Öl sowie Geruch- und Flavorattributen. Auf dieser Grundlage wurden daher unter Berücksichtigung aller bewerteten Attribute Netzdiagramme erstellt, die eine Zusammenfassung der sensorischen Bewertung der untersuchten Sorten darstellen. Die Abb. 22a – 22d zeigen die über die Sorten gemittelten Attributsausprägungen der Geruchs- und Flavorbewertungen der Mohnöle und -samen. Zusätzlich zur GPA lässt sich anhand der Diagramme die Höhe der Intensitätsbewertungen klarer erkennen und insbesondere auf die aus der GPA ausgeschlossenen Attribute Bezug nehmen. Die Sorte `Borowski` wurde aufgrund der fehlenden Wiederholungen davon ausgenommen.

Die Skalenausnutzung der Intensitätsbewertung der Attribute war für die Mohnöle am höchsten, die insgesamt am stärksten durch mohntypische, nussige, fettig/ölige und grüne Aromen geprägt waren.

Auffällig ist hier wie auch in der GPA die Abgrenzung von `Mieszko` ($1,9 \pm 0,4$) und `Viola` ($2,1 \pm 0,2$) zu `Zeno Morphex` ($1,4 \pm 0,3$) im grünen Flavor. Die geringsten Intensitäten im Mohnöl wurden in den Attributen muffig, bitter und adstringierend ermittelt, allerdings trat der erdige Flavor bei `Mieszko` ($2,4 \pm 0,6$) etwas stärker hervor als bei `Viola` ($1,8 \pm 0,4$) und `Zeno Morphex` ($2,0 \pm 0,1$). Beim Mohnölgeruch wird ebenfalls wieder die Differenzierung der Sorten anhand des grünen Geruchseindrucks (Viola $2,6 \pm 0,6$; Mieszko $2,5 \pm 0,9$, Zeno Morphex $1,4 \pm 0,3$) sowie durch die Attribute fettig/ölig, ranzig und süßlich deutlich.

Zusätzlich ließ sich ein tendenziell etwas muffigerer Geruch der `Zeno Morphex` Proben ($1,7 \pm 0,3$) gegenüber den Sommermohnsorten ($1,4 \pm 0,3$ und $1,4 \pm 0,2$) erkennen.

Muffig wird in der Sensorik als Fehl aroma beschrieben und beispielsweise von Verbindungen wie Geosmin oder 2,4,6-Trichloranisol hervorgerufen¹⁵⁹. Diese Stoffe wurden jedoch nicht im Mohn detektiert und es ergaben sich auch aus den übrigen flüchtigen Verbindungen keine Hinweise auf muffige Komponenten. Die Ergebnisse passen jedoch dazu, dass beispielsweise auch der ranzige Geruch stärker im Wintermohnöl wahrgenommen wurde, was die Sommermohnöle insgesamt etwas „frischer“ wirken lässt. Ranzig riechende Verbindungen entstehen unter anderem durch oxidative Prozesse, die durch mechanische Beschädigungen der Samen, wie sie auch bei der Ölpressung stattfinden, beschleunigt werden¹⁶⁶. Dies würde auch erklären, warum der ranzige Geruch im Öl stärker wahrnehmbar war als in den Samen. Dass das mohntypische und nussige Aroma stärker im Ölflavor hervortrat, ist vermutlich auf die Vermischung von retronasaler und gustatorischer Wahrnehmung der Aromakomponenten bei Aufnahme in den Mundraum zurückzuführen²²¹.

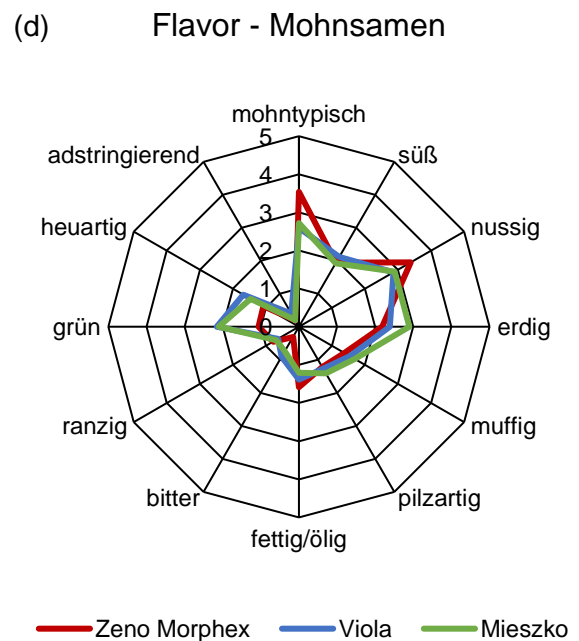
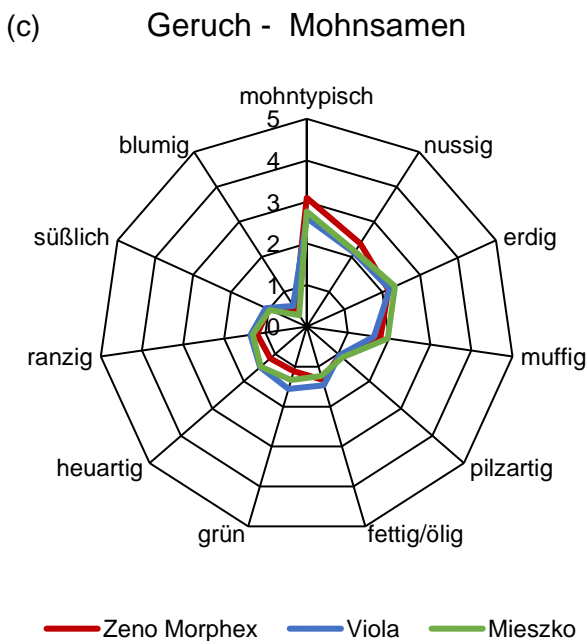
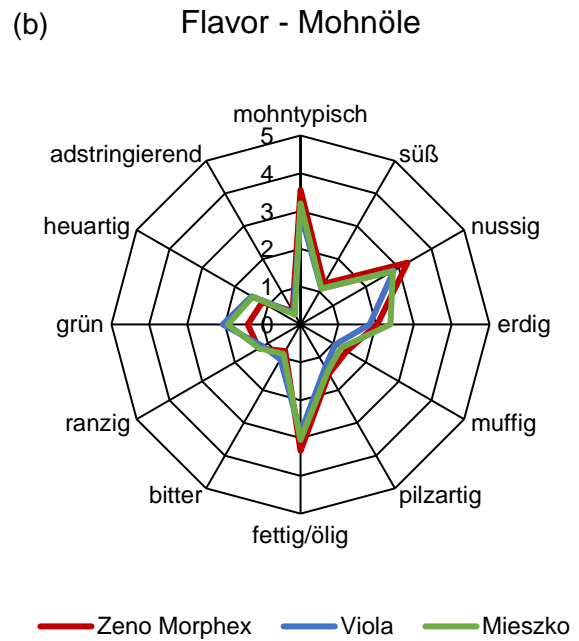
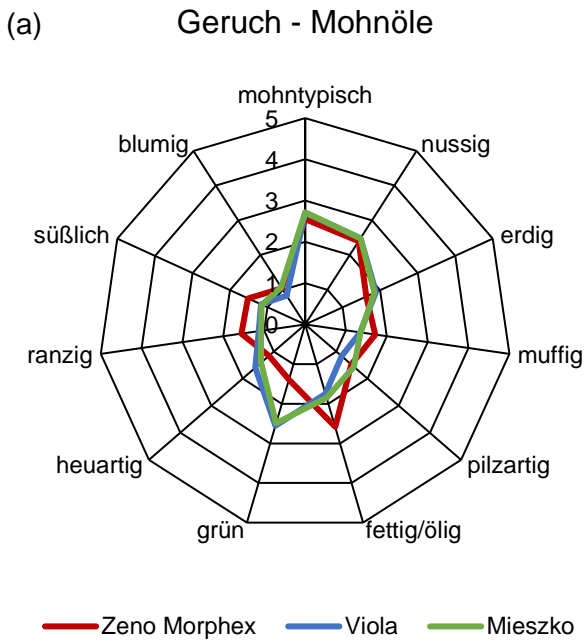


Abb. 22 Netzdiagramme der sensorischen Bewertung von (a) Ölgeruch, (b) Ölflavor, (c) Samengeruch und (d) Samenflavor gemittelt für die drei Sorten `Viola`, `Mieszko` und `Zeno Morphex`

Bei den Mohnsamen wurden die Attribute in der geruchlichen Bewertung insgesamt eher niedriger als im Flavor bewertet. Dadurch traten auch die Sortenunterschiede erst beim Samenflavor deutlicher hervor.

Dies liegt vermutlich auch daran, dass die Geruchsstoffe sich im Kopfraum der Mohnölgefäße ansammeln konnten, wohingegen die Geruchswahrnehmung durch die verschlossene Samenschale deutlich schwieriger ist.

Auch bei den Samen wurden die Attribute mohntypisch und nussig intensiver bei `Zeno Morphex´ (2,4 – 3,1) wahrgenommen, wohingegen grün und heuartig die deutlich höhere Ausprägung bei `Viola´ (1,5 – 1,6) und `Mieszko´ (1,3 – 1,5) zeigten. Blumig und adstringierend waren wiederum kaum messbare Merkmalseigenschaften, jedoch wurde beim Mohnsamengeruch annäherungsweise und beim Mohnsamenflavor deutlicher, dass das Attribut erdig besonders bei `Mieszko´ intensiver bewertet wurde (Flavor erdig `Mieszko´: 2,9 ± 0,9; `Viola´: 2,4 ± 0,6; `Zeno Morphex´: 2,2 ± 0,1).

Der erdige Flavor zeigte sich bereits im Öl und betont die durchgängig erdigere Note der Sorte `Mieszko´.

Erdig ist ein Geruch, der typischerweise mit Rote Bete oder Waldboden verbunden wird und beispielsweise auch durch Geosmin oder 2,3,5-Trimethylpyrazin hervorgerufen wird¹⁵⁹. Dies ist auch der Grund, weshalb eine Abgrenzung zum muffigen Aroma nicht immer eindeutig ist. Da aber ein Rote-Bete-ähnlicher Geruch von den Panelteilnehmern in der einfach beschreibenden Prüfung als eher positiv eingestuft wurde, wurden die Begriffe getrennt bewertet und der Geruch erdig mit einer eher positiven Konnotation behaftet. Dass die Öle fettig/ölig charakterisiert wurden als die Samen, hängt vermutlich auch mit der Textur der Proben zusammen. Beim Aufnehmen in den Mundraum müssen die relativ trockenen Samen zunächst zerkaut werden, weshalb der fettig/ölige Charakter der Proben vermutlich weniger stark wahrnehmbar ist als beim Verzehr des reinen Öls.

Die Intensität der Fehleraromen bitter und adstringierend wurde maximal mit 1,1 eingeschätzt, sodass dies keine Rolle in der Gesamtwahrnehmung der Proben spielte. Bitter ist ein Fehlgeschmack, der in Mohnsamen und -ölen von mangelnder Qualität vorkommt, weshalb die Intensitätsbewertungen unterhalb von 1,0 für eine insgesamt annehmbare Qualität der untersuchten Samen und Öle sprechen. Viele, einen Bittergeschmack verursachende Moleküle sind pflanzlichen Ursprungs, die ursprünglich dazu dienten die Pflanze unschmackhaft für herbivore Tiere zu machen¹⁷¹. Menschen sind unterschiedlich sensitiv gegenüber dem Bittergeschmack, was zum Teil durch genetische Variation in den Rezeptoren für bitter schmeckende Moleküle erklärt werden kann¹⁷¹. Im Rahmen der Panelschulung musste deshalb ein Prüfer wegen fehlender Sensitivität gegenüber dem Bittergeschmack von der Profilprüfung ausgeschlossen werden. Im Mohn wird der Bittergeschmack hauptsächlich auf freie Fettsäuren, insbesondere Linolsäure und deren Oxidationsprodukte, verschiedene Oylipine, zurückgeführt^{169,170}. Dabei werden von Lainer et al. (2020)¹⁷⁰ Geschmacksschwellen von unter 1,61 mM für die verschiedenen Verbindungen angegeben, was einen Bitterwahrnehmung auch schon bei geringen Konzentrationen möglich macht.

Es kann daher bei den untersuchten Proben davon ausgegangen werden, dass kaum Bitterstoffe in Samen und Öl vorhanden waren.

Auch das Geruchsattribut blumig wurde in den Samen mit maximal $0,6 \pm 0,2$ ('Viola') und im Öl $1,1 \pm 0,2$ ('Mieszko') bewertet und lag für die übrigen Sorten stets darunter. Blumig scheint daher kein geeigneter Begriff für die Beschreibung des Mohnaromas zu sein. Der süße Geschmack wurde im Samen (1,9 – 2,1) etwas höher bewertet als im Öl (1,1 – 1,2). Da das Öl hauptsächlich aus Triglyceriden und freien Fettsäuren besteht, ist ein besonders süßer Geschmackseindruck des Öls durch Zuckerstoffe unwahrscheinlich. Im Samen sind geringe Mengen Kohlenhydrate vorhanden, Nergiz und Ötles (1994)¹²¹ bestimmten 236 g kg^{-1} , sodass ein leicht süßlicherer Geschmack der Samen, der durch Zucker- oder zuckerähnliche Stoffe hervorgerufen wird, plausibel erscheint.

Zur weißsamigen Sorte ist zu sagen, dass besonders die mohntypische und nussige olfaktorische Note im Öl mit Intensitäten von $2,8 \pm 1,4$ bzw. $3,0 \pm 1,2$ auffiel, was im Falle des nussigen Aromas deutlich über der Bewertung der anderen Proben lag. Auch der pilzartige Geruch des Öls lag bei $1,7 \pm 1,5$ Punkten und damit über den anderen Sorten. Die Bewertung der Attribute grün und heuartig des Öls lagen im Bereich der Blaumohn-Sommervarianten und waren gegenüber 'Zeno Morphex' leicht erhöht. Entsprechend wurde auch der fettig/ölige Eindruck niedriger als im Wintermohn bewertet, wohingegen der ranzige Eindruck zwischen 'Zeno Morphex' und den Sommermohnvarianten lag. Was den Geruch der Samen betrifft, wurde 'Borowski' mit $2,9 \pm 1,5$ als etwas weniger mohntypisch als 'Zeno Morphex' ($3,1 \pm 0,4$) charakterisiert, lag damit aber etwas höher als 'Viola' und 'Mieszko'. Auffällig war die erdige Note, die bei 'Borowski' mit $2,5 \pm 1,1$ relativ stark ausgeprägt war.

Das Geschmacksprofil des Öls von 'Borowski' wies die größten Ähnlichkeiten mit dem Wintermohn auf. Ebenso wie in den Samen war der mohntypische ($3,5 \pm 1,1$) und nussige ($3,4 \pm 1,0$) Flavor besonders ausgeprägt und auch der süße Geschmack ähnlich hoch wie 'Zeno Morphex' ($1,2 \pm 1,0$). Der fettig/ölige Charakter des Öls war im Bereich der Sommermohne einzuordnen, ebenso wie die muffige Note, die relativ schwach ausgeprägt war. Im Samengeschmack lag die Sorte 'Borowski' für die meisten Attribute auf ähnlichem Niveau wie 'Mieszko' und 'Viola', insbesondere was die erhöhte grüne ($2,1 \pm 1,4$) und heuartige ($1,5 \pm 1,6$) Note betraf. Der mohntypische Flavor ordnete sich zwischen Winter- und Sommermohn ein, wohingegen der süße Geschmack etwas deutlicher war ($2,2 \pm 1,2$) und insbesondere das nussige Aroma mit den höchsten Intensitäten bewertet wurde ($3,5 \pm 1,1$).

Der deutlichste Unterschied zu den übrigen Sorten trat im Attribut pilzartig auf, dessen Intensität bei 'Borowski' mit $2,2 \pm 3,0$ bewertet wurde, gegenüber Intensitäten unterhalb von 1,5 bei den anderen Sorten.

Die hohen Standardabweichungen bei `Borowski´ kommen dadurch zustande, dass zur Berechnung nur die einzelnen Prüferbewertungen herangezogen werden konnten, wohingegen bei den übrigen Sorten die Mittelwerte über die Sortenwiederholungen gebildet wurden. Dass das Attribut pilzartig in allen untersuchten Aspekten (Geruch Samen, Geruch Öle, Flavor Samen, Flavor Öle) bei `Borowski´ mit den höchsten Intensitäten bewertet wurde, gibt deutliche Hinweise auf eine genotypische Ausprägung. Da jedoch nur eine Vergleichsprobe zur Verfügung stand, ist dies genauer zu prüfen.

Insgesamt ließ sich die weißsamige Sorte durch ein mohntypisches, nussiges Aroma charakterisieren, das insbesondere im Geruch und Geschmack der Öle intensiv wahrgenommen wurde. Ähnlich zu `Viola´ und `Mieszko´ wurde `Borowski´ im Geruch von Samen und Öl sowie im Samenflavor auch als grün und heuartig bewertet. Dies trat geschmacklich im Öl in den Hintergrund. Besonders `Borowski´-typisch war zudem ein Pilzaroma, was insbesondere den Flavor der Samen prägte.

Fehlaromen wie ranzig, muffig, bitter oder adstringierend traten nur in geringem Maße auf. Die Betonung der positiven Aromen im Öl macht die Sorte für die Ölgewinnung sehr attraktiv. Bei den Samen ist der Wintermohn durch ein ausgeprägteres mohntypisches Aroma und das Fehlen von grünen Fehlaromen vermutlich noch konsumgeeigneter¹⁶⁴. Ebenso spielt die Farbe eine wichtige Rolle, da in den meisten Mohnprodukten Blau- oder Graumohnsamen verwendet werden.

»» Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Proben insgesamt eher positive sensorische Eigenschaften zeigten mit einer geringen Tendenz zu Off-Flavors. Der Wintermohn oder die Sorte `Borowski´ könnten trotzdem aus Konsumentensicht favorisiert werden, da sie durchgängig mohntypisches Aroma zeigten und so gut wie keine starken grünen Geruchs- oder Geschmackseindrücke hervorriefen. Zielführend wären in diesem Sinne hedonische Sensorikprüfungen, die Aufschluss darüber geben, welche Sorten und Aromakomponenten von Verbrauchern tatsächlich bevorzugt werden.

10.2.2 Nachgeschmack

Die Bewertung des Nachgeschmacks erfolgte nur, wenn der Prüfer einen Nachgeschmack identifizieren konnte. Dies wurde bei jeder Probe von mindestens zwei Prüfern festgestellt.

Die Beschreibung des Nachgeschmacks orientierte sich an der Geruchs- und Flavorbeschreibung der Proben, deren dominanteste Attribute sich auch nach dem Abschlucken im Mundraum hielten.

Insgesamt wurde ein Nachgeschmack bei den Ölen nicht häufiger festgestellt als bei den Samen, aber die Attributsauswahl zur Beschreibung des Nachgeschmacks war vielseitiger.

Auffällig war, dass nussig der häufigste genannte Nachgeschmack der Wintermohn-Samenproben war (24 Nennungen) mit den meisten Nennungen bei Probe Z3 und Z4. Darüberhinaus wurde nur noch viermal ein anderer Nachgeschmack bei den Samen der Wintermohnproben festgestellt, davon zweimal heuartig. Der Nachgeschmack der Wintermohnöle wurde ebenfalls am häufigsten mit nussig beschrieben (8 Nennungen), danach folgten heuartig, mohntypisch und ranzig. Den geringsten Nachgeschmack unter den Wintermohnölen wies Probe Z4 auf. Diese Bewertungen stehen in gutem Einklang mit den Wahrnehmungen des Geruchs und Flavors der Wintermohnproben, bei denen dieselben charakteristischen Attribute mit hohen Intensitäten bewertet wurden. Dass nussig auch im Nachgeschmack aller `Zeno Morpex´ Öle und Samen ausgeprägt vorhanden war, unterstreicht die Dominanz dieses Aromas, was in diesem Fall positiv bewertet werden kann, da nussig ein erwünschtes Aroma ist^{1,26}. Bei den Samen der Sorte `Viola´ wurde am häufigsten ein grüner Nachgeschmack detektiert (8 Nennungen), aber auch heuartig und nussig wurden mehrmals (3 – 7 Nennungen) genannt. Bei den Ölen dominierte ebenfalls der grüne Nachgeschmack (5 Nennungen), gefolgt von heuartig und nussig. Ähnlich wurde die Sorte `Mieszko´ charakterisiert, bei der heuartig und nussig den Nachgeschmack der Samen und grün und nussig den Nachgeschmack der Öle charakterisierten. Es fällt auf, dass ebenso wie bei Geruch und Flavor, sich der grüne oder auch heuartige Eindruck der Sommermohnproben auch im Nachgeschmack häufig wiederfand.

»» Sowohl in den Winter- als auch in den Sommermohnproben war der nussige Flavor im Nachgeschmack deutlich feststellbar. Dies gibt Hinweise darauf, dass das nussige Aroma die getesteten Mohnsamen und -öle grundsätzlich charakterisiert, was im Hinblick auf die sensorische Qualität positiv zu bewerten ist. Es kann daher auch vermutet werden, dass bei den Sommermohnproben der nussige Eindruck in Geruchs- und Flavorbewertung von den grünen Aromastoffen stärker überlagert wurde. Das Fehlen eines negativen Nachgeschmacks wie beispielsweise bitter unterstreicht weiterhin die hohe Qualität der getesteten Proben.

10.2.3 Aussehen/Farbe

Die Farbe ist insbesondere für die Nutzung der Mohnsamen ein entscheidendes Qualitätsmerkmal, da die Optik der daraus hergestellten Backwaren mit einer bestimmten Erwartung der Verbraucher verknüpft ist. Möglichst dunkelblaue, einheitlich gefärbte Samen werden hier gegenüber hellen, unregelmäßig gefärbten Samen bevorzugt²⁷. Von 13 Ölproben wurden 8 Proben eher mit der Farbe RAL 1012 (zitronengelb) als mit RAL 1018 (zinkgelb) beschrieben.

Zur visuellen Beschreibung der Mohnöle stellte zitronengelb die passendste Farbe dar.

Das kaltgepresste Mohnöl wird in der Literatur als blassgelb bis hellgoldgelb beschrieben¹. Da die Farbe von Pflanzenölen auch abhängig vom Pressverfahren, maßgeblich in Abhängigkeit der Temperatur, variiert²³⁴ und alle in dieser Studie analysierten Proben mittels Kaltpressung auf gleiche Art und Weise bei maximal 30°C hergestellt wurden, wurde nicht von einer besonders hoher Farbvariation in den Proben ausgegangen.

Visuelle Viskosität, Transparenz und Homogenität der Öle wurde stets ähnlich bewertet, sodass sie als gering viskos ($2,4 \pm 0,2$), höchst transparent ($4,1 \pm 0,2$) und äußerst homogen ($4,3 \pm 0,2$) beschrieben wurden.

Hohe Bewertungen von Transparenz und Homogenität zusammen mit einer geringen Viskosität zeigen, dass die Öle nahezu wasser-ähnliche Konsistenz hatten und dabei eine hohe Reinheit aufwiesen, da kaum Trübstoffe oder Schlieren registriert wurden. Schlierenbildung tritt oft nach längerer Standzeit auf, die bei kaltgepressten Ölen die Bildung eines weißlichen Bodensatzes durch nicht hydratisierte Phospholipide verursacht, der sich bei Bewegen der Probe als Schlieren durch das Öl zieht^{235,236}. Durch die kurze Lagerdauer und das Vermeiden des Auskippens möglicher Bodensätze für die Verkostung, bestanden hier keine Auffälligkeiten in den untersuchten Proben.

Das Öl der weißsamigen Probe (B1) ließ sich optisch nicht von den Blaumohnölen unterscheiden.

Die Farben zitronengelb und zinkgelb wurden gleichermaßen als passend empfunden und die Probe wies eine ähnliche Transparenz und Homogenität im Vergleich mit den übrigen Ölen auf. Bei den Samen wurde RAL 7000 (fehgrau) in 7 von 13 Fällen vor RAL 7015 (schiefergrau) bevorzugt. Die weißsamige Sorte wurde als beige (RAL 1001) eingestuft.

Zwischen den Blaumohnsamen konnten keine klaren Unterschiede in der Farbwahrnehmung erkannt werden.

Dies kann unter anderem durch die geringen Bewertungen der Farbhomogenität ($\leq 2,6$) erklärt werden, da alle Samenproben eine Mixtur an unterschiedlichsten Grautönen aufwiesen. Weil dies alle Samenproben betraf, machte die hohe Farbheterogenität eine Sortenzuordnung unmöglich. Eine Probe (V2) erhielt etwa gleich viele fehgraue wie schiefergraue Nennungen, was dafür spricht, dass die Farbmusterung dieser Probe am uneinheitlichsten ausfiel. Nach Schijfsma et al. (1960) ist eine Farbcharakterisierung von Mohnsorten äußerst schwierig, da Farben nicht nur zwischen, sondern auch innerhalb einer Variante schwanken können. Es ist zwar möglich, die Sorten grob einer Farbe wie grau oder blau zuzuordnen, trotzdem können die Nuancen dieser Farben sogar zwischen einzelnen Pflanzen und dort auch zwischen einzelnen Kapseln variieren²⁷.

Daher ist es nicht ungewöhnlich, dass auch die in dieser Studie untersuchten Proben eine Mischung aus verschiedenen Grau- und Blautönen aufwiesen. Trotzdem lassen sich leichte Tendenzen erkennen. Beispielsweise wurde insgesamt der fehgraue Farbton etwas öfter ausgewählt, was bedeutet, dass die meisten Samen eher hellgrau gefärbt waren. Hier wurde keine Sortenspezifität erkannt, jedoch eine leichte Beeinflussung durch den Standort. So wurden die Wintermohnsamen vom Campus Klein-Altendorf häufiger mit schiefergrau beschrieben (12 Nennungen schiefergrau zu 7 Nennungen fehgrau), während die Sommermohnsamen eine stärker fehgraue Färbung aufwiesen (10 zu 3 Nennungen).

Beide Proben aus Hessen wurden mit einem größeren fehgrauen Anteil (9:4) charakterisiert, wohingegen beide Proben aus Niedersachsen eher als schiefergrau bewertet wurden. Für Proben aus Friedenfels ergaben sich eher fehgraue Anteile. Zwar konnte kein signifikanter Einfluss des Anbaustandorts auf die Farbausprägung berechnet werden, allerdings wurde schon früh der Einfluss von Umweltbedingungen auf die Färbung von Mohnsamen gezeigt. Schijfsma et al. (1960) konnten dunklere Samen auf Tonböden produzieren, wohingegen Sandböden hellere Samen hervorbrachten²⁷. Da der Mohnanbau sowohl in Immichenhain als auch in Dudensen auf sandigen Lehmböden erfolgte und Farbunterschiede am Campus Klein-Altendorf auch auf identischer Fläche zwischen Winter- und Sommermohnsorten auftraten, ist die Höhe der Beeinflussung der Samenfarbe durch den Standortfaktor Boden vermutlich nur gering.

Im Gegensatz zu den dunklen Samen zeigten die weißen Samen eine hohe Farbhomogenität ($4,2 \pm 0,6$), sie waren deutlich uniformer als die Blaumohnsamensamen. Auch die Homogenität in der Samengröße lag bei `Borowski´ etwas höher ($4,0 \pm 0,6$) im Vergleich zu den Blaumohnsamensamen ($3,4 \pm 0,2$), allerdings waren hier die Unterschiede nicht so gravierend wie in der Homogenität der Samenfarbe.

»» Optisch ergeben sich somit nur schwache Anhaltspunkte, um die Samenproben eindeutig voneinander zu unterscheiden. Grundsätzlich scheinen die in Deutschland angebauten Sorten eine eher graublau gefärbte Färbung aufzuweisen, die auch hellere Grautöne beinhaltet. Für eine Vermarktung als Streumohn wäre eine homogenere, dunklere Färbung wünschenswerter, dies muss also durch Vorteile in den übrigen Parametern, wie die homogene Größenverteilung oder positive Texturattribute, kompensiert werden. Das Öl war bei allen Proben optisch ähnlich mit hohen Bewertungen von Transparenz und Homogenität. Mit seiner zitronengelben bis zinkgelben Farbe ähnelt es anderen (kalt gepressten) Pflanzenölen (Raps-, Oliven- oder Leinöl)²³⁷ und ist somit optisch gut für den Einsatz im Lebensmittelbereich geeignet.

10.2.3 Textur

Die Textur des Öls wurde mit den Attributen viskos und ölig beschrieben, die bei allen Proben ungefähr gleich ausfiel.

Ölig wird mit „Produkt hinterlässt einen fettartigen Film“¹⁷⁷ definiert und wurde im Mittel mit 3,8 ($\pm 0,2$) bewertet. Niedrige Bewertungen der Viskosität als Mundgefühl ($2,5 \pm 0,2$) weisen auf die eher flüssige Struktur des Mohnöls hin, die aufgrund des hohen Gehalts an ungesättigten Fettsäuren und einem Schmelzpunkt von -17°C zustande kommt¹.

Die Samenqualität wird neben Geruch, Geschmack und Aussehen auch von der Textur bestimmt. Speisemohnsamensamen sollen sich rau anfühlen und leicht knackig sein²⁷. Dies hängt unter anderem mit dem Relief der Samen zusammen, weshalb Samen mit grober Oberflächenstruktur rauer sind. Gleichzeitig weisen diese Samen auch das geringere Gewicht auf²⁷.

Was die untersuchten Blaumohnsamensamen betrifft, wurden alle Proben als eher rau ($3,3 \pm 0,2$), ziemlich knackig ($2,9 \pm 0,4$) und fest ($3,0 \pm 0,3$) charakterisiert.

Rau und knackig sind bevorzugte Qualitätseigenschaften, weshalb alle untersuchten Samenproben aufgrund ihrer Textureigenschaften gleichwertig hoch anzusehen sind. Einen Unterschied machte jedoch die Sorte `Borowski´, die zwar ähnlich rau aber etwas weniger knackig ($2,2 \pm 0,8$) und weniger fest ($2,7 \pm 1,3$) als die Blaumohnsamensamen eingestuft wurde.

Dies könnte an der Struktur der Samen gelegen haben, die beim Weißmohn deutlich kleiner waren als beim Blaumohn.

» Zusammenfassend traten in der Textur der Samen und Öle kaum wahrnehmbare Unterschiede und keine auffällig negativen Eigenschaften auf. Im Gegenteil, die Bewertung der positiven Merkmale wie knackig, rau und fest, mit denen die Samen beschrieben wurden, sprechen für die gute Vermarktbarkeit der untersuchten Sorten. Eine Veränderung der Textur wäre möglicherweise bei längerer oder unsachgemäßer Lagerung zu erwarten.

10.2.4 Korrelationen in der Sensorik

Um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Attributen besser zu verstehen, wurden Korrelationsanalysen innerhalb der sensorischen Bewertungen durchgeführt. Zwischen 21 von 23 Attributen, die sowohl für die Mohnsamen als auch -öle bewertet wurden, konnten signifikante Korrelationen ($p < 0,001$) ermittelt werden, die Spearman Korrelationskoeffizienten von 0,3 und höher aufwiesen (Tab. 29). Nur zwischen fettig/öligem Flavor von Samen und Ölen konnte keine signifikante Korrelation festgestellt werden und beim erdigen Flavor war die Korrelation geringer als 0,3. Besonders hohe Korrelationen ($R > 0,5$) wurden bei den Geruchsattributen pilzartig, heuartig, süßlich und blumig und den Flavorattributen nussig, pilzartig, grün und heuartig festgestellt. Dies spricht dafür, dass diese, wenn sie auftraten, besonders stark wahrnehmbar waren und sich deshalb sowohl in Samen als auch in Ölen gut erkennen ließen. Beim insgesamt nur schwach intensiv wahrgenommenen Attribut blumig, lässt die hohe Korrelation vermuten, dass es relativ gleichmäßig in Samen und Ölen mit geringen Intensitäten bewertet wurde.

Insgesamt ließ sich ein starker Zusammenhang zwischen der sensorischen Wahrnehmung der Samen und der daraus hergestellten Öle feststellen.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Pressvorgang zur Herstellung der Öle die Probencharakteristik kaum verändert, da die Öle sehr ähnliche Attributsausprägungen aufwiesen wie die dazugehörigen Samen. Dies war auch ein Grund, warum die Zusammensetzung der flüchtigen Verbindungen aus dem Kopfraum der Mohnöle auch für die Erklärung des Samenaromas genutzt wurde, da sich ihre sensorische Beschreibung kaum unterschied.

Tab. 29 Spearman-Korrelationen zwischen Mohnsamen- und Mohnölattributen zu Geruch und Flavor (fett markiert sind Korrelationskoeffizienten über 0,5)

Attribut Mohnsamen	Attribut Mohnöle	Korrelations- koeffizient	p
Geruch			
mohntypisch	mohntypisch	0,474	0,000
nussig	nussig	0,457	0,000
erdig	erdig	0,341	0,000
muffig	muffig	0,441	0,000
pilzartig	pilzartig	0,681	0,000
fettig/ölig	fettig/ölig	0,439	0,000
grün	grün	0,416	0,000
heuartig	heuartig	0,551	0,000
ranzig	ranzig	0,495	0,000
süßlich	süßlich	0,532	0,000
blumig	blumig	0,514	0,000
Flavor			
mohntypisch	mohntypisch	0,476	0,000
süß	süß	0,464	0,000
nussig	nussig	0,518	0,000
erdig	erdig	0,293	0,000
muffig	muffig	0,316	0,000
pilzartig	pilzartig	0,665	0,000
fettig/ölig	fettig/ölig	0,114	0,138
bitter	bitter	0,368	0,000
ranzig	ranzig	0,306	0,000
grün	grün	0,552	0,000
heuartig	heuartig	0,672	0,000
adstringierend	adstringierend	0,493	0,000

Weitere starke Beziehungen konnten zwischen synonymen Geruchs- und Flavorattributen hergestellt werden.

Die hohen Korrelationen zwischen Geruchs- und Flavorattributen bedeuten, dass beispielsweise eine Probe, die einen nussigen Geruch aufwies, meist auch einen nussigen Flavor innehatte. Mit Ausnahme des fettig/öligem Attributs sowie süß/süßlich konnten signifikante Korrelationen ($p < 0,001$) zwischen Geruch und Flavor berechnet werden, mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,255 (muffig, Samen) und 0,769 (pilzartig, Öle) (Tab. 30). Bei den Samen waren insbesondere die Attribute mohntypisch, pilzartig und heuartig positiv zwischen Geruch und Flavor korreliert. Bei den Ölen waren es die Attribute mohntypisch, nussig, erdig, pilzartig, grün, heuartig und ranzig.

Somit war die Beziehung zwischen den Ölattributen in vielen Attributen noch stärker als in den Samen. Eine Erklärung könnte die insgesamt schwächere geruchliche Wahrnehmung der Samen sein (Abb. 22), weshalb die Attributsausprägungen im Öl intensiver waren.

Es ist weiterhin plausibel, dass die Flavorattribute sich in Beziehung zu den Geruchsattributen setzen lassen, da dieselben Aromaverbindungen an der nasalen sowie retronasalen Wahrnehmung ansetzen und somit sowohl für einen spezifischen Geruch als auch für den entsprechenden Flavor verantwortlich gemacht werden können¹⁷¹. Dies gilt allerdings nicht für den süßen Geschmack, da dieser zu den Grundgeschmacksarten zählt und die dafür verantwortlichen (zuckerartigen) Moleküle direkt mit den Zungenpapillen interagieren²²⁰. Einen süßlichen Geruchseindruck können wiederum unterschiedliche Verbindungen auslösen. Aufgrund dessen ist auch nachvollziehbar, weshalb zwischen süß und süßlich (im Samengeruch) nur eine schwache Korrelation festgestellt werden konnte.

Berechnet man allgemeine Korrelationen zwischen allen Attributen ergibt sich eine unübersichtlich große Anzahl an Beziehungen, von denen ausschnittsweise einige im Folgenden dargestellt werden. Beispielsweise fanden sich signifikante Korrelationen von mohntypisch und nussig ($R > 0,48$, $p < 0,001$) sowohl in den Samen als auch in den Ölen in Geruch und Flavor. Da beide Attribute zu einem positiv wahrgenommenen Mohnaroma beitragen¹, ist eine positive Korrelation untereinander wünschenswert. Nussig riechende Verbindungen werden oft gleichzeitig mit einem fettigen Geruchseindruck beschrieben und für die stark fettig riechenden Verbindungen Nonanal, *trans-trans*-2,4-Nonadienal und Decanal wird auch ein Geruch nach Mohnsamen angegeben¹⁶³. Aus diesem Grund sind hohe Korrelation zwischen mohntypisch, nussig und den fettig/öligem Attributen hoch wahrscheinlich. Für die Verbindung von fettig/öligem und nussigem Geruch wurde beispielsweise in den Ölen ein Korrelationskoeffizient von 0,304 ($p < 0,01$) und in den Samen von 0,457 ($p < 0,01$) berechnet, was diese Hypothese unterstützt. Die Verbindung von fettig/ölig zum Mohngeruch war dagegen schwächer ausgeprägt. Für das Mohnöl sind die Korrelationen zwischen den Attributen nussig, mohntypisch und fettig/ölig in Tab. 31 dargestellt.

Tab. 30 Spearman-Korrelationen zwischen Geruchs- und Flavorattributen der Mohnsamen und Mohnöle (fett markiert sind Korrelationskoeffizienten über 0,5)

Geruch	Flavor	Korrelationskoeffizient	p
Mohnsamen			
mohntypisch	mohntypisch	0,576	0,000
nussig	nussig	0,356	0,000
erdig	erdig	0,326	0,000
muffig	muffig	0,255	0,001
pilzartig	pilzartig	0,659	0,000
fettig/ölig	fettig/ölig	0,398	0,000
grün	grün	0,278	0,000
heuartig	heuartig	0,642	0,000
ranzig	ranzig	0,392	0,000
süßlich	süß	0,178	0,020
Mohnöle			
mohntypisch	mohntypisch	0,605	0,000
nussig	nussig	0,584	0,000
erdig	erdig	0,610	0,000
muffig	muffig	0,485	0,000
pilzartig	pilzartig	0,769	0,000
fettig/ölig	fettig/ölig	0,202	0,008
grün	grün	0,581	0,000
heuartig	heuartig	0,633	0,000
ranzig	ranzig	0,560	0,000
süßlich	süß	0,471	0,000

Tab. 31 Spearman-Korrelationen zwischen den Attributen mohntypisch, nussig und fettig/ölig am Beispiel der Mohnöle

Mohnöle		Geruch			Flavor		
		mohn-typisch	nussig	fettig/ölig	mohn-typisch	nussig	fettig/ölig
Geruch	mohn-typisch	1	0,545**	0,126	0,605**	0,482**	0,162*
	nussig	0,545**	1	0,304**	0,357**	0,584**	0,257**
	fettig/ölig	0,126	0,304**	1	0,228**	0,228**	0,202**
Flavor	mohn-typisch	0,605**	0,357**	0,228**	1	0,494**	0,321**
	nussig	0,482**	0,584**	0,228**	0,494**	1	0,404**
	fettig/ölig	0,162*	0,257**	0,202**	0,321**	0,404**	1

*Die berechneten Korrelationen sind signifikant auf einem Niveau von $p < 0,05$; ** Die berechneten Korrelationen sind signifikant auf einem Niveau von $p < 0,01$

Weiterhin ließ sich eine deutliche Verbindung zwischen den Attributen heuartig und pilzartig feststellen mit Korrelationskoeffizienten über 0,4 für mehrere der möglichen Attributskombinationen (Samen, Öl, Geruch, Flavor). Ebenfalls waren muffig und nussig stark mit pilzartig korreliert. Exemplarisch ist dies für die Mohnöle in Tab. 32 dargestellt. Als pilzartige Verbindung wird beispielsweise 1-Octen-3-ol in der Literatur genannt, was gleichzeitig ein kräuterartiges, erdiges Aroma verursacht^{159,164} und auch in höheren Mengen in den untersuchten Proben vorkam. Demzufolge ist die hohe Ähnlichkeit zu einem heuartigen Eindruck plausibel. Pilzartig und muffig stehen außerdem über die gemeinsame Assoziation zu Waldboden und Erde in Verbindung, die eine Abgrenzung gegeneinander erschwert. Es gibt weiterhin Verbindungen, die ein nussiges, aber auch erdiges Aroma entfalten wie beispielsweise 2,3,5-Trimethylpyrazin¹⁵⁹. Zwar wurde 2,3,5-Trimethylpyrazin nicht in den untersuchten Mohnproben identifiziert, das Beispiel zeigt aber die Möglichkeit einer natürlichen Verknüpfung von nussigen und erdigen Eindrücken, die wiederum nah mit einem pilzartigen Eindruck verwandt sind.

Tab. 32 Spearman-Korrelationen zwischen den Attributen pilzartig, heuartig, nussig und muffig am Beispiel der Mohnöle

Mohnöle		Geruch				Flavor			
		pilz- artig	heu- artig	nussig	muffig	pilz- artig	heu- artig	nussig	muffig
Geruch	pilzartig	1	0,332**	0,323**	0,423**	0,769**	0,321**	0,419**	0,211**
	heuartig	0,332*	1	-0,077	0,325**	0,452**	0,633**	0,092	0,106
	nussig	0,323**	-0,077	1	-0,124	0,252**	0,058	0,584**	-0,118
	muffig	0,423**	0,325**	-0,124	1	0,427**	0,249**	0,143	0,485**
Flavor	pilzartig	0,769**	0,452**	0,252**	0,427**	1	0,437**	0,428**	0,274**
	heuartig	0,321**	0,633**	0,058	0,249**	0,437**	1	0,277**	0,004
	nussig	0,419**	0,092	0,584**	0,143	0,428**	0,277**	1	-0,027
	muffig	0,211**	0,106	-0,118	0,485**	0,274**	0,004	-0,027	1

*Die berechneten Korrelationen sind signifikant auf einem Niveau von $p < 0,05$; ** Die berechneten Korrelationen sind signifikant auf einem Niveau von $p < 0,01$

»» Insgesamt zeigen die hohen Korrelationen zwischen Samen- und Ölattributen, dass sich die olfaktorischen und gustatorischen Eigenschaften der Öle aus der Rohware ableiten lassen und somit die Samenqualität auch Aufschluss über die Ölqualität geben kann. Die starke Ähnlichkeit in der Bewertung von Geruchs- und Flavorattributen legt nahe, dass für den Gesamteindruck einer Probe dieselben Aromastoffe verantwortlich sind.

10.3 Verbindung von analytischen und sensorischen Daten

Mit Hilfe von Korrelationsberechnungen wurden in einem weiteren Schritt die analytischen Daten mit den sensorischen Erhebungen verknüpft. Ein Ausschnitt der wichtigsten Pearson-Korrelationen ist in Tab. 33 dargestellt.

Insbesondere für den grünen und heuartigen Geruch sowie den entsprechenden Flavor wurden starke Korrelationen zu einzelnen flüchtigen Verbindungen nachgewiesen. Dies betraf sowohl Samen als auch Öle, deren grünes und heuartiges Aroma mit den drei detektierten Methoxypyrazinen (22,26 und 27) in Verbindung gebracht werden konnte (Tab. 33). Den genannten Verbindungen wird ein starkes grünes und erdiges Aroma zugeschrieben²³¹, weshalb es wahrscheinlich ist, dass auch ein kausaler Zusammenhang zwischen dem Vorkommen der Methoxypyrazine und einem grünen sensorischen Eindruck vorhanden war. Dies traf besonders für die Sorten `Viola` und `Mieszko` zu, da nur bei Proben dieser Sommermohnsorten die Methoxypyrazine auftraten und die Sorten sich gleichzeitig durch ihr starkes grünes Aroma von den Wintermohnproben unterschieden. 2-Isobutyl-3-Methoxypyrazin war ebenfalls mit einem erdigen Geruch der Mohnöle sowie einem erdigen Flavor von Samen und Ölen positiv korreliert, was dazu passt, dass ihm auch ein erdiges Aroma attestiert wird²³¹.

Da die Methoxypyrazin-Verbindungen Nr. 22, 26 und 27 mit insgesamt 10 der in Tab. 33 aufgeführten Mohnattribute korrelierten, wird ihnen eine bedeutende Rolle in der Formierung des grünen und erdigen Mohnaromas unterstellt.

Eine weitere wichtige Verbindung im Zusammenhang mit grünen und heuartigen Eindrücken stellte α -Caryophyllen dar. Dieser Stoff war besonders hoch mit grünen und heuartigen Attributen des Samenflavors und des Ölgeruchs korreliert. Zuvor wurde ihm keine Bedeutung bei der Zusammensetzung des Mohnaromas zuteil, aber α -Caryophyllen wurde in dieser Studie bei den Proben V1, V2, V3, M1, M2, B1 und Z5 detektiert. Somit war es am häufigsten in Proben der Sorte `Viola` und `Mieszko` zu finden. Normalerweise taucht α -Caryophyllen in Nelken oder Basilikum auf²³⁸, weshalb auch eine „grüne“ Assoziation denkbar ist.

Somit trägt höchstwahrscheinlich auch α -Caryophyllen maßgeblich zum grünen Aroma, insbesondere der Sommermohnsorten, bei.

Außerdem wurde eine große Zahl an Fettsäureabbauprodukten im Mohn in entsprechenden Mengen, auch über den Geruchsschwellen, identifiziert. Diese tragen vermutlich mit am meisten zum Mohnaroma bei.

Unter anderem waren Hexanal, 1-Octen-3-ol, Octanal, 2-Octenal, 2-Nonen-1-ol, Heptansäure, Octansäure und Decanal positiv mit einem ranzigen Geruch der Samen korreliert und in ähnlicher Weise auch zu einem ranzigen Öl-Flavor.

Die höchsten ranzigen Bewertungen bekamen die Wintermohnproben, aber auch der Öl-Flavor und Samengeruch von V2 und M3. Alle diese Proben waren durch hohe Gehalte an Fettsäure-Oxidationsprodukten gekennzeichnet. Tocopherole und Tocotrienole verlangsamten aufgrund ihrer antioxidativen Eigenschaften den Fettsäureabbau, weshalb ihr Gehalt häufig negativ mit der Zunahme an oxidativen Prozessen korreliert¹⁶⁶. Die Sommermohnöle wiesen höhere Gehalte an γ -Tocopherol auf, dies war im Fall der Sorte `Viola´ sogar signifikant. Zwar konnten keine signifikanten Unterschiede im Gehalt der einzelnen Abbauprodukte zwischen den Sorten berechnet werden. Trotzdem könnte der höhere γ -Tocopherolgehalt in den `Viola´ Proben auch eine langsamere Autoxidation und damit eine geringere ranzige Wahrnehmung bedingen.

2-Octenal und Decanal waren zusätzlich hoch mit dem nussigen Ölgeruch korreliert, was mit den Literaturangaben zusammenpasst, die beispielsweise 2-Octenal als fettig aber auch nussig, bzw. walnussähnlich charakterisieren^{163,230}.

Tab. 33 Signifikante Korrelationen zwischen wichtigen sensorischen Attributen und einzelnen flüchtigen Verbindungen in den Mohnsamen und -ölen. Angegeben sind die minimalen (R min) und maximalen (R max) Korrelationskoeffizienten über 0,5 ($p < 0,05$) zwischen den Attributen und den jeweiligen flüchtigen Aromastoffen

Attribut ^a	Flüchtige Verbindung (Nr.)	R min	R max
OG grün	40	0,648	0,648
OF grün	27, 40	0,633	0,729
SG grün	3, 22	0,645	0,749
SF grün	3, 22, 27, 40	0,565	0,672
OG heuartig	22, 27, 40	0,578	0,775
OF heuartig	26, 27	0,729	0,804
SG heuartig	26, 27	0,563	0,619
SF heuartig	22, 40	0,559	0,651
OG erdig	22, 26, 27, 40	0,611	0,857
OF erdig	25, 27	0,590	0,639
SF erdig	27	0,607	0,607
OF ranzig	12, 17, 19, 23, 24, 30, 34	0,590	0,824
SG ranzig	2, 11, 13, 17, 23, 24, 30, 31	0,612	0,790
OG nussig	17, 31	0,583	0,632

^a OG: Öl Geruch, OF: Öl Flavor, SG: Samen Geruch, SF: Samen Flavor.

»» Aus den Beziehungen zwischen flüchtigen Verbindungen und sensorischen Attributen wird deutlich, dass die Fettoxydationsprodukte für einen fettig/öligem, ranzigen aber auch nussigen Eindruck verantwortlich waren. Die Methoxypyrazine und einige Mono- und Sesquiterpene fügten den Proben ein grünes, manchmal heuartiges Aroma hinzu. Der mohntypische Geruch und Flavor konnte dabei nicht einer einzelnen flüchtigen Verbindung zugeschrieben werden. Höchstwahrscheinlich ergibt sich dieser Eindruck durch ein Zusammenspiel vieler im Mohn identifizierbarer Moleküle, die sich zum Mohnaroma zusammensetzen. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass einzelne Aromakomponenten von anderen, stärkeren Verbindungen überlagert werden, was es zusätzlich erschwert, den Beitrag einzelner Stoffe zum Gesamteindruck der Probe zu identifizieren.

Weiterführend könnte die Nutzung einer gaschromatografisch-olfaktorischen Probenanalyse den Geruchsbeitrag der einzelnen Moleküle weiter differenzieren. Mit Hilfe der GC-Olfaktometrie könnten die von der GC aufgetrennten Stoffe einzeln bestimmt und geruchssensorisch bewertet werden²³⁹. In Kombination mit den humansensorischen Paneldaten zur Gesamtprobe ließe sich dann ein noch detaillierteres Bild der einzelnen Aromakomponenten zeichnen. Aus den einzelnen Aromakomponenten wären anschließend Rekombinationsversuche denkbar, in denen das Mohnaroma aus Einzelverbindungen nach und nach wieder zusammengesetzt wird. So kann erkannt werden, welche Stoffe hauptverantwortlich für das typische Mohnaroma sind.

10.4 Schlussfolgerung zur Qualitätsanalyse

Anhand der Analysen von Ölgehalt, Fettsäurezusammensetzung, Tocopherolen, flüchtigen Verbindungen und der visuellen, olfaktorischen und gustatorischen Bewertung der Sensorik konnte ein umfassendes Profil der untersuchten Sorten `Viola`, `Mieszko` und `Zeno Morphex` erstellt und für die Sorte `Borowski` erste Hinweise gesammelt werden.

Die anfangs aufgestellten Hypothesen lassen sich daher wie folgt beantworten:

1. Es lassen sich Unterschiede in der inhaltsstofflichen Zusammensetzung der Mohnsamen und -öle feststellen, die sich aufgrund der Sorte oder des Anbaustandorts ergeben.
- » Der Ölgehalt der Wintermohnproben war um etwa 4,4% höher als der Ölgehalt der Sommermohnsorten. Die Fettsäurezusammensetzung zeigte ein einheitliches Profil mit über 70% Linolsäure wohingegen signifikant höhere γ -Tocopherolgehalte bei `Viola` im Vergleich zu den übrigen Sorten gemessen wurden und nur bei `Zeno Morphex` δ -Tocopherol detektiert wurde. Das Spektrum der volatilen Verbindungen umfasste hauptsächlich Abbauprodukte aus der Lipidoxidation sowie eine Häufung grün riechender Verbindungen in Proben der Sorten `Viola` und `Mieszko`. Der Standort hatte keinen messbaren Einfluss auf die analysierten Parameter.

Somit ließen sich Winter- und Sommermohn insbesondere anhand des Ölgehalts und dem Profil der flüchtigen Verbindungen unterscheiden, wohingegen durch die Tocopherole Sortenunterschiede sichtbar wurden. Die Fettsäuren zeigten sich dagegen unbeeinflusst von Sorte, Anbauform und Anbaustandort. Dass der Standort so eine geringe Rolle in der Ausprägung der Inhaltsstoffe spielte, begünstigt die Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse auf andere Anbaustandorte. Infolgedessen lassen sich mit den hier ermittelten Ergebnissen allgemeine Aussagen zur Qualität der Mohnrohware aus den untersuchten Sorten ableiten. Dies kann auch ein Vorteil bezüglich der Vermarktbarkeit sein, da die Sortenprofile relativ standortstabil scheinen und damit Schwankungen in der Qualität aufgrund unterschiedlicher Rohwareherkünfte gering sind. Es lässt sich für die Wintermohne ein höheres Ölertragspotenzial ableiten, wohingegen die Fettsäurezusammensetzung unabhängig von der Sortenwahl ist. Ernährungsphysiologisch verbessern hohe Tocopherolgehalte die antioxidativen Eigenschaften der Rohware, insbesondere bei der Sorte `Viola`, und die vielseitige Zusammensetzung der aromagebenden, flüchtigen Verbindungen unterstreicht die Qualität aller untersuchten Proben. Der hohe Anteil ungesättigter Fettsäuren ist ebenfalls ein positives Qualitätsmerkmal. Nichtsdestotrotz muss das ungünstige ω -6/ ω -3 Fettsäure-Verhältnis beachtet werden, das durch den hohen Linolsäureanteil im Vergleich zu geringen Linolensäurekonzentrationen entsteht, und nicht durch Sorten- oder Standortfaktoren zu beeinflussen ist.

2. Es lassen sich Unterschiede in der sensorischen Beschreibung der Mohnsamen und -öle feststellen, die sich aufgrund der Sorte oder des Anbaustandorts ergeben.
 - »» Die Auswertung von Geruch und Flavor von Mohnsamen und Ölen ergab eine hohe Ausprägung der Attribute mohntypisch, nussig, fettig/ölig sowie ranzig und süß bei Proben der Wintermohnsorte `Zeno Morphex´. Im Gegensatz dazu wurden die Sommermohnsorten hauptsächlich als grün und heuartig charakterisiert. Eine visuelle Unterscheidung der Öle war nicht möglich, auch die Textur wurde ähnlich bewertet. Die Samen der Blaumohnsorten wiesen ebenfalls ein nicht unterscheidbares, gemischtes Farbspektrum an Grautönen auf, wohingegen `Borowski´ als uniform beige und deutlich weniger knackig charakterisiert wurde. Der Standort hatte kaum einen Einfluss auf die sensorische Bewertung von Mohnsamen und -ölen.

Während die Proben sich in Farbe und Textur stark ähnelten, traten größere Unterschiede in der olfaktorischen und gustatorischen Merkmalsausprägung auf. Dabei hing die Bewertung der Samen eng mit denen der Öle zusammen und es ließen sich ebenfalls hohe Korrelationen zwischen Geruch und Flavor einzelner Attribute berechnen. Dies bedeutet, dass sich das Profil der Öle nicht stark von den zugrundeliegenden Samen unterscheidet und eine Aussage über die Sensorik der Öle auch anhand der Samen getroffen werden kann, was für die Verarbeitung wichtig ist. Ebenso fiel keine der Proben durch starke Off-Flavor wie bitter, adstringierend oder muffig auf, weshalb sie sich aus sensorischer Sicht gut für eine Vermarktung als Rohware oder Mohnöl eignen. Die stark grüne Note der Sommermohnsorten könnte jedoch einen Nachteil in der Akzeptanz der Verbraucher bedeuten, weshalb `Zeno Morphex´ und `Borowski´ als etwas höherwertiger in Bezug auf die Vermarktung angesehen werden. `Borowski´ ähnelte in ihrer sensorischen Beurteilung stark den Wintermohnproben, weshalb sie nur visuell unterscheidbar ist und grundsätzlich ebenfalls konsumgeeignet erscheint.

3. Es gibt einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Aromastoffen und der sensorischen Wahrnehmung der Proben
 - »» Korrelationsanalysen konnten hohe Zusammenhänge zwischen Lipidoxidationsprodukten wie Hexanal, 2-Octenal oder Heptansäure zu einem ranzigen Aroma herstellen, deren Konzentrationen über den jeweiligen Geruchsschwellen lagen und daher höchstwahrscheinlich das Mohnaroma beeinflussten. Zusätzlich wurden auch Verbindungen von Methoxy-pyrazinen zu einem grünen Geruch und Flavor gefunden, die ebenfalls oberhalb der Geruchsschwellen lagen. Da diese nur im Sommermohn vorkamen, wird ihnen ein hoher Beitrag zur grünen sensorischen Note dieser Sorten unterstellt.

Durch die Verbindung von analytischen und sensorischen Daten wurden insbesondere die dominanten Aromen fettig/ölig und grün den sie verursachenden Stoffen zugeordnet.

Die Vielzahl an sensorischen Eindrücken und flüchtigen Verbindungen lässt eine noch viel stärkere Verbindung einzelner Stoffe zu Teilen des Mohnaromas vermuten. Da jedoch stets die gesamte Mischung an Aromastoffen zeitgleich auftritt, werden vermutlich einige schwächere Aromen von den markanten Merkmalen maskiert, sodass eine Zuordnung zu einzelnen sensorischen Attributen erschwert wird. Um dies genauer aufzuschließen wäre die Nutzung einer GC-Olfaktometrie hilfreich, bei der die einzelnen Stoffe nach Detektion individuell gerochen und bewertet werden. Im nächsten Schritt wären auch Rekombinationsversuche mit den ermittelten Substanzen denkbar, um das Mohnaroma zu rekonstruieren und die wichtigsten Bausteine zu identifizieren.

Für die untersuchten Sorten zeigen die inhaltsstofflichen und sensorischen Daten durch die hohen Tocopherolgehalte, das vielseitige Aromaprofil und die überwiegend positiven sensorischen Bewertungen, dass sie durch hohe Qualitätseigenschaften überzeugen und somit eine regionale Alternative zur Importware sein können. Dies macht den aufwändigeren, heimischen Anbau interessant und kann aufgrund der transparenten Wertschöpfungskette auch ein Kaufargument für lokale Verarbeiter darstellen. Einzig die inhomogene Färbung der Mohnsamen, die eine Vielzahl von Grautönen aufwies, könnte die Vermarktbarkeit beeinträchtigen. Da keine Standorteffekte auf die inhaltsstoffliche sowie sensorische Qualität nachgewiesen werden konnte, scheint die Beeinflussung durch Umwelteffekte eher gering zu sein, womit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf andere Anbauregionen und Anbausysteme gegeben ist. Demzufolge wäre auch eher von keiner negativen Beeinflussung der Rohwarenqualität durch Mischanbau auszugehen. Dadurch, dass nur eine Wintermohnsorte für den Anbau zugelassen und in dieser Studie untersucht worden ist, lässt sich nicht genau definieren, ob die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintermohn auf genetische Faktoren oder das Anbauverfahren zurückzuführen sind. Daher wären Untersuchungen mit einem größeren Sorten- und Probenpektrum zur Verifizierung der Sortenunterschiede interessant.

Grundsätzlich belegen die steigenden Anbauflächen (2017: 165 ha, 2018: 475 ha, 2019: 570 ha¹⁰), dass der Mohnanbau in Deutschland starkes Interesse erfährt. Vom allgemeinen Trend zu mehr ökologischen und regionalen Produkten und der Forderung nach mehr Biodiversität in der Landwirtschaft scheint demnach auch der Mohn zu profitieren. Dementsprechend zeigt auch die Wahl zur Giftpflanze des Jahres 2021 durch den Botanischen Sondergarten Wandsbek (Hamburg), dass der Mohn in der Bevölkerung stärker wahrgenommen wird und Informationen zu Nutzungsmöglichkeiten dieser Kultur auf Interesse stoßen²⁴⁰. Infolgedessen ist es umso wichtiger eine wissenschaftliche Datenbasis zu den Qualitätseigenschaften der regionalen Sorten zur Verfügung zu stellen, um die Anbauwürdigkeit und Vermarktbarkeit der in Deutschland produzierten Rohware objektiv bewerten zu können.

11.0 Gesamtfazit

Die Feldversuche zum Mischanbau mit der Hauptfrucht Mohn zeigen vielversprechende Ansätze, diesen in Mischkultur anzubauen und so die Anbaurisiken auf mehrere Kulturen zu verteilen. In Kombination mit niedrig wachsenden Leguminosen können Vorteile wie Bodenbedeckung, N-Fixierung und in begrenztem Umfang Unkrautregulierung in Anspruch genommen werden, wohingegen die Kombination mit Sommergerste größere Konkurrenz bedeutet aber auch zu erhöhter Flächenproduktivität und verbesserter Unkrautregulierung führt. Um möglichst viele dieser Vorteile zu kombinieren, wäre auch der Mischanbau mit anderen Druschleguminosen wie Linsen, Lupinen, Ackerbohnen oder Soja denkbar. Die Integration von Leguminosen in den Mischanbau könnte auch vor dem Hintergrund von Agrarfördermaßnahmen und der Sicherung nachhaltiger Anbauziele (Biodiversität, Bodenschutz, Nährstoffeffizienz) zusätzlich attraktiv werden. Als alternatives Getreide käme Hafer aufgrund seines hohen Proteingehalts in Frage, da der Mohn im Gegensatz zur Braugerste ebenfalls einen eher hohen Stickstoffbedarf hat. Grundsätzlich zeigen die hier vorgestellten Experimente ein hohes Potenzial für die Nutzung des Mohns in Mischkultur auch unter veränderten Boden- und Klimabedingungen, da über die Wahl der Gemengepartner, deren Saatzeitpunkte und Saatstärken eine Anpassung der Konkurrenzsituation an die jeweiligen Wachstumsbedingungen erfolgen kann. Offen bleibt dabei, inwieweit sich der Mischanbau auch für den Wintermohn, der eine noch deutlich langsamere Jugendentwicklung zeigt als der Sommermohn, eignet.

Dass sich die Auseinandersetzung mit alternativen Anbauverfahren für den Mohn lohnt, zeigen die Ergebnisse der inhaltstofflichen und sensorischen Qualitätsanalytik der in Deutschland anbaufähigen Sorten `Viola´, `Mieszko´ und `Zeno Morphex´. Der hohe Anteil ungesättigter Fettsäuren und Tocopherole und das vielseitige, überwiegend positive Aroma machen die Vermarktung sowohl von Mohnsamen als auch von daraus gewonnenem Mohnöl attraktiv. Bäckereien, Ölmühlen und Verarbeiter können sich dabei neben der inhaltsstofflichen und sensorischen Qualität auch auf die Morphinfreiheit und transparente Wertschöpfungsketten berufen und so vermutlich auch höhere Preise gegenüber importierter Ware gegenüber dem Verbraucher rechtfertigen. Noch detailliertere Erkenntnisse über den Beitrag einzelner Stoffe auf die Zusammensetzung des Mohnaromas könnten über GC-Olfaktrometrie und Aroma-Rekombinationsversuche ermöglicht werden und zusätzlich die Verbraucherakzeptanz über hedonische Sensorik-Prüfverfahren ermittelt werden. Da sich der Wintermohn sensorisch positiv von den Sommermohnsorten abhob, wäre es wünschenswert, dass neben `Zeno Morphex´ in Zukunft weitere, morphinarme Wintermohnsorten eine Anbauzulassung erhielten, um das hohe ökologische und ökonomische Potenzial des Mohnanbaus weiter ausbauen zu können.

12.0 Finanzierung

Diese Arbeit wurde unterstützt durch das Projekt „Speisemohn im Ökologischen Landbau: Entwicklung regionaler Anbau- und Vermarktungskonzepte“, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Förderkennzeichen 33936/01.

13.0 Referenzen

- (1) Krist, S.; Buchbauer, G.; Klausberger, C. Mohnöl. In Lexikon der pflanzlichen Fette und Öle; Krist, S.; Buchbauer, G.; Klausberger, C., Hrsg.; 2008, Springer: Wien, S. 282–288.
- (2) Dobos, G.; Lohwasser, U.; Schliephake, E., Schmatz, R. Mohn (*Papaver somniferum* L.). In Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenanbaus; Bernd Hoppe, Hrsg.; 2013, Eigenverlag: Bernburg, S. 174–191.
- (3) General, J.; Kniel, B. Untersuchungen zur Reduzierung von Morphin in Mohnsamen und Mohngebäck mit praktikablen technologischen Maßnahmen. BMI aktuell: Neues aus dem Backmittelinstitut, 2006, 3, S. 6–8.
- (4) Waldviertler Mohnhof. Waldviertler Graumohn. Internetdokument, 2021. <https://www.mohnhof.at/page.asp/-/12.htm>, überprüft am: 19.01.21.
- (5) López, P.; Pereboom-de Fauw, D. P. K. H.; Mulder, P. P. J.; Spanjer, M.; Stoppelaar, J. d.; Mol, H. G. J.; Nijs, M. d. Straightforward analytical method to determine opium alkaloids in poppy seeds and bakery products. Food Chemistry, 2018, 242, S. 443–450.
- (6) EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Knutsen, H.K.; Alexander, J.; Barregård, L.; Bignami, M.; Brüschweiler, B.; Ceccatelli, S.; Cottrill, B.; Dinovi, M.; Edler, L.; Grasl-Kraupp, B.; Hogstrand, C.; Hoogenboom, L.; Nebbia, C. S.; Oswald, I. P.; Petersen, A.; Rose, M.; Roudot, A.-C.; Schwerdtle, T.; Vollmer, G.; Wallace, H.; Benford, D.; Calò, G.; Dahan, A.; Dusemund, B.; Mulder, P.; Németh-Zámboriné, É.; Arcella, D.; Baert, K.; Cascio, C.; Levorato, S.; Schutte, M.; Vleminckx, C. Update of the Scientific Opinion on opium alkaloids in poppy seeds. EFSA Journal, 2018, 16.
- (7) Heeger, E. F.; Poethke, W. *Papaver somniferum* L., der Mohn: Anbau, Chemie, Verwendung. Verlag Dr. Werner Saenger: Berlin, 1947.
- (8) Schuster, W.; Marquard, R. A. Ölpflanzen in Europa. DLG-Verlag: Frankfurt am Main, 1992.
- (9) Bernáth, J. Poppy. The Genus *Papaver*. Harwood Academic Publ: Amsterdam, 1998.
- (10) Bundesopiumstelle. Anbaufläche Mohn in Deutschland 2019. Mündliche Auskunft, 2021, Bonn.
- (11) Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT crop data poppy seed. Internetdokument, 2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, aktualisiert am: 18.02.2020, überprüft am: 17.05.2020.
- (12) Baser, K. H. C.; Arslan, N. Opium Poppy (*Papaver somniferum*). In Medicinal and Aromatic Plants of the Middle-East; Yaniv, Z.; Dudai, N., Hrsg.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2014, S. 305–332.
- (13) Frick, C.; Hebeisen, T. Mohn als alternative Ölpflanze. Agrarforschung Schweiz. 2005, 12, S. 4–9.
- (14) Merry, A. M.; Corkrey, R.; Westmore, G.; Dean, G. Increasing seed yield in *Papaver somniferum* L. with the use of honey bees (*Apis mellifera* L.). In Proceedings of the 18th Australian Society of Agronomy Conference, Ballarat, Australia, 2017.
- (15) Bajpai, S.; Prajapati, S.; Luthra, R.; Sharma, S.; Naqvi, A.; Kumar, S. Variation in the seed and oil yields and oil quality in the Indian germplasm of opium poppy *Papaver somniferum*. Genetic Resources and Crop Evolution, 1999, 46, S. 435–439.

- (16) Hiltbrunner, J.; Herzog, C.; Luginbühl, C.; Hebeisen, T. Sorten- und Anbauversuche mit winterhartem Mohn. *Agrarforschung Schweiz*, 2014, 5, S. 280–285.
- (17) Edelbauer, A.; Stangl, J. Nährstoffentzug durch den Waldviertler Graumohn (*Papaver somniferum* L.) im Verlauf der Vegetationszeit. *Die Bodenkultur*, 1993, 44, S. 15–27.
- (18) Dachler, M. Varieties and Nitrogen Requirements of Some Medicinal and Spice Plants Grown for Seed (*Papaver somniferum* L.; *Linum usitatissimum* L., *Carum carvi* L. and *Sinapis alba* L.). *Acta Horticulturae*, 1992, 306, S. 88–99.
- (19) Lošák, T.; Richter, R. Split nitrogen doses and their efficiency in poppy (*Papaver somniferum* L.) nutrition. *Plant, Soil and Environment*, 2004, 50, S. 484–488.
- (20) Chizzola, R.; Dobos, G. Ertrag und Nährstoffentzug von Winter- und Sommermohnsorten (*Papaver somniferum* L.). *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 2007, 12, S. 30–36.
- (21) Lošák, T.; Páleníček, L. Using nitrogen and sulphur for the poppy (*Papaver somniferum* L.) nutrition. *Oilseed Crops*, 2005, XXVI, S. 261–267.
- (22) Lošák, T.; Richter, R.; Škarpa, P. Foliar application of elementary sulphur in the nutrition of poppy (*Papaver somniferum* L.). *Oilseed Crops*, 2006, XXVII, S. 71–76.
- (23) Laughlin, J. C. The Boron Nutrition of Poppies (*Papaver somniferum* L.) on Krasnozem and Alluvial Soils of Tasmania. *Herba Hungarica*, 1979, 18, S. 227–234.
- (24) Liebmann, M.; Dyck, E. Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management. *Ecological Applications*, 1993, 3, S. 92–122.
- (25) Sproll, C.; Perz, R. C.; Buschmann, R.; Lachenmeier, D. W. Guidelines for reduction of morphine in poppy seed intended for food purposes. *European Food Research and Technology*, 2007, 226, S. 307–310.
- (26) Emir, D. D.; Güneşer, O.; Yılmaz, E. Cold pressed poppy seed oils: sensory properties, aromatic profiles and consumer preferences. *Grasas y Aceites*, 2014, 65.
- (27) Schijfsma, L.; Hoesbergen, M.; Nijdam, F. E. A study of the colour and other characters of the seed of some varieties of oil seed poppy. *Euphytica*, 1960, 9, S. 127–140.
- (28) Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR). Gehalte an pharmakologisch aktiven Opiumalkaloiden in Mohnsamen sollten auf das technologisch erreichbare Mindestmaß gesenkt werden. Mitteilung Nr. 018/2018, 2018.
- (29) Shetge, S. A.; Dzakovich, M. P.; Cooperstone, J. L.; Kleinmeier, D.; Redan, B. W. Concentrations of the Opium Alkaloids Morphine, Codeine, and Thebaine in Poppy Seeds are Reduced after Thermal and Washing Treatments but are Not Affected when Incorporated in a Model Baked Product. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68, S. 5241–5248.
- (30) Lithourgidis, A. S.; Dordas, C. A.; Damalas, C. A.; Vlachostergios, D. N. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5, S. 396–410.
- (31) Brooker, R. W.; Bennett, A. E.; Cong, W.-F.; Daniell, T. J.; George, T. S.; Hallett, P. D.; Hawes, C.; Iannetta, P. P. M.; Jones, H. G.; Karley, A. J.; Li, L.; McKenzie, B. M.; Pakeman, R. J.; Paterson, E.; Schöb, C.; Shen, J.; Squire, G.; Watson, C. A.; Zhang, C.; Zhang, F.; Zhang, J.; White, P. J. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 2015, 206, S. 107–117.
- (32) Zhang, F.; Shen, J.; Zhang, J.; Zuo, Y.; Li, L.; Chen, X. Chapter One - Rhizosphere Processes and Management for Improving Nutrient Use Efficiency and Crop Productivity: Implications for China. In *Advances in Agronomy*; Sparks, D. L., Hrsg.; Academic Press, 2010, S. 1–32.

- (33) Szumigalski, A.; van Acker, R. Weed suppression and crop production in annual intercrops. *Weed Science*, 2005, 53, S. 813–825.
- (34) Lammerts van Bueren, E. T.; Struik, P. C.; Jacobsen, E. Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 2002, 50, S. 1–26.
- (35) Willey, R. W. *Resource Use In Intercropping Systems*. Agricultural Water Management, 1990, 17, S. 215–231.
- (36) Vandermeer, J. H. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University Press, New York, 2012.
- (37) Szumigalski, A. R.; van Acker, R. C. Nitrogen Yield and Land Use Efficiency in Annual Sole Crops and Intercrops. *Agronomy Journal*, 2006, 98, S. 1030–1040.
- (38) Bybee-Finley, K. A.; Ryan, M. R. Advancing Intercropping Research and Practices in Industrialized Agricultural Landscapes. *Agriculture*, 2018, 8, S. 1–24.
- (39) Yu, Y.; Stomph, T.-J.; Makowski, D.; van der Werf, W. Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2015, 184, S. 133–144.
- (40) Paulsen, H. M.; Schochow, M.; Ulber, B.; Kühne, S.; Rahmann, G. Mixed cropping systems for biological control of weeds and pests in organic oilseed crops. *Aspects of Applied Biology*, 2006, 79, S. 215–219.
- (41) Lanini, W. T.; Orloff, S. B.; Vargas, R. N.; Orr, J. P.; Marble, V. L.; Grattan, S. R. Oat Companion Crop Seeding Rate Effect on Alfalfa Establishment, Yield, and Weed Control. *Agronomy Journal*, 1991, 83, S. 330–333.
- (42) Hauggaard-Nielsen, H.; Ambus, P.; Jensen, E. S. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research*, 2001, 70, S. 101–109.
- (43) Kraska, P.; Andruszczak, S.; Kwiecińska-Poppe, E.; Staniak, M.; Różyło, K.; Rusecki, H. Supporting Crop and Different Row Spacing as Factors Influencing Weed Infestation in Lentil Crop and Seed Yield under Organic Farming Conditions. *Agronomy*, 2020, 10, S. 1–13.
- (44) Mohler, C. L.; Liebmann, M. Weed Productivity and Composition in Sole Crops and Intercrops of Barley and Field Pea. *Journal of Applied Ecology*, 1987, 24, S. 685–699.
- (45) Carrubba, A.; La Torre, R.; Saiano, F.; Aiello, P. Sustainable production of fennel and dill by intercropping. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28, S. 247–256.
- (46) Rao, M. R.; Palada, M. C.; Becker, B. N. Medicinal and aromatic plants in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 2004, 61, S. 107–122.
- (47) Singh, D.; Kothari, S. K. Intercropping Effects on Mustard Aphid (*Lipaphis erysimi* Kalténback) Populations. *Crop Science*, 1997, 37, S. 1263–1264.
- (48) Rao, M. R.; Willey, R. W. Evaluation of Yield Stability in Intercropping: Studies on Sorghum/Pigeonpea. *Experimental Agriculture*, 1980, 16, S. 105–116.
- (49) Ciric, M.; Nagl, N.; Taski-Ajdukovic, K.; Brdar-Jokanovic, M.; Zupunski, V.; Curcic, Z. Intercropping sugar beet and poppy seed: opportunities and challenges. In 75th IIRB Congress; International Institute of Sugar Beet Research, Hrsg., Göttingen, 2015.
- (50) Wölfer, T. *Schlipf's Handbuch der Landwirtschaft*, 24. Ed.; Verlag für Landwirtschaft, Gartenbau und Forstwesen: Berlin, 1922.
- (51) den Hollander, N. G.; Bastiaans, L.; Kropff, M. J. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26, S. 104–112.

- (52) Meier, U. BBCH Monografie. Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. Julius Kühn-Institut (JKI): Quedlinburg, 2018.
- (53) Süß, A.; Danner, M.; Obster, C.; Locherer, M.; Hank, T.; Richter, K. Measuring Leaf Chlorophyll Content with the Konica Minolta SPAD-502Plus - Theory, Measurement, Problems, Interpretation. (EnMAP Field Guides Technical Report). Potsdam, 2015.
- (54) Mead, R.; Willey, R. W. The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, 1980, 16, S. 217–228.
- (55) Willey, R. W.; Rao, M. R. A Competitive Ratio for Quantifying Competition Between Intercrops. *Experimental Agriculture*, 1980, 16, S. 117–125.
- (56) Andersen, M. K.; Hauggaard-Nielsen, H.; Ambus, P.; Jensen, E. S. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant and Soil*, 2004, 266, S. 273–287.
- (57) Váňová, M.; Palík, S.; Hajšlová, J.; Burešová, I. Grain quality and yield of spring barley in field trials under variable growing conditions. *Plant, Soil and Environment*, 2006, 52, S. 211–219.
- (58) Lütke Entrup, N.; Schäfer, B. C., Hrsg.; Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2: Kulturpflanzen, 3. Ed.; AgroConcept: Bonn, 2011.
- (59) Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL). Bodentypen - Nutzung, Gefährdung, Schutz. Bonn, 2019.
- (60) Dercas, N.; Liakatas, A. Water and Radiation Effect on Sweet Sorghum Productivity. *Water Resources Management*, 2007, 21, S. 1585–1600.
- (61) Arkley, R. J. Relationships Between Plant Growth and Transpiration. *Hillgardia*, 1963, 34, S. 559–584.
- (62) Kaspar, T. C.; Bland, W. L. Soil temperature and root growth. *Soil Science*, 1992, 154, S. 290–299.
- (63) Fukai, S.; Trenbath, B. R. Processes determining intercrop productivity and yields of component crops. *Field Crops Research*, 1993, 34, S. 247–271.
- (64) Stoop, W. A. Agronomic management of cereal/cowpea cropping systems for major toposequence land types in the west african savanna. *Field Crops Research*, 1986, 14, S. 301–319.
- (65) Povilaitis, V.; Lazauskas, S.; Antanaitis, Š.; Feizienė, D.; Feiza, V.; Tilvikienė, V. Relationship between spring barley productivity and growing management in Lithuania's lowland. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 2018, 68, S. 86–95.
- (66) Hecht, V. L.; Temperton, V. M.; Nagel, K. A.; Rascher, U.; Postma, J. A. Sowing Density: A Neglected Factor Fundamentally Affecting Root Distribution and Biomass Allocation of Field Grown Spring Barley (*Hordeum Vulgare* L.). *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7, S. 1–14.
- (67) Gerhards, R. Weed Suppression Ability and Yield Impact of Living Mulch in Cereal Crops. *Agriculture*, 2018, 8, S. 1–7.
- (68) Bundessortenamt. Beschreibende Sortenliste. Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Hannover, 2020.
- (69) Yadav, R. L.; Mohan, R.; Singh, R.; Verma, R. K. The effect of application of nitrogen fertilizer on the growth of opium poppy in north central India. *The Journal of Agricultural Science*, 1984, 102, S. 361–366.

- (70) Isidro-Sánchez, J.; Perry, B.; Singh, A. K.; Wang, H.; DePauw, R. M.; Pozniak, C. J.; Beres, B. L.; Johnson, E. N.; Cuthbert, R. D. Effects of Seeding Rate on Durum Crop Production and Physiological Responses. *Agronomy Journal*, 2017, 109, S. 1981–1990.
- (71) Brougham, R. W. Leaf development in swards of white clover (*Trifolium repens* L.). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1958, 1, S. 707–718.
- (72) Belaygue, C.; Wery, J.; Cowan, A. A.; Tardieu, F. Contribution of Leaf Expansion, Rate of Leaf Appearance, and Stolon Branching to Growth of Plant Leaf Area under Water Deficit in White Clover. *Crop Science*, 1996, 36, S. 1240–1246.
- (73) Xu, X.; Yang, G.; Yang, X.; Li, Z.; Feng, H.; Xu, B.; Zhao, X. Monitoring ratio of carbon to nitrogen (C/N) in wheat and barley leaves by using spectral slope features with branch-and-bound algorithm. *Scientific Reports*, 2018, 8.
- (74) Zhang, H.; Wu, H.; Yu, Q.; Wang, Z.; Wei, C.; Long, M.; Kattge, J.; Smith, M.; Han, X. Sampling date, Leaf Age and Root Size: Implications for the Study of Plant C:N:P Stoichiometry. *PLOS ONE*, 2013, 8.
- (75) Liebmann, M. Weed suppression in intercropping systems: experiments with barley, pea, and mustard. Dissertation, University of California, Berkeley, California, USA, 1986.
- (76) Kostrzewska, M. K.; Jastrzębska, M.; Wanic, M.; Treder, K. Effect of a sowing regime and water conditions on nitrogen content and accumulation in the aerial biomass of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.). *Journal of Elementology*, 2017, S. 607–616.
- (77) Przulj, N.; Momčilović, V. Dry matter and nitrogen accumulation and use in spring barley. *Plant, Soil and Environment*, 2003, 49, S. 36–47.
- (78) Shayanfar, A.; Sharifiamina, S.; Moot, D. J.; Moltchanova, E.; Bloomberg, M. Quantifying perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.) seed germination responses to water potential and temperature with a hydrothermal time model. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2020, 63, S. 379–394.
- (79) Valenzuela, J. L.; Guzman, M.; Sánchez, A.; Del Río, A.; Romero, L. Relationship between biochemical indicators and physiological parameters of nitrogen and physiological plant age. In *Optimization of Plant Nutrition. Refereed Papers from the Eighth International Colloquium for the Optimization of Plant Nutrition, 31 August - 8 September 1992, Lisbon, Portugal*; Frago, M. A.; van Beusichem, M. L., Hrsg.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2013.
- (80) Luo, W.; Li, M.-H.; Sardans, J.; Lü, X.-T.; Wang, C.; Peñuelas, J.; Wang, Z.; Han, X.-G.; Jiang, Y. Carbon and nitrogen allocation shifts in plants and soils along aridity and fertility gradients in grasslands of China. *Ecology and Evolution*, 2017, 7, S. 6927–6934.
- (81) Thomas; Robertson, M. J.; Fukai, S.; Peoples, M. B. The effect of timing and severity of water deficit on growth, development, yield accumulation and nitrogen fixation of mungbean. *Field Crops Research*, 2004, 86, S. 67–80.
- (82) Engin, M.; Sprent, J. I. Effects of water stress on growth and nitrogen-fixing activity of *Trifolium repens*. *New Phytologist*, 1973, 72, S. 117–126.
- (83) Mengel, K. Available nitrogen in soils and its determination by the 'Nmin-method' and by elecroultrafiltration (EUF). *Fertilizer Research*, 1991, 28, S. 251–262.
- (84) Farack, M.; Degner, J.; Jentsch, U.; Zorn, W.; Götz, R.; Paul, R. Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Sommergerste, 7. Ed.: Jena, 2011.
- (85) Leghari, S. J.; Wahocho, N. A.; Laghari, G. M.; Laghari, A. H.; Bhabhan, G. M.; Talpur, K. H.; Bhutto, T. A.; Wahocho, S. A.; Lashari, A. A. Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A Review. *Advances in Environmental Biology*, 2016, 10, S. 209–218.

- (86) Viets, F. G. Water Deficits and Nutrient Availability. In *Plant Responses and Control of Water Balance*; Kozłowski, T. T., Hrsg.; Elsevier Science: Oxford, 1972, S. 217–239.
- (87) Cordovil, C. M. d. S.; Goss, M. J.; Coutinho, J.; Cabral, F. Estimating short- and medium-term availability to cereals of nitrogen from organic residues. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35, S. 366–383.
- (88) Du, S.; Liu, L.; Liu, X.; Hu, J. Response of Canopy Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence to the Absorbed Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Chlorophyll. *Remote Sensing*, 2017, 9, S. 1–19.
- (89) Uddling, J.; Gelang-Alfredsson, J.; Piikki, K.; Pleijel, H. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*, 2007, 91, S. 37–46.
- (90) Reis, A. R.; Favarin, J. L.; Malavolta, E.; Júnior, J. L.; Moraes, M. F. Photosynthesis, Chlorophylls, and SPAD Readings in Coffee Leaves in Relation to Nitrogen Supply. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40, S. 1512–1528.
- (91) Génard, T.; Etienne, P.; Diquélou, S.; Yvin, J.-C.; Revellin, C.; Laîné, P. Rapeseed-legume intercrops: plant growth and nitrogen balance in early stages of growth and development. *Heliyon*, 2017, 3.
- (92) Li, Y.; Ma, L.; Wu, P.; Zhao, X.; Chen, X.; Gao, X. Yield, yield attributes and photosynthetic physiological characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.)/maize (*Zea mays* L.) strip intercropping. *Field Crops Research*, 2020, 248.
- (93) Giunta, F.; Motzo, R.; Deidda, M. SPAD readings and associated leaf traits in durum wheat, barley and triticale cultivars. *Euphytica*, 2002, 125, S. 197–205.
- (94) Inostroza, L.; Acuña, H. Water use efficiency and associated physiological traits of nine naturalized white clover populations in Chile. *Plant Breeding*, 2010, 129, S. 700–706.
- (95) Setiawan, E. Relationship between mangosteen leaf nitrogen contents and leaf SPAD values. *Agrovigor*, 2014, 7.
- (96) Rascher, U.; Damm, A.; van der Linden, S.; Okujeni, A.; Pieruschka, R.; Schickling, A.; Hostert, P. Sensing of Photosynthetic Activity of Crops. In *Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity*; Oerke, E.-C.; Gerhards, R.; Menz, G.; Sikora, R. A., Hrsg.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2010, S. 87–99.
- (97) Peñuelas, J.; Isla, R.; Filella, I.; Araus, J. L. Visible and Near-Infrared Reflectance Assessment of Salinity Effects on Barley. *Crop Science*, 1997, 37, S. 198–202.
- (98) Bhagsari, A. S.; Brown, R. H. Leaf Photosynthesis and its Correlation with Leaf Area. *Crop Science*, 1986, 26, S. 127–132.
- (99) Trail, P.; Abaye, O.; Thomason, W. E.; Thompson, T. L.; Gueye, F.; Diedhiou, I.; Diatta, M. B.; Faye, A. Evaluating Intercropping (Living Cover) and Mulching (Desiccated Cover) Practices for Increasing Millet Yields in Senegal. *Agronomy Journal*, 2016, 108, S. 1742–1752.
- (100) Inostroza, L.; Acuña, H.; Muñoz, P.; Vásquez, C.; Ibáñez, J.; Tapia, G.; Pino, M. T.; Aguilera, H. Using Aerial Images and Canopy Spectral Reflectance for High-Throughput Phenotyping of White Clover. *Crop Science*, 2016, 56, S. 2629–2637.
- (101) Tóth, K.; Blazsek, K.; Reisinger, P.; Pinke, G. Weed flora and historical review of weed control technologies of poppy crops. *Magyar Gyomkutatás Technológia*, 2013, 19, S. 3–16.
- (102) Hanf, M. *Ackerunkräuter Europas mit ihren Keimlingen und Samen*, 2. Ed.; BLV Verlagsgesellschaft: München, 1982.
- (103) Cardina, J.; Johnson, G. A.; Sparrow, D. H. The nature and consequence of weed spatial distribution. *Weed Science*, 1997, 45, S. 364–373.

- (104) Kugbe, X. J.; Yaro, R. N.; Soyel, J. K.; Kofi, E. S.; Ghaney, P. Role of Intercropping in Modern Agriculture and Sustainability: A Review. *British Journal of Science*, 2018, 16, S. 67–75.
- (105) Raseduzzaman, M.; Jensen, E. S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 2017, 91, S. 25–33.
- (106) Hartl, W. Influence of Undersown Clovers on Weeds and on the Yield of Winter Wheat in Organic Farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1989, 27, S. 389–396.
- (107) Pinke, G.; Pál, R. W.; Tóth, K.; Karácsony, P.; Czúcz, B.; Botta-Dúkat, Z. Weed vegetation of poppy (*Papaver somniferum*) fields in Hungary: effects of management and environmental factors on species composition. *Weed Research*, 2011, 51, S. 621–630.
- (108) Flade, J.; Beschow, H.; Wensch-Dorendorf, M.; Plescher, A.; Wätjen, W. Occurrence of Nine Pyrrolizidine Alkaloids in *Senecio vulgaris* L. Depending on Developmental Stage and Season. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2019, 8, S. 1–13.
- (109) Jasim, H.; Hussein, A. O.; Hameed, I. H.; Kareem, M. A. Characterization of alkaloid constitution and evaluation of antimicrobial activity of *Solanum nigrum* using gas chromatography mass spectrometry (GC-MS). *Journal of Pharmacognosy and Phytotherapy*, 2015, 7, S. 56–72.
- (110) Brooker, R. W.; Maestre, F. T.; Callaway, R. M.; Lortie, C. L.; Cavieres, L.A.; Kunstler, G.; Liancourt, P.; Tielbörger, K.; Travis, J. M. J.; Anthelme, F.; Armas, C.; Coll, L.; Corcket, E.; Delzon, S.; Forey, E.; Kikvidze, Z.; Olofsson, J.; Pugnaire, F.; Quiroz, C. L.; Saccone, P.; Schiffrers, K.; Seifan, M.; Touzard, B.; Michalet, R. Facilitation in plant communities: The past, the present, and the future. *Journal of Ecology*, 2008, 96, S. 18–34.
- (111) Anderson, P. M.; Oelke, E. A.; Simmons, S. R. *Growth and Development Guide for Spring Barley*. University of Minnesota Extension Service, 1995.
- (112) Hauggaard-Nielsen, H. *Competitive Interactions, Resource Use and Nitrogen Dynamics in Annual Intercrops in Low-Input Cropping Systems*. Dissertation, Royal Veterinary and Agricultural University, Riso, 2001.
- (113) Dhima, K.; Vasilakoglou, I.; Gatsis, T.; Gougoulas, N. Faba Bean-Barley Intercrops for High Productivity and Corn Poppy Suppression, *Experimental Agriculture*, 2018, 54, S. 163–180.
- (114) Dordas, C. A.; Vlachostergios, D. N.; Lithourgidis, A. S. Growth dynamics and agronomic-economic benefits of pea-oat and pea-barley intercrops. *Crop and Pasture Science*, 2012, 63, S. 45–52.
- (115) Laidig, F.; Piepho, H.-P.; Rentel, D.; Drobek, T.; Meyer, U. Breeding progress, genotypic and environmental variation and correlation of quality traits in malting barley in German official variety trials between 1983 and 2015. *Theoretical and Applied Genetics*, 2017, 130, S. 2411–2429.
- (116) Molina-Cano, J.-L.; Francesch, M.; Perez-Vendrell, A. M.; Ramo, T.; Voltas, J.; Brufau, J. Genetic and Environmental Variation in Malting and Feed Quality of Barley. *Journal of Cereal Science*, 1997, 25, S. 37–47.
- (117) Eagles, H. A.; Bedggood, A. G.; Panozzo, J. F.; Martin, P. J. Cultivar and Environmental Effects on Malting Quality in Barley. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46, S. 831–844.
- (118) Webster, F. *Oats. Chemistry and Technology*, 2. Ed.; Elsevier Science & Technology; ProQuest: Atlanta, Ann Arbor, Michigan, 2016.
- (119) Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. *Ackerbaustrategie 2035*: Berlin, 2019.

- (120) Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Umsetzung der EU-Agrarreform in Deutschland. Ausgabe 2015: Berlin, 2015.
- (121) Nergiz, C.; Ötles, S. The Proximate Composition and some Minor Constituents of Poppy Seeds, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1994, 66, S. 117–120.
- (122) Azcan, N.; Ozturk Kalender, B.; Kara, M. Investigation of Turkish Poppy Seeds and Seed Oils. *Chemistry of Natural Compounds*, 2004, 40, S. 370–372.
- (123) Prusky, D. Reduction of the incidence of postharvest quality losses, and future prospects. *Food Security*, 2011, 3, S. 463–474.
- (124) European Commission; Hrsg.; Common Catalogue of Varieties of Agricultural Plant Species. Consolidated Version, 2019.
- (125) Kara, N. The Effects of Autumn and Spring Sowing on Yield, Oil and Morphine Contents in the Turkish Poppy (*Papaver somniferum* L.) Cultivars. *Turkish Journal of Field Crops*, 2017, 22, S. 39–46.
- (126) Yilmaz, G. The investigations on the sowing date of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) in Tokat conditions. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 1997, 14, S. 105–122.
- (127) Kirkland, K.; Johnson, E. N. Alternative seeding dates (fall and April) affect *Brassica napus* canola yield and quality. *Canadian Journal of Plant Science*, 2000, 80, S. 713–719.
- (128) Duman, E.; Özcan, M. M. Proximate analysis and fatty acid composition assessment of three different colored poppy seed oils. *Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*, 2015, 92, S. 183.
- (129) Hlinková, A.; Havrlentová, M.; Šupová, J.; Bednářová, A. Poppy Seed (*Papaver somniferum* L.): Effect of Genotype and Year of Cultivation on Variability in its Lipid Composition. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2012, S. 908–922.
- (130) Özcan, M. M.; Atalay, Ç. Determination of seed and oil properties of some poppy (*Papaver somniferum* L.) varieties. *Grasas y Aceites*, 2006, 57, S. 169–174.
- (131) Rahimi, A.; Arslan, N.; Rezaeieh, K. A. P.; Gurbuz, B. Variation in Fatty Acid Composition of Four Turkish Registered Poppy (*Papaver somniferum* L.) Seeds in two Locations (Ankara and Boldavin) of Turkey. *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 2015, 4, S. 183–190.
- (132) Dündar Emir, D.; Aydeniz, B.; Yilmaz, E. Effects of roasting and enzyme pretreatments on yield and quality of cold-pressed poppy seed oils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2015, 39, S. 260–271.
- (133) Sethi, K. L.; Sapra, R. L.; Gupta, R. Performance of Poppy Cultivars in Relation to Seed, Oil and Latex Yields under Different Environments. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1990, 52, S. 309–313.
- (134) Canvin, D. T. The Effect of Temperature on the Oil Content and Fatty Acid Composition of the Oils from several Oil Seed Crops. *Canadian Journal of Botany*, 1965, 43, S. 63–69.
- (135) Valizadeh, N.; Rahimi, A.; Arslan, N. Variation in fatty acid composition of three turkish slit flower opium poppy (*Papaver somniferum* L.) lines. *International Journal of Biosciences*, 2014, 4, S. 268–274.
- (136) Singh, S. P.; Khanna, K. R.; Dixit, B. S.; Srivastava, S. N. Fatty acid composition of opium poppy (*Papaver somniferum*) seed oil. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1990, 60, S. 358–359.

- (137) Hlinková, A.; Čertík, M.; Havrlentová, M. Investigation of Lipid Content and Fatty Acids Composition in selected Poppy Cultivars (*Papaver somniferum* L.). Agriculture (Polnohospodárstvo), 2011, 57, S. 118–123.
- (138) Rainer, L.; Heiss, C. J. Conjugated Linoleic Acid: Health Implications and Effects on Body Composition. Journal of the American Dietetic Association, 2004, 104, S. 963–968.
- (139) Aruna, K.; Sivaramakrishnan, V. M. Anticarcinogenic Effects of the Essential Oils from Cumin, Poppy and Basil. Phytotherapy Research, 1996, 10, S. 577–580.
- (140) Saini, R. K.; Keum, Y.-S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: Dietary sources, metabolism, and significance - A review. Life Sciences, 2018, 203, S. 255–267.
- (141) Erinç, H.; Tekin, A.; Özcan, M. M. Determination of fatty acid, tocopherol and phytosterol contents of the oils of various poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds. Grasas y Aceites, 2009, 60, S. 375–381.
- (142) Rahimi, A.; Arslan, N.; Ahmed, H. A. Variation in Oil, Protein Content and Fatty Acid Composition of Twelve Turkish Opium Poppy (*Papaver somniferum* L.) Lines. Journal of Medicinal Plants and By-products, 2012, 1, S. 49–54.
- (143) Küsmenoğlu, S.; Akay, Z.; Şener, B. Fatty Acid Composition in the Seed Oils of *Papaver somniferum* from Different Provinces. FABAD Journal of Pharmaceutical Sciences, 2002, 27, S. 13–18.
- (144) Lančaričová, A.; Havrlentová, M.; Muchová, D.; Bednárová, A. Oil content and fatty acids composition of poppy seeds cultivated in two localities of Slovakia. Agriculture (Polnohospodárstvo). 2016, 62, S. 19–27.
- (145) Abudak, M.; Kara, H. H. Fatty acid composition and some bioactive properties of edible oil extracted from different varieties of poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds. Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse, 2017, XCIV, S. 19–25.
- (146) Rahimi, A.; Kiralan, M.; Arslan, N.; Bayrak, A.; Doğramacı, S. Variation in Fatty Acid Composition of Registered Poppy (*Papaver somniferum* L.) Seed in Turkey. Akademik Gıda, 2011, 9, S. 22–25.
- (147) Kamal-Eldin, A.; Andersson, R. A Multivariate Study of the Correlation Between Tocopherol Content and Fatty Acid Composition in Vegetable Oils. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1997, 74, S. 375–379.
- (148) Luthra, R.; Singh, N. Changes in Fatty Acid Composition Accompanying the Deposition of Triacylglycerols in Developing Seeds of Opium Poppy (*Papaver somniferum* L.). Plant Science, 1989, 60, S. 55–60.
- (149) Flagella, Z.; Rotunno, T.; Tarantino, E., Di Caterina, R.; Caro, A. de. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. European Journal of Agronomy, 2002, 17, S. 221–230.
- (150) Trémolières, A.; Dubacq, J. P.; Drapier, D. Unsaturated Fatty Acids in Maturing Seeds of Sunflower and Rape: Regulation by Temperature and Light Intensity. Phytochemistry (Elsevier), 1982, 21, S. 41–45.
- (151) Robertson, J. A.; Green, V. E. Effect of Planting Date on Sunflower Seed Oil Content, Fatty Acid Composition and Yield in Florida. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1981, 58, S. 698–701.
- (152) Harris, H. C.; McWilliam, J. R.; Mason, W. K. Influence of Temperature on Oil Content and Composition of Sunflower Seed. Australian Journal of Agricultural Research, 1978, 29, S. 1203–1212.
- (153) Sengupta, A.; Mazumder, U. K. Triglyceride composition of *Papaver somniferum* seed oil. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1976, 27, S. 214–218.

- (154) Raie, M. Y.; Salma. *Sesamum indicum* and *Papaver somniferum* Oils. *Fette Seifen Anstrichmittel*, 1985, 87, S. 246–247.
- (155) Bozan, B.; Temelli, F. Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils. *Bioresource Technology*, 2008, 99, S. 6354–6359.
- (156) Gao, P.; Cao, Y.; Liu, R.; Jin, Q.; Wang, X. Phytochemical Content, Minor-Constituent Compositions and Antioxidant Capacity of Screw-Pressed Walnut Oil Obtained from Roasted Kernels. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2019, 121.
- (157) Trela, A.; Szymańska, R. Less widespread plant oils as a good source of vitamin E. *Food Chemistry*, 2019, 296, S. 160–166.
- (158) Deiana, M.; Rosa, A.; Cao, C. F.; Pirisi, F. M.; Bandino, G.; Dessì, M. A. Novel Approach to Study Oxidative Stability of Extra Virgin Olive Oils: importance of α -Tocopherol Concentration. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50, S. 4342–4346.
- (159) Simat, T.; Schneider-Häder, B.; Uhl, M.; Mleczko, M. Geruchs- und Aromaschulung in der Sensorik. *DLG-Expertenwissen*, 01/2017.
- (160) Guneser, B. A.; Yilmaz, E. Bioactives, Aromatics and Sensory Properties of Cold-Pressed and Hexane-Extracted Lemon (*Citrus Limon* L.) Seed Oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2017, 94, S. 723–731.
- (161) Olías, J. M.; Pérez, A. G.; Ríos, J. J.; Sanz, L. C. Aroma of Virgin Olive Oil: Biogenesis of the “Green” Odor Notes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1993, 41, S. 2369–2373.
- (162) Guo, J.; Kong, D.; Hu, L. Comparative Analysis of Volatile Flavor Compounds of Poppy Seed Oil Extracted by Two Different Methods via Gas Chromatography/Mass Spectrometry. *Journal of PharmaSciTech*, 2015, 4, S. 36–38.
- (163) Kopuncová, M.; Sádecká, J.; Kolek, E.; Havlrentová, M.; Blaško, J. Key odour-active compounds in selected Slovakian poppy seed (*Papaver somniferum* L.) varieties revealed by gas chromatography-olfactometry. *Journal of Food and Nutrition Research (Bratislava, Slovakia)*, 2016, 55, S. 237–246.
- (164) Krist, S.; Stuebiger, G.; Unterweger, H.; Bandion, F.; Buchbauer, G. Analysis of Volatile Compounds and Triglycerides of Seed Oils Extracted from Different Poppy Varieties (*Papaver somniferum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53, S. 8310–8316.
- (165) Jeleń, H. H.; Obuchowska, M.; Zawirska-Wojtasiak, R.; Wąsowicz, E. Headspace Solid-Phase Microextraction Use for the Characterization of Volatile Compounds in Vegetable Oils of Different Sensory Quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48, S. 2360–2367.
- (166) Wagner, K.-H.; Isnardy, B.; Elmadfa, I. Effects of seed damage on the oxidative stability of poppy seed oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2003, 105, S. 219–224.
- (167) Franklin, L. M.; Mitchell, A. E. Review of the Sensory and Chemical Characteristics of Almond (*Prunus dulcis*) Flavor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67, S. 2743–2753.
- (168) Masanetz, C.; Grosch, W. Hay-like off-flavour of dry parsley. *Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 1998, 206, S. 114–120.
- (169) Grosch, W.; Laskawy, G. Untersuchungen über die Beteiligung von Linolsäure am Bittergeschmack von Mohnsamen (*Papaver somniferum*). *Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 1984, 178, S. 257–295.

- (170) Lainer, J.; Dawid, C.; Dunkel, A.; Gläser, P.; Wittl, S.; Hofmann, T. Characterization of Bitter-Tasting Oxylipins in Poppy Seeds (*Papaver somniferum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68, S. 10361–10373.
- (171) Le Bon, A. M.; Salles, C.; Guichard, E.; Morzel, M., Hrsg. *Flavour. From food to perception*; John Wiley & Sons Inc: Chichester, West Sussex, Hoboken, NJ, 2017.
- (172) Busch-Stockfisch, P. *Sensorik kompakt: in der Produktentwicklung und Qualitätssicherung*; Behr's Verlag, 2015.
- (173) Stone, H.; Sidel, J. L. *Sensory Evaluation Practices*. Elsevier Academic Press, Boston, 2004.
- (174) Lawless, H. T.; Heymann, H. *Sensory Evaluation of Food*; Springer New York: New York, 2010.
- (175) Schneider-Häder, B.; Derndorfer, E. *Sensorische Analyse: Methodenüberblick und Einsatzbereiche. Teil 4: Klassisch beschreibende Prüfungen & neue Schnellmethoden*, DLG-Expertenwissen, 2016.
- (176) DIN EN ISO 8586:2014-05, *Sensory analysis - General guidelines for the selection, training and monitoring of selected assessors and expert sensory assessors*.
- (177) DIN 10964:2014-11, *Sensory analysis - Simple descriptive test*.
- (178) BVL L 17.00-4:2017-10, *Untersuchung von Lebensmitteln - Bestimmung des Gesamtfettgehaltes in Brot einschließlich Kleingebäck aus Brotteigen nach Säuerungsabschluss mittels Extraktion und Gravimetrie*.
- (179) Karasek, F.W.; Clement, R. E. *Basic Gas Chromatography-Mass Spectrometry. Principles and Techniques*, 3. Ed.; Elsevier Science: Amsterdam, 2003.
- (180) Holm, T. Aspects of the mechanism of the flame ionization detector. *Journal of Chromatography A.*, 1999, 842, S. 221–227.
- (181) Lingeman, H.; Underberg, W. J. M.; Takadate, A.; Hulshoff, A. Fluorescence Detection in High Performance Liquid Chromatography. *Journal of Liquid Chromatography*, 1985, 8, S. 789–874.
- (182) Pawliszyn, J. Theory of Solid-Phase Microextraction. *Journal of Chromatographic Science*, 2000, 38, S. 270–278.
- (183) Boulanger, R.; Chassagne, D.; Crouzet, J. Free and bound flavour components of amazonian fruits. 1: Bacuri. *Flavour and Fragrance Journal*, 1999, 14, S. 303–311.
- (184) Turchini, G. M.; Giani, I.; Caprino, F.; Moretti, V. M.; Valfrè, F. Discrimination of origin of farmed trout by means of biometrical parameters, fillet composition and flavor volatile compounds. *Italian Journal of Animal Science*, 2004, 3, S. 123–140.
- (185) Peterson, D. G.; Reineccius, G. A. Determination of the aroma impact compounds in heated sweet cream butter. *Flavour and Fragrance Journal* 2003, 18, S. 320–324.
- (186) Quijano, C. E.; Salamanca, G.; Pino, J. A. Aroma volatile constituents of Colombian varieties of mango (*Mangifera indica* L.). *Flavour and Fragrance Journal*, 2007, 22, S. 401–406.
- (187) Ertugrul, K.; Dural, H.; Tugay, O.; Flamini, G.; Cioni, P. L.; Morelli, I. Essential oils from flowers of *Centaurea kotschyi* var. *kotschyi* and *C. kotschyi* var. *decumbens* from Turkey. *Flavour and Fragrance Journal*, 2003, 18, S. 95–97.
- (188) Karagül-Yüceer, Y.; Vlahovich, K. N.; Drake, M.; Cadwallader, K. R. Characteristic Aroma Components of Rennet Casein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51, S. 6797–6801.

- (189) Dugo, P.; Mondello, L.; Zappia, G.; Bonaccorsi, I.; Cotroneo, A.; Russo, M. T. The Composition of the Volatile Fraction and the Enantiomeric Distribution of Five Volatile Components of Fastrime Oil (*Monocitrus australatica* x *Fortunella* sp. x *Citrus urantifolia*). *Journal of Essential Oil Research*, 2004, 16, S. 328–333.
- (190) Flamini, G.; Cioni, P. L.; Morelli, I. Composition of the essential oils and in vivo emission of volatiles of four *Lamium* species from Italy: *L. purpureum*, *L. hybridum*, *L. bifidum* and *L. amplexicaule*. *Food Chemistry*, 2005, 91, S. 63–68.
- (191) Pino, J. A.; Mesa, J.; Muñoz, Y.; Martí, M. P.; Marbot, R. Volatile Components from Mango (*Mangifera indica* L.) Cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53, S. 2213–2223.
- (192) Saroglou, V.; Arfan, M.; Shabir, A.; Hadjipavlou-Litina, D.; Skaltsa, H. Composition and antioxidant activity of the essential oil of *Teucrium royleanum* Wall. ex Benth growing in Pakistan. *Flavour and Fragrance Journal*, 2007, 22, S. 154–157.
- (193) Beaulieu, J. C.; Grimm, C. C. Identification of Volatile Compounds in Cantaloupe at Various Developmental Stages Using Solid Phase Microextraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49, S. 1345–1352.
- (194) Mondello, L.; Zappia, G.; Cotroneo, A.; Bonaccorsi, I.; Chowdhury, J. U.; Yusuf, M.; Dugo, G. Studies on the essential oil-bearing plants of Bangladesh. Part VIII. Composition of some *Ocimum* oils *O. basilicum* L. var. *purpurascens*; *O. sanctum* L. green; *O. sanctum* L. purple; *O. americanum* L., citral type; *O. americanum* L., camphor type. *Flavour and Fragrance Journal* 2002, 17, S. 335–340.
- (195) Saroglou, V.; Marin, P. D.; Rancic, A.; Veljic, M.; Skaltsa, H. Composition and antimicrobial activity of the essential oil of six *Hypericum* species from Serbia. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2007, 35, S. 146–152.
- (196) Avsar, Y. K.; Karagul-Yuceer, Y.; Drake, M. A.; Singh, T. K.; Yoon, Y.; Cadwallader, K. R. Characterization of Nutty Flavor in Cheddar Cheese. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87, S. 1999–2010.
- (197) Carunchia Whetstine, M. E.; Croissant, A. E.; Drake, M. A. Characterization of Dried Whey Protein Concentrate and Isolate Flavor. *Journal of Dairy Science*, 2005, 88, S. 3826–3839.
- (198) Cho, I. H.; Lee, S. M.; Kim, S. Y.; Choi, H.-K.; Kim, K.-O.; Kim, Y.-S. Differentiation of Aroma Characteristics of Pine-Mushrooms (*Tricholoma matsutake* Sing.) of Different Grades Using Gas Chromatography-Olfactometry and Sensory Analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55, S. 2323–2328.
- (199) Zhao, J.; Liu, J.; Zhang, X.; Liu, Z.; Tsering, T.; Zhong, Y.; Nan, P. Chemical composition of the volatiles of three wild *Bergenia* species from western China. *Flavour and Fragrance Journal* 2006, 21, S. 431–434.
- (200) Mimica-Dukić, N.; Kujundžić, S.; Soković, M.; Couladis, M. Essential Oil Composition and Antifungal Activity of *Foeniculum vulgare* Mill. Obtained by Different Distillation Conditions. *Phytotherapy Research*, 2003, 17, S. 368–371.
- (201) Colahan-Sederstrom, P. M.; Peterson, D. G. Inhibition of Key Aroma Compound Generated during Ultrahigh-Temperature Processing of Bovine Milk via Epicatechin Addition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53, S. 398–402.
- (202) Kim, T. H.; Shin, J. H.; Baek, H. H.; Lee, H. J. Volatile flavour compounds in suspension culture of *Agastache rugosa* Kuntze (Korean mint). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2001, 81, S. 569–575.
- (203) Javidnia, K.; Miri, R.; Kamalinejad, M.; Khazraii, H. Chemical composition of the volatile oil of aerial parts of *Valeriana sisybriifolia* Vahl. grown in Iran. *Flavour and Fragrance Journal*, 2006, 21, S. 516–518.

- (204) Benzo, M.; Gilardoni, G.; Gandini, C.; Caccialanza, G.; Vita Finzi, P.; Vidari, G.; Abdo, S.; Layedra, P. Determination of the threshold odor concentration of main odorants in essential oils using gas chromatography-olfactometry incremental dilution technique. *Journal of Chromatography. A*, 2007, 1150, S. 131–135.
- (205) Campo, E.; Ferreira, V.; Escudero, A.; Cacho, J. Prediction of the Wine Sensory Properties Related to Grape Variety from Dynamic-Headspace Gas Chromatography-Olfactometry Data. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53, S. 5682–5690.
- (206) Mahattanatawee, K.; Goodner, K. I.; Baldwin, E. Volatile Constituents and Character Impact Compounds of Selected Florida's Tropical Fruit. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 2005, 118, S. 414–418.
- (207) Flamini, G.; Cioni, P. L.; Morelli, I. Volatiles from leaves, fruits, and virgin oil from *Olea europaea* Cv. Olivastra Seggianese from Italy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51, S. 1382–1386.
- (208) Choi, H.-S.; Kim, M.-S. L.; Sawamura, M. Constituents of the essential oil of *cnidium officinale* Makino, a Korean medicinal plant. *Flavour and Fragrance Journal*, 2002, 17, S. 49–53.
- (209) Markowicz Bastos, D. H.; Ishimoto, E. Y.; Marques, M.O. M.; Ferri, A. F.; Torres, E. A. F. S. Essential oil and antioxidant activity of green mate and mate tea (*Ilex paraguariensis*) infusions. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19, S. 538–543.
- (210) Klesk, K.; Qian, M. Aroma Extract Dilution Analysis of Cv. Marion (*Rubus* spp. *hyb*) and Cv. Evergreen (*R. laciniatus* L.) Blackberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51, S. 3436–3441.
- (211) Zhao, C.; Li, X.; Liang, Y.; Fang, H.; Huang, L.-F.; Guo, F. Comparative analysis of chemical components of essential oils from different samples of *Rhododendron* with the help of chemometrics methods. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2006, 82, S. 218–228.
- (212) Isidorov, V. A.; Krajewska, U.; Dubis, E. N.; Jdanova, M. A. Partition coefficients of alkyl aromatic hydrocarbons and esters in a hexane-acetonitrile system. *Journal of Chromatography A*, 2001, 923, S. 127–136.
- (213) Senatore, F.; Urrunaga Soria, E.; Urrunaga Soria, R.; Della Porta, G.; Feo, V. de. Essential oils from two Peruvian *Satureja* species. *Flavour and Fragrance Journal*, 1998, 13, S. 1–4.
- (214) Solina, M.; Baumgartner, P.; Johnson, R. L.; Whitfield, F. B. Volatile aroma components of soy protein isolate and acid-hydrolysed vegetable protein. *Food Chemistry*, 2005, 90, S. 861–873.
- (215) Santos, A. P.; Cornélio Lopes, M.; Limberger, R. P.; Anders Apel, M.; Henriques, A. T.; Moreno, P. R. H. Analysis of the volatile oil from *Pilocarpus pennatifolius* Lemmaire (Rutaceae) leaves by GC–MS. *Flavour and Fragrance Journal*, 2004, 19, S. 325–326.
- (216) Shellie, R.; Mondello, L.; Marriott, P. Dugo, G. Characterisation of lavender essential oils by using gas chromatography-mass spectrometry with correlation of linear retention indices and comparison with comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2002, 970, S. 225–234.
- (217) Su, Y.-C.; Ho, C.-L.; Wang, E. I.-C. Analysis of leaf essential oils from the indigenous five conifers of Taiwan. *Flavour and Fragrance Journal*, 2006, 21, S. 447–452.
- (218) DIN ISO 3972:2013-12, Sensory analysis - Methodology - Method of investigating sensitivity of taste.

- (219) Yamaguchi, S. The Umami Taste. In Food Taste Chemistry. Based on a symposium sponsored by the Division of Agricultural and Food Chemistry at the ACS/CSJ Chemical Congress, Honolulu, Hawaii, April 2-6, 1979; Boudreau, J. C., Hrsg.; American Chemical Society: Washington, DC, 1979, S. 33–51.
- (220) Roper, S. D.; Chaudhari, N. Taste buds: cells, signals and synapses. *Nature Reviews, Neuroscience*, 2017, 18, S. 485–497.
- (221) Murphy, C.; Cain, W. S.; Bartoshuk, L. M. Mutual action of taste and olfaction. *Sensory processes*, 1977, 1, S. 204–211.
- (222) Murphy, C.; Cain, W. S. Taste and Olfaction: Independence vs Interaction. *Physiology & Behavior*, 1980, 24, S. 601–605.
- (223) Green, B. G.; Nachtigal, D.; Hammond, S.; Lim, J. Enhancement of Retronasal Odors by Taste. *Chemical Senses*, 2012, 37, S. 77–86.
- (224) DIN ISO 8587:2010-08, Sensory analysis - Methodology - Ranking.
- (225) DIN EN ISO 13299:2016-09, Sensory analysis - Methodology - General guidance for establishing a sensory profile.
- (226) ASTM E253-20a. Standard Terminology Relating to Sensory Evaluation of Materials and Products; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- (227) Aksoylu Özbek, Z.; Günç Ergönül, P. Determination of Physicochemical Properties, Fatty Acid, Tocopherol, Sterol, and Phenolic Profiles of Expeller–Pressed Poppy Seed Oils from Turkey. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2020, 97, S. 591–602.
- (228) Rokosik, E.; Dwiecki, K.; Siger, A. Nutritional quality and phytochemical contents of cold pressed oil obtained from chia, milk thistle, nigella, and white and black poppy seeds. *Grasas y Aceites*, 2020, 71.
- (229) Bozan, B.; Temelli, F. Extraction of Poppy Seed Oil Using Supercritical CO₂. *Journal of Food Science*, 2003, 68, S. 422–426.
- (230) Belitz, H.-D.; Grosch, W.; Schieberle, P. *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*; Springer: Berlin, Heidelberg, 2001.
- (231) Wüst, M. Biosynthesis of Plant-Derived Odorants. In *Springer Handbook of Odor*; Büttner, A., Hrsg.; Springer International Publishing: Cham, 2017, S. 9–10.
- (232) Rychlik, M.; Schieberle, P.; Grosch, W. Compilation of odor thresholds, odor qualities and retention indices of key food odorants; Dt. Forschungsanst. für Lebensmittelchemie; Inst. für Lebensmittelchemie: Garching, Germany, 1998.
- (233) Shah, J.; Chaturvedi, R.; Chowdhury, Z.; Venables, B.; Petros, R. A. Signaling by small metabolites in systemic acquired resistance. *The Plant Journal*, 2014, 79, S. 645–658.
- (234) Mridula, D.; Barnwal, P.; Singh, K. K. Screw pressing performance of whole and dehulled flaxseed and some physico-chemical characteristics of flaxseed oil. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52, S. 1498–1506.
- (235) Busch-Stockfisch, M., Hrsg. *Praxishandbuch Sensorik. In der Produktentwicklung und Qualitätssicherung*; Behrs: Hamburg, 2002.
- (236) Ambrosewicz-Walacik, M.; Tańska, M.; Rotkiewicz, D. Phospholipids of Rape Seeds and Oils - Factors Determining Their Content and Technological Significance - A Review. *Food Reviews International*, 2015, 31, S. 385–400.
- (237) Krist, S.; Buchbauer, G.; Klausberger, C., Hrsg. *Lexikon der pflanzlichen Fette und Öle*; Springer: Wien, 2008.
- (238) Zheljazkov, V. D.; Callahan, A.; Cantrell, C. L. Yield and Oil Composition of 38 Basil (*Ocimum basilicum* L.) Accessions Grown in Mississippi. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56, S. 241–245.

(239) Delahunty, C. M.; Eyres, G.; Dufour, J.-P. Gas chromatography-olfactometry. Journal of Separation Science, 2006, 29, S. 2107–2125.

(240) Masch, H. Schlafmohn - Giftpflanze des Jahres 2021, 2021. <https://www.hamburg.de/wandsbek/gdj-2021-schlafmohn/>. Saturday, January 23, 2021.

14.0 Abbildungsverzeichnis

Abb. Nr.	Titel	Seite
Abb. 1	Blüte der Wintermohnsorte `Zeno Morphex´ (links) und der Sommermohnsorte `Viola´ (rechts)	14
Abb. 2	Aussaatschema und Reihenabstände der Mohnpflanzen und Mischungspartner am Campus Klein-Altendorf (2019 und 2020). 2018 betrug der Reihenabstand zwischen den Mohnpflanzen 50 cm, sodass der Abstand zwischen Mohn und Mischungspartner 12 cm betrug. Die Sommergerste wurde als Symbolbild gewählt, der Weißklee wurde nach demselben Schema gesät (Schemazeichnung: Inga Becker)	24
Abb. 3	Trockenmasse (g m ⁻²) von (a) Sommermohn in Reinsaat (P) und in Mischung mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1, PB2, PB3) sowie Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2), (b) Sommergerste in Reinsaat in drei Saatstärken (B1, B2, B3) und in Mischung mit Sommermohn (PB1, PB2, PB3) und (c) Weißklee-Frühsaat in Reinsaat und Mischung (C1, PC1) sowie Weißklee-Spätsaat in Rein- und in Mischsaat (C2, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	38
Abb. 4	(a) Sommermohn in Mischung mit Weißklee (PC1) 55 Tage nach Mohnaussaat, (b) Sommermohn in Mischung mit Sommergerste (PB1) 55 Tage nach Mohnaussaat, (c) Sommermohn in Mischung mit Weißklee (PC1) zum Erntezeitpunkt, (d) Sommermohn in Mischung mit Sommergerste (PB1) zum Erntezeitpunkt am Campus Klein-Altendorf 2019	39
Abb. 5	Höhenwachstum (cm) von (a) Sommermohn in Reinsaat (P) und in Mischung mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1, PB2, PB3) sowie Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2), (b) Sommergerste in Reinsaat in drei Saatstärken (B1, B2, B3) und in Mischung mit Sommermohn (PB1, PB2, PB3) und (c) Weißklee-Frühsaat in Reinsaat und Mischung (C1, PC1) sowie Weißklee-Spätsaat in Rein- und in Mischsaat (C2, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P:	44

Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee). Die adaptierten Entwicklungsstadien (BBCH) sind für die jeweilige Kultur als zweistellige Zifferncodes in den Abbildungen zu jedem Probenahmedatum hinterlegt

- Abb. 6 Stickstoffgehalt (%) und C/N-Verhältnis der Sommermohnpflanzen in Reinsaat (P) sowie in Mischsaat mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1, PB2, PB3) und Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Die adaptierten Mohn-Entwicklungsstadien (BBCH) sind als zweistellige Zifferncodes in den Abbildungen zu jedem Probenahmedatum hinterlegt (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee) 56
- Abb. 7 Stickstoffgehalt (%) und C/N-Verhältnis der Sommergerstepflanzen in Reinsaat zu drei verschiedenen Saatstärken (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) und in Mischung mit Mohn (PB1, PB2, PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Die Ziffern über den jeweiligen Boniturtagen geben die BBCH Makrostadien der Sommergerste zu diesem Zeitpunkt an (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee) 60
- Abb. 8 Stickstoffgehalt (%) und C/N-Verhältnis der Weißkleepflanzen in Reinsaat zu zwei Saatzeitpunkten (C1, C2) und in Mischung mit Sommermohn (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Die Ziffern über den jeweiligen Boniturtagen geben die BBCH Makrostadien des Klees zu diesem Zeitpunkt an (C1/C2) (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee) 64
- Abb. 9 N_{\min} -Gehalte (kg ha^{-1}) in 30 cm Tiefe der 11 Versuchsvarianten am Campus Klein-Altendorf zum 18.05. und 20.09.2018 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee) 67
- Abb. 10 N_{\min} -Gehalte (kg ha^{-1}) in 30 cm Tiefe der 11 Versuchsvarianten am Campus Klein-Altendorf zum 18.06. und 20.08.2019 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee) 68
- Abb. 11 SPAD-Werte der Sommermohnblätter zu den jeweiligen Entwicklungsstadien der Sommermohnpflanzen am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee) 71
- Abb. 12 Bodendeckungsgrad (%) von Unkraut, Sommermohn, Sommergerste und Weißklee in den jeweiligen Varianten zum Zeitpunkt kurz vor der 82

- Ernte am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)
- Abb. 13 Sommermohn Samenerträge (kg ha⁻¹) in Reinsaat (P) im Vergleich zur 87
Mischsaat mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) und Weißklee zu zwei Aussaatzeitpunkten (PC1, PC2) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in jedem Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)
- Abb. 14 Sommergerstenerträge (kg ha⁻¹) in Reinsaat in zwei (B1, B2; 2018) bzw. 93
drei (B1, B2, B3; 2019 – 2020) verschiedenen Saatstärken verglichen mit denselben Saatstärken in Mischsaat mit Mohn (PB1, PB2, PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten in jedem Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)
- Abb. 15 Partielle LER (pLER) für die Mischungen von Sommermohn und 97
Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2 und PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)
- Abb. 16 Boxplots der mittels Nahinfrarotspektroskopie ermittelten Proteingehalte 100
(%) der Sommergerste in drei verschiedenen Saatstärken (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) in Reinsaat und jeweils in Kombination mit Mohn zur Ernte am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Versuchsjahr (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)
- Abb. 17 Mittlere Tocopherolgehalte (mg kg⁻¹) der Mohnöle. Kleinbuchstaben 145
markieren signifikante Unterschiede zwischen den Sorten (ANOVA + Tukey-HSD, p<0.05)
- Abb. 18 Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 1 und 3 der 155
Geruchsattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnölproben (Z: `Zeno Morpex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)
- Abb. 19 Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 3 und 4 der 157
Flavorattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften

	Mohnölproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)	
Abb. 20	Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 1 und 3 der Geruchsattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnsamenproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)	158
Abb. 21	Biplots der GPA Dimensionen (a) 1 und 2 und (b) 3 und 4 der Flavorattribute im Zusammenhang mit den einzelnen geprüften Mohnsamenproben (Z: `Zeno Morphex`, V: `Viola`, M: `Mieszko`, B: `Borowski`)	159
Abb. 22	Netzdiagramme der sensorischen Bewertung von (a) Ölgeruch, (b) Ölflavor, (c) Samengeruch und (d) Samenflavor gemittelt für die drei Sorten `Viola`, `Mieszko` und `Zeno Morphex`	161

15.0 Tabellenverzeichnis

Tab. Nr.	Titel	Seite
Tab. 1	Varianten des Mischanbauversuchs am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	22
Tab. 2	Saat- und Erntezeitpunkte von Somermohn, Sommergerste und Weißklee am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020	22
Tab 3	Mittlere Tagestemperatur (°C) und Niederschlagssumme (mm) für den Zeitraum März bis August am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 im Vergleich zum jeweils langjährigen Mittel	25
Tab. 4	Bodenparameter der Versuchsflächen am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 vor Experimentbeginn. VS: Versorgungsstufe	25
Tab. 5	Blattflächenindizes (BFI) von Somermohn in Reinsaat (P) sowie in Mischung mit Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2) und Sommergerste zu drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (BBCH) am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	46

Tab. 6	Blattflächenindizes (BFI) von Sommergerste in Reinsaat (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) sowie in Mischung mit Sommermohn (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (BBCH) des Mohns am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/ Weißklee)	48
Tab. 7	Blattflächenindizes (BFI) von Weißklee in Reinsaat zu zwei Aussaatzeitpunkten (C1, C2) sowie in Mischung mit Sommermohn (PC1, PC2) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (BBCH) des Mohns am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im jeweiligen Jahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	50
Tab. 8	Ausgangsgehalte an mineralisch verfügbarem Stickstoff (N_{min}) ($kg\ ha^{-1}$) auf den Versuchsflächen am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020	66
Tab. 9	NDVI der Sommermohnblätter in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (BBCH) und Variante am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zum jeweiligen Messzeitpunkt (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	75
Tab. 10	NDVI der Sommergerstenblätter in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (BBCH) und Variante am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zum jeweiligen Messzeitpunkt (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	76
Tab. 11	NDVI der Weißkleeblätter in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (BBCH) und Variante am Campus Klein-Altendorf 2019 und 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zum jeweiligen Messzeitpunkt (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	77
Tab. 12	Sommermohnertragsdaten in Reinsaat (P) im Vergleich zur Mischsaat mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) und Weißklee zu zwei Saatzeitpunkten (PC1, PC2) am Campus	90

	Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für jeden Parameter in jeweiligen Versuchsjahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	
Tab. 13	Sommergerstenertragsdaten aus Reinsaat in drei Saatstärken (B1 (nur 2019 und 2020), B2, B3) und in Mischsaat mit Sommermohn (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2, PB3) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für jeden Parameter in jeweiligen Versuchsjahr (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	95
Tab. 14	Competitive Ratio (CR) für die Mischungen von Sommermohn mit Sommergerste in drei Saatstärken (PB1 (nur 2019 und 2020), PB2 und PB3) für Sommermohn (CRa) und Sommergerste (CRb) am Campus Klein-Altendorf 2018 – 2020 (P: Poppy/Sommermohn, B: Barley/Sommergerste)	98
Tab. 15	Übersicht über Anbauformen, Sorten, Anbaustandorte und Erntezeitpunkte der für die Inhaltsstoffanalytik und Sensorik verwendeten Mohnproben aus dem Erntejahr 2019 (CKA: Campus Klein-Altendorf)	116
Tab. 16	Mittlere Temperaturen und Niederschlagssummen für die vier Probenregionen im Zeitraum Ende Mai bis Mitte August 2019	119
Tab. 17	Bodendaten der einzelnen Anbauflächen an den verschiedenen Standorten 2019	119
Tab. 18	Standardkalibrierlösungen zusammengesetzt aus den Einzelstandards der Tocopherole in 1 ml HPLC-Vials	123
Tab. 19	Retentionsindizes und Massenspektrometrie-Daten zu den flüchtigen Verbindungen, die im Kopfraum der Mohnöle detektiert wurden im Vergleich zu in der Literatur angegebenen Retentionsindizes	125
Tab. 20	Reihenfolge der einzelnen Schulungstests im Rahmen der sensorischen Panelschulung	128
Tab. 21	Mischungsverhältnisse der Graphit/Stärkemischungen des Graustufentests nach DIN EN ISO 8586:2014-05	129
Tab. 22	Mischungsverhältnisse der Stammlösungen „süß“ und „bitter“ mit Leitungswasser zur Herstellung von je 1 Liter Prüflösung der Schwellenwertprüfung Geschmack	131

Tab. 23	Ausgangskonzentrationen und Mischungsverhältnisse mit Propylenglykol für 5 ml der in der Geruchsintensitätsprüfung verwendeten Aromalösungen	134
Tab. 24	Übersicht der für die sensorische Analyse verwendeten Attribute zur Beschreibung der Mohnsamen und -öle in Anlehnung an DIN 10964:2014-11	137
Tab. 25	Ölgehalte der Mohnproben die mittels Soxhlet-Extraktion oder durch manuelle Pressung ermittelt wurden	141
Tab. 26	Anteile der einzelnen Fettsäuren an der Zusammensetzung der Mohnöle. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Mohnsorten; n.s.: nicht signifikant (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0.05$)	143
Tab. 27	Pearson-Korrelationskoeffizienten der wichtigsten Oxidationsprodukte des Fettsäureabbaus im Profil der flüchtigen Verbindungen aller untersuchten Winter- und Sommermohnölproben	147
Tab. 28	Konzentrationen ($\mu\text{g g}^{-1}$), Retentionsindizes und Aromabeschreibung der im Kopfraum der Mohnöle detektierte flüchtige Verbindungen	151
Tab. 29	Spearman-Korrelationen zwischen Mohnsamen- und Mohnölattributen zu Geruch und Flavor (fett markiert sind Korrelationskoeffizienten über 0,5)	170
Tab. 30	Spearman-Korrelationen zwischen Geruchs- und Flavorattributen der Mohnsamen und Mohnöle (fett markiert sind Korrelationskoeffizienten über 0,5)	172
Tab. 31	Spearman-Korrelationen zwischen den Attributen mohntypisch, nussig und fettig/ölig am Beispiel der Mohnöle	172
Tab. 32	Spearman-Korrelationen zwischen den Attributen pilzartig, heuartig, nussig und muffig am Beispiel der Mohnöle	173
Tab. 33	Signifikante Korrelationen zwischen wichtigen sensorischen Attributen und einzelnen flüchtigen Verbindungen in den Mohnsamen und -ölen. Angegeben sind die minimalen (R min) und maximalen (R max) Korrelationskoeffizienten über 0,5 ($p < 0,05$) zwischen den Attributen und den jeweiligen flüchtigen Aromastoffen	175

16.0 Anhang

Abkürzung	Titel	Seite
Tab. A1	Übersicht der Boniturtermine im Sommermohn-Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2018 unter Angabe der untersuchten Kulturen (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee, X: Parzellenwert unabhängig der Kultur)	205
Tab. A2	Übersicht der Boniturtermine im Sommermohn-Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2019 unter Angabe der untersuchten Kulturen (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee, X: Parzellenwert unabhängig der Kultur)	206
Tab. A3	Übersicht der Boniturtermine im Sommermohn-Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2020 unter Angabe der untersuchten Kulturen (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee, X: Parzellenwert unabhängig der Kultur)	207
Tab. A4	Trockenmasse (g m ⁻²) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2018. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	208
Tab. A5	Trockenmasse (g m ⁻²) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2019. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	209
Tab. A6	Trockenmasse (g m ⁻²) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste 2020. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	210
Tab. A7	Pflanzenhöhe (cm) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2018. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum	211

	(ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	
Tab. A8	Pflanzenhöhe (cm) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2019. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	212
Tab. A9	Pflanzenhöhe (cm) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2020. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	213
Tab. A10	Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte (%) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste im Misanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2018. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	214
Tab. A11	Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte (%) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste im Misanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2019. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	215
Tab. A12	Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte (%) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste im Misanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2019. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	216
Tab. A13	Auflistung der einzelnen Unkrautarten in den jeweiligen Varianten und Versuchsjahren* im Misanbauversuch am Campus Klein-	217

	Altendorf kumuliert über die einzelnen Boniturtermine (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	
Tab. A14	Entwicklungsstadien bei Mohn (Adaptierte BBCH – Skala)	218
Abb. A1	Parzellenpläne der Versuchsanlagen zum Feldversuch Sommermohn-Mischanbau 2018, 2019 und 2020 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)	220
Abb. A2	Chromatogramm der Fettsäuremethylester-Standards	221
Abb. A3	Chromatogramm der Standard Tocopherole (α , β , γ , δ)	221
F1	Prüferhinweise zum Verhalten vor und während einer Panelprüfung	222
F2	Prüfbogen einfach beschreibende Prüfung Mohnsamen	223
F3	Prüfbogen: Einfach beschreibende Prüfung Mohnöle	224
F4	Gruppenprotokoll der einfach beschreibenden Prüfung des ersten Termins - Mohnsamen	225
F5	Gruppenprotokoll der einfach beschreibenden Prüfung des ersten Termins - Mohnöle	227
F6	Prüfbogen Profilprüfung Mohnsamen dunkel	229
F7	Prüfbogen Profilprüfung Mohnsamen hell	231
F8	Prüfbogen Profilprüfung Mohnöl	233

Tab. A1 Übersicht der Boniturtermine im Sommermohn-Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2018 unter Angabe der untersuchten Kulturen (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee, X: Parzellenwert unabhängig der Kultur)

Datum	04.05. 2018	25.05. 2018	29.05. 2018	07.06. 2018	14.06. 2018	19.06. 2018	25.06. 2018	05.07. 2018	11.07. 2018	17.07. 2018*	24.07. 2018	01.08. 2018	07.08. 2018	14.08. 2018	20.08. 2018
BBCH Mohn	11	13	14	30	51	63	65	74	77	85	88	89	89	99	-
BBCH Gerste	-	-	11	13	21	21	33	49	51	55	59	75	80	87	-
BBCH Weißklee	-	1/0	1/0	3/1	4/3	4/3	5/4	6/5	6/5	7/6	7/6	8/7	8/8	9/8	-
Bestandesdichte	P		P, C1, B	P, C1, B	P, C1, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B				P, B	C
Pflanzhöhe		P, C1	P, C1, B	P, C1, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B				P, C, B	
Frisch- & Trockenmasse			P, C1	P, C1, B	P, C1, B	P, C, B	P, C, B	P, C		P, C, B					C
C/N Gehalt i.d. Trockenmasse			P		P, C	P, C, B	P, C, B	P, C, B		P, C, B					
Kulturpflanzen-deckungsgrad		P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	P, C, B	
Unkrautdeckungsgrad		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Unkrautarten					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Unkrautboniturnote			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Samen-/Kornertrag manuell														P, B	
Samen-/Kornertrag Drusch														P, B	
Strohertrag manuell														P, B	
Kapselgewicht manuell														P	
TKM														P, B	
Kapsel-/Ährenzahl														P, B	
Protein und Feuchte (%) im Korn														B	
Nmin	05.03. 2018	08.05. 2018	20.09. 2018												

Tab. A2 Übersicht der Boniturtermine im Sommermohn-Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2019 unter Angabe der untersuchten Kulturen (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee, X: Parzellenwert unabhängig der Kultur)

Datum	23.04. 2019	03.05. 2019	14.05. 2019	20.05. 2019	30.05. 2019	11.06. 2019	17.06. 2019	01.07. 2019	18.07. 2019	07.08. 2019
BBCH Mohn	11	-	15	16	30	51	59	77	81	89
BBCH Gerste	-	11	12	21	22	33	49	75	78	85
BBCH Weißklee	1/-	-	1/0	1/0	3/1	4/3	5/4	6/5	7/6	7/7
Bestandesdichte	P,C1	B		P,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B
Pflanzenhöhe			P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B
Frisch- und Trockenmasse				P,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	C
Blattfläche					P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B		
SPAD					P,C1,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B		
Reflektion					P,C1,B	P,C,B		P,C,B		
C/N Gehalt i.d. Trockenmasse				P,B	P,C,B		P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B
Kulturpflanzendeckungsgrad			P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B
Unkrautdeckungsgrad			x	x	x	x	x	x	x	x
Unkrautanzahl			x	x	x	x	x	x	x	x
Unkrautarten			x	x	x	x	x	x	x	x
Unkrautbiomasse				x	x	x	x	x	x	
Unkrautboniturnote			x	x	x	x	x	x	x	x
Samen-/Kornertrag manuell										P,B
Samen-/Kornertrag Drusch										P,B
Strohertrag manuell										P,B
Kapselgewicht manuell										P
TKM										P,B
Kapsel-/Ährenzahl										P,B
Protein und Feuchte (%) im Korn										B
Nmin	14.02. 2019	18.06. 2019	20.08. 2019							

Tab. A3 Übersicht der Boniturtermine im Sommermohn-Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2020 unter Angabe der untersuchten Kulturen (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee, X: Parzellenwert unabhängig der Kultur)

Datum	15.04. 2020	24.04. 2020	05.05. 2020	08.05. 2020	18.05. 2020	30.05. 2020	08.06. 2020	18.06. 2020	06.07. 2020	29.07. 2020	11.08. 2020
BBCH Mohn	11	14	16	17	30	51	60	69	85	-	99
BBCH Gerste	-	-	-	0	12	22	23	30	55	-	85
BBCH Weißklee	1/0	1/0	1/0	1/0	3/1	4/3	5/4	6/5	7/6	-	8/7
Bestandesdichte	P,C1			P,C1	P,C,B	P,C1,B	P,C,B	P,C,B			
Pflanzenhöhe		P,C1	P,C1	P,C1	P,C1,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B		P,C,B
Frisch- und Trockenmasse				P,C1	P,C1,B	P,C1,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B		C1,C2
Blattfläche				P,C1	P,C1,B	P,C1,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B		
SPAD				P	P,C1,B	P,C1,B		P,C,B			
Reflektion				P,C1	P,C1,B			P,C,B			
C/N Gehalt i.d. Trockenmasse					P,C1,B	P,C1,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B		
Kulturpflanzendeckungsgrad					P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	P,C,B	
Unkrautdeckungsgrad					x	x	x	x	x	x	
Unkrautanzahl					x	x	x	x	x	x	
Unkrautarten					x	x	x	x	x	x	
Unkrautbiomasse					x	x	x	x	x	x	
Unkrautboniturnote					x	x	x	x	x	x	
Samen-/Kornertrag manuell											P,B
Samen-/Kornertrag Drusch											P,B
Strohertrag manuell											P,B
Kapselgewicht manuell											P
TKM											P,B
Kapsel-/Ährenzahl											P,B
Protein und Feuchte (%) im Korn											B
Nmin	19.02. 2020	26.08. 2020									

Tab. A4 Trockenmasse (g m⁻²) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2018. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Trockenmasse (g m ⁻²)						
	29.05.18	07.06.18	14.06.18	19.06.18	25.06.18	05.07.18	17.07.18
	BBCH 14	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 63	BBCH 65	BBCH 74	BBCH 85
P	70,00 a ± 22,55	219,00 a ± 54,22	363,70 a ± 82,58	458,78 a ± 151,02	635,58 a ± 170,64	788,15 a ± 156,90	941,53 ab ± 67,89
PC1	66,75 a ± 23,89	209,50 a ± 54,84	360,85 a ± 16,37	360,90 a ± 131,32	734,33 a ± 168,10	713,73 a ± 276,47	743,58 abc ± 242,05
PC2	115,50 a ± 25,28	205,25 a ± 63,77	323,98 a ± 44,82	453,18 a ± 121,80	786,23 a ± 184,02	844,00 a ± 90,28	1086,90 a ± 176,27
PB2	64,25 a ± 16,46	209,00 a ± 68,29	376,15 a ± 110,49	420,05 a ± 57,80	687,68 a ± 146,38	704,48 a ± 183,59	718,83 bc ± 123,55
PB3	89,25 a ± 28,18	197,00 a ± 75,06	352,63 a ± 84,34	395,58 a ± 18,19	748,15 a ± 306,03	776,65 a ± 274,85	596,70 c ± 121,77
C1	25,50 a ± 24,50	68,75 a ± 28,72	141,35 a ± 37,59	148,40 a ± 92,82	453,63 a ± 75,18	674,83 a ± 118,87	
C2				53,55 ab ± 62,19	34,18 c ± 15,69	149,75 c ± 42,61	400,18 a ± 143,80
PC1	28,00 a ± 25,81	165,75 a ± 112,99	85,73 a ± 33,11	165,30 a ± 50,55	190,90 b ± 82,72	342,05 b ± 73,72	398,23 a ± 159,87
PC2				10,55 b ± 6,32	5,48 c ± 8,33	19,28 c ± 4,15	17,68 b ± 14,18
B2		51,50 ab ± 12,22	105,13 a ± 12,30	167,13 a ± 15,66	424,65 a ± 17,81	654,95 a ± 23,52	1086,78 a ± 25,23
B3		67,00 a ± 11,18	108,75 a ± 14,00	232,58 a ± 14,00	337,58 ab ± 22,33	516,35 a ± 25,04	949,03 ab ± 48,57
PB2		22,00 b ± 10,56	40,05 b ± 10,67	65,33 b ± 12,42	183,98 bc ± 13,27	199,08 b ± 14,83	452,88 bc ± 22,47
PB3		36,75 ab ± 11,58	64,15 ab ± 11,41	96,88 b ± 11,87	142,85 c ± 13,45	218,25 b ± 17,09	366,87 c ± 25,04

Tab. A5 Trockenmasse (g m⁻²) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2019. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Trockenmasse (g m ⁻²)					
	22.05.19	30.05.19	11.06.19	17.06.19	02.07.19	22.07.19
	BBCH 16	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 59	BBCH 77	BBCH 81
P	121,58 a ± 35,53	163,78 a ± 23,25	386,45 a ± 111,06	549,25 a ± 63,71	1144,73 a ± 138,29	1260,80 a ± 215,65
PC1	77,85 a ± 17,07	140,89 ab ± 45,94	341,95 ab ± 109,27	600,83 a ± 133,69	995,30 a ± 149,05	955,13 a ± 378,24
PC2	97,70 a ± 38,77	168,15 a ± 15,70	373,55 a ± 56,58	614,15 a ± 123,67	1028,28 a ± 160,28	1054,48 a ± 165,11
PB1	65,20 a ± 27,08	119,10 ab ± 18,56	221,90 abc ± 68,08	324,10 b ± 99,17	454,30 b ± 82,77	343,14 b ± 104,39
PB2	90,58 a ± 17,68	124,35 ab ± 46,00	182,23 bc ± 53,56	220,00 b ± 50,25	389,13 b ± 66,26	343,63 b ± 103,13
PB3	85,23 a ± 5,28	94,55 b ± 8,19	144,50 c ± 13,72	211,58 b ± 69,71	285,03 b ± 113,01	241,48 b ± 149,35
C1		41,05 a ± 20,58	211,63 a ± 22,86	259,58 a ± 89,81	427,05 a ± 47,62	481,00 a ± 135,43
C2		11,93 ab ± 3,68	99,70 b ± 47,84	133,58 b ± 20,64	287,38 b ± 64,74	441,10 a ± 76,78
PC1		25,45 ab ± 17,60	51,13 b ± 26,78	104,20 b ± 41,48	194,05 b ± 76,12	138,00 b ± 38,27
PC2		8,57 b ± 4,24	39,30 b ± 8,85	42,58 b ± 41,09	67,80 c ± 27,23	71,70 b ± 23,99
B1	50,35 a ± 13,42	122,55 ab ± 17,26	422,00 a ± 128,85	502,65 ab ± 187,22	970,73 a ± 135,55	1.373,15 a ± 427,52
B2	65,20 a ± 24,94	147,33 ab ± 34,07	378,63 ab ± 109,85	528,03 ab ± 52,27	886,90 ab ± 48,49	1.134,55 a ± 241,20
B3	75,13 a ± 35,00	160,50 a ± 33,44	445,63 a ± 65,62	604,43 a ± 68,58	958,83 a ± 174,47	1.107,40 a ± 287,07
PB1	65,33 a ± 30,57	89,60 b ± 10,14	203,58 b ± 50,59	313,55 b ± 17,20	566,80 b ± 235,09	871,80 a ± 133,19
PB2	53,20 a ± 12,40	120,75 ab ± 36,75	331,25 ab ± 88,35	432,03 ab ± 109,07	762,33 ab ± 116,35	790,23 a ± 248,71
PB3	84,98 a ± 21,95	130,60 ab ± 38,32	411,65 ab ± 106,33	520,90 ab ± 122,47	742,50 ab ± 142,44	813,00 a ± 31,44

Tab. A6 Trockenmasse (g m⁻²) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2020. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Trockenmasse (g m ⁻²)					
	08.05.20	19.05.20	30.05.20	09.06.20	18.06.20	06.07.20
	BBCH 17	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 60	BBCH 69	BBCH 85
P	29,40 a ± 9,34	129,38 a ± 47,94	319,15 a ± 118,85	712,40 a ± 209,02	893,98 a ± 176,29	1.728,85 a ± 502,22
PC1	20,45 a ± 8,63	64,38 a ± 22,52	202,25 a ± 55,60	410,43 a ± 88,92	692,03 a ± 194,92	1.157,18 a ± 200,36
PC2	36,23 a ± 18,90	119,13 a ± 56,04	297,60 a ± 79,39	503,63 a ± 189,30	783,90 a ± 303,22	1.431,5 a ± 304,07
PB1	35,20 a ± 13,90	126,5 a ± 74,64	342,30 a ± 96,13	717,20 a ± 149,83	913,38 a ± 204,09	1.588,08 a ± 240,54
PB2	25,40 a ± 13,08	86,05 a ± 20,75	333,70 a ± 114,84	597,08 a ± 211,35	930,48 a ± 176,80	1.417,78 a ± 247,90
PB3	25,43 a ± 15,43	101,23 a ± 91,85	214,35 a ± 57,65	500,28 a ± 245,50	680,45 a ± 113,33	1.302,95 a ± 224,11
C1	6,45 a ± 2,88	21,05 a ± 16,63	139,15 a ± 72,68	242,20 a ± 144,20	532,13 a ± 188,34	581,30 a ± 133,70
C2				7,80 b ± 1,47	48,00 bc ± 13,73	226,10 b ± 69,63
PC1	5,38 a ± 1,95	22,98 a ± 6,97	52,30 a ± 27,40	140,43 ab ± 11,33	293,48 ab ± 136,42	307,80 b ± 44,14
PC2				3,00 b ± 0,28	9,77 c ± 3,70	7,78 c ± 8,56
B1		6,25 ab ± 1,72	41,65 abc ± 5,33	99,75 ab ± 14,40	213,75 ab ± 51,00	759,10 a ± 215,38
B2		9,53 ab ± 3,60	55,65 a ± 2,00	99,88 ab ± 13,29	336,63 a ± 73,33	619,55 a ± 98,78
B3		11,63 a ± 2,33	44,80 ab ± 25,71	120,78 a ± 14,77	318,90 a ± 57,93	708,90 a ± 99,08
PB1		3,95 b ± 0,81	15,45 c ± 9,68	16,78 d ± 5,49	60,75 c ± 21,26	278,53 b ± 176,16
PB2		4,80 b ± 2,68	15,95 c ± 6,77	44,33 cd ± 32,60	132,90 bc ± 85,79	275,00 b ± 137,70
PB3		7,83 ab ± 2,93	26,90 bc ± 9,07	67,45 bc ± 14,47	164,50 bc ± 50,19	225,11 b ± 59,19

Tab. A7 Pflanzenhöhe (cm) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2018. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Pflanzenhöhe (cm)									
	25.05.18	29.05.18	07.06.18	14.06.18	19.06.18	25.06.18	05.07.18	11.07.18	17.07.18	14.08.18
	BBCH 13	BBCH 14	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 63	BBCH 65	BBCH 74	BBCH 77	BBCH 85	BBCH 99
P	10,85 a ± 0,47	14,35 a ± 0,57	37,45 a ± 4,48	64,10 a ± 3,19	93,05 a ± 2,64	99,95 a ± 3,67	100,45 a ± 2,02	99,85 a ± 2,87	98,90 a ± 1,82	99,35 a ± 6,06
PC1	8,80 b ± 0,85	12,70 a ± 2,21	35,35 a ± 2,31	58,40 a ± 8,43	85,15 a ± 9,02	87,10 a ± 7,50	101,70 a ± 5,80	97,80 a ± 7,80	94,00 a ± 7,46	99,50 a ± 6,84
PC2	9,85 ab ± 1,50	12,75 a ± 1,61	37,10 a ± 3,56	60,00 a ± 2,73	88,25 a ± 2,72	94,40 a ± 6,62	91,50 a ± 12,01	97,10 a ± 6,43	95,35 a ± 5,32	94,55 a ± 4,65
PB2	10,05 ab ± 0,81	14,65 a ± 2,54	37,35 a ± 3,48	62,85 a ± 4,22	89,95 a ± 5,84	94,30 a ± 8,15	98,95 a ± 9,09	101,15 a ± 6,67	98,40 a ± 6,16	98,95 a ± 10,27
PB3	9,10 ab ± 0,38	12,20 a ± 1,43	37,55 a ± 2,62	60,60 a ± 2,73	90,40 a ± 5,60	93,30 a ± 6,60	93,25 a ± 6,44	91,10 a ± 5,88	92,20 a ± 6,99	91,3 a ± 4,20
C1		6,75 a ± 0,38		16,30 a ± 2,81	29,60 a ± 23,65	17,70 b ± 2,98	20,60 a ± 3,90	16,60 ab ± 4,53	-	7,15 c ± 1,60
C2				2,00 b ± 0,78	4,48 ab ± 1,85	7,95 c ± 2,01	9,20 b ± 1,70	10,40 bc ± 1,52	11,90 b ± 1,16	12,30 a ± 0,89
PC1		6,25 a ± 0,53		17,55 a ± 2,70	22,35 ab ± 2,65	24,05 a ± 1,91	26,20 a ± 2,78	21,75 a ± 3,62	21,25 a ± 0,91	11,75 ab ± 2,33
PC2				2,65 b ± 0,38	4,40 b ± 2,30	7,20 c ± 1,37	7,90 b ± 2,09	9,00 c ± 1,40	9,75 b ± 2,46	8,10 bc ± 1,88
B2		5,20 a ± 0,70		25,70 a ± 2,30	32,20 a ± 1,80	35,30 a ± 0,80	65,10 a ± 2,80	72,90 a ± 2,40	73,60 a ± 1,90	66,30 a ± 1,00
B3		5,20 a ± 0,70		24,50 a ± 3,1	30,50 a ± 2,70	37,20 a ± 2,80	63,90 a ± 5,70	72,80 a ± 5,30	72,90 a ± 4,20	64,90 a ± 2,60
PB2		5,40 a ± 0,60		37,1 a ± 18,70	32,40 a ± 3,60	39,70 a ± 3,60	66,90 a ± 7,30	71,40 ab ± 3,80	70,90 a ± 5,90	65,30 a ± 3,50
PB3		4,20 a ± 0,50		26,10 a ± 3,80	33,60 a ± 4,80	43,70 a ± 6,40	63,90 a ± 3,20	64,70 b ± 2,70	69,30 a ± 8,70	60,40 a ± 5,30

Tab. A8 Pflanzenhöhe (cm) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2019. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Pflanzenhöhe (cm)							
	14.05.19 BBCH 15	22.05.19 BBCH 16	30.05.19 BBCH 30	11.06.19 BBCH 51	17.06.19 BBCH 59	02.07.19 BBCH 77	22.07.19 BBCH 81	07.08.19 BBCH 89
P	4,97 a ± 0,59	9,14 a ± 0,67	18,58 a ± 2,06	54,01 a ± 1,66	77,69 a ± 2,17	116,11 a ± 2,20	109,53 a ± 7,32	113,08 a ± 2,44
PC1	4,70 a ± 0,82	9,30 a ± 0,41	17,02 a ± 3,21	53,10 a ± 6,05	76,30 a ± 4,51	113,50 a ± 1,54	107,40 a ± 7,49	107,30 a ± 6,08
PC2	4,85 a ± 0,30	9,32 a ± 0,82	16,48 a ± 2,47	54,85 a ± 1,39	77,93 a ± 3,07	117,63 a ± 3,26	109,40 a ± 8,50	111,80 a ± 3,07
PB1	5,10 a ± 0,60	8,17 a ± 1,04	15,90 a ± 1,75	42,08 b ± 6,02	61,88 b ± 7,20	93,63 b ± 6,97	87,90 b ± 8,04	91,20 b ± 3,56
PB2	5,00 a ± 0,77	8,32 a ± 0,61	14,95 a ± 3,07	41,38 b ± 4,82	54,10 b ± 7,15	81,80 c ± 7,73	77,95 b ± 7,39	81,85 c ± 2,31
PB3	4,80 a ± 0,43	8,70 a ± 1,18	15,83 a ± 2,52	42,93 b ± 7,22	56,60 b ± 3,81	81,57 c ± 5,72	78,35 b ± 5,38	83,35 c ± 3,62
C1	1,43 a ± 0,46	2,93 a ± 0,17	5,60 a ± 0,76	13,13 ab ± 2,95	21,12 a ± 1,77	21,38 a ± 1,15	19,05 a ± 0,75	17,95 a ± 0,57
C2	0,37 a ± 0,10	1,23 b ± 0,29	3,03 b ± 0,33	8,68 b ± 1,43	15,97 b ± 0,99	21,45 a ± 0,83	17,95 a ± 1,18	18,05 a ± 0,47
PC1	1,37 a ± 0,83	2,75 a ± 0,58	6,15 a ± 0,73	17,23 a ± 3,54	21,20 a ± 0,92	21,65 a ± 0,64	18,80 a ± 1,43	17,70 a ± 1,87
PC2	0,36 a ± 0,05	1,50 b ± 0,26	3,00 b ± 0,57	9,73 b ± 1,35	16,27 b ± 0,54	21,08 a ± 2,82	18,90 a ± 2,31	16,90 a ± 1,16
B1	8,30 a ± 0,50	13,20 a ± 0,20	20,80 a ± 1,30	40,80 ab ± 1,40	58,10 a ± 2,80	76,90 a ± 1,50	77,40 a ± 3,00	75,80 ab ± 3,50
B2	8,50 a ± 0,70	12,90 a ± 0,40	21,20 a ± 1,40	42,90 ab ± 0,90	60,10 a ± 3,30	78,20 a ± 2,40	75,60 a ± 1,50	73,90 ab ± 2,30
B3	8,40 a ± 0,80	17,10 a ± 8,90	22,30 a ± 1,40	42,00 ab ± 2,60	58,70 a ± 1,90	73,70 a ± 1,50	74,90 a ± 2,10	68,60 b ± 2,50
PB1	8,10 a ± 0,70	12,60 a ± 0,20	19,50 a ± 0,50	39,90 b ± 1,90	59,20 a ± 6,60	78,10 a ± 2,30	78,30 a ± 1,50	77,20 a ± 2,90
PB2	8,80 a ± 0,70	12,30 a ± 0,50	20,00 a ± 1,70	39,90 b ± 1,20	57,60 a ± 6,10	75,90 a ± 2,60	74,40 a ± 4,60	72,30 ab ± 5,50
PB3	8,10 a ± 0,80	12,20 a 0,90	21,10 a ± 0,40	44,20 a ± 2,40	62,00 a ± 3,60	75,90 a ± 3,00	73,90 a ± 2,90	71,20 ab ± 3,80

Tab. A9 Pflanzenhöhe (cm) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste am Campus Klein-Altendorf 2020. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, p<0,05; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Pflanzenhöhe (cm)								
	24.04.20	05.05.20	08.05.20	19.05.20	30.05.20	09.06.20	18.06.20	06.07.20	11.08.20
	BBCH 14	BBCH 16	BBCH 17	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 60	BBCH 69	BBCH 85	BBCH 99
P	2,75 a ± 0,48	6,80 a ± 1,30	8,68 a ± 1,43	19,55 a ± 1,63	45,65 a ± 6,97	83,00 ab ± 3,86	121,15 ab ± 5,62	124,45 ab ± 1,65	125,95 ab ± 5,15
PC1	2,70 a ± 0,29	6,38 a ± 1,14	8,35 a ± 0,26	17,15 a ± 0,70	43,50 a ± 3,38	77,60 b ± 1,03	112,05 b ± 3,97	118,15 b ± 5,09	115,85 b ± 7,19
PC2	2,43 a ± 0,64	7,45 a ± 1,01	8,95 a ± 1,20	18,15 a ± 2,44	44,35 a ± 4,66	86,25 a ± 3,89	123,85 a ± 3,08	129,75 a ± 3,04	129,30 a ± 3,69
PB1	2,90 a ± 0,36	7,25 a ± 1,37	8,43 a ± 0,43	19,43 a ± 0,50	47,70 a ± 2,32	81,45 ab ± 1,80	122,35 a ± 4,24	126,95 ab ± 5,67	127,40 a ± 4,60
PB2	3,05 a ± 0,53	7,93 a ± 1,52	8,98 a ± 0,57	18,85 a ± 2,00	45,10 a ± 3,84	79,00 b ± 1,63	119,15 ab ± 4,47	125,00 ab ± 3,20	122,20 ab ± 2,20
PB3	2,75 a ± 0,37	7,03 a ± 1,79	8,38 a ± 1,01	19,00 a ± 1,96	42,20 a ± 4,53	79,55 b ± 2,55	115,70 ab ± 3,89	121,50 ab ± 5,88	121,75 ab ± 4,43
C1	1,70 a ± 0,41	2,65 a ± 0,31	3,18 a ± 0,21	3,50 a ± ,08	7,90 a ± 0,60	10,45 a ± 1,04	19,40 a ± 1,86	30,80 a ± 2,78	23,20 a ± 3,09
C2					1,34 b ± 0,28	4,08 b ± 0,57	9,00 b ± 0,49	21,60 b ± 4,82	21,25 a ± 2,64
PC1	1,50 a ± 0,29	2,45 a ± 0,13	3,20 a ± 0,51	3,78 a ± 0,30	9,38 a ± 2,05	11,35 a ± 2,04	22,00 a ± 3,25	26,25 ab ± 1,40	19,80 a ± 1,03
PC2					1,25 b ± 0,19	2,83 b ± 0,51	8,00 b ± 1,41	12,20 c ± 2,47	10,70 b ± 2,61
B1				9,30 a ± 0,30	19,40 a ± 1,10	23,70 a ± 0,40	43,50 a ± 1,60	71,80 a ± 1,60	73,10 a ± 1,60
B2				9,50 a ± 0,60	18,10 a ± 1,20	24,80 a ± 1,10	45,50 a ± 2,50	70,60 a ± 4,40	72,30 a ± 2,10
B3				9,30 a ± 0,30	18,90 a ± 0,70	24,60 a ± 1,20	44,70 a ± 2,80	69,50 a ± 2,30	70,10 a ± 2,70
PB1				9,00 a ± 0,10	17,30 a ± 0,90	23,20 a ± 1,30	46,80 a ± 1,80	60,70 a ± 11,70	69,70 a ± 4,50
PB2				9,20 a ± 0,20	16,60 a ± 0,80	23,80 a ± 2,30	46,40 a ± 2,80	65,60 a ± 4,50	70,00 a ± 4,30
PB3				9,50 a ± 0,40	25,60 a ± 13,10	24,40 a ± 1,60	46,50 a ± 2,70	68,50 ± 0,50	71,70 a ± 2,40

Tab. A10 Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte (%) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste im Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2018. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Stickstoff (%)						Kohlenstoff (%)					
	29.05.18	14.06.18	19.06.18	25.06.18	05.07.18	17.07.18	29.05.18	14.06.18	19.06.18	25.06.18	05.07.18	17.07.18
	BBCH 14	BBCH 51	BBCH 63	BBCH 65	BBCH 74	BBCH 85	BBCH 14	BBCH 51	BBCH 63	BBCH 65	BBCH 74	BBCH 85
P	3,40 a ± 0,16	2,38 a ± 0,15	2,26 a ± 0,44	1,55 a ± 0,36	1,73 a ± 0,35	1,47 a ± 0,15	32,47 a ± 2,03	36,10 a ± 0,53	38,50 a ± 0,79	37,30 a ± 0,83	37,15 a ± 2,93	32,76 a ± 4,94
PC1	3,00 a ± 0,28	1,77 bc ± 0,38	1,91 a ± 0,27	1,40 a ± 0,38	1,82 a ± 0,28	1,54 a ± 0,33	32,63 a ± 2,74	34,02 a ± 2,15	38,68 a ± 0,64	34,20 a ± 6,65	35,89 a ± 4,52	36,83 a ± 1,59
PC2	3,02 a ± 0,22	2,22 ab ± 0,11	2,13 a ± 0,19	1,40 a ± 0,26	1,74 a ± 0,42	1,50 a ± 0,27	29,49 a ± 3,81	35,85 a ± 1,01	38,91 a ± 0,70	35,23 a ± 1,67	38,47 a ± 1,55	32,76 a ± 2,21
PB2	3,15 a ± 0,58	2,04 abc ± 0,25	1,87 a ± 0,15	1,32 a ± 0,22	1,59 a ± 0,32	1,53 a ± 0,25	29,12 a ± 1,53	35,53 a ± 1,43	39,43 a ± 0,71	36,06 a ± 2,79	38,64 a ± 1,61	35,33 a ± 3,53
PB3	3,20 a ± 0,32	1,66 c ± 0,14	1,91 a ± 0,18	1,34 a ± 0,30	1,53 a ± 0,39	1,44 a ± 0,19	30,14 a ± 3,89	25,12 a ± 0,45	38,63 a ± 0,94	36,42 a ± 0,46	39,26 a ± 1,17	36,96 a ± 0,96
C1		3,31 a ± 0,16	3,06 a ± 0,21	2,96 b ± 0,32	2,46 a ± 0,22			34,75 a ± 0,28	32,30 a ± 3,12	36,07 a ± 4,00	33,24 ab ± 5,29	
C2		3,11 a ± 0,44	3,04 a ± 1,03	3,92 a ± 0,38	2,21 a ± 0,41	2,25 a ± 0,73		34,98 a ± 1,62	24,47 a ± 8,16	36,51 a ± 2,43	23,57 b ± 3,06	27,59 a ± 9,11
PC1			2,41 a ± 0,31	2,91 b ± 0,18	1,93 a ± 0,38	2,00 a ± 0,03			28,67 a ± 2,80	39,20 a ± 0,75	37,56 a ± 5,49	33,07 a ± 2,10
PC2			2,65 a ± 1,31	3,00 b ± 0,35	1,84 a ± 0,48	1,13 b ± 0,20			27,72 a ± 11,95	37,31 a ± 0,78	30,56 ab ± 6,48	16,15 b ± 3,25
B2		4,09 a ± 0,66	3,65 a ± 1,01	2,83 a ± 0,81	2,36 a ± 0,73	1,67 a ± 0,48		37,98 a ± 0,42	39,76 a ± 1,89	41,26 ab ± 1,25	41,70 a ± 1,57	40,29 a ± 0,59
B3		3,22 ab ± 0,62	3,04 a ± 0,53	2,51 a ± 0,71	2,15 a ± 0,70	1,64 a ± 0,39		37,12 a ± 0,99	40,05 a ± 1,45	41,76 a ± 0,73	40,16 a ± 1,10	40,32 a ± 1,38
PB2		3,14 ab ± 0,56	2,65 a ± 0,41	2,30 a ± 0,74	2,20 a ± 0,79	1,73 a ± 0,39		38,49 a ± 0,83	36,53 a ± 2,83	40,57 ab ± 1,89	42,11 a ± 0,16	39,76 a ± 1,97
PB3		2,35 b ± 0,57	2,30 a ± 0,30	1,71 a ± 0,18	1,70 a ± 0,17	1,42 a ± 0,11		33,43 a ± 5,75	38,87 a ± 0,67	38,82 b ± 0,31	42,74 a ± 2,21	39,00 a ± 3,87

Tab. A12 Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte (%) von Sommermohn, Weißklee und Sommergerste im Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf 2020. Angegeben sind die Mohn BBCH-Stadien. Kleinbuchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten für die jeweilige Kultur zum jeweiligen Datum (ANOVA + Tukey-HSD, $p < 0,05$; P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Variante	Stickstoff (%)					Kohlenstoff (%)				
	19.05.20	30.05.20	09.06.20	18.06.20	06.07.20	19.05.20	30.05.20	09.06.20	18.06.20	06.07.20
	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 60	BBCH 69	BBCH 85	BBCH 30	BBCH 51	BBCH 60	BBCH 69	BBCH 85
P	3,83 a ± 0,20	2,99 a ± 0,41	2,27 a ± 0,21	2,12 ab ± 0,35	2,83 a ± 1,22	35,29 a ± 1,56	37,60 a ± 0,34	38,03 a ± 0,69	37,32 a ± 0,63	38,38 a ± 1,75
PC1	3,72 a ± 0,27	2,41 b ± 0,11	2,09 a ± 0,10	2,24 ab ± 0,27	2,51 a ± 0,32	37,96 a ± 0,58	37,43 a ± 0,45	37,75 a ± 1,05	37,07 ab ± 0,63	40,44 a ± 0,55
PC2	3,53 a ± 0,70	2,67 ab ± 0,10	1,93 a ± 0,22	2,78 a ± 0,57	2,23 a ± 0,17	32,32 a ± 3,64	37,32 a ± 0,28	37,85 a ± 0,35	36,05 b ± 0,63	38,63 a ± 1,98
PB1	3,60 a ± 0,89	2,62 ab ± 0,21	2,18 a ± 0,17	2,00 b ± 0,20	1,95 a ± 0,23	32,21 a ± 4,12	37,28 a ± 0,20	36,33 a ± 3,47	37,13 ab ± 0,22	39,70 a ± 2,59
PB2	3,63 a ± 0,38	2,42 b ± 0,15	2,77 a ± 0,84	1,97 b ± 0,25	2,08 a ± 0,21	34,30 a ± 1,89	37,18 a ± 0,56	37,95 a ± 0,74	37,18 ab ± 0,39	39,02 a ± 2,09
PB3	3,59 a ± 1,11	2,25 b ± 0,09	2,37 a ± 0,44	2,12 ab ± 0,16	2,23 a ± 0,73	32,14 a ± 7,92	37,12 a ± 0,20	37,75 a ± 0,58	37,06 ab ± 0,38	38,46 a ± 0,62
C1	3,37 a ± 0,99	3,31 a ± 0,55	3,30 b ± 0,67	1,75 b ± 0,61	3,50 ab ± 0,25	34,03 a ± 9,02	28,56 a ± 10,21	31,52 a ± 4,18	14,91 b ± 4,03	38,11 a ± 3,17
C2			5,09 a ± 0,39	3,79 a ± 0,69	4,19 a ± 0,33			34,81 a ± 1,33	28,99 a ± 4,59	37,16 a ± 1,46
PC1	3,31 a ± 0,55	3,04 a ± 1,09	3,15 b ± 0,11	1,92 b ± 0,54	3,00 b ± 0,40	35,75 a ± 1,61	34,33 a ± 4,77	32,58 a ± 1,47	17,86 ab ± 6,72	35,76 ab ± 3,71
PC2			3,01 b ± 0,06	1,16 b ± 0,59	2,09 a ± 0,46			30,37 a ± 2,55	11,86 b ± 5,90	27,75 b ± 5,99
B1	5,40 a ± 0,35	4,53 a ± 0,47	4,18 a ± 0,46	4,00 a ± 0,34	3,33 a ± 0,34	42,10 a ± 3,05	39,24 a ± 0,31	34,91 a ± 4,20	38,01 a ± 1,44	39,79 a ± 1,43
B2	5,35 a ± 0,41	3,93 ab ± 0,27	3,79 ab ± 0,44	3,36 ab ± 0,70	2,82 a ± 0,44	41,07 a ± 0,92	39,52 a ± 0,91	36,20 a ± 2,02	35,01 a ± 1,72	39,95 a ± 1,02
B3	5,17 a ± 1,00	3,95 ab ± 0,36	3,62 ab ± 0,25	2,84 b ± 0,31	2,55 a ± 0,27	42,06 a ± 1,44	40,05 a ± 0,50	34,26 a ± 2,10	35,50 a ± 3,14	39,78 a ± 0,97
PB1	4,19 a ± 0,81	3,88 ab ± 0,27	2,62 c ± 0,43	3,33 ab ± 0,34	2,45 a ± 0,26	41,11 a ± 1,78	39,08 a ± 1,05	37,75 a ± 4,13	37,14 a ± 1,91	35,42 a ± 8,55
PB2	4,49 a ± 0,78	3,30 bc ± 0,68	3,19 bc ± 0,44	2,82 b ± 0,44	2,41 a ± 0,13	42,38 a ± 1,43	39,63 a ± 0,17	39,71 a ± 0,72	34,14 a ± 5,11	40,07 a ± 1,50
PB3	4,75 a ± 0,39	2,84 c ± 0,300	3,30 abc ± 0,30	2,55 b ± 0,27	2,01 a ± 0,30	43,08 a ± 1,95	39,57 a ± 0,14	37,42 a ± 2,37	31,82 a ± 3,18	38,31 a ± 2,48

Tab. A13 Auflistung der einzelnen Unkrautarten in den jeweiligen Varianten und Versuchsjahren* im Mischanbauversuch am Campus Klein-Altendorf kumuliert über die einzelnen Boniturtermine (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

Unkrautart	P	B1	B2	B3	PB1	PB2	PB3	C1	C2	PC1	PC2
<i>Aphanes arvensis</i>		■					◆	■			
<i>Capsella bursa-pastoris</i>							●	■	●	■	
<i>Chenopodium album</i>	●	■	◆	■	◆	●	■	◆	●	■	◆
<i>Cirsium arvense</i>	●	■	■	●	◆	●	■	●	■	●	■
<i>Echinochloa crus-galli</i>	●			●	●			●			
<i>Equisetum arvense</i>								■			
<i>Lamium purpureum</i>	■							●			
<i>Matricaria sp.</i>	●	■		●	●		●	■	●	■	●
<i>Papaver rhoeas</i>	●									●	
<i>Plantago major</i>	■										
Poaceae						●			●		◆
<i>Polygonum aviculare</i>	■			◆			◆				◆
<i>Senecio vulgaris</i>	●	■		●	●		●	●	■	●	■
<i>Solanum nigrum</i>	■	◆	■	■	●	■		●	■	◆	■
<i>Stellaria media</i>		◆			◆			◆	◆		
<i>Taraxacum officinale</i>			●				●		●	●	
<i>Veronica agrestis</i>								●	●		

*● 2018; ■ 2019, ◆ 2020

Tab. A14 Entwicklungsstadien bei Mohn (Adaptierte BBCH – Skala)

Code	EC Stadium	Beschreibung
0 Keimung	0-08	Keimung bis Auflaufen
	09	Spross bzw. Blatt durchbricht die Bodenoberfläche, Keimblätter sichtbar
	10	Keimblätter voll entfaltet
1 Blattentwicklung, Rosettenbildung	11	1. Laubblatt entfaltet
	12	2. Laubblatt entfaltet
	13	3. Laubblatt entfaltet
	14-19	Rosettenwachstum: 4. bis 9. oder mehr Laubblätter entfaltet
	30	Beginn des Längenwachstums
3 Längenwachstum und Schossen (Haupttrieb)	31	1. sichtbar gestrecktes Internodium
	32	2. sichtbar gestrecktes Internodium
	33	3. sichtbar gestrecktes Internodium
	34- 39	4. bis maximale Anzahl gestreckter Internodien sichtbar
	51	Blütenknospe in mitten der obersten Blätter sichtbar
5 Entwicklung der Blütenanlage (Hauptspross)	52	Blütenknospe überragt die obersten Blätter
	53	Blütenknospe hängend
	55	Blütenknospe richtet sich auf erste Blütenblätter sichtbar
	59	Blütenknospe aufrecht, Blütenblätter sichtbar, Blüte noch geschlossen
	60	Blütenblätter entfalten sich
6 Blüte der Hauptinfloreszenz	61	Blüte ist voll entfaltet und geöffnet
	69	Ende der Blüten, Blütenblätter abgefallen
	70	Kapsel grün, 10 % ihrer Endgröße erreicht
7 Fruchtbildung	75	Kapsel leicht bemehlt, 50 % ihrer Endgröße erreicht
	79	Kapsel braun, sortenspezifische Endgröße erreicht
	80	Beginn der Reife, Samen weiß
8 Ausreifen der Kapsel, Samenreife	85	Kapsel leicht bemehlt, Samen hellbraun
	87	Kapsel braun, Samen kastanienbraun
	88	Kapsel braun und weich, Samen hellgrau, färben nach
	89	Kapsel braun, trocken und fest, Samen metallic blaugrau, färben nicht nach
	Wichtig: Beschreibung der Abreife sämtlicher Seitentriebe mit Doppelboniturnote (Haupttrieb/Seitentrieb)	H/S

9 Absterben	91	Kapselreife abgeschlossen, Laub aber noch grün
	93	Beginn der Blattverfärbung
	95	50 % der Blätter verfärbt
	99	Erntegut, Druschreife

Parzellenpläne der Versuchsanlagen 2018, 2019 und 2020

2018

	Norden											
	P	B3	PB2	PC2	C1	PC1	B2	C2	PC2	PC1	PB3	B3
	B2	PC1	PC2	PB3	C2	P	PB3	P	B3	B2	PB2	C1
3 m	PB3	C2	C1	B2	B3	PB2	PC1	PB2	C1	PC2	P	C2
	Süden											
	← 10 m →											

2019

	Norden			
	C1	PC2	B1	PB2
	P	PB1	B3	C2
	PB3	B2	PC1	P
	C2	P	PC2	PB1
	PB2	C1	P	B2
	B1	PC1	PB3	B3
	PC1	C2	B1	C1
	PB1	P	B2	P
	PC2	B3	PB2	PB3
	P	PB2	C2	PC2
	B3	C1	PB1	B1
3 m	B2	PB3	P	PC1
	Süden			
	← 10 m →			

2020

	Norden			
	PC1	P	PB3	B2
	B1		C1	B3
	PC2	C2	PB2	
	PB3		B3	PC2
	C2	B2	PB2	PC1
	C1	B1	C2	PC1
	B3	PB3	PC1	B1
	B2	PB1	C1	PB2
	PB1	PC2	P	C2
	P	PC1	B2	PB3
	C2	B3	PB1	
3 m	PB2	B1	PC2	C1
	Süden			
	← 10 m →			

Abb. A1 Parzellenpläne der Versuchsanlagen zum Feldversuch Sommermohn-Mischanbau am Campus Klein-Altendorf 2018, 2019 und 2020 (P: Poppy/ Sommermohn, B: Barley/Sommergerste, C: Clover/Weißklee)

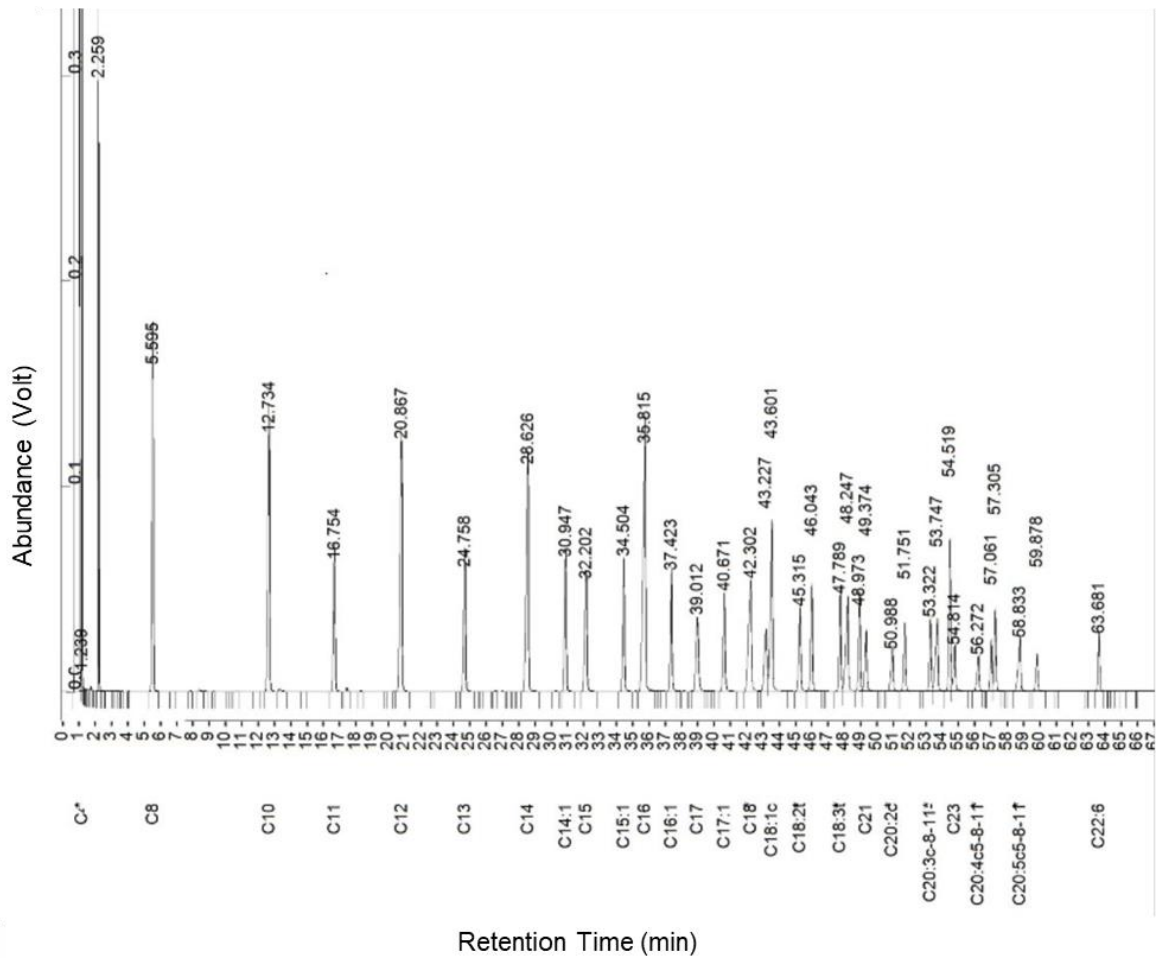


Abb. A2 Chromatogramm der Fettsäuremethylester-Standards

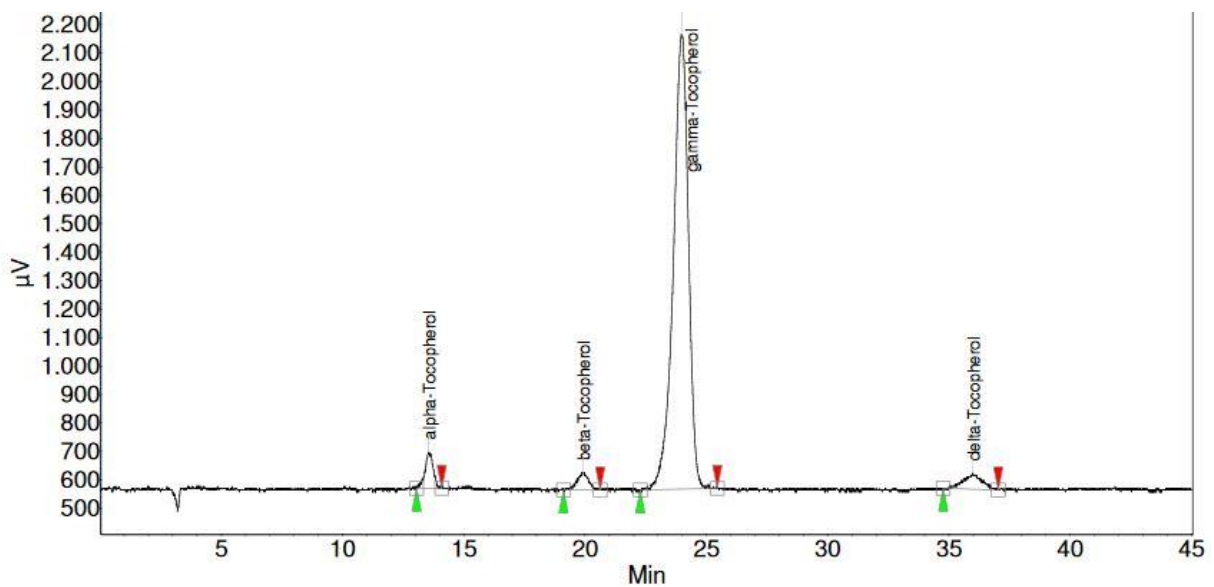


Abb. A3 Chromatogramm der Standard Tocopherole (α , β , γ , δ)

Sensorik-Formulare:

F1: Prüferhinweise zum Verhalten vor und während einer Panelprüfung

Hinweise zur Panelschulung

Folgendes ist VOR der Prüfung von Seiten der Prüfer zu beachten:

1. Raucher mindestens eine Stunde vorher nicht rauchen, Kleidung sollte auch nicht nach Rauch riechen
2. Kaffeekonsum, Kaugummikauen, Bonbon lutschen, starkes Parfüm sowie stark gewürzte Speisen mit Knoblauch und Zwiebeln sollten mindestens eine Stunde vor der Prüfung vermieden werden
3. Bitte teilen Sie dem Pannelleiter mit, wenn:
 - Sie Nahrungsmittelallergien haben
 - Sie bei bestimmten Wahrnehmungen besonders sensibel sind
 - Sie erkältet sind
 - Sie sonstige Beeinträchtigungen der Geruchs- und Geschmackswahrnehmung verspüren

Folgendes ist WÄHREND der Prüfung von Seiten der Prüfer zu beachten:

1. Prüfungen ernst nehmen:
 - nicht reden
 - kein Handy während der Prüfung
 - nicht anschauen oder miteinander reden
2. Prüfbogen gründlich lesen und Fragen stellen, falls es Unklarheiten gibt
3. Melden, falls Nachschub an Neutralisationsmittel benötigt wird
5. Prüfproben sollten/können nach dem Verkosten ausgespuckt werden, um den Magen so wenig wie möglich zu belasten (Speibecher)
6. Die Verkostung von Proben erfolgt von links nach rechts
7. Neutralisationsmittel nutzen, um Ermüdungserscheinungen hinauszuzögern
8. Teilen Sie dem Pannelleiter mit, wenn:
 - Sie mit dem Probenumfang überfordert sind
 - Sie mehr Zeit für die Bewertung benötigen
 - die Fragestellung nicht eindeutig zu verstehen ist
 - Sie besondere Auffälligkeiten an den Proben feststellen
 - äußere Faktoren Ihre Konzentration stören (Lärm, Geruch, Zeit)

F2: Prüfbogen einfach beschreibende Prüfung Mohnsamen

Einfach beschreibende Prüfung - Mohnsamen

Name:

Datum:

Produkt: Mohnsamen

Prüfaufgabe: Ziel ist die Erarbeitung einer Attributliste für die unten aufgelisteten Merkmale. Verkosten Sie die zwei vorliegenden Mohnsamenproben und beschreiben Sie die von Ihnen wahrgenommenen Merkmalseigenschaften objektiv. Beginnen Sie mit dem Aussehen/Farbe und fahren Sie dann mit dem Geruch, Geschmack und der Textur fort. Neutralisieren Sie nach der ersten Probe mit Wasser und Weißbrot. Warten Sie 2 Minuten nach dem Neutralisieren, bevor Sie zur nächsten Probe übergehen. Bitte verkosten Sie die Proben von links nach rechts einzeln und ohne Rückverkosten.

Merkmal	Merkmalseigenschaften der Probe 097	Merkmalseigenschaften der Probe 322
Geruch		
Aussehen/Farbe		
Geschmack		
Textur		

F3: Prüfbogen: Einfach beschreibende Prüfung Mohnöle

Einfach beschreibende Prüfung - Mohnöle

Name:

Datum:

Produkt: Mohnöle

Prüfaufgabe: Ziel ist die Erarbeitung einer Attributliste für die unten aufgelisteten Merkmale. Verkosten Sie die zwei vorliegenden Mohnölproben und beschreiben Sie die von Ihnen wahrgenommenen Merkmalseigenschaften objektiv. Beginnen Sie mit dem Aussehen/Farbe und fahren Sie dann mit dem Geruch, Geschmack und der Textur fort. Neutralisieren Sie nach der ersten Probe mit Wasser und Weißbrot. Warten Sie 2 Minuten nach dem Neutralisieren, bevor Sie zur nächsten Probe übergehen. Bitte verkosten Sie die Proben von links nach rechts einzeln und ohne Rückverkosten. Die Proben können Sie nach dem Verkosten in den Speibecher spucken.

Merkmal	Merkmalseigenschaften der Probe 134	Merkmalseigenschaften der Probe 589
Geruch		
Farbe/Aussehen		
Geschmack		
Textur		

F4: Gruppenprotokoll der einfach beschreibenden Prüfung des ersten Termins - Mohnsamen

Merkmal	Attribut	Anzahl der Nennungen der Probe 097	Anzahl der Nennungen der Probe 322	
Geruch	süßlich	6	5	
	mohnartig	6	2	
	erdig	3	3	
	muffig	3	1	
	dumpf	1	1	
	grasig/grün	3	4	
	fettig	2	3	
	bitter	1	0	
	nussig	6	6	
	ranzig	2	4	
	herb	1	0	
	heuartig/strohig	4	1	
	Knete	2	2	
	künstlich	1	0	
	kunststoffartig	1	0	
	neutral	0	2	
	kräftig	2	0	
	weich	0	1	
	Farbe/Aussehen	grau/bläulich	11	0
		hellgrau	3	0
dunkler Stahl		1	0	
braun		6	1	
dunkelgrau		2	0	
ocker		0	1	
beige		0	10	
sandsteinfarbend		0	4	
braun		6	1	
cremefarbend		0	1	
ungleichmäßig (Farbe)		8	0	
Farbverlauf (Samen)		1	0	
Maßerung		1	1	
homogen (Farbe)		0	6	
matt		3	4	
nierenförmig		1	3	
raue Oberfläche		2	1	
glatte Oberfläche		0	1	
rundlich		2	1	
homogen (Größe)		3	3	
klein				
inhomogene Körner (Größe)		1	2	
blass		1	0	
Geschmack		neutral	1	1
		nussig	12	12
		süß	9	6

Merkmal	Attribut	Anzahl der Nennungen der Probe 097	Anzahl der Nennungen der Probe 322
Textur	erdig	3	6
	grasig/grün	5	1
	muffig	1	2
	alt	0	1
	herb	2	0
	waldbodenartig	0	1
	ranzig	0	3
	strohig	0	2
	bitter	2	2
	fettig	1	2
	faulig/schimmelartig	0	1
	pilzartig	0	2
	Knete	0	1
	mohnartig	4	1
	adstringierend	1	0
	rau	3	3
	kratzig	1	0
	knackig	5	1
	knusprig	0	2
	gleichmäßig	1	0
	trocken	1	2
	austrocknend	2	1
	hart -> fest	3	3
	breiig	1	4
	knatschig	0	1
	klebrig	0	1
	mehlig	0	1
	perlartig	1	0
	krümelig	1	1
	sandig	5	4
	körnig	9	4
	griesig	2	2
klumpig	0	2	

F5: Gruppenprotokoll der einfach beschreibenden Prüfung des ersten Termins - Mohnöle

Merkmal	Attribut	Anzahl der Nennungen der Probe 134	Anzahl der Nennungen der Probe 589	
Geruch	Mohnaroma	6	1	
	nussig	12	6	
	erdig	4	4	
	fettig	4	2	
	muffig/modrig	1	2	
	herb	1	0	
	süß/fruchtig/blumig	5	2	
	grasig/grün	4	12	
	frisch	1	1	
	Wolfsmilchartig	0	3	
	strohig	1	0	
	heuartig	0	1	
	bitter	0	1	
	stechend	0	1	
	ranzig	0	2	
	pilzartig/waldbodenartig	0	3	
	Ton	1/0	0	
	Farbe/Aussehen	hellgelb	10	4
		grünlich/ gelb	2	2
gelb		5	8	
zitronengelb		1	1	
verdünnt/wässrig		1	1	
viskos		2	1	
klar/durchsichtig		12	10	
sedimentfrei		1	1	
homogen/gleichmäßig		3	2	
glänzend		4	3	
inhomogen		0	0	
Schlieren		0	2	
blass		1	0	
Geschmack	mohnartig	6	4	
	süß	3	2	
	nussig	8	7	
	erdig	1	5	
	waldbodenartig	1	1	
	pilzig/muffig	0	4	
	ölig	5	3	
	schwer	1	0	
	herb	1	0	
	bitter	4	4	
	getreideartig	1	0	
leicht	1	2		

Merkmal	Attribut	Anzahl der Nennungen der Probe 134	Anzahl der Nennungen der Probe 589
	ranzig	2	1
Textur	grasig	0	4
	heuartig	1	0
	neutral	2	0
	Nachgeschmack: ranzig	1	2
	Nachgeschmack: bitter	1	0
	Nachgeschmack: nussig	1	0
	weich	3	2
	belegend	5	3
	schleimig	2	1
	ölig	7	6
	glatt	1	1
	schwer	1	2
	zusammenhaltend	0	1
	viskos	5	4
	sämig	1	1
	samtig	3	3
	wässrig	0	1

F6: Prüfbogen Profilprüfung Mohnsamen dunkel

Profilprüfung Mohnsamen dunkel

Name:

Probennummer:

Datum:

Prüfanweisung: Vor Ihnen steht eine Mohnsamenprobe deren Merkmalseigenschaften in dem Auftreten ihrer Intensität bewertet werden sollen. Beginnen Sie mit der Bewertung des Geruchs und fahren Sie dann mit dem Aussehen/Farbe, Geschmack und der Textur fort. Für die Bewertung der Farbe liegt Ihnen ein Farbfächer bereit. Nutzen Sie außerdem folgendes Bewertungsschema:

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

GERUCH

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
mohntypisch						
nussig						
erdig						
muffig						
pilzartig						
fettig/ölig						
grün						
heuartig						
ranzig						
süßlich						
blumig						

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

AUSSEHEN/FARBE

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
Fehgrau						
Schiefergrau						
homogen (Farbe)						
homogen (Größe)						

GESCHMACK

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
mohntypisch						
süß						
nussig						
erdig						
muffig						
pilzartig						
fettig/ölig						
bitter						
ranzig						
grün						
heuartig						
adstringierend						
Nachgeschmack:						

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

TEXTUR

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
rau						
knackig						
fest						

F7: Prüfbogen Profilprüfung Mohnsamen hell

Profilprüfung Mohnsamen hell

Name:

Probennummer:

Datum:

Prüfanweisung: Vor Ihnen steht eine Mohnsamenprobe deren Merkmalseigenschaften in dem Auftreten ihrer Intensität bewertet werden sollen. Beginnen Sie mit der Bewertung des Geruchs und fahren Sie dann mit dem Aussehen/Farbe, Geschmack und der Textur fort. Für die Bewertung der Farbe liegt Ihnen ein Farbfächer bereit. Nutzen Sie außerdem folgendes Bewertungsschema:

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

GERUCH

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
mohntypisch						
nussig						
erdig						
muffig						
pilzartig						
fettig/ölig						
grün						
heuartig						
ranzig						
süßlich						
blumig						

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

AUSSEHEN/FARBE

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
Beige						
homogen (Farbe)						
homogen (Größe)						

GESCHMACK

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
mohntypisch						
süß						
nussig						
erdig						
muffig						
pilzartig						
fettig/ölig						
bitter						
ranzig						
grün						
heuartig						
adstringierend						
Nachgeschmack:						

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

TEXTUR

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
rau						
knackig						
fest						

F8: Prüfbogen Profilprüfung Mohnöl

Profilprüfung Mohnöl

Name:

Probennummer:

Datum:

Prüfanweisung: Vor Ihnen steht eine Mohnölprobe deren Merkmalseigenschaften in dem Auftreten ihrer Intensität bewertet werden sollen. Beginnen Sie mit der Bewertung des Geruchs und fahren Sie dann mit dem Aussehen/Farbe, Geschmack und der Textur fort. Für die Bewertung der Farbe liegt Ihnen ein Farbfächer bereit. Nutzen Sie außerdem folgendes Bewertungsschema:

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

GERUCH

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
mohntypisch						
nussig						
erdig						
muffig						
pilzartig						
fettig/ölig						
grün						
heuartig						
ranzig						
süßlich						
blumig						

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

AUSSEHEN/FARBE

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
Zitronengelb						
Zinkgelb						
viskos						
transparent						
homogen						

GESCHMACK

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
mohntypisch						
süß						
nussig						
erdig						
muffig						
pilzartig						
fettig/ölig						
bitter						
ranzig						
grün						
heuartig						
adstringierend						
Nachgeschmack:						

Intensitätsskala:

- 0 – nicht erkennbar
- 1 – sehr schwach erkennbar
- 2 – schwach erkennbar
- 3 – deutlich erkennbar
- 4 – stark erkennbar
- 5 – sehr stark erkennbar

TEXTUR

Merkmalseigenschaft	0	1	2	3	4	5
ölig						
viskos						

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein Dank gebührt Prof. Dr. Ralf Pude für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit und die fachliche sowie persönliche Unterstützung bei der Umsetzung der Promotion.

Danken möchte ich auch Prof. Dr. Thomas Döring für die hilfreichen Anregungen zur Planung und Auswertung der Feldversuche und für die Begutachtung dieser Arbeit.

Besonderer Dank gilt meiner Kollegin Hanna Blum, die mich im Arznei- und Gewürzpflanzenteam so herzlich aufgenommen und mich bei der Konzipierung und Durchführung der Versuchsarbeiten immer unterstützt und motiviert hat.

Ebenso bedanke ich mich ausdrücklich bei Dr. Thorsten Kraska für die wissenschaftliche Begleitung und die konstruktive Kritik, die meine Arbeit aufgewertet haben.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften, insbesondere bei Prof. Dr. Matthias Wüst, Dr. Nadine Schulze-Kaysers, Dr. Michelle Feuereisen und Fabian Marezky bedanken, die mich mit ihrem großen Fachwissen unterstützt und eine angenehme Zusammenarbeit ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank gilt den Versuchstechnikern des Campus Klein-Altendorf, insbesondere Marcus Weber und Kevin Leitenberger, für ihre uneingeschränkte Hilfsbereitschaft bei der Umsetzung der Feldversuchsarbeiten. Mein Dank gebührt ausdrücklich auch den übrigen Mitarbeitern und Doktoranden am Campus Klein-Altendorf für die stets unkomplizierte Zusammenarbeit und das freundliche Arbeitsklima.

Ich bedanke mich sehr bei Elisa Dörr und Lukas Wirth, die die Versuche zur inhaltsstofflichen und sensorischen Qualitätsanalyse mit ihren Abschlussarbeiten begleitet haben. Ebenso bedanke ich mich bei Charlotte Hubert und Benedikt Ohrem für die zuverlässige Mitarbeit bei den praktischen Feldversuchsarbeiten. Mein Dank gilt darüberhinaus allen Teilnehmenden der Sensorik-Verkostungen, die diesen Teil der Arbeit erst möglich gemacht haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und Inga, bedanken, die mich mit viel Geduld und Motivation bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet haben.