



Technische Universität München

**Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung,
Landnutzung und Umwelt**

Fakultät Agrar- und Gartenbauwissenschaften

Studiengang Agrarmanagement

Masterarbeit

Auswirkungen von Fertigation und Tropfschlauchpositionierung
auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe
von Hopfen (*Humulus lupulus*)

Verfasser: Johannes Stampfl

Prüfer: Prof. Dr. Thomas Ebertseder

Datum der Ausgabe: 03.11.2016

Datum der Abgabe: 15.02.2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	2
2.1 Entwicklung und Anbau des Hopfens	2
2.2 Hopfeninhaltsstoffe	4
2.3 Nährstoffaufnahme und Düngung von Hopfen	6
2.4 Bewässerung	10
2.4.1 Positionierung von Tropfbewässerung	13
2.4.2 Wasser- und Wurzelverteilung bei Tropfbewässerung	14
2.4.3 Bewässerungsmanagement	15
2.4.4 Fertigation	17
2.5 Bedeutung von Bewässerung und Fertigation in Hopfen	21
3 Fragestellung	24
4 Material und Methoden	25
4.1 Standortbeschreibung	25
4.1.1 Standort A	25
4.1.2 Standort B	27
4.2 Witterungsverlauf	28
4.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	30
4.3.1 Versuchsanlage und -ablauf	31
4.3.2 Bodenuntersuchung	32
4.3.3 Düngebedarfsermittlung und Düngung	33

4.3.4	Aufbau der Bewässerungsanlage.....	38
4.3.5	Bewässerungssteuerung und Fertigation	39
4.3.6	Bestandsbeurteilung und Ernte.....	40
4.4	Analyse des Wasser- und Alphasäuregehalts	42
4.5	Auswertung und Statistik	42
5	Ergebnisse	45
5.1	Standort A.....	45
5.1.1	Perle – Standort A	45
5.1.2	Herkules – Standort A	48
5.2	Standort B	51
5.2.1	Perle – Standort B.....	51
5.2.2	Herkules – Standort B	55
6	Diskussion.....	60
7	Zusammenfassung	68
	Literaturverzeichnis	69
	Anhang.....	79

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Schematische Einteilung der Sekundärmetaboliten des Hopfens.	4
Abb. 2.2: Alpha- und Beta-Säuren des Hopfens.	5
Abb. 2.3: Stickstoff-Aufnahmeraten [kg N/Tag je ha] der Hopfensorte Tettnanger im Wachstumsverlauf.	6
Abb. 2.4: Biomassebildung und N-Aufnahme von Hopfen im Wachstumsverlauf; P- und K-Aufnahme verlaufen ähnlich.	7
Abb. 2.5: Nährstoffgehalte [kg/100 kg] Hopfendolden bei einem Wassergehalt von 10 % in Hopfendolden und Restpflanze.	9
Abb. 2.6: Formen der Mikrobewässerung.	11
Abb. 2.7: Wasserausbreitung [m] bei ober- und unterirdischer Tropfschlauchpositionierung auf Sand- (Links) und Lehmboden (Rechts); Wassergehalt von 5 bis 40 %.	15
Abb. 2.8: Objektive Verfahren zur Beurteilung der Boden- und Pflanzenwasserversorgung sowie Steuerung von Bewässerungsanlagen.	16
Abb. 4.1: Niederschlagsverteilung (Tagessumme) und Tagesdurchschnittstemperatur für Juni und Juli 2016.....	29
Abb. 4.2: Niederschlagsverteilung (Tagessumme) und Tagesdurchschnittstemperatur für Aug. und Sept. 2016.	29
Abb. 4.3: Anlageplan: Für alle Versuche gleichermaßen gültig.	31
Abb. 4.4: N-Düngung der Sorte PE am Standort A.....	36
Abb. 4.5: N-Düngung der Sorte PE am Standort B.....	36
Abb. 4.6: N-Düngung der Sorte HS am Standort A/Standort B.....	37
Abb. 4.7: Insgesamt ausgebrachte Wassermengen je Versuchsfläche.	39
Abb. 5.1: Sorte PE Standort A; Boniturergebnisse Grünfärbung.....	46
Abb. 5.2: Sorte PE Standort A. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.	46
Abb. 5.3: Sorte PE Standort A; Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.	47
Abb. 5.4: Sorte HS Standort A; Boniturergebnisse Grünfärbung.	49
Abb. 5.5: Sorte HS Standort A. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.	49

Abb. 5.6: Sorte HS Standort A. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.	50
Abb. 5.7: Sorte PE Standort B; Boniturergebnisse Grünfärbung.	51
Abb. 5.8: Sorte PE Standort B. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.	52
Abb. 5.9: Sorte PE Standort B. Ertragsmittelwerte in Abhängigkeit von der Düngungsstufe.	53
Abb. 5.10: Sorte PE Standort B. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.....	53
Abb. 5.11: Sorte PE Standort B. Mittlere Alphasäuregehalte [%] und Alphaerträge [kg/ha] in Abhängigkeit von der Positionierung des Tropfschlauches.	54
Abb. 5.12: Sorte PE Standort B. Mittlere Alphasäuregehalte [%] und Alphaerträge [kg/ha] in Abhängigkeit von der Düngung.	55
Abb. 5.13: Sorte HS Standort B; Boniturergebnisse Grünfärbung.	55
Abb. 5.14: Sorte HS Standort B. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.	56
Abb. 5.15: Sorte HS Standort B. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von der Tropfschlauchpositionierung.	57
Abb. 5.16: Sorte HS Standort B. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.....	57
Abb. 5.17: Sorte HS Standort B. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von der Tropfschlauchpositionierung.	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Düngemittel zum Einsatz bei Fertigation.....	19
Tab. 4.1: Bodenschätzungsergebnisse für die Versuchsflächen am Standort A.	26
Tab. 4.2: Feldkapazität, Totwasseranteil und nutzbare Feldkapazität der Bodenarten am Versuchsstandort A.	26
Tab. 4.3: Bodenschätzungsergebnisse für die Versuchsflächen am Standort B.....	27
Tab. 4.4: Feldkapazität, Totwasseranteil und nutzbare Feldkapazität der Bodenarten am Versuchsstandort A.	28
Tab. 4.5: Lage und Relevanz der zur Beurteilung des Witterungsverlaufs verwendeten Wetterstationen.....	28
Tab. 4.6: Monatliche Niederschlagssumme [mm] im Jahr 2016 in Abhängigkeit von der Wetterstation.....	28
Tab. 4.7: Ergebnisse der Standardbodenuntersuchung: Nährstoffgehalte [mg/kg] und Gehaltsklassen für Phosphat, Kali und Magnesium sowie pH-Wert der Versuchsflächen am Standort A und B.	32
Tab. 4.8: Ergebnisse der Nmin-Untersuchung: Nmin-Gehalte der Versuchsflächen [kg N/ha].....	33
Tab. 4.9: Ertragserwartung der Betriebe [dt/ha] und Ergebnisse der Düngebedarfsermittlung für Phosphat, Kali und Magnesium [kg/ha] in Abhängigkeit von der Versuchsfläche.....	34
Tab. 4.10: Düngebedarfsermittlung für Stickstoff [kg N/ha] nach dem DSN-System für die einzelnen Versuchsflächen.	35
Tab. 4.11: Allgemeine Einteilung zur Beurteilung des Signifikanzausmaßes.	43
Tab. 5.1: Sorte PE Standort A - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.	47
Tab. 5.2: Sorte PE Standort A - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.....	48
Tab. 5.3: Sorte HS Standort A - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.....	50
Tab. 5.4: Sorte HS Standort A - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.....	51
Tab. 5.5: Sorte PE Standort B - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.....	52
Tab. 5.6: Sorte PE Standort B - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.....	54

Tab. 5.7: Sorte HS Standort B - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.	56
Tab. 5.8: Sorte HS Standort B - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.	58
Tab. A.1: Düngung der Sorte Perle am Standort A.	78
Tab. A.2: Düngung der Sorte Herkules am Standort A.	78
Tab. A.3: Düngung der Sorte Perle am Standort B.	79
Tab. A.4: Düngung der Sorte Herkules am Standort B.	79
Tab. A.5: Einzelparzellenergebnisse der Sorte Perle am Standort A.	80
Tab. A.6: Einzelparzellenergebnisse der Sorte Herkules am Standort A.	81
Tab. A.7: Einzelparzellenergebnisse der Sorte Perle am Standort B.	82
Tab. A.8: Einzelparzellenergebnisse der Sorte Herkules am Standort B.	83
Tab. A.9: Ergebnisse Varianzanalysen - Ertrag.	84
Tab. A.10: Ergebnisse Varianzanalysen - Alphasäuregehalt.	85
Tab. A.11: Ergebnisse Varianzanalysen - Alphaertrag.	86

Abkürzungsverzeichnis

AB:	Tropfschlauchposition „Auf dem Bifang“
AHL:	Ammonitratharnstofflösung
ANOVA:	Analysis of Variance
D:	Entstehungsart „Diluvial“
DSN:	Düngeberatungssystem Stickstoff
EBC:	European Brewery Convention
FAO:	Food and Agriculture Organization
FK:	Feldkapazität
HS:	Hopfensorte „Herkules“
ICID:	International Commission on Irrigation and Drainage
K:	Kalium
KAS:	Kalkammonsalpeter
L:	Bodenart „Lehm“
LfL:	Landesanstalt für Landwirtschaft
MAP:	Monoammonphosphat
N:	Stickstoff
NB:	Tropfschlauchposition „Neben dem Bifang“
nFK:	Nutzbare Feldkapazität
P:	Phosphor
PE:	Hopfensorte „Perle“
s L:	Bodenart „sandiger Lehm“
S L:	Bodenart „Stark lehmiger Sand“
StMELF	Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
TM:	Trockenmasse
TW:	Totwasser
WA:	Bundesstaat Washington

1 Einleitung

Hopfen (*Humulus lupulus L.*), ein aufgrund der Inhaltsstoffe unverzichtbarer Rohstoff zur Herstellung von Bier, wird in den unterschiedlichsten Regionen der Welt kultiviert. Die auf allen Kontinenten verteilten Anbauggebiete unterscheiden sich unter anderem in den klimatischen Bedingungen, woraus verschiedene Anbausysteme resultieren. Unabhängig von Region oder Anbausystem erfolgt die Produktion von Hopfen stets mit dem Ziel standortspezifisch optimale Erträge und Qualität zu erzeugen, wobei Umwelteffekte wie Nährstoffausträge in andere Ökosysteme nicht unbeachtet bleiben dürfen.

Ein limitierender Faktor im Hopfenbau ist häufig die Wasserversorgung. Dabei stellen in semiariden Gebieten, wie dem Yakima Valley (WA, USA), zusätzliche Bewässerungssysteme eine Grundvoraussetzung dar, ohne welche der kommerzielle Anbau der Sonderkultur dort nicht möglich wäre. Aber auch in grundsätzlich humiden Regionen kann Bewässerung bei ungleichmäßiger Niederschlagsverteilung zur Ertragsabsicherung sowie Risikominimierung von Bedeutung sein. Vor diesem Hintergrund und um Wetterextremen im Zuge des prognostizierten Klimawandels zu begegnen wurden in den vergangenen Jahren auch in der Hallertau, dem größten deutschen Hopfenanbaugebiet, vermehrt Bewässerungsanlagen in Form von Tropfbewässerungssystemen errichtet.

Neben Sicherstellung der Wasserversorgung von Pflanzen bieten Bewässerungssysteme auch die Möglichkeit Pflanzennährstoffe mit dem Wasser auszubringen, wodurch eine exakte Platzierung ermöglicht wird. Diese Form der Düngung wird als Fertigation bezeichnet und kommt in der Landwirtschaft vor allem in ariden und semiariden Regionen der Welt zum Einsatz. Auch im Hopfenanbau wird Fertigation genutzt. So erfolgt im Yakima Valley in den USA ein Großteil der Düngung über diese Methode, welche den Vorteil bietet, dass durch die gezielte Anpassung der Nährstoffversorgung an den Pflanzenbedarf im Verlauf der Vegetation auch Umweltwirkungen wie Nährstoffausträge in andere Ökosysteme minimiert werden können. In der Hallertau hingegen wird ein Großteil der Pflanzennährstoffe durch das oberflächige Streuen granulierter Dünger zugeführt. Jedoch hat das Interesse an effizienteren Düngungsmethoden wie etwa Fertigation infolge der vermehrten Errichtung von Bewässerungsanlagen zugenommen.

2 Literaturübersicht

2.1 Entwicklung und Anbau des Hopfens

Die Sonderkultur Hopfen, *Humulus lupulus L.* ist eine diözische, perennierende und rechtswindende Pflanze aus der Familie der Cannabaceae (Small, 1978). Von Bedeutung ist die Kulturart aufgrund der hohen Gehalte an wertgebenden Sekundärmetaboliten (Ceh et al., 2000), welche nur von weiblichen Pflanzen produziert werden (Neve, 1991). Die perennierenden Eigenschaften der Hopfenpflanze beruhen auf im Boden überdauernden Pflanzenteilen. Diese können aufgrund morphologischer sowie funktioneller Unterschiede in unterirdische Sprossorgane und das Wurzelsystem unterteilt werden. Während die Knospen des größtenteils verholzten Sprossgewebes für den Wiederaustrieb verantwortlich sind, dienen die verschiedenen Wurzeltypen des Wurzelsystems der Aufnahme von Wasser und Nährstoffen sowie der Speicherung von Reservestoffen (Rybacek, 1991). Im Zuge der Ernte werden alle oberirdischen Teile der Hopfenpflanze entfernt. Der Wiederaustrieb im nächsten Jahr erfolgt durch die über Reservestoffe ernährten Knospen (Kohlmann und Kastner, 1975). Zu Beginn der Vegetation ist das Längenwachstum des Sprosses größer als die Blattentwicklung (Williams, 1960), wodurch bis Mitte Mai Kohlenhydrate im Wurzelstock abgebaut werden (Thomas, 1967). Die Akkumulation neuer Reservestoffe in den Speicherwurzeln beginnt ab Mitte Juni und dauert bis zum Blattfall oder wie bei der Kultivierung bis zur Ernte der Pflanzen (Thomas, 1982). Erfolgt die Ernte zu früh, sind noch nicht ausreichend Reservestoffe in den Speicherwurzeln eingelagert, wodurch die Pflanzen im Folgejahr eine geringere Vitalität und Widerstandskraft gegen Krankheiten aufweisen (Lutz et al., 2009). Im Anbau können Hopfenpflanzen in Abhängigkeit von Sorte und Standort bei optimaler Bewirtschaftung bis zu 25 Jahre gleichbleibende Erträge liefern (Lutz et al., 2011). Zur Steuerung des Austriebs sowie zur Unterdrückung von falschem und echtem Mehltau werden im Frühjahr je nach Anbaugebiet verschiedene mechanische und chemische Verfahren angewendet. In mitteleuropäischen Gebieten erfolgt ein Zurückschneiden der unterirdischen Sprossorgane des Vorjahres, wodurch ein Teil der Knospen entfernt wird. Diese pflanzenbauliche Maßnahme dient auch der Gewinnung von Fehsern zur vegetativen Vermehrung. Nach einigen Wochen entwickelt sich aus den verbleibenden Knospen eine Vielzahl an Trieben, welche mit 40 bis 60 cm beginnen sich zu winden (Zattler, 1965). Von diesen werden 4 bis 6 Triebe an zwei

Aufleitdrähte oder Aufleitschnüre angeleitet, welche den Pflanzen als Kletterhilfe dienen. Im weiteren Verlauf entwickeln sich die angeleiteten Triebe zu sechskantigen Haupttrieben mit Klimmhaaren, die das Hochwachsen an der Kletterhilfe ermöglichen (Neve, 1991). Durch das Aufackern werden neue Dämme entlang der Reihen geformt, was das Austreiben weiterer Triebe aus dem Wurzelstock verhindert und zusätzlich Unkraut unterdrückt. Am unteren Teil der verschütteten Haupttriebe erfolgt im weiteren Verlauf der Vegetation die Bildung von sekundären Sommerwurzeln, welche zusätzlich Nährstoffe sowie Wasser aufnehmen. Häufig wird das gesamte Dammvolumen erschlossen, jedoch variiert die Intensität der Durchwurzelung in Abhängigkeit von Bodenart, Witterung und Bewirtschaftung (Kohlmann und Kastner, 1975; Graf et al., 2014). Die Haupttriebe der Hopfenpflanzen sind durch Nodien untergliedert, wobei deren Anzahl sowohl von der Sorte als auch dem Anbaujahr abhängt. An den Knoten wachsen die Blätter der Hopfenpflanze, deren Form altersabhängig ist. Nachdem eine bestimmte Anzahl an Nodien erreicht wurde, etwa bei halber Gerüsthöhe, beginnt aus den Blattachsen die Bildung der Seitenarme. An diesen Seitentrieben werden die Blüten und Dolden gebildet, deren Anzahl entscheidend für die Ertragsbildung sind.

Nach Erreichen der Gerüsthöhe beginnt ab Anfang Juli, ausgelöst durch bestimmte Lichtverhältnisse, der Übergang von der vegetativen zur generativen Phase. Da die Blühinduktion erfolgt, sobald eine bestimmte Tageslänge unterschritten wird, stellt Hopfen eine Kurztagpflanze dar (Thomas und Schwabe, 1969; Biendl et al., 2012). Möglich ist die Induktion aber nur, wenn eine bestimmte Mindestgröße erreicht wurde, welche je nach Sorte mit der Anzahl an Blattpaaren am Haupttrieb beschrieben werden kann. In Abhängigkeit von Sorte und Wachstumsverhältnissen vollzieht sich die Blüte über einen Zeitraum von 3 bis 4 Wochen (Kohlmann und Kastner, 1975). Bei den Blüten einer weiblichen Hopfenpflanze handelt es sich um Blütenstände bestehend aus Einzelblütchen, welche aufgrund der Windbestäubung klein und unauffällig sind. Die Blütenstände entwickeln sich im Verlauf der Ausdoldung zu einem Zapfen oder einer zusammengesetzten Dolde. Die Hopfendolde besteht aus einer gewellten Spindel mit Deck- und Vorblättern. An den Vorblättern sitzen Lupulindrüsen, welche ein gelbes klebriges Pulver (Lupulin) absondern, das die wertgebenden Inhaltsstoffe enthält (Rybacek, 1991). Erfolgt eine Befruchtung wird in der taschenartigen Vertiefung am unteren Ende der Vorblätter ein Samen gebildet (Kohlmann und Kastner, 1975). Dies ist jedoch zu vermeiden, weil der hohe Fettsäuregehalt der Samen die Schaum- und

Geschmacksstabilität des Bieres negativ beeinflusst und so zu einer erheblichen Minderung der Brauqualität führt (Biendl et al., 2012).

2.2 Hopfeninhaltsstoffe

Die Dolden des Hopfens zeichnen sich durch einen sehr hohen Gehalt an sekundären Pflanzeninhaltsstoffen aus (Biendl et al., 2012). Diese können in Bitterstoffe (Harze), Ätherische Öle und Polyphenole unterteilt werden (siehe Abb. 2.1). Während es sich bei den Harzen und Ölen um die Inhaltsstoffe des Lupulins handelt, sind die polyphenolischen Substanzen in den Doldenblättern enthalten.

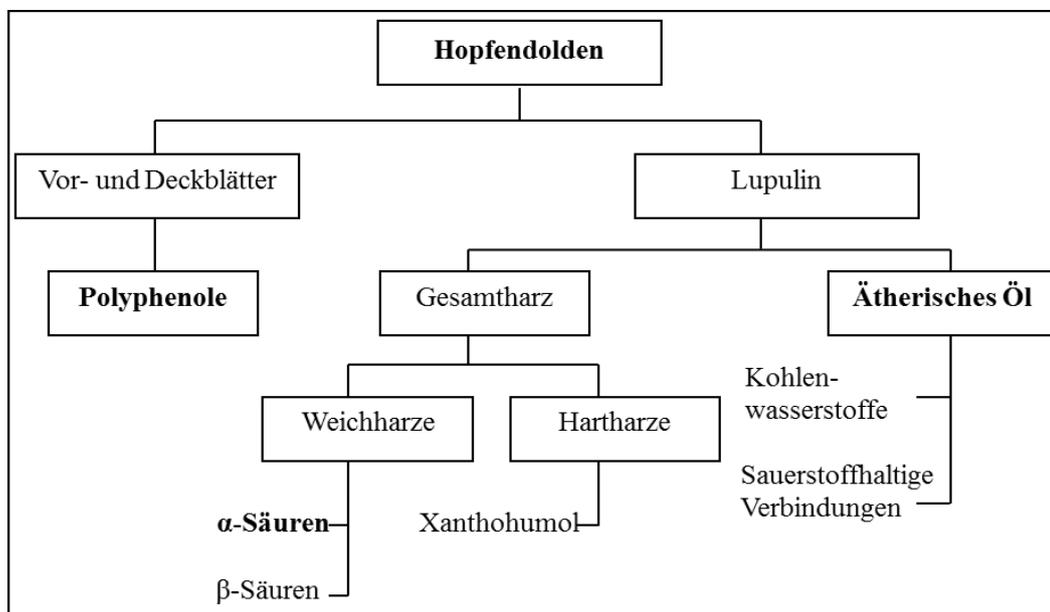


Abb. 2.1: Schematische Einteilung der Sekundärmetaboliten des Hopfens (nach: Biendl et al., 2012).

Die Gruppe der Harze, welche bisher bei keiner anderen Pflanzenart gefunden wurde, stellt eine Besonderheit des Hopfens dar (Neve, 1991). Von diesen sind die α -Säuren mit Abstand am wichtigsten. Sie werden von den Brauern als primäres wirtschaftliches Qualitätsmerkmal angesehen, da sie ein Maß für das Bitterpotenzial im Bier darstellen (Kammhuber, 2006). Alpha- wie auch Beta-Säuren (Abb. 2.2) sind di- bzw. triprenylierte Derivate des Phloroglucinols, die jeweils eine Mischung aus Homologen darstellen und sich nur in ihrer Alkanoyl-Seitenkette unterscheiden (Biendl et al., 2012). Die Hauptbestandteile der Alpha- und Beta-Säure werden als n-, Co- und Ad- Humulon bzw. Lupulon bezeichnet (Kammhuber, 2008a). Zusätzlich existieren weitere Nebenhomologe, das Prä- und Post- Humulon bzw. Lupulon, welche aufgrund der geringen Mengen jedoch

unbedeutend sind. Die Hauptbittere im Bier entsteht schließlich weder durch Alpha- noch Beta-Säuren, sondern durch Iso-Alphasäuren, die während des Brauprozesses gebildet werden (Biendl et al., 2012).

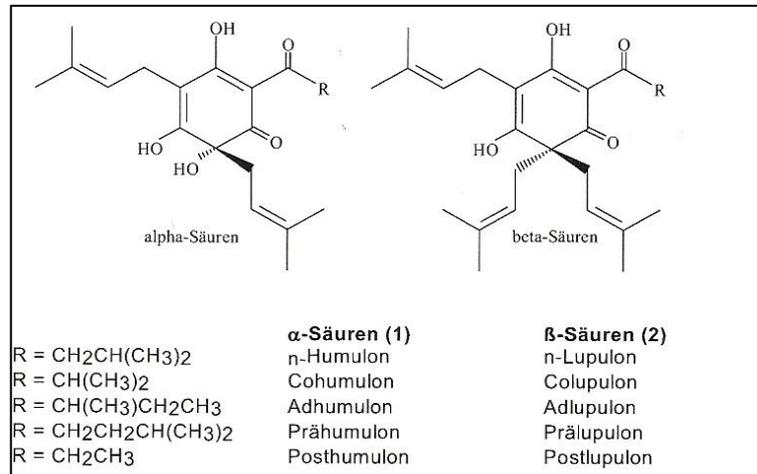


Abb. 2.2: Alpha- und Beta-Säuren des Hopfens (Kamhuber, 2008a).

Der Geruch des Hopfens, auch als grünes Hopfenaroma bezeichnet, wird durch die enthaltenen ätherischen Öle hervorgerufen. Während die Zusammensetzung des Öls vor allem von der Sorte abhängt, wird der Gehalt auch durch Anbaugebiet und Erntejahr beeinflusst. In getrockneten Dolden schwankt dieser zwischen 0,2 und 3,0 Prozent. Die Vielzahl an flüchtigen Verbindungen, aus denen sich das Öl zusammensetzt, werden in Kohlenwasserstoffe und sauerstoffhaltige Verbindungen eingeteilt (vgl. Abb. 2.1). Mengenmäßig sind Kohlenwasserstoffe am bedeutendsten, jedoch haben diese keinen Einfluss auf das Aroma im Bier, da sie im Brauvorgang verdampfen oder deren unlösliche Reste abgeschieden werden. Als wichtigste Indikatorsubstanz für das Hopfenaroma im Bier gilt Linalool 11 ein Monoterpenoxid aus der Gruppe der sauerstoffhaltigen Verbindungen, dessen Anteil maximal 1,5 % des Gesamtöls beträgt (Biendl et al., 2012).

Polyphenole, die dritte Gruppe der Sekundärmetaboliten des Hopfens, kommen in vielen Pflanzenarten vor und haben heute aufgrund vielfältiger, gesundheitlich positiver Eigenschaften einen hohen ernährungsphysiologischen Stellenwert (Biendl, 2006). Der Gesamtgehalt an Polyphenolen in getrockneten Hopfendolden kann je nach Sorte bis zu 8 % betragen (Kamhuber, 2008b). Einige der im Hopfen enthaltenen polyphenolischen Substanzen können nicht oder nur in sehr wenigen anderen Pflanzen gefunden werden, daher stellen diese, wie auch die Bitterstoffe, eine Besonderheit des Hopfens dar (Biendl et al., 2012). Zu diesen zählt insbesondere das prenylierte Chalcon Xanthohumol aus der Gruppe der Prenylflavonoide, welches eine Vielzahl an positiven Wirkungsweisen hat, vor

allem aber durch das anticancerogene Potenzial bekannt wurde (Biendl, 2006). Im Gegensatz zu anderen Polyphenolen ist Xanthohumol nicht in den Doldenblättern, sondern wie die Bitterstoffe nur im Lupulin enthalten (Biendl et al., 2012).

2.3 Nährstoffaufnahme und Düngung von Hopfen

Zur zeitlichen Anpassung des Nährstoffangebots an den Bedarf der Hopfenpflanzen sind Kenntnisse über den Verlauf von Wachstum und Nährstoffaufnahme essenziell. Grundlegende Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt des Hopfens wurden u. a. von Zattler (1965), Schäufele (1966), Seiffert (1995) und Portner (o. j.) angestellt. Seiffert (1995) untersuchte die Nährstoffaufnahme des Hopfens an der Sorte Tettmanger im Baden-Württembergischen Anbaugebiet Tettmang. Dabei korrelierte die Aufnahmekurve von Stickstoff während der Sprossentwicklung mit dem Wachstumsverlauf und der Biomassebildung der Hopfenpflanze. Die höchste TM-Zuwachsrate und Aufnahme rate für Stickstoff, Phosphat, Kali sowie Magnesium konnten ab Anfang Juli im Zeitraum des Seitentriebwachstums und der Blütenausbildung, den bedeutendsten Prozesse der Ertragsbildung, nachgewiesen werden. Auch laut Zattler (1965) und Schäufele (1966) findet die Hauptnährstoffaufnahme der Hopfenpflanze in diesem Zeitraum statt. Die N-Aufnahmeraten unterlagen bei den Untersuchungen von Seiffert (1995) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt/Entwicklungsstadium starken Schwankungen (siehe Abb. 2.3).

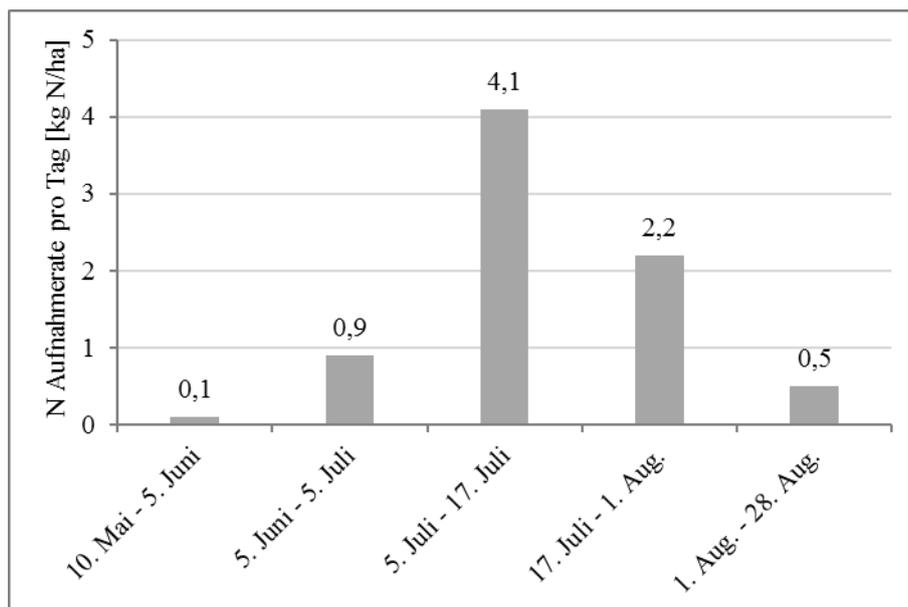


Abb. 2.3: Stickstoff-Aufnahmeraten [kg N/Tag je ha] der Hopfensorte Tettmanger im Wachstumsverlauf (nach: Seiffert, 1995).

Unter den Standortbedingungen der Hallertau wurden auch an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft für verschiedene Sorten Trockenmassezuwachs und Nährstoffaufnahme im Vegetationsverlauf untersucht (Portner et al., o. j.). Das resultierende Ergebnis deckt sich mit den Aussagen von Zattler (1965), Schäufele (1966) und Seiffert (1995). Die Hauptnährstoffaufnahme erfolgte ab Ende Juni bzw. Anfang Juli und korrelierte mit der Biomassebildung im Wachstumsverlauf der Pflanzen (siehe Abb. 2.4). Im zeitlichen Verlauf ging die N-Aufnahme der Trockenmassebildung etwas voraus (Portner et al., o. j.), was auch Seiffert (1995) an der Hopfensorte Tettninger zeigte. Neuere Untersuchungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zur Blattflächenentwicklung verschiedener Hopfensorten zeigen ebenfalls, dass höchste Zuwachsraten zwischen Ende Juni und Ende Juli erreicht werden (Engelhard et al., 2011).

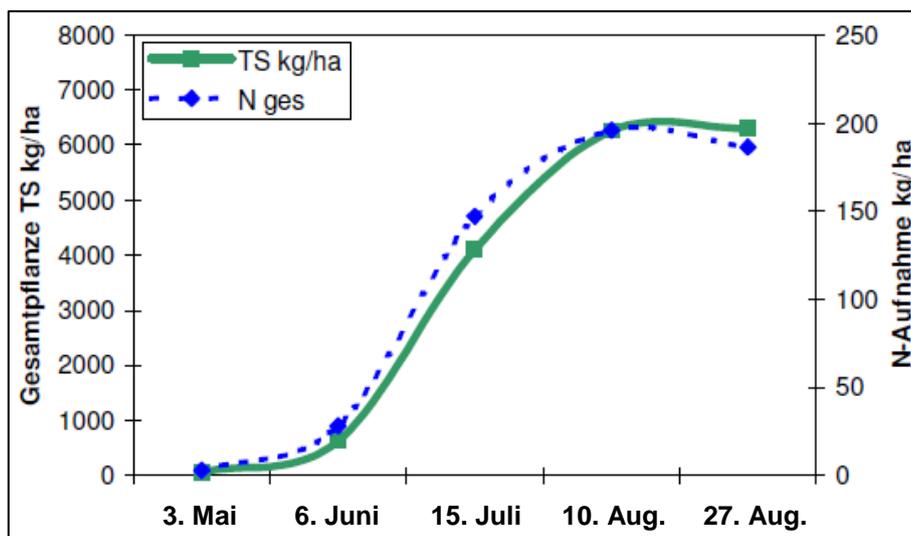


Abb. 2.4: Biomassebildung und N-Aufnahme von Hopfen im Wachstumsverlauf; P- und K-Aufnahme verlaufen ähnlich (nach: Portner et al., o. j.).

Der Stickstoffbedarf eines Pflanzenbestands wird allgemein aus dem zu Vegetationsbeginn in der Wurzelzone vorhandenem N_{min}-Gehalt, dem während der Vegetation mineralisierten Stickstoff, dem mit organischen und mineralischen Düngemitteln zugeführten Stickstoff und bei Leguminosen auch durch den fixierten Luftstickstoff gedeckt. Während der Vegetationsperiode erfolgt eine Beeinflussung der N-Nachlieferung eines Standortes durch den Bodenzustand, Gehalt an organischer Substanz und Witterungsverlauf. Dabei kann vor allem der Witterungseinfluss zu starken jährlichen Schwankungen hinsichtlich nachgelieferter N-Mengen führen. Durch langjährige organische Düngung erhöht sich das Mineralisations- und Nachlieferungspotenzial zusätzlich. Begünstigt wird die Mineralisation von Stickstoff durch konstante Wärme und Feuchtigkeit (Wendland et al., 2012). Die Düngebedarfsermittlung für Stickstoff erfolgt in Bayern auch bei Hopfen nach dem Düngeberatungssystem für Stickstoff (DSN). Dabei wird, ausgehend von einem N-Sollwert durch Abzug des N_{min}-Gehalts und Berücksichtigung weiterer Zu- und Abschläge aufgrund schlagspezifischer Gegebenheiten, die Höhe der notwendigen N-Düngung berechnet (LfL, 2016).

Für Phosphat, Kali und Magnesium richtet sich der Düngebedarf nach dem Nährstoffgehalt des Bodens, der Nährstoffabfuhr durch den Pflanzenbestand sowie den spezifischen Faktoren eines Standortes. Die Ermittlung der Nährstoffgehalte im Boden erfolgt dabei durch Bodenuntersuchungen. Zur Bewertung vorhandener Nährstoffmengen werden die Ergebnisse im Anschluss in Gehaltsstufen eingeteilt, wobei auch die Bodenart von Bedeutung ist. Für Phosphat, Kali und Magnesium gilt das Ziel: Erhalten oder Erreichen der Gehaltsstufe C, welche nachhaltig optimale Erträge gewährleistet (Wendland et al., 2012). Grundsätzlich ist auch davon auszugehen, dass auf Standorten mit Gehaltsstufe C zusätzliche Mengen an Phosphat, Kali oder Magnesium, welche über den ermittelten Düngebedarf hinausgehen, keinen ökonomischen Vorteil bringen (Bundesarbeitskreis Düngung, 2003).

Die Höhe der Nährstoffabfuhr wird vor allem durch die Pflanzenart und deren Ertrag bestimmt. Zusätzlich muss beachtet werden, ob die gesamte Pflanze abgefahren wird oder Ernterückstände auf dem Feld verbleiben. Zur Berechnung der Nährstoffabfuhr für Phosphat, Kali und Magnesium gelten bei Hopfen die in Abb. 2.5 dargestellten Nährstoffgehalte je 100 kg Hopfendolden bei einem Wassergehalt von 10 % (Wendland et al., 2012). Für Stickstoff wird der Düngbedarf nicht direkt über die Abfuhrmenge ermittelt, sondern wie zuvor beschrieben über das DSN-System. Dabei gilt ein Sollwert in Höhe von 240 kg N/ha. Die gesamte mineralisch auszubringende N-Menge kann bei Hopfen auf drei gleiche Gaben verteilt werden. Für die Verteilung dieser werden folgende Zeitpunkte vorgeschlagen (LfL, 2016):

1. **Gabe:** Ende April
2. **Gabe:** Ende Mai
3. **Gabe:** Ende Juni bis Anfang Juli

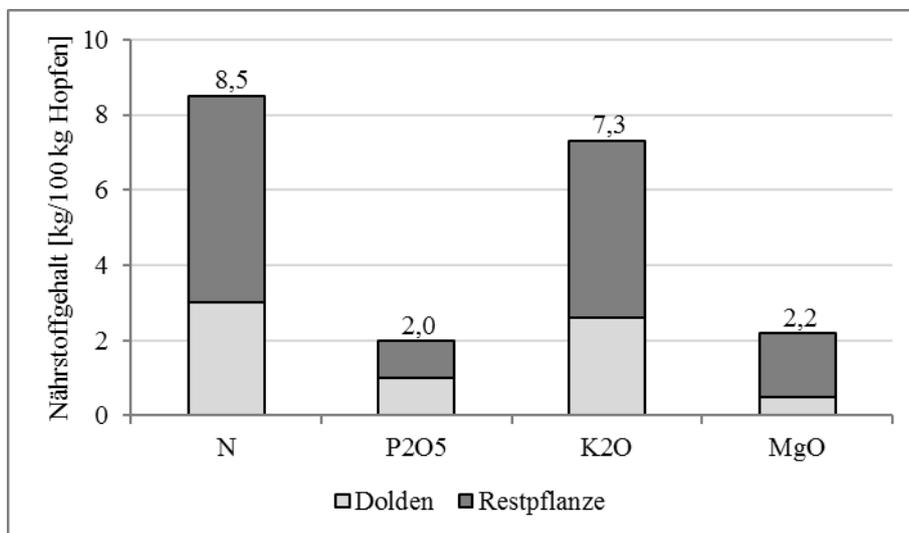


Abb. 2.5: Nährstoffgehalte [kg/100 kg] Hopfendolden bei einem Wassergehalt von 10 % in Hopfendolden und Restpflanze (Wendland, et al., 2012).

2.4 Bewässerung

Für optimales Pflanzenwachstum ist die Aufrechterhaltung eines spezifischen Wassergehalts im Bereich des Wurzelsystems essenziell (Savva und Frenken, 2002). Der Bodenwassergehalt nimmt nicht nur Einfluss auf den Wasserhaushalt der Pflanzen, sondern auch auf die Nährstoffverfügbarkeit und Nährstoffaufnahme. Infolge zunehmender Austrocknung oberer Bodenschichten verringert sich im Verlauf der Vegetation die Nährstoffnachlieferung in Richtung Wurzeloberfläche. Außerdem nimmt die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen unter trockenen Bedingungen durch reduziertes Wurzelwachstum zusätzlich ab (Marschner und Rengel, 2012).

In vielen Gebieten der Erde mit semiaridem Klima stellt die Möglichkeit der Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen eine wichtige Grundvoraussetzung für intensiven Pflanzenbau dar. Aber auch an Standorten, wo die Wasserbilanz während der gesamten Vegetationsperiode keinen Bewässerungsbedarf ausweist, können aufgrund ungleichmäßiger Niederschlagsverteilung Zeiträume mit Wassermangel auftreten (Paschold, 2010). Dort dienen Bewässerungssysteme vor allem der Verringerung von Ertrags- sowie Qualitätsschwankungen und somit als Instrumente zur Risikoregulierung. Aufgrund bestehender Unterschiede in Konstruktion, verwendetem Material und Einsatzart werden Bewässerungsverfahren in drei Gruppen eingeteilt. Weltweit sind davon die Verfahren zur Oberflächenbewässerung mit 77 % am bedeutendsten (ICID, 2016). Zu diesen zählen einfache Formen wie Furchen-, Becken- sowie Landstreifenbewässerung, welche sich alle durch eine sehr geringe Wasserausnutzungseffizienz auszeichnen (Michel und Sourell, 2014). Technisch höher entwickelte und effizientere Formen werden den Gruppen Beregnung oder Mikrobewässerung zugeordnet. Auf die unterschiedlichen Beregnungsmethoden wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Eine umfangreiche Beschreibung dieser wird durch Michel und Sourell (2014) vorgenommen. Grundsätzlich können die einzelnen Formen der Mikrobewässerung in Abhängigkeit von deren Positionierung in oberirdische und unterirdische Systeme unterteilt werden (vgl. Abb. 2.6).

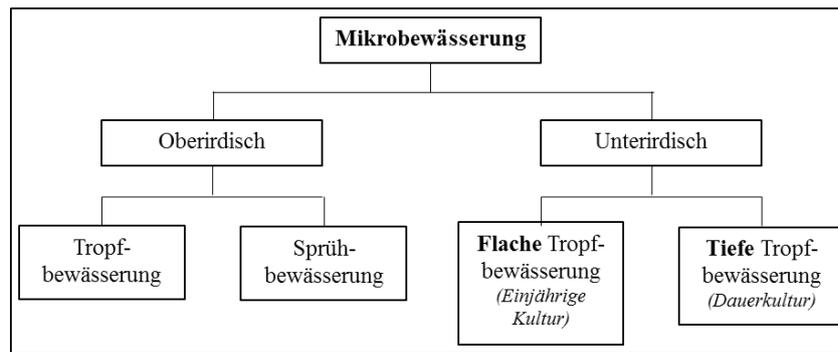


Abb. 2.6: Formen der Mikrobewässerung (nach: Michel und Sourell, 2014).

Durch alle Verfahren der Mikrobewässerung erfolgt eine langsame Wasserapplikation an, über oder unter der Bodenoberfläche. Da nur ein Teil des Bodenvolumens befeuchtet wird, kann Mikrobewässerung auch als lokalisierte Bewässerung bezeichnet werden (Ayars et al., 2007). Folgende Eigenschaften gelten als charakteristisch für Mikrobewässerung:

- 1) Geringe Ausbringrate
- 2) Applikation einer Wassergabe über einen langen Zeitraum
- 3) Bewässerung in regelmäßigen Abständen
- 4) Ausbringung nahe oder direkt in der Wurzelzone
- 5) Einfacher Einsatz von Düngemitteln

Tropfbewässerung zählt zu den Verfahren der Mikrobewässerung und wird definiert als Bewässerungsmethode durch welche das Wasser in Tropfenform über Emitter auf die Bodenoberfläche ausgebracht wird (ASAE, 2015). Johnson et al. (1991) beschreiben Tropfbewässerung als Methode zur gleichmäßigen sowie langsamen Wasserapplikation am Standort der Pflanze, wodurch die gesamte Wassermenge innerhalb der Wurzelzone platziert werden kann. Im Vergleich zu anderen Bewässerungsformen bietet Tropfbewässerung eine Vielzahl an Vorteilen, ist zugleich aber auch mit Nachteilen verbunden. Nachfolgend werden sowohl positive als auch negative Aspekte dieser Methode näher beschrieben.

Im Vergleich zu Oberflächen- und Beregnungs- aber auch Mikrosprinklerverfahren kann durch Tropfbewässerung, da ein geringerer Anteil der gesamten Bodenoberfläche befeuchtet wird, eine höhere Wasserausnutzungseffizienz erreicht werden. Die Verluste durch Evaporation sind deutlich geringer als bei anderen Verfahren (Schwankl und Hanson, 2007; Shock, 2013). Auch Fischer et al. (2007) beschreiben Tropfbewässerung als geeignete Methode, um den Wasserverbrauch zu verringern und gleichzeitig Ertrag und Qualität zu sichern. Das Einsparungspotenzial wird dabei durch Pflanzenart, Topografie,

Boden und Umweltbedingungen aber auch durch das Bewässerungsmanagement beeinflusst (Ayars et al., 2007). Neben der geringeren Evaporation werden bei der Tropfbewässerung auch Verluste durch Oberflächenabfluss in Hanglagen sowie Versickerung des Wassers unterhalb der Wurzelzone verringert (Shock, 2013). Des Weiteren besteht durch Tropfbewässerung die Möglichkeit Ertrag und Qualität gezielt zu verbessern, da das Wasser langsam und in regelmäßigen Abständen ausgebracht wird. Der Bodenwassergehalt in der aktiven Wurzelzone der Pflanzen bleibt im Wesentlichen konstant und große Schwankungen werden verhindert, wodurch im Vergleich zu anderen Bewässerungsverfahren Stresssituationen vermieden werden. Ein weiterer Vorteil der Tropfbewässerung liegt in der Möglichkeit zur gezielten Ausbringung von Düngemitteln zusammen mit dem Wasser, wodurch die Düngung exakt an den Bedarf des Pflanzenbestands angepasst werden kann (Ayars et al., 2007). Pflanzennährstoffe werden dabei direkt in die aktive Wurzelzone appliziert, weshalb die Effizienz von Düngemitteln optimiert wird und verbesserte Wachstumsbedingungen geschaffen werden (Neilsen et al., 1998). Durch diese gezielte und regelmäßige Nährstoffapplikation können zudem der Gesamtbedarf sowie Auswaschungsverluste reduziert werden (Ayars et al., 1999).

Obwohl Tropfbewässerungssysteme erfolgreich eingesetzt werden, sind mit deren Anwendung je nach Standort, Wasserqualität und Umweltbedingungen auch Nachteile verbunden. Dazu zählen technische Probleme wie das Blockieren der Emitter. Durch ganz oder teilweise verstopfte Tropfelemente wird dabei unmittelbar die Uniformität der Wasser- und Nährstoffverteilung im Feld beeinträchtigt. Als Folge zu geringer Ausbringungsmengen entsteht bei bestimmten Pflanzen eines Bestandes Trockenstress, was mit erheblichen Ertragseinbußen einhergehen kann, wenn das Problem nicht frühzeitig erkannt wird (Ayars et al., 2007). Das Blockieren der Emitter wird durch unzureichende Wasserfiltration und Algenwachstum in den Tropfleitungen aber auch durch Ausfällung von Verbindungen an den Austrittsöffnungen verursacht (Shock, 2013). Ein weiterer Nachteil ist die begrenzte Entwicklungsmöglichkeit des Wurzelsystems. Da Tropfbewässerungssysteme nur einen Teil des gesamten Bodenvolumens befeuchten, ist die Ausbildung der Wurzeln auf diese Bereiche begrenzt, was vor allem in semiariden Anbauregionen zu sehr kompakten Wurzelsystemen führt. Wird das Wurzelwachstum einer Pflanze zu stark eingeschränkt, können auch Sprosswachstum und Ertrag abnehmen (Ayars et al., 2007).

2.4.1 Positionierung von Tropfbewässerung

Tropfbewässerungssysteme können in Abhängigkeit von deren Positionierung in oberirdische sowie unterirdische Systeme unterteilt werden (Devasirvatham, 2009; Michel und Sourell, 2014). Seit der Entwicklung moderner Tropfbewässerungsanlagen erfuhren oberirdische Varianten ein deutlich stärkeres Wachstum, was wahrscheinlich die Folge der zusätzlichen Probleme, hervorgerufen durch blockierte Emittieren und Wurzelinfusionen, bei unterirdischen Systemen war (Camp und Lamm, 2003). Bei oberirdischen Systemen liegen die Tropfschläuche mit den integrierten Emittieren entweder auf der Bodenoberfläche oder sind an einer Gerüstanlage befestigt. Hingegen werden diese Schläuche bei unterirdischen Anlagen in den Boden eingezogen (Lamm und Camp, 2007). Die Ausstoßraten der Emittieren unterscheiden sich in der Regel nicht voneinander, jedoch weisen Tropfleitungen zur unterirdischen Installation eine höhere Wandstärke auf (Coolong, 2016). Die Schläuche werden bei unterirdischen Systemen so tief installiert, dass keine Beeinträchtigung durch Bodenbearbeitung erfolgt und die Lebensdauer mehrere Jahre beträgt (Camp und Lamm, 2003).

Unterirdische Tropfbewässerung gilt als das effizienteste Bewässerungsverfahren (Lamm et al., 2012). Durch Ausbringung des Wassers unter der Bodenoberfläche verringern sich sowohl Evaporation als auch potenzielle Verluste durch Oberflächenabfluss. Zudem wird die Infiltration und Speicherung von saisonalen Niederschlägen verbessert, da obere Bodenschichten trockener sind und einen geringeren Verkrustungsgrad aufweisen. Insgesamt führen die genannten Punkte beim Vergleich mit oberirdischen Systemen zu einer zusätzlichen Verbesserung der Wasserausnutzungseffizienz (Lamm, 2002). Ein weiterer Vorteil ist, dass wenn alle Komponenten des Bewässerungssystems im Boden verbaut sind Kulturmaßnahmen, vor allem die der Bodenbearbeitung, uneingeschränkt erfolgen können (Lamm und Camp, 2007). Außerdem entstehen, im Vergleich zu oberirdischen Systemen, keine Kosten für das jährliche Auslegen und Einholen der Tropfschläuche (Devasirvatham, 2009).

Unterirdische Tropfbewässerungssysteme sind aber auch mit Nachteilen verbunden. Dabei spielt bei vielen Kulturen die schlechte und ungleichmäßige Befeuchtung der oberen Bodenschichten, wodurch die Etablierung von Kulturpflanzenbeständen erschwert wird, eine bedeutende Rolle (Camp et al., 2000; Raine und Foley, 2001; Lamm, 2002). Erfolgt die Installation in zu großer Tiefe wird außerdem die Pflanzenverfügbarkeit oberflächig ausgebrachter Nährstoffe durch den Mangel an Feuchtigkeit in oberen Schichten

eingeschränkt (Devasirvatham, 2009). Ein weiteres Problem stellt vor allem in Reihenkulturen die Gefahr von Bodenschadverdichtungen dar. Entstehen können diese, wenn Tropfschläuche im Bereich der Fahrspuren installiert werden und Bewässerung und Kulturmaßnahmen mit schwerem landwirtschaftlichen Gerät gleichzeitig erfolgen. Die Eignung unterirdischer Systeme kann zudem durch das Einwachsen von Wurzeln in die Emitter oder das Zerdrücken der Tropfschläuche durch größere Wurzeln für bestimmte Kulturen eingeschränkt sein.

2.4.2 Wasser- und Wurzelverteilung bei Tropfbewässerung

Über Tropfbewässerung appliziertes Wasser bewegt sich im Boden in einem dreidimensionalen Strömungsmuster (Kafkafi und Tarchitzky, 2011). Sowohl die Schwerkraft als auch Kapillarkräfte wirken auf die Ausbreitung ein. Die tatsächliche Verteilung im Feld, ausgehend von einer punktförmigen Quelle, wird zusätzlich durch eine Vielzahl an Bodenfaktoren beeinflusst. Zu diesen gehören hydraulische Bodeneigenschaften, Textur und Struktur eines Bodens, undurchlässige Schichten im Profil sowie die horizontale und vertikale Permeabilität (Vermeiren und Jobling, 1984; Cote et al., 2003; Gardenas et al., 2005; Skaggs et al., 2010). Erfolgt die Wasserausbringung durch unterirdische Tropfbewässerung, unterscheidet sich das Verteilungsmuster im Boden grundsätzlich, da auch eine Ausbreitung entgegen der Schwerkraft erfolgt (Sne, 2006).

Erste Versuche zur Wasserverteilung im Boden, ausgehend von punktuellen Quellen führte Bresler (1977) durch. Dieser zeigte, dass die vertikale sowie horizontale Verteilung des Wassers als Funktion der Ausstoßrate dargestellt werden kann. Bei geringen Applikationsraten erfolgt vor allem eine vertikale Ausbreitung des Wassers. Wird die gleiche Wassermenge hingegen in kürzerer Zeit appliziert, erfolgt die Verteilung verstärkt horizontal. Auch Li et al. (2003) konnten in Versuchen zur Wasserverteilung im Boden die Abhängigkeit der horizontalen Ausbreitung von der Ausstoßrate beweisen.

Neuere Untersuchungen zur Wasserverteilung bei ober- und unterirdischer Tropfbewässerung liefern Schütze et al. (2013). Dabei wurden für verschiedene Bodenarten die Auswirkungen unterschiedlicher Ausstoßraten und Wassermengen auf die Ausbreitung des Wassers unter Berücksichtigung der Effekte von Transpiration und Evaporation ermittelt. Für die geprüften Bodenarten Sand, Lehm und Schluff kann die Aussage getroffen werden, dass wie auch durch Bresler (1977) und Li et al. (2003)

beschrieben, die horizontale und vertikale Ausbreitung des Wassers als Funktion der Ausbringrate dargestellt werden kann. Bei unterirdischer Tropfbewässerung in einer Tiefe von 0,25 m erfolgt auch eine Verteilung in vertikaler Richtung entgegen der Schwerkraft, wobei die obersten Bodenschichten nicht befeuchtet werden (vgl. Abb. 2.7). Auf Sandboden verteilt sich das Wasser grundsätzlich verstärkt vertikal in Richtung der Schwerkraft, auf Lehmboden hingegen gleichmäßig.

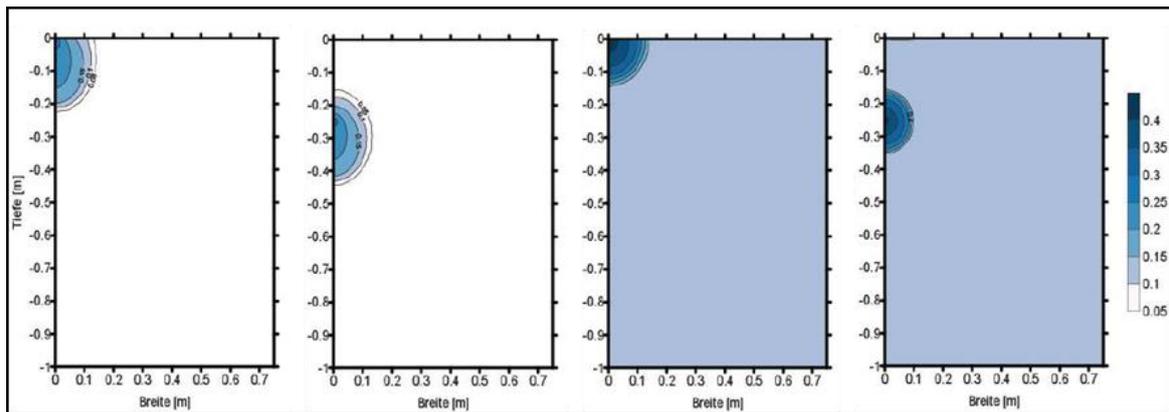


Abb. 2.7: Wasserausbreitung [m] bei ober- und unterirdischer Tropfschlauchpositionierung auf Sand- (Links) und Lehmboden (Rechts); Wassergehalt von 5 bis 40 % (nach: Schütze et al., 2013).

Die Wurzelverteilung einer Pflanze wird unter Tropfbewässerung maßgeblich durch die Wasser- und Nährstoffverteilung beeinflusst. In der wassergesättigten Zone, direkt unter der Tropfstelle, sterben Wurzeln aufgrund von Sauerstoffmangel in der Regel ab (Huck und Hillel, 1983). Die Ausbreitung der Pflanzenwurzeln erfolgt vor allem dort, wo Wasser, Sauerstoff und Nährstoffe gleichzeitig zur Verfügung stehen. Wird die Wasserversorgung eines Pflanzenbestandes ausschließlich durch Tropfbewässerung mit häufigen, kleinen Wassergaben sichergestellt, bilden Pflanzen flache und kompakte Wurzelsysteme aus (Sne, 2006). Hingegen führen andere Bewässerungssysteme, die das gesamte Bodenprofil befeuchten zu einer tieferen und großflächigeren Wurzelverteilung.

2.4.3 Bewässerungsmanagement

Ein effektives Bewässerungsmanagement beinhaltet Zeitpunkt und Höhe der Einzelgaben, Zeitintervalle zwischen diesen sowie objektive Bemessungskriterien. Zusätzlich muss beachtet werden, dass keine Konflikte mit weiteren Kulturmaßnahmen entstehen. Bestmögliches Pflanzenwachstum und die Vermeidung von bewässerungsbedingter Nährstoffverlagerung können nur durch optimale Steuerung erreicht werden. Das Ziel liegt in der Aufrechterhaltung der pflanzenartspezifischen optimalen Bodenfeuchte, sodass weder Wasser- noch Sauerstoffmangel die Pflanzenentwicklung beeinträchtigt (Paschold,

2010). In der Praxis erfolgt die Steuerung von Bewässerungssystemen häufig auf Basis von subjektiven Indikatoren sowie Erfahrungen. Jedoch wird bei dieser Vorgehensweise, aufgrund mangelnder Genauigkeit, kein optimales Bewässerungsmanagement erreicht (Howell und Meron, 2007; Michel und Sourell, 2014). Neben der Steuerung auf Basis von Erfahrungen existieren weitere, objektivere Verfahren um die Boden- und Pflanzenwasserversorgung zu beurteilen und Bewässerungsanlagen zu steuern (vgl. Abb. 2.8).

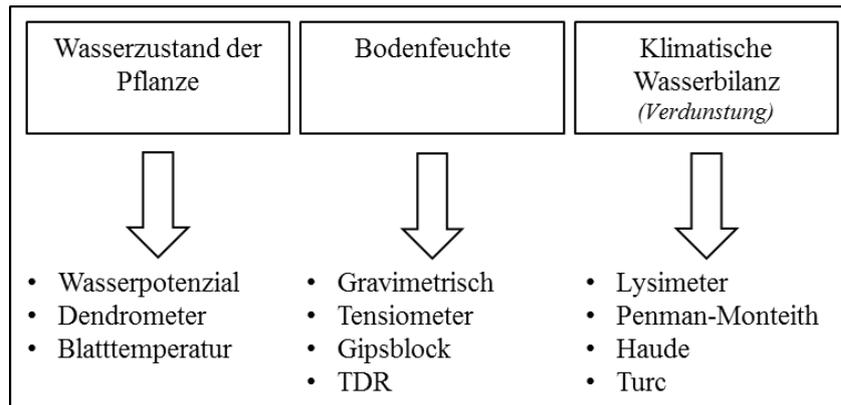


Abb. 2.8: Objektive Verfahren zur Beurteilung der Boden- und Pflanzenwasserversorgung sowie Steuerung von Bewässerungsanlagen (nach: Paschold, 2010).

Zur direkten Messung des Wasserzustands einer Pflanze existieren zwar Messinstrumente, jedoch wurde die Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung des Bewässerungsbedarfs bisher nicht ausreichend erforscht. Dennoch ist die Pflanze selbst ein sehr geeigneter Indikator zur Bemessung des Bewässerungsbedarfs, da die Wirkung verschiedener Bodenfaktoren sowie Effekte der Verdunstung miteinander kombiniert werden (Howell und Meron, 2007).

Eine weitere, indirekte Methode zur Bewässerungssteuerung stellt die Messung der Bodenfeuchte dar. Hierbei wird durch verschiedene Verfahren der Wassergehalt im Boden gemessen wodurch, in Abhängigkeit von der Bodenart, Aussagen über die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser getroffen werden können. Ein Problem stellt dabei die Heterogenität des Bodens dar, wodurch die Interpretation der Messwerte beeinträchtigt wird. Das Finden einer repräsentativen Stelle für einen gesamten Schlag erweist sich im Freiland als schwierig (Paschold, 2010; Michel und Sourell, 2014; Graf, 2016).

Des Weiteren kann der Bewässerungsbedarf auch über Wasserhaushaltsmodelle ermittelt werden. Dabei erfolgt eine Bilanzierung von Niederschlag und Verdunstung sowie eine

Bewertung der Wirkung auf den Wasservorrat im Boden (Michel und Sourell, 2014). Eine weltweit anwendbare Methode dafür stellt die von der FAO empfohlene Penman-Monteith-Gleichung dar (Allen et al., 1998). Diese basiert darauf, dass Wasser in Pflanzenbeständen sowohl direkt von der Bodenoberfläche über den Prozess der Evaporation als auch durch die Transpiration der Pflanzen selbst verdunstet. Da eine Unterscheidung schwierig ist, werden beide im Prozess der Evapotranspiration kombiniert. Beeinflusst wird dieser durch klimatische Faktoren, Pflanzenart, Umweltbedingungen und Bewirtschaftung. Die Berechnung des tatsächlichen täglichen Wasserbedarfs eines Pflanzenbestandes erfolgt über die standardisierte Evapotranspiration einer Referenzfrucht und einem kulturspezifischen Korrekturfaktor. Zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs sind neben dem tatsächlichen Wasserbedarf auch Niederschlag sowie der Bodenwasservorrat von Bedeutung (Savva und Frenken, 2002).

Die Kombination einer klimatischen Wasserbilanz mit gelegentlichen Aktualisierungen durch Bodenfeuchtemessungen wird gegenwärtig als vorteilhafteste Methode zum Steuern der Bewässerung eingeschätzt (Paschold, 2010).

2.4.4 Fertigation

Fertigation bezeichnet die Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen über das Bewässerungswasser (Bar-Yosef, 1991). Magen (1995) beschreibt Fertigation als eine effiziente Form der Düngung, bei welcher durch die Kombination von Wasser mit den von Kulturpflanzen benötigten Nährstoffen eine verbesserte Aufnahme in die Wurzel sowie Verwertung innerhalb der Pflanze resultieren. Fertigation stellt eine moderne Agrotechnik zur Verbesserung der Ausnutzungseffizienz und Verringerung der Ausbringmengen von Düngemitteln dar. Außerdem besteht durch diese Technik die Möglichkeit zur gleichzeitigen Maximierung von Erträgen sowie Minimierung von Umweltbelastungen. Auch Alva et al. (2008) berichten, dass mit diesem Düngesystem, vor dem Hintergrund einer verbesserten Nährstoffaufnahme sowie verringerten Verlagerung von Nährelementen in tiefere Bodenschichten, bei vielen Kulturen sowohl Ertrag als auch Qualität verbessert werden können.

Magen (1995) zeigt auf Basis von Versuchsergebnissen, dass vor allem bei Bewässerungssystemen, die nur einen Teil der Fläche befeuchten, konventionelle Düngesysteme mit breitflächiger Ausbringung ineffizient sind. Laut Devasirvatham (2009) wirkt sich Fertigation sowohl bei oberirdischer, als auch bei unterirdischer

Tropfbewässerung positiv auf das Pflanzenwachstum aus. Evans (1999) beschreibt Fertigation bei Mikrobewässerungssystemen in semiariden sowie humiden Klimaregionen als eine effektive Methode um der Nährstoffverarmung befeuchteter Zonen entgegenzuwirken. Zudem macht er deutlich, dass oberflächlich, über konventionelle Düngerverfahren ausgebrachte Nährstoffe in semiariden Gebieten größtenteils nicht pflanzenverfügbar sind, es sei denn diese werden innerhalb der bewässerten Zone platziert (Evans und Waller, 2007). Fertigation sollte in Bewässerungsprogrammen stets berücksichtigt werden, damit der Pflanzenbedarf an Wasser sowie Nährstoffen gedeckt werden kann. Bei Tropfbewässerung werden häufig täglich Nährstoffe ausgebracht. Aufgrund der mangelnden Verteilung dieser existieren aber auch Verfahren, bei denen zu Vegetationsbeginn ein Teil des Nährstoffbedarfs durch konventionelle Ausbringungsverfahren abgedeckt wird (Evans und Waller, 2007).

Bewässerungssysteme mit Fertigation ermöglichen eine präzise Nährstoffversorgung, die auch an den wechselnden Bedarf der Kulturpflanzen im Verlauf der Vegetation angepasst werden kann (Burt, 1995; Evans und Waller, 2007). Hierfür sind jedoch Kenntnisse über benötigte Nährstoffmengen sowie Aufnahmeraten im Wachstumsverlauf notwendig. Der Verlauf der Nährstoffaufnahme ist abhängig von den spezifischen Eigenschaften der Kulturpflanze. Zusätzlich wird die Aufnahme von einer Vielzahl an Umweltfaktoren bestimmt. Auch die Menge an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden ist für die gezielte Ernährung der Pflanzen von Bedeutung (Hagin und Lowengart-Aycicegi, 2003). Aufgrund signifikanter Unterschiede zwischen verschiedenen Pflanzenarten gibt es kein allgemein gültiges Konzept für eine optimale Fertigation von Nutzpflanzen. Sowohl Bewässerung als auch Fertigation müssen kulturspezifisch optimiert werden (Devasirvatham, 2009).

Durch Fertigation können sowohl Mehr- als auch Einzelnährstoffdünger direkt in die aktive Wurzelzone appliziert werden (Paschold, 2010). Bei der Auswahl des Düngemittels sollten Pflanzentyp und Entwicklungsstadium, Standortbedingungen, Wasserqualität und Düngerverfügbarkeit beachtet werden (Kafkafi, 2005). Zusätzlich ist bei Tropfbewässerung die Löslichkeit eines Düngers in Wasser, um Probleme mit blockierten Emittlern zu vermeiden, von Bedeutung. Der am häufigsten eingesetzte Nährstoff ist Stickstoff, aber auch Phosphat und Kali spielen eine wichtige Rolle (Boman und Obreza, 2002; Burt, 1998). Einen Überblick zu Düngemitteln, die bei Fertigation eingesetzt werden können, soll Tab. 2.1 vermitteln.

Tab. 2.1: Düngemittel zum Einsatz bei Fertigation (nach: Magen, 1995; Burt, 1998; Hagin und Lowengart-Aycicegi, 2003; Kafkafi und Tarchitzky, 2011).

Nährstoff	Verbindung/Düngemittel	Nährstoffgehalt (N - P₂O₅ - K₂O)
Stickstoff	Ammonitratharnstofflösung	28-0-0
	Harnstoff	46-0-0
	Ammoniumsulfat	21-0-0
	Ammoniumnitrat	33-0-0
Phosphat	Monoammoniumphosphat	12-61-0
	Diammoniumphosphat	18-46-0
	Phosphorige Säure	0-61-0
Kali	Kaliumchlorid	0-0-62
	Kaliumnitrat	13-0-46
	Kaliumsulfat	0-0-50
Magnesium	Magnesiumsulfat	
	Magnesiumchlorid	
Mikronährstoffe	Verschiedene Elemente	

Folgende Beispiele belegen, dass eine Fertigation auch in Dauerkulturen positive Effekte auf die Wasser- und Nährstoffeffizienz hat: Boman (1996) untersuchte bei Grapefruit-Bäumen in einem 4-jährigen Feldversuch, ob die Nährstoffausbringung über ein kombiniertes Düngesystem, bei welchem ein Teil der Nährstoffe konventionell oberflächlich gestreut werden und der Rest über Fertigation appliziert wird, Vorteile gegenüber der regulären oberflächigen Applikation aufweist. Bei der regulären Düngungsmethode erfolgte die Ausbringung des Gesamtbedarfs an Stickstoff und Kali in drei Gaben, welche jeweils gestreut wurden. Hingegen wurde im kombinierten Düngesystem ein Drittel der Menge an Stickstoff und Kali gestreut. Der Rest wurde in mehreren Gaben im Abstand von zwei Wochen durch Fertigation ausgebracht. Die insgesamt ausgebrachten Mengen an

Stickstoff und Kali unterschieden sich zwischen den Versuchsvarianten nicht. Während des Versuchszeitraums erreichte die kombinierte Variante in drei von vier Jahren signifikant höhere Erträge, woraus auch eine verbesserte Nährstoffausnutzungseffizienz resultiert. Durchschnittlich nahm der Ertrag durch Fertigation um 9 % zu.

Kwong et al. (1999) führten über zwei Jahre Feldversuche zur Fertigation bei Zuckerrohr durch. Dabei wurde in einem Steigerungsversuch für Stickstoff die Wirkung der Nährstoffausbringung über ein Tropfbewässerungssystem analysiert. Als Referenzmethode diente die reguläre Form der Düngung, bei der Stickstoff in granulierter Form in den Boden eingearbeitet wird. Als Ergebnis der Untersuchungen wird angeführt, dass Stickstoffdüngung über das Fertigationsverfahren deutlich effizienter ist und die N-Menge im Vergleich zur Referenzmethode um 30 % reduziert werden kann, ohne Verringerung des Zuckerertrags.

Auch Asokaraja (2016) belegt in Feldversuchen, dass durch Nährstoffausbringung über Fertigation Ertrag und Qualität bei verschiedenen Kulturen, darunter Zuckerrohr und Bananen, verbessert werden können. Des Weiteren wird angeführt, dass durch die Kombination von Bewässerung und Düngung eine bessere Wasser- und Nährstoffverwertung erreicht wird.

2.5 Bedeutung von Bewässerung und Fertigation in Hopfen

Für ein stabiles Ertragsniveau stellt die Sonderkultur Hopfen hohe Ansprüche an die Wasserversorgung, jedoch ist nicht nur die absolute Wassermenge, sondern auch die zeitliche Verteilung der Niederschläge von Bedeutung (Münsterer, 2012). Der Einfluss der Wasserversorgung auf Wachstum, Ertrag sowie Synthese der Inhaltsstoffe wurde von verschiedenen Autoren beschrieben. Srecec et al. (2004; 2008) verdeutlichten die negativen Effekte einer mangelnden Wasserversorgung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe an der Sorte Aurora in Kroatien. In Tschechien konnte bei pflanzenbaulichen Versuchen speziell die Bedeutung der Niederschlagsverteilung während der Vegetation hervorgehoben werden (Koren, 2007). Für die Hopfensorte Saazer wurde sowohl von Kucera und Krofta (2009) als auch von Monzy et al. (2009) ein positiver Effekt der Niederschlagsmenge auf den Gehalt an Alphasäure gezeigt. Pavlovic et al. (2012; 2013) analysierten für die Jahre 1994 bis 2009 rechnerisch den Einfluss verschiedener Witterungsparameter, wobei Niederschlag sowohl für den Ertrag als auch für den Gehalt an Alphasäure von Bedeutung war.

Der Anbau von Hopfen erfolgt weltweit in klimatisch sehr unterschiedlichen Regionen. Bewässerung stellt dabei in semiariden Anbaugebieten wie dem Yakima Valley (WA, USA) eine Grundvoraussetzung dar, ohne welche der kommerzielle Anbau der Sonderkultur nicht möglich wäre. In humiden Anbauregionen, wie der Hallertau hingegen, finden Bewässerungssysteme vor allem zur Ertragsabsicherung sowie Risikominimierung in Trockenjahren Anwendung. Die Wirkung von Bewässerung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe wurde in einer Reihe an Versuchen analysiert. So untersuchten Svoboda et al. (2008) die Effekte in den Jahren 2005 bis 2007 an der Sorte Saazer in Tschechien. Als Ergebnis wird angeführt, dass Ertrag und Alphasäuregehalt durch Bewässerung durchschnittlich um 21 % bzw. 7 % gesteigert werden können. Fandino et al. (2015) zeigten in Spanien an der Sorte Nugget eine Ertragssteigerung von 37 % durch Bewässerung auf. Nakawuka (2013) untersuchte die Auswirkungen von Wasserstress an vier Sorten im Yakima Valley (WA, USA). Dabei wurde festgestellt, dass durch die Anpassung der Bewässerung an den tatsächlichen Bedarf der Pflanzen höhere Erträge möglich sind. Delahunty und Johnston (2011) erforschten die Auswirkungen von Bewässerung in Maine (USA), einer Region mit humidem Klima. Dabei wurden durch Tropfbewässerung, trotz hoher Niederschlagsmengen in den Sommermonaten, deutliche Ertragssteigerungen erreicht.

Auch im deutschen Hopfenbau hat die Bedeutung von Bewässerung zur Verbesserung des Hopfenanbaus zugenommen, weshalb an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in den vergangenen Jahren unterschiedliche Versuche zur Optimierung der Tropfbewässerung durchgeführt wurden (Graf und Beck, 2015; Graf, 2016). In diesen wurde die Wirkung von Bewässerung auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen untersucht, wobei ein Großteil der Versuche an der Hochalphasorte Herkules erfolgte. Hierbei ist anzumerken, dass die Sorte Herkules wie auch die verwandten Sorten Magnum und Taurus aufgrund des genetischen Ausgangsmaterials mit großer Wahrscheinlichkeit eine erhöhte Trockenheitstoleranz aufweist (Lutz, 2013; Stampfl, 2013). Tendenziell erreichten Versuchsvarianten mit Bewässerung häufig höhere Erträge. Signifikant höher lagen diese aber nur im extremen Trockenjahr 2015 auf sandigem Boden. In diesem Jahr lag auch der Alphasäuregehalt durch Bewässerung höher. Zusätzlich wurde der Einfluss der Tropfschlauchpositionierung, d. h. ob der Tropfschlauch auf dem Bifang liegt oder parallel zur Hopfenreihe in den Boden eingezogen ist, untersucht. Die resultierenden Ergebnisse zeigen, dass oberirdische Varianten tendenziell höhere Erträge erreichen, wobei die Unterschiede jedoch in keinem der Versuche signifikant waren (Graf, 2016). Im Anbaujahr 2012 wurde an der Aromasorte Perle und Hochalphasorte Herkules untersucht, inwieweit ein induzierter Trockenstress in den letzten 4 Wochen vor der Ernte den Ertrag und die Inhaltsstoffe beeinflusst (Stampfl, 2013). Negative Auswirkungen auf Ertrag und Alphasäuregehalt zeigten sich bei der Sorte Perle, nicht jedoch bei Herkules.

Bei Bewässerung kann Fertigation, wie im Kapitel 2.4.4 erläutert, hinsichtlich einer präzisen Nährstoffversorgung, die auch an den wechselnden Bedarf von Kulturpflanzen im Verlauf der Vegetation angepasst werden kann, eine wichtige Rolle spielen. Diese Form der Nährstoffausbringung wurde bei der Sonderkultur Hopfen bisher vor allem im größten amerikanischen Anbaugebiet, dem Yakima Valley angewendet. Aufgrund der klimatischen Bedingungen während der Vegetationszeit wäre dort die Wirksamkeit oberflächlich gestreuter Nährstoffe gering. Die Ausbringung von Nährstoffen durch Fertigation ist in dieser Region die Standardmethode zur Düngung. Hauptsächlich wird dabei Stickstoff durch wöchentliche Gaben in Höhe von 6 – 22 kg/ha ausgebracht (Delahunty und Johnston, 2014). Zur Anpassung der N-Düngung an den aktuellen Bedarf der Pflanzen wird der Nitratgehalt in den Blattstielen voll entwickelter Blätter mehrmals im Verlauf der Saison analysiert (Gingrich et al., 2000; Delahunty und Johnston, 2014). In Abhängigkeit des ermittelten Versorgungszustandes kann durch Fertigation anschließend wöchentlich eine Korrektur erfolgen, indem N-Gaben erhöht oder verringert werden.

Im Anbaujahr 2014 führten Delahunty und Johnston, (2014) in Maine im Nordosten der USA einen einjährigen Versuch zur Fertigation bei Hopfen durch. Dabei wurden die Auswirkungen einer N-Düngung über Tropfbewässerung untersucht und mit dem praxisüblichen Düngesystem, bei welchem dieselbe Menge an Stickstoff oberflächlich gestreut wurde, verglichen. Die Versuche erfolgten an zwei- und fünfjährigen Pflanzen verschiedener Hopfensorten. Insgesamt wurden vier verschiedene Düngungsvarianten unterschieden. Als Ergebnis wird angeführt, dass Fertigation zu einer signifikanten Verbesserung der Erträge bei allen Sorten führen kann. Am größten waren die Unterschiede zwischen Fertigation und regulärer Ausbringung bei jüngeren Pflanzen.

Im deutschen Hopfenanbaugebiet der Hallertau wurde Fertigation bis vor wenigen Jahren nicht eingesetzt. Erst seit der vermehrten Errichtung von Tropfbewässerungsanlagen in den vergangenen Jahren nahm auch das Interesse an dieser Düngungsmethode zu, da sich vor allem in Trockenperioden dadurch wesentliche Vorteile ergeben. Über optimale Fertigation bei Hopfen unter den Bedingungen in der Hallertau liegen bisher jedoch keine Informationen vor. In der Praxis werden dem Bewässerungswasser in einigen Betrieben zwar gelegentlich Nährstoffe zugegeben, jedoch erfolgt dies häufig nach „Gefühl“ statt an den Bedarf der Pflanzen angepasst.

3 Fragestellung

Vor dem Hintergrund der Optimierung des Hopfenanbaus durch Tropfbewässerung sollen im Rahmen dieser Masterarbeit grundlegende Erkenntnisse zu Auswirkungen von Fertigation und Positionierung des Tropfschlauches unter den Bedingungen in der Hallertau gewonnen werden. Folgende Fragen werden dabei hinsichtlich der Effekte auf Ertrag und Qualität untersucht:

- 1) Wie wirkt sich eine Nährstoffausbringung über Tropfbewässerung im Vergleich zur oberflächigen Applikation granulierter Dünger aus?
- 2) Welche Bedeutung hat die Positionierung des Tropfschlauches?

Zur Untersuchung dieser Fragen wurden in der Hallertau im Anbaujahr 2016 Feldversuche an den Sorten Perle (PE) und Herkules (HS) durchgeführt. Sowohl die Aromasorte Perle als auch die Hochalphasorte Herkules wurden dabei auf zwei, hinsichtlich der vorherrschenden Bodenart verschiedenen Standorten, untersucht. Insgesamt wurden vier Versuchen angelegt, welche in den kommenden Jahren durch die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft weitergeführt werden sollen.

4 Material und Methoden

4.1 Standortbeschreibung

Die Versuche wurden auf den Flächen zweier, in der Hallertau liegender, Hopfenbaubetriebe durchgeführt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese als Standort/Betrieb A und B bezeichnet. Betrieb A, mit mittleren bis schweren Böden, befindet sich bei Hirnkirchen im nördlichen Landkreis Freising. Da sich die Versuchsstandorte hinsichtlich der vorherrschenden Bodenart unterscheiden sollten, musste Betrieb B in einer Region mit leichteren Böden ausgewählt werden. Zudem war bei der Auswahl die Nähe zum Hopfenforschungszentrum in Hüll, wo die Versuchsernte stattfinden sollte, ausschlaggebend. Die Wahl fiel schließlich auf einen Betrieb in Starzhausen bei Wolnzach im südlichen Landkreis Pfaffenhofen a. d. Ilm. Bei beiden Betrieben ist ein Großteil der Hopfenflächen mit einer im Boden verbauten Tropfbewässerung ausgestattet. In den folgenden zwei Abschnitten werden die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Standortes genauer beschrieben.

4.1.1 Standort A

Standort A befindet sich im löblehmbeeinflussten Tertiärhügelland (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016). Die Anlage der Versuche erfolgte auf zwei räumlich voneinander getrennten Flächen, welche 480 – 500 Meter über NN liegen.

Koordinaten Versuchsfläche PE:

- 48°32'36.50"N
- 11°40'32.55"O

Koordinaten Versuchsfläche HS:

- 48°32'37.44"N
- 11°41'23.63"O

Beide Versuchsflächen am Standort A wurden langjährig organisch gedüngt. Das Feld mit der Sorte Perle hat eine Fläche von 2 ha und die Reihen mit den Hopfenpflanzen verlaufen in Nord-Süd Richtung. Aufgrund einer Hangkuppe wurde der Versuch unmittelbar nach dieser im leichten Süd-Nord Gefälle angelegt. Das Feld der Sorte Herkules hat eine Fläche von 3 ha und die Hopfenreihen verlaufen ebenfalls in Nord-Süd Richtung mit einem

Gefälle in Richtung Süden. Da sich dieses Feld an der Hangoberseite als zu heterogen für die Durchführung eines Versuchs herausstellte, musste der Versuch an dessen Hangunterseite angelegt werden.

Aus den Ergebnissen der Bodenschätzung (Tab. 4.1) geht hervor, dass Entstehungsart und Zustandsstufe beider Flächen identisch sind. Hinsichtlich Boden- und Ackerzahl ist die Fläche mit der Sorte Perle etwas besser einzustufen. Unterschiede bestehen laut Bodenschätzung auch in der vorherrschenden Bodenart, welche bei PE „Lehm“ und bei HS „sandiger Lehm“ ist.

Tab. 4.1: Bodenschätzungsergebnisse für die Versuchsflächen am Standort A (StMELF, 2016).

	Perle	Herkules
Bodenart	L	s L
Zustandsstufe	4	4
Entstehungsart	D	D
Bodenzahl	60	56
Ackerzahl	55	50

Auf Basis der vorherrschenden Bodenart können Parameter zur Bewertung des Wasserspeichervermögens sowie Bewässerungsbedarfs abgeschätzt werden (vgl. Tab. 4.2). Am Versuchsstandort A liegt die Feldkapazität der Fläche mit der Sorte PE (Bodenart Lehm) über der des Schlags mit der Sorte HS (Bodenart sandiger Lehm). Jedoch ist bei der Bodenart „Lehm“ auch der Totwasseranteil höher, weshalb sich im Vergleich zur Bodenart „sandiger Lehm“ insgesamt eine geringere nutzbare Feldkapazität ergibt.

Tab. 4.2: Feldkapazität, Totwasseranteil und nutzbare Feldkapazität der Bodenarten am Versuchsstandort A (Mastel, 2002).

Bodenart	FK [%]	TW [%]	nFK [%]
L	40	23	17
s L	36	17	19

4.1.2 Standort B

Standort B liegt im sandigeren Teil des Tertiärhügellandes (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2016). Die Schläge mit den Sorten Perle und Herkules liegen an diesem Standort direkt nebeneinander und befinden sich auf einer Höhe von 420 Meter über NN.

Koordinaten beider Versuchsflächen:

- 48°37'19.91"N
- 11°36'51.44"O

Am Standort B erfolgte keine langjährige organische Düngung. Das Feld mit der Sorte Perle hat eine Fläche von 3,3 ha; die Reihen mit den Hopfenpflanzen verlaufen in Ost-West Richtung, quer zu einem leichten Gefälle. Der Schlag mit der Sorte Herkules liegt südlich davon und hat eine Fläche von 1,7 ha; dort verlaufen die Hopfenreihen in Nord-Süd Richtung mit einem Gefälle in Richtung Süden. Die Versuchsanlage erfolgte an der Hangoberseite.

Bodenart, Zustandsstufe und Entstehungsart der Versuchsflächen am Standort B unterscheiden sich nicht voneinander (Tab. 4.3). Hinsichtlich der Bodenzahl und der daraus resultierenden Ackerzahl ist die Fläche mit der Sorte HS etwas besser einzustufen. Unterschiede zu den Flächen von Betrieb A (Tab. 4.1) bestehen vor allem hinsichtlich der Bodenart. Am Standort B ist die vorherrschende Bodenart „stark lehmiger Sand“.

Tab. 4.3: Bodenschätzungsergebnisse für die Versuchsflächen am Standort B (StMELF, 2016).

	Perle	Herkules
Bodenart	S L	S L
Zustandsstufe	3	3
Entstehungsart	D	D
Bodenzahl	56	58
Ackerzahl	54	57

Da sich am Standort B die vorherrschende Bodenart der Schläge nicht unterscheidet, bestehen auch keine Unterschiede hinsichtlich der Schätzwerte für Feldkapazität, Totwasser und nutzbarer Feldkapazität (vgl. Tab. 4.4).

Tab. 4.4: Feldkapazität, Totwasseranteil und nutzbare Feldkapazität der Bodenarten am Versuchsstandort A (Mastel, 2002).

Bodenart	FK [%]	TW [%]	nFK [%]
S L	32	15	17

4.2 Witterungsverlauf

Zur Beurteilung des Witterungsverlaufs werden Aufzeichnungen von drei Wetterstationen herangezogen (Tab. 4.5). Die Station am Hopfenforschungszentrum in Hüll liegt zwischen beiden Standorten. Hingegen sind Hirnkirchen und Stadelhof die jeweils nächstgelegenen Stationen von Betrieb A bzw. B und dienen für spezifische Aussagen bezüglich der Niederschlagsverteilung.

Tab. 4.5: Lage und Relevanz der zur Beurteilung des Witterungsverlaufs verwendeten Wetterstationen.

Station	Relevanz	Lage
Hüll	Standort A	6,5 km nördlich von A
	Standort B	5 km südöstlich von B
Hirnkirchen	Standort A	1,5 - 2 km südöstlich von A
Stadelhof	Standort B	3 km nördlich von B

Trotz geringer räumlicher Entfernung der drei Wetterstationen variierte die monatliche Niederschlagssumme (vgl. Tab. 4.6). Vor allem in Hüll fielen in den Monaten Juni bis August höhere Mengen. In Hirnkirchen fehlten für die Monate Mai und September vollständige Datensätze, weshalb keine Werte angegeben werden können.

Tab. 4.6: Monatliche Niederschlagssumme [mm] im Jahr 2016 in Abhängigkeit von der Wetterstation.

	Mai	Juni	Juli	August	September
Hüll	88	132	135	67	66
Hirnkirchen	-	92	116	59	-
Stadelhof	96	85	112	48	62

Auffällig hinsichtlich der Niederschlagsverteilung ist an beiden Standorten die hohe Anzahl an Regentagen im Zeitraum von Anfang Juni bis Mitte August (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Im weiteren Verlauf nahm die Niederschlagshäufigkeit ab und gegen Ende August setzte trockenere Witterung ein. Ab Anfang September herrschte ein Wasserdefizit und an Pflanzen in Randbereichen von Hopfenschlägen waren erste Anzeichen von Wassermangel und Trockenstress zu erkennen. Hinsichtlich der mittleren Tagestemperatur bestanden minimale Unterschiede zwischen den Standorten, weshalb nur die Daten der Station in Hüll abgebildet werden.

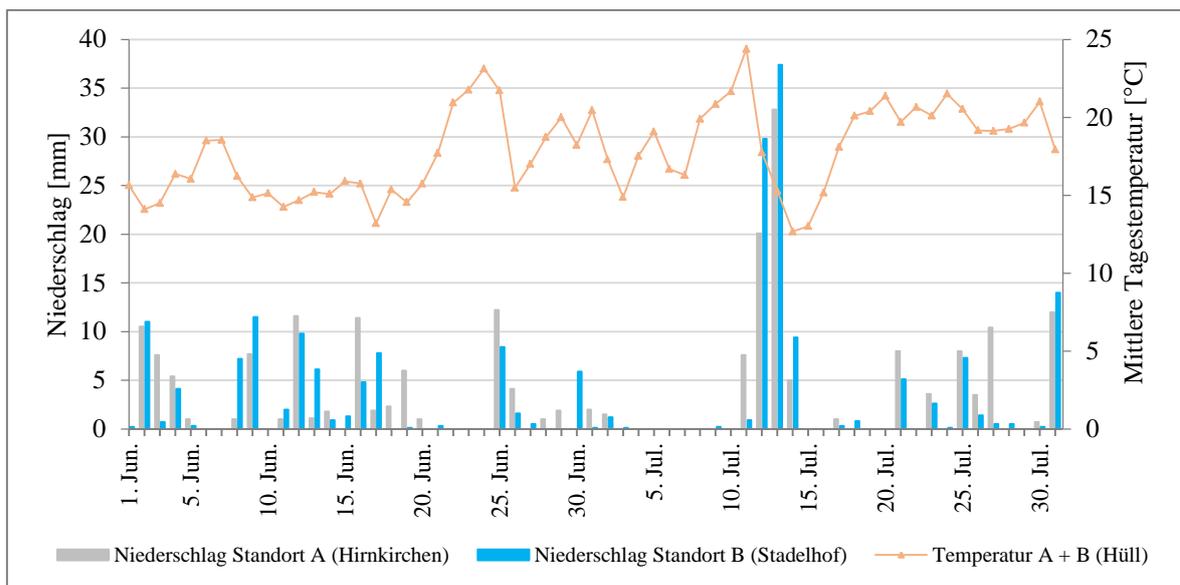


Abb. 4.1: Niederschlagsverteilung (Tagessumme) und Tagesdurchschnittstemperatur für Juni und Juli 2016 (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016).

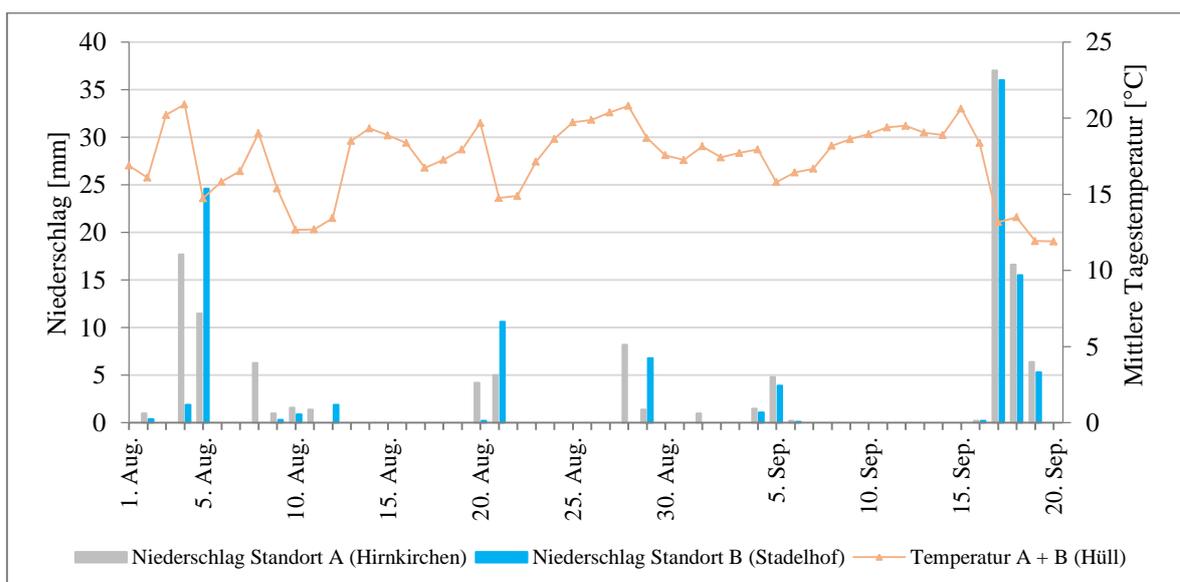


Abb. 4.2: Niederschlagsverteilung (Tagessumme) und Tagesdurchschnittstemperatur für Aug. und Sept. 2016.

Für die Station in Hirnkirchen (Standort A) fehlen Niederschlagsdaten für September, stattdessen wurden die Werte der Station in Hüll abgebildet (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016).

4.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Anlage der Versuche erfolgte, wie bereits in Kapitel 3 erläutert, mit dem Ziel die Auswirkungen von Fertigation und Tropfschlauchpositionierung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen zu untersuchen. Um die Effekte dieser Einflussgrößen gezielt zu analysieren, wurde jeweils ein 2-faktorielles Versuchsdesign verwendet. Die Faktoren sowie die dazugehörigen Stufen lauten:

Faktor 1 = Düngung:

- Kontrolle
- Gestreut
- Fertigation

Faktor 2 = Tropfschlauchposition:

- Auf Bifang (AB)
- Neben Bifang (NB)

Die einzelnen Stufen des Faktors Düngung unterschieden sich hinsichtlich der Höhe und Ausbringungsart einer Teilemenge des gesamten Stickstoffbedarfs. Dabei erfolgten die erste und zweite N-Gabe bei allen Düngungsvarianten eines Versuchs einheitlich in Form eines NPK-Düngers bzw. durch AHL. Bei der Variante „Kontrolle“ wurden insgesamt nur 2/3 des ermittelten N-Bedarfs ausgebracht, aufgeteilt auf zwei Gaben. Hingegen wurde bei der Stufe „Gestreut“ die N-Düngung erhöht und 3/3 des Bedarfs gedüngt. Diese höhere N-Menge wurde durch eine dritte Gabe in Form von KAS in einer Banddüngung ausgebracht. Bei der Düngungsvariante „Fertigation“ wurde insgesamt die gleiche N-Menge (3/3) wie bei „Gestreut“ gedüngt. Jedoch erfolgte die Ausbringung der höheren N-Menge in Form von AHL über einen Zeitraum von sieben Wochen mit dem Bewässerungswasser. Zudem wurde bei dieser Düngungsvariante ein geringer Teil der höheren N-Menge dem Bewässerungswasser in Form von Monoammoniumphosphat (MAP) zugesetzt. Des Weiteren erfolgte bei „Fertigation“ zusammen mit der wöchentlichen AHL-Gabe auch das Einspeisen von gelöstem Bittersalz (Nährstoffmengen siehe. Tab. A.1 bis A.4).

Den zweiten Faktor der Versuche stellt die Tropfschlauchpositionierung dar. Die Stufe „AB“ bedeutet, dass die Tropfschläuche nach dem zweiten Aufackern auf den Bifängen ausgelegt wurden. Bei der Stufe „NB“ hingegen befinden sich diese dauerhaft im Boden

neben den Hopfenreihen. Durch Kombination von drei Düngungsstufen mit zwei Tropfschlauchpositionen, bestand jeder Versuch aus insgesamt sechs verschiedenen Varianten (siehe Abb. 4.3).

4.3.1 Versuchsanlage und -ablauf

Die Bewirtschaftung der Schläge mit den Versuchsfeldern erfolgte bei beiden Betrieben praxisüblich und an die Bedingungen im Anbaujahr 2016 angepasst. Aufgebaut wurde jeder Versuch als 2-faktorielle Spaltanlage mit den Stufen der Düngung als Großteilstücke und den Stufen der Tropfschlauchpositionierung als Kleinteilstücke (vgl. Abb. 4.3). Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen musste auf eine vollständige Randomisierung der einzelnen Prüfglieder verzichtet werden.

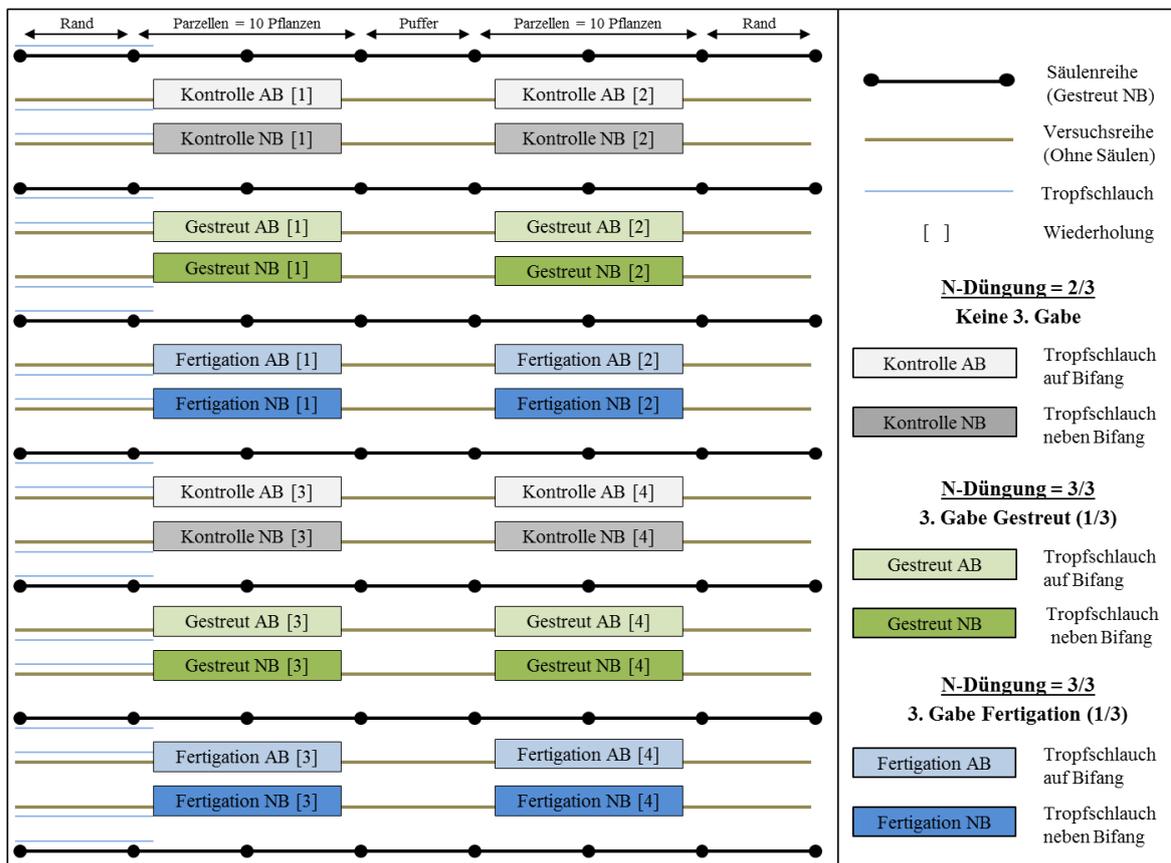


Abb. 4.3: Anlageplan: Für alle Versuche gleichermaßen gültig.

Wie dem Anlageplan (Abb. 4.3) zu entnehmen ist, wurden für die Durchführung jedes Versuchs 12 Hopfenreihen benötigt, wobei Säulenreihen ausgeschlossen wurden, um potenzielle negative Effekte, ausgehend von den Hopfensäulen zu vermeiden. Behandelt wurden diese Säulenreihen wie die Versuchsvariante Gestreut NB. Mit einer Länge von 63 m und einer Breite von 53 m betrug die Fläche eines Versuchs 0,33 ha.

Die Versuchsanlage begann Mitte März 2016 durch das Markieren der Versuchsflächen und die Entnahme der Bodenproben für Standardboden- sowie Nmin-Untersuchungen. Aufbauend darauf wurde der Düngebedarf ermittelt (siehe 4.3.3). Des Weiteren war zur Durchführung der Versuche, wie im Anlageplan (Abb. 4.3) dargestellt, jeweils ein Umbau der vorhandenen Tropfbewässerungsanlage notwendig. Vor der Nährstoffausbringung über Fertigation musste der Flächenanteil der Reihen mit Fertigation exakt vermessen. Ab Mitte Juni wurde bei den Reihen der Düngungsstufe „Fertigation“ damit begonnen, Nährstoffe mit dem Bewässerungswasser auszubringen. Mitte August und Anfang September erfolgte mehrmals eine Bonitur der Grünfärbung der einzelnen Varianten aller Versuche. Nach Erreichen der Erntereife im September wurden zuerst die Versuche der Aromasorte Perle und im Anschluss die der Hochalphasorte Herkules geerntet.

4.3.2 Bodenuntersuchung

Zur Überprüfung der Nährstoffvorräte im Boden wurden in jedem Versuch zwei Proben entnommen. Am 14.03.2016 erfolgte die Entnahme der Bodenproben für die Standardboden-Untersuchung, wobei jede Versuchsfläche im Zick-Zack-Gang auf Krumentiefe beprobt wurde. Die Sammelprobe wurde anschließend vermischt und eine Teilmenge davon analysiert. An beiden Standorten waren die Flächen weitgehend optimal mit Phosphat, Kali und Magnesium versorgt (Tab. 4.7). Je eine Fläche der Standorte war hoch (Gehaltsklasse D) mit Phosphat versorgt, während beide Flächen am Standort B nur eine niedrige Magnesiumversorgung (Gehaltsklasse B) aufwiesen.

Tab. 4.7: Ergebnisse der Standardbodenuntersuchung: Nährstoffgehalte [mg/kg] und Gehaltsklassen für Phosphat, Kali und Magnesium sowie pH-Wert der Versuchsflächen am Standort A und B.

		P₂O₅		K₂O		MgO		pH
		mg/kg	Klasse	mg/kg	Klasse	mg/kg	Klasse	
Standort A	Perle	14	C	19	C	14	C	5,3
	Herkules	22	D	14	C	14	C	6,1
Standort B	Perle	24	D	14	C	5	B	5,8
	Herkules	14	C	11	C	6	B	6,2

Die Probenahme zur Untersuchung des Nmin-Gehalts erfolgte bei allen Versuchsflächen am 21.03.2016. Gezogen wurden die Proben bis 90 cm Tiefe, wobei die Mitte der Fahrspur nicht beprobt wurde, da in den Betrieben Banddüngung erfolgt. Auffällig waren die deutlich erhöhten Nmin-Gehalte am Standort A (Tab. 4.8). Dabei wurde für die Versuchsfläche mit der Sorte Perle ein Gehalt von 109 kg N/ha ermittelt. Hingegen lag der vom Betrieb für diesen Schlag untersuchte Wert nur bei 65 kg N/ha.

Tab. 4.8: Ergebnisse der Nmin-Untersuchung: Nmin-Gehalte der Versuchsflächen [kg N/ha].

		Nmin-Gehalt
Standort A	Perle	109 (65)
	Herkules	80
Standort B	Perle	50
	Herkules	36

4.3.3 Düngebedarfsermittlung und Düngung

Auf Basis der Ergebnisse von Standardboden- und Nmin-Untersuchung (Tab. 4.7 und 4.8) sowie der sorten- und betriebsspezifischen Ertragserwartung (Tab. 4.9) wurde für jede Versuchsfläche eine Düngebedarfsermittlung durchgeführt. Bei Phosphat, Kali und Magnesium (Tab. 4.9) erfolgte die Berechnung der auszubringenden Nährstoffmenge durch Multiplikation der Ertragserwartung mit dem Nährstoffgehalt der gesamten Pflanze (siehe Abb. 2.5), da bei beiden Betrieben davon ausgegangen wurde, dass kein Rebenhäcksel zurückgeführt wird. In Abhängigkeit von der Gehaltsklasse einer Versuchsfläche (Tab. 4.7) erfolgte anschließend die Korrektur der berechneten Menge. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die P-Düngung bei keiner der hoch versorgten Flächen reduziert wurde. Am Standort B lagen beide Versuchsflächen für Magnesium in Versorgungsstufe B, weshalb der berechnete Düngebedarf um 30 kg/ha erhöht wurde.

Tab. 4.9: Ertragserwartung der Betriebe [dt/ha] und Ergebnisse der Düngebedarfsermittlung für Phosphat, Kali und Magnesium [kg/ha] in Abhängigkeit von der Versuchsfläche.

		Ertragserwartung	P₂O₅	K₂O	MgO
		[dt/ha]	[kg/ha]	[kg/ha]	[kg/ha]
Standort A	Perle	22	44	161	48
	Herkules	37	74	270	81
Standort B	Perle	22,5	45	164	50 + 30
	Herkules	35	70	255	77 + 30

Da sich die einzelnen Düngungsvarianten hinsichtlich der ausgebrachten Mengen an Phosphat, Kali und Magnesium innerhalb eines Versuchs nicht unterscheiden sollten, erfolgte eine Ausgleichsdüngung. Dabei wurde zum einen die bei der Variante „Fertigation“ über das Bewässerungswasser ausgebrachte Menge an Phosphat (MAP) und Magnesium (Bittersalz) in den Varianten „Kontrolle“ und „Gestreut“ in granulierter Form appliziert. Zum anderen wurde dadurch bei allen Düngungsvarianten der Rest des berechneten Gesamtbedarfs an Phosphat, Kali und Magnesium (Tab. 4.9) ausgebracht. Auf eine detaillierte Erläuterung der Ausgleichsdüngung wird an dieser Stelle verzichtet, jedoch können die verwendeten Düngemittel sowie ausgebrachte Nährstoffmengen für jede Versuchsfläche den Tabellen A.1 bis A.4 entnommen werden.

Für den Nährstoff Stickstoff erfolgte die Berechnung des Düngebedarfs nach dem DSN-System (siehe 2.3). Bei der Sonderkultur Hopfen wird dabei die auszubringende N-Menge, ausgehend von einem allgemeinen Sollwert in Höhe von 240 kg N/ha, durch Zu- und Abschläge errechnet. Abschläge wurden für den Nmin-Gehalt, die Zwischenfruchteinsaat und org. Düngung erteilt (siehe. Tab. 4.10). Zuschläge hingegen für die über 20 dt/ha hinausgehende Ertragserwartung der Betriebe. Bei Sorte Perle am Standort A erfolgte die Berechnung nicht auf Basis des analysierten Nmin-Gehalts, da dieser als zu hoch erachtet wurde, stattdessen wurde der vom Betrieb ermittelte Wert in Höhe von 65 kg N/ha (Tab. 4.8) verwendet. Zu beachten ist außerdem, dass die ermittelte theoretisch auszubringende N-Menge bei Standort B für beide Versuchsflächen reduziert wurde, da sonst Grenzen, die

zur Vermeidung von Überdüngung dienen, überschritten worden wären. Bei Erträgen bis 25 dt/ha liegt die Grenze bei 180 kg N/ha. Da die Ermittlung der Grenzen vor der Züchtung der Sorte Herkules erfolgte, welche jedoch Erträge bis zu 40 dt/ha liefert, existieren keine sinnvollen Grenzwerte für diese Sorte. In den durchgeführten Versuchen erfolgte die Begrenzung der N-Menge für die Sorte Herkules bei 210 kg N/ha. Am Standort A wurde die theoretisch auszubringende N-Menge aus Gründen der Vereinfachung minimal reduziert.

Tab. 4.10: Düngedarfsermittlung für Stickstoff [kg N/ha] nach dem DSN-System für die einzelnen Versuchsflächen.

	Standort A [kg N/ha]		Standort B [kg N/ha]	
	Perle	Herkules	Perle	Herkules
N-Sollwert	240	240	240	240
+ Ertrag (> 20 dt/ha)	+ 8	+ 73	+ 11	+ 65
- Nmin-Gehalt	- 65	- 80	- 50	- 36
- Zwischenfrucht	- 10	- 10	- 10	- 10
- organische Düngung	- 10	- 10	-	-
= N-Menge (theoret.)	163	213	190	260
→ tatsächl. N-Düngung	160	210	180	210

Wie bereits zu Beginn des Abschnitts 4.3 beschrieben, erfolgte bei der Versuchsvariante „Kontrolle“ eine Reduktion der N-Düngung um 1/3. Dabei stellt die Sorte Perle am Standort A eine Ausnahme dar, da die N-Menge der „Kontrolle“ aus Gründen der Vereinfachung um 37,5 % reduziert wurde. Die erste und zweite N-Gabe erfolgten bei allen Düngungsvarianten innerhalb eines Versuchs einheitlich. Die Abbildungen 4.4, 4.5 und 4.6 verdeutlichen die versuchsspezifische Vorgehensweise bei der N-Düngung.

Bei der **Sorte Perle am Standort A** (Abb. 4.4) unterscheiden sich die einzelnen Düngungsstufen hinsichtlich Höhe und Ausbringungsart der dritten N-Gabe. In den Reihen der Variante „Kontrolle“ wurde auf die dritte N-Gabe verzichtet und es wurden 60 kg N/ha weniger gedüngt als in denen der Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“. In der Versuchsvariante „Gestreut“ wurde die dritte Gabe in Form von KAS als Einzelgabe in

einer Banddüngung appliziert. Hingegen wurde in den Reihen mit Fertigation dieselbe Menge zum Großteil in Form von AHL mit dem Bewässerungswasser ausgebracht. Über einen Zeitraum von sieben Wochen wurden durch Fertigation insgesamt 57 kg N/ha als AHL gedüngt. Die wöchentliche N-Menge betrug 8,14 kg N/ha. Zusätzlich wurde bei dieser Düngungsvariante mit der Tropfbewässerung vor Beginn der AHL-Applikation eine Teilmenge des Stickstoffs (3 kg N/ha) als gelöstes MAP ausgebracht.

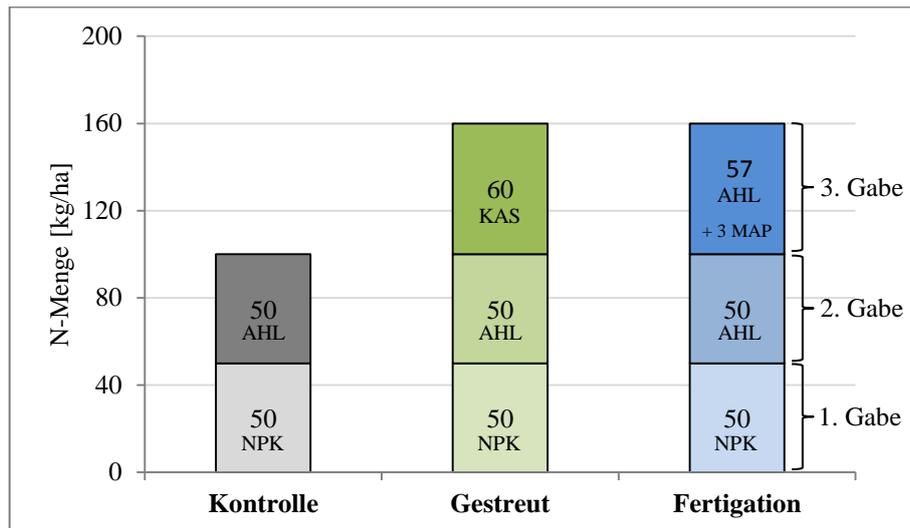


Abb. 4.4: N-Düngung der Sorte PE am Standort A.

1. N-Gabe am 11 April; 2. N-Gabe am 10. Juni (chem. Hopfenputzen); 3. N-Gabe bei Gestreut am 2. Juli; 3. N-Gabe bei Fertigation von Juli - August.

Bei der **Sorte Perle am Standort B** (Abb. 4.5) unterscheidet sich die N-Düngung dahingehend, dass die erste und zweite N-Gabe jeweils um 10 kg N/ha erhöht wurden, um die in der Düngebedarfsermittlung berechnete Gesamtmenge (Tab. 4.10) zu erreichen. In diesem Versuch wurde die N-Düngung in den Reihen der Variante „Kontrolle“ durch das Verzichten auf eine dritte Gabe exakt um 1/3 reduziert. Durch Fertigation wurden wöchentlich 8,14 kg N/ha als AHL ausgebracht. In den Reihen mit Fertigation wurden auch in diesem Versuch 3 kg N/ha in Form von gelöstem MAP gedüngt.

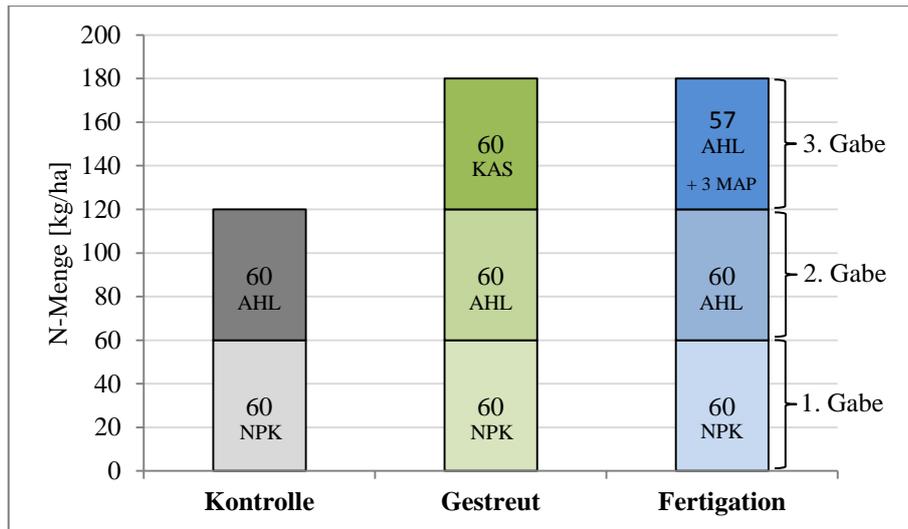


Abb. 4.5: N-Düngung der Sorte PE am Standort B.

1. N-Gabe am 13 April; 2. N-Gabe am 10. Juni (chem. Hopfenputzen); 3. N-Gabe bei Gestreut am 2. Juli; 3. N-Gabe bei Fertigation von Juli – August.

Bei der **Sorte Herkules** (Abb. 4.6) erfolgte die N-Düngung **an beiden Versuchsstandorten** identisch. In den Reihen der Versuchsvariante „Kontrolle“ wurden durch den Verzicht auf eine dritte N-Gabe nur 140 kg N/ha (2/3 des ermittelten Düngebedarfs) appliziert. Die wöchentlich durch Fertigation applizierte N-Menge betrug 9,57 kg/ha. Auch bei dieser Sorte wurde in den Reihen mit Fertigation eine Teilmenge des Stickstoffs (3 kg N/ha) als gelöstes MAP ausgebracht.

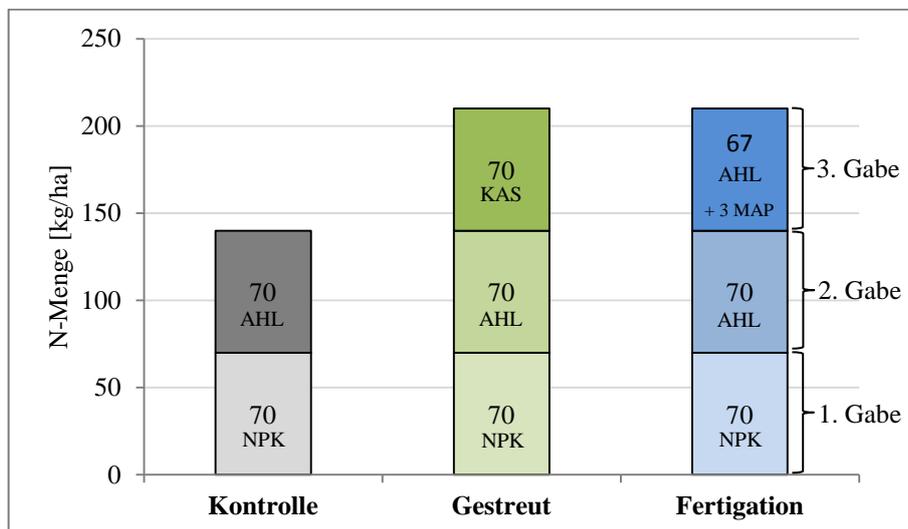


Abb. 4.6: N-Düngung der Sorte HS am Standort A/Standort B.

1. N-Gabe am 20/13 April; 2. N-Gabe am 10. Juni (chem. Hopfenputzen); 3. N-Gabe bei Gestreut am 2. Juli; 3. N-Gabe bei Fertigation von Juli - August.

4.3.4 Aufbau der Bewässerungsanlage

In beiden Betrieben ist die vorhandene Tropfbewässerungsanlage im Boden verbaut, d.h. die Tropfschläuche verlaufen parallel zu den Hopfenreihen neben den Bifängen (NB). Als Wasserquelle dient jeweils ein an der Hofstelle errichteter Brunnen an dessen Grund eine Pumpe installiert ist. Nach der Reinigung des Wassers in einer Filterstation wird es in die Hauptleitung gepumpt, welche einen Meter tief unter der Erde verläuft und zu jedem bewässerten Hopfenfeld führt. Ein über ein Kabel angesteuertes elektrisches Magnetventil stellt die Verbindung zwischen Feld und Hauptleitung her. Die Steuerung der gesamten Anlage erfolgt automatisiert über einen Computer, mit welchem Zeitpunkt und Dauer einer Bewässerung programmiert werden können. Nach den Magnetventilen folgen kleinere Querleitungen, welche an der Hangoberseite der Hopfenfelder in einer Tiefe von 50 cm quer zu den Reihen verlaufen. Bei Betrieb A sind am Ende der Hopfenreihen zusätzliche Querleitungen installiert. An der höchsten Stelle eines Feldes ist eine Vorrichtung an den Querverteilungsleitungen zur automatischen Be- und Entlüftung angebracht. Am tiefsten Punkt sind Entwässerungshähne zum Ablassen von Restwasser vor dem Winter installiert. Bei Betrieb A sind die Tropfschläuche im Feld sowohl am Anfang als auch am Ende mit den Querleitungen verbunden, wodurch ein Kreislauf entsteht und die Tropfschläuche gespült werden können. Bei Betrieb B sind die Tropfschläuche hingegen nur am Anfang mit der Querleitung verbunden. Die Schläuche verlaufen bei beiden Betrieben parallel zur Reihe mit den Hopfenpflanzen in einer Tiefe von 30 bis 35 cm, wobei sich in jeder zweiten Fahrspur, wie im Anlageplan in Abb. 4.3 abgebildet, jeweils zwei Schläuche befinden. Beim Einziehen wurde darauf geachtet, dass die Tropfschläuche möglichst nahe an die Wurzelstöcke der Pflanzen gelegt werden, ohne dabei größere Schäden am Wurzelsystem zu verursachen. Die Entfernung zur Reihenmitte beträgt etwa 30 cm. Bei beiden Betrieben werden Tropfschläuche mit einem Emitter-Abstand von 50 cm und einer Ausstoßrate von 1 Liter/Stunde verwendet.

Um die Reihen der Versuchsvariante „Fertigation“ getrennt bewässern zu können, musste zuerst eine zusätzliche Querverteilungsleitung installiert werden. Die Befestigung dieser erfolgte an den Querseilen des Gerüsts. Im Anschluss wurde die neue Verteilerleitung mit der vorhandenen Querleitung des Feldes verbunden. Zwischen zwei Ankern der Gerüstanlage wurde in diese neue Leitung ein Bypass mit der Injektionseinheit zur Düngemittleinspeisung integriert. Die Tropfschläuche der vier Reihen mit Fertigation wurden dann über Blindschläuche mit der neuen Verteilerleitung verbunden. In jeder

Versuchsreihe, bei welcher der Tropfschlauch auf dem Bifang verlaufen sollte und bei den Reihen der Variante „Fertigation NB“, musste sowohl am Anfang als auch am Ende aufgegraben werden, um die vorhandenen unterirdischen Tropfschläuche abzutrennen. Bei den AB-Reihen ohne Fertigation erfolgte anschließend die Herstellung einer Verbindung zwischen dem vorhandenen unterirdischen und dem neuen oberirdischen Tropfschlauch. Zum Schluss wurden bei allen AB-Versuchsreihen neue Tropfschläuche auf den Bifängen ausgelegt.

4.3.5 Bewässerungssteuerung und Fertigation

Zeitpunkt und Höhe der Wassergaben wurden auf Basis von Wetterdaten festgelegt, ein konkretes Modell zur Bilanzierung des Wasserhaushaltes (vgl. 2.4.3) wurde jedoch nicht genutzt. Aufgrund der anhaltend regnerischen Witterung im Zeitraum von Anfang Juni bis Mitte August (vgl. Abb. 4.1 und 4.2), wäre eine zusätzliche Bewässerung der Versuchsflächen in dieser Periode nicht erforderlich gewesen. Erst ab Anfang September herrschte ein Wasserdefizit. Zu diesem Zeitpunkt war eine Bewässerung nur bei der spätreiferen Sorte Herkules noch sinnvoll. Trotz des fehlenden Bewässerungsbedarfs bis Mitte August, musste regelmäßig bewässert werden, um die wöchentliche N-Menge bei den Reihen mit Fertigation auszubringen. Dabei erhielten innerhalb eines Versuchs alle Varianten stets dieselbe Wassermenge. Um eine Beschädigung der Pflanzenwurzeln durch eine zu hohe Salzkonzentration zu verhindern, lag die Bewässerungsdauer bei jeder N-Gabe, bei mindestens drei Stunden. Bei der Sorte Herkules am Standort A lag die insgesamt ausgebrachte Wassermenge deutlich höher (vgl. Abb. 4.7), da in der Zeit von Anfang bis Mitte September aufgrund der trockenen Witterung (vgl. Abb. 4.2) mehrere Bewässerungsgaben ausgebracht wurden.

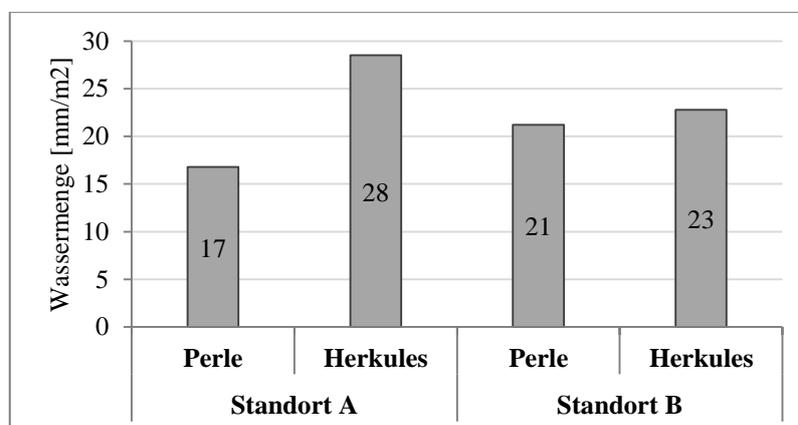


Abb. 4.7: Insgesamt ausgebrachte Wassermengen je Versuchsfläche.

Ende Juni wurde bei den Reihen mit Fertigation zuerst die festgelegte Menge an MAP (siehe Tab. A.1 bis A.4), verteilt auf zwei Gaben, eingespeist. Ab Anfang Juli erfolgte dann wöchentlich über einen Zeitraum von sieben Wochen die Injektion von AHL in Kombination mit gelöstem Bittersalz. Aus der wöchentlichen Menge je Hektar wurde dafür, auf Basis des Flächenanteils der Reihen mit Fertigation, die einzuspeisende Menge exakt berechnet. Diese auf die Versuchsfläche angepasste Mengen an AHL und Bittersalz wurden jede Woche abgewogen. Zum ersten Termin wurde das gelöste Bittersalz zusammen mit dem AHL in einen 10 Liter Kanister gegeben, welcher anschließend vollständig mit Wasser befüllt wurde. Ziel war es beide Komponenten gleichzeitig in das Tropfbewässerungssystem einzuspeisen um den Arbeitsaufwand zu verringern. Dabei fiel im Kanister eine Verbindung aus, welche die Injektionseinheit blockierte und nur mühsam wieder gelöst werden konnte. Ab dem zweiten Termin wurden beide Komponenten erst kurz vor der Einspeisung zusammengemischt, was bei hohen Außentemperaturen problemlos funktionierte. Bei kühler Witterung jedoch fiel ebenfalls das Salz aus. Schließlich wurden für den Rest der Saison beide Komponenten getrennt voneinander in das Bewässerungssystem eingespeist, was jedoch mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden war. Ein Test ergab, dass bei Vermischung der wöchentlichen Mengen an AHL und Bittersalz insgesamt ca. 20 Liter nötig gewesen wären, um das Ausfallen des Salzes zu verhindern. Für diese Menge an Flüssigkeit hätte die Injektionsvorrichtung mehr als vier Stunden benötigt, was deutlich zu lang ist und somit nicht umsetzbar war. Das Dosieren der gelösten Nährstoffe zum Bewässerungswasser erfolgte über einen Proportionaldosierer. Diese technische Vorrichtung funktioniert ohne Strom, als Antriebskraft dient ausschließlich der Wasserdruck.

4.3.6 Bestandsbeurteilung und Ernte

Zum Zeitpunkt der Versuchsplanung wurde festgelegt, dass während der Vegetation die Parameter Habitus, Doldenansatz und Grünfärbung in jedem Versuch zu verschiedenen Terminen bonitiert werden. Aufgrund geringer Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten war es nicht möglich Habitus und Doldenansatz im Feld zu bewerten. Ab dem 10. August wurde jedoch die Grünfärbung der einzelnen Versuchsvarianten mehrmals bonitiert. Dabei kam eine Boniturskala von 1 bis 9 mit 1 = gelb und 9 = dunkelgrün zum Einsatz. Jede Parzelle wurde einzeln bonitiert. Aus den Wiederholungen einer Versuchsvariante wurde anschließend ein Mittelwert berechnet.

Ende August erfolgte in jeder Versuchsreihe die Markierung der zu erntenden Parzellen, wie im Anlageplan (Abb. 4.3) dargestellt. Dabei wurden bei jeder Parzelle die Reben markiert, welche nicht mehr geerntet werden. Zwischen zwei Markierungsbändern befanden sich schließlich jeweils 10 Hopfenpflanzen (20 Aufleitungen). Die korrekte Anzahl an Reben wurde durch mehrmaliges Zählen überprüft. An der letzten Rebe einer Parzelle wurde jeweils ein rotes Kunststoffetikett mit dem Parzellenidentifikationscode angebracht. Während der Parzellenmarkierung wurde auch sichergestellt, dass sich keine Pflanzen einer anderen Sorte in den Parzellen befinden.

Jeder Versuch wurde innerhalb eines Tages geerntet. Dabei erfolgten Pflücke und Ertragsermittlung jeweils an der Versuchspflückmaschine am Hopfenforschungsinstitut in Hüll. Das Herunterreißen der Reben und der Transport zur Pflückmaschine wurde mit einem Abreißgerät und Rebenladewagen durchgeführt. Nach Verladung der 20 Reben einer Parzelle erfolgte eine Abtrennung von der nächsten Parzelle durch einen Streifen Kunststoffolie, dabei musste beachtet werden, dass die Etiketten mit dem Parzellenidentifikationscode gut sichtbar waren. Je Fuhre konnten vier Parzellen geladen werden, pro Versuch mussten somit sechs Fuhren nach Hüll transportiert werden.

In Hüll wurden alle Reben der vier Parzellen vor der Pflückmaschine abgeladen. Anschließend erfolgte jeweils das Einhängen der 20 Reben einer Parzelle, wobei das Etikett einer jeden Parzelle gesichert wurde. In einer Hopfenpflückmaschine werden zuerst alle Dolden und Blätter von den Reben abgetrennt. Im weiteren Verlauf wird diese Mischung durch verschiedene Reinigungsstufen aufgetrennt. Bei der Versuchspflückmaschine werden die gereinigten Hopfendolden am Ende des Doldenbandes in Säcken aufgefangen. Auf diese Weise wurde der gesamte Grünhopfen einer Parzelle gesammelt. Im Anschluss erfolgte das Wiegen der Grünhopfenmenge jeder Parzelle und die Dokumentation zusammen mit dem Parzellenidentifikationscode. Während der Befüllung der Säcke wurde für jede Parzelle zusätzlich eine Mischprobe entnommen, welche als repräsentative Probe für Analysen diente und zur restlichen Grünhopfenmenge addiert wurde. Nachdem alle 20 Reben einer Parzelle die Pflückmaschine durchlaufen haben musste, um eine Vermischung mit der nachfolgenden Parzelle auszuschließen, eine kurze Leerlaufzeit eingehalten werden. Aus dem losen am Boden liegenden Material wurde eine Restmenge an Dolden ermittelt, welche rechnerisch auf die vier Parzellen einer Fuhre verteilt wurde. Der Ernteablauf war für jeden der Versuche identisch. Die Säcke mit Grünhopfen wurden zurück auf die Betriebe

transportiert, wo die Trocknung der Dolden erfolgte. Alle entnommenen Mischproben wurden gesammelt und in Hüll getrocknet. Eine Teilmenge davon wurde nach der Trocknung als Probe zur Analyse des Wasser- und Alphasäuregehalts ins Labor weitergegeben.

4.4 Analyse des Wasser- und Alphasäuregehalts

Die Analyse des Wassergehalts der Proben erfolgte nach der offiziellen Methode EBC 7.2 (Hopsteiner, 2011). Von jeder Hopfenprobe wird dabei eine bestimmte Menge eingewogen, welche anschließend im Trockenschrank bei einer standardisierten Temperatur von 103 bis 104 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wird. Zum Abkühlen werden die getrockneten Teilmengen für 20 Minuten in einen Exsikkator gestellt. Danach erfolgt die Rückwaage der Proben. Durch den Gewichtsverlust kann dann der Wassergehalt vor der Trocknung ermittelt werden.

Um den Alphasäuregehalt von Hopfenproben zu untersuchen gibt es verschiedene Messmethoden. Die Proben dieser Versuche wurden durch konduktometrische Titration nach der Methode EBC 7.4 (Hopsteiner, 2011) analysiert. Auf eine detaillierte Erläuterung der eingesetzten Untersuchungsmethode wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

4.5 Auswertung und Statistik

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte über verschiedene Computersoftware. Microsoft Excel 2016 diente dabei als Eingabemedium und Tool zur Datenaufbereitung. Zur statistischen Auswertung der Ergebnisse wurde die freie Statistiksoftware „R“ (R Core Team, 2016) genutzt.

Wie bereits im Kapitel 4.3.6 beschrieben, wurde während der Versuchsernte nicht der gesamte Doldenertrag einer Parzelle getrennt getrocknet, sondern nur die entnommene Mischprobe. Über den Nettogewichtsverlust dieser Probe erfolgte die Berechnung eines Faktors, mit welchem der gesamte Grünhopfenertrag einer Parzelle umgerechnet werden konnte. In einem weiteren Schritt wurde durch den im Labor festgestellten spezifischen Wassergehalt jeder Probe der Einzelparzellenertrag bei einem standardisierten Wassergehalt von 10 % ermittelt. Im Anschluss wurden aus dem Parzellenertrag der

Einzelrebenenertrag und schließlich der Ertrag je Hektar in Abhängigkeit von der spezifischen Pflanzenanzahl ermittelt.

Auch der Alphasäuregehalt wurde für jede Parzelle aus einer Teilmenge der getrockneten Mischprobe analysiert. Da der Wassergehalt einer Probe das Ergebnis der Alphasäure-Analyse beeinflusst, musste auch der Alphasäuregehalt anschließend korrigiert werden. Die Berechnung erfolgte ebenfalls für den standardisierten Wassergehalt von 10 %. Zuletzt wurde aus dem Doldenertrag je Hektar und dem jeweiligen Alphasäuregehalt einer Parzelle bei einem Wassergehalt von 10 % der Alphaertrag in kg/ha errechnet. Die verwendeten Formeln sind nachfolgend aufgeführt.

$$\text{Faktor} = \text{Probe}_{\text{trocken}} \div \text{Probe}_{\text{grün}}$$

$$\text{Parzellenertrag}_{\text{trocken}} = \text{Faktor} * \text{Parzellenertrag}_{\text{grün}}$$

$$\text{Parzellenertrag}_{10\%} = \text{Parzellenertrag}_{\text{trocken}} * [(100 - \text{H}_2\text{O-Gehalt}) \div 90]$$

$$\text{Ertrag/Rebe}_{10\%} = \text{Parzellenertrag}_{10\%} \div 20$$

$$\text{Reben/ha} = 10.000 \text{ m}^2 \div (\text{Reihenabstand (m)} * \text{Abstand in der Reihe (m)})$$

$$\text{Ertrag/ha}_{10\%} = \text{Ertrag/Rebe}_{10\%} * \text{Reben/ha}$$

$$\text{Alphasäuregehalt}_{10\%} = (\text{Alpha} * 90) \div (100 - \text{H}_2\text{O-Gehalt})$$

$$\text{Alphaertrag/ha}_{10\%} = \text{Alpha}_{10\%} * \text{Ertrag/ha}_{10\%}$$

Im Anschluss an die Berechnung dieser drei Parameter, folgte die statistische Auswertung der Ergebnisse. Die Anlage der Versuche erfolgte als 2-faktorielle Spaltanlage (vgl. Abb. 4.3) mit den Stufen des Faktors Düngung als Großteilstücke (Haupteinheiten) und den Stufen des Faktors Tropfschlauchpositionierung als Kleinteilstücke (Untereinheiten). Für die Auswertung wurde jeder Versuch entsprechend der Anzahl an Wiederholungen in vier Blöcke unterteilt. Zuerst wurde mit der Statistiksoftware R eine Varianzanalyse (ANOVA) nach der Prozedur des allgemeinen linearen Modells durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass bei einer 2-faktoriellen Spaltanlage zwei Fehlervarianzen berechnet werden müssen, weil die Haupteinheit mit geringerer Präzision als die Untereinheit geprüft wird. Die Varianzanalyse erfolgte für die Parameter Ertrag, Alphasäuregehalt und Alphaertrag jeweils in Abhängigkeit folgender Varianzursachen.

- 1) Block
- 2) Düngung (Großteilstücke)

- 3) Position (Kleinteilstücke)
- 4) Düngung x Position (Wechselwirkung)
- 5) Block x Düngung (Wechselwirkung)

Nach Durchführung der ANOVA war es möglich für jeden Versuch die Aussage zu treffen, ob statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Blöcke, Düngungsstufen oder Tropfschlauchpositionen bestehen und ob sich eine Wechselwirkung als signifikant herausstellte. Statistische Signifikanz liegt vor, wenn die reale Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) einer Varianzursache unter dem Signifikanzniveau ($\alpha=5\%$) liegt. Bei der Beurteilung des Signifikanzmaßes gilt die allgemeine Einteilung (Tab. 4.11).

Tab. 4.11: Allgemeine Einteilung zur Beurteilung des Signifikanzmaßes (R Core Team, 2016).

p-Wert	Signifikanz
> 0,10	Nicht signifikant (ns)
0,10 – 0,05	Nahe dem Signifikanzniveau (.)
0,05 – 0,01	Signifikant (*)
0,01 – 0,001	Hoch signifikant (**)
< 0,001	Sehr hoch signifikant (***)

Wenn sich in der Varianzanalyse herausstellte, dass signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsstufen oder Tropfschlauchpositionen bestehen, wurde anschließend der multiple T-Test als Mittelwertvergleichstest verwendet, um herauszufinden, welche Stufen des jeweiligen Faktors sich signifikant voneinander unterscheiden. Die Anwendung des T-Tests war nur möglich, da die Anzahl der Vergleiche gering war, wodurch das Risiko 2. Art, d.h. die Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese anzunehmen, obwohl sie nicht zutrifft nicht zu stark anstieg. In einer weiteren Varianzanalyse, ebenfalls mit der Prozedur des allgemeinen linearen Modells, wurde zusätzlich der Einfluss des Standortes auf die ermittelten Parameter Ertrag, Alphasäuregehalt und Alphaertrag einer Sorte überprüft.

5 Ergebnisse

Im nachfolgenden Ergebnisteil der Arbeit wird jeder Versuch einzeln beschrieben. Zuerst werden jeweils die Ergebnisse der Bonitur der Grünfärbung erläutert. Dabei wurden bei keinem Versuch innerhalb einer Düngungsstufe Unterschiede zwischen der Tropfschlauchposition AB und NB bonitiert, weshalb je Düngungsstufe nur ein Mittelwert beider Positionen abgebildet wird. Des Weiteren erfolgt die Darstellung der im Ernteprozess ermittelten Parameter Ertrag und Alphasäuregehalt sowie des berechneten Alphaertrags. Für die Gesamtheit der Versuche kann, basierend auf der varianzanalytischen Auswertung mit dem Faktor Standort, die Aussage getroffen werden, dass sich der Einfluss des Standortes bei keiner Sorte als statistisch signifikant erwies.

5.1 Standort A

5.1.1 Perle – Standort A

Für die **Sorte Perle am Standort A** erfolgte die Bewertung der Grünfärbung zu drei Zeitpunkten vor der Ernte (Abb. 5.1). Die Reaktion der Pflanzen auf Veränderung der Düngung fiel in diesem Versuch minimal aus. Am ersten Boniturtermin (10. August) waren alle Pflanzen im Versuch einheitlich grün, weshalb für jede Düngungsstufe der Wert 6 vergeben wurde. Zwischen den Versuchsreihen der Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“ konnten zu keinem Termin Unterschiede beobachtet werden, außerdem veränderte sich die Grünfärbung dieser Varianten im weiteren Verlauf der Vegetation nicht. Die Reihen der Versuchsvariante „Kontrolle“ zeigten ab dem 28. August eine geringfügige Aufhellung. Auch am 7. September erschienen diese insgesamt etwas heller, die Aufhellung verstärkte sich jedoch nicht.

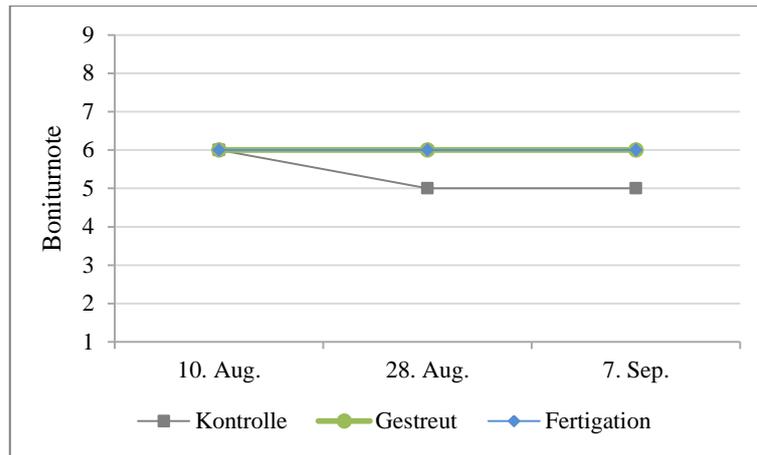


Abb. 5.1: Sorte PE Standort A; Boniturergebnisse Grünfärbung.
1 = gelb; 9 = dunkelgrün.

Bei der **Sorte Perle am Standort A** (Abb. 5.2) lieferte die Variante „Fertigation AB“ durchschnittlich die höchsten Doldenerträge. Den niedrigsten Mittelwert erreichte „Fertigation NB“. Das Mittel aller AB-Parzellen lag 3,9 % über dem der NB-Varianten. Die einzelnen Düngungsstufen unterschieden sich hinsichtlich des mittleren Ertrags nur gering voneinander.

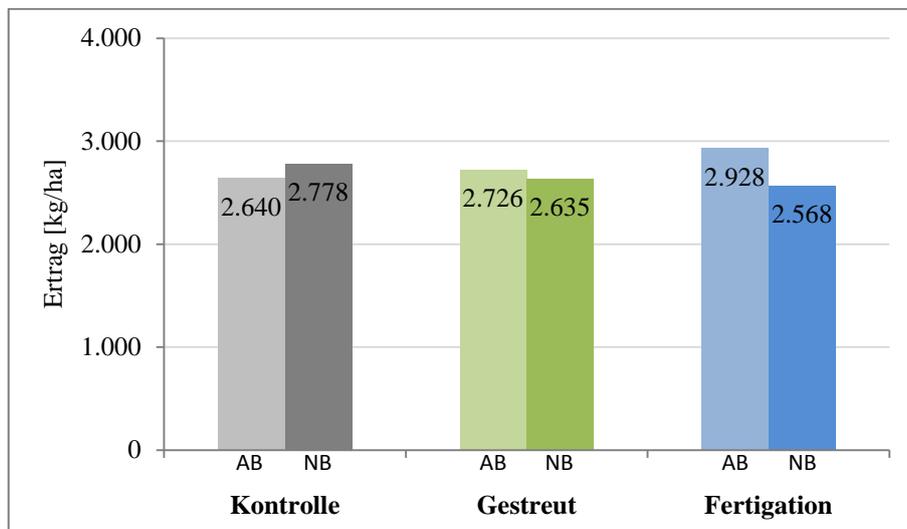


Abb. 5.2: Sorte PE Standort A. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.

Durch die Ergebnisse der Varianzanalyse (Tab. 5.1) wird deutlich, dass weder zwischen den Ertragsmittelwerten der Düngungsstufen, noch denen der Tropfschlauchpositionen signifikante Unterschiede bestanden. Die reale Irrtumswahrscheinlichkeit der Wechselwirkung „Düngung x Position“ liegt mit 5,7 % jedoch unmittelbar an der Grenze des Signifikanzniveaus.

Tab. 5.1: Sorte PE Standort A - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA. Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Düngung	2,96	0,793	ns
Position	0,02	0,196	ns
Düngung x Position	0,76	0,057	.

In Abb. 5.3 werden für die **Sorte Perle am Standort A** sowohl die prozentualen Alphasäuregehalte (Dreiecke), als auch die berechneten Alphaerträge (Säulen) dargestellt. Hinsichtlich der mittleren Alphasäuregehalte ergaben sich geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsvarianten. Jedoch lag der Mittelwert aller AB-Varianten um 0,3 Prozentpunkte über dem der NB-Varianten. In Abhängigkeit von der Düngungsstufe wurden für „Kontrolle“ und „Gestreut“ identische Gehalte ermittelt, „Fertigation“ lag minimal niedriger.

Der Alphaertrag aller AB-Varianten lag 6,1 % über dem der NB-Varianten. Bei Gruppierung nach der Art der Düngung ergaben sich für einzelnen Stufen hingegen annähernd identische Alphaerträge.

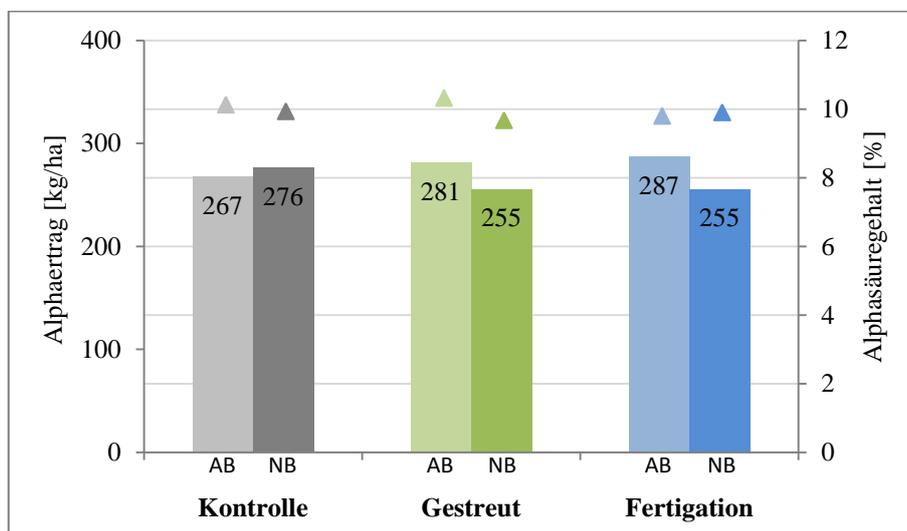


Abb. 5.3: Sorte PE Standort A; Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition. Alphasäuregehalte sind als Punkt- und Alphaerträge als Säulendiagramm dargestellt.

Die Varianztabelle (Tab. 5.2) zeigt, dass weder der Alphasäuregehalt noch der Alphaertrag signifikant durch die Veränderung der Düngung oder Positionierung des Tropfschlauches beeinflusst wurden.

Tab. 5.2: Sorte PE Standort A - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.

Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	Alphasäuregehalt		Alphaertrag	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
Düngung	0,760	ns	0,965	ns
Position	0,262	ns	0,151	ns
Düngung x Position	0,364	ns	0,259	ns

5.1.2 Herkules – Standort A

Die Grünfärbung der **Sorte Herkules am Standort A** wurde zu vier Zeitpunkten vor der Ernte bonitiert (Abb. 5.4). Die Pflanzen dieser Versuchsfläche reagierten auf Veränderung der Düngung. Zum ersten Boniturtermin am 10. August waren alle Pflanzen im Versuch einheitlich grün und es bestanden keine Unterschiede, weshalb jeder Düngungsstufe der Wert 6 zugeteilt wurde. Am 28. August wurde zuerst bei den Reihen der „Kontrolle“ eine Aufhellung erfasst, welche sich an den folgenden zwei Terminen jeweils verstärkte. Die Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“ zeigten am 28. August noch keine Reaktion. Am dritten Termin begann die Variante „Gestreut“ heller zu werden. Auch bei dieser verstärkte sich die Aufhellung bis zur Ernte. Bei den Reihen der Variante „Fertigation“ konnte erst am 20. September eine leichte Aufhellung bonitiert werden.

Bei HS am Standort A erfolgte am Tag der Ernte, aufgrund deutlicher Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsvarianten, eine zusätzliche Bonitur. Dabei wurde festgestellt, dass der Bestand der Düngungsstufe „Fertigation“ im Vergleich zu dem der Varianten „Gestreut“ und „Kontrolle“ deutlich homogener war. Zum anderen wurde die Reife der Kontrollvariante als weiter vorangeschritten bewertet. Des Weiteren wiesen die Pflanzen der „Kontrolle“ einen signifikant stärkeren Mehлтаubefall an den Dolden, sowie eine geringere Vitalität auf. Der starke Krankheitsbefall der Dolden zeigte sich auch nach der Ernte an den getrockneten Hopfenproben.

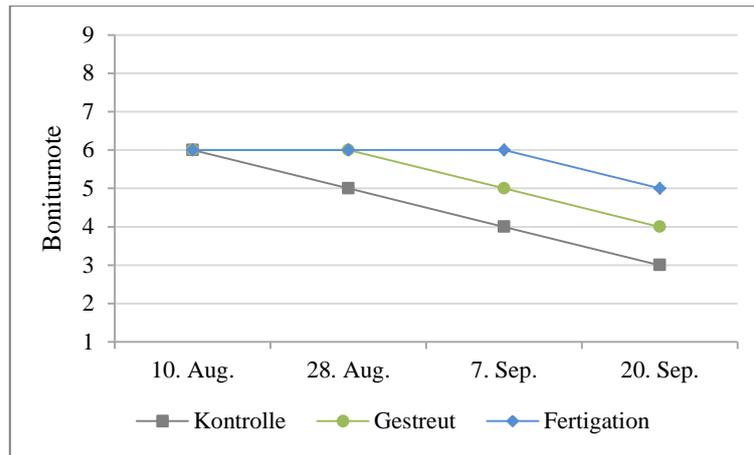


Abb. 5.4: Sorte HS Standort A; Boniturergebnisse Grünfärbung.
1 = gelb; 9 = dunkelgrün.

Bei der **Sorte Herkules am Standort A** (Abb. 5.5) lag der mittlere Ertrag aller AB-Reihen 4,2 % über dem der NB-Varianten. Im Vergleich zur „Kontrolle“ erreichten die Düngungsstufen „Gestreut“ und „Fertigation“ durchschnittlich um 2,4 % bzw. 1,9 % höhere Erträge.

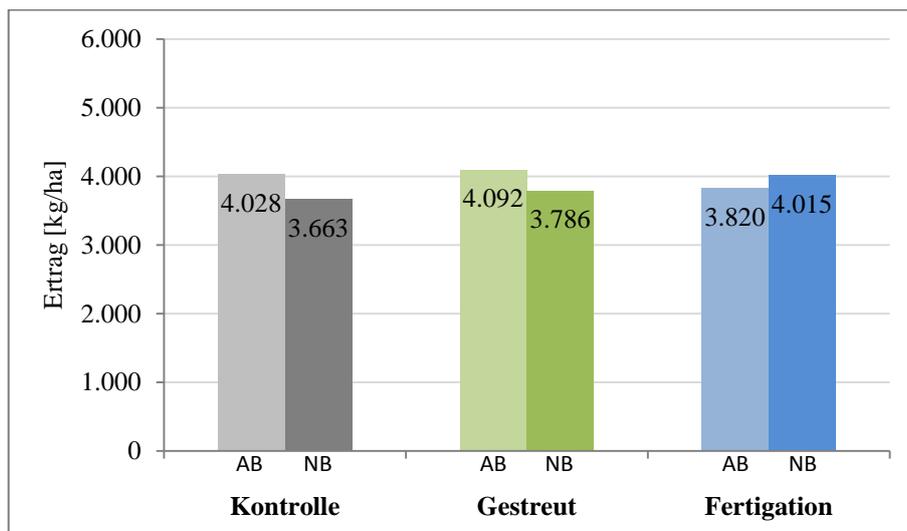


Abb. 5.5: Sorte HS Standort A. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.

Auf Basis der Varianzanalyse (Tab. 5.3) kann für die **Sorte Herkules am Standort A** die Aussage getroffen werden, dass sich weder die mittleren Erträge der Düngungsstufen noch die der Tropfschlauchpositionen signifikant voneinander unterscheiden. Die reale Irrtumswahrscheinlichkeit der Wechselwirkung „Düngung x Position“ liegt mit 8,7 % jedoch in der Nähe des Signifikanzniveaus.

Tab. 5.3: Sorte HS Standort A - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA. Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Düngung	0,33	0,729	ns
Position	2,59	0,142	ns
Düngung x Position	3,24	0,087	.

Der Alphasäuregehalt der Versuchsvarianten mit Fertigation lag bei der **Sorte Herkules am Standort A** deutlich unter „Kontrolle“ und Gestreut“ (Abb. 5.6). Hinsichtlich der Positionierung des Tropfschlauches erreichten die NB-Varianten minimal höhere Alphasäuregehalte.

Der Alphaertrag lag bei „Gestreut AB“ am höchsten, wohingegen dieser bei „Fertigation AB“ am niedrigsten war. Der mittlere Alphaertrag aller AB-Varianten lag 4,2 % über dem der NB-Varianten. Im Vergleich zu „Kontrolle“ und „Fertigation“ lieferte die Düngungsvariante „Gestreut“ durchschnittlich um 3 % bzw. 7,7 % höhere Alphaerträge.

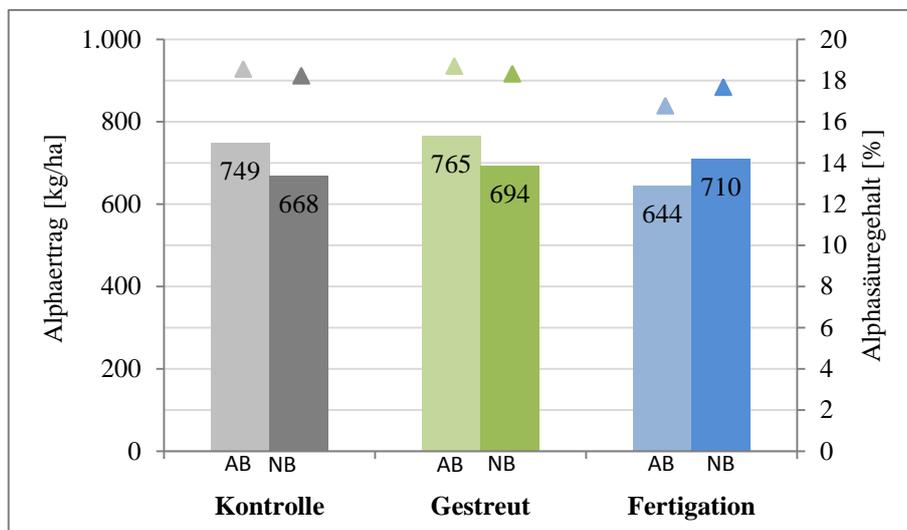


Abb. 5.6: Sorte HS Standort A. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition. Alphasäuregehalte sind als Punkt- und Alphaerträge als Säulendiagramm dargestellt.

Die varianzanalytische Auswertung (Tab. 5.4) verdeutlicht, dass der prozentuale Alphasäuregehalt und der Alphaertrag der Sorte Herkules am Standort A nicht signifikant durch die untersuchten Varianzursachen beeinflusst wurden.

Tab. 5.4: Sorte HS Standort A - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.

Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	Alphasäuregehalt		Alphaertrag	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
Düngung	0,103	ns	0,421	ns
Position	0,891	ns	0,380	ns
Düngung x Position	0,494	ns	0,155	ns

5.2 Standort B

5.2.1 Perle – Standort B

Bei der **Sorte Perle am Standort B** erfolgte die Bonitur der Grünfärbung zu drei Terminen vor der Ernte (Abb. 5.7). Am 10. August waren die Pflanzen der Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“ einheitlich grün und es bestanden keine Unterschiede, weshalb beide die Boniturnote 6 erhielten. Der Pflanzenbestand der Variante „Kontrolle“ erschien bereits zu diesem Zeitpunkt etwas heller. Ab dem zweiten Termin konnte auch bei den Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“ eine Aufhellung beobachtet werden. Dieser Trend verstärkte sich bei den Pflanzen der Variante „Gestreut“ bis zum dritten Boniturtermin. Auch bei der „Kontrolle“ verstärkte sich die Aufhellung am zweiten und dritten Termin kontinuierlich. Hingegen unterlag die Variante „Fertigation“ keiner weiteren Aufhellung.

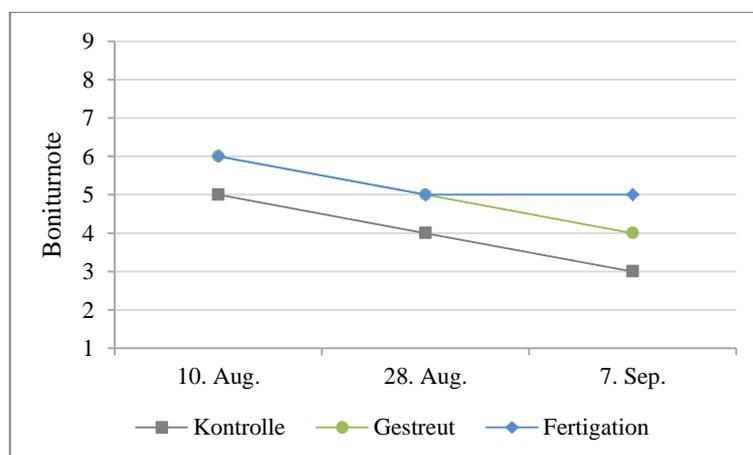


Abb. 5.7: Sorte PE Standort B; Boniturergebnisse Grünfärbung.

1 = gelb; 9 = dunkelgrün.

Hinsichtlich des Ertrags lag bei der **Sorte Perle am Standort B** das Mittel aller AB-Varianten im Vergleich zu NB um 4,2 % höher (Abb. 5.8). Die Versuchsreihen der Düngungsstufe „Gestreut“ erreichten im Durchschnitt die höchsten Erträge, hingegen lagen die Varianten „Fertigation“ und „Kontrolle“ um 4,3 % bzw. 10,3 % niedriger.

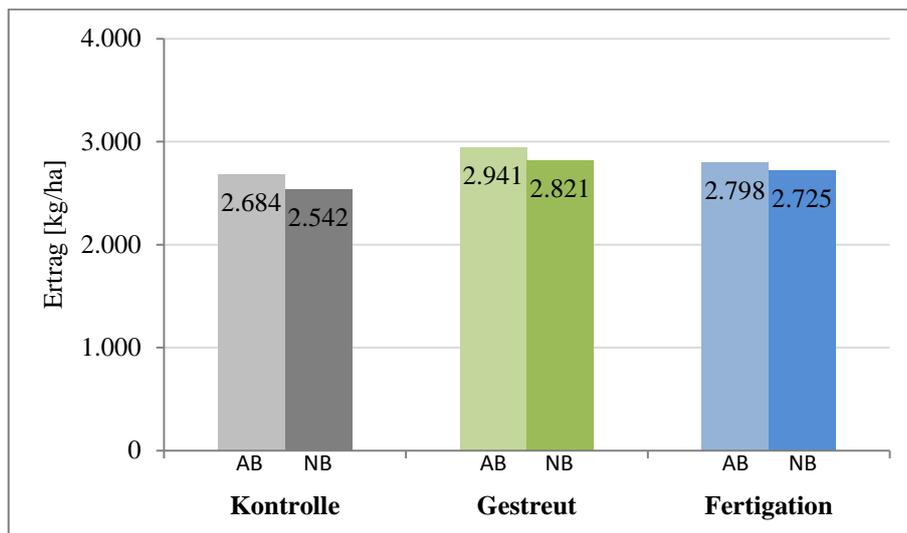


Abb. 5.8: Sorte PE Standort B. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.

In der Varianzanalyse (Tab. 5.5) wurde für die Ursache „Düngung“ eine reale Irrtumswahrscheinlichkeit von 1,4 % ermittelt. Aufgrund dieses Ergebnisses, kann die Aussage getroffen werden, dass der Ertrag signifikant durch Düngung beeinflusst wurde und Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsstufen bestehen. Für weitere Ursachen wurde zwar keine Signifikanz ermittelt, jedoch lag die reale Irrtumswahrscheinlichkeit von „Position“ mit 8,6 % nahe am Signifikanzniveau ($\alpha=5\%$).

Tab. 5.5: Sorte PE Standort B - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA. Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Düngung	7,18	0,014	*
Position	3,73	0,086	.
Düngung x Position	0,12	0,887	ns

Nach einem Vergleich der mittleren Erträge je Düngungsstufe mittels multiplen T-Test konnte gezeigt werden, dass sich „Gestreut“ hoch signifikant von der Kontrolle

unterscheidet (Abb. 5.9). Der Unterschied zwischen „Fertigation“ und „Kontrolle“ erwies sich zwar nicht als signifikant, jedoch lag die reale Irrtumswahrscheinlichkeit mit 5,4 % unmittelbar am Signifikanzniveau. Beim Vergleich von „Gestreut“ und „Fertigation“ konnte keine Signifikanz ermittelt werden.

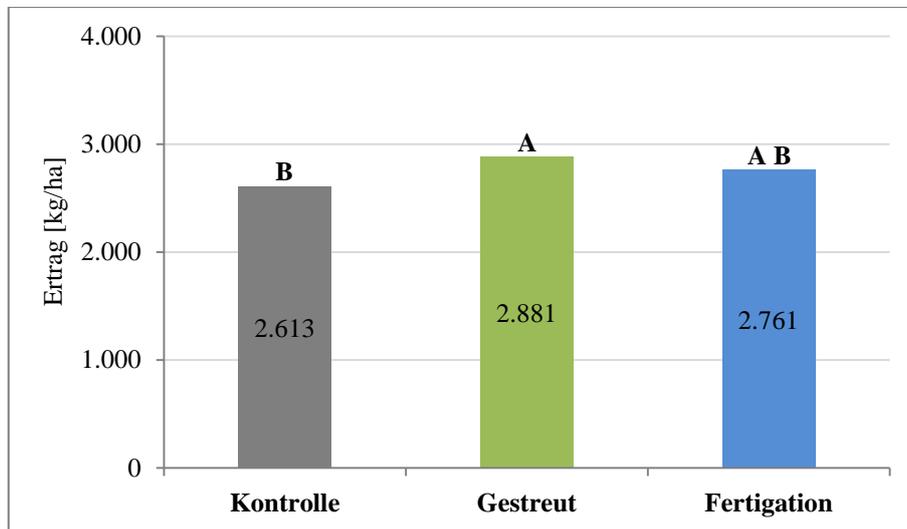


Abb. 5.9: Sorte PE Standort B. Ertragsmittelwerte in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. T-Test mit $\alpha=5\%$; Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Bei der **Sorte Perle am Standort B** ergaben sich Unterschiede hinsichtlich der mittleren Alphasäuregehalte (Abb. 5.10). Durch Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang wurden im Vergleich zu „NB“ höhere Gehalte erreicht. Auffällig ist auch, dass die Düngungsstufe „Fertigation“ im Mittel deutlich niedrigere Gehalte erzielte als „Kontrolle“ oder „Gestreut“. Den höchsten Alphaertrag erreichte „Gestreut“, dieser lag um 11 % über dem von „Kontrolle“ und „Fertigation“. Alle AB-Varianten lieferten im Vergleich zu „NB“ durchschnittlich um 8 % höhere Alphaerträge.

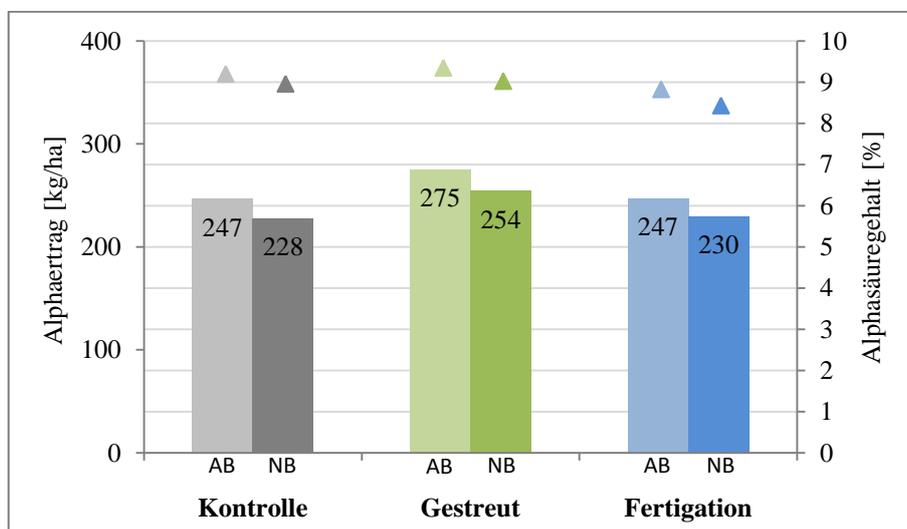


Abb. 5.10: Sorte PE Standort B. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition. Alphasäuregehalte sind als Punkt- und Alphaerträge als Säulendiagramm dargestellt.

In der Varianzanalyse (Tab. 5.6) wird deutlich, dass die reale Irrtumswahrscheinlichkeit für die untersuchten Ursachen „Düngung“ und „Position“ jeweils unter dem Signifikanzniveau liegt. Somit wurden sowohl der Alphasäuregehalt, als auch der Alphaertrag jeweils signifikant durch die Düngung und Positionierung des Tropfschlauches beeinflusst.

Tab. 5.6: Sorte PE Standort B - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.

Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	Alphasäuregehalt		Alphaertrag	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
Düngung	0,016	*	0,008	**
Position	0,038	*	0,012	*
Düngung x Position	0,892	ns	0,977	ns

Die Ergebnisse der im Anschluss durchgeführten multiplen T-Tests sind in die Abbildungen 5.11 und 5.12 integriert. Hinsichtlich der Positionierung des Tropfschlauches (Abb. 5.11) kann die Aussage getroffen werden, dass bei „AB“ im Vergleich zu „NB“ sowohl signifikant höhere Alphasäuregehalte als auch höhere Alphaerträge erreicht wurden. Beim Vergleich der Mittelwerte in Abhängigkeit der Düngungsstufen (Abb. 5.12) resultiert, dass die Alphasäuregehalte von „Kontrolle“ und „Gestreut“ signifikant über dem von „Fertigation“ lagen. Außerdem erreichte die Düngungsstufe „Gestreut“ signifikant höhere Alphaerträge als „Kontrolle“ und „Fertigation“.

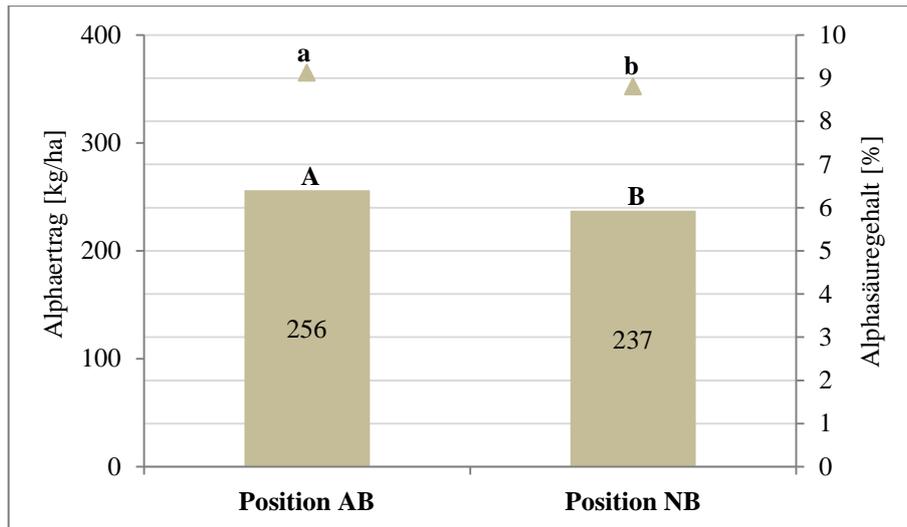


Abb. 5.11: Sorte PE Standort B. Mittlere Alphasäuregehalte [%] und Alphaerträge [kg/ha] in Abhängigkeit von der Positionierung des Tropfschlauches. T-Test mit $\alpha=5\%$; Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander; Kleinbuchstaben für Alphasäuregehalt und Großbuchstaben für Alphaertrag.

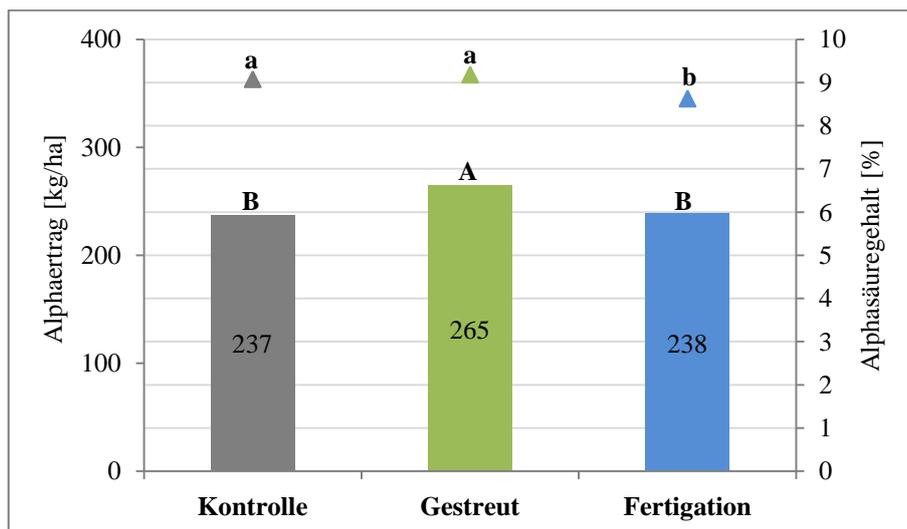


Abb. 5.12: Sorte PE Standort B. Mittlere Alphasäuregehalte [%] und Alphaerträge [kg/ha] in Abhängigkeit von der Düngung. T-Test mit $\alpha=5\%$; Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander; Kleinbuchstaben für Alphasäuregehalt und Großbuchstaben für Alphaertrag.

5.2.2 Herkules – Standort B

Bei der Sorte **Herkules** am Standort **B** (Abb. 5.13) waren die Pflanzen der Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“ am 10. August einheitlich grün. Im Vergleich dazu erschien der Bestand der „Kontrolle“ bereits etwas heller. Diese Aufhellung verstärkte sich am zweiten und dritten Boniturtermin jeweils. Ab dem 28. August konnte auch bei der Variante „Gestreut“ eine Aufhellung beobachtet werden, welche bis zum dritten Termin

ebenfalls zunahm. Die Variante „Fertigation“ zeigte erst am dritten Termin eine leichte Aufhellung.

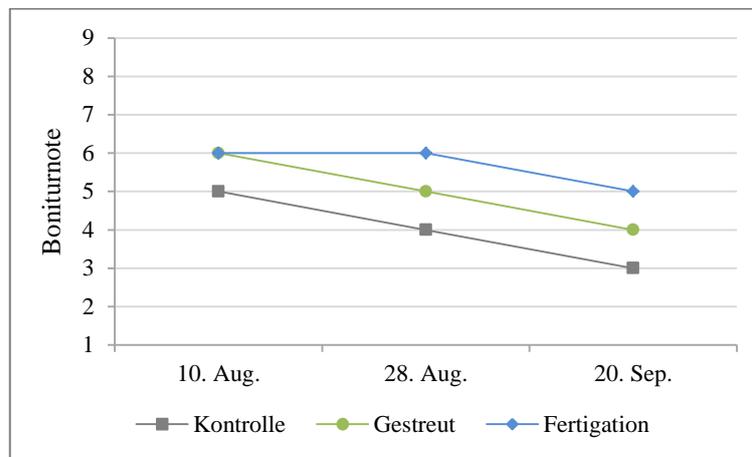


Abb. 5.13: Sorte HS Standort B; Boniturergebnisse Grünfärbung. 1 = gelb; 9 = dunkelgrün.

Bei der **Sorte Herkules am Standort B** (Abb. 5.14) lag der mittlere Ertrag aller AB-Varianten um 11,6 % über dem der NB-Reihen. Im Gegensatz dazu lieferten die einzelnen Düngungsstufen fast identische Ertragsmittelwerte.

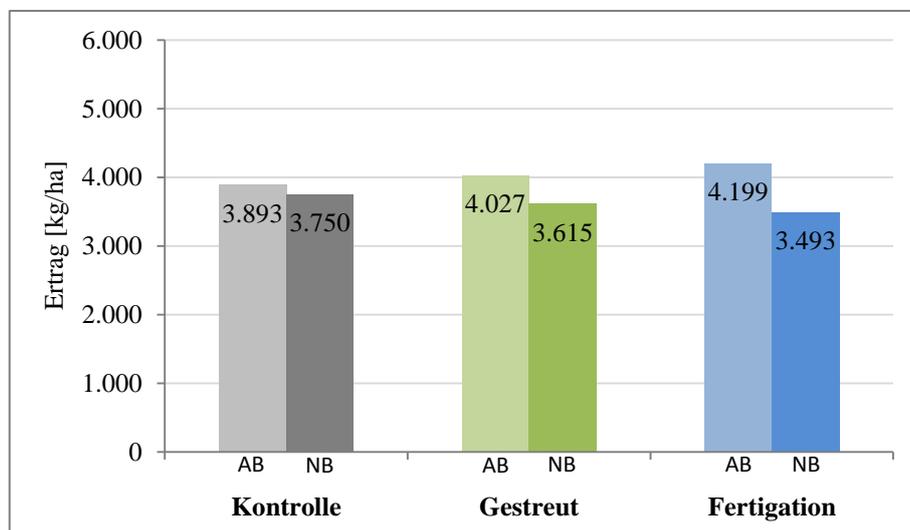


Abb. 5.14: Sorte HS Standort B. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse (Tab. 5.7) zeigen, dass die reale Irrtumswahrscheinlichkeit nur für die Varianzursache „Position“ unter dem Signifikanzniveau liegt. Auf Basis dieses Ergebnisses kann die Aussage getroffen werden,

dass signifikante Unterschiede zwischen den Erwartungswerten für die unterschiedlichen Tropfschlauchpositionen bestehen.

Tab. 5.7: Sorte HS Standort B - Ertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA. Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Düngung	0,0219	0,978	ns
Position	13,823	0,005	**
Düngung x Position	2,0775	0,181	ns

Nach dem Vergleich der Ertragsmittelwerte von AB und NB mittels multiplen T-Test liegt der Erwartungswert für den Ertrag der Tropfschlauchposition AB sehr hoch signifikant ($p=0,0004$) über dem der Position NB (Abb. 5.15).

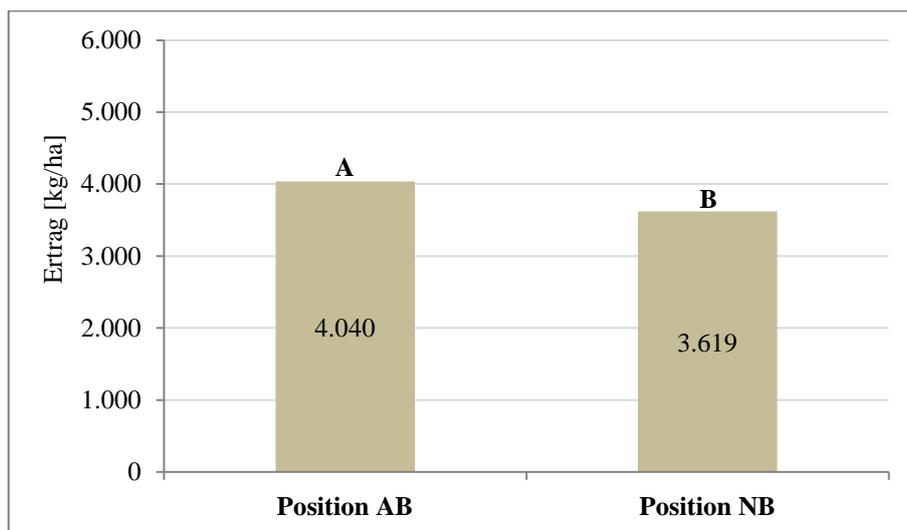


Abb. 5.15: Sorte HS Standort B. Ertragsmittelwerte [kg/ha] in Abhängigkeit von der Tropfschlauchpositionierung. T-Test mit $\alpha=5\%$; Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Der mittlere Alphasäuregehalt aller AB-Reihen lag bei der **Sorte Herkules am Standort B** (Abb. 5.16) minimal über dem der NB-Varianten. Erfolgt die Gruppierung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Düngung, unterscheiden sich die Stufen „Kontrolle“ und „Fertigation“ im Alphasäuregehalt nur marginal voneinander, jedoch lag „Gestreut“ deutlich darunter. Hinsichtlich des Alphaertrags wurden durch Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang im Mittel um 12 % höhere Werte erreicht als bei „NB“.

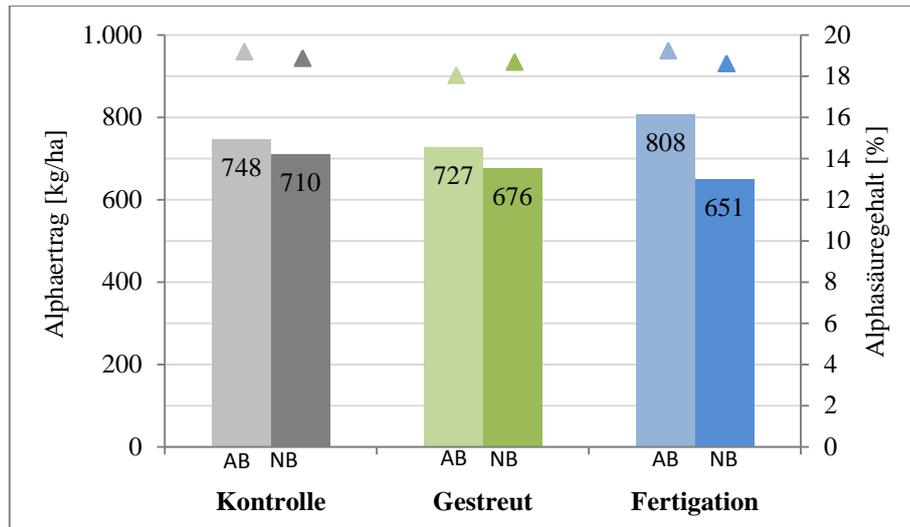


Abb. 5.16: Sorte HS Standort B. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von Düngung und Tropfschlauchposition. Alphasäuregehalte sind als Punkt- und Alphaerträge als Säulendiagramm dargestellt.

Durch die Varianzanalyse (Tab. 5.8) wird deutlich, dass der Alphasäuregehalt durch keine der untersuchten Ursachen signifikant beeinflusst wurde. Für den Alphaertrag wurden jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Tropfschlauchpositionen ermittelt.

Tab. 5.8: Sorte HS Standort B - Alphasäuregehalt und Alphaertrag; Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA.

Signifikanzniveau: $\alpha=5\%$.

Varianzursache	Alphasäuregehalt		Alphaertrag	
	p-Wert	Signifikanz	p-Wert	Signifikanz
Düngung	0,4368	ns	0,714	ns
Position	0,8266	ns	0,027	*
Düngung x Position	0,4936	ns	0,285	ns

Mittels multiplen T-Test konnte anschließend gezeigt werden, dass der Erwartungswert für den Alphaertrag der Tropfschlauchposition AB hoch signifikant ($p=0,008$) über dem der Position NB liegt (vgl. Abb. 5.17).

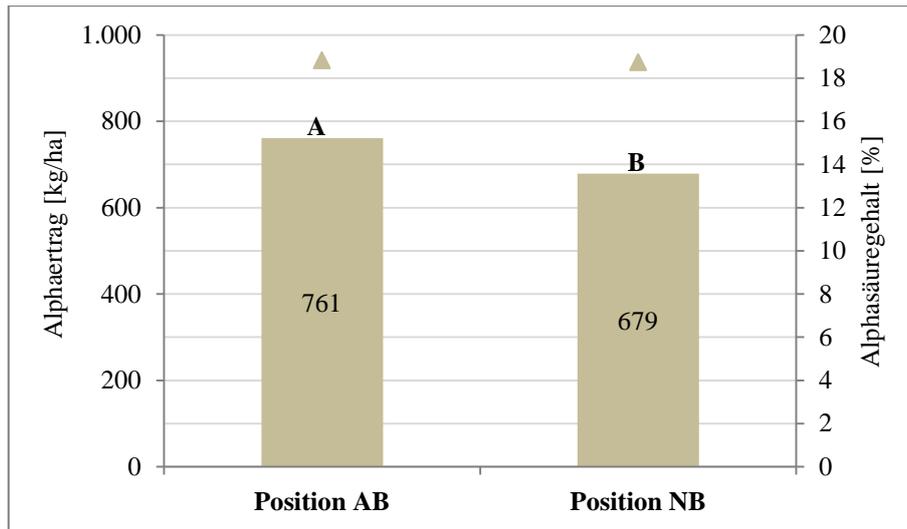


Abb. 5.17: Sorte HS Standort B. Alphasäuregehalt [%] und Alphaertrag [kg/ha] in Abhängigkeit von der Tropfschlauchpositionierung. T-Test mit $\alpha=5\%$; Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

6 Diskussion

Zur Untersuchung der Frage, wie sich Fertigation und Tropfschlauchpositionierung auf den Ertrag und die Qualität von Hopfen auswirken, wurden an zwei Standorten in der Hallertau Feldversuche mit den Sorten Perle und Herkules durchgeführt. In diesen erfolgte zum einen der Vergleich von Fertigation und konventioneller oberflächiger Düngerausbringung in granulierter Form. Zum anderen wurde die Tropfschlauchposition „auf dem Bifang“ der Lage des Schlauches im Boden neben den Hopfenreihen gegenübergestellt. Durch die Bonitur der Grünfärbung zu verschiedenen Zeitpunkten vor der Ernte sollte analysiert werden, inwieweit die Versuchsvariante den N-Versorgungszustand der Pflanzen beeinflusst. In diesem Kapitel werden nun die zuvor beschriebenen Ergebnisse miteinander verglichen sowie in einem wissenschaftlichen Kontext diskutiert. Dabei gestaltete sich der Verweis auf Forschungsergebnisse aus der Vergangenheit schwierig, da an Hopfen bisher nur wenige Versuche zur Fertigation und Tropfschlauchpositionierung durchgeführt wurden.

Zunächst soll auf die Problematik beim Versuchsaufbau eingegangen werden. Jeder Versuch wurde als 2-faktorielle Spaltanlage aufgebaut (Abb. 4.3), wobei in einer Versuchsreihe jeweils zwei Wiederholungen derselben Variante vorkamen. Diese stellten somit keine echten Wiederholungen dar. Aus arbeitstechnischen Gründen war ein Versuchsaufbau mit vollständig randomisierten Blöcken und vier echten Wiederholungen jedoch nicht möglich, da eine Durchführung an zwei Sorten und zwei Standorten aufgrund des Arbeitsaufwandes sonst nicht möglich gewesen wäre. Eine vollständig randomisierte Anlage wäre aber vor allem hinsichtlich der Einflussmöglichkeiten vorherrschender Bodenunterschiede innerhalb der Versuchsflächen grundsätzlich sinnvoller gewesen.

Des Weiteren stellt die Düngung im Rahmen der Versuchsdurchführung einen Kritikpunkt dar. Zum einen erfolgte bei der Sorte PE am Standort A die Berechnung der auszubringenden N-Menge nicht auf Basis des in der Bodenuntersuchung analysierten N_{min}-Gehalts, da dieser als zu hoch erachtet wurde (vgl. 4.3.3). Stattdessen wurde der vom Betrieb A für diesen Schlag ermittelte Gehalt verwendet (Tab. 4.8). Da diese Fläche jedoch langjährig organisch gedüngt wurde (vgl. 4.1.1), liegt wahrscheinlich ein hohes Mineralisationspotential vor (vgl. 2.3). Rückblickend wird somit die Verwendung des höheren N_{min}-Wertes als sinnvoller angesehen. Dies wird bekräftigt durch die im Rahmen

der Bonitur der Grünfärbung ermittelte geringe Aufhellung der „Kontrolle“ (Abb. 5.1) in diesem Versuch.

Zum anderen erfolgte bei der Düngungsvariante „Fertigation“ in jedem Versuch die Ausbringung von Bittersalz sowie MAP mit dem Bewässerungswasser. Diese Düngemittel wurden bei „Kontrolle“ und „Gestreut“ nicht eingesetzt (vgl. 4.3.3). Ob sich das auf die Pflanzen der Reihen mit Fertigation auswirkte, kann nicht beurteilt werden, da eine entsprechende Variante „Fertigation ohne MAP und Bittersalz“ nicht untersucht werden konnte. Aufgrund des Nährstoffausgleichs im Rahmen der durchgeführten Ausgleichsdüngung (siehe Tab. A.1 bis A.4) sowie der optimalen bzw. hohen Versorgungsstufen für Phosphat (vgl. Tab. 4.7), kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das über MAP ausgebrachte Phosphat keinen zusätzlichen positiven Effekt hatte. Auch die bei „Fertigation“ über Bittersalz ausgebrachte Menge an Magnesium wurde in den Varianten „Kontrolle“ und „Gestreut“ ausgeglichen (siehe Tab. A.1 bis A.4). Für die Flächen am Standort A, welche in Versorgungsstufe C für diesen Nährstoff liegen, können positive Effekte durch die Magnesiumapplikation über Tropfbewässerung somit ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu können für die Versuchsflächen von Betrieb B, welche sich für Magnesium in Versorgungsstufe B bzw. an der Grenze zur Stufe A befinden (vgl. Tab. 4.7), positive Effekte auf Wachstum und Entwicklung der Pflanzen durch die gezielte Ausbringung mit dem Bewässerungswasser nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Wenn in den Versuchen am Standort B durch Fertigation im Vergleich zu „Gestreut“ positive Effekte erreicht worden wären, könnte somit nicht beurteilt werden, ob dies durch die regelmäßige und gezielte Ausbringung von Magnesium oder Stickstoff hervorgerufen wurde.

Ab Mitte August erfolgte zu verschiedenen Zeitpunkten vor der Ernte in jedem Versuch die Bonitur der Grünfärbung. Wie bereits im Ergebnisteil beschrieben, waren in keinem der Versuche Unterschiede in Abhängigkeit von der Tropfschlauchpositionierung erkennbar. Bei der Sorte PE am Standort A (Abb. 5.1) zeigten die Düngungsstufen „Gestreut“ und „Fertigation“ auch bei der letzten Bonitur keine Aufhellung. Außerdem wurde in diesem Versuch auch bei den Reihen der Kontrolle trotz Reduktion der N-Ausbringmenge um 37,5 % (vgl. Abb. 4.4) nur eine minimale Aufhellung beobachtet. Bei PE am Standort B hingegen erfuhren alle Versuchsvarianten in den letzten Wochen vor der Ernte eine deutliche Aufhellung (vgl. Abb. 5.7), wobei „Fertigation“ am geringsten reagierte. Die fehlende Aufhellung bei PE am Standort A bestätigt, dass der Boden dieses

Schlags infolge der langjährigen organischen Düngung (vgl. 4.1.1) ein hohes Mineralisationspotenzial aufweist. Wahrscheinlich wurden deshalb große Mengen an Stickstoff nachgeliefert, wobei die Mineralisation speziell durch die Witterungsbedingungen im Anbaujahr 2016 (vgl. Abb. 4.1 und 4.2) zusätzlich begünstigt wurde. Dafür spricht auch, dass PE am Standort B, wo keine organische Düngung erfolgte, trotz der insgesamt höheren N-Düngung (vgl. Tab. 4.10) wesentlich stärker aufhellte (vgl. Abb. 5.1 und 5.7). Bei der Sorte Herkules wurde an beiden Versuchsstandorten eine Aufhellung aller Düngungsvarianten beobachtet (vgl. Abb. 5.4 und 5.13). Am Standort B setzte diese jedoch deutlich früher ein, bereits am 10. August wurde die Kontrolle im Vergleich zu „Gestreut“ und „Fertigation“ etwas heller bewertet. Dies war bei Betrieb A erst am 28. August zu beobachten. Auch in den Varianten „Gestreut“ und „Fertigation“ begann die Aufhellung im Vergleich zum Standort A frühzeitiger. Die Verzögerung der Aufhellung bei HS am Standort A wurde wahrscheinlich ebenfalls durch die erhöhte Nachlieferung infolge der über Jahre erfolgten organischen Düngung verursacht. Mit Ausnahme der Sorte PE am Standort A erfuhr die Düngungsvariante „Fertigation“ in allen Versuchen, trotz gleicher Gesamt-N-Menge, eine geringere Aufhellung als „Gestreut“. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass bei „Gestreut“, bedingt durch den früheren Zeitpunkt des N-Angebots, wahrscheinlich mehr Stickstoff zur Ausbildung von Blättern und Seitentrieben verwendet wurde. Bei Fertigation hingegen stand durch die kontinuierliche Applikation geringer N-Mengen auch am Ende noch Stickstoff zur Aufrechterhaltung der Grünfärbung zur Verfügung.

Hinsichtlich der Positionierung des Tropfschlauches lag der durchschnittliche Doldenertrag von „AB“ in jedem Feldversuch über dem von „NB“. Im Mittel wurden in Abhängigkeit von Sorte und Standort folgende Ertragszunahmen erreicht:

Perle (A): + 3,9%

Perle (B): + 4,1%

Herkules (A): + 4,2%

Herkules (B): + 11,6%

Mit Ausnahme der Sorte Herkules am Standort B lag die Ertragszunahme durch die Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang in allen Versuchen auf einem ähnlichen Niveau. Als statistisch signifikant ($p=0,005$) erwies sich die Verbesserung nur bei HS am Standort B (vgl. Abb. 5.15). Jedoch lag auch die Ertragszunahme von PE am

Standort B nahe am Signifikanzniveau ($p=0,086$). Am Standort A erwiesen sich die Ertragsunterschiede zwar nicht als statistisch signifikant, jedoch zeigen die Ergebnisse eine deutliche Tendenz. Auch der mittlere Alphasäuregehalt lag in 3 von 4 Versuchen bei Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang höher als bei „NB“. Statistisch abzusichern mit $p=0,038$ war ein höherer Gehalt aber nur bei der Sorte Perle am Standort B (vgl. Abb. 5.11). Des Weiteren lag auch der berechnete Alphaertrag in jedem Versuch bei der Tropfschlauchposition „AB“ höher. Dieses Ergebnis konnte am Standort B sowohl für Perle ($p=0,012$) als auch für Herkules ($p=0,027$) statistisch abgesichert werden (vgl. Abb. 5.11 und 5.17). Am Standort A hingegen konnte hinsichtlich der Unterschiede im Alphaertrag in Abhängigkeit von der Tropfschlauchpositionierung keine statistische Signifikanz ermittelt werden.

Die Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang wirkte sich im Anbaujahr 2016, trotz des geringen Bewässerungsbedarfs infolge der günstigen Niederschlagsverteilung (vgl. Abb. 4.1 und 4.2), standortunabhängig in allen Versuchen positiv auf die Ernteergebnisse aus. Auch Graf (2016) zeigte an der Sorte Herkules in verschiedenen Feldversuchen tendenzielle Vorteile von „AB“ gegenüber „NB“ auf. Bei dem in der Hallertau vorherrschenden Anbausystem werden im Verlauf der Vegetation durch das Aufackern der humus- und nährstoffreichen oberen Erdschicht des gesamten Zwischendammbereichs Dämme entlang der Pflanzenreihen aufgeschüttet. In diesen bilden die Hopfenpflanzen, ausgehend vom unteren Teil des verschütteten Haupttriebs, sekundäre Sommerwurzeln, welche zusätzlich Wasser und Nährstoffe aufnehmen können. Häufig ist das gesamte Dammvolumen von feinen weißen Wurzeln durchzogen. Die Intensität dieser Durchwurzelung variiert jedoch in Abhängigkeit von Sorte, Witterung und Bewirtschaftung (Kohlmann und Kastner, 1975; Graf et al., 2014). Bei oberirdischer Tropfschlauchpositionierung (AB) erfolgt die Wasserverteilung (vgl. Abb. 2.7) sowohl horizontal als auch vertikal in Richtung der Schwerkraft (Schütze et al., 2013). Somit wird der nährstoff- und humusreiche Boden des aufgeschütteten Damms bei „AB“ regelmäßig durchfeuchtet. Dadurch kann zum einen die Durchwurzelung des nährstoffreichen Damms gefördert werden, wodurch insgesamt, im Vergleich zu „NB“, mehr Wasser und Nährstoffe zur Verfügung stehen. Zum anderen können Wasser sowie gelöste Nährstoffe, aufgenommen über die direkt am Spross gelegenen Sommerwurzeln, wahrscheinlich effizienter genutzt werden, was sich positiv auf Wachstum und Entwicklung der Hopfenpflanze auswirken kann. Wenn über Tropfbewässerung, wie bei der Versuchsvariante „Fertigation“, neben Wasser auch Nährstoffe ausgebracht werden, kann

eine Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang im Vergleich zur Lage im Boden neben der Reihe zusätzliche Vorteile haben. Denn Wasser sowie gelöste Nährstoffe werden bei „Fertigation AB“ direkt in den intensiv durchwurzeltten Damm platziert, woraus positive Effekte auf Wachstum und Entwicklung resultieren können. Folglich könnten sich auch Ertrag und Alphasäuregehalt verbessern. Die Ergebnisse der durchgeführten Feldversuche bestätigen diese These. Bei PE am Standort A wurde durch „Fertigation AB“ im Vergleich zu „Fertigation NB“ eine deutliche Ertragssteigerung (14 %) erzielt. Auch bei HS am Standort B wurde durch „Fertigation AB“ eine deutliche Ertragszunahme in Höhe von 20 % erreicht.

Erfolgt die Positionierung des Tropfschlauches im Vergleich dazu im Boden neben dem Bifang, befindet sich dieser in einer Tiefe von 30 cm und liegt ebenso weit von der Reihenmitte entfernt, etwa im Bereich der Fahrspuren (vgl. 4.3.4). Das Verteilungsmuster von Wasser im Boden unterscheidet sich bei unterirdischer Tropfbewässerung (NB) grundsätzlich, da auch eine Ausbreitung in vertikaler Richtung entgegen der Schwerkraft erfolgt (Sne, 2006). Die obersten Bodenschichten werden jedoch in der Regel nicht ausreichend befeuchtet (vgl. Abb. 2.7), was sich bei anderen Kulturen bereits als problematisch herausstellte (Camp et al., 2000; Raine und Foley, 2001; Lamm, 2002). Durch die fehlende Befeuchtung wird zudem die Verfügbarkeit oberflächlich ausgebrachter Nährstoffe verringert (Devasirvatham, 2009). Auch für Hopfen gilt, dass die obersten Bodenschichten sowie der aufgeschüttete Damm bei „NB“ nicht befeuchtet werden, wodurch oberflächlich ausgebrachte Nährstoffe im Gegensatz zu „AB“ wahrscheinlich schlechter genutzt werden können. Außerdem könnte die horizontale Ausbreitung des Wassers (vgl. Abb. 2.7) zu gering sein, um die Hopfenpflanze ähnlich effizient wie bei „AB“ mit Wasser zu versorgen, was zu einem weiteren Nachteil von „NB“ führen würde. Jedoch könnten sich die Wurzeln bei Positionierung des Tropfschlauches neben dem Bifang stattdessen verstärkt in diesem Bereich ausbreiten, da dort Wasser und bei Fertigation auch Nährstoffe vorhanden sind. Dem widerspricht allerdings, dass sich Pflanzenwurzeln vor allem an Stellen ausbreiten, wo neben Wasser und Nährstoffen auch Sauerstoff vorhanden ist (vgl. 2.4.2). Denn speziell der Sauerstoffgehalt kann dort, im Bereich der Fahrspuren, durch stärkere Bodenverdichtung verringert sein (vgl. 2.4.1). Aufgrund der günstigen Niederschlagsverteilung im Anbaujahr 2016 (vgl. Abb. 4.1 und 4.2) war der Bewässerungsbedarf in den Versuchen minimal. Unter trockeneren Bedingungen könnte sich die positive Wirkung von „AB“ gegenüber „NB“ zusätzlich verstärken.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Positionierung des Tropfschlauches auf dem Bifang im Vergleich zu „NB“ sowohl den Ertragsaufbau als auch die Synthese der Alphasäure begünstigt. Für die Praxis ist aber vor allem von Bedeutung, inwieweit durch die Verbesserung von Ertrag und Alphasäuregehalt die höheren Kosten für das jährliche Auslegen und Einholen der Tropfschläuche kompensiert werden können (Devasirvatham, 2009). Zur Ableitung einer Empfehlung für den Hopfenbau in der Hallertau sollte dies analysiert und in weiteren Feldversuchen überprüft werden.

Eine höhere N-Düngung führte nur in zwei von vier Versuchen, bei Herkules am Standort A (Abb. 5.5) und Perle am Standort B (Abb. 5.8) zu einer Ertragszunahme. Dabei ist anzumerken, dass diese bei HS am Standort A gering ausfiel. An beiden Versuchsstandorten war der Witterungsverlauf im Anbaujahr 2016 bis Mitte August geprägt durch regelmäßige Niederschläge (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Die oberen Bodenschichten waren dadurch ständig gut durchfeuchtet und wurden bei allen Varianten der Tropfschlauchposition AB speziell im Bereich des nährstoffreichen Damms in regelmäßigen Abständen zusätzlich durch Bewässerung befeuchtet. Auch die Tagesdurchschnittstemperatur lag häufig im Bereich von 20 °C (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Insgesamt herrschten somit optimale Bedingungen für die Mineralisation organischer N-Verbindungen (vgl. 2.3), weshalb wahrscheinlich große Mengen an Stickstoff nachgeliefert wurden, wodurch eine höhere N-Düngung größtenteils keine Wirkung zeigte. Gesicherte Aussagen über die Nachlieferung aus dem Boden können jedoch nicht getroffen werden, da im Rahmen dieser Arbeit keine Untersuchungen dazu durchgeführt wurden. Speziell auf den Versuchsflächen am Standort A wurde die N-Nachlieferung durch langjährige organische Düngung (vgl. 4.1.1) wahrscheinlich zusätzlich erhöht. Die Entwicklung der Grünfärbung der einzelnen Düngungsstufen am Standort A unterstützt die These einer hohen N-Nachlieferung aus dem Boden. Für eine hohe N-Nachlieferung spricht außerdem, dass nur bei PE am Standort B (Abb. 5.9), wo keine langjährige organische Düngung stattfand, eine signifikante Ertragszunahme ($p=0,014$) durch die Erhöhung der N-Düngung ermittelt werden konnte. In diesem Versuch lieferte die Düngungsvariante „Gestreut“ im Vergleich zur Kontrolle einen signifikant höheren Ertrag (vgl. Abb. 5.9). Aber auch „Fertigation“ erreichte im Vergleich zur Kontrolle einen höheren Ertrag. Zwar konnte dieser Unterschied statistisch nicht abgesichert werden, jedoch lag die reale Irrtumswahrscheinlichkeit des Vergleichs am Signifikanzniveau. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass eine Ertragszunahme durch Erhöhung der N-Düngung unabhängig davon erreicht werden kann, ob die Ausbringung des Stickstoffs in gestreuter Form oder

mit dem Bewässerungswasser erfolgt. Allerdings zeigten sich in den durchgeführten Versuchen, nicht wie von Boman (1996), Kwong et al. (1999) und Asokaraja (2016) bei anderen Kulturen und von Delahunty und Johnston (2014) bei Hopfen beschrieben, deutlich positive Effekte durch Fertigation im Vergleich zur gestreuten Ausbringung. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Versuchsjahr 2016 aufgrund der hohen Niederschläge (vgl. Abb. 4.1 und 4.2) grundsätzlich keine optimalen Bedingungen zur Durchführung eines Bewässerungsversuches mit Fertigation herrschten. In Jahren mit trockeneren Bedingungen könnten die Vorteile von Fertigation (siehe 2.4.4) hingegen wesentlich zum Tragen kommen.

Bei Ausbringung einer höheren N-Menge durch Fertigation nahm der Alphasäuregehalt in allen Versuchen ab. Bei PE am Standort B (Abb. 5.12) erwies sich diese Verringerung als statistisch signifikant ($p=0,016$). Da durch Fertigation kontinuierlich Stickstoff ausgebracht wurde, lag die N-Versorgung der Pflanzen dieser Düngungsstufe höher. Dies bestätigen die Ergebnisse der Bonitur der Grünfärbung (vgl. Abb. 5.4, 5.7 und 5.13). Wenn Pflanzen einen hohen N-Versorgungszustand aufweisen, wird im Rahmen der N-Assimilation grundsätzlich mehr Kohlenstoff für den Einbau von Stickstoff in Aminosäuren benötigt (Hawkesford et al., 2012). Daraus resultiert, dass bei hoher N-Versorgung weniger Kohlenstoff zur Bildung weiterer Inhaltsstoffe zur Verfügung steht. Die Gruppe der Alphasäuren sind Derivate des Phloroglucinols (Biendl et al., 2012), für deren Synthese ebenfalls C-Gerüste benötigt werden. Somit besteht die Möglichkeit, dass die Alphasäurebildung bei hoher N-Versorgung reduziert wird, da nicht ausreichend Kohlenstoff zur Verfügung steht. Dies könnte in den durchgeführten Versuchen speziell bei den Pflanzen der Düngungsstufe „Fertigation“ zu geringeren Alphasäuregehalten geführt haben.

Eine abschließende Beurteilung der Frage, wie sich Fertigation im Vergleich zur oberflächigen Applikation granulierter Dünger auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen unter den Bedingungen in der Hallertau auswirkt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, weil eine höhere N-Düngung nur in einem der Versuche eine Wirkung zeigte. Grundsätzlich stellt Fertigation aber eine effiziente Form der Düngung dar, welche eine Vielzahl an Vorteilen bietet (Burt, 1995; Magen, 1995; Evans, 1999; Evans und Waller, 2007; Alva et al., 2008). Außerdem wird Fertigation in den USA erfolgreich bei Hopfen eingesetzt (Delahunty und Johnston, 2014). Jedoch sind die dabei verfolgten Strategien und Ansätze aufgrund erheblicher klimatischer Unterschiede nicht

direkt übertragbar, können aber als Anhaltspunkte dienen. Weiterführende Untersuchungen zur optimalen Anwendung von Fertigation im Hopfenbau unter den Bedingungen in der Hallertau werden als sinnvoll erachtet.

In zukünftigen Untersuchungen zur Fertigation im Hopfen ist darüber nachzudenken den über Fertigation ausgebrachten Anteil an der gesamten N-Düngung zu erhöhen. Dies würde eine stärkere Anpassung der N-Düngung an den Wachstumsverlauf der Pflanzen (Abb. 2.4) ermöglichen. Speziell im Zeitraum größter Zuwachsraten (Abb. 2.3) könnte dann die wöchentliche Ausbringmenge erhöht werden, wodurch N-Mangel vermieden und optimales Pflanzenwachstum erreicht werden kann. Vor allem hinsichtlich der hohen täglichen Aufnahmeraten des Hopfens (Seiffert, 1995; Portner et al., o. j.) wird dies als sinnvoll erachtet. Auch die von Delahunty und Johnston (2014) erläuterte Praxis aus den USA mit höheren wöchentlichen N-Gaben im Zeitraum des stärksten Wachstums spricht für eine gezielte Anpassung der N-Düngung an den Wachstums- und Aufnahmeverlauf der Hopfenpflanze.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche Auswirkungen Fertigation und Tropfschlauchpositionierung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (*Humulus lupulus L.*) haben können. Zur Untersuchung der Effekte wurden im Anbaujahr 2016 Feldversuche mit der Aromasorte Perle und Hochalphasorte Herkules an zwei Standorten im Anbaugebiet Hallertau durchgeführt. Um die Einflüsse beider Parameter zu analysieren wurde ein 2-faktorielles Versuchsdesign eingesetzt. Dabei wurde zum einen eine Teilmenge des insgesamt auszubringenden Stickstoffs entweder praxisüblich gestreut oder über Fertigation in flüssiger Form mit dem Bewässerungswasser ausgebracht. Zum anderen wurde die Tropfschlauchposition „auf dem Bifang“ der Lage des Schlauches im Boden neben den Hopfenreihen gegenübergestellt. Auf Basis der Versuchsergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass die Positionierung des Tropfbewässerungssystems auf den Bifängen, trotz des geringen Bewässerungsbedarfs im Jahr 2016, positive Auswirkungen auf Ertrag und Inhaltsstoffe des Hopfens hatte. Ob dadurch die höheren Kosten für das jährliche Auslegen und Einholen der Tropfschläuche kompensiert werden können, sollte in weiteren Untersuchungen quantifiziert werden. Eine abschließende Beurteilung der Düngungsmethode Fertigation ist aufgrund geringer Effekte einer höheren Stickstoff-Düngung, wahrscheinlich bedingt durch eine hohe N-Nachlieferung aus dem Boden, infolge der regelmäßigen Niederschläge im Anbaujahr 2016, nicht möglich. Jedoch bietet Fertigation eine Vielzahl an pflanzenbaulichen sowie umweltökologischen Vorteilen, weshalb in Zukunft die optimale Anwendung im Hopfenanbau unter den Bedingungen in der Hallertau weiter untersucht werden sollte.

Literaturverzeichnis

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. 1998: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Hg. v. Food and Agriculture Organization. Rom, Italien.

Alva A. K., Mattos D., Quaggio J. A. 2008: Advances in Nitrogen Fertigation of Citrus. In: *Journal of Crop Improvement* 22 (1), S. 121–146.

ASAE 2015: Standard: S526.4 - Soil and Water Terminology. Hg. v. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). St Joseph, MI, USA.

Asokaraja N. 2016: Advances in Fertigation for Microirrigation. In: M. R. Goyal (Hg.): Water and fertigation management in micro irrigation. Oakville, ON, Kanada: Apple Academic Press (Research advances in sustainable micro irrigation, Volume 9), S. 145–174.

Ayars J. E., Bucks D. A., Lamm F. R., Nakayama F. S. 2007: Introduction. In: F. R. Lamm, J. E. Ayars und F. S. Nakayama (Hg.): Microirrigation for crop production. Design, Operation, and Management. Amsterdam: Elsevier (Developments in Agricultural Engineering, 13), S. 1–26.

Ayars J. E., Phene C. J., Hutmacher R. B., Davis K. R., Schoneman R. A., Vail S. S., Mead R. M. 1999: Subsurface drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. In: *Agricultural Water Management* 42, S. 1–27.

Bar-Yosef B. 1991: Fertilization under drip irrigation. In: D. A. Palgrave (Hg.): Fluid fertilizer. Science and technology. New York, USA: Dekker (Fertilizer science and technology series, 7), S. 285–329.

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2016: Agrarmeteorologie Bayern. Online verfügbar unter <http://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L941ES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=10VER48553>, aufgerufen am: 20.12.2016.

Bayerisches Landesamt für Umwelt 2016: GeoFachdatenAtlas - Bodeninformationssystem Bayern. Augsburg. Online verfügbar unter <http://www.bis.bayern.de/bis/initParams.do>, aufgerufen am: 15.12.2016.

Biendl M. 2006: Polyphenole - Pflanzeninhaltsstoffe mit Vermarktungspotential. In: *Hopfenrundschau International* 2005/2006, S. 22–27.

Biendl M., Engelhard B., Forster A., Gahr A., Lutz A., Mitter W., Schmidt R., Schönberger C. 2012: Hopfen. Vom Anbau bis zum Bier. Nürnberg: Fachverlag Carl (Brauwelt-Wissen).

Boman B., Obreza T. 2002: Fertigation Nutrient Sources and Application Considerations for Citrus. Hg. v. Agricultural and Biological Engineering Department. Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS). Florida, USA (Circular, 1410). Online verfügbar unter <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/CH/CH18500.pdf>, aufgerufen am: 02.12.2016.

Boman B. 1996: Fertigation versus conventional fertilization of flatwoods grapefruit. In: *Fertilizer Research* 44, S. 123–128.

Bresler E. 1977: Trickle-drip irrigation: Principles and application to soil-water management. In: *Advances in Agronomy* 29, S. 343–393.

Bundesarbeitskreis Düngung 2003: Phosphat und Kali - Bausteine nachhaltiger Ertragsbildung. Hg. v. Bundesarbeitskreis Düngung. Online verfügbar unter <http://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/uid/publikationen/pho-k.pdf>, aufgerufen am: 16.12.2016.

Burt C. M. 1995: Fertigation - The Next Frontier. In: *Irrigation Business and Technology* 3 (4), S. 16–19.

Burt C. M. 1998: Chemicals for Fertigation. ITRC Paper 98-002. Irrigation Association 19th Annual Conference. Irrigation Training and Research Center. San Luis Obispo, CA, USA. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/aa82/a8774baf806ff8a19e21b3343b85947c61be.pdf>, aufgerufen am: 24.01.2017.

Camp C. R., Lamm F. R. 2003: Irrigation Systems, Subsurface Drip. In: B. A. Stewart und T. A. Howell (Hg.): *Encyclopedia of water science*. New York, USA: Dekker, S. 560–564.

Camp C. R., Lamm F. R., Evans R. G., J. Phene C. 2000: Subsurface Drip Irrigation - Past, Present and Future. In: American Society of Agricultural Engineers (ASAE) (Hg.): *Proceedings of the 4th Decennial Irrigation Symposium*. St Joseph, MI, USA, S. 363–372.

Ceh B., Kac M., Kosir I. J., Abram V. 2000: Relationships between Xanthohumol and Polyphenol Content in Hop Leaves and Hop Cones with Regard to Water Supply and Cultivar. In: *International Journal of Molecular Sciences* 8, S. 989–1000.

Coolong T. 2016: Weed Management in Crops with Micro Irrigation: A Review. In: M. R. Goyal (Hg.): *Water and fertigation management in micro irrigation*. Oakville, ON, Kanada:

Apple Academic Press (Research advances in sustainable micro irrigation, Volume 9), S. 105–127.

Cote F. J., Bristow K. L., Charlesworth P. B., Cook F. J., Thorburn P. J. 2003: Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. In: *Irrigation Science* 22, S. 143–156.

Delahunty K., Johnston J. 2011: An Experiment on the Effectiveness of Irrigation and Cover Cropping to Produce Sustainable Hops in Maine. USDA Northeast SARE Final Report. Hg. v. US Department of Agriculture. ME, USA. Online verfügbar unter http://mysare.sare.org/sare_project/fne11-711/?page=final&view=print, aufgerufen am: 24.01.2017.

Delahunty K., Johnston J. 2014: Investigating best practices for timing and amount of organic soluble nitrate fertigation of hops in the Northeast. USDA Northeast SARE Final Report. Hg. v. US Department of Agriculture. ME, USA. Online verfügbar unter http://mysare.sare.org/wp-content/uploads/998543FNE14_796_FinalReport.pdf, aufgerufen am: 24.01.2017.

Devasirvatham V. 2009: A Review of Subsurface Drip Irrigation in Vegetable Production. Hg. v. Cooperative Research Centre for Irrigation Futures. Sydney, Australien (Irrigation Matters Series). Online verfügbar unter <https://www.irrigationaustralia.com.au/documents/item/277>, aufgerufen am: 25.01.2017.

Engelhard B., Kammhuber K., Lutz A., Lachermeier U., Bergmeier M. 2011: Blattflächenentwicklung und Ertragsaufbau wichtiger Hopfensorten. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising-Weihenstephan (LfL-Schriftreihe).

Evans R. G. 1999: Microirrigation. Hg. v. US Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Sidney, MT, USA. Online verfügbar unter <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/21563/Microirrigation.pdf>, aufgerufen am: 15.12.2016.

Evans R. G., Waller P. M. 2007: Application of Chemical Materials. In: F. R. Lamm, J. E. Ayars und F. S. Nakayama (Hg.): Microirrigation for crop production. Design, Operation, and Management. Amsterdam: Elsevier (Developments in Agricultural Engineering, 13), S. 285–327.

Fandino M., Olmedo J. L., Martinez E. M., Valladares J., Paredes P., Rey B. J., Mota M., Cancela J. J., Pereira L. S. 2015: Assessing and modeling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (*Humulus Lupulus*), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. In: *Industrial Crops and Products* 77, S. 204–217.

- Fischer G., Tubiello, F., N., Velthuizen H., Wiberg, D., A. 2007:** Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. In: *Technological Forecasting & Social Change* 74, S. 1083–1107.
- Gardenas A., Hopmans J. W., Hanson B. R., Simunek J. 2005:** Two dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under microrrigation. In: *Agricultural Water Management* 74, S. 219–242.
- Gingrich C., Hart J., Christensen N. 2000:** Hops. Fertilizer Guide. Hg. v. Oregon State University Extension Service (Fertilizer Guide, 79). Online verfügbar unter <https://catalog.extension.oregonstate.edu/fg79>, aufgerufen am: 09.01.2017.
- Graf T. M., Beck M. 2015:** Optimierung des Bewässerungsmanagements im Hopfenbau (*Humulus lupulus*). DBU Abschlussbericht. Hg. v. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Osnabrück.
- Graf T. M., Beck M., Mauermeier M., Ismann D., Portner J., Doleschel P., Schmidhalter U. 2014:** *Humulus lupulus* - The Hidden Half. In: *Brewing Science* 67, S. 161–166.
- Graf T. M. 2016:** Tröpfchenbewässerung im Hopfenbau - Feldversuche, Physiologie und Rhizosphäre. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Hagin J., Lowengart-Aycicegi M. S. 2003:** Fertigation - Fertilization through Irrigation. Hg. v. International Potash Institute (IPI). Basel, Schweiz (IPI Research Topics, 23).
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Skrumsager I., White P. 2012:** Functions of Macronutrients. In: P. Marschner (Hg.): *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*. Third Edition. Amsterdam, Niederlande: Elsevier Academic press, S. 135–189.
- Hopsteiner 2011:** Hopsteiner Newsletter. Analytical Methods for Hops and Hop Products. New York, USA. Online verfügbar unter http://www.hopsteiner.de/fileadmin/redeakteur/pdf/neuigkeiten-berichte/Hopsteiner%20Newsletter/2011/2011-08_TS_analytical_methods.pdf, aufgerufen am: 18.01.2017.
- Howell T. A., Meron M. 2007:** Irrigation Scheduling. In: F. R. Lamm, J. E. Ayars und F. S. Nakayama (Hg.): *Microirrigation for crop production. Design, Operation, and Management*. Amsterdam: Elsevier (Developments in Agricultural Engineering, 13), S. 61–130.

Huck M. G., Hillel D. 1983: A model of root growth and water uptake accounting for photosynthesis, respiration, transpiration and soil hydraulics. In: Daniel Hillel (Hg.): *Advances in Irrigation*. Volume 2. Burlington: Elsevier Science, S. 273–333.

ICID 2016: *Agricultural Water Management for Sustainable Rural Development*. Annual Report 2015/2016. Hg. v. International Commission on Irrigation and Drainage. Neu-Delhi, Indien. Online verfügbar unter http://www.icid.org/ar_2015.pdf, aufgerufen am: 24.01.2017.

Johnson H., Dennis P., Ronald V. 1991: *Saving water in vegetable gardens*. Hg. v. University of California. Oakland, CA, USA. Online verfügbar unter http://vric.ucdavis.edu/pdf/drip%20irrigation_savingwater.pdf, aufgerufen am: 25.01.2017.

Kafkafi U. 2008: Global aspects of fertigation usage. In: P. Imas und R. Price (Hg.): *Fertigation Proceedings*. Selected papers presented at the International Symposium on Fertigation "Optimizing the utilization of water and nutrients", Beijing, 20-24 September 2005. International Potash Institute (IPI). Horgen, Schweiz. S. 8–22.

Kafkafi U., Tarchitzky J. 2011: *Fertigation - A Tool for Efficient Fertilizer and Water Management*. Hg. v. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, Frankreich. Online verfügbar unter http://www.haifa-group.com/files/Articles/ifa_fertigation-Kafkafi-511.pdf, aufgerufen am: 24.01.2017.

Kammhuber K. 2006: Differenzierung des Welthopfensortiments nach Bitterstoffen und Polyphenolen. In: *Hopfenrundschau International* 2005/2006, S. 42–46.

Kammhuber K. 2008: Die antimikrobiellen und bakteriostatischen Eigenschaften der Hopfenbitterstoffe. In: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hg.): *Hopfenanbau 2020 - Internationales Hopfensymposium*. Wolnzach, 5-6 Mai 2008. BMELV. Bonn, S. 22–23.

Kammhuber K. 2008: Entwicklung von Analysemethoden für die Hopfenpolyphenole. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.): *Jahresbericht 2007 Sonderkultur Hopfen*. LfL. Freising-Weihenstephan (LfL-Information), S. 79–81.

Kohlmann H., Kastner A. 1975: *Der Hopfen*. Wolnzach: Hopfen-Verlag.

Koren J. 2007: Influence of plantation row spacing on quality and yield of hops. In: *Plant Soil Environment* 6 (53), S. 276–282.

Kucera J., Krofta K. 2009: Mathematical model for prediction of yield and alpha acid contents from meteorological data for Saaz aroma variety. In: D. Keukeleire (Hg.): Proceedings of the 2nd International Humulus Symposium. II International Humulus Symposium. Gent, Belgien, 1-5 September 2008. International Society for Horticultural Science. Löwen, Belgien: ISHS (Acta horticultrae, 848), S. 131–139.

Kwong K. F., Paul J. P., Deville J. 1999: Drip Fertigation - A Means for Reducing Fertilizer Nitrogen to Sugarcane. In: *Experimental Agriculture* 35, S. 31–37.

Lamm F. R. 2002: Advantages and Disadvantages of Subsurface Drip Irrigation. Online verfügbar unter <http://fyi.uwex.edu/cropirrigation/files/2015/12/Adv-Disadv-SDI-KS-2002-Lamm.pdf>, aufgerufen am: 18.01.2017.

Lamm F. R., Bordovsky J. P., Schwankl L. J., Grabow G. L., Enciso-Medina J., Peters R. T., Colaizzi P. D., Trooien T. P., Porter D. O. 2012: Subsurface Drip Irrigation. Status of the Technology in 2010. In: *Transactions of the ASABE* 55 (2), S. 483–491.

Lamm F. R., Camp C. R. 2007: Subsurface Drip Irrigation. In: F. R. Lamm, J. E. Ayars und F. S. Nakayama (Hg.): Microirrigation for crop production. Design, Operation, and Management. Amsterdam: Elsevier (Developments in Agricultural Engineering, 13), S. 473–551.

LfL 2016: Grünes Heft. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising-Weihenstephan (LfL-Information). Online verfügbar unter http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/gr%C3%BCnes_heft_2016.pdf, aufgerufen am: 15.12.2016.

Li J., Zhang J., Ren L. 2003: Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. In: *Irrigation Science* 22, S. 12–30.

Lutz A. 2013: Stammbäume verschiedener Hopfensorten. Wolnzach, 25.02.2013. Persönliche Mitteilung.

Lutz A., Engelhard B., Seigner E. 2011: Hopfen für alle Biere der Welt. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising-Weihenstephan (LfL-Information).

Lutz A., Kneidl J., Seigner E., Kammhuber K. 2009: Hopfenqualität - Ernte zum richtigen Zeitpunkt. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising-Weihenstephan (LfL-Information).

Magen H. 1995: Fertigation: An overview of some practical aspects. Hg. v. ICL Fertilizers. Online verfügbar unter

http://www.iclfertilizers.com/Fertilizers/Knowledge%20Center/Fertigation_overview_of_practical_aspects.pdf, aufgerufen am: 24.01.2017.

Marschner P., Rengel Z. 2012: Nutrient Availability in Soils. In: P. Marschner (Hg.): Marschner's Mineral nutrition of higher plants. Third Edition. Amsterdam, Niederlande: Elsevier Academic press, S. 315–330.

Mastel K. 2002: Umweltgerechte Landbewirtschaftung - Beregnung, Bewässerung. Hg. v. Landesanstalt für Pflanzenbau. Rheinstetten (Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung).

Michel R., Sourell H. 2014: Bewässerung in der Landwirtschaft. Clenze: Agrimedia (Themenbibliothek Pflanzenproduktion).

Mozny M., Tolasz R., Nekovar J., Sparks T., Trnka M., Zalud Z. 2009: The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (6-7), S. 913–919.

Münsterer J. 2012: Untersuchungen möglicher Methoden zur Steuerung der Tröpfchenbewässerung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.): Jahresbericht 2011 Sonderkultur Hopfen. LfL. Freising-Weihenstephan (LfL-Information), S. 84–88.

Nakawuka P. 2013: Effect of Deficit Irrigation on Yield, Quality and Grower Returns of Native Spearmint and Hops in Washington State. Dissertation. Washington State University, Pullman, WA, USA.

Neilsen D., Parchomchuk P., Neilson G. H., Hogue, E., J. 1998: Using soil moisture monitoring to determine the effects of irrigation management and fertigation on nitrogen availability in high-density apple orchards. In: *Journal of the American Society for Horticultural Science* 123 (4), S. 706–713.

Neve R. A. 1991: Hops. 1. ed. London, England: Chapman & Hall.

Paschold P. J. 2010: Steuern und Regeln der Bewässerung. In: P. J. Paschold und H. Beltz (Hg.): Bewässerung im Gartenbau. Stuttgart: Ulmer, S. 81–115.

Pavlovic V., Pavlovic M., Cerenak A., Kosir I. J., Ceh B., Rozman C., Turk J., Pazek K., Krofta K., Gregoric G. 2012: Environment and weather influence on quality and market value of hops. In: *Plant Soil Environment* 58 (4), S. 155–160.

Pavlovic V., Pavlovic M., Rozman C., Udovc A., Stajko D., Wang D., Gavric M., Srecec S. 2013: Market value assessment of hops by modeling of weather attributes. In: *Plant Soil Environment* 59 (6), S. 267–272.

Portner J., Roßbauer G., Bauer M. o. j.: Nährstoffaufnahme des Hopfens. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter <http://www.lfl.bayern.de/ipz/hopfen/021742/index.php>, aufgerufen am: 18.01.2017.

R Core Team 2016: R: A language and environment for statistical computing. Wien, Österreich: R Foundation for Statistical Computing. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>, aufgerufen am: 20.11.2016.

Raine S. R., Foley J. P. 2001: Application systems for cotton irrigation - Are you asking the right questions and getting the answer right? Hg. v. Irrigation Association of Australia. Sydney, Australien.

Rybacek V. (Hg.) 1991: Hop production. Amsterdam, Niederlande: Elsevier (Developments in crop science, 16).

Savva A. P., Frenken K. 2002: Crop water Requirements and irrigation scheduling. Irrigation Manual - Module 4. Hg. v. Food and Agriculture Organization. FAO. Rom, Italien. Online verfügbar unter <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai593e/ai593e00.pdf>, aufgerufen am: 25.01.2017.

Schäufele W. R. 1966: Zur Frage der Nährstoffversorgung und Ernährung des Hopfens in den süddeutschen Anbaugebieten - unter besonderer Berücksichtigung des Magnesiums. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.

Schütze N., Lubrich T., Khaddam I., Jung C. 2013: Atlas der Bewässerung: Ober- und unterirdische Tropfer - Die Ausbreitung des Wassers im Boden beim Einzeltropfer. Hg. v. Technische Universität Dresden. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/ihm/hydrologie/ressourcen/dateien/forschung/Projekte/saphir/atlantefolder/atlas_tropfer.pdf?lang=de, aufgerufen am: 20.12.2016.

Schwankl L. J., Hanson B. R. 2007: Surface Drip Irrigation. In: F. R. Lamm, J. E. Ayars und F. S. Nakayama (Hg.): Microirrigation for crop production. Design, Operation, and Management. Amsterdam: Elsevier (Developments in Agricultural Engineering, 13), S. 431–472.

Seiffert S. 1995: Stickstoffernährung von Hopfen (*Humulus lupulus* L.) und Stickstoffhaushalt im Tettlinger Hopfenanbau. Dissertation. Universität Hohenheim, Stuttgart.

Shock C. 2013: Drip Irrigation: An Introduction. Hg. v. Oregon State University, Corvallis, OR, USA (Sustainable Agriculture Techniques). Online verfügbar unter http://extension.oregonstate.edu/sorec/sites/default/files/drip_irrigation_em8782.pdf, aufgerufen am: 24.01.2017.

Skaggs T. H., Trout T. J., Rothfuss Y. 2010: Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. In: *Soil Science Society of America Journal* 74, S. 1886–1896.

Small E. 1978: A numerical and nomenclatural analysis of morphogeographic taxa of *Humulus*. In: *Systematic Botany* 3 (1), S. 37–76.

Sne M. 2006: Guidelines for planning and Design of micro irrigation in arid and semiarid regions. New Delhi, India: International Commission on Irrigation and Drainage.

Srecec S., Kvaternjak I., Kaucic D., Maric V. 2004: Dynamics of Hop Growth and Accumulation of Alpha-acids in Normal and Extreme Climatic Conditions. In: *Agriculturae Conspectus Scientificus* 69 (2-3), S. 59–62.

Srecec S., Kvaternjak I., Kaucic D., Spoljar A., Erhatic R. 2008: Influence of climatic conditions on accumulation of alpha-acids in hop cones. In: *Agriculturae Conspectus Scientificus* 3 (73), S. 161–166.

Stampfl J. 2013: Auswirkungen eines Wasserdefizits am Ende der generativen Phase auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (*Humulus lupulus*). Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising-Weihenstephan.

StMELF 2016: iBALIS. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München. Online verfügbar unter https://www.stmelf.bayern.de/ibalis/bH-TKRZst1P7D_YxdsRdTZMgFi72145p/bH-36, aufgerufen am: 15.12.2016.

Svoboda P., Hnilickova H., Knilicka F. 2008: Changes in yield and quality of hop depending on the irrigation. In: *Cereal Research Communications* 36 (5), S. 891–894.

Thomas G. G. 1967: Hop studies by the late I. H. Williams. In: Wye College (Hg.): Annual Report Department of Hop Research 1966. Ashford, Kent, UK, S. 63–67.

Thomas G. G. 1982: Stages in the annual growth cycle of the perennial hop (*Humulus lupulus* L.) under English conditions. In: Wye College (Hg.): Annual Report Department of Hop Research 1981. Ashford, Kent, UK, S. 35–39.

Thomas G. G., Schwabe W. W. 1969: Factors controlling flowering in the hop (*Humulus lupulus* L.). In: *Annals of Botany* 33, S. 781–793.

Vermeiren L., Jobling G. A. 1984: FAO Irrigation and Drainage 36 Paper. Localized Irrigation. Hg. v. Food and Agriculture Organization. Rom, Italien.

Wendland M., Diepolder M., Capriel P. 2012: Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Gelbes Heft - 10. unveränderte Auflage. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising-Weihenstephan (LfL-Information).

Williams I. H. 1960: Changes in the carbohydrate balance of the hop in relation to the annual growth cycle in young plants. In: Wye College (Hg.): Annual Report Department of Hop Research 1959. Ashford, Kent, UK, S. 98–106.

Zattler F. 1965: Hopfen (*Humulus Lupulus* L.). In: N. Atanasiu, W. Baden, F. Baltin, L. D. Baver, A. Blamauer, E. Boguslawski et al. (Hg.): Düngung der Kulturpflanzen. Zweite Hälfte. Wien, Österreich: Springer (Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung, 3 / 2), S. 1097–1133.

Anhang

Tab. A.1: Düngung der Sorte Perle am Standort A.

		Kontrolle				Gestreut				Fertigation			
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO
1. Gabe	NPK	50	83	21	17	50	83	21	17	50	83	21	17
2. Gabe	AHL	50				50				50			
3. Gabe - Gestreut	KAS					60							
3. Gabe Fertigation	Krista MAP									3		15	
	AHL									57			
	EPSO Top												20
Ausgleichsdüngung	Kornkali		77		11		77		11		77		11
	Kieserit				20				20				
	Triple Superphosphat			23				23				8	
		100	160	44	48	160	160	44	48	160	160	44	48

Tab. A.2: Düngung der Sorte Herkules am Standort A.

		Kontrolle				Gestreut				Fertigation			
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO
1. Gabe	NPK	70	117	29	23	70	117	29	23	70	117	29	23
2. Gabe	AHL	70				70				70			
3. Gabe - Gestreut	KAS					70							
3. Gabe Fertigation	Krista MAP									3		15	
	AHL									67			
	EPSO Top												23
Ausgleichsdüngung	Kornkali		153		23		153		23		153		23
	Kieserit				35				35				12
	Triple Superphosphat			45				45				30	
		140	270	74	81	210	270	74	81	210	270	74	81

Tab. A.3: Düngung der Sorte Perle am Standort B.

		Kontrolle				Gestreut				Fertigation			
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO
Grunddüngung	Patentkali		69		23		69		23		69		23
1. Gabe	NPK	60	13	13	5	60	13	13	5	60	13	13	5
2. Gabe	AHL	60				60				60			
3. Gabe - Gestreut	KAS					60							
3. Gabe Fertigation	Krista MAP									3		15	
	AHL									57			
	EPSO Top												20
Ausgleichsdüngung	Kornkali		83		12		83		12		83		12
	Kieserit				40				40				20
	Triple Superphosphat			33				33				18	
		120	164	45	80	180	164	45	80	180	164	45	80

Tab. A.4: Düngung der Sorte Herkules am Standort B.

		Kontrolle				Gestreut				Fertigation			
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO
Grunddüngung	Patentkali		69		23		69		23		69		23
1. Gabe	NPK	60	13	13	5	60	13	13	5	60	13	13	5
2. Gabe	AHL	80				80				80			
3. Gabe - Gestreut	KAS					70							
3. Gabe Fertigation	Krista MAP									3		15	
	AHL									67			
	EPSO Top												23
Ausgleichsdüngung	Kornkali		175		26		175		26		175		26
	Kieserit				53				53				30
	Triple Superphosphat			58				58				43	
		140	256	70	107	210	256	70	107	210	256	70	107