

Thema:

**Komparative Analyse der
Bewässerungsverfahren Düsenwagen und
Starkregner zur Bestimmung der jeweiligen
Wasserverluste**

Masterarbeit

im wissenschaftlichen Studiengang Agrarwissenschaften

an der Georg-August-Universität Göttingen

Fakultät für Agrarwissenschaften

Studienrichtung: Nutzpflanzenwissenschaften

Studierender: Jasper Lehn

Matrikelnummer: 27428556

Abgabedatum: 15.12.2025

Erstprüfer: Prof. Dr. Martin Freudiger

Zweitprüferin: Dr. Eva Falge

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	4
2.1 Übersicht der Bewässerungsverfahren	4
2.1.1 Oberflächenbewässerung	5
2.1.2 Beregnung	6
2.1.3 Kreis- und Linearberegnungsverfahren	15
2.1.4 Mikrobewässerung	17
2.2 Methodische Grundlagen	20
2.2.1 Messmethoden der Niederschlagsmenge	20
2.2.2 Empirische Formel zur Berechnung der Evaporation aus meteorologischen und klimatologischen Daten nach Penman	21
2.2.3 Kenngrößen zur Bewertung der Wasserverteilung	23
2.3 Bisherige Forschungsergebnisse zu Wasserverlusten in verschiedenen Beregnungsverfahren	24
3 Material und Methoden	36
3.1 Versuchsstandort und meteorologische Rahmenbedingungen	36
3.2 Beschreibung des Trommelwagens	37
3.3 Beschreibung des Starkregners	38
3.4 Beschreibung des Düsenwagens	39
3.5 Messaufbau und Versuchsdurchführung	40
3.6 Versuchsauswertung	44
4 Ergebnis	48

4.1	Ergebnisse des Starkregners	48
4.1.1	Übersicht über die Versuchsbedingungen	48
4.1.2	Ausgebrachte und gewogene Wassermenge	48
4.1.3	Gemessene Wasserverluste	49
4.1.4	Wasserverteilung über die Arbeitsbreite	50
4.2	Ergebnisse des Düsenwagens	51
4.2.1	Übersicht über die Versuchsbedingungen	51
4.2.2	Ausgebrachte und gewogene Wassermenge	52
4.2.3	Gemessene Wasserverluste	52
4.2.4	Wasserverteilung über die Arbeitsbreite	54
4.3	Ergebnisse der Korrelationsanalyse	55
5	Diskussion	58
5.1	Abdriftverluste	58
5.2	Verdunstung und Verwehung	59
5.3	Bedeutung meteorologischer Einflüsse für beide Systeme	60
5.4	Einordnung der Ergebnisse in den Kontext der Literatur	60
5.4.1	Vergleich mit der Literatur zum Starkregnern	61
5.4.2	Vergleich mit der Literatur zum Düsenwagen	62
5.5	Bewertung der Wasserverteilungsgleichmäßigkeit	63
5.6	Beschränkung der Forschung	65
5.7	Empfehlung für weiterführende Forschung	65
6	Fazit	67
7	Zusammenfassung	69
8	Abstract	70
9	Literaturverzeichnis	71
	Anhang	75
	Eidesstattliche Erklärung	79
	Erklärung zur Nutzung von ChatGPT und vergleichbaren Werkzeugen	80

Abkürzungsverzeichnis

PE-Rohr: Polyethylenrohr

WDEL = Wind Drift and Evaporation Losses

WAE = Water Application Efficiency

CU-Wert: Christiansen Uniformity Coefficient

DU-Wert: Distribution Unity

DWD: Deutscher Wetterdienst

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht der verschiedenen Beregnungsverfahren (Demmel, 2007).....	2
Abb. 2: Aufstellung der Rohrberegnung im Vierecks- (links) und Dreiecksverband (rechts). „a“ beschreibt den Regnerabstand, „b“ den Rohrabstand und „w“ die Wurfweite (Köller und Hensel, 2019).....	7
Abb. 3: Rohrberegnung (links) mit starren Rohren und Rohr-Schlauchberegnung (rechts) mit flexibel aufstellbaren Regnern im Viereckverband (Köller und Hensel, 2019).....	7
Abb. 4: Aufbau einer Rohrtrommelberegnungsmaschine mit Beschriftung der wichtigen Elemente (Köller und Hensel, 2019).	9
Abb. 5: Der Starkregner mit Düse (1), dem Drive-Spoon bzw. Ablenkhebel (2), Sektorbegrenzung (3) und dem Durchflussrohr (4) (verändert nach Nelson (2021)).	10
Abb. 6: Bildliche Darstellung der drei Düsen Taper Bore Düse (1), Taper Ring Düse (2) und Ring Düse (3) (verändert nach Tang und Chen (2022)).	10
Abb. 7: Drei Düsentypen, die sich sowohl in der Strahlbreite, als auch in der Strahlweite unterscheiden (Nelson, 2021).	11
Abb. 8: Drive-Spoon bzw. Ablenkhebel dient der Rotation des Regners und der gleichmäßigeren Wasserverteilung (Tang und Chen, 2022).	11
Abb. 9: Applikationsmenge des Beregnungswassers in mm in Abhängigkeit von der Entfernung vom Regner in m. Die untersuchten Sektorwinkel hatten einen Radius zwischen 180° und 330° (Xu et al., 2025).....	12
Abb. 10: Flugkurve des Beregnungswassers bei unterschiedlichen Ausstoßwinkeln. Das Wasser fliegt unterschiedlich hoch und weit (Nelson, 2021).....	12
Abb. 11: Beregnungsdurchgang vom Starkregner kreisförmig (oben) und vom Düsenwagen starr (unten) (Köller und Hensel, 2019).	13
Abb. 12: Düsenwagen im ausgeklappten Zustand (links) und eine Sprühdüse im Einsatz (rechts) (Köller und Hensel, 2019).	14
Abb. 13: Wesentliche Bestandteile einer Sprühdüse (verändert nach Chen et al. (2020)).	14
Abb. 14: Modell der Kreisberegnungsmaschine (links) und der Linearberegnungsmaschine (rechts) (Köller und Hensel, 2019).	17
Abb. 15: Möglicher Aufbau einer Tropfbewässerung. Hauptbestandteil sind die Kopfstation, die Leitungen und die Bewässerungsapplikatoren (Köller und Hensel, 2019).	18
Abb. 16: Quantitative Messwerte des Niederschlages von Hellmann Messbechern und UBA-Niederschlagsmessern im Vergleich zur tatsächlichen Niederschlagsmenge (Hoffmann et al., 2016).	20

Abb. 17: Eine Strömungssimulation in einem zylindrischen Behälter bei Windgeschwindigkeiten von $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Durch Verwirbelungen im Behälter kommt es zu einem Auftrieb im Inneren des Behälters (Hendawi et al., 2005).	29
Abb. 18: Eine Illustration der Strip-Methode, bei der die WAE der Beregnungsanlage über Auffangrinnen analysiert wird (Sadeghi et al., 2015).	31
Abb. 19: Übersicht der Versuchsfläche mit Beregnungs- und Messpunkten (Eigene Darstellung mit Hilfe von Google (2013)).	36
Abb. 20: Trommelwagen Beinlich Monsun II im Versuchseinsatz (Eigene Aufnahme).	37
Abb. 21: Starkregner Komet Twin 160 Pro im Versuchseinsatz (Eigene Aufnahme).	39
Abb. 22: Düsenwagen der Firma Deierling während des Beregnungseinsatzes (Eigene Aufnahme).	40
Abb. 23: An Düsenwagen installierte Düse mit einem optimalen Druck von 1,0 Bar (Eigene Aufnahme).	40
Abb. 24: Schematischer Aufbau der Messstrecke und der Verdunstungsmessung (verändert nach Hartmann (1992)).	41
Abb. 25: Messbecher zur Erfassung der Beregnungsmenge (Eigene Aufnahme).	42
Abb. 26: Übersicht des Distribution Uniformity der zehn Versuche des Starkregners in Prozent. ..	50
Abb. 27: Übersicht der Christiansen Koeffizienten der zehn Versuche des Starkregners in Prozent.	51
Abb. 28: Übersicht der Distribution Uniformity der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent.	54
Abb. 29: Übersicht der Christiansen Koeffizienten der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent.	54
Abb. 30: Boxplot der Abdriftverluste bei der Beregnung mit dem Starkregner und dem Düsenwagen.	58
Abb. 31: Boxplot der Verdunstung und feinen Verwehungen bei der Beregnung mit dem Starkregner und dem Düsenwagen.	59
Abb. 32: Wasserverteilung des Beregnungssystems Starkregner über die komplette Arbeitsbreite.	64
Abb. 33: Wasserverteilung des Beregnungssystems Düsenwagen über die komplette Arbeitsbreite.	64

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Überblick der zentralen Bewässerungssysteme (Köller und Hensel, 2019).....	4
Tab. 2: Übersicht zentraler Literaturdaten.....	34
Tab. 3: Meteorologische Bedingungen während der zehn Versuchszeiträume des Starkregners	43
Tab. 4: Meteorologische Bedingungen während der zehn Versuchszeiträume des Düsenwagens ...	44
Tab. 5: Übersicht der Wasserverluste durch Verdunstung und feine Verwehungen der zehn Versuche des Starkregners in Prozent	49
Tab. 6: Übersicht der Wasserverluste durch Abdrift aus der Arbeitsbreite der zehn Versuche des Starkregners in Prozent	50
Tab. 7: Übersicht der Wasserverluste durch Verdunstung und feine Verwehungen der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent	53
Tab. 8: Übersicht der Wasserverluste durch Abdrift aus der Arbeitsbreite der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent	53
Tab. 9: Bestimmtheitsmaß R^2 für die Zusammenhänge zwischen meteorologischen Parametern und dem Wasserverlust der verschiedenen Beregnungssysteme	56

1 Einleitung

Wasser stellt eine der grundlegendsten Ressourcen für alle lebenden Organismen dar und übernimmt in der Pflanzenproduktion eine zentrale physiologische Funktion. Es ist maßgeblich an der Photosynthese beteiligt, dient als Transportmedium für Nährstoffe und ist unverzichtbar für die Transpiration, welche wiederum die pflanzliche Kühlung und den Stoffaustausch reguliert (Caemmerer und Baker, 2007). Vor diesem Hintergrund kommt der ausreichenden und effizienten Wasserversorgung von Kulturpflanzen eine entscheidende Bedeutung zu. In Deutschland wurden im Jahr 2021 etwa 506.500 Hektar landwirtschaftlicher Freilandfläche bewässert (Statistisches, Bundesamt 25.10.2021).

Seit dem Jahr 1881 stieg die mittlere Lufttemperatur in Deutschland um etwa 1,5° Celsius an, was weitreichende Veränderungen in den klimatischen Rahmenbedingungen nach sich zog. Mit der Erwärmung ging ein deutlicher Rückgang der Frost- und Eistage einher, während gleichzeitig die Zahl der Sommer- und Hitzetage kontinuierlich zunahm. Diese Entwicklung veränderte nicht nur die Temperaturverteilung über das Jahr, sondern beeinflusste auch die hydrologischen Prozesse maßgeblich. Zwar wird nach aktuellen Erkenntnissen kein allgemeiner Rückgang der jährlichen Niederschlagsmenge erwartet, jedoch führt die erhöhte Lufttemperatur zu einem gesteigerten Potenzial für extreme Niederschlagsereignisse. Die Intensität solcher Ereignisse nimmt zu, während ihre zeitliche Verteilung unregelmäßiger wird. Dadurch verlängern sich Trockenperioden tendenziell, da Niederschläge seltener, punktueller und weniger gleichmäßig auftreten (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2019).

Das Jahr 2018 gilt als Paradebeispiel für ausgeprägte Trockenheit (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2022), wodurch die Bedeutung der Bewässerung für die Sicherung der Erträge und die Produktion qualitativ hochwertiger Lebensmittel weiter zunahm. Ziel einer effizienten Bewässerung ist es, das eingesetzte Wasser möglichst vollständig der Kulturpflanze zukommen zu lassen und Verluste zu minimieren. Wasserverluste entstehen jedoch häufig durch Verdunstung oder Abdrift, die die Effizienz der Bewässerung erheblich reduzieren können. Yazar (1984) identifizierte durchschnittliche Verdunstungsverluste von etwa 5,6 % und Abdriftverluste von rund 5,3 %.

In der landwirtschaftlichen Praxis stehen verschiedene Bewässerungsverfahren zur Verfügung, die sich grundsätzlich in Oberflächenbewässerung, Mikrobewässerung und Beregnung gliedern lassen. Innerhalb der Beregnung existiert eine Vielzahl technischer Systeme, wie in Abb. 1 dargestellt wird.

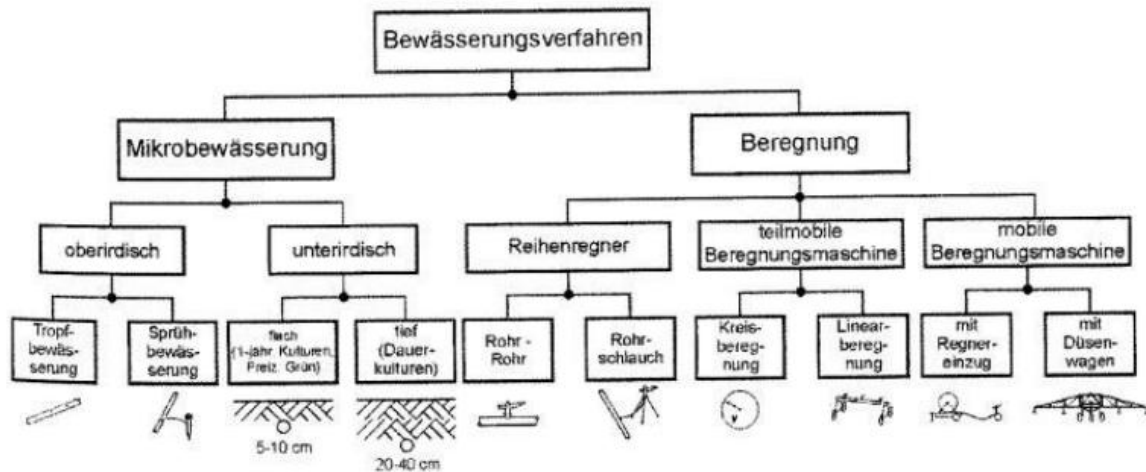


Abb. 1: Übersicht der verschiedenen Beregnungsverfahren (Demmel, 2007)

Diese Arbeit konzentriert sich auf zwei Beregnungsverfahren, die in der landwirtschaftlichen Nutzung Deutschlands besonders verbreitet sind. Dies ist zum einen der Starkregner, in Abb. 1 als Regnereinzug bezeichnet und der Düsenwagen.

Der Regnereinzug, ein Trommelwagen mit aufgewickelter Polyethylenrohr (PE-Rohr), an dessen Ende ein großflächig arbeitender Starkregner montiert ist, stellt in Deutschland das dominierende Beregnungsverfahren dar. Der Starkregner wirft das Wasser über Entfernungen von bis zu 45 m und erreicht durch seine Rotation Arbeitsbreiten von bis zu 90 m. Nach Erhebung von Riedel und Gödeke aus dem Jahr 2022 werden etwa 98 % der bewässerten Freilandflächen in Deutschland mit diesem System beregnet.

Als alternatives System wurde in dieser Arbeit der Düsenwagen untersucht. Am Ende des PE-Rohrs befindet sich statt eines Starkregners ein Fahrgestell mit einem ausklappbaren Auslegerstativ, an dem Wasserrohre mit regelmäßig montierten Sprühdüsen und seitlich ausgerichteten Endregnern angebracht sind. Die Sprühdüsen zeichnen sich durch eine geringe Wurfweite aus, während der gesamte Ausleger Arbeitsbreiten von über 70 m ermöglicht (Köller und Hensel, 2019). Aufgrund der geringen Wurfweiten gelten Düsenwagensysteme als weniger windanfällig und als geeigneter für eine gleichmäßigere und schonendere Bewässerung (Gödeke et al., 2024). Tarjuelo et al. (2000) zeigten, dass der Starkregner im Mittel Wasserverluste von rund 20,7 % aufwies, während die Verluste beim Düsenwagen durchschnittlich bei etwa 13,3 % lagen. Diese Erkenntnisse stützen die zunehmend geführte Diskussion, ob der Düsenwagen langfristig eine effiziente Alternative zum Starkregner darstellen könnte.

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Wassereffizienz der beiden Beregnungssysteme Starkregner und Düsenwagen unter praktischen Feldbedingungen zu untersuchen. Im Mittelpunkt stehen die Analyse der Wasserverluste durch Verdunstung und Abdrift, die Identifikation der

meteorologischen Einflussgrößen auf diese Prozesse sowie die Einordnung der Ergebnisse in die bestehende wissenschaftliche Diskussion über die Zukunft der Berechnungstechnik in Deutschland.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden 20 Feldversuche durchgeführt, jeweils 10 pro Berechnungssystem. Die Versuche fanden Ende August und Anfang September im Jahr 2024 in Braunschweig statt. Das Berechnungswasser wurde in einem definierten Netz aus Regenmessern aufgefangen und anschließend gravimetrisch bestimmt. Diese Methode bietet eine höhere Messgenauigkeit als das rein visuelle Verfahren. Parallel wurden meteorologische Parameter wie Windgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Strahlung erfasst. Anschließend erfolgten eine Analyse der Berechnungseffizienz und eine Korrelationsanalyse, um die Zusammenhänge zwischen den Wasserverlusten und den meteorologischen Einflussfaktoren zu überprüfen.

Die Arbeit gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Kapitel. Zu Beginn wird ein Überblick über die verschiedenen Bewässerungsverfahren gegeben, teilweise ergänzt um deren praktische Vor- und Nachteile, um die Relevanz und die Einsatzbedingungen der Systeme zu verdeutlichen. Darauf folgt eine Einführung in die mathematische Erfassung der Wasserverteilung und eine Erläuterung der Penman- Gleichung, deren Anwendung es ermöglicht, die erwartete Verdunstungsrate mit den gemessenen Wasserverlusten zu vergleichen. Anschließend werden bestehende wissenschaftliche Untersuchungen zu Wasserverlusten verschiedener Berechnungsverfahren vorgestellt, um die Ergebnisse dieser Arbeit fundiert einordnen zu können. Im Anschluss werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die angewandten Methoden der Auswertung detailliert erläutert. Nach der Darstellung der Ergebnisse erfolgt eine Diskussion der Befunde, insbesondere im Hinblick auf potenzielle Einflussfaktoren der Wasserverluste und die Bewertung der Systeme im Kontext der Literatur. Den Abschluss bilden Empfehlungen für weiterführende Forschung sowie ein zusammenfassendes Fazit.

2 Stand des Wissens

2.1 Übersicht der Bewässerungsverfahren

In der Agrarwirtschaft dienen unterschiedliche Bewässerungsverfahren der bestmöglichen Wasserversorgung der Kulturpflanze. Die einzelnen Bewässerungsverfahren unterscheiden sich in der Art und Weise, wie das Wasser zu den Pflanzen geleitet und dort appliziert wird (Köller und Hensel 2019). Die Bewässerungsverfahren müssen sich dabei verschiedenen Umständen wie beispielsweise Kulturpflanze, Wasserverfügbarkeit und ökonomische Ressource anpassen. Nicht jede Bewässerungsart ist universell einsetzbar. Zum Beispiel wäre die Furchenbewässerung für die Getreidebewässerung aufgrund der engen Saatreihe ungeeignet (Achtnich, 1980). Die Eignung eines Bewässerungssystems ist im Wesentlichen vom Wirkungsgrad des Gesamtzuflusses abhängig (Project efficiency). Dieser definiert sich durch die Verluste im Zuleitungs- und Verteilungssystem sowie die Verluste während der eigentlichen Bewässerung. Der Wirkungsgrad des Gesamtzuflusses ist das Produkt dreier Wirkungsgradsegmente. Der Wirkungsgrad der Wasserzuteilung (Water conveyance efficiency) bezieht sich auf die Wasserverluste, die beim Zuleitungssystem bis zum einzelnen Betrieb entstehen. Mit dem Wirkungsgrad des Feldzuflusses (Farm ditch efficiency) werden die Wasserverluste im Verteilungssystem beschrieben. Die Wasserverluste, die während des Bewässerns entstehen, beschreibt der Wirkungsgrad der Wasserverteilung auf der Bewässerungsfläche (Field application efficiency). Um die Wassermenge, die tatsächlich von den Pflanzen im Betrieb genutzt wird und die gesamte Wassermenge, die dem Betrieb zugeleitet wird, ins Verhältnis zu setzen, wird der Wirkungsgrad der Wasserverteilung im gesamten Betrieb (Distribution efficiency) betrachtet (Köller und Hensel, 2019).

Tab. 1: Überblick der zentralen Bewässerungssysteme (Köller und Hensel, 2019)

Oberflächenbewässerung	Beckenbewässerung	
	Furchenbewässerung	
Beregnung	Rohrberegnung	
	Rohrtrommelberegnungsmaschine	mit Regnerwagen
		mit Düsenwagen
	Kreisberegnungsmaschine	
	Linearberegnungsmaschine	
Mikrobewässerung	Überflurbewässerung	
	Unterflurbewässerung	

Die Bewässerungsverfahren können in drei Kategorien eingeteilt werden: Oberflächenbewässerung, Tröpfchenbewässerung und Mikrobewässerung (vgl. Tab. 1).

2.1.1 Oberflächenbewässerung

Die Besonderheit der Oberflächenbewässerung liegt in der unmechanisierten Gestaltung. Das Wasser wird durch die Schwerkraft den Nutzpflanzen zugeführt (Köller und Hensel, 2019). Die Beregnungsmenge definiert sich durch die Wassermenge, mit welcher der Boden überspült wird (Achtnich, 1980). Die Oberflächenbewässerung unterteilt sich wiederum in die Becken- und Furchenbewässerung.

Bei der Beckenbewässerung kommt es zu einem temporären Wasserstau. Das eingeleitete Wasser flutet das gesamte Becken, in dem sich die Nutzpflanzen befinden und staut sich bis zum Ablassen auf (Köller und Hensel 2019). Während das Becken mit dem Wasser gefüllt ist, versickert ein Teil des Beregnungswassers. Dementsprechend ist diese Beregnungsart nur für Böden mit einer langsamen Versickerungsrate und einem großen Wasseraufnahmevermögen geeignet (Achtnich, 1980). Die Größe der Becken kann stark variieren und von wenigen Quadratmetern bis zu mehreren Hektaren reichen (Köller und Hensel, 2019).

Im Gegensatz dazu überflutet das Beregnungswasser in der Furchenbewässerung nicht die Erde der Kulturpflanze sondern wird in Furchen parallel zur Saatreihe geleitet (Köller und Hensel, 2019). Das Wasser versickert durch die Seitenwände in die Erde zu den Pflanzen (Achtnich, 1980). Durch das Anstauen und Versickern des Wassers entsteht die Gefahr der Versalzung. Daher müssen die Furchen regelmäßig ausgewaschen werden (Achtnich, 1980). Diese Beregnungsart bietet sich für Kulturen an, die ohnehin in weiteren Reihen angebaut werden, wie beispielsweise Kartoffeln, Rüben, Mais, Zuckerrohr oder Baumwolle. Der Furchenabstand sollte dabei zwischen 50 und 150 cm liegen und vorzugsweise rund oder parabolisch geformt sein. V-Furchen haben aufgrund der verringerten Oberfläche eine schlechtere Wasserverteilung und eine erhöhte Erosionsgefahr (Achtnich, 1980). Um der Erosion entgegenzuwirken, kann entweder die Fließgeschwindigkeit verringert werden oder der Wasserzulauf nur stoßweise geöffnet werden. Bestenfalls sollte das Wasser auf der kompletten Furche gleichmäßig versickern (Köller und Hensel, 2019).

Die Wassernormierung der gesamten Oberflächenbewässerung geschieht über Kanäle, die durch Gated Pipes oder Siphons reguliert werden (Villalobos und Fereres, 2016). Gated Pipes sind verstellbare Ausläufe von Zuführrohren. Je nach eingestelltem Durchmesser des Zuführrohrs kann mehr oder weniger Wasser zur Beregnung genutzt werden (Köller und Hensel, 2019). Siphons sind bewegliche Heber, die wie eine Art Staudamm den Weg des Wassers verengen und dadurch regulieren (Achtnich, 1980).

Der große Vorteil in diesem Bewässerungsverfahren liegt in dem geringen Kapitaleinsatz. Die Bau- und Betriebskosten sind vergleichsweise niedrig (Achtnich, 1980). Das System ist sehr robust gegenüber verunreinigtem Wasser und Winderosion. Es können keine Motoren oder Schläuche verstopfen und das Wasser kann nicht in der Luft vom Wind erfasst werden. Die Wasserverluste

können unter anderem durch die Evaporation trotzdem die 40 % übersteigen (Köller und Hensel, 2019). Nachteilig macht sich die schlechte Mobilität und die komplizierte Wasserregulierung bemerkbar. Der Anteil der Oberflächenbewässerung ist weltweit mit 80 % am höchsten. In Deutschland ist sie jedoch nur gering vertreten (Köller und Hensel, 2019).

2.1.2 Beregnung

In dem Bewässerungsverfahren der Beregnung wird das Wasser unter Druck regenartig ausgebracht. Dazu gehört ein umfangreiches Equipment wie Motorpumpe, Rohre, Regner und weiteres Zubehör. Der Wirkungsgrad ist höher als bei der Oberflächenbewässerung, jedoch auch vom Regner abhängig (Köller und Hensel, 2019). Eine hohe Temperatur und Wind können die Bewässerung beeinflussen und den Wirkungsgrad verringern (Achtnich, 1980). Außerdem werden bei der Beregnung die Pflanzen oberirdisch vom Wasser benetzt, wodurch sich das Wasser auf der Pflanze sammelt und von dort wieder verdampfen kann, bevor es am Boden ankommt. Dieses Wasser wird Interzeptionswasser genannt (Köller und Hensel, 2019). Um der Evaporation entgegenzuwirken wird empfohlen nachts zu bewässern, da die Erwärmung der Sonneneinstrahlung nicht vorhanden ist und somit keinen Einfluss auf das Regenwasser nehmen kann. Die Wassermengen der Beregnungseinheiten sind variabel einstellbar (Achtnich, 1980), auf schmalen und unförmigen Flächen jedoch schwer umsetzbar (Köller und Hensel, 2019). Weltweit werden nur 11 % der bewässerten Flächen über Beregnungsanlagen versorgt, in Deutschland dominiert dieses System jedoch mit einem Anteil von 90 %. Das Beregnungsverfahren kann auf verschiedene Weisen umgesetzt werden.

Rohrberegnung

Es wird zwischen ortsfester und mobiler Rohrberegnung unterschieden (Köller und Hensel, 2019). Für Kulturen, die einen häufig wiederkehrenden Beregnungszyklus aufweisen oder eine Frostschutzberegnung benötigen, bietet sich die ortsfeste Rohrberegnung an (Villalobos und Fereres, 2016). Die am Feldrand verlaufende Hauptleitung speist die sogenannten Regnerleitungen, die parallel über dem Feld installiert sind. Als Haupt- und Regnerleitung werden in erster Linie verzinkte Stahlrohre oder Aluminiumrohre mit Schnellkuppleranschlüssen verwendet. Das Beregnungssystem kann somit bei Bedarf schnell montiert und demontiert werden. Ein Rohr besitzt eine Länge von 6 m und einen Durchmesser von 2 bis 4 Zoll, also 50 – 100 mm. Der optimale Wasserdruck richtet sich nach der Länge der Regnerleitung, um den nötigen Druck bis zum Ende dieser Regnerleitung garantieren zu können (Köller und Hensel, 2019). Eine Alternative zu den Rohren wären Flachschräuche aus PE, welche leichter in der Handhabung sind, jedoch eine geringere Lebensdauer vorweisen.

Entlang der Regnerleitungen, welche sich über den Pflanzen befinden, werden in bestimmten Abständen Regner installiert. Die Regner bewässern radial um die eigene Achse, welche als Benetzungsfläche bezeichnet wird (Achtnich, 1980). Für eine optimale Wasserverteilung sollten sich

die Benetzungsflächen der Regner überschneiden. Der ideale Abstand zwischen den Regnern und der Wasserdruck wird dem spezifischen Datenblatt entnommen und ist je nach Regnertyp unterschiedlich. Die Wasserverteilung kann selbst innerhalb der Benetzungsfläche variieren und wird von der Wasserverteilkurve beschrieben (Achtnich, 1980). Die üblichen Regnerabstände liegen bei 10 bis 30 m und sollten im Vierecks- oder Dreiecksverband aufgestellt sein (vgl. Abb. 2).

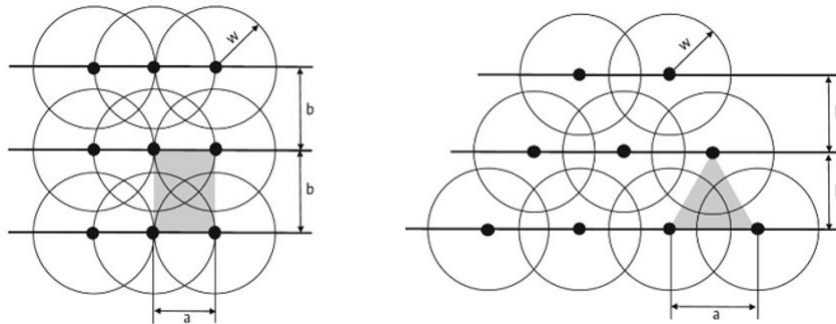


Abb. 2: Aufstellung der Rohrberegnung im Vierecks- (links) und Dreiecksverband (rechts). „a“ beschreibt den Regnerabstand, „b“ den Rohrabstand und „w“ die Wurfweite (Köller und Hensel, 2019).

Die mobile Rohrberegnung bietet den Vorteil das Bewässerungskonstrukt über das Feld verschieben zu können, wenn nicht der gesamte Acker mit dem Rohrberegnungssystem ausgestattet ist.

Eine Alternative gegenüber der Rohrberegnung wäre die Rohrschlauchberegnung. Von den Rohrleitungen werden flexible Schläuche an die Regner angeschlossen. Dies bietet eine größere Anpassungsfähigkeit bei der Aufstellung der Regner (Köller und Hensel, 2019). Das Aufstellbild dieser beiden Beregnungsarten ähnelt sich stark (vgl. Abb. 3).

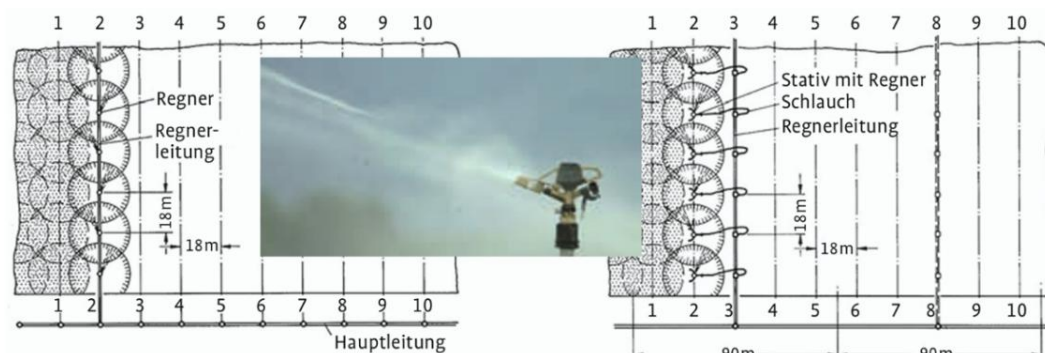


Abb. 3: Rohrberegnung (links) mit starren Rohren und Rohr-Schlauchberegnung (rechts) mit flexibel aufstellbaren Regnern im Viereckverband (Köller und Hensel, 2019).

Die zu verwendenden Regner sind identisch. Sie sind in zwei Arten zu unterteilen. Die Regner mit drehendem Kopf und die Sprühregner (Villalobos und Fereres, 2016).

Regner mit drehendem Kopf drehen sich relativ schnell um die eigene Achse und verteilen so das Wasser gleichmäßig radial um den Mittelpunkt (Achnich, 1980). Sprühregner leiten das Wasser auf eine Platte, wodurch der Regner kreisförmig um sich selbst gedreht wird. Bei der Rohrberegnung werden hauptsächlich Drehstrahlregner eingesetzt, die häufig mit mehreren Düsen ausgestattet sind (Köller und Hensel, 2019).

Die Wurfweite ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben dem Wasserdruck und der Düsenart bestimmt auch der Strahlanstieg wie weit der Wasserradius reicht. Ein steilerer Strahlanstieg führt jedoch auch zu einer größeren Gefahr der Winderosion und somit zur Beeinflussung der Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung. Der Strahlanstieg liegt im Normalfall bei 20 bis 30°. Mit einem Düsendurchmesser von 3 bis 7 mm und einem Wasserdruck von 2 bis 5 Bar werden Wurfweiten von 10 bis 35 Meter erreicht. Die Beregnungsintensität liegt in dem Fall zwischen 2 und 15 mm*h⁻¹ (Köller und Hensel, 2019).

Rohrtrommelberegnungsmaschine

Die Beregnung mit einer Rohrtrommelberegnungsmaschine ist ein mobiles Beregnungsverfahren, welches auf einer Fläche auf- und wieder abgebaut werden kann. Es besteht aus einem Fahrgestell, mit einer drehbaren Rohrhaspel, auf der ein Polyethylenrohr (PE-Rohr) aufgewickelt ist. Das PE-Rohr kann bis zu 1.000 m lang und einen Durchmesser zwischen 50 und 150 mm aufweisen. Am Ende des PE-Rohrs befindet sich der Regnerwagen, der beim Flächenwechsel auch auf dem Fahrgestell befestigt ist. Der Regnerwagen kann mit einem Starkregner oder auch einem Düsenwagen ausgestattet sein (Köller und Hensel, 2019).

Zur Inbetriebnahme wird die Beregnungsmaschine zum Start der Beregnungsfläche gezogen. Das Fahrgestell wird so positioniert, dass der Regnerwagen (vgl. Abb. 3) bis zum Ende der Beregnungsfläche ausgezogen werden kann. Anschließend zieht eine Zugmaschine den Regnerwagen an das Feldende. Das PE-Rohr wird dadurch von der Rohrhaspel abgerollt. Wichtig sind die Stützfüße, die sich im Boden verankern (vgl. Abb. 4). Beim Ein- oder Auszug des Regnerwagens können die Zugkräfte durch beispielsweise Steine oder Löcher, die im Weg sind, sehr hoch werden. Die Stützfüße schützen in dem Fall die Rohrhaspel vor dem Umkippen (Köller und Hensel, 2019).

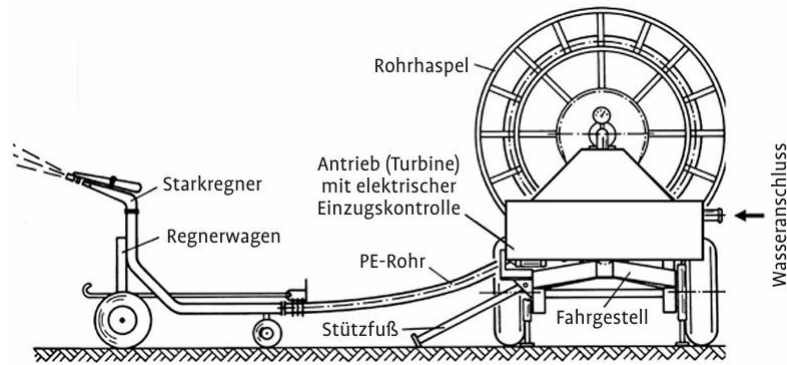


Abb. 4: Aufbau einer Rohrtrommelberechnungsmaschine mit Beschriftung der wichtigen Elemente (Köller und Hensel, 2019).

Die Berechnungsmaschine wird an einen Hydranten bzw. direkt an eine Wasserpumpe angeschlossen. Diese sollte die Berechnungsmaschine mit einem gleichbleibenden Druck mit Wasser versorgen. Das Wasser strömt neben dem PE-Rohr auch durch eine Turbine mit Getriebe, die für den Einzug des Regnerwagens sorgt. Durch das Getriebe kann die Einzugsgeschwindigkeit angepasst werden. Eine Wickelvorrichtung sorgt für das ordentliche Aufwickeln des PE-Rohrs und die Einzugsgeschwindigkeit wird elektronisch über einen Computer kontrolliert. Erreicht der Regnerwagen die Trommel, wird die Bewässerung automatisch abgeschaltet. Die Einzugsgeschwindigkeit bestimmt die Bewässerungsmenge, weshalb eine konstante Geschwindigkeit Voraussetzung für eine gleichmäßige Bewässerung ist (Köller und Hensel, 2019).

Bei gleichbleibendem Druck ist die Arbeitsbreite und die Durchflussmenge der Berechnungsmaschine stetig. Somit bleibt nach der Gleichung (1) (verändert nach Petersen und Tam (2014)) die Einzugsgeschwindigkeit als Variabel, mit der die Bewässerungshöhe angepasst wird .

$$\text{Berechnungsmenge} \left(\frac{L}{m^2} \right) = \frac{\text{Durchflussmenge} \left(\frac{m^3}{h} \right)}{\text{Arbeitsbreite (m)} * \text{Einzugsgeschwindigkeit} \left(\frac{m}{h} \right)} * 1000 \quad (1)$$

In der Praxis wird anhand des Drucks und der Einzugsgeschwindigkeit die dazu passende Berechnungsmenge aus einer Tabelle abgelesen. Diese muss jedoch der Berechnungsmaschine angepasst sein, da Schlauchlänge und Innendurchmesser für die Berechnung von Relevanz sind (Petersen und Tam, 2014).

Regnerwagen mit Starkregner

Der Starkregner besteht aus vier wesentlichen Komponenten. Dies sind die Düse (1), der Drive-Spoon bzw. Ablenkhebel (2), die Sektorbegrenzung (3) und das Durchflussrohr (4) (vgl. Abb. 5). Außerdem kann ein Barometer hilfreich sein, das den genauen Druck am Regner selbst anzeigt.



Abb. 5: Der Starkregner mit Düse (1), dem Drive-Spoon bzw. Ablenkhebel (2), Sektorbegrenzung (3) und dem Durchflussrohr (4) (verändert nach Nelson (2021)).

Die Düse ist austauschbar und den Gegebenheiten anpassbar. Sowohl Größe, als auch Form können angepasst werden. Die Größe unterscheidet sich im Durchmesser und wird in Millimeter angegeben. Die Düsenform wird in drei Bauarten eingeteilt. Die Tapare Bore Düse mit einer durchgehend konischen Düse, die Tapared Ring Düse mit einem innenliegenden konischen Ring und der Ringdüse, in der ein einfacher Ringeinsatz in der Bohrung aufgeführt ist (vgl. Abb. 6) (Petersen und Tam, 2014).



Abb. 6: Bildliche Darstellung der drei Düsen Taper Bore Düse (1), Taper Ring Düse (2) und Ring Düse (3) (verändert nach Tang und Chen (2022)).

Die Düsenform hat einen wesentlichen Einfluss auf den Wasserstrahl, der aus dem Starkregner austritt (Petersen und Tam, 2014). Eine einfache Ringdüse hat einen sehr breiten Wasserstrahl, wobei eine Konusdüse einen dünneren Wasserstrahl produziert. Die Konusdüse weist die maximale Reichweite der drei Düsentypen auf und die Ringdüse die minimale (vgl. Abb. 7).

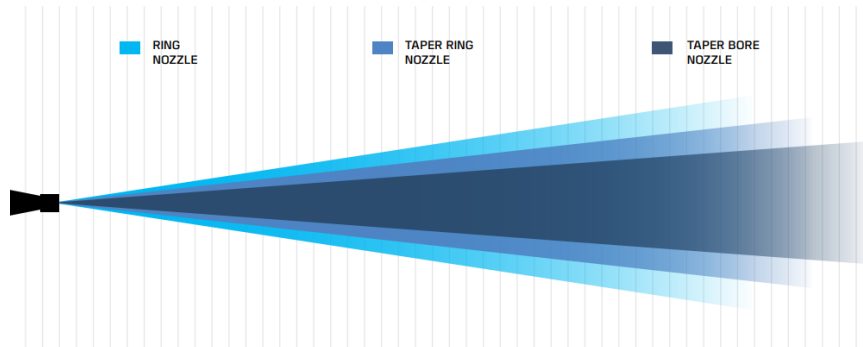


Abb. 7: Drei Düsentypen, die sich sowohl in der Strahlbreite, als auch in der Strahlweite unterscheiden (Nelson, 2021).

Der Drive-Spoon bzw. Ablenkhebel hat eine doppelte Funktion. Zum einen sorgt er für die Rotation des Regners, zum anderen für eine optimalere Wasserverteilung (Tang und Chen, 2022). Er bewegt sich auf und ab, wodurch der Wasserstrahl zyklisch unterbrochen wird (vgl. Abb. 8). Am hinteren Ende befindet sich ein Gewicht, durch das der Ablenkhebel widerkehrend in den Wasserstrahl gedrückt wird. Je nach Positionierung und Wasserdruck wiederholt sich die Unterbrechung schneller oder langsamer (Tang und Chen, 2022).

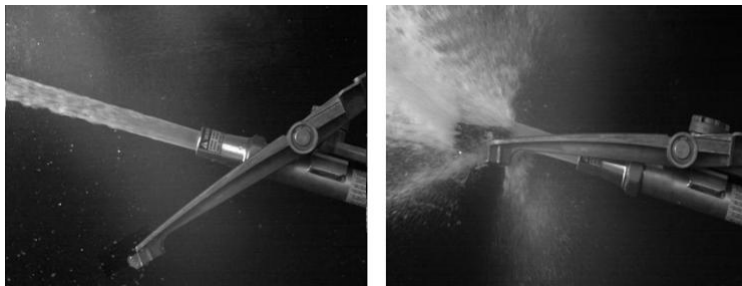


Abb. 8: Drive-Spoon bzw. Ablenkhebel dient der Rotation des Regners und der gleichmäßigeren Wasserverteilung (Tang und Chen, 2022).

Der schräg angesetzte Drive-Spoon greift zyklisch in den Wasserstrahl und überträgt dabei Impulse, die den Regner in eine rotierende Bewegung versetzen. An der Sektorgrenze klappt der Drive-Spoon um und leitet die Rotation in die entgegengesetzte Richtung. Der applizierte Wasserstrahl verteilt sich so kreisförmig um den Aufstellungsort, wobei der Sektorwinkel durch die Sektorbegrenzung definiert wird. Diese kann mechanisch oder elektronisch eingestellt und an Feldränder angepasst werden, indem je nach Position eine Verengung oder Erweiterung des Sektorwinkels erfolgt (Nelson, 2021). Auf diese Weise lassen sich Sektorwinkel zwischen 0° und 360° realisieren. Untersuchungen von Xu et al. (2025) zeigen, dass die Verteilgenauigkeit in Abhängigkeit vom eingestellten Sektorwinkel variiert (vgl. Abb. 9).

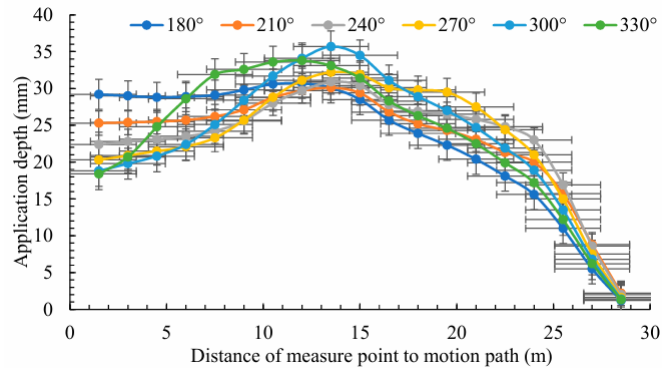


Abb. 9: Applikationsmenge des Beregnungswassers in mm in Abhängigkeit von der Entfernung vom Regner in m. Die untersuchten Sektorwinkel hatten einen Radius zwischen 180° und 330° (Xu et al., 2025).

Die Abb. 9 zeigt, dass die Applikationsmenge mit zunehmender Distanz vom Regner ansteigt und ihr Maximum bei etwa der Hälfte der Wurfweite erreicht wird. Anschließend sinkt die Applikationsmenge bis zur maximalen Reichweite stark ab. Laut Xu et al. (2025) wird bei einer einzelnen Aufstellung mit einem Schwenkwinkel von 240° die höchste Verteilungsgleichmäßigkeit erzielt, ausgedrückt durch den Christiansen Uniformity Coefficient (CU-Wert) von 80 %. Bei mehreren Überfahrten, die parallel nebeneinander durchgeführt werden, kann sich die Applikationsmenge durch Überlappung der Arbeitsbreiten ergänzen und somit den CU-Wert erhöhen. Die höchste Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung erreichte Xu et al. (2025) bei einem Abstand der Überfahrten von dem 1,6-fachen der Wurfweite des Starkregners. Der Sektorwinkel wurde auf 180° beschränkt und erlangte dadurch einen CU-Wert von 95 %.

Der Ausstoßwinkel ist relevant für die Flugkurve des Wassers. Nelson (2021) hat die verschiedenen Flugkurven der unterschiedlichen Ausstoßwinkel graphisch in Abb. 10 dargestellt.

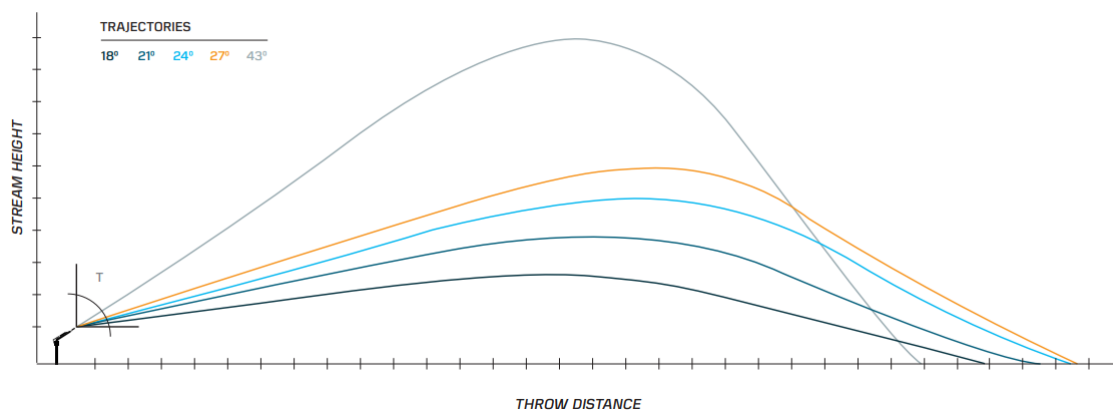


Abb. 10: Flugkurve des Beregnungswassers bei unterschiedlichen Ausstoßwinkeln. Das Wasser fliegt unterschiedlich hoch und weit (Nelson, 2021).

Bei einem Ausstoßwinkel von 18° bis 27° steigt nicht nur die Wurfhöhe, sondern auch die Wurfweite. Ab 43° fliegt das Wasser vergleichsweise am höchsten, geht aber relativ nah am Regner wieder zu Boden. Bei 18° scheint die Flugzeit am kürzesten, was auf ein geringes Potential für Evaporationsverluste schließen lässt. Die maximale Wurfweite wird hingegen bei einem Winkel von 27° erzielt (Nelson, 2021).

Bei der Verwendung des Starkregners werden Durchflussmengen bis zu $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ erreicht. Für eine optimale Beregnung ist ein Betriebsdruck im Bereich von 4 bis 12 Bar erforderlich, womit Wurfweiten bis zu 90 m erzielt wurden (Köller und Hensel, 2019).

Regnerwagen als Düsenwagen

Die Beregnung mit dem Düsenwagen weist zahlreiche Parallelen zur Nutzung eines Starkregners auf. Der Düsenwagen ist durch ein PE-Rohr mit dem Beregnungswagen verbunden. Das PE-Rohr ist wie bei dem Starkregner auf eine Rohrspindel aufgewickelt und wird für den Bewässerungsvorgang über die Fläche ausgezogen. Während des Beregnungsdurchgangs wird der Düsenwagen an dem PE-Rohr langsam wieder eingezogen, um die gesamte Einzugsfläche zu bewässern. Im Gegensatz zum Starkregner erfolgt die Bewässerung nicht radial sondern linear (vgl. Abb. 11) (Köller und Hensel, 2019).

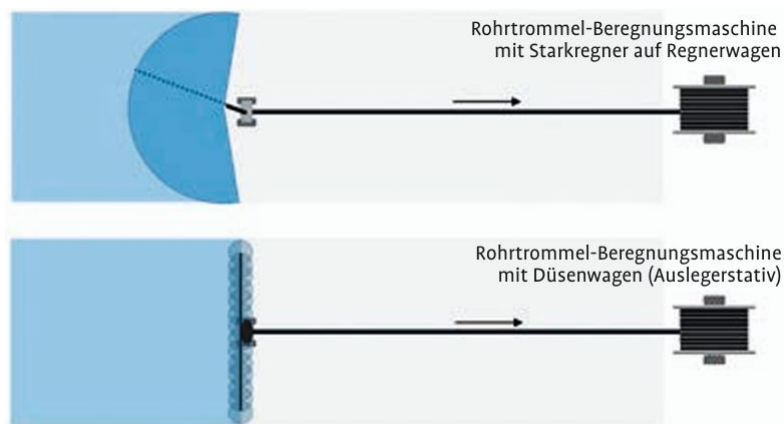


Abb. 11: Beregnungsdurchgang vom Starkregner kreisförmig (oben) und vom Düsenwagen starr (unten) (Köller und Hensel, 2019).

Der Düsenwagen besteht aus einem Fahrgestell und dem darauf montierten Auslegerstativ. Um beispielsweise Keile exakter zu bewässern, kann das Auslegerstativ auf einem Drehkranz montiert sein (Gödeke et al., 2024). Für den Arbeitseinsatz werden Wasserrohre seitlich ausgeklappt, an denen in regelmäßigen Abständen Sprühdüsen montiert sind (vgl. Abb. 12). Im ausgeklappten Zustand kann der Düsenwagen eine Breite von bis zu 50 m haben und durch an den Seiten installierte Endregner Arbeitsbreiten von bis zu 70 m erreichen (Gödeke et al., 2024).



Abb. 12: Düsenvagen im ausgeklappten Zustand (links) und eine Sprühdüse im Einsatz (rechts) (Köller und Hensel, 2019).

Die Sprühdüsen sind an Schläuchen unterhalb der Wasserrohre in einer Höhe von etwa ein bis zwei Metern angebracht (Köller und Hensel, 2019). Im Gegensatz zu den Stark- oder Endregnern haben die Sprühdüsen nur eine geringe Wurfweite sowie einen geringen Wasserdurchfluss. Dies führt jedoch zu einer deutlich geringeren Windanfälligkeit, einer gleichmäßigeren Wasserverteilung und einer schonenderen Bewässerung des Pflanzenbestandes. Durch den niedrigen erforderlichen Betriebsdruck lässt sich zudem eine Energieersparnis von 20 % erzielen. Nachteilig ist allerdings, dass der Arbeitszeitaufwand für Auf- und Abbau im Vergleich zum Starkregner höher ausfällt (Riedel und Gödeke, 2022). Abb. 13 zeigt den Aufbau einer Düse.

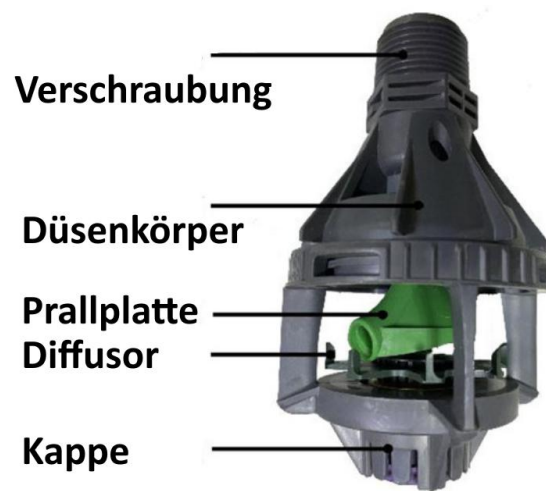


Abb. 13: Wesentliche Bestandteile einer Sprühdüse (verändert nach Chen et al. (2020)).

Die Verschraubung verbindet die Düse mit dem Wassernetz. Der Düsenkörper leitet das Wasser zunächst zur Prallplatte, an welcher der Strahl aufgetrennt wird. Anschließend erfolgt die weitere Zerstäubung und Verteilung des Wassers. Die Kappe hält die Düse zusammen und kann für Reparaturarbeiten an der Düse entfernt werden (Köller und Hensel, 2019).

2.1.3 Kreis- und Linearberechnungsverfahren

Das Berechnungsverfahren der Kreis- und Linearregner werden für Bewässerungsflächen genutzt, die größer als 100 Hektar sind. Die Funktionsweise ist hoch automatisiert und zeichnet sich durch eine gleichmäßige Wasserverteilung aus. Durch die Zugabe von Düngemittel in das Wassersystem kann zeitgleich die Zielpflanze mit Nährstoffen versorgt werden. Dieses Verfahren wird Fertigation genannt. Ähnlich wie bei der Rohrberegnung sind an dem Zuleitungsrohr Sprühdüsen oder Regner installiert, die sich über dem Pflanzenbestand befestigt sind. Das Zuleitungsrohr ist jedoch mobil einsetzbar und kann somit größere Flächen mit Wasser benetzen (Köller und Hensel, 2019).

Kreisberegnungsmaschinen sind mit einem Zentralturm ausgestattet, der als fester Punkt in der Mitte des Beregnungskreises als drehbare Achse fungiert. Dieser feste Punkt ist an die Wasserzuleitung des Beregnungssystems angeschlossen und versorgt die Rohrleitung mit dem benötigten Wasser. Die Wasserrohre werden durch Fahrtürme in der Luft gehalten, wodurch diese mobil über den Acker gefahren werden können. Die Fahrtürme bewegen sich kreisförmig um den Zentralturm herum und bilden so eine runde Beregnungsfläche (vgl. Abb. 14). Die Wasserrohre bestehen aus Stahl oder Aluminium mit Durchmessern von 100 bis 300 mm (Köller und Hensel, 2019).

Der Antrieb der Fahrtürme erfolgt durch Elektromotoren, welche einzeln an jedem Fahrturm montiert sind. Die Stromversorgung erfolgt ebenfalls über den Zentralturm. Da die Beregnungsfläche kreisförmig ist, muss die Fahrgeschwindigkeit des äußersten Fahrturms am schnellsten sein und zum Kreisinernen abnehmen (Achtnich, 1980). Eine abgestimmte Steuerung hält die Fahrtürme so auf einer Linie, wie beispielsweise die häufig genutzte Knicksteuerung, bei der mechanische Schalter genutzt werden, die beim Erreichen bestimmter Winkel zwischen den Fahrtürmen die Elektromotoren starten und stoppen (Köller und Hensel, 2019).

Das Trägergerüst, welches aus Wasserrohr und Stromversorgung besteht, wird Span genannt. Die Länge eines Spans variiert zwischen 30 und 60 m und muss dabei an die Topografie des Geländes angepasst werden, wodurch die Spanlänge auch innerhalb einer Anlage unterschiedlich sein kann. Die einzelnen Wasserrohre sind über Gummimuffen miteinander verbunden und verhindern so, dass Spannungen aufgebaut werden können und Wasserleitungen platzen (Achtnich, 1980).

Die Rotationszeit einer Kreisberegnungsmaschine liegt zwischen 10 und 30 Stunden und wird von der Ackerfläche und der Beregnungsintensität abhängig gemacht. Die minimale Geschwindigkeit begrenzt der äußerste Fahrturm. Um die Rotationszeit zu verlängern werden Pausen zwischen den Bewegungen eingebaut (Köller und Hensel, 2019).

Zur Wasserausbringung werden Sprühdüsen oder Regner verwendet. Im Niederdruckbereich kommen Sprühdüsen, sogenannte LEPA (low energy precision application) zum Einsatz. Diese verwenden einen Wasserdruck zwischen 0,5 und 1,5 Bar und werden in Abständen von 1 bis 3 m am

Span installiert. Sprühdüsen hängen an Schläuchen über dem Pflanzenbestand und verteilen das Wasser mit geringer Wurfweite und großer Tropfengröße. Regner haben eine größere Wurfweite, weswegen ein Installationsabstand von 6 m und ein Wasserdruck zwischen 2,5 bis 5 Bar gewählt werden sollten. Durch den größeren Wasserdruck kommt es jedoch auch zu feineren Tropfen, wodurch sowohl die Energie-, als auch die Wassereffizienz sinkt (Köller und Hensel 2019). Aufgrund des Druckverlustes innerhalb der Wasserleitung zum Kreisäußeren sollte der Abstand zwischen den Regnern oder Sprühdüsen nach außen hin verringert werden um eine gleichmäßige Wasserausbringung zu gewährleisten (Villalobos und Fereres 2016). Durch individuell ansteuerbare Sprühdüsen oder Sprühdüsengruppen können durch Kreisberegnungsmaschinen Sektorberegnungen durchgeführt werden. Die Wassermenge wird in dem Fall an wechselnde Böden oder verschiedene Feldfrüchte angepasst (Köller und Hensel, 2019).

Ein Nachteil der Kreisberegnung ist die ineffiziente Eckbewässerung. Jedoch können verschiedene Systeme diesem Nachteil entgegenwirken. Teilweise werden am Ende des Spans zusätzliche Regner installiert, die in den Ecken gezielt angeschaltet werden, um die unerreichte Ackerfläche zu bewässern. Bei Niederdruckdüsen muss in dem Fall eine Druckerhöhungspumpe zugeschaltet werden. Außerdem können Cornersysteme in die Beregnungsanlage installiert werden. Bei diesem System fährt der äußerste Span im rechten Winkel zu der Kreisberegnungsanlage und wird dann GPS-gesteuert in den Ecken ausgefahren, um diese wassereffizient zu bewässern (Villalobos und Fereres 2016). Durch eine Eckberegnung kann der Flächenanteil der unberegneten Fläche von 21,8 % auf 8,5 % der Fläche verringert werden (Achtnich, 1980).

Linearberegnungsmaschinen sind ebenfalls mit einem mobilen Wasserrohr und Sprühdüsen, bzw. Regnern ausgestattet, jedoch ist die Bewegungsrichtung nicht kreisförmig, sondern linear. Dadurch entstehen rechteckige Bewässerungsfelder. Ein feststehender Zentralturm ist somit nicht möglich (vgl. Abb. 14).

Als Wasserversorgung dient entweder ein zur Beregnungsfläche parallel gezogener Kanal oder Schleppschläuche, welche das mobile Beregnungssystem und die stationäre Wasserzufuhr verbinden. Die Beregnungsfläche ist im Falle der Schleppschläuche an die Länge der Schläuche gebunden. Bei der Wasserversorgung aus dem Kanal hilft eine Schwimmpumpe bei der Wasserbereitstellung. Die Pumpe bleibt in dem Fall dauerhaft parallel zur Beregnungsanlage. Die Fahrtrichtung kann bei beiden Systemen mittels gezogenem Seil, einer gezogenen Furche, Induktionssteuerung oder GPS-basiert erfolgen. Die übliche Fahrgeschwindigkeit liegt zwischen 50 und 250 m*h⁻¹. Ein Dieselgenerator versorgt den Antrieb mit Strom. (Köller und Hensel, 2019).

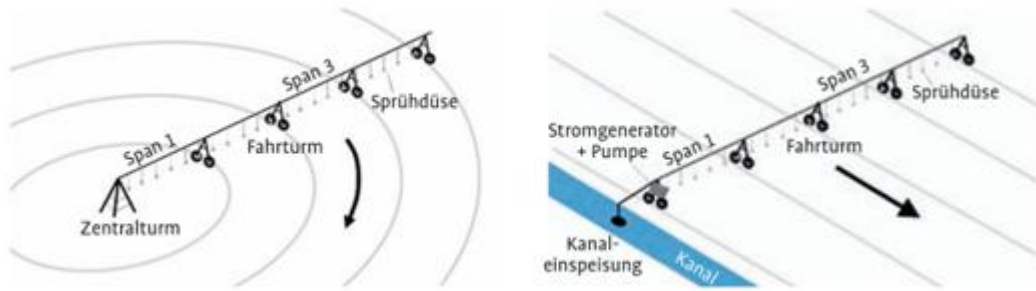


Abb. 14: Modell der Kreisberegnungsmaschine (links) und der Linearberegnungsmaschine (rechts) (Köller und Hensel, 2019).

2.1.4 Mikrobewässerung

Mikrobewässerung bezeichnet alle Bewässerungsverfahren, bei dem das Wasser mit geringem Druck und in kleinen Mengen nur durch Rohrleitungen geführt wird und gezielt an die Pflanze oder an das unmittelbare Umfeld abgegeben wird. Somit ist es gut für die teilflächenspezifische Bewässerung geeignet, bei dem das Wasser bedarfsgerecht an gezielten Stellen intervallweise ausgebracht wird (Villalobos und Fereres, 2016).

Ein wesentlicher Vorteil der Mikrobewässerung ist die Verminderung der Oberflächenerosion (Achnich 1980). Da die Wasserabgabe in so kleinen Mengen durchgeführt wird, kommt es nicht zum Anstau von Wassermengen und dem darauffolgendem Abfluss. Durch diese ideale und maßgeschneiderte Gestaltung der Wasserabgabe wird die Mikrobewässerung als effektivste Bewässerung mit einem Wirkungsgradverlust von weniger als 10 % angesehen. Zusätzlich kann auch die Mikrobewässerung mit der Düngerausbringung kombiniert werden (Achnich, 1980).

Trotz dieser Vorteile sind die Kosten für die Installation der Bewässerungsanlage wesentlich höher als bei anderen Bewässerungstechniken. Besonders auf bewirtschafteten Flächen mit kurzen Fruchtfolgen ist der Auf- und Abbau mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden. Hinzukommt, dass die Systeme bei verunreinigtem Wasser verstopfungsanfällig sind, weswegen die Verwendung eines Filters mit einer Maschenweite von 0,1 mm empfohlen wird, um Fremdkörper vor dem Festsetzen in dem Leitungssystem zu vermeiden (Achnich, 1980).

Zur Applikation werden neben Bubbler und Mikrosprinklern am häufigsten Tropfer in das Beregnungssystem integriert. Sie können entweder in vorgefertigten Abständen von 30 bis 60 cm in das System eingebunden sein oder durch eigenangefertigte Löcher in individuellen Abständen bedarfsgerecht installiert werden (Köller und Hensel, 2019). Um den Wasserdruck zu reduzieren und gleichzeitig eine gleichmäßige Tropfung zu garantieren, sind Fließlabyrinth in den Tropfern verbaut. Wenn es durch Hanglagen oder lange Wasserleitungen zu großen Druckunterschieden kommt, werden Membrane installiert, welche für einen gleichmäßigen Druck in der Wasserleitung

sorgen. Tropfer arbeiten optimal mit einem Wasserdruck zwischen 0,7 und 2 Bar und sollten dabei besonders 4 Bar nicht überschreiten. Außerdem sollten Druckabweichungen von $\pm 0,1$ Bar vermieden werden, um eine gleichmäßige Bewässerung zu sichern. Bei diesen Druckbedingungen variieren die Durchflussraten zwischen 1 und 8 Litern pro Stunde (Achtnich, 1980).

Bubbler sind den Tropfern sehr ähnlich, besitzen aber eine höhere Durchflussrate von 20 bis 50 Litern pro Stunde. Mikrosprinkler bewässern hingegen kreisförmig, mit Durchflussraten von 20 bis 300 Litern pro Stunde. Sie arbeiten mit einem Wasserdruck von 0,7 bis 3 Bar und erreichen damit Wurfweiten von 1 bis 10 m. Da die Mikrosprinkler per Zuführschlauch mit der Wasserleitung verbunden sind, können sie flexibel auf der Fläche umgestellt werden (Köller und Hensel, 2019).

Die Hauptbestandteile der Mikrobewässerung sind die Kopfstation, die Leitungen und die Tropfer (vgl. Abb. 15). Die Kopfstation steuert den im Zuleitungsrohr entstehenden Wasserdruck und den Wasserdurchfluss. Die Wasserfilter sind in der Mikrobewässerung essenziell, um die kleinen Wasserdurchflüsse der Tropfer vor Verstopfung durch Fremdkörper zu schützen. Bei der Planung einer Mikrobewässerung wird zunächst der Wasserverbrauch der zu bewässernden Pflanzen ermittelt, um dadurch Rückschlüsse auf die benötigte Wassermenge, den erforderlichen Rohrdurchmesser und den zu erwartenden Druckverlust zu ermitteln. Hersteller bieten hierfür Diagramme und Tabellen an, um bei der Planung zu unterstützen (Achtnich, 1980).

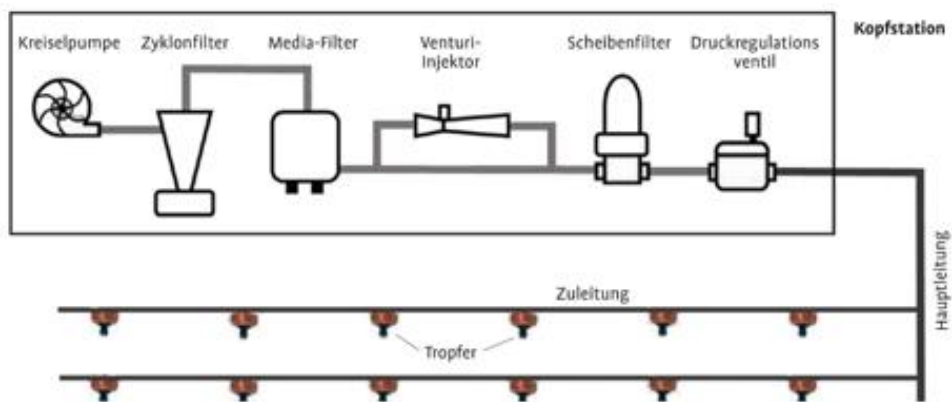


Abb. 15: Möglicher Aufbau einer Tropfbewässerung. Hauptbestandteil sind die Kopfstation, die Leitungen und die Bewässerungsapplikatoren (Köller und Hensel, 2019).

Eine Sonderform der Mikrobewässerung ist die Unterflurbewässerung, bei der das Wasser mit 0,5 bis 8 Litern pro Stunde unterirdisch ausgebracht wird (Villalobos und Fereres, 2016). Unterhalb der Bodenoberfläche kommt es zu verminderter Verdunstung, weswegen die Unterflurbewässerung als wassereffizientestes Bewässerungsverfahren beschrieben wird (Köller und Hensel, 2019). Außerdem wird die Bodenoberfläche nicht beeinflusst und somit Verschlammungen, Verkrustungen und Erosion verhindert (Villalobos und Fereres, 2016). Durch den unterirdischen Aufbau der Bewässerungsanlage ist die Oberfläche frei von Hindernissen, wodurch die mechanisierte

Bearbeitung der Fläche ungestört durchgeführt werden kann und es somit zu keinem Landverlust kommt. Eine fertig installierte Mikrobewässerungsanlage ist hochautomatisiert und bringt keinen hohen Arbeitsaufwand mit sich (Köller und Hensel, 2019).

Allerdings bringt die Mikrobewässerung auch gewisse Herausforderungen. Die Installationskosten für ein unterflur verlegtes Rohrnetz sind im Vergleich zu den anderen Beregnungskosten sehr hoch. Bei salzhaltigem Wasser kommt es zur Salzanreicherung in den oberen Bodenschichten. In dem Fall ist eine zusätzliche Oberflächenbewässerung zur Auswaschung des Salzes unumgänglich. Flachwurzeln Pflanzen können problematisch für die Tropfer sein, da die Wurzeln in die Tropfer einwachsen und somit für Verstopfungen sorgen können (Villalobos und Fereres, 2016). Der Aufwand, die verstopften Tropfer oder Rohre zu reinigen, ist enorm (Köller und Hensel, 2019).

2.2 Methodische Grundlagen

2.2.1 Messmethoden der Niederschlagsmenge

Zur quantitativen Messung von Niederschlägen dienen verschiedene Verfahren und Utensilien. Diese können beispielsweise Lysimeter, Kippwaagen oder Hellmannmessbecher sein, welche die Wassermengen auf unterschiedliche Art und Weise bestimmen. Durch die verschiedenen Berechnungsarten weichen die Ergebnisse unter Umständen voneinander ab (Hoffmann et al., 2016). Lysimeter bestimmen die Niederschlagsmenge sehr exakt. Sie sind außerdem sehr robust gegenüber Wind und Evaporation. Im Vergleich zu anderen Messverfahren sind sie jedoch wesentlich teurer. Kippwaagen sind weniger exakt und weichen stärker von der tatsächlichen Regenmenge ab (Hoffmann et al., 2016). Laut Hoffmann et al. (2016) und Sarwar et al. (2021) ergaben Hellmannmessbecher ähnliche Regenmesswerte wie die Lysimeter. Hoffmann et al. (2016) ermittelten bei einer 14-monatigen Testphase eine Abweichung von 0,7 % zur tatsächlichen Regenmenge. Werden die Monate jedoch separat betrachtet, entsteht dieser präzise Messwert durch eine Kombination aus Unter- und Überschätzung (vgl. Abb. 16).

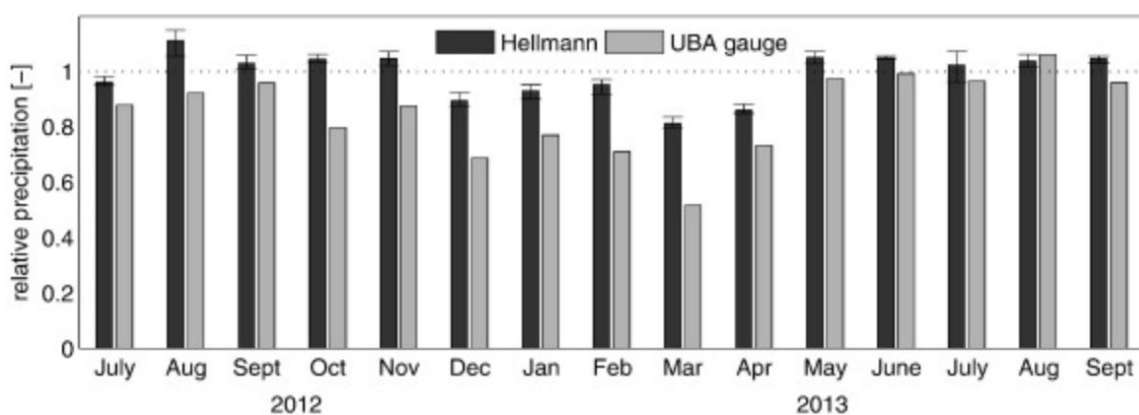


Abb. 16: Quantitative Messwerte des Niederschlages von Hellmann Messbechern und UBA-Niederschlagsmessern im Vergleich zur tatsächlichen Niederschlagsmenge (Hoffmann et al., 2016).

Vor allem in den Sommermonaten kommt es zu einer Überschätzung der Niederschlagsmenge, wobei es in den Wintermonaten eher zu einer Unterschätzung kommt. Laut Pollock et al. (2018) hängt die Messungenauigkeit von der Form und der angebrachten Höhe des Messgerätes ab. Regenmesser die aerodynamischer gestaltet sind, haben eine höhere Messgenauigkeit. Außerdem kann je nach Windbedingungen eine Steigerung der Messhöhe um einen Meter das Ergebnis um mehr als 5 % variieren. Messgeräte, die sich dichter an der Erdoberfläche befinden, sind windgeschützter und messen genauere Niederschlagswerte (Duchon und Essenberg, 2001). Dies ist neben der Windstärke jedoch auch von der Tropfengröße abhängig (Sieck et al., 2007).

2.2.2 Empirische Formel zur Berechnung der Evaporation aus meteorologischen und klimatologischen Daten nach Penman

Durch die Penmanformel wird die Evaporation aus rein physikalischen Werten errechnet (Schrödter, 1985). Die Formel wurde für die Verdunstungswerte von freien Wasserflächen oder kurz gehaltenen Grasflächen entwickelt. Sie gilt als ausgereifteste Methode für die Evaporationsberechnung, besonders bei der Berechnung von kürzeren Zeitabschnitten und gilt als Basis für die modellmäßige Behandlung des Verdunstungsprozesses im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine Vielzahl meteorologischer Parameter in die Berechnung einfließt, was den Rechenaufwand erheblich erhöht. Nicht zugängliche Daten können durch Faustwerte tabellarisch abgeschätzt werden, wodurch die Formel auch bei geringem Datenbestand genutzt werden kann. Darunter leidet die Genauigkeit der Aussagekraft, weswegen sich die Penmanformel in dem Fall nicht mehr von anderen unterscheidet. Dann wird häufig eine andere Formel mit geringerem Rechenaufwand gewählt (Schrödter, 1985). Rohdaten werden von der Temperatur in Grad Celsius, der Windgeschwindigkeit in Kilometer pro Tag, der Luftfeuchtigkeit in Prozent, dem Luftdruck in Kilopascal, der Strahlung in Joule pro Quadratcentimeter und den Höhenmetern benötigt.

Für die vorliegende Arbeit ist das Verständnis der Penmanformel von Bedeutung, da sie eine etablierte Referenzgröße für klimatisch bedingte Wasserverluste darstellt (Schrödter, 1985). Sie ermöglicht es, die experimentell ermittelten Wasserverluste der Berechnungsverfahren ins Verhältnis zur theoretischen Verdunstungsrate zu setzen. Außerdem lassen sich durch das Verständnis der Formel Rückschlüsse auf hohe oder niedrigere Verdunstungsraten ziehen.

Die Penmanformel setzt sich aus folgenden Variablen zusammen (Gl. (2)):

$$ET_g = (W * R_n + (1 - W) * f(u) * (E - e)) * C \quad (2)$$

- ET_g = Grundwert des Wasserverbrauchs ($\text{mm} \cdot \text{Tag}^{-1}$)
- W = Faktor, abhängig von Temperatur und Höhenlage
- R_n = Netto-Strahlung, umgerechnet in äquivalent Verdunstung ($\text{mm} \cdot \text{Tag}^{-1}$)
- $F(u)$ = Funktion, abhängig vom Wind
- $(E - e)$ = Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck E bei mittlerer Lufttemperatur und dem aktuellen gemessenen Dampfdruck e (mbar)
- C = C-Faktor korrigiert den berechneten Grundwert des Wasserverbrauchs

Um den strahlungsgetriebenen Ansatz der Verdunstung zu berechnen, muss die temperaturspezifische Steigung der Kurve des Sättigungsdefizits Δ und die Psychrometerkonstante γ berücksichtigt werden (Gl.(3)).

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

Dieser wird in der Literatur als Faktor W bezeichnet. Durch die Bestimmung der Temperatur und der Höhenmeter kann der W-Wert auch tabellarisch abgelesen werden (vgl. Schrödter (1985, S. 183)).

Die Nettostrahlung R_n ergibt sich aus der Differenz der Einstrahlung und der reflektierten Strahlung (Gl. (4)). Die Sonne sendet hauptsächlich kurzwellige Strahlung, von der ein Teil von der Erde reflektiert wird. Die aufgenommene Energie wird von der Erde als langwellige Wärmestrahlung wieder abgegeben (Achtlich, 1980). Es werden also weniger langwellige und mehr kurzwellige Strahlen von der Erde aufgenommen, als abgegeben. Die Bilanz der kurzwelligen Strahlung (R_{ns}) ist positiv und die der langwelligen Strahlung (R_{nl}) ist negativ. Die Differenz beider Komponenten ergibt die Netto-Strahlung.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4)$$

Bei fehlenden Messdaten kann die Globalstrahlung und Reflektion R_{ns} mithilfe der extraterrestrischen Strahlung R_a , der tatsächlichen zur maximalen Sonnenscheindauer $\frac{n}{N}$ und dem Reflektionskoeffizienten α der betreffenden Oberfläche geschätzt werden (Gl. (5)):

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * \left(0,2 + 0,5 * \frac{n}{N}\right) * R_a \quad (5)$$

Die langwellige Netto-Strahlung (Gl. (6)) wird aus Temperatur T_m (Gl. (7)), dem Dampfdruck, der Luft e (Gl. (8)) und dem Sonnenscheindauerverhältnis bestimmt (Gl.(9)):

$$R_{nl} = f(T) * f(e) * f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (6)$$

$$f(T) = 1,98 * 10^{-9} * (273 + T_m)^4 \quad (7)$$

$$f(e) = 0,34 - 0,044\sqrt{e} \quad (8)$$

$$f\left(\frac{n}{N}\right) = 0,1 + 0,9 * \frac{n}{N} \quad (9)$$

Die Windfunktion wird gemäß folgender Beschreibung definiert, wobei die Windgeschwindigkeit u in der Einheit km/Tag auf einer Höhe von 2 m angegeben wird (Gl. (10)):

$$f(u) = 0,27 * \left(1 + \frac{u}{100}\right) \quad (10)$$

Die Berechnung der täglichen Verdunstungsmenge basiert auf verschiedenen Einflussfaktoren. Zu diesen zählen die variierende Tageslänge, die Unterschiede der Windverhältnisse zwischen Tag und Nacht sowie die Schwankungen der Luftfeuchtigkeit. Zur Reduktion der Unsicherheiten wird ein Korrekturfaktor C eingeführt, welcher den berechneten Grundwert des Wasserverbrauchs (ET_g) an die spezifischen klimatischen Bedingungen anpasst. Dieser Faktor wird global durch die relative

Luftfeuchtigkeit der Region, das klimatische Verhältnis von Tag- und Nachtbedingungen, die Windgeschwindigkeit sowie die Globalstrahlung bestimmt. Für Mitteleuropa kann die Berechnung des C-Faktors vereinfacht werden, indem nur die Windgeschwindigkeit in Beaufort (bft) und die Globalstrahlung (R_s) berücksichtigt werden (Gl. (11)):

$$c = 0,79 - 0,034 * Um + 0,028 * Rs \quad (11)$$

2.2.3 Kenngrößen zur Bewertung der Wasserverteilung

Christiansen Koeffizient (CU)

Der von Christiansen im Jahr 1942 eingeführte Christiansen Koeffizient bildet eine zentrale methodische Grundlage (vgl. (12)) für die moderne Analyse von Beregnungssystemen (J. E. Christiansen, 1942). Mit der Entwicklung dieser Kenngröße legte Christiansen den ersten systematischen Ansatz vor, um die Gleichmäßigkeit von Bewässerungsverteilungen rechnerisch zu erfassen und zwischen verschiedenen Systemen vergleichen zu können.

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |x|}{n * m} \right) \quad (12)$$

Der Christiansen Koeffizient basiert auf einer Auswertung der Niederschlagsmengen, die in einem Raster von Regenmessern erfasst werden. Zunächst wird aus allen Messwerten der Mittelwert m der Wasserhöhen berechnet und als Referenzgröße herangezogen. Dieser Mittelwert stellt die durchschnittliche Niederschlagsmenge dar, mit der alle weiteren Beobachtungen verglichen werden. Für jeden einzelnen Messpunkt wird anschließend die Abweichung x des gemessenen Wertes vom Mittelwert bestimmt. Dazu wird die Differenz zwischen der gemessenen Wasserenge und dem Mittelwert berechnet. Da es für die Bewertung der Gleichmäßigkeit allein auf die absolute Abweichung ankommt, wird der Betrag dieser Differenz verwendet, sodass weder positive noch negative Abweichung unterschiedlich gewichtet werden.

Alle absoluten Abweichungen werden im nächsten Schritt aufaddiert. Eine hohe Summe weist dabei auf deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten hin und signalisiert eine ungleichmäßige Wasserverteilung. Ergänzend wird die Anzahl der verwendeten Messpunkte n berücksichtigt. Aus diesen Größen wird schließlich der Christiansen Koeffizient als Prozentwert berechnet. Ein Wert von einhundert Prozent würde einer vollkommen gleichmäßigen Wasserverteilung entsprechen, während niedrigere Werte auf zunehmende Abweichungen vom Mittelwert hinweisen (J. E. Christiansen, 1942).

Distribution Uniformity (DU)

Im Unterschied zum Christiansen Koeffizienten bezieht sich die Distribution Uniformity spezifisch auf das am schwächsten bewässerte Viertel der Messpunkte. Damit wird gezielt bewertet, wie groß die Abweichungen der niedrigsten Wassermengen im Verhältnis zum Mittelwert aller Messpunkte

sind. Die Kenngröße beschreibt somit, wie ungleich die Wasserapplikation in den am schlechtesten versorgten Bereichen ausfällt und in welchem Umfang diese Zonen gegenüber dem Gesamtniveau benachteiligt sind. Die Distribution Uniformity beantwortet daher unmittelbar die Frage, wie schlecht der am wenigsten bewässerte Bereich eines Bestandes tatsächlich versorgt wird.

Die Berechnung erfolgt anhand folgender Formel (13):

$$DU = 100 \frac{\text{avarage low – quarter depth of water received}}{\text{avarage depth of water reveived}} \quad (13)$$

Der Begriff avarage low quarter depth bezeichnet den Durchschnitt der niedrigsten fünfundzwanzig Prozent der gemessenen Wassermengen. Dieser Teilbereich repräsentiert die flächenmäßig am schwächsten versorgten Zonen und erlaubt eine direkte Bewertung des potenziellen Bewässerungsdefizits innerhalb des Bestandes. Der Wert avarage depth beschreibt hingegen den Gesamtdurchschnitt aller Messpunkte und bildet die gesamte applizierte Wassermenge ab.

In der Formel (15) werden beide Werte ins Verhältnis gesetzt. Je näher die durchschnittliche Niederschlagsmenge des niedrigsten Viertels am Gesamtdurchschnitt liegt, desto gleichmäßiger ist die Verteilung der Beregnung über die gesamte Arbeitsbreite. Eine geringe Differenz zwischen beiden Kennwerten weist folglich auf eine homogene Wasserverteilung hin, während große Abweichungen auf deutliche Unterversorgung einzelner Bereiche schließen lassen. Für die Darstellung des Distribution Uniformity als Prozentwert wird der Quotient abschließend mit einhundert multipliziert (Keller und Bliesner, 1990).

2.3 Bisherige Forschungsergebnisse zu Wasserverlusten in verschiedenen Beregnungsverfahren

Zur Planung neuer Beregnungsversuche und Einschätzung der möglichen Herausforderungen, Problematiken und der auftretenden Wasserverluste bieten Erkenntnisse aus der Fachliteratur unerlässliche Informationen. Die Ermittlung von Verdunstungs- und Driftverlusten basiert in der Literatur überwiegend auf experimentellen Untersuchungen. Ergänzend dazu erklärten einige Autoren auf Grundlage von Modellen aus bestehenden wissenschaftlichen Studien und daraus bestimmten Formeln die Größenordnung des Wasserverlustes. Trotz der detaillierten Datenauswertung ist eine direkte Vergleichbarkeit der Versuche aufgrund der heterogenen Auswahl der Messbecher nur eingeschränkt möglich (Hartmann, 1992).

Im Rahmen der Dissertation von Hartmann (1992) wurde der Wasserverlust bei der Anwendung von Starkregnern, herkömmlich Kanone genannt, mit mobilen Beregnungsmaschinen untersucht. Die Zielsetzung war die direkten und indirekten Wasserverluste systematisch zu erfassen, zu quantifizieren und hinsichtlich ihrer Ursachen zu analysieren. Die 31 Feldversuche wurden auf einer Dauergrünlandfläche in Braunschweig während der Monate Mai bis Oktober durchgeführt. Zum Einsatz kam eine Beregnungsmaschine des Typs Aquamat III mit einem Nelson SR 150-

Großflächenregners. Dieser war mit einer 27,4 mm Ringdüse ausgestattet und hatte einen festverbauten Strahlanstieg von 24°. Der Regnerdruck lag bei konstanten 4,0 Bar und die Einzugs geschwindigkeit betrug $28 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Diese Parameter wurden regelmäßig überprüft. Das Polyethylenzuleitungsrohr war 300 m lang und hatte einen Außendurchmesser von 110 mm bei einer Wandstärke von 10 mm, wodurch dem Wasser ein Durchmesser von 100 mm blieb. Die Maschine verfügte über eine elektronische Einzugsregelung, was zu einer gleichmäßigen Wasserverteilung entlang der Einzugsrichtung beiträgt. In der Wasserleitung zur Regenmaschine wurden drei geeichte Wasseruhren und ein Druckschreiber installiert. Es wurde mit einem Wasserdurchfluss von 40 m^3 pro Stunde berechnet. Die Wassertemperatur wurde in jedem Versuch 45 min nach Versuchsbeginn gemessen.

Zur Ermittlung der Beregnungshöhe wurde ein linearer Messstreifen rechtwinklig zur Einzugsrichtung aufgebaut, auf dem über 100 standardisierte, weiß lackierte Messbecher aus Weißblech mit einem Querschnitt von $76,4 \text{ cm}^2$ in einem Meter Abstand aufgestellt wurden. Die Becherfarbe wurde bewusst gewählt, um der Bechererwärmung und damit der verfälschenden Evaporation entgegen zu wirken. Die Becher hatten eine Höhe von 148 mm, eine Breite von 98,63 mm und wurden 270 mm über dem Boden aufgestellt. Für eine genaue Auswertung wurden die Becher nummeriert und auf 2 Nachkommastellen genau gewogen. Die aufgefangenen Niederschlagsmengen wurden direkt nach Beendigung des Beregnungsversuches gravimetrisch mittels einer hochauflösenden elektronischen Laborwaage bestimmt. Um die während der Messzeit bedingten Fehler durch Evaporation zu minimieren, wurden außerhalb des Versuchsfeldes fünf wassergefüllte Messbecher zur Bestimmung der Becherverdunstung aufgestellt. Die zeitliche Verdunstungsrate wurde mathematisch ermittelt und auf die Versuchsbecher angewandt, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgelesen wurden und an unterschiedlichen Standorten standen.

Um einen Bezug der Wasserverluste zu den meteorologischen Gegebenheiten ziehen zu können, wurden diese durch verschiedene Geräte gemessen. Ein Windschreiber zeichnete die Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 2 m Höhe auf. Ein Haarhygrograf stand 14 m von der Mitte der Messstrecke entfernt und 0,6 m über dem Boden und erfasste die relative Luftfeuchtigkeit auf der Beregnungsfläche. Außerdem maß eine Forschungsstelle, die 750 m außerhalb der Beregnungsfläche steht, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur im Viertelstundentakt. Als Identifikation der meteorologischen Messwerte galt der Zeitraum zur Hauptberegnung, was 70 % der rechnerisch maximalen Benetzungsdauer entspricht.

Die direkten Wasserverluste durch Evaporation und Abwehung wurden über die Differenz des gemessenen Brutto- und Nettowasserverbrauchs ermittelt. Während das Bruttovolumen durch die drei in Serie geschalteten Wasserzähler erfasst wurde, konnte das Nettovolumen aus der Summe der

im Feld gemessenen Einzelvolumina berechnet werden. Neben der Verdunstung wurden auch Störgrößen wie Haftwasser an Bechern oder natürliche Niederschläge berücksichtigt und korrigiert.

Zur Bestimmung der indirekten Verluste durch ungleichförmige Wasserverteilung wurden die gemessenen Beregnungshöhen zusätzlich zur Berechnung des CU-Werts herangezogen. Dazu wurden die Einzelprofile durch Überlappung miteinander verrechnet, um die praxisnahe Wasserverteilung bei verschiedenen Arbeitsbreiten von 45-85 m zu simulieren.

Mithilfe der Ergebnisse der direkten Wasserverluste, den Werten des Sättigungsdefizites und der mittleren Windgeschwindigkeit wurde ein Modell zur Bestimmung der Wasserverluste formuliert. Da die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit nicht gleichförmig wechseln, wurden die gemessenen Wasserverluste drei Windgeschwindigkeitsklassen zugeordnet (Klasse 1: 0-1,5 m*s⁻¹; Klasse 2: 1,5-4,5 m*s⁻¹ und Klasse 3: 4,5-6 m*s⁻¹). Entwickelt wurde ein Modell, welches die direkten Beregnungsverluste unter Beachtung der meteorologischen Parameter bilanziert (Gl. (14)):

$$LB (\%) = 1885 + k_i + 0,545 * E_{def} \quad (14)$$

LB beschreibt die direkten Beregnungsverluste in Prozent. Für k_i muss eine Windkonstante eingegeben werden und für E_{def} das Sättigungsdefizit.

Die berechneten Beregnungsverluste bei Windstille und geringem Sättigungsdefizit gehen nahe 0. Dies bestätigt auch ein Beregnungsversuch unter diesen Bedingungen, welcher die Abhängigkeit der Verluste vom Sättigungsdefizit und der Windgeschwindigkeit bestätigt. Die gemessenen Verluste reichen in den gesamten Versuchen von -2,08 % bis 14,41 %. Ein negativer Verlust wäre theoretisch ein Gewinn, jedoch wird davon ausgegangen, dass dieser Wert der hohen Streuung der Messwerte im Versuch geschuldet ist. Der Wasserverlust von 14,41 % entstand bei den höchsten gemessenen Windgeschwindigkeiten von 5,61 m*s⁻¹ und einem Sättigungsdefizit von 4,79 mbar. Bei dem Versuch mit dem höchsten Sättigungsdefizit von 17,65 mbar und Windgeschwindigkeiten von 1,52 m*s⁻¹ entstand der zweithöchst gemessene Wasserverlust von 13,3 %. Generell wird empfohlen bei Windgeschwindigkeiten von über 3 m*s⁻¹ die Beregnung abzustellen, um extreme Wasserverluste zu vermeiden.

Playán et al. (2005) führte einen ähnlichen Bewässerungsversuch in Zaragoza, Spanien durch.

Zunächst verglich Playán et al. (2005) Modelle zur Bestimmung der Wasserverluste während des Beregnungsdurchganges von anderen Autoren. Dabei wurde festgestellt, dass die meisten bestätigten meteorologischen Einflüsse auf den Windabdrift und die Evaporation (WDEL) die Windgeschwindigkeit, die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck sind. Der Windgeschwindigkeit wurde am meisten Bedeutung zugeschrieben.

Bei dem Beregnungsversuch wurden zwei Regnertypen verwendet. Eine festinstallierte Rohrberegnungsanlage und eine mobile Linearberegnungsanlage. Für beide Systeme wurden meteorologische Stationen aufgebaut, welche die Windgeschwindigkeiten und die Windrichtung in 2 m Höhe und die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in 1,5 m Höhe alle 5 min dokumentierten. Andere meteorologische Daten, wie die Sonneneinstrahlung in 2 m Höhe sowie die Nettostrahlung und der Bodenwärmefluss werden nur alle 30 min festgehalten.

Zur Erfassung der Niederschlagsverteilung und -menge wurden Regenmessbecher verwendet. Unter der stationären Beregnungsanlage, bei welcher die Düsen in einem 15 x 15 m Netz verteilt sind, wurden 25 Messpunkte im 3 x 3 m Netz festgelegt. An jedem Messpunkt wurden drei verschieden große Messbecher platziert. Die unteren 145 mm der Messbecher waren bei allen drei Größen konisch und die oberen 30 mm zylindrisch. Lediglich die Öffnungsbreite war unterschiedlich. Beim Kleineren waren es 79 mm, beim Mittleren 130 mm und der Größte hatte eine Öffnung von 210 mm. Bei der mobilen Anlage wurden 72 von den kleinen Regenmessern in einer Matrix von drei Reihen mit jeweils 24 Gefäßen im Abstand von 1 x 1 m aufgestellt.

Auf der festinstallierten Beregnungsmaschine waren zwei Düsentypen mit einem Durchmesser von 4,4 mm und 2,4 mm verbaut. Diese waren in einem Gitternetz von 15 x 15 m installiert und befanden sich 2 m über dem Bestand. Der Wasserdruck an den Düsen betrug 3,8 Bar und die Beregnungsmenge $8,3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Die mobile Beregnungsanlage war mit dem Düsentyp Nelson R3000 Rotator ausgestattet, welcher einen Durchmesser von 6,7 mm hatte und 2,05 m über dem Bestand hing. Bei dieser Beregnung wurde lediglich ein Wasserdruck von 1,4 Bar angewendet.

Ähnlich wie bei Hartmann (1992) wurden bei dem Versuch von Playán et al. (2005) gefüllte Messbecher aufgestellt, die Hinweise zur Wasserverdunstung während des Beregnungsdurchgangs geben sollten. Diese wurden jedoch nicht parallel zum Versuchsdurchgang, sondern auf einer vorher beregneten Fläche aufgestellt und regelmäßig mit Wasser besprüht, um die Beregnungsbedingungen zu imitieren. Diese Verdunstungsmenge wurde als Obergrenze der Evaporationsverluste angenommen, da die Bedingungen härter als im Versuch selbst waren. Der Evaporationsverlust wurde gravimetrisch gemessen.

Insgesamt wurden 89 Versuche durchgeführt, 37 mit der festinstallierten Beregnungsmaschine (19 nachts und 18 tagsüber) und 52 mit der beweglichen Maschine (21 nachts und 31 tagsüber). Die Dauer eines Beregnungsvorganges betrug jeweils eine Stunde. Zur Bestimmung der prozentualen Wasserverluste der festen Beregnungsstation wurde folgende Formel genutzt (Gl. (15)):

$$WDEL = \frac{q_{ss}^t - 9 \sum_{i=1}^{25} z_i}{q_{ss}^t} \quad (15)$$

q_{ss}^t beschreibt die Menge an ausgebrachtem Wasser und z_i ist die Summe des aufgefangenen Wassers. Die 9 repräsentiert die Menge an Quadratmeter, die über die Messbecher abgedeckt wird. Dementsprechend wird die Formel für die mobile Berechnungsanlage angepasst.

Playán et al. (2005) stellten fest, dass der WDEL für die stationäre Berechnungsanlage tagsüber bei 15,4 % und nachts bei 8,5 % liegt. Der WDEL der beweglichen Berechnungsanlage entspricht tagsüber 9,8 % und nachts 5 %. Dementsprechend liegt der WDEL nachts ca. 50% niedriger als tagsüber. Bei der Korrelation der meteorologischen Daten mit den WDEL zeigt sich, dass die Windgeschwindigkeit den stärksten Zusammenhang mit den Wasserverlusten hat. Die Korrelation mit der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit oder der Strahlung scheint eher gering. Außerdem zeigt der Vergleich der Messbechergrößen, dass Gefäße mit einer kleineren Öffnung (79 mm) ab einer Windgeschwindigkeit von $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zu einer systematischen Überschätzung der Wasserverluste neigt. Die Verdunstungsverluste während der Versuchsdurchführung wurden auf 0,5 % geschätzt.

Silva (2006) untersuchte den Einfluss der Aufprallplatten auf den Wasserverlust. Dafür wurde eine grobe und eine glatte Aufprallplatte in Beregnungsversuchen auf den Wasserverlust geprüft. Als Beregnungsmaschine diente eine 30 m Center-Pivot Anlage mit 1,4 Bar und einem Düsenabstand von 1,5 m. Die Düsengröße variierte von 2,75 bis 6 mm. Die Beregnungsversuche mit der glatten Platte wurden mit 111 bis $125 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ durchgeführt und die der groben Platte mit 99 bis $116 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Die Beregnungsmenge betrug bei allen Versuchen 12,1 mm. Die Messung des aufgefangenen Wassers wurde durch Catch Cans durchgeführt, die im Abstand von 3 m zueinander aufgestellt wurden. Während des Versuches wurde die Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur gemessen, in welcher Frequenz wird jedoch nicht beschrieben. Silva (2006) misst einen durchschnittlichen Wasserverlust von 20,6 % bei der glatten Oberfläche und 12,8 % bei der rauen Plattenoberfläche. Es wird festgestellt, dass die Tropfen der feinen Platte wesentlich feiner sind, als die der groben Platte. Dies wird aber nicht als Hauptursache des Wasserverlustes gedeutet. Hauptsächlich ist die Windgeschwindigkeit und Windrichtung entscheidend. Die feinen Wassertropfen sind stärker anfällig für den Einfluss des Windes. Der Vorteil besteht jedoch in der besseren Verteilgenauigkeit. Ob die Wasserverdunstung während der Versuchsdurchführung aus den Messbechern beachtet wurde, wird nicht erwähnt. Dieser Effekt könnte den gemessenen Wasserverlust verfälschen und zu einer Überschätzung führen. Während des Experiments kam es bei vereinzelt Versuchen, wie bei Hartmann (1992), zu einer positiven Wasserbilanz. Als Grund dafür wird der Wechsel der Windrichtung während der Versuchsdurchführung gesehen. Die Messbecher fangen bei einem Wechsel der Windrichtung möglicherweise mehr Wasser auf, als ohne Wind zu erwarten gewesen wäre.

Hendawi et al. (2005) beschäftigt sich in einer wissenschaftlichen Untersuchung mit möglichen Messfehlern bei der Erfassung von Niederschlägen durch Regenmessbecher. Mithilfe von Strömungssimulationen wurden verschiedene Behälterformen auf die aerodynamischen Eigenschaften geprüft und auf mögliche Messfehler hin untersucht. Durch Windeinfluss kann es wie in Abb. 17 zu sehen ist, zu einem Auftrieb innerhalb des Behälters kommen.

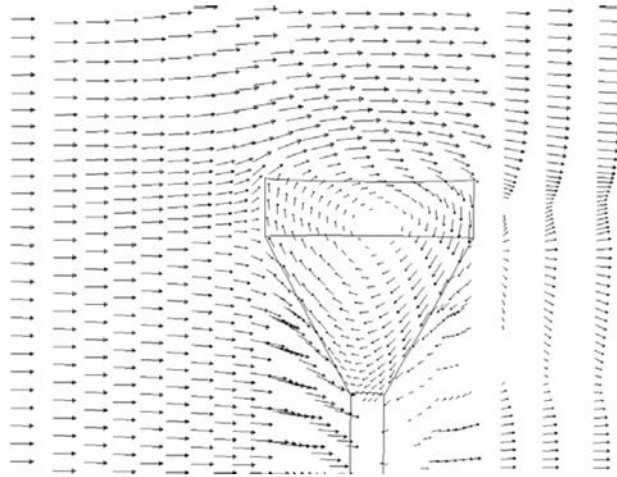


Abb. 17: Eine Strömungssimulation in einem zylindrischen Behälter bei Windgeschwindigkeiten von $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Durch Verwirbelungen im Behälter kommt es zu einem Auftrieb im Inneren des Behälters (Hendawi et al., 2005).

Laut Hendawi et al. (2005) entsteht der Wasserverlust durch ein Zusammenspiel von Tropfengröße und Windgeschwindigkeit. Feine Tropfen unter 2 mm werden leicht aus dem Behälter rausgepustet und können so nicht als beregnetes Wasser gewertet werden. Es kommt zu einer Fehlinterpretation und Überbewertung des Wasserverlustes. Der Wasserverlust nimmt mit der Windgeschwindigkeit zu und mit der Tropfengröße ab. Eine Lippe am oberen Behälterrand bremst den Anstieg der Luftgeschwindigkeit im Behälterinneren und unterdrückt die Verwirbelungen.

Tarjuelo et al. (2000) quantifizierten und modellierten Verdunstungs- und Abdriftverluste unter verschiedenen Bedingungen. In der wissenschaftlichen Studie wird der WDEL von einer Einzelsprinkleranlage, einer Blockbewässerung und unter realen Feldbedingungen untersucht. 40 m von der Teststation entfernt misst eine Wetterstation minütlich die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung auf $1,2$ und 4 m . Bei beiden Versuchsdurchführungen wird das Wasser aus einem separaten Wassertank gesogen, um die Wasserverfügbarkeit zu garantieren und ein Betriebsdruck von $3,8 \text{ Bar}$ angewendet.

Der Sprinkler stand in der Mitte einer Matrix mit 22×22 Messbechern, welche im Abstand von 2 m zueinander platziert waren. Die Messbecher selbst hatten einen Durchmesser von 160 mm und waren 150 mm hoch. In der Blockbewässerung wurden 4×4 Sprinkler mit jeweils einem Abstand von 18 m durch eine 76 mm starke Leitung miteinander verbunden. Unter den Sprinklern wurde ebenfalls ein

Raster an Messbechern im 2 x 2 m Abstand aufgestellt. Bei den Untersuchungen unter realen Feldbedingungen schwankte der Betriebsdruck zwischen 2,5 und 4,76 Bar. Neben den Versuchsflächen wurden Referenzmessbecher aufgestellt, die den Wasserverlust durch die Verdunstung aus den Messbechern quantifizieren sollen. Diese wurden während des Versuchsdurchganges alle 15 min kontrolliert. Tarjuelo et al. (2000) fiel auf, dass aus Regenmessern mit wenig Wasser die Evaporationsmenge höher ist, als in Messbechern mit viel Wasser.

Als Ergebnis erhalten Tarjuelo et al. (2000) einen Wasserverlust bei dem einzelne Sprinkler von 20,7 %, bei der Blockbewässerung von 13,36 % und bei dem praxisnahen Versuch 14,64 %. Der hohe Wasserverlust beim Einzelsprinkler ist dem fehlenden Mikroklima zuzuschreiben, das sonst bei einer Umgebung mit mehreren Sprinklern entsteht. In den Modellen zur Quantifizierung der Wasserverluste wird als Einflussgröße auf Windgeschwindigkeiten, Arbeitsdruck und das Dampfdruckdefizit gesetzt.

Salvatierra-Bellido et al. (2018) beschäftigen sich in einem wissenschaftlichen Artikel vermehrt mit der gleichmäßigen Wasserverteilung von Beregnungsanlagen. Laut dieser Ergebnisse hat die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung den größten Einfluss auf die gleichförmige Wasserverteilung. Außerdem verbessert ein konstanter Betriebsdruck deutlich die Gleichmäßigkeit der Beregnung. Die Anordnung der Sprinkler ist auch entscheidend. Ein dreieckiges Layout mit engen Düsenabständen sorgte in den Untersuchungen häufig für eine optimalere Wasserverteilung, besonders bei wechselnden Windgeschwindigkeiten. Um der Unterversorgung im Nahbereich entgegenzuwirken, kann eine Nahbereichsdüse eingesetzt werden.

Sadeghi et al. (2015) untersuchten ebenfalls den Wasserverlust von Center-Pivot-Bewässerung, jedoch wurden die Ergebnisse von den Regenmessern mit einer anderen Methode verglichen, welche Strip-Methode genannt wird. Im Test wurde die Wasserapplikationseffizienz (WAE) von einer 60 m langen und 1,5 m hohen Center-Pivot-Maschine analysiert, auf der in 3 m Abstand 20 Sprinkler montiert waren. Der Wasserdruck an der 4,37 mm Düse lag bei 1,03 Bar und die Durchflussmenge betrug $13 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Insgesamt wurden 8 Bewässerungstests durchgeführt. Windrichtung, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur wurden in 0,75 m Höhe gemessen. Die meteorologischen Daten wurden jede Sekunde dokumentiert.

Der Versuchsaufbau mit den Regenmessern wurde ähnlich aufgebaut wie bei Hartmann (1992) oder Playán et al. (2005). Die Regenmesser hatten einen Durchmesser von 110 mm und waren 130 mm hoch. In 6 Reihen wurden je 18 Regenmesser im Abstand von 1 m zueinander aufgestellt. Anhand des aufgefangenen Wassers und der Öffnungsfläche der Regenmesser wurde der Wasserverlust berechnet, ähnlich wie durch die Formel von Playán et al. (2005) in Gleichung (15). Außerdem achteten Sadeghi et al. (2015) ebenfalls auf die verfälschende Evaporation während der Versuchsdurchführung und bestimmten die Wasserverdunstung durch einen aufgestellten und

meteorologischen Einflussfaktoren. Während eines Testdurchganges mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten konnte die Strip-Methode WAE-Werte zwischen 77 und 95 % dokumentieren, wohingegen die Regenmessermethode lediglich einen Durchschnittswert von 82 % auswies. Windgeschwindigkeiten haben den stärksten negativen Einfluss auf die WAE, was signifikant nachgewiesen wurde. Auch die Lufttemperatur hat einen signifikant negativen Einfluss auf die WAE. Ein signifikanter Zusammenhang zur relativen Luftfeuchtigkeit konnte nicht nachgewiesen werden.

1979 untersuchte Yazar (1984) im Zeitraum von Juli bis Dezember den WDEL an einer Rohrberegnungsanlage mit integrierten Düsen unter verschiedenen klimatischen und betrieblichen Bedingungen. Verwendet wurden Düsen mit einem Durchmesser von 5,2 und 5,6 mm, die über Leitungen mit einem Durchmesser von 102 mm miteinander verbunden waren. Der Abstand zwischen den zehn Düsen betrug jeweils 6,1 m. In den Versuchen wurde der Wasserdruck in drei verschiedene Druckstufen (2,07 Bar, 2,67 Bar und 3,1 Bar) eingeteilt, um den Einfluss des Wasserdrucks auf die WDEL zu überprüfen.

Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden in 2 m Höhe gemessen. Die Lufttemperatur (trocken und feucht) wurde alle 10 min dokumentiert, um daraus das Dampfdruckdefizit zu berechnen.

Zur Messung der Beregnungsverluste wurden 132 mm breite Trichter über ein 300 mm langes Rohr gestülpt, welche das Beregnungswasser auffangen. Der Aufbau war ähnlich zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten. 130 dieser Auffangbehälter wurden in einem Raster von 1,5 x 3 m unter der Beregnungsanlage aufgebaut. Im Gegensatz zu Hartmann (1992) oder Playán et al. (2005) wurden die Beregnungsverluste jedoch nicht per Brutto- und Nettomenge berechnet. Die Evaporationsverluste wurden anhand der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt, indem diese sowohl beim aufgefangenen als auch beim eingeleiteten Wasser gemessen wurde. Wasser, aus dem ein Teil verdunstet ist, weist eine höhere elektrische Leitfähigkeit auf, da die gelösten Salze im verbleibenden Wasser konzentrierter vorliegen. Der Abdrift wurde mit der Magnesiumoxid-Methode gemessen. In 21 und 26 m Entfernung wurden Glasplatten mit Magnesiumoxid beschichtet. Wenn Sprühtropfen auf die Platte treffen, hinterlassen sie je nach Tropfengröße Flecken. Es wurden pro Messplatz zehn vertikale Ebenen im Abstand von je 35 cm mit den Glasplatten aufgebaut, wodurch eine Messstation mit einer Höhe von 3,5 m entstand. Die Durchmesser der Tropfen wurden analysiert und so Rückschlüsse auf die Driftmenge gezogen. Durch die angewandten differenzierten Methoden konnten Playán et al. (2005) Abdrift- und Evaporationsverluste getrennt erfassen und analysieren.

Die Evaporationsverluste lagen zwischen 1,5 und 16,8 %. Maßgeblich dafür waren die Windgeschwindigkeit und das Dampfdruckdefizit. Die Spannweite der Driftverluste ist mit 1,5 % bis 15,1% ähnlich groß. Sie wurde vorrangig durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Der

Betriebsdruck hat nur einen geringen Einfluss auf den Wasserverlust. Kombiniert entstehen WDEL von 1,7 und 30,7 %. Bei einer Windgeschwindigkeit über $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ machte der Abdrift 47 % der WDEL aus. Unter $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sind es nur noch rund 25 %.

In einer Schreibtischstudie untersuchten van den Eertwegh et al. (2020) die theoretische Abschätzung von Wasserverlusten bei der Tages- und Nachtbewässerung. Dabei wurden keine praktischen Feldversuche angelegt, sondern Modelle aus der Literatur unter anderem von Yazar (1984) und Sadeghi et al. (2015) genutzt, um unter Bezug aktueller meteorologische Daten zu erwartende Wasserverluste zu berechnen. Die meteorologischen Daten stammten von Wetterstationen, welche Temperatur, Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Niederschlag stündlich sammelten. Die Autoren van den Eertwegh et al. (2020) wandten die literarischen Formeln auf die Wetterdaten von drei verschiedenen Standorten in den Niederlanden im Zeitraum Juli-August 2020 an. Als Beregnungsanlage wurde eine Sprühtrommel (auch als Starkregner bezeichnet) mit einer effektiven Arbeitsbreite von 80 m, einem Düsendurchmesser von 25 mm und einer Förderleistung von $50 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ genutzt.

Die Autoren van den Eertwegh et al. (2020) kamen tagsüber zu Verdunstungsverlusten von 3 bis 6 % und nachts auf 2 bis 3 %. Der Unterschied wurde mit weniger als 3 % als gering bewertet und mit der fehlenden Sonneneinstrahlung begründet. Die Driftverluste stiegen mit der Windgeschwindigkeit mehr als linear an. Bei Windgeschwindigkeiten von über $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ waren Abdriftverluste von 10 % zu erwarten. In den Nachtstunden lagen die Verluste im Durchschnitt um 1 bis 3 % niedriger, wobei dieser Unterschied stark von der jeweiligen Region und dem typischen Tag-Nacht-Windgefälle abhing.

McLean et al. (2000) konzentrierten sich in einem Vergleich von Starkregner mit Center-Pivot-Anlagen hauptsächlich auf die Verdunstungsverluste. Zur Quantifizierung dieser Verluste kam die Methode der elektrischen Leitfähigkeit (EC-Methode) zum Einsatz. Dafür wurden 60 zwei Liter Flaschen 150 mm unter dem Flaschenhals aufgeschnitten und als Auffangbehälter für die Bewässerung genutzt. Parallel zur Versuchsdurchführung wurden die Wetterdaten in Intervallen von 15 Minuten aufgenommen. Erfasst wurde dabei die relative Luftfeuchtigkeit mittels Psychrometer, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit Hilfe eines Anemometers.

Direkt nach der Beregnung der Probenbehälter wurden Laborproben aus den Behältern gezogen, die lediglich das Volumen von 1 ml betrugen. Gleichzeitig wurden Frischwasserproben aus der Düse gezogen. Der Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit der einzelnen Proben mit dem Frischwasser ergab den Wasserverlust durch die Evaporation. Um eine Kontamination mit Salzablagerungen auszuschließen, wurden die Auffangbehälter nach jeder Nutzung sorgfältig gereinigt. Die Behälter wurden ausgekocht, mit destilliertem Wasser gespült und anschließend über Kopf aufgehängt, um zu trocknen.

Der Starkregner wies im Mittel einen Verdunstungsverlust von 4 bis 6 % aus, wobei die höchsten Verluste mit 11 bis 12 % am Ende der Wurfstrecke festgestellt wurden. Dies lässt sich mit dem längsten Weg durch die Luft erklären, da das Wasser so die längste Zeit für die Evaporation hatte. Die Werte der Center-Pivot-Anlage lagen etwa zwischen 2 und 5 %.

Zentrale Literaturdaten ausgewählter Forschungsergebnisse

Zur Einordnung der in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse ist ein Überblick über die Literaturdaten aus Kapitel 2.2.3 sinnvoll. Die Tabelle Tab. 2: Übersicht zentraler Literaturdaten fasst die wichtigsten Daten der Literatur zusammen.

Tab. 2: Übersicht zentraler Literaturdaten

Autor	Berechnungssystem	Wasserverlust	Haupteinflussfaktor
Hartmann (1992)	Starkregner	-2,08 bis 14,41 %	Windgeschwindigkeit
Playán et al. (2005)	Feste Rohrberegnungsanlage, Linearberegnungsmaschine	8,5 % (nachts) bis 15,4 % (tagsüber)	Windgeschwindigkeit
Silva (2006)	Center-Pivot-Anlage	12,8 % bis 20,6 %	Windrichtung, Windgeschwindigkeit
Tarjuelo et al. (2000)	Einzelregner, Rohrberegnung	Einzelregner (0,55 bis 42,25 %) Ø: 20,7 %	Windgeschwindigkeit, Arbeitsdruck, Dampfdruckdefizit
		Rohrberegnung (0,95 bis 29,41 %) Ø: 13,36 %	
Sadeghi et al. (2015)	Center-Pivot-Anlage	5 % bis 23 %	Windgeschwindigkeit
Yazar (1984)	Rohrberegnungsanlage	Evaporationsverlust: 1,5 % bis 16,8 % Ø: 5,6 %	Windgeschwindigkeit, Dampfdruckdefizit
		Driftverluste: 1,5 % bis 15,1 % Ø: 5,3 %	
		Kombinierte Verluste: 1,7 % bis 30,7 %	

Autor	Beregnungssystem	Wasserverlust	Haupteinflussfaktor
van den Eertwegh et al. (2020)	Starkregner	Verdunstung: 2 bis 3 % (nachts) 3 % bis 6 % (tagsüber) Abdriftverluste: 10 %	Sonneneinstrahlung beeinflusst die Verdunstung, Windgeschwindigkeit beeinflusst den Abdrift
McLean et al. (2000)	Starkregner, Center-Pivot-Anlage	Starkregner: 4 % bis 6 % Center-Pivot-Anlage: 2 % bis 3 %	Windgeschwindigkeit

Tab. 2 zeigt, dass die Windgeschwindigkeit in allen Untersuchungen als entscheidende Einflussgröße auf die Wasserverluste identifiziert wurde. Außerdem wurde deutlich, dass die Höhe der Wasserverluste stark von der verwendeten Beregnungsanlage abhängt. Center-Pivot-Anlagen und Düsenwagen haben im direkten Vergleich zum Einzelregner oder Starkregner einen geringeren Wasserverlust. Durch eine Nachtberegnung konnte in einzelnen Studien eine Verringerung des Wasserverlustes gemessen werden. Insgesamt variierten die ermittelten Wasserverluste in den betrachteten Arbeiten zwischen etwa 1 % und 30 %.

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsstandort und meteorologische Rahmenbedingungen

Die Versuchsdurchführung erfolgte im Zeitraum vom 23. August 2024 bis zum 02. September 2024 auf einer freiliegenden Grünlandfläche innerhalb des Geländes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Braunschweig. Das Gelände liegt offen und ohne große Hindernisse gegenüber atmosphärischen Einflüssen, wodurch eine realitätsnahe Erfassung der Bewässerungsverluste unter Freilandbedingungen ermöglicht wurde. Die Abb. 19 veranschaulicht die räumliche Anordnung der Versuchspunkte, der meteorologischen Messstellen, sowie der Beregnungsstandorte.

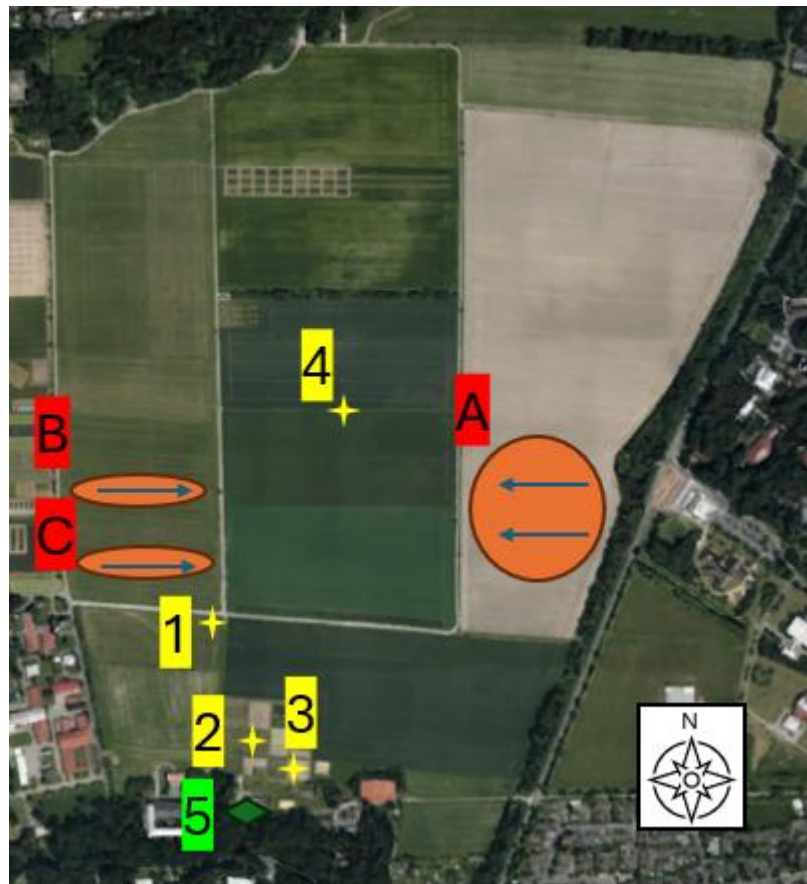


Abb. 19: Übersicht der Versuchsfläche mit Beregnungs- und Messpunkten (Eigene Darstellung mit Hilfe von Google (2013)).

Der erste Standort des Starkregners (A) befindet sich auf einer offenen, ebenen Fläche. Etwa 350 m nördlich des Standortes verläuft eine Hecke, an die sich eine rund 400 m breite Freifläche anschließt, bevor ein kleiner Wald und eine angrenzende Siedlung beginnen. Östlich befindet sich in einer Entfernung von etwa 500 m eine Baumreihe, hinter der sich ebenfalls das Siedlungsgebiet anschließt. Südlich, in einer Entfernung von etwa 600 m, liegen die Gebäude des Deutschen Wetterdienstes, gefolgt vom Beginn der Siedlung. In westlicher Richtung erstreckt sich eine etwa 1.000 m breite Freifläche, bevor ein Waldgebiet folgt. Innerhalb des unmittelbaren Versuchsbereichs befinden sich

keine hohen Objekte, die den Windeinfluss oder die Verteilung des Beregnungswassers signifikant beeinflussen konnten.

Der erste Standort des Düsenwagens (A) lag rund 250 m nördlich des Starkregnerstandortes. Für die zweite Versuchsdurchführung wurden beide Beregnungsmaschinen um etwa 350 m nach Westen verlagert. Dabei befand sich der Düsenwagen am Standort B, während der Starkregner am Standort C positioniert wurde.

Die meteorologischen Messstellen waren über das Versuchsfeld verteilt und ermöglichten eine kontinuierliche Erfassung der relevanten klimatischen Parameter. Die Erfassung erfolgte in der Regel im Minutenintervall, für die Auswertung wurden jedoch Stunden bzw. 15-Minuten-Mittelwerte herangezogen. Der Abstand zwischen den jeweiligen Regnerstationen und den Messstellen variierte je nach Position zwischen 100 und 800 m.

Die Temperatur- und Luftfeuchtemessungen wurden an Messstelle 2 durchgeführt und im Stundentakt ausgewertet. Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden an Messstelle 1 in 10 m Höhe über Grund erfasst. Bei Ausfall dieser Station wurden die Daten der Ersatzstelle 4 in 4 m Höhe herangezogen. Auch hier erfolgte eine stündliche Auswertung. Die kurz- und langwellige Strahlungsbilanz wurde an Messstelle 3 bestimmt, welche im 15-Minuten-Takt erfolgte. Auf Grundlage dieser meteorologischen Daten wurde die Referenzverdunstung nach der Penman - Methode berechnet. Der Punkt 5 markiert das Labor, in dem die gravimetrische Bestimmung des aufgefangenen Beregnungswassers zur Ermittlung der Wasserverluste vorgenommen wurde.

3.2 Beschreibung des Trommelwagens

Für die Beregnungsversuche kam der Trommelwagen Beinlich Monsun II zum Einsatz (vgl. Abb. 20). Diese Maschine ist mit einem PE-Rohr von 600 m Länge ausgestattet, das einen Außendurchmesser von 132 mm, einen Innendurchmesser von 110 mm und eine Wandstärke von 11 mm aufweist.



Abb. 20: Trommelwagen Beinlich Monsun II im Versuchseinsatz (Eigene Aufnahme).

Der Trommelwagen war über eine Wasseruhr mit dem Hydranten verbunden. Die Wasseruhr ermöglichte eine präzise Erfassung der durchgeleiteten Wassermenge, sodass die tatsächlich ausgebrachte Beregnungsmenge während des Versuchs exakt bestimmt werden konnte.

Die Einzugsregelung des Beinlich Monsun II erfolgte über das durchströmende Wasser. Dieses wird teilweise über einen Bypass durch das Getriebe geleitet und treibt dadurch die Trommelbewegung an. Sie setzt die Drehung der Trommel in eine kontrollierte Einzugsbewegung des Schlauchs um. Mit zunehmender Aufwicklung vergrößert sich der Umfang der Trommel, wodurch eine kontinuierliche Anpassung der Einzugsregelung notwendig ist. Um eine gleichmäßige Rückzugsgeschwindigkeit sicherzustellen, verlangsamt sich die Drehbewegung der Trommel automatisch im Verlauf des Beregnungsvorgangs. Die Sollgeschwindigkeit des Schlaucheinzugs wurde vor jedem Versuch am Steuercomputer des Geräts eingegeben. Dieser überwacht den tatsächlichen Einzugsverlauf fortlaufend und vergleicht ihn mit dem eingestellten Wert. Abweichungen werden automatisch korrigiert, wodurch eine konstante Beregnungsgeschwindigkeit und eine gleichmäßige Wasserverteilung über die gesamte Feldlänge gewährleistet werden. Zur Validierung der computergesteuerten Einzugs geschwindigkeit erfolgte eine manuelle Kontrolle in regelmäßigen Abständen, bei der die zurückgelegte Schlauchlänge mithilfe eines Maßbandes und die entsprechende Zeitspanne mit einer Stoppuhr erfasst wurden.

3.3 Beschreibung des Starkregners

Für die Beregnungsversuche wurde der Starkregner Komet Twin 160 Pro der Firma Komet Irrigation eingesetzt (vgl. Abb. 21). Der Regner gehört zur Kategorie der Großflächenregner und ist speziell für den Einsatz auf mobilen Trommelbewässerungsanlagen konzipiert. Er verfügt über einen festen Strahlanstiegswinkel von 24° und misst 908 mm in der Länge sowie 555 mm in der Höhe. Der gesamte Regnerwagen kommt somit auf eine Höhe von 2.900 mm. Das Gerät ist auf einem dreipunktgestützten Fahrgestell montiert, wobei jeder Punkt mit zwei hintereinander angeordneten Rädern ausgestattet ist. Diese Anordnung ermöglicht es den Regner innerhalb einer Fahrgasse zu bewegen, ohne die Kulturpflanze stark zu beeinträchtigen.



Abb. 21: Starkregner Komet Twin 160 Pro im Versuchseinsatz (Eigene Aufnahme).

Der Regner ist so ausgerichtet, dass er entgegengesetzt zur Fahrtrichtung des Trommelwagens sprüht. Dadurch wird verhindert, dass der Wagen über die durchfeuchtete Fläche fährt und die Bodenstruktur beeinträchtigt. Der Verbindungsschlauch zum Trommelwagen ist linksseitig an zwei stabilen Füßen entlanggeführt, sodass er aus der Perspektive des Trommelwagens in der linken Fahrspur verläuft.

Zum Einsatz kam eine 22,5 mm Tapare Bore-Düse mit einer durchgehend konischen Form. Die Sektorbegrenzung des Regners betrug 240°, realisiert durch eine automatische Umschaltvorrichtung, welche die Drehrichtung des Regners selbstständig umkehrte. Die Drehung zwischen den eingestellten Sektorbegrenzungen betrug 2 Minuten und 40 Sekunden.

Während der Versuche lag der Betriebsdruck am Regnerkopf zwischen 2,6 und 4,8 Bar, was einem theoretischen Durchsatz von 33 bis 42,6 m³ h⁻¹ und einer Wurfweite von 38,9 bis 51 m entspricht (Komet Austria GmbH, 2014). Die Einzugsgeschwindigkeit war bei allen Versuchsdurchgängen gleich und auf 20 m h⁻¹ eingestellt.

3.4 Beschreibung des Düsenwagens

Für die Versuche wurde ein Düsenwagentyp der Firma Deierling eingesetzt (vgl. Abb. 22). Der Wagen ist mit einer Gesamtarbeitsbreite von etwa 50 m ausgestattet und verfügt über insgesamt 13 Düsen, die in regelmäßigen Abständen von circa 3,5 m entlang des Gestänges angeordnet sind. Jede Düse erzeugt einen Wasserstrahl mit einer Wurfweite von etwa 3,5 m. Das Gestänge ist vierfach klappbar, wobei jedes Segment 5,5 m misst. Die zentrale Verbindungseinheit besitzt eine Breite von 2 m. Die verwendeten Rohrdurchmesser variieren entlang des Gestänges und betragen von innen nach außen 5,5 mm, 4,5 mm, 4 mm und 3,5 mm, um eine gleichmäßige Druckverteilung und Beregnungsintensität über die gesamte Arbeitsbreite zu erreichen.



Abb. 22: Düsenwagen der Firma Deierling während des Beregnungseinsatzes (Eigene Aufnahme).

Verwendet wurden Rotationsdüsen der Firma Nelson mit einem KPR-Druckregler. Die Düsenanordnung besteht aus sechs Düsen pro Seite sowie einer zentralen Mitteldüse. Während die zweite und dritte Düse (von der Mitte aus rechts) nur mit einem reduzierten Druck von 0,7 Bar betrieben werden, arbeiteten alle anderen bei einem optimalen Druck von 1,0 Bar (vgl. Abb. 23). Der Druckregulator sorgt für einen beständigen Wasserdruck. Die mittlere Düse ist in Fahrtrichtung nach hinten geneigt und arbeitet mit einem Betriebsdruck von 1,4 Bar. Diese Ausrichtung verhindert, dass sich die Reifenspur des Wagens aufweicht, wodurch eine stabile Fahrspur erhalten bleibt.



Abb. 23: An Düsenwagen installierte Düse mit einem optimalen Druck von 1,0 Bar (Eigene Aufnahme).

Ursprünglich ist der Düsenwagen mit Randregnern ausgestattet, die an den äußeren Enden des Gestänges zusätzlich Wasser über die Arbeitsbreite hinaus verteilen, um die Arbeitsbreite zu vergrößern und beispielsweise Ecken zu beregnen. Für den vorliegenden Versuch wurde diese Konfiguration jedoch modifiziert, sodass an den Enden ebenfalls Düsen verbaut waren.

Die Applikationshöhe über dem Pflanzenbestand betrug etwa 1,5 m. Die Arbeitsgeschwindigkeiten bei allen Versuchsdurchgängen betrug 38 m h^{-1} .

3.5 Messaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Erfassung der Wasserverluste während der Beregnungsdurchgänge wurde ein einheitlich strukturierter Versuchsaufbau entwickelt, welcher für beide Beregnungsvorgänge eingesetzt wurde.

Der Versuchsaufbau bestand aus zwei Reihen von Messbechern (in Abb. 24 punktiert dargestellt), die im 90°-Winkel zur ausgezogenen Regnerleitung positioniert und versetzt zueinander aufgestellt waren. Innerhalb der Reihe bestand zwischen den Bechern ein Abstand von 2 m und zwischen den Reihen selbst einer von 1 m.

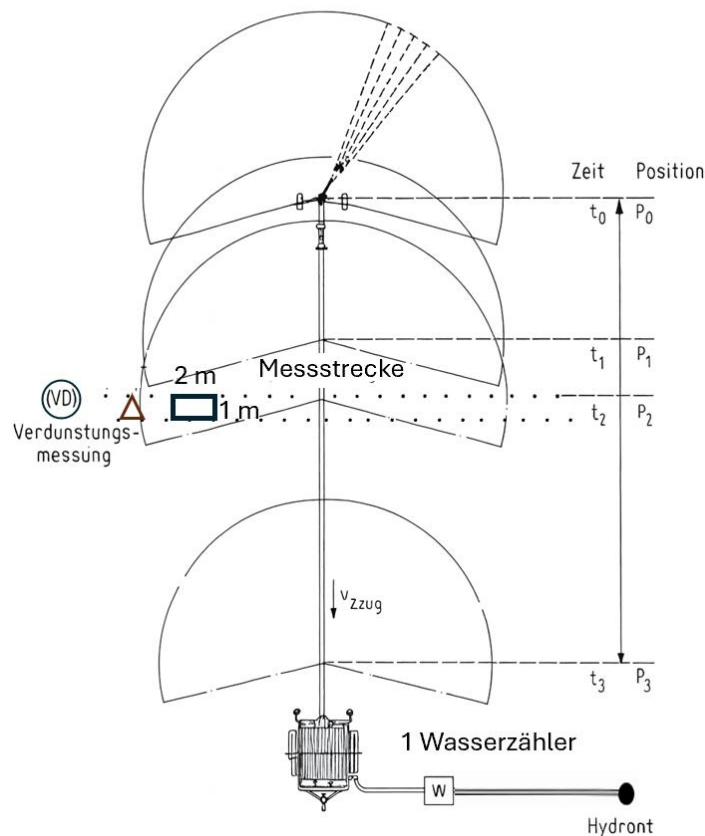


Abb. 24: Schematischer Aufbau der Messstrecke und der Verdunstungsmessung (verändert nach Hartmann (1992)).

Die eingesetzten Messbecher bestanden aus transparentem Kunststoff und verfügten über eine zylindrische Form (vgl. Abb. 25). Ihre Gesamtlänge betrug 27,5 cm, wobei sie etwa 7 cm tief im Boden steckten und lotrecht ausgerichtet wurden. Das Wasser wurde somit 20 cm über dem Bestand aufgefangen. Der Durchmesser der oberseitigen Öffnung betrug 7,9 cm, was eine Auffangfläche von 49 cm² ergab. Die Wandstärke betrug 0,2 cm und die Tiefe des Auffangbehälters lag bei 17,5 cm. Playán et al. (2005) scheinen der eigenen Beschreibung nach sehr ähnlich Messbecher zu verwenden.



Abb. 25: Messbecher zur Erfassung der Beregnungsmenge (Eigene Aufnahme).

Zwischen den Hydranten und der Regentrommel war eine Wasseruhr installiert, über welche die Bruttowassermenge erfasst werden konnte, die während eines gesamten Beregnungsdurchgangs ausgebracht wurde. Zusätzlich war an der Beregnungsmaschine sowie am Regner selbst ein Druckmanometer angebracht, mit dem der Betriebsdruck regelmäßig überprüft wurde. Die Ablesegenauigkeit betrug hierbei 0,5 Bar. Ein Druckschreiber war nicht installiert. Die Einzugsgeschwindigkeit (V_{Zug}) wurde direkt am Computer der Beregnungsmaschine eingegeben.

Zur Erfassung der Verdunstungsverluste während der Beregnung wurde außerhalb der Beregnungsfläche ein Piche-Verdunstungsmessgerät aufgestellt. Dieses besteht aus einem graduierten Messröhrchen mit einer Skala in Millilitern, das am unteren Ende einen Klemmbügel zur Befestigung eines Fließpapiers besitzt. Das obere Ende ist verschlossen und die Skala beginnt hier bei 0. Durch die Wasserverdunstung über das Fließpapier sinkt der Wasserstand im Röhrchen, wodurch sich die Verdunstungsrate pro Zeiteinheit direkt ablesen lässt. Um zusätzlich den Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Verdunstung zu quantifizieren, wurde ein zweiter Piche verwendet, dessen Fließpapier mit einer kleinen Abdeckplatte beschattet war.

Der Versuchsdurchgang begann zu einem Zeitpunkt (t_0), zu dem sich die Beregnungsmaschine so weit entfernt befand, dass die ersten Messbecher noch nicht vom Wasserstrahl getroffen wurden. Sobald das Wasser erstmals einen Becher erreichte (t_1), begann die Datenerfassung. Der Stand der Wasseruhr, der Wert der Picheanzeige und die Uhrzeit wurden dokumentiert. Zu diesem Zeitpunkt traf der Regner den äußeren Bereich der Messfläche durch den Sektorwinkel von 240° . Im weiteren Verlauf (t_2) wurde die gesamte Messstrecke gleichmäßig vom Regner überfahren. Sobald die Maschine so weit entfernt war, dass aufgrund des Windes kein Wasser mehr in die Becher gelangen konnte (t_3), wurde der Endstand der Wasseruhr, der Stand des Piches und die Uhrzeit erneut bestimmt.

Während der Versuche sollte regelmäßig überprüft werden, ob die Einzugsgeschwindigkeit konstant bleibt. In der Praxis wurde dies unregelmäßig durchgeführt. Insbesondere bei windigen Bedingungen

war die Bestimmung des Endzeitpunkts (t_3) visuell anspruchsvoll, da vereinzelt Tropfen in Randbereiche gelangen konnten.

Nach Abschluss jedes Berechnungsdurchgangs wurden die Messbecher visuell abgelesen. Die enthaltene Wassermenge wurde anschließend in einen gemeinsamen Eimer entleert, der mit einem Deckel vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt war, um eine zusätzliche Verdunstung zu verhindern. Im Anschluss erfolgte die gravimetrische Bestimmung der Gesamtwassermenge durch Wägung des Eimerinhalts. Dabei wurde auch die Zeit der visuellen Messung festgehalten, um sie mit den Werten des Piches zu vergleichen. Die gewogene Wassermenge konnte anschließend in Beziehung zu den visuellen Becherablesungen gesetzt werden.

Die meteorologischen Daten wurden während der gesamten Versuchsdauer durch die am Standort installierten Messstationen erfasst und in der Tab. 3 für den Starkregner und Tab. 4 für den Düsenwagen aufgelistet. Die in den Tabellen verwendeten Abkürzungen beziehen sich auf die folgenden erfassten Parameter:

- Temp. = Temperatur
- Wind.= Windgeschwindigkeit
- max. Wind. = maximale Windgeschwindigkeit
- Windricht.= Windrichtung
- Rel. Luftfeucht.= relative Luftfeuchtigkeit
- kurzw. Strahlung = kurzwellige Strahlung
- Langw. Strahlung = langwellige Strahlung

Tab. 3: Meteorologische Bedingungen während der zehn Versuchszeiträume des Starkregners

Nr.	Temp. (°C)	Wind. (m*s ⁻¹)	Max. Wind. (m*s ⁻¹)	Windricht. (°)	Rel. Luftfeucht. (%)	Kurzw. Strahlung (W*m ⁻²)	Langw. Strahlung (W*m ⁻²)
1	26,28	7,54	12,0	220,0	40,54	527,92	-129,51
2	26,60	7,30	12,9	226,7	42,06	470,14	-122,02
3	24,76	3,96	5,5	127,7	36,72	565,79	-165,51
4	25,98	3,83	7,1	132,1	32,20	490,24	-169,25
5	24,22	3,72	5,4	103,6	53,40	468,82	-129,00
6	28,34	4,28	8,0	116,7	45,62	539,09	-154,17
7	29,18	4,20	7,4	121,3	44,48	369,59	-135,19
8	23,96	4,42	5,8	90,7	50,76	483,68	-131,25
9	25,82	4,16	7,0	102,3	45,96	529,01	-152,34
10	26,02	3,48	6,7	92,3	47,96	287,96	-114,45

Tab. 4: Meteorologische Bedingungen während der zehn Versuchszeiträume des Düsenwagens

Nr.	Temp. (°C)	Wind. (m*s ⁻¹)	Max. Wind. (m*s ⁻¹)	Windricht. (°)	Rel. Luftfeucht. (%)	Kurzw. Strahlung (W*m ⁻²)	Langw. Strahlung (W*m ⁻²)
1	23,60	3,30	4,2	128,3	41,00	520,37	-148,32
2	24,65	4,05	5,5	113,3	37,00	558,18	-163,36
3	26,10	3,45	7,6	130,0	31,40	505,59	-171,09
4	26,20	3,40	7,5	133,3	31,75	457,84	-165,41
5	25,10	3,85	6,2	115,3	51,50	511,06	-137,01
6	29,00	4,45	8,7	121,0	44,50	549,88	-157,75
7	29,95	4,20	7,3	122,5	41,60	365,33	-136,94
8	23,30	4,80	5,2	89,2	53,05	464,63	-122,28
9	26,45	3,70	7,6	106,7	44,50	519,08	-154,83
10	26,70	3,65	6,6	95,03	45,90	344,78	-126,47

3.6 Versuchsauswertung

Zur systematischen und reproduzierbaren Auswertung sämtlicher Beregnungsversuche wurde eine einheitliche Auswertungsmaske in Microsoft Excel erstellt. Diese diente der strukturierten Erfassung, Berechnung und Darstellung aller relevanten Versuchsparameter und Messergebnisse. Der Aufbau dieser Maske ermöglicht es, die erhobenen Rohdaten in standardisierter Form aufzubereiten und miteinander vergleichbar zu machen.

Für jeden Versuchsdurchgang wurden zunächst die grundlegenden Betriebsparameter der Beregnung erfasst. Dazu zählten die verwendeten Düsengrößen, die Fahrgeschwindigkeit des Beregnungswagens, die Durchmesser der Regenmesser sowie die Auffangoberfläche der jeweiligen Messgefäße in Quadratzentimetern. Zudem wurden die Start- und Endzeiten der Beregnung dokumentiert, woraus sowohl die Beregnungsdauer in Stunden und Minuten als auch die dezimale Stundenangabe berechnet wurde. Auch die Zeitpunkte und Dauer des Ablesens der Regenmesser wurden festgehalten, um sie mit einer potenziellen Verdunstung in Verbindung zu bringen.

Neben diesen Zeitparametern wurden auch die hydraulischen Kenngrößen systematisch erfasst. Hierzu gehörten der Wasserdruck am Trommelwagen und am Beregnungswagen, aus denen sich der Druckverlust entlang der Leitung bestimmen ließ. Der Wasserzählerstand zu Beginn und am Ende jedes Beregnungsdurchgangs ermöglichte die Ermittlung des Gesamtwasserverbrauchs in Litern. Zur quantitativen Beschreibung der beregneten Fläche wurde die Beregnungsbreite ermittelt, die anhand der tatsächlich getroffenen Messbecher bestimmt wurde. Als Kriterium galt dabei eine Mindestauffangmenge von 0,5 mm pro Becher. Die Beregnungstrecke wurde durch die Kombination der Fahrgeschwindigkeit mit der Beregnungsdauer berechnet. Aus der

Berechnungsbreite und Berechnungsstrecke konnte wiederum die Gesamtmessfläche in Quadratmetern abgeleitet werden.

Darüber hinaus wurde die Gesamtauffangfläche der Regenmesser berechnet, indem die Fläche eines einzelnen Messgefäßes durch 10.000 geteilt und mit der gesamten Berechnungsbreite multipliziert wurde. Zur Quantifizierung der Verdunstungsverluste wurde der Pichestand zu Beginn und am Ende des Versuches dokumentiert, sowohl für die unbeschattete als auch für die beschattete Messung. In der Auswertung wurde der Mittelwert beider Messstation berechnet und auf den Verdunstungswert pro Stunde vereinheitlicht.

Für jeden Versuch wurde eine Tabelle erstellt, in welcher der Wasserinhalt pro Regenmesser und die jeweilige Entfernung zur Berechnungstechnik aufgeführt wurden. Diese Werte wurden anschließend, mithilfe der bekannten Oberfläche der Regenmesser, in Gramm Wasser pro Regenmesser umgerechnet. Aus den Messergebnissen und den jeweiligen Abständen zur Berechnungsquelle konnte die Verteilungskurve der Niederschlagsintensität grafisch dargestellt werden.

Nach Abschluss der Beregnung wurde die visuell abgelesene Wassermenge aller Regenmesser summiert und zusätzlich die gravimetrisch bestimmte Gesamtwassermenge durch Wägung des Eimerinhaltes ermittelt. Das Verhältnis zwischen visueller und gravimetrischer Messung dient der Überprüfung der Messgenauigkeit.

Parallel dazu wurden die durchschnittlich meteorologischen Bedingungen während jedes Versuches erfasst. Diese Daten wurden aus der entsprechenden Tabelle der meteorologischen Messstation entnommen, wobei Zeitwerte, die weniger als 30 Minuten die volle Stunde überzogen, abgerundet wurden und darüber aufgerundet wurden. Erfasst wurden Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, kurze- und langwellige Strahlung, Penman-Potentialevaporation, Windgeschwindigkeit, maximale Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung in Grad. Anhand der Daten der Windrichtung und der Position der Messbecherreihe wurde die Windrichtung im Verhältnis zur Beregnungsstrecke berechnet. Ein Winkel von 0 Grad entsprach dabei einer Windrichtung entgegen der Beregnungsstrecke, während 90 Grad eine parallel zur Beregnungsrichtung verlaufende Strömung bedeutete. Diese Angabe ermöglichte Rückschlüsse auf mögliche seitliche Driftbewegungen des Beregnungswassers oder eine Verlagerung der Tropfen entlang der Beregnungsrichtung, bei der die Tropfen auf dem Versuchsfeld bleiben.

Auf Grundlage der im Messnetz erfassten Niederschlagsmengen wurde anschließend die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung für beide Beregnungssysteme quantifiziert. Hierfür wurden der CU und der DU nach Kapitel 2.2.3 berechnet. Die Berechnungen wurden für jeden Versuch separat durchgeführt, um potenzielle Unterschiede zwischen den Beregnungssystemen abbilden zu können.

In Kapitel 2.1 stellten Köller und Hensel (2019) verschiedene Wirkungsgrade der Wassereffizienz beziehungsweise des Wasserverlustes vor, die jeweils auf unterschiedlichen Bewertungsansätzen beruhten. In den vorliegenden Versuchsreihen wird der Fokus auf den Wasserverlust im Sinne der *field application efficiency* gelegt. Zur Quantifizierung der Wasserverluste wurden zwei unterschiedliche Berechnungsansätze herangezogen, die sowohl die Verdunstung mit feinen Verwehungen, als auch die durch Abdrift bedingten Verluste innerhalb der Beregnungsfläche erfassen. Im ersten Schritt wurde auf Grundlage der Messfläche und der jeweils ausgebrachten Gesamtwassermenge die SOLL-Wassermenge bestimmt, also die theoretische Wassermenge, die pro Quadratmeter in den Regenmessern hätte aufgefangen werden müssen. Hierzu wurde das Verhältnis der ausgebrachten Wassermenge in Litern zur berechneten Fläche in Quadratmetern berechnet und als flächenbezogene SOLL-Größe herangezogen. Die IST-Wassermenge wurde anschließend aus der tatsächlich gewogenen Wassermenge in den Regenmessern und der gesamten Auffangoberfläche aller eingesetzten Messbecher ermittelt. Durch den Vergleich von theoretischer SOLL-Wassermenge und gemessener IST-Wassermenge ließ sich der prozentuale Wasserverlust berechnen, der hauptsächlich auf Verdunstung und feiner Verwehungen an Sprühnebel von den Messbechern zurückzuführen ist. Bei genauerer Betrachtung ist das die gleiche Vorgehensweise wie Playán et al. (2005) in Gleichung (15) die eigenen Wasserverluste berechnen.

Im zweiten Schritt wurde ergänzend der Wasserverlust durch Abdrift aus der wirksamen Arbeitsbreite der Beregnungsmaschinen erfasst, um jene Wasseranteile zu quantifizieren, die zwar innerhalb des Messfeldes niedergehen, jedoch außerhalb der Zielfläche und somit möglicherweise außerhalb des für die Kultur relevanten Bereichs abregnen. Hierfür wurde für jeden Versuch zunächst die mittlere aufgefangene Wassermenge über alle Regenmesser berechnet. Anschließend wurde ermittelt, welche Regenmesser mindestens fünfzig Prozent dieses Mittelwertes erreichten. Die so identifizierten Messpunkte repräsentieren den Bereich mit ausreichender und als zielgerichtet anzusehender Wasserapplikation und bildeten die Grundlage zur Bestimmung der effektiven Arbeitsbreite des jeweiligen Beregnungssystems. Diese Arbeitsbreite wurde virtuell mittig über die Versuchsfläche gelegt, um den Einfluss wechselnder Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, da die maximale Wasserabgabe in der Praxis häufig in Richtung des vorherrschenden Windes verschoben ist. Alle Wassermengen, die in Regenmessern außerhalb dieser definierten Arbeitsbreite aufgefangen wurden, wurden als Abdriftverluste klassifiziert.

Zur quantitativen Bewertung des Einflusses meteorologischer Größen auf die Wasserverluste wurden für beide Beregnungssysteme getrennte lineare Regressionsmodelle gebildet. Als abhängige Variablen gingen dabei sowohl die Abdriftverluste als auch die Gesamtverluste in die Auswertung ein, jeweils separat für den Starkregner und den Düsenwagen. Als erklärende Größen wurden die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Nettokurzwellenstrahlung, die Nettolangwellenstrahlung, die globale Kurzwellenstrahlung, die aktuelle Windgeschwindigkeit, die

maximale Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, die Referenzverdunstung nach Penman, die Picheverdunstung sowie die Kenngrößen der Wasserverteilung Distribution Uniformity und Christiansen Koeffizient berücksichtigt. Aus jedem einfachen linearen Regressionsmodell wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 als Maß für die Stärke des Zusammenhangs zwischen Wasserverlusten und der jeweiligen meteorologischen Einheit abgeleitet.

4 Ergebnis

4.1 Ergebnisse des Starkregners

4.1.1 Übersicht über die Versuchsbedingungen

Die Beregnungsdauer der einzelnen Durchgänge mit dem Starkregner lag zwischen 2 Stunden 36 Minuten (9. Starkregner, 02.09.) und 3 Stunden 30 Minuten (8. Starkregner, 02.09.). Im Mittel betrug die Beregnungslänge damit rund 3 Stunden und 11 Minuten. Die Zeitspanne zwischen Beregnungsende und dem vollständigen Ablesen der Regenmesser lag je nach Versuch zwischen 8 und 22 Minuten. Diese Ablesezeit ist insbesondere im Kontext der Verdunstungsverluste relevant, da während dieser Phase zusätzlich Wasser aus den Messbechern verdunsten kann.

Die erfasste Beregnungsbreite variiert zwischen 63 m (8. Starkregner, 02.09.) und 73 m (7. Starkregner, 28.08.) bei einem Mittelwert von etwa 68 m. Die zugrunde gelegte Messfläche lag zwischen 3.432 m² (9. Starkregner, 02.09.) und 5.292 m² (5. Starkregner, 28.08.). Im Mittel wurden pro Durchgang rund 4.500 m² beprobt. Die Messfläche war stark abhängig von der wirksamen Arbeitsbreite.

Die gemessenen Verdunstungsraten aus den Picheauswertungen zeigten eine deutliche Variation. Sie erstreckten sich von geringen Werten um 0,49 mm*h⁻¹ (6. Starkregner, 28.08.) bis hin zu maximal 2,1 mm*h⁻¹ (2. Starkregner, 23.08.). Die durchschnittliche Verdunstungsrate lag über allen Durchgängen etwa bei 1,06 mm*h⁻¹. Eine Übersicht über alle Daten der zehn Versuchsdurchgänge des Starkregners sind in Anhang 1 zu finden (vgl. Tab. A 1).

4.1.2 Ausgebrachte und gewogene Wassermenge

Die mit dem Starkregner ausgebrachte Wassermenge variiert mit jedem Versuchsdurchgang. Bei dem 9. Durchgang am 02.09. wurden mit 102,1 m³ am wenigsten Wasser verwendet und bei dem 8. Versuch am 02.09. mit 136,4 m³ am meisten. Der Mittelwert betrug rund 125,1 m³ Wasser je Versuchsdurchgang.

Die in den Regenmessern aufgefangenen Wassermengen lagen zwischen 7,825 l (5. Starkregner, 28.08.) und 9,477 l (6. Starkregner 28.08.) mit einem Mittelwert von etwa 8,8 l. Im Verhältnis zur insgesamt ausgebrachten Wassermenge erscheint die aufgefangene Menge zwar sehr gering, dies ist jedoch methodisch bedingt, da die Messbecher lediglich eine repräsentative Teilfläche der Gesamtberegnung erfassen.

Entscheidend ist daher weniger die absolute in den Regenmessern erfasste Wassermenge, sondern vielmehr das Verhältnis von ausgebrachter Wassermenge zur theoretisch erwarteten Menge in den Messgefäßen sowie die räumliche Verteilung des Niederschlags über die Arbeitsbreite. Diese Größen werden im Folgenden über die Wasserverluste und Verteilungskriterien beschrieben.

Ergänzend zu den absoluten Auffangmengen wurden im Rahmen der zehn Versuche die durchschnittlichen Füllstände der Regenmesser ausgewertet. Die ermittelten Füllhöhen lagen zwischen 19,19 mm (5. Starkregner, 28.08.) und 29,06 mm (8. Starkregner, 02.09.) und zeigten somit eine deutliche Spannweite zwischen den einzelnen Beregnungsdurchgängen. Der über alle Versuche berechnete mittlere Füllstand betrug 23,9 mm.

4.1.3 Gemessene Wasserverluste

Wasserverlust durch Verdunstung und feine Verwehungen

Die aus der Differenz zwischen theoretisch zu erwartender und tatsächlich gemessener Auffangmenge ermittelten Wasserverluste durch Verdunstung und feine Verwehungen lagen zwischen 4,2 % (6. Starkregner, 23.08.) und 21 % (5. Starkregner, 28.08.). Im Mittel gingen etwa 11,3 % des Wassers, das rechnerisch in den Regenmessern hätte enthalten sein sollen, verloren (vgl. Tab. 5).

Tab. 5: Übersicht der Wasserverluste durch Verdunstung und feine Verwehungen der zehn Versuche des Starkregners in Prozent

Versuchsdurchgang	Wasserverlust in %
1. Versuch (23.08.)	4,5
2. Versuch (23.08.)	4,8
3. Versuch (27.08.)	15
4. Versuch (27.08.)	12,6
5. Versuch (28.08.)	21
6. Versuch (28.08.)	4,2
7. Versuch (28.08.)	15,8
8. Versuch (02.09.)	5,9
9. Versuch (02.09.)	18,2
10. Versuch (02.09.)	10,5
Mittelwert:	11,3

Wasserverlust durch Abdrift aus der Arbeitsbreite

Zusätzlich zu den Verdunstungsverlusten wurden die Abdriftverluste aus der definierten Arbeitsbreite quantifiziert. Die so ermittelten Verluste lagen zwischen 2,5 % (8. Starkregner, 02.09.) und 30,14 % (1. Starkregner, 23.08.) (vgl. Tab. 6). Im Mittel betrug der Abdriftanteil etwa 9,1 %. Während die Mehrzahl der Versuche relativ niedrige Abdriftwerte im Bereich von etwa 4 - 7 % aufwiesen, fiel insbesondere der erste Versuch mit 30,14 % deutlich aus dem Rahmen. Hier hat ein erheblicher Anteil

des Niederschlags die Arbeitsbreite des Starkregners verlassen und ist außerhalb der Zielzone zu Boden gegangen.

Tab. 6: Übersicht der Wasserverluste durch Abdrift aus der Arbeitsbreite der zehn Versuche des Starkregners in Prozent

Versuchsdurchgang	Wasserverlust in %
1. Versuch (23.08.)	30,1
2. Versuch (23.08.)	20
3. Versuch (27.08.)	5
4. Versuch (27.08.)	6,9
5. Versuch (28.08.)	6,1
6. Versuch (28.08.)	7,2
7. Versuch (28.08.)	4,8
8. Versuch (02.09.)	2,5
9. Versuch (02.09.)	4,6
10. Versuch (02.09.)	4,1
Mittelwert:	9,1

4.1.4 Wasserverteilung über die Arbeitsbreite

Die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung wurde mithilfe der Kenngrößen Distribution Uniformity (DU) und Christiansen Koeffizienten (CU) bewertet. Beide Parameter beschreiben die räumliche Verteilung der in den Regenmessern erfassten Wassermengen entlang der Beregnungsbreite.

Die Distribution Uniformity wies Werte zwischen 9,8 % (1. Starkregner, 23.08.) und 41,65 % (8. Starkregner, 02.09.) auf. Der Mittelwert betrug etwa 24,9 % (vgl. Abb. 26).

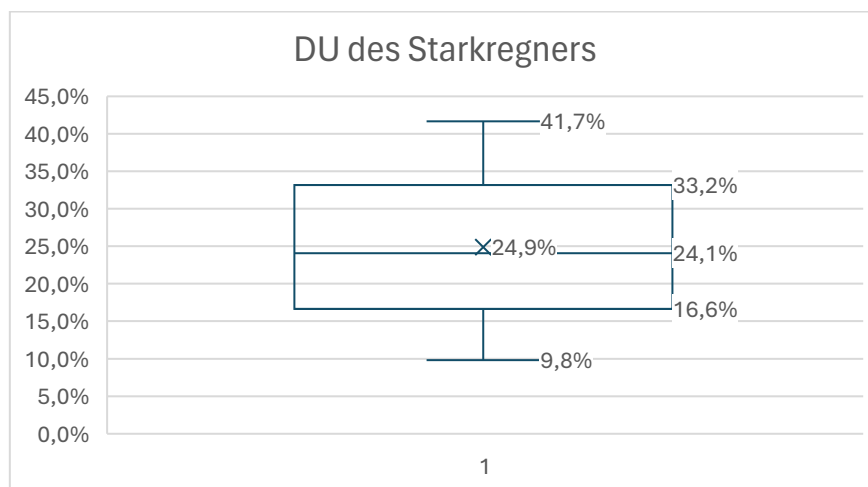


Abb. 26: Übersicht des Distribution Uniformity der zehn Versuche des Starkregners in Prozent.

Der Christiansen Koeffizient lag zwischen 4,56 % (9. Starkregner, 02.09.) und 66,3 % (8. Starkregner, 02.09.), mit einem Mittelwert von rund 51,3 % (vgl. Abb. 27).

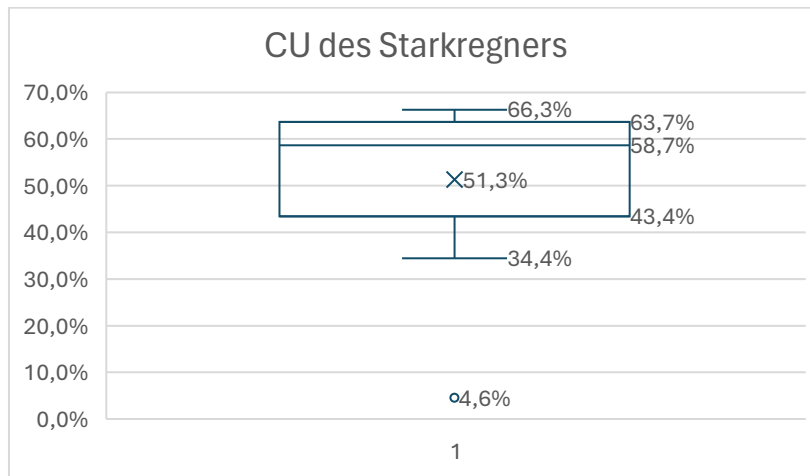


Abb. 27: Übersicht der Christiansen Koeffizienten der zehn Versuche des Starkregners in Prozent.

4.2 Ergebnisse des Düsenwagens

4.2.1 Übersicht über die Versuchsbedingungen

Die Beregnungsdauer der Versuche mit dem Düsenwagen lag zwischen 21 Minuten (9. Düsenwagen, 02.09.) und 32 Minuten (1. Düsenwagen, 27.08.). Damit konzentrieren sich die Einsätze des Düsenwagens auf deutlich kürzere Zeiträume als die Versuche mit dem Starkregner.

Die Zeitspanne zwischen Beregnungsende und Ablesen der Regenmesser bewegte sich, sofern dokumentiert, in einem Bereich von 6 bis 13 Minuten und war damit wieder kürzer als bei den Versuchen des Starkregners. Dies lässt sich auf die schmalere Arbeitsbreite zurückführen, da weniger Regenmesser abgelesen werden mussten. Die vergleichsweise kurzen Intervalle zwischen Beregnung und Erfassung der Messwerte könnten sich tendenziell günstig auf die Höhe der Verdunstungsverluste auswirken, da die Wasseroberfläche in den Messbechern nur für eine begrenzte Zeit der Atmosphäre ausgesetzt ist.

Die Arbeitsbreite des Düsenwagens betrug in nahezu allen Versuchen 49 m. Lediglich im ersten, siebten und achten Versuch wurden 48 bzw. 51 m ermittelt. Die zugrunde liegenden Messflächen lagen je nach Versuch zwischen 651 m² und knapp 996 m² und damit deutlich unter den Messflächen der Starkregner Versuche.

Die aus den Pichemessungen abgeleiteten Verdunstungsraten bewegten sich in einem Bereich von 0,62 mm*h⁻¹ (5. Düsenwagen, 28.08.) bis 1,4 mm*h⁻¹ (9. Düsenwagen, 02.09.). Im Mittel ergab sich eine Verdunstungsrate von 0,87 mm*h⁻¹. Die durchschnittliche Verdunstungsrate über alle

Durchgänge lag etwa bei $1,06 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Eine Übersicht über alle Daten der zehn Versuchsdurchgänge des Starkregners sind in Anhang 1 zu finden (vgl. Tab. A 2).

4.2.2 Ausgebrachte und gewogene Wassermenge

Die mit dem Düsenwagen ausgebrachte Wassermenge variierte mit jedem Versuch und lag zwischen $11,6 \text{ m}^3$ (3. Düsenwagen, 27.08.) und $17,3 \text{ m}^3$ (1. Düsenwagen 27.08.). Die durchschnittliche Niederschlagsgabe lag bei $13,58 \text{ m}^3$. Die in den Regenmessern aufgefangene Wassermenge reichte von $3,195 \text{ l}$ (9. Düsenwagen, 02.09.) bis $6,048 \text{ l}$ (1. Düsenwagen, 02.09.).

Zur besseren Einordnung wurden zusätzlich die mittleren Füllhöhen je Regenmesser ermittelt. Diese Mittelwerte reichten von $12,28 \text{ mm}$ (9. Düsenwagen, 02.09.) bis $19,48 \text{ mm}$ (1. Düsenwagen, 27.08.). Somit wurden im Durchschnitt $14,59 \text{ mm}$ aufgefangen und lag damit unter den Werten, die mit dem Starkregner gemessen wurden.

4.2.3 Gemessene Wasserverluste

Wasserverlust durch Verdunstung und feine Verwehungen

Von besonderem Interesse für die Bewertung der Bewässerungseffizienz sind die berechneten Wasserverluste. Die Verluste durch Verdunstung und feinen Verwehungen, welche aus dem Vergleich von theoretisch zu erwartender SOLL-Wassermenge und tatsächlich gemessener IST-Wassermenge abgeleitet wurden, zeigten ein breites Spektrum. Die berechneten Werte reichten von negativen Verlusten in Höhe von $20,35 \%$ (1. Düsenwagen, 02.08.) bis hin zu positiven Verlusten von $27,74 \%$ (9. Versuchen, 02.09.) (vgl. Tab. 7). Die negativen Werte bedeuten, dass die gemessene Wassermenge in den Regenmessern geringfügig über der theoretisch berechneten SOLL-Wassermenge lag. Dies ist nicht im physikalischen Sinne als Zugewinn zu interpretieren, sondern spiegelt Mess- und Berechnungsunsicherheit wieder. In den übrigen Versuchen lagen die Verluste durch Verdunstung und feine Verwehungen im Bereich von etwa $6,9 \%$ (4. Düsenwagen, 27.08.) bis $27,7 \%$ (9. Düsenwagen, 02.09.). Im Durchschnitt beliefen sich die Wasserverluste auf ca. $5,6 \%$.

Tab. 7: Übersicht der Wasserverluste durch Verdunstung und feine Verwehungen der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent

Versuchsdurchgang	Wasserverlust in %
1. Versuch (27.08.)	-20,4
2. Versuch (27.08.)	-12,9
3. Versuch (27.08.)	7,6
4. Versuch (27.08.)	6,9
5. Versuch (28.08.)	-12,2
6. Versuch (28.08.)	10,7
7. Versuch (28.08.)	17,6
8. Versuch (02.09.)	18,8
9. Versuch (02.09.)	27,7
10. Versuch (02.09.)	11,9
Mittelwert:	5,6

Wasserverlust durch Abdrift aus der Arbeitsbreite

Die Verluste durch Abdrift aus der definierten Arbeitsbreite waren bei allen Versuchen mit dem Düsenwagen relativ gering. Sie lagen zwischen 1,52 % (1. Düsenwagen, 27.08.) und 5,68 % (8. Düsenwagen, 02.09.), mit einem Mittelwert von 3,2 % (vgl. Tab. 8).

Tab. 8: Übersicht der Wasserverluste durch Abdrift aus der Arbeitsbreite der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent

Versuchsdurchgang	Wasserverlust in %
1. Versuch (27.08.)	1,5
2. Versuch (27.08.)	2,8
3. Versuch (27.08.)	2,5
4. Versuch (27.08.)	2,6
5. Versuch (28.08.)	2,7
6. Versuch (28.08.)	2,7
7. Versuch (28.08.)	4,5
8. Versuch (02.09.)	5,7
9. Versuch (02.09.)	4,7
10. Versuch (02.09.)	2,7
Mittelwert:	3,2

4.2.4 Wasserverteilung über die Arbeitsbreite

Die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung über die Arbeitsbreite wurde wie beim Starkregner anhand der Kenngrößen Distribution Uniformity und Christiansen Koeffizienten bewertet. Die Werte für die Distribution Uniformity lagen zwischen 31,1 % (2. Düsenwagen, 27.08.) und 37 % (6. Düsenwagen, 28.08.). In allen Versuchen wurde damit eine ähnliche Verteilungsqualität erreicht, ohne dass extreme Ausreißer nach oben oder unten auftraten. Der Mittelwert der Distribution Uniformity lag bei 34,9 % (vgl. Abb. 28).

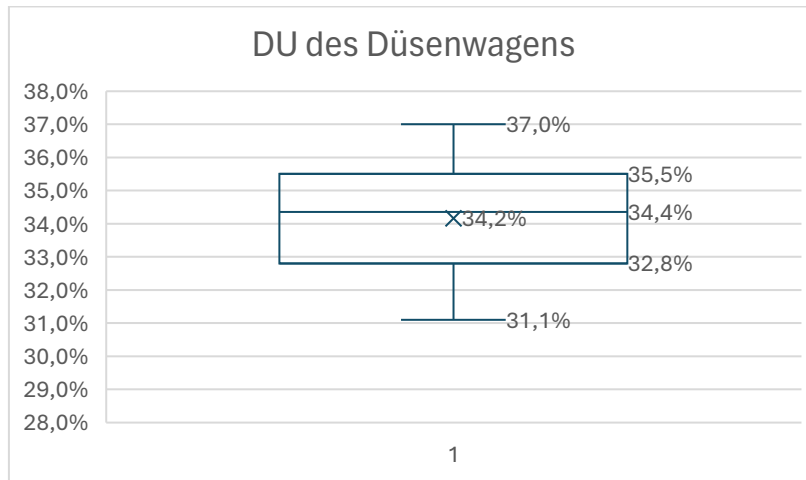


Abb. 28: Übersicht der Distribution Uniformity der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent.

Die Christiansen Koeffizienten bewegten sich zwischen 62 % (2. Düsenwagen, 27.08.) und 66,1 % (7. Düsenwagen, 28.08.). Diese relativ homogenen Ergebnisse zeigen, dass der Düsenwagen über alle Versuche hinweg eine stabile Verteilungsqualität aufwies. Der Mittelwert betrug 64,1 % (vgl. Abb. 29).

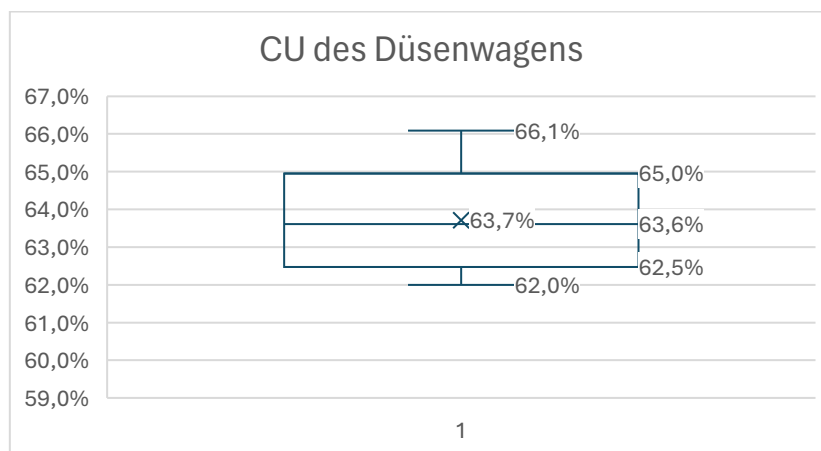


Abb. 29: Übersicht der Christiansen Koeffizienten der zehn Versuche des Düsenwagens in Prozent.

4.3 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Die Ergebnisse der Regressionsrechnungen wurden tabellarisch zusammengefasst (vgl. Tab. 9). Die Tabelle enthält in der ersten Spalte die betrachtete meteorologische Größe. In den folgenden vier Spalten sind die jeweiligen R^2 -Werte für die Kombinationen Abdriftverlust Starkregner, Verdunstung und feine Verwehungen Starkregner, Abdriftverlust Düsenwagen und Verdunstung und feine Verwehungen Düsenwagen dargestellt. In einer weiteren Spalte wurde eine Summe gebildet, welche die insgesamt physikalisch plausiblen Zusammenhänge pro meteorologischer Größe abbilden soll. Dabei wurden nur diejenigen R^2 -Werte in die Summe einbezogen, deren Regressionsverlauf in die erwartete Richtung zeigte. Regressionsbeziehungen, die mit einem graphischen Verlauf klar gegenläufig bzw. meteorologisch nicht plausiblen Zusammenhang waren, wurden in der Tabelle farblich rot markiert und bei Bildung der Summe bewusst nicht berücksichtigt. Zum Beispiel, dass etwa mit steigender Temperatur oder Windgeschwindigkeit eine Verringerung der Verdunstungs- oder Abdriftverluste berechnet wurde.

Die Spaltensumme dient somit weniger der statistischen Prüfung im engeren Sinn, als der Einordnung, welche meteorologische Größen über beide Berechnungssysteme und Verlustarten hinweg konsistent und physikalisch nachvollziehbar mit den Wasserverlusten verknüpft sind. Um die Interpretation der Tabelle weiter zu erleichtern, wurden zudem für jedes Berechnungssystem und jede meteorologische Größe die jeweils höchsten plausiblen Korrelationen zwischen Wasserverlust und erklärender Variable in der Tabelle unterstrichen (vgl. Tab. 9). Diese Hervorhebung zeigt auf einen Blick, welche Kombinationen von Berechnungssystemen und meteorologischer Größe den stärksten erklärbaren Anteil an der Variabilität der Abdrift bzw. der Verdunstung aufweisen.

Tab. 9: Bestimmtheitsmaß R^2 für die Zusammenhänge zwischen meteorologischen Parametern und dem Wasserverlust der verschiedenen Berechnungssysteme

Meteorologische Einheit	Starkregner		Düsenwagen		Summe
	Abdrift	Verdunstung	Abdrift	Verdunstung	
Temperatur	0,0147	0,0365	0,0046	0,3168	0,3361
Rel. Luftfeuchtigkeit	0,1337	0,058	0,0685	0,0717	0,2054
Nettokurzwellen	0,0585	0,0103	0,0639	0,169	0,0585
Nettolangwellen	0,0839	0,0553	0,2021	0,0333	0,3193
Globale Kurzwellen	0,0663	0,0113	0,0776	0,1852	0,0663
Windgeschwindigkeit	0,7124	0,3557	0,1824	0,6405	1,891
Windrichtung	0,4704	0,0638	0,3438	0,145	0,5526
Max. Windgeschwindigkeit	0,8035	0,3907	0,0092	0,3682	1,1809
Penman	0,196	0,1515	0,0024	0,2567	0,4527
Picheverdunstung	0,8201	0,3111	0,2731	0,4926	1,5858
Distribution Uniformity	0,5431	-0,0987	-0,0899	-0,2176	0,1369
Christiansen Koeffizient	0,1015	0,0044	-0,0104	-0,1635	-0,068

Die Auswertung der Bestimmtheitsmaße zeigt deutliche Unterschiede zwischen den beiden Berechnungssystemen sowie zwischen den Verlustarten. Für den Starkregner weisen die Abdriftverluste die höchsten R^2 Werte gegenüber der Picheverdunstung auf, mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8201. Ebenfalls sehr hohe Zusammenhänge ergeben sich zur maximalen Windgeschwindigkeit mit 0,8035 sowie zur aktuellen Windgeschwindigkeit mit 0,7124. Der geringste Zusammenhang der Abdriftverluste des Starkregners zeigt sich zur Temperatur. Für die Verdunstungsverluste des Starkregners erreicht die Windgeschwindigkeit mit einem R^2 von 0,3557 zwar den höchsten Wert, dieser ist jedoch im Vergleich zu den Abdriftverlusten deutlich niedriger. Die geringste Korrelation ergibt sich hier zur Windrichtung mit 0,0638. Auffällig ist, dass für die Verdunstungsverluste des Starkregners mehrere Regressionsbeziehungen mit einer negativen Steigung beobachtet wurden, die meteorologisch nicht plausibel sind und daher bei der Summenbildung nicht berücksichtigt wurden.

Beim Düsenwagen zeigt sich ein abweichendes Muster. Für die Abdriftverluste erreicht die Windrichtung mit einem R^2 von 0,3438 den höchsten Wert, wenngleich dieser insgesamt nur als moderat einzustufen ist. Der geringste Zusammenhang der Abdriftverluste des Düsenwagens findet sich wiederum zur Temperatur mit einem R^2 von 0,0046. Für die Verdunstungsverluste des Düsenwagens ergibt sich der höchste Zusammenhang zur Windgeschwindigkeit mit einem R^2 von 0,6405, während die geringste Korrelation zur relativen Luftfeuchtigkeit vorliegt.

Der Zusammenhang zwischen Wasserverlusten und der Wasserverteilung, ausgedrückt über den Distribution Uniformity und den Christiansen Koeffizienten, stellt einen Sonderfall dar. Hier lässt sich nicht eindeutig vorhersagen, ob eine höhere Gleichmäßigkeit der Verteilung mit höheren oder niedrigeren Verlusten einhergeht. Entsprechend traten graphisch sowohl steigende als auch fallende Korrelationen auf. Um diese Ambivalenz sichtbar zu machen, wurden Konstellationen, in denen eine bessere Wasserverteilung mit höheren Wasserverlusten einherging, in der Tabelle gesondert gekennzeichnet und mit einem negativen Vorzeichen in die Summenbildung einbezogen. Insgesamt ergaben sich für die Verteilungsgrößen keine durchgehend hohen und konsistenten R^2 -Werte über beide Systeme und Verlustarten hinweg.

5 Diskussion

Insgesamt zeigen die Messdaten dass beide Systeme charakteristische Muster von Verdunstung, feiner Verwehungen und Abdrift aufweisen, die sich sowohl in ihrer Größenordnung als auch in ihrer meteorologischen Abhängigkeit klar unterscheiden. Die Analyse der Verteilungsgleichmäßigkeit verdeutlicht zudem deutliche strukturelle Unterschiede des Beregnungsbildes. Diese Resultate bilden die Grundlage für einen direkten Vergleich der Systeme und deren Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext.

5.1 Abdriftverluste

Die Abdriftverluste zeigen ein deutliches Differenzierungsmerkmal zwischen beiden Systemen. Der Starkregner erreichte im Mittel einen Abdriftverlust von 9,1 %, während der Düsenwagen lediglich einen Mittelwert von etwa 3,2 % aufwies (vgl. Abb. 30).

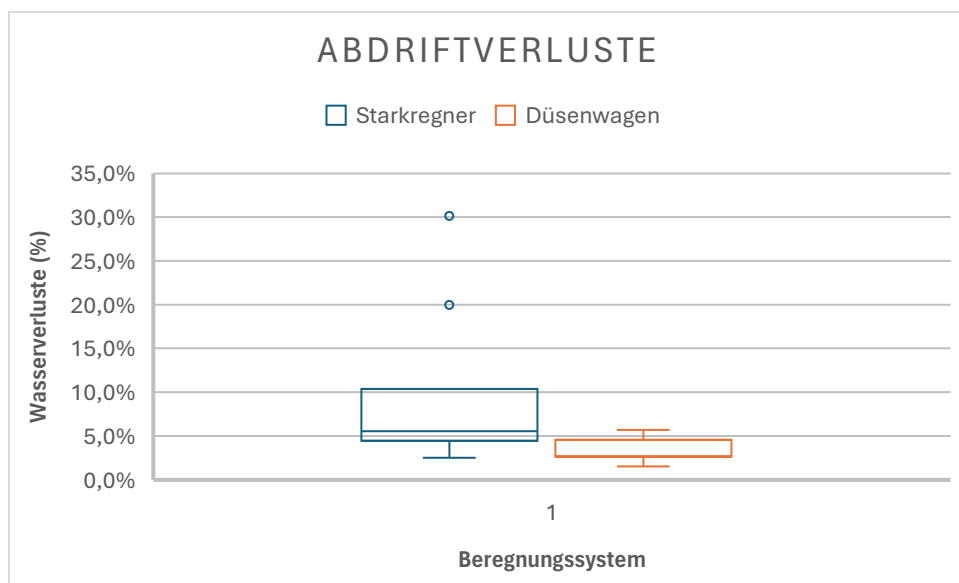


Abb. 30: Boxplot der Abdriftverluste bei der Beregnung mit dem Starkregner und dem Düsenwagen.

Auch die Spannweite der Messwerte bestätigt dieses Bild. Der höchste Abdrift beim Starkregner lag bei 30,1 %, während er beim Düsenwagen nicht über 5,7 % hinausging. Der Düsenwagen blieb sowohl im Maximum als auch im Minimum deutlich unter den Werten des Starkregners (vgl. Abb. 30). Der durchschnittliche Abdriftverlust des Düsenwagens ist damit um etwa zwei Drittel geringer.

Die meteorologischen Abhängigkeiten unterstreichen die starke Empfindlichkeit des Starkregners gegenüber dem Wind. Die Korrelation zwischen Abdrift und Windgeschwindigkeit erreichte ein R^2 von 0,71, während die maximale Windgeschwindigkeit sogar einen Zusammenhang von 0,8 aufwies. Eine mögliche Erklärung dazu wäre die enorme Flugbahn des Wassers beim Starkregner, die über dreißig Meter beträgt. Während dieser Flugphase kann der Wind die Tropfen erheblich seitlich

verlagern. Dennoch zeigt sich, dass die Windrichtung beim Düsenwagen mit 0,34 den größten Einfluss ausübt. Beim Starkregner zeigte zudem die Picheverdunstung die höchste Korrelation mit den Abdriftverlusten bei einem R^2 von 0,82, was darauf hindeutet, dass die Verdunstung während der Flugphase des Wassers einen relevanten Beitrag zur Minderung der erreichten Wassermenge liefert.

5.2 Verdunstung und Verwehung

Der Starkregner weist mit einem mittleren Verlust von etwa 11,3 % (vgl. Tab. 5) eine mehr als doppelt so hohe Verdunstungsrate und Verwehungsrate als der Düsenwagen auf, dessen durchschnittliche Verluste bei etwa 5,6 % lagen (vgl. Tab. 7). Die maximale Spannweite ist bei beiden Systemen beträchtlich, wobei die höchsten Verluste beim Starkregner bei 21 % und beim Düsenwagen bei 27,7 % lagen (vgl. Abb. 31).

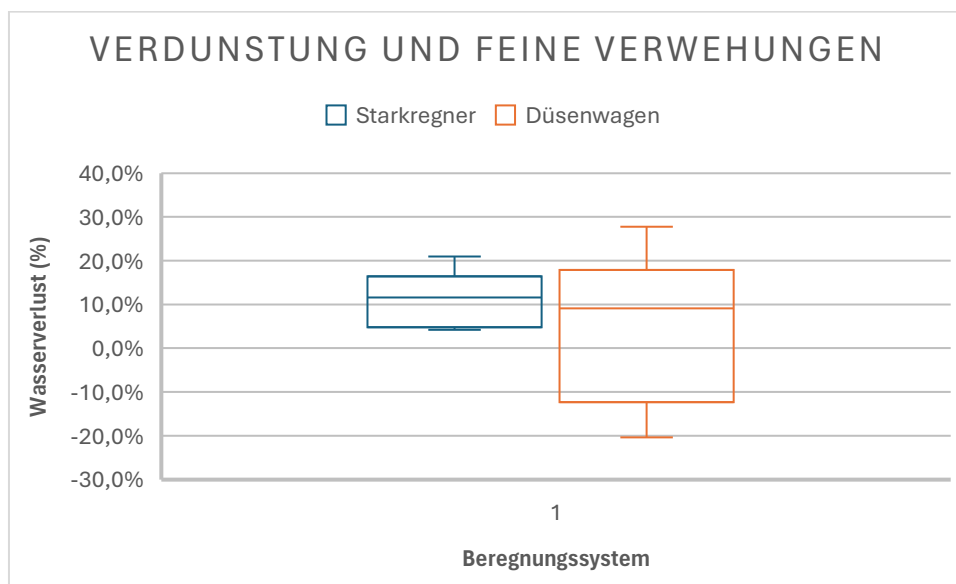


Abb. 31: Boxplot der Verdunstung und feinen Verwehungen bei der Beregnung mit dem Starkregner und dem Düsenwagen.

Auffällig sind die negativen Werte beim Düsenwagen die bis zu – 20,4 % reichten. Diese negativen Werte sind, wie in Kapitel 4.2.3 erwähnt, physikalisch nicht als Wassergewinn zu interpretieren, sondern spiegeln Messunsicherheiten wider, etwa durch leichte Abweichungen bei der Erfassung der ausgebrachten Wassermenge oder zufällige Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Messfläche. Eine Streichung dieser Werte erschien nicht gerechtfertigt, da die Versuchsabläufe den übrigen Durchgängen entsprachen und somit keine sachliche Grundlage für eine selektive Ausblendung der Daten bestand. Vielmehr deuten sie an, dass die Verdunstungsverluste gering waren und unter bestimmten Bedingungen durch Messunsicherheiten überlagert wurden.

Der Vergleich der beiden Systeme macht deutlich, dass der Düsenwagen trotz einzelner hoher Messwerte insgesamt weniger empfindlich gegenüber Verdunstung und feiner Verwehung ist. Seine mittleren Verluste liegen nur bei etwa der Hälfte der Werte des Starkregners. Die Analyse der

meteorologischen Einflussgrößen deutet ähnliches an. Während beim Düsenwagen ein nachvollziehbarer und moderater Zusammenhang zwischen der Picheverdunstung und den erfassten Verlusten identifiziert werden konnte, zeigte der Starkregner kein konsistentes oder positives Korrelationsmuster. Vielmehr verliefen nahezu alle untersuchten meteorologischen Parameter wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit sowie kurzwellige und langwellige Strahlung in einem negativen Zusammenhang zu den gemessenen Verlusten. Dies erschwert die Interpretation und deutet darauf hin, dass der Einfluss dieser Faktoren durch andere Rahmenbedingungen überlagert wurde. Beim Düsenwagen hingegen zeigte sich ein klarer, wenn auch moderater Einfluss der Picheverdunstung mit einem R^2 von 0,49, was innerhalb der Kategorie Verdunstung und feine Verwehungen den zweithöchsten Wert darstellte. Darüber hinaus wies die Windgeschwindigkeit mit einem R^2 von 0,64 die stärkste Verbindung zu den Verlusten des Düsenwagens auf. Beim Starkregner war die Windgeschwindigkeit zwar ebenfalls die meteorologische Größe mit dem vergleichsweise höchsten Einfluss, jedoch fiel der Korrelationswert mit 0,36 deutlich geringer aus. Dies unterstreicht die eingeschränkte Aussagekraft der meteorologischen Parameter für das Verhalten des Starkregners in den vorliegenden Messungen.

5.3 Bedeutung meteorologischer Einflüsse für beide Systeme

Die Summierung der Korrelationen sämtlicher meteorologischer Parameter zeigt für beide Systeme ein eindeutiges Bild. Die höchsten Gesamteinflüsse hatten die Windgeschwindigkeiten, gefolgt von der Picheverdunstung und der maximalen Windgeschwindigkeit. Dies bestätigt, dass Wind in seinen verschiedenen Ausprägungen der dominierende Einflussfaktor auf die Wasserverluste beider Systeme ist, insbesondere jedoch für den Starkregner.

5.4 Einordnung der Ergebnisse in den Kontext der Literatur

Bevor die Messergebnisse dieser Arbeit im Kontext der Literatur eingeordnet wurden, musste berücksichtigt werden, dass nur wenige Studien identische Systeme untersuchten, die in ihrer technischen Ausführung vollständig mit den in dieser Arbeit eingesetzten Geräten übereinstimmten. Viele Veröffentlichungen konzentrieren sich auf Einzelregner, Pivot- oder Linearberegnungsanlagen, die sich technisch vom Düsenwagen oder dem Starkregner unterscheiden. Aufgrund dieser heterogenen Studienlage war ein direkter Vergleich der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich. Dennoch wurden die verfügbaren Daten herangezogen, um grundlegende Muster der Wasserverluste abzuleiten und die Messwerte dieser Untersuchung in einen breiteren wissenschaftlichen Kontext einzuordnen. Die Gegenüberstellung von Einzelregnern und Starkregnern sowie von Pivotalanlagen und Düsenwagensystemen stellte somit eine notwendige Annäherung dar, um unterschiedliche technische Ausführungen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede hinsichtlich Verdunstung und Abdrift analysieren zu können.

5.4.1 Vergleich mit der Literatur zum Starkregnern

Die in dieser Arbeit gemessenen Wasserverluste ließen sich insgesamt schlüssig in den Kontext der vorhandenen Literatur einordnen, auch wenn sich im Detail deutliche Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Systemen und den in der Literatur beschriebenen Versuchsanordnungen zeigten. Wie in Tab. 2 dargestellt, wurde in allen dort aufgeführten Studien die Windgeschwindigkeit als zentrale Einflussgröße auf die Wasserverluste identifiziert. Dieses Bild bestätigt sich in der vorliegenden Untersuchung, da sowohl beim Starkregner, als auch beim Düsenwagen die Windgeschwindigkeit und die maximale Windgeschwindigkeit zu den meteorologischen Größen mit den höchsten Bestimmtheitsmaßen gehörten.

Der Starkregner war besonders gut vergleichbar mit der Dissertation von Hartmann (1992), der ebenfalls einen Starkregner an einer Trommelberegnungsmaschine unter Freilandbedingungen einsetzte und direkte Wasserverluste zwischen etwa – 2 % und rund 14 % berichtete. Damit lagen seine maximalen Verluste zwar etwas unter denen in dieser Arbeit beobachteten Höchstwerte, die Größenordnung stimmte jedoch überein..

Tarjuelo et al. (2000) beschrieb für Einzelsprinkler und Blockberegnung ebenfalls Wasserverluste, die in einer ähnlichen Größenordnung wie in der vorliegenden Arbeit lagen, allerdings mit einer deutlich größeren Spannweite bis über 20 % hinaus und einem mittleren Wasserverlust von etwa 13 %. Als wesentliche Einflussgröße wurden neben der Windgeschwindigkeit auch der Arbeitsdruck und das Dampfdruckdefizit genannt. Diese Parameter wurden in dieser Arbeit nicht systematisch als Einflussfaktor untersucht.

Deutlich niedrigere Wasserverluste als in der vorliegenden Untersuchung berichteten hingegen die Studien von van den Eertwegh et al. (2020) und McLean et al. (2000). Die Autoren van den Eertwegh et al. (2020) ermittelten Verdunstungsverluste von 2 bis 6 %. Die Sonneneinstrahlung soll im Vordergrund der Verdunstungsprozesse stehen, während der Wind vor allem den Abdrift beeinflusste. In der vorliegenden Arbeit zeigte die Korrelationsanalyse dagegen, dass nach den Bestimmtheitsmaßen die Windgeschwindigkeit sowohl für die Verdunstung mit feinen Verwehungen als auch für den Abdrift eine dominierende Rolle spielte, während die kurzwellige Strahlung keinen ausgeprägten Einfluss auf die Wasserverluste erkennen ließ. McLean et al. (2000) berichtete für den Starkregner Verdunstungsverluste von etwa 4 bis 6 % und ordnete diese Verluste ebenfalls in erster Linie der Windgeschwindigkeit zu, was der in dieser Arbeit beobachteten Bedeutung des Windes entsprach, jedoch bei insgesamt geringerer Verlusthöhe.

Zusammenfassend ließ sich der Starkregner dieser Arbeit somit in das von der Literatur beschriebene Spektrum einordnen. Die gemessenen Verluste lagen tendenziell eher am oberen Rand der berichteten Werte, blieben jedoch in der von anderen Autoren dokumentierten Spannweite.

5.4.2 Vergleich mit der Literatur zum Düsenwagen

Für den Düsenwagen ergab sich im Vergleich zur Literatur ein heterogeneres Bild. Die in dieser Arbeit ermittelten mittleren Verluste durch Verdunstung und feine Verwehungen von rund 5,6 % lagen deutlich unter den Werten, die in mehreren Studien für Düsen- und Sprühanlagen beschrieben wurden. Playán et al. (2005) berichteten bei Nachtversuchen von Mittelwerten von etwa 8,5 % und tagsüber von rund 15,4 %, womit seine Ergebnisse sowohl nachts als auch tagsüber über den in dieser Arbeit gemessenen Verluste lagen. Als Hauptfaktor wurde, analog zu den vorliegenden Befunden, die Windgeschwindigkeit bezeichnet. Silva (2006) ermittelte Verdunstungsverluste zwischen knapp 13 und gut 20 % bei einer Center Pivot Anlage und stellte neben der Windgeschwindigkeit insbesondere die Windrichtung als entscheidenden Einflussfaktor heraus. Auch diese Werte lagen deutlich über den in dieser Arbeit gemessenen Verlusten des Düsenwagens. Tarjuelo et al. (2000) wiederum beschrieb für Rohrberegnung mit Düsen Wasserverluste bis knapp 30 % bei einem Mittelwert von etwa 13 % und identifizierte wie schon beim Einzelregner sowohl Windgeschwindigkeit als auch Arbeitsdruck und Dampfdruckdefizit als maßgebliche Einflussgrößen. Damit überschritt sein mittlerer Wasserverlust ebenfalls die in dieser Arbeit beobachteten Werte, obgleich die Spannweite insgesamt vergleichbar war.

Demgegenüber standen Studien, die in ihrer Größenordnung näher an den Ergebnissen des Düsenwagens dieser Arbeit lagen. Besonders hervorzuheben war die Arbeit von Yazar (1984), der bei einer Rohrberegnungsanlage sowohl Evaporationsverluste als auch Driftverluste separat erfasste. Die Mittelwerte seiner Evaporationsverluste entsprachen nahezu den in dieser Arbeit bestimmten durchschnittlichen Verdunstungs- und Verwehungsverlusten, während die Spannweite bei Yazar(1984) insgesamt geringer war und keine negativen Werte auftraten. Die Höchstwerte der Verdunstung waren bei ihm fast nur halb so hoch wie die hier beobachteten Extremwerte. Die Driftverluste lagen bei Yazar (1984) dagegen im Durchschnitt um etwa zwei Prozentpunkte über den Abdriftwerten dieser Untersuchung. Insgesamt waren die kombinierten Verluste seiner Versuche etwas höher, jedoch noch im Bereich der in dieser Arbeit für den Düsenwagen gemessenen Größenordnung. Als dominierende Einflussgrößen wurden auch hier die Windgeschwindigkeit und das Dampfdruckdefizit herausgestellt, was die in der vorliegenden Untersuchung beobachtete Bedeutung des Windes stützte und zugleich darauf hinwies, dass das Dampfdruckdefizit als abgeleitete Größe des atmosphärischen Wasserangebotes eine zusätzliche Erklärungskraft besitzen könnte.

Sadeghi et al. (2015) berichteten für eine Center Pivot Anlage ebenfalls Verlustwerte, die mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar waren. Die Spannweite von etwa 5 bis 23 % umfasste die mittleren Verluste des Düsenwagens, ohne dass ein präziser Mittelwert angegeben wurde. Auch in dieser Studie wurde die Windgeschwindigkeit als wesentlicher Einflussfaktor auf die Wasserverluste bestätigt. McLean et al. (2000) schließlich ermittelte für die Center Pivot Technik mittlere

Verdunstungsverluste zwischen 2 und 3 %, die damit nur geringfügig unter den durchschnittlichen Verdunstungs- und Verwehungsverlusten des Düsenwagens in dieser Arbeit lagen. Er ordnete diese Verluste primär der Windgeschwindigkeit zu, was mit den Ergebnissen dieser Untersuchung übereinstimmte.

Insgesamt ließ sich für den Düsenwagen festhalten, dass die in dieser Arbeit bestimmten Wasserverluste meist im unteren Bereich der in der Literatur beschriebenen Spannweiten lagen, in ihrer Größenordnung jedoch durch mehrere Studien gestützt wurden. Die vergleichsweise geringen Abdriftverluste und die moderaten Verdunstungs- und Verwehungsverluste passten zu dem in der Literatur häufiger beschriebenen Befund, dass Sprühdüssensysteme und Center Pivot Anlagen im direkten Vergleich zu Einzelregnern und Starkregnern häufig geringere Wasserverluste aufweisen. Gleichzeitig zeigte der Vergleich, dass die Literatur die Trennung von Verdunstung und Abdrift nur selten vornahm, wodurch direkte Gegenüberstellungen erschwert wurden. Dennoch war erkennbar, dass die in dieser Arbeit gemessenen Werte sowohl beim Starkregner als auch beim Düsenwagen innerhalb des durch die Literatur abgesteckten Rahmens lagen, wobei Wind in allen Studien und auch in dieser Untersuchung als übereinstimmend dominanter Einflussfaktor auf die Wasserverluste bestätigt wurde.

5.5 Bewertung der Wasserverteilungsgleichmäßigkeit

Die Analyse der Wasserverteilung anhand der Kenngrößen Distribution Uniformity und Christiansen Koeffizienten zeigt, dass beide Systeme keine optimale Gleichverteilung erreichen. Besonders deutlich fällt beim Starkregner die Untersuchung der schwächsten Bereiche aus. Die Wasserverteilungskurven verdeutlichen ein charakteristisches Muster des Starkregners. Der höchste Niederschlag liegt etwa 20 m vom Regner entfernt, während die Niederschlagsmenge sowohl in Regnernähe als auch in der Mitte der Arbeitsbreite stark abnimmt (vgl. Abb. 32).

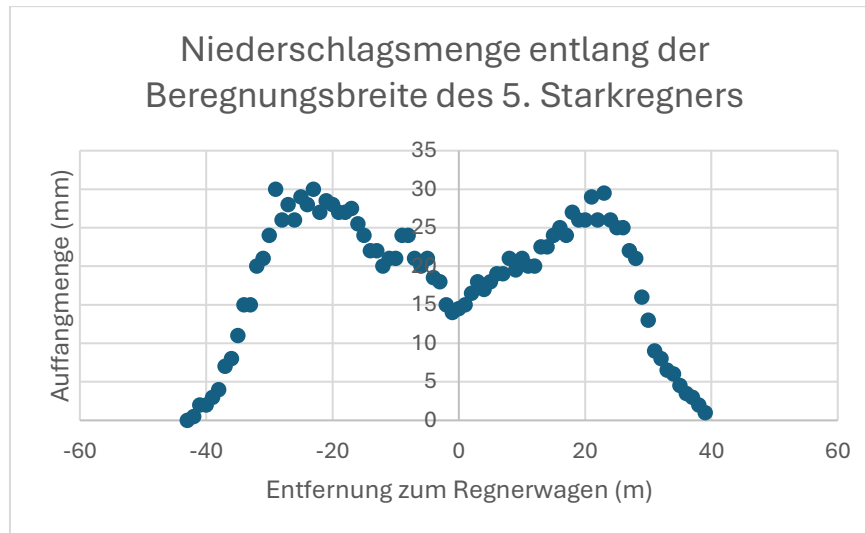


Abb. 32: Wasserverteilung des Beregnungssystems Starkregner über die komplette Arbeitsbreite.

Beim Düsenwagen zeigt sich ein abgeschwächtes, aber ähnliches Muster (vgl. Abb. 33). Die höchste Beregnungsmenge wurde in etwa 15 Metern Entfernung erfasst, während die Werte in der Mitte der Arbeitsbreite etwas absanken. Auffällig ist zudem eine geringe Asymmetrie zugunsten der linken Seite, was sich möglicherweise durch die kleinere Düsengröße auf der rechten Seite erklären lässt.

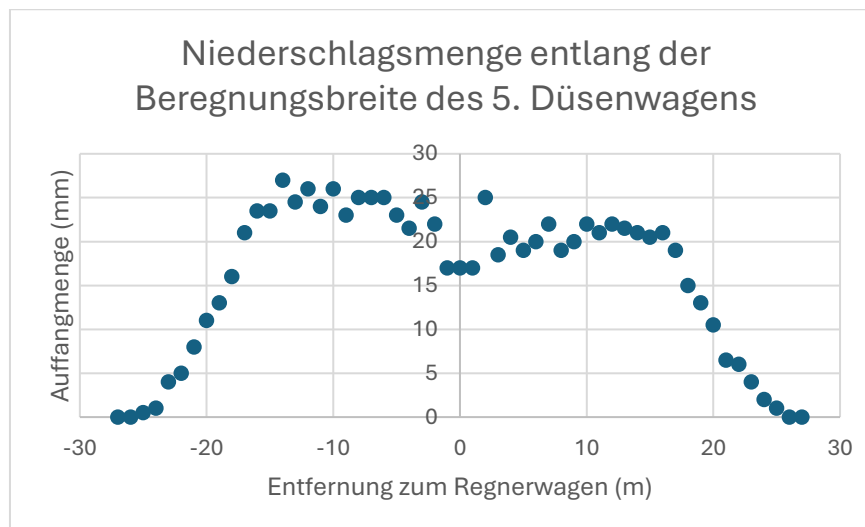


Abb. 33: Wasserverteilung des Beregnungssystems Düsenwagen über die komplette Arbeitsbreite.

Die Korrelation zwischen Wasserverteilung und Verlustgrößen zeigte jedoch nur geringe Werte. Lediglich zwischen Abdrift des Starkregners und der Distribution Uniformity konnte ein moderater Zusammenhang von 0,54 festgestellt werden. Alle weiteren Kombinationen lagen deutlich darunter, sodass eine robuste Verbindung nicht nachgewiesen werden konnte.

5.6 Beschränkung der Forschung

Die Aussagekraft der Ergebnisse wird durch verschiedene Einschränkungen begrenzt. Die Anzahl der Versuche war aufgrund zeitlicher Rahmenbedingungen limitiert. Zudem waren die Berechnungen auf die Tagesstunden zwischen 8 und 18 Uhr beschränkt, sodass wichtige Nachtbedingungen, wie geringere Temperaturen oder Windstille, nicht abgedeckt werden konnten. Weiterhin beeinflussen kurze Berechnungszeiten die Genauigkeit der Messungen, insbesondere bei der Erfassung der Wasserdurchflussmenge.

Der Vergleich mit den Literaturwerten war nur eingeschränkt möglich, da die in den Studien verwendeten Modellvarianten, Düsengrößen und Druckeinstellungen des Starkregners oder des Düsenwagens deutlich voneinander abwichen. Diese methodischen Unterschiede beeinflussten die hydraulischen Eigenschaften der Berechnungssysteme sowie die resultierenden Wasserverluste und Wasserverteilungen, wodurch eine indirekte Übertragbarkeit der Ergebnisse nur bedingt gewährleistet war.

5.7 Empfehlung für weiterführende Forschung

Für zukünftige Untersuchungen ergeben sich mehrere Optimierungsmöglichkeiten. Längere Versuchsdurchführungen würden sicherstellen, dass der Beginn der Beregnung und der Abschluss des Versuchs nicht von Verzögerungen im Wassertransport beeinflusst werden. Eine gleichbleibende Versuchsdauer würde die Vergleichbarkeit verbessern und die Bedeutung der mittleren Düse des Düsenwagens präziser einordnen lassen. Zudem sollten Durchflussmengen über länger Zeiträume gemessen werden, um Schwankungen durch manuelle Ablesezeitpunkte zu minimieren.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Vereinheitlichung der Düsengrößen und ein konstanter Druck sowie eine regelmäßige Überprüfung der Einzugsgeschwindigkeit. Darüber hinaus sollte die Anzahl der Versuche erhöht werden, insbesondere unter extremen meteorologischen Bedingungen wie hoher oder niedriger Windgeschwindigkeit, intensiver oder fehlender Sonneneinstrahlung oder Temperaturschwankungen. Nachtversuche sind besonders wichtig, da unter diesen Bedingungen nahezu keine Verdunstungsverluste auftreten sollten und somit verlässliche Referenzwerte geschaffen werden können.

Schließlich scheint die Strip-Methode von Sadeghi et al. (2015) vielversprechend, da das aufgefangene Wasser unmittelbar abgeleitet und gemessen wird. Dadurch wird die Verdunstung während des Versuchs vollständig ausgeschlossen. Eine zusätzliche Kontrolle könnte durch einen wassergefüllten Regenmesser erfolgen, der parallel zur Pichevorrichtung aufgestellt wird, um den realen Verdunstungsanteil aus dem Messbecher zu quantifizieren. Alternativ könnte zur Bestimmung der Verdunstungsverluste das Prinzip der elektrischen Leitfähigkeit genutzt werden, welches Yazar (1984) zur Untersuchung verwendete.

Die Auswertung der Versuchsreihen könnte grundsätzlich durch den Einsatz weiterer statistischer Modelle vertieft werden. In der vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich das Bestimmtheitsmaß R^2 zur Analyse potentieller Zusammenhänge zwischen meteorologischen Einflussgrößen und den gemessenen Wasserverlusten herangezogen.

Für eine weiterführende Analyse wäre es sinnvoll, zusätzliche meteorologische und prozessbezogene Einflussfaktoren in die Modellierung einzubeziehen. Insbesondere das Dampfdruckdefizit stellt in der Literatur einen zentralen Steuerfaktor der Verdunstungsprozesse dar und wird häufig als wesentliche Größe zur Erklärung von Wasserverlusten identifiziert. Auch Druckunterschiede innerhalb des Beregnungssystems gelten als relevanter Parameter für die Bewertung des Wasserverlustverhaltens.

Darüber hinaus scheint eine wirtschaftliche Bewertung der beiden Beregnungssysteme notwendig. Zwar weist der Düsenwagen nach den vorliegenden Ergebnissen Vorteile hinsichtlich der geringeren Wasserverluste und einer potenziell höheren Verteilungsgleichmäßigkeit auf. Dennoch greifen landwirtschaftliche Betriebe weiterhin häufig auf den Starkregner zurück (Riedel und Gödeke, 2022). Ein systematischer Vergleich der Investitions- und Betriebskosten, der Arbeitszeitbedarfe, der Energieeffizienz sowie der praktischen Handhabbarkeit könnte wesentliche Gründe hierfür aufzeigen.

6 Fazit

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die Bewässerungsverfahren Düsenwagen und Starkregner hinsichtlich ihrer Wasserverluste durch Verdunstung, feine Verwehungen und Abdrift vergleichend zu analysieren. Die Ergebnisse der zehn Versuchsdurchgänge je System ermöglichten eine differenzierte Betrachtung der Effizienz beider Beregnungstechniken und lieferten zugleich eine Einordnung in den bestehenden Forschungsstand.

Im Hinblick auf die Verdunstungs- und feinen Verwehungsverluste zeigte sich ein deutliches Gefälle zwischen beiden Systemen. Der Starkregner wies mit durchschnittlich 11,3 % die doppelte Verlusthöhe im Vergleich zum Düsenwagen auf, dessen mittlerer Verlust bei 5,6 % lag. Auffällig waren die teils negativen Verlustwerte des Düsenwagens, die bis zu – 20,4 % erreichten. Trotz dieser ungewöhnlichen Befunde ließen sich keine Hinweise auf grobe Messfehler oder systematisch fehlerhaftes Verhalten identifizieren, sodass die Werte in die Analyse einbezogen wurden. Ein Ausschluss hätte die Mittelwerte künstlich erhöht und damit die Aussagekraft verzerrt. Die Tendenz der Ergebnisse deckt sich mit dem Literaturstand, wonach der Düsenwagen in der Regel geringere Verdunstungs- und Verwehungsverluste aufweist. Gleichzeitig zeigte sich beim Düsenwagen eine größere Spannweite der Einzelwerte, da sowohl das Minimum als auch das Maximum unter bzw. über den entsprechenden Werten des Starkregners lagen. Die Korrelationsanalysen bestätigten die Unsicherheiten in der Interpretierbarkeit, insbesondere beim Starkregner, dessen Regressionsverläufe häufig gegenläufig und damit meteorologisch nicht plausibel ausfielen. Der Düsenwagen hingegen zeigte mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,64 gegenüber der Windgeschwindigkeit eine nachvollziehbare Tendenz, dass seine Verdunstungs- und feinen Verwehungsverluste unter windigen Bedingungen stärker ansteigen.

Die Abdriftverluste differenzierten die beiden Systeme noch deutlicher auseinander. Während der Starkregner im Mittel 9,1 % seiner applizierten Wassermenge außerhalb der Arbeitsbreite verlor, lagen die Verluste beim Düsenwagen bei nur 3,2 %. Damit erreichten die Driftverluste des Düsenwagens lediglich ein Drittel der Werte des Starkregners. Die Korrelationsanalysen spiegelten diese Unterschiede wider, da der Starkregner wesentlich stärker auf Windparameter reagiert als der Düsenwagen. Dieser geringere Einfluss der Windbedingungen auf den Düsenwagen lässt auf eine robustere Bewässerung unter windigen Verhältnissen schließen.

Die Analyse der Verteilungsqualität anhand der Kennwerte des Distribution Uniformity und des Christiansen Koeffizienten ergab ebenfalls klare Systemunterschiede. Der Düsenwagen erreichte mit einer durchschnittlichen Distribution Uniformity von 34,9 % höhere Werte als der Starkregner mit 24,9 %. Besonders in den schlecht bewässerten Bereichen zeigte sich der Starkregner deutlich benachteiligt, was eine ungleichmäßigere Wasserverteilung verdeutlicht. Der Christiansen Koeffizient bestätigt dieses Ergebnis. Während der Düsenwagen im Mittel 64,1 % erreichte, lag der

Wert des Starkregners bei 51,3 %. Damit verfügt der Düsenwagen über die gleichmäßigere Wasserverteilung der gesamten Arbeitsbreite. Eine Korrelation zwischen den Verteilungsparametern und den Wasserverlusten konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, sodass beide Kenngrößen unabhängig von den Verlustparametern zu bewerten sind.

Zusammenfassend lässt sich die Forschungsfrage eindeutig beantworten. Der Düsenwagen bewässerte unter sämtlichen untersuchten Bedingungen effizienter als der Starkregner. Sowohl bei den Verdunstungs- und Verwehungsverlusten, als auch hinsichtlich der Abdriftverluste und der Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung zeigte der Düsenwagen in allen analysierten Bereichen bessere Ergebnisse. Die Einflüsse meteorologischer Parameter konnten nur eingeschränkt bestätigt werden, jedoch deuteten zumindest die stärker ausgeprägten Zusammenhänge zur Windgeschwindigkeit auf nachvollziehbare Muster hin.

Die Ergebnisse lassen sich gut in den bestehenden Forschungsstand einordnen. Sowohl die absoluten Verlusthöhen als auch die relativen Unterschiede zwischen beiden Verfahren entsprechen den in der Literatur beschriebenen Größenordnungen. Abweichungen lagen im zu erwartenden Bereich, ohne die wissenschaftliche Einordnung der Ergebnisse zu gefährden. Damit bestätigt die vorliegende Untersuchung zentrale Erkenntnisse früherer Arbeiten und erweitert sie um spezifische Daten unter den gegebenen Versuchsbedingungen.

Für die zukünftige Forschung ergeben sich mehrere Ansatzpunkte. Um potenzielle Zusammenhänge zwischen meteorologischen Größen und Wasserverlusten präziser zu quantifizieren, sollten weitere Versuchsreihen unter standardisierten Bedingungen durchgeführt werden. Besonders Nachtversuche oder Versuche bei Windstille könnten als Referenz dienen, um die realen Verdunstungsverluste mit den modellierten beziehungsweise gemessenen Werten abzugleichen. Ebenso ist die Vereinheitlichung der Düsenwahl und des Betriebsdrucks notwendig, um die Vergleichbarkeit weiter zu verbessern. Eine höhere Zahl und zeitliche Streuung der Versuchsdurchgänge würde zudem die Datenbasis verbreitern und statistische Unsicherheiten reduzieren. Ergänzend sollte künftig auch die ökonomische Betrachtung einbezogen werden, da in der landwirtschaftlichen Praxis nicht allein die technische Effizienz, sondern auch der Kostenaufwand über die Wahl eines Bewässerungssystems entscheidet. Die Frage, inwieweit die gemessenen Einsparungen durch geringere Wasserverluste die höheren Investitionskosten eines Düsenwagens kompensieren können, stellt einen zentralen Punkt für die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis dar.

Insgesamt zeigte die Untersuchung, dass der Düsenwagen unter den gegebenen Bedingungen ein deutlich effizienteres Bewässerungssystem darstellt als der Starkregner.

7 Zusammenfassung

Diese Masterarbeit untersuchte vergleichend die Bewässerungssysteme Starkregner und Düsenwagen, um zu klären, welches System höhere Wasserverluste durch Abdrift und Verdunstung aufweist. Grundlage bildeten zwanzig Feldversuche auf dem Gelände des Deutschen Wetterdienstes in Braunschweig, die Ende August und Anfang September unter realen Freilandbedingungen durchgeführt wurden. Zunächst wurden beide Bewässerungssysteme detailliert beschrieben, gefolgt von der Darstellung der Versuchsdurchführung und der anschließenden Datenauswertung. Die Ergebnisse zeigten eindeutig, dass der Düsenwagen wesentlich effizienter bewässerte als der Starkregner. Die Abdriftverluste lagen beim Düsenwagen bei etwa ein Drittel der Verluste des Starkregners und die Verdunstungsverluste bei ungefähr der Hälfte. Für beide Systeme zeigte sich zudem, dass die höchste Korrelation zwischen den Wasserverlusten und der Windgeschwindigkeit bestanden, womit der Wind als zentraler Einflussfaktor gilt.

8 Abstract

This master's thesis compared the watering systems of irrigation boom and large area sprinkler irrigation to determine which system had higher water losses due to drift and evaporation. The basis was twenty field tests conducted at the German Weather Service in Braunschweig at the end of August and beginning of September under real outdoor conditions. Both irrigation systems were first described in detail, followed by the presentation of the experiment procedure and the subsequent data evaluation. The results clearly showed that the irrigation boom irrigated more efficiently than the large area sprinkler irrigation. The drift losses for the irrigation boom were about one-third of the losses for the large area sprinkler irrigation, and the evaporation losses were approximately half. For both systems, the highest correlation between water losses and wind speed was also shown, with wind being the central influencing factor.

9 Literaturverzeichnis

Achtnich, Wolfram (1980): Bewässerungslandbau. Agrotechnische Grundlagen der Bewässerungswirtschaft. Stuttgart: Ulmer.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019): Agenda: Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel. Hg. v. BMEL. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/AMK-12-04-19-Agenda-Anpassung-Klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 05.12.2025.

Caemmerer, Susanne von; Baker, Neil (2007): The Biology of Transpiration. From Guard Cells to Globe. In: *Plant Physiology* 143 (1), S. 3. DOI: 10.1104/pp.104.900213.

Chen, Rui; Li, Hong; Wang, Jian; Guo, Xin (2020): Effects of Pressure and Nozzle Size on the Spray Characteristics of Low-Pressure Rotating Sprinklers. In: *Water* 12 (10), S. 2904. DOI: 10.3390/w12102904.

Demmel, Markus (2007): Bewässerung – Eine Strategie zur Verstetigung von Menge und Qualität im Kartoffelanbau und der Kartoffelvermarktung. Institut für Landtechnik und Tierhaltung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Herrsching, 19.11.2007. Online verfügbar unter <https://media.repro-mayr.de/10/67510.pdf>, zuletzt geprüft am 08.12.2025.

Duchon, Claude E.; Essenberg, Gavin R. (2001): Comparative rainfall observations from pit and aboveground rain gauges with and without wind shields. In: *Advancing earth and space sciences*, 01.12.2001.

Gödeke, Henning; Belau, Till; Müller, Martin (2024): Technik in der Bewässerung. Systemvergleich, zuletzt geprüft am 21.08.2025.

Google (2013): Google Earth – Satellitenbild der Versuchsfläche in Braunschweig. Online verfügbar unter https://earth.google.com/web/search/Deutscher+Wetterdienst+in+der+N%C3%A4he+von+Braunschweig/@52.29822983,10.44316825,80.18660472a,2877.07416147d,35y,0h,0t,0r/data=CiwiJgokCcZY7HNWY0pAEd0VKqpjIUpAGVDcmc7rZCZAIUo_HN1LISRAQgIIATIpCicKJQohMTNZWWRkMnFRXzZ1S1B4aVVBOXhtdGJnUExHT2hIb2lJIAE6AwoBMEICCABKCAjXi_6GBBAB, zuletzt geprüft am 08.11.2025.

Hartmann, Hans (1992): Untersuchungen zu den Wasserverlusten beim Einsatz des Großflächenregners mit mobilen Beregnungsmaschinen. Dissertation. Landbauschule Völkenrode, Völkenrode.

- Hendawi, M.; Molle, B.; Folton, C.; Granier, J. (2005): Measurement Accuracy Analysis of Sprinkler Irrigation Rainfall in Relation to Collector Shape. In: *J. Irrig. Drain Eng.* 131 (5), S. 477–483. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:5(477).
- Hoffmann, Marieke; Schwartengraber, Reinhild; Wessolek, Gerd; Peters, Andre: Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data. In: *Atmospheric Research* 174-175, S. 120–123. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809516300175>.
- J. E. Christiansen (1942): *Irrigation by Sprinkling*. Berkley, California.
- Keller, Jack; Bliesner, Ron D. (1990): *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Boston, MA: Springer US.
- Köller, Karlheinz; Hensel, Oliver (Hg.) (2019): *Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Komet Austria GmbH (2014): *Komet Twin. Big Volume Guns for Travellers, Pivots and Solid-sets*. Komet Austria GmbH, zuletzt geprüft am 25.09.2025.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2022): *Zur Zukunft der Bewässerung - Grundsatzbeitrag*. Hg. v. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover (bzw. Niedersachsen, Deutschland). Online verfügbar unter https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/39060_Zur_Zukunft_der_Bewaesserung_-_Grundsatzbeitrag, zuletzt aktualisiert am 02.03.2022, zuletzt geprüft am 15.05.2024.
- McLean, R. K.; Ranjan, R. Sri; Klassen, G. (2000): Spray evaporation losses from sprinkler irrigation systems. In: *Canadian Agricultural Engineering* (42), S. 1–8, zuletzt geprüft am 22.08.2025.
- Nelson (2021): *Big Gun Solutions. Portable/ Solid Set Irrigation*. Hg. v. Nelson.
- Petersen, Andrew; Tam, Stephanie (2014): *B. C. Sprinkler Irrigation Manual. Chapter 6*. Hg. v. British Columbia Ministry of Agriculture.
- Playán, E.; Salvador, R.; Faci, J. M.; Zapata, N.; Martínez-Cob, A.; Sánchez, I. (2005): Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. In: *Agricultural Water Management* 76 (3), S. 139–159. DOI: 10.1016/j.agwat.2005.01.015.
- Pollock, M. D.; O'Donnell, G.; Quinn, P.; Dutton, M.; Black, A.; Wilkinson, M. E. et al. (2018): Quantifying and Mitigating Wind-Induced Undercatch in Rainfall Measurements. In: *Water Resources Research* 54 (6), S. 3863–3875. DOI: 10.1029/2017WR022421.
- Riedel, Angela; Gödeke, Henning (2022): *Verfahrensvergleich Bewässerungstechnik. Jahrbuch Agrartechnik 2021*, vol. 33. Unter Mitarbeit von Universitätsbibliothek Braunschweig. Hg. v. TU Braunschweig. Braunschweig.

- Sadeghi, Sayed-Hossein; Peters, Troy R.; Amini, Mohammad Z.; Malone, Sparkle L.; Loescher, Hank W. (2015): Novel approach to evaluate the dynamic variation of wind drift and evaporation losses under moving irrigation systems. In: *Biosystems Engineering* 135, S. 44–53. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.04.011.
- Salvatierra-Bellido, B.; Montero-Martínez, J.; Pérez-Urrestarazu, L. (2018): Development of an automatic test bench to assess sprinkler irrigation uniformity in different wind conditions. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 151, S. 31–40. DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.036.
- Sarwar, Abid; Peters, R. Troy; Shafeeque, Muhammad; Mohamed, Abdelmoneim; Arshad, Arfan; Ullah, Ikram et al. (2021): Accurate measurement of wind drift and evaporation losses could improve water application efficiency of sprinkler irrigation systems – A comparison of measuring techniques. In: *Agricultural Water Management* 258, S. 107209. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107209.
- Schrödter, Harald (1985): Verdunstung. Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. Berlin, Heidelberg: Springer (Hochschultext).
- Sieck, Lisa C.; Burges, Stephen J.; Steiner, Matthias (2007): Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. In: *Water Resources Research* 43 (1), Artikel 2005WR004519. DOI: 10.1029/2005WR004519.
- Silva, Luis Leopoldo (2006): The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil. In: *Agricultural Water Management* 85 (3), S. 243–252. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.05.006.
- Statistisches Bundesamt (25.10.2021): Pressemitteilung Nr. 494 vom 25. Oktober 2021. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/10/PD21_494_412.html, zuletzt geprüft am 08.12.2025.
- Tang, Pan; Chen, Chao (2022): An Investigation of the Frequency and Duration of a Drive Spoon–Dispersed Water Jet and Its Influence on the Hydraulic Performance of a Large-Volume Irrigation Sprinkler. In: *Agronomy* 12 (9), S. 2233. DOI: 10.3390/agronomy12092233.
- Tarjuelo, J.M; Ortega, J.F; Montero, J.; Juan, J.A de (2000): Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. In: *Agricultural Water Management* 43 (3), S. 263–284. DOI: 10.1016/S0378-3774(99)00066-9.
- van den Eertwegh, Gé; van Bakel, Jan; Massop, Harry; van Dam, Jos; Bosveld, Fred; Veldhuizen, Ab (2020): Bewässerungseffizienz. Eine Schreibtischstudie über Wissen und Einblicke in Bezug auf Wasserverluste bei der Bewässerung am Mittag im Vergleich zur Bewässerung in der Nacht. Hg. v. Ministerie von Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit.

Villalobos, Francisco J.; Fereres, Elias (2016): Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Cham: Springer (Springer eBook Collection Biomedical and Life Sciences).

Xu, Zhengdian; Li, Shuang; Shi, Lei; Zhang, Changyu; Xiang, Qingjiang; Zhu, Zhu; Pan, Hui (2025): Uniformity of Linear-Move Irrigation with a Single Sprinkler of the Self-Propelled Hard Hose Traveler. In: *Water* 17 (13), S. 1917. DOI: 10.3390/w17131917.

Yazar, Attila (1984): Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. In: *Agricultural Water Management* 8 (4), S. 439–449. DOI: 10.1016/0378-3774(84)90070-2.

Anhang

Tabellenverzeichnis	76
Anhang 1: Übersicht der Werte des Piche Evaporimeter in tabellarischer Form	77
Anhang 2: Versuchsrohdaten.....	78

Tabellenverzeichnis

Tab. A 1: Übersicht der Werte des Piche Evaporimeters der zehn Versuchsdurchgänge des Starkregners im Millimeter pro Stunde	77
Tab. A 2: Übersicht der Werte des Piche-Evaporimeters der zehn Versuchsdurchgänge des Düsenwagens in Millimeter pro Stunde	77

Anhang 1: Übersicht der Werte des Piche Evaporimeter in tabellarischer Form

Tab. A 1: Übersicht der Werte des Piche Evaporimeters der zehn Versuchsdurchgänge des Starkregners im Millimeter pro Stunde

Versuchsdurchgang	Wert des Piche-Evaporimeter ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
1. Versuch (23.08.)	2,04
2. Versuch (23.08.)	2,13
3. Versuch (27.08.)	0,72
4. Versuch (27.08.)	1,06
5. Versuch (28.08.)	0,49
6. Versuch (28.08.)	1
7. Versuch (28.08.)	1,02
8. Versuch (02.09.)	0,59
9. Versuch (02.09.)	0,94
10. Versuch (02.09.)	0,59
Mittelwert:	1,06

Tab. A 2: Übersicht der Werte des Piche-Evaporimeters der zehn Versuchsdurchgänge des Düsenwagens in Millimeter pro Stunde

Versuchsdurchgang	Wert des Piche-Evaporimeter ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
1. Versuch (27.08.)	0,73
2. Versuch (27.08.)	0,68
3. Versuch (27.08.)	0,95
4. Versuch (27.08.)	1,04
5. Versuch (28.08.)	0,62
6. Versuch (28.08.)	0,66
7. Versuch (28.08.)	0,91
8. Versuch (02.09.)	0,92
9. Versuch (02.09.)	1,43
10. Versuch (02.09.)	0,78
Mittelwert:	0,87

Anhang 2: Versuchsrohdaten

Die Rohdaten der einzelnen Versuchsdurchgänge werden in den Excellisten, welche zur Auswertung genutzt wurden aufgeführt. Da das Abbilden der einzelnen Excellisten zu Umfangreich wäre, werden die Excellisten im digitalen Anhang aufgeführt und können dort eingesehen werden.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Göttingen, 15.12.25

Ort, Datum

3. Wh

Unterschrift

Erklärung zur Nutzung von ChatGPT und vergleichbaren Werkzeugen

In der hier vorliegenden Arbeit habe ich ChatGPT oder eine andere KI wie folgt genutzt:

☐ gar nicht

☐ bei der Ideenfindung

☐ bei der Erstellung der Gliederung

☐ zum Erstellen einzelner Passagen, insgesamt im Umfang von ...% am gesamten Text

☐ zur Entwicklung von Software-Quelltexten

☐ zur Optimierung oder Umstrukturierung von Software-Quelltexten

☒ zum Korrekturlesen oder Optimieren

☐ Weiteres, nämlich: ...

Ich versichere, alle Nutzungen vollständig angegeben zu haben. Fehlende oder fehlerhafte Angaben werden als Täuschungsversuch gewertet.

15.12.25, 3. Wh

Datum, Unterschrift