

*Maschinelle Blütenausdünnung von
Apfelbäumen*

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. sc. agr.)

Fakultät Agrarwissenschaften

Universität Hohenheim

**Institut für Kulturpflanzenwissenschaften (340) - Ertragsphysiologie der
Sonderkulturen (340f)**

Prof. Dr. Jens Wünsche

vorgelegt von

Andreas Riehle

aus Offenburg

2020

Die vorliegende Arbeit wurde am 23.06.2020 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung:	17.07.2020
Leiter/in der Prüfung:	Prof. Dr. Stefan Böttinger
Berichterstatter 1. Prüfer:	Prof. Dr. Jens Norbert Wünsche
Mitberichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. Dominikus Kitemann
Weiterer Berichter, Prüfer:	Prof. Dr. Joachim Müller

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Jens Norbert Wünsche für die themenbezogenen Diskussionen und Anregungen, aber auch für den gewährten Freiraum und das damit entgegengebrachte Vertrauen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Michael Zoth vom Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee für die konstruktive Zusammenarbeit, die zahlreichen Diskussionen, die Hilfsbereitschaft und den gewährten Freiraum zur Verwirklichung eigener Ideen. Zudem möchte ich mich herzlichst bei den vielen fleißigen Helfern am KOB sowie an der Universität Hohenheim bedanken, die mich bei der Versuchsarbeit im Feld und Labor tatkräftig unterstützt haben.

Ebenfalls besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und meiner Frau Judith für den Rückhalt, die Unterstützung und Hilfestellung, die schlussendlich zum Gelingen dieser Promotionsarbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

I.	VORWORT	1
II.	STAND DER WISSENSCHAFT	4
2.1.	Physiologischer Hintergrund der Ausdünnung.....	4
2.1.1.	Die Entwicklung des Fruchtbehangs im Jahresverlauf.....	4
2.1.1.1.	Blütenknospe	4
2.1.1.2.	Die Blüte.....	8
2.1.1.3.	Fruchtwachstum.....	9
2.1.2.	Blüten- und Fruchtfall.....	11
2.1.2.1.	Physiologischer Hintergrund: Blüten- und Fruchtfall	11
2.1.2.2.	Hormonelle Steuerung des Blüten- und Fruchtfalls	13
2.1.2.3.	Nachblütefall	14
2.1.2.4.	Junifruchtfall – Korrelativ regulierter Fruchtfall.....	15
2.2.	Ausdünnung.....	17
2.2.1.	Chemische Ausdünnung	19
2.2.2.	Mechanische Ausdünnung	20
2.2.2.1.	Maschinelle Blütenausdünnung.....	20
2.2.2.2.	„Darwin“-Maschine.....	21
2.2.2.3.	Handausdünnung	25
2.2.3.	Auswirkung einer Ausdünnung auf die Fruchtqualität.....	26
2.3.	Vegetatives Triebwachstum	27
2.3.1.	Physiologischer Hintergrund: Triebwachstum	27
2.3.2.	Hormonelle Steuerung des Triebwachstums.....	29
2.3.3.	Einfluss des Fruchtbehangs auf das Triebwachstum	30
2.3.4.	Einfluss von Stress auf das Triebwachstum.....	31
2.3.5.	Einfluss von Bioregulatoren auf das Wachstum.....	32
2.3.6.	Blattentwicklung und Assimilatversorgung.....	32
2.4.	Alternanz	33
III.	ZIELE DER ARBEIT	36
IV.	MATERIAL UND METHODEN	37

4.1.	Versuchsstandort	37
4.2.	Versuchsaufbau	37
4.2.1.	Ausdünnung `Darwin`-Maschine.....	37
4.2.2.	Handausdünnung.....	38
4.2.3.	Regalis-Behandlungen	39
4.3.	Blüten- und Fruchtzählungen	40
4.3.1.	Ganzbaumzählungen.....	40
4.3.2.	Astzählungen.....	41
4.3.3.	Markiertes Blütenbüschel	42
4.4.	Ernte und Sortierung.....	43
4.5.	Bonitur Schädigungsgrad Blüten und Blätter	43
4.6.	Indol-3-Essigsäure (IAA) Analyse	46
4.6.1.	Probenentnahme Triebspitzen.....	46
4.6.2.	Aufbereitung der Pufferdiffusate	47
4.6.3.	Quantitative IAA-Bestimmung - Radioimmunassay (RIA)	47
4.7.	Bestimmung des Triebwachstums	48
4.8.	Mineralstoffanalyse	49
4.9.	Berechnung der Stammquerschnittsfläche	50
4.10.	Statistische Auswertung und Erstellung der Abbildungen.....	50
V.	ERGEBNISSE	51
5.1.	Blüte Versuchsbäume	51
5.2.	Ausdünnung und Fruchtbehang.....	53
5.3.	Fruchtqualität.....	56
5.4.	Ergebnisse Mineralstoffe.....	59
5.5.	Beschädigung von Blüten und Blättern	62
5.5.1.	Blatt- und Blütenbonituren.....	62
5.5.2.	Auswirkungen auf Blüten- und Fruchtfall	65
5.5.3.	Reduktion und Schädigung der Primärblattfläche.	66
5.6.	Blüten- und Fruchtfall	71

5.6.1.	Nachblütefall.....	71
5.6.2.	Junifruchtfall.....	75
5.7.	Triebwachstum.....	78
5.7.1.	Manuelle Messungen.....	78
5.7.2.	Auxin-Messungen.....	81
5.8.	Alternanz und Nachfolgeblüte.....	84
VI.	DISKUSSION.....	86
6.1.	Blüte Versuchsbäume.....	87
6.2.	Ausdünnwirkung.....	87
6.2.1.	Fruchtbehang.....	87
6.2.2.	Fruchtqualität.....	90
6.3.	Blüten und Fruchtfall.....	93
6.3.1.	Beschädigung von Blüten und Blättern.....	93
6.3.2.	Auswirkungen des Blütenschädigungsgrades.....	96
6.3.3.	Auswirkungen der Reduktion der Blattmasse.....	96
6.4.	Blüten- und Fruchtfall.....	98
6.4.1.	Nachblüte- und Junifruchtfall.....	98
6.4.2.	Einfluss von Ethylen auf den Blüten- und Fruchtfall.....	101
6.5.	Triebwachstum.....	103
6.5.1.	Fruchtbehang und Triebwachstum.....	103
6.5.2.	Auxin-Export aus den Triebspitzen.....	104
6.5.3.	Regalis-Behandlungen.....	105
6.5.4.	Triebwachstum und Junifruchtfall.....	105
6.5.5.	Fazit Triebwachstum.....	106
6.6.	Einfluss der Ausdünnung auf die Alternanz.....	106
6.7.	Zusammenfassung Diskussion.....	110
VII.	ZUSAMMENFASSUNG.....	116
VIII.	LITERATURVERZEICHNIS.....	121

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.** Schematische Darstellung einer gemischten Blütenknospe bei Apfel während der Dormanz im Winter. (a) Knospenschuppen; (b) Übergangsblätter; (c) Blattprimordium; (d) Triebmeristem. Verändert nach *Foster et al.* (2003). 6
- Abbildung 2.** Zeitlicher Verlauf der Entwicklung eines Apfels von der vegetativen Knospe über die verschiedenen Entwicklungsstadien bis hin zur generativen Frucht zum Zeitpunkt der Ernte. Verändert nach *Larcher* (1995). 7
- Abbildung 3.** Aufsicht auf einen Blütenstand (Infloreszenz) der Sorte `Gala` zum Zeitpunkt Ballonstadium (BBCH-Stadium 59) kurz vor dem aufblühen. (a = Königsblüte, b = laterale Blüten). 8
- Abbildung 4.** Zunahme des saisonalen Frischgewichts einer individuellen Apfelfrucht in Abhängigkeit des Zeitpunkts der Handausdünnung (0, 20 und 40 Tage nach Vollblüte (TnV) auf einen mittelstarken Fruchtbehang pro Baum in der Sorte `Empire` in Geneva (New York, USA, 1988) und `Golden Delicious` in (Bologna, Italien, 1990). Verändert nach *Lakso et al.* (1995). 11
- Abbildung 5.** Vierstufiges Model zur Ausbildung eines Trenngewebes an der Stielbasis einer Blüte oder einer Frucht bei Apfel unter der Berücksichtigung des Einflusses der Phytohormone (Ethylen (C₂H₄), Abscisinsäure (ABA), Jasmonsäure (JA), Cytokinin (CK), Auxin (AUX), Gibberellin (GA), Polyamin (PA) und Brassinosteroide (BR)). (A) Ausbildung eines Trenngewebes durch Differenzierung der Zellen. (B) Befähigung der Zellen im Trenngewebe auf innere und äußere aktivierende Signale zu reagieren. (C) Aktivierung des Trenngewebes. (D) Bildung einer zellulären Schutzschicht auf Seite der Pflanze. Verändert nach *Estornell et al.* (2013) und *Patterson* (2001). 12
- Abbildung 6.** Schema eines Fruchtstandes bei Apfel, bestehend aus der Königsfrucht (1 KF), den lateralen Früchten (LF) entsprechend deren Hierarchie im Fruchtstand (2 – 5) und des sekundären Kurztriebes (eng. `bourse shoot`). Die Zahlen innerhalb der Früchte geben den IAA-Export (`Jonagold` 25 TnV.) inklusive der Standardabweichung in Nanogramm [ng] und die Samenanzahl wieder (Bangerth 2000). 17
- Abbildung 7.** Beziehung zwischen der Anzahl an Früchte pro Baum und der Apfelfruchtgröße, sowie dem Blüten- und Fruchtfall und der Ausdünnung der Äpfel in Bezug auf Gesamtertrag [kg] und wirtschaftlichen Ertrag [€] pro Baum. Verändert nach *Costa et al.* 2018. 18
- Abbildung 8.** Ausdünnmaschine `Flexitree` (Typ Bonn) der Firma Clemens GmbH & CO KG aus Wittlich. Entwickelt von L. Damerow und M. Blanke an der Universität Bonn (Damerow et al. 2007a). 21
- Abbildung 9.** Weiterentwicklung der `Darwin`-Maschine der Firma Fruit-Tec (Markdorf) mit dem SmaArt-System zur automatischen Regulierung der Spindeldrehzahl entsprechend der Anzahl an Blüten. (a) funktionale Einheit der `Darwin`-Spindel, (b) Fadenelemente mit 60 cm langen Fäden, (c) Steuerung, (d) Halterung für Kamera und GPS-Antenne, (e) Kamera, (f) GPS-Antenne und (g) Boardcomputer. 22
- Abbildung 10.** Entwicklung des Stundenlohns [€ h⁻¹] in der Landwirtschaft im Zuge der Einführung des Mindestlohns seit 2008, sowie dessen prozentuale Steigerung im Vergleich zu 2008 in Prozent [%] (BMAS 2019, Wicke 2015). 25

Abbildung 11. Entwicklung des Fruchtgewichts eines Apfels in Abhängigkeit des Zeitpunktes (a) (0 (Blüte), 20 und 40 Tage nach Vollblüte (TnV)) der Ausdünnung in der Sorte `Braeburn` und in Abhängigkeit des Fruchtbehangs (b) (340, 260 und 160 Früchte pro Baum) in der Sorte `Empire`. Abbildung verändert nach <i>Wünsche und Lakso</i> (2000b).....	27
Abbildung 12. Darstellung der Triebe und Knospen beim Kernobst. Verändert nach <i>Riess</i> (2016).....	28
Abbildung 13. Relative Assimilatversorgung der Apfelfrüchte in Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung der Blattmasse am Blütenbüschel (Primärblätter), den sekundären Kurztrieben und den Langtrieben. Verändert nach <i>Wünsche und Lakso</i> (2000b).....	32
Abbildung 14. Theorie des Regulationsmechanismus der zum Auftreten von Alternanz am Apfelbaum führt unter Einbeziehung von Wechselwirkungen zwischen Lichtmangel, dem Wasserhaushalt und der Stimulation durch den Transport von basipolarem Cytokinin und der Inhibierung der Blütenbildung durch Gibberellin 7 (GA ₇). Verändert nach <i>Krasniqi et al.</i> (2013).	34
Abbildung 15. Übersicht zur Blüten- und Fruchtzählungen am ganzen Baum, an den vier Versuchsästen bzw. an den 8 markierten Blütenbüschel je Versuchsbaum in den Sorten `Gala` und `Elstar` 2014, 2015 und 2016.	40
Abbildung 16. Eines der acht je Versuchsbaum gesondert markierten Blütenbüschel, bei dem die einzelnen Blüten entsprechend ihrer Rangordnung im Blütenbüschel vor der Ausdünnung mit einem Filzstift durchnummeriert wurden. (Königsblüte = 1; erste laterale Blüte = 2; Nummerierung folgender Blüten im Uhrzeigersinn).	42
Abbildung 17. Blattboniturschema für die maschinelle Ausdünnung mechanisch verursachten äußeren Schäden an den Blattorganen in den Abstufungen 1 bis 6. [Stufe 1 = Blätter ohne Beschädigung; Stufe 2 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz bis zu 2 cm, ein Blattviertel ist beschädigt, Stufe 3 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz > 2 cm bzw. mehrfach geschlitzte Blätter, ¼ der Blattfläche ist entfernt; zwei Blattviertel sind beschädigt, Stufe 4 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz > 2 cm bzw. mehrfach geschlitzte Blätter, ½ der Blattmasse ist entfernt; drei Blattviertel beschädigt; Stufe 5 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz > 2 cm bzw. mehrfach geschlitzte Blätter, ¾ der Blattmasse entfernt, vier Blattviertel beschädigt, Stufe 6 = Blätter sind abgeschlagen].	43
Abbildung 18. Blütenboniturschema für die durch die maschinelle Ausdünnung mechanisch verursachten äußeren Schäden an den Blütenorganen in den Abstufungen 1 bis 7. [Stufe 1 = keine sichtbaren Schäden zu erkennen; Stufe 2 = Blütenblätter sind teilweise entfernt, Anthere und Stamina sind intakt, Blütenstiel weist keine Verletzungen auf; Stufe 3 = Blütenblätter entfernt, Anthere und Stamina intakt, Blütenstiel weist keine Verletzungen auf; Stufe 4 = Ein oder mehrere Kelchblätter sind beschädigt/ entfernt, Anthere und Stamina intakt, Blütenstiel weist keine Verletzungen auf; Stufe 5 = Verletzungen an Anthere und/ oder Stamina sind zu erkennen, leichte Beschädigungen am Blütenstiel; Stufe 6 = massive Verletzungen an Anthere und oder Stamina, Blütenstiel stark beschädigt, Blüte nahezu abgetrennt; Stufe 7 = Blüte ist abgeschlagen]	45
Abbildung 19. Fruchtbehang pro 100 Blütenbüschel (Infloreszenz) zur Ernte in der Sorte `Elstar` in den Versuchsjahre 2014, 2015 und 2016 in den Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min ⁻¹ , 240 U min ⁻¹ , 280 U min ⁻¹ , 320 U min ⁻¹ , 400 U min ⁻¹ , 320 U min ⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder, p = ≤ 0,05).....	53

- Abbildung 20.** Fruchtbehang pro 100 Blütenbüschel (Infloreszenz) zur Ernte in der Sorte `Gala` in den Versuchsjahre 2014, 2015 und 2016 in den Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; p = ≤ 0,05)..... 55
- Abbildung 21.** Durch die maschinelle Ausdünnung verursachte Schäden an Blätter und Blüten in Prozent [%] an der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufe in den Jahren 2015 und 2016. Datenerhebung erfolgte an 8 Blütenbüscheln je Versuchsbaum, 2015 in den Behandlungsstufen 200 U min⁻¹ ●, 240 U min⁻¹ ○, 280 U min⁻¹ ▼, 320 U min⁻¹ △, 240 U min⁻¹ + Hand ■ und 320 U min⁻¹ + Hand □. In 2016 in den Behandlungsstufen 240 U min⁻¹ ○, 320 U min⁻¹ △, 400 U min⁻¹ ☆, 240 U min⁻¹ + Hand ■, 320 U min⁻¹ + Hand □, 320 U min⁻¹ + Regalis ◇ und 320 U min⁻¹ + Regalis + Hand ◆. Schädigungsgrad 1 entspricht keiner Beschädigung. Schädigungsgrad 6 bei Blättern und 7 bei Blüten entspricht einem vollständig abgeschlagenen Organ. Die nicht maschinell ausgedünnten Varianten wurden nicht in die Abbildung mit aufgenommen, da 100 % der Blätter und Blüten der Boniturstufe 1 zugeordnet werden konnten..... 62
- Abbildung 22.** Durch die maschinelle Ausdünnung verursachte Schäden an Blätter und Blüten in Prozent [%] an der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufe in den Jahren 2015 und 2016. Datenerhebung erfolgte an 8 Blütenbüscheln je Versuchsbaum, 2015 in den Behandlungsstufen 200 U min⁻¹ ●, 240 U min⁻¹ ○, 280 U min⁻¹ ▼, 320 U min⁻¹ △, 240 U min⁻¹ + Hand ■ und 320 U min⁻¹ + Hand □. In 2016 in den Behandlungsstufen 240 U min⁻¹ ○, 320 U min⁻¹ △, 400 U min⁻¹ ☆, 240 U min⁻¹ + Hand ■, 320 U min⁻¹ + Hand □, 320 U min⁻¹ + Regalis ◇ und 320 U min⁻¹ + Regalis + Hand ◆. Schädigungsgrad 1 entspricht keiner Beschädigung. Schädigungsgrad 6 bei Blättern und 7 bei Blüten entspricht einem vollständig abgeschlagenen Organ. Die nicht maschinell ausgedünnten Varianten wurden nicht in die Abbildung mit aufgenommen, da 100 % der Blätter und Blüten der Boniturstufe 1 zugeordnet werden konnten..... 64
- Abbildung 23.** Anteil an Blüten und Früchten in Prozent [%], welche in Abhängigkeit ihrer durch die maschinelle Ausdünnung verursachten Verletzungen (dargestellt durch den Schädigungsgrad zur Blüte), während der Fruchtentwicklung bis hin zur Ernte vom Baum in den Versuchsjahren 2015 und 2016 abgefallen sind. (`Gala` (△) und `Elstar` (●)). Fehlerindikatoren geben den Standardfehler wieder..... 65
- Abbildung 24.** Entwicklung der Blattfläche 2016 an den Versuchsbäumen der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Zeit (10.05.2016; 30.05.2016; 25.08.2016) und der Ausdünnungsintensität in den Behandlungsstufen unbehandelte Kontrolle (UBK), 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ und 400 U min⁻¹..... 69
- Abbildung 25.** Entwicklung der Blattfläche 2016 an den Versuchsbäumen der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Zeit (10.05.2016; 30.05.2016; 25.08.2016) und der Ausdünnungsintensität in den Behandlungsstufen unbehandelte Kontrolle (UBK), 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ und 400 U min⁻¹..... 70
- Abbildung 26.** Schematischer Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Fruchtbehangs am Baum zwischen der unbehandelten Kontrolle und der mit der `Darwin`-Maschine ausgedünnten Behandlungen..... 72

- Abbildung 27.** Anzahl [Blüten Baum⁻¹] bzw. Prozent [%] abgefallener Einzelblüten vor dem Fruchtansatz (Nachblütefall) der Sorte `Gala` über die Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis im Zeitraum 2015 ((a) und (b)) und 2016 ((c) und (d)). In Abbildung (a) und (c) sind die berechneten Daten aus den Zählungen dargestellt. In Abbildung (b) und (d) ist der prozentuale Anteil abgefallener Blüten nach der maschinellen Ausdünnung dargestellt. Als Berechnungsgrundlage dienten die Blüten- und Fruchtzählungen nach der maschinellen Ausdünnung und zum Fruchtansatz. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$)..... 73
- Abbildung 28.** Anzahl [Blüten Baum⁻¹] bzw. Prozent [%] abgefallener Einzelblüten vor dem Fruchtansatz (Nachblütefall) der Sorte `Elstar` über die Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis im Zeitraum 2015 ((a) und (b)) und 2016 ((c) und (d)). In Abbildung (a) und (c) sind die berechneten Daten aus den Zählungen dargestellt. In Abbildung (b) und (d) ist der prozentuale Anteil abgefallener Blüten nach der maschinellen Ausdünnung dargestellt. Als Berechnungsgrundlage dienten die Blüten- und Fruchtzählungen nach der maschinellen Ausdünnung und zum Fruchtansatz. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$)..... 74
- Abbildung 29.** Junifruchtfall in den Jahren 2015 und 2016 der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. Die absolute Anzahl abgefallener Früchte ist in (a) und (c) und der prozentuale Anteil abgefallener Früchte (b) und (d) dargestellt. Als Berechnungsgrundlage diente die Zählung der Früchte zum Fruchtansatz und zur Ernte. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$). 75
- Abbildung 30.** Junifruchtfall in den Jahren 2015 und 2016 der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. Die absolute Anzahl abgefallener Früchte ist in (a) und (c) und der prozentuale Anteil abgefallener Früchte (b) und (d) dargestellt. Als Berechnungsgrundlage diente die Zählung der Früchte zum Fruchtansatz und zur Ernte. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$). 77
- Abbildung 31.** Saisonaler Gesamttriebzuwachs pro Baum in Zentimeter [cm] in den Jahren 2015 (links) und 2016 (rechts) der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$)..... 78
- Abbildung 32.** Saisonaler Gesamttriebzuwachs pro Baum in Zentimeter [cm] in den Jahren 2015 (links) und 2016 (rechts) der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$)..... 79

- Abbildung 33.** Durchschnittliche Triebblänge in Zentimetern [cm] (Balken) und Anzahl der Neutriebe größer 1 cm (Dreiecke) in den Versuchsjahren 2015 und 2016 in der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder; $p = \leq 0,05$). 80
- Abbildung 34.** Durchschnittliche Triebblänge in Zentimetern [cm] (Balken) und Anzahl der Neutriebe größer 1 cm (Dreiecke) in den Versuchsjahren 2015 und 2016 in der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder; $p = \leq 0,05$). 81
- Abbildung 35.** Export von Indol-3-Essigsäure (IAA) in Nanogramm je Gramm Frischmasse [ng g⁻¹ FM⁻¹] aus den Triebspitzen der Sorte `Gala` zu den entsprechenden Analyseterminen in den Versuchsjahren 2015 und 2016 und in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$). 82
- Abbildung 36.** Export von Indol-3-Essigsäure (IAA) in Nanogramm je Gramm Frischmasse [ng g⁻¹ FM⁻¹] aus den Triebspitzen der Sorte `Elstar` zu den entsprechenden Analyseterminen in den Versuchsjahren 2015 und 2016 und in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$). 83
- Abbildung 37.** Nachfolgeblüte der Versuchsbäume aus den 3 Versuchsjahren für `Gala` (a, c, e) und `Elstar` (b, d, f) in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. Die Bonitur der Blühstärke erfolgte auf einer Skala von 1 bis 9 (1 = keine Blüte; 5 = ausreichend für einen Vollertrag; 9 = Weißblüte). (Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder; $p = \leq 0,05$). 85
- Abbildung 38.** Schematische Darstellung der Interaktion verschiedener physiologischer Prozesse am Apfelbaum, sowie deren potentielle direkte bzw. indirekte Beeinflussung durch die maschinelle Blütenausdünnung mit der `Darwin`-Maschine. 86
- Abbildung 39.** Korrelation der Spindeldrehzahl in Umdrehungen pro Minute [U min⁻¹] mit dem durchschnittlichen Fruchtbehang der Versuchsbäume zur Ernte mit der **Anzahl Früchte je Versuchsbaum** [Früchte Baum⁻¹] (*Abbildung (a) `Elstar` und (b) `Gala`*) und mit der **Anzahl Früchte je 100 Blütenbüschel** [Früchte 100 Blütenbüschel⁻¹] (*Abbildung (c) `Elstar` und (d) `Gala`*) in den Versuchsjahren 2014, 2015 und 2016 in den Sorten `Elstar` und `Gala`. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder). 88
- Abbildung 40.** Korrelation zwischen dem Fruchtbehang [Früchte Baum⁻¹] und der durchschnittlichen Fruchtgröße [mm] bei (a) `Elstar` und (b) `Gala` in den Versuchsjahren 2014, 2015 und 2016. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder). 91
- Abbildung 41.** Bäume und Blütenbüschel aus der Versuchsanlage `Gala` Q 2.1 am KOB-Bavendorf im direkten Anschluss an die maschinellen Blütenausdünnung. 94

Abbildung 42. Darstellung der Intensität des Nachblüte- und Junifruchtfalls in Abhängigkeit der Anzahl Blüten (Nachblütefall) oder Früchte (Junifruchtfall) je Baum vor Eintritt der entsprechenden Blüten- bzw. Fruchtfallereignisses. Korrelationen zwischen der Anzahl Früchte pro Baum zum Zeitpunkt des Fruchtansatzes 30 Tage nach Vollblüte (TnV) [Früchte Baum⁻¹] und der Anzahl Blüten 1 Tag nach der Ausdünnung [Blüten Baum⁻¹] (a) `Elstar` und (c) `Gala` (Nachblütefall). Korrelation zwischen der Anzahl Früchte 30 Tage nach Vollblüte und der Anzahl Früchte zur Ernte [Früchte Baum⁻¹] (b) `Elstar` und (d) `Gala` (Junifruchtfall) über beide Versuchssorten `Gala` (c und d) und `Elstar` (a und b) in den Versuchsjahren 2015 und 2016 und den entsprechenden Behandlungsstufen ohne Handausdünnung. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder)..... 100

Abbildung 43. Zusammenhang zwischen dem Fruchtbehang der Bäume zur Ernte [Früchte Baum⁻¹] und der Nachfolgeblüte im Folgejahr der Sorten `Elstar` (a) und `Gala` (b) in den Versuchsjahren 2014 bis 2016. Die Nachfolgeblüte ist ausgedrückt über die Blühstärke anhand der Skala 1 bis 9. [1 = keine Blüte; 9 = Weißblüte]. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder)..... 108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Extrahierbarer Gehalt an Ethylen aus Blütengewebe bei Apfel in $\text{nl g}^{-1} \text{FM}^{-1}$ (Frischmasse) (Blanpied 1972).....	14
Tabelle 2. Einstufung der Ausdünnintensität der maschinellen Blütenausdünnung (‘Darwin’-Maschine) anhand der Berechnung der kinetischen Rotationsenergie (E_{kin}), die potentiell in den Baum eingebracht werden kann. Ausdünnintensität $< 55\%$ = sanft; $55\text{-}90\%$ = schwach; $91\text{-}125\%$ = mittel; $126\text{-}160\%$ = stark, $> 160\%$ = sehr stark. Tabelle verändert nach M. Zoth (2011). (Referenzeinstellung: 10 km h^{-1} ; 250 U min^{-1} ; 216 Fäden).....	23
Tabelle 3. Übersicht über den Versuchsaufbau.	37
Tabelle 4. Aufstellung der im Versuch durchgeführte Behandlungsstufen zur maschinellen Ausdünnung in Kombination mit nachträglicher Handausdünnung und dem Einsatz von Regalis Plus [®] über die Jahre 2014, 2015 und 2016 in den Sorten ‘Gala’ und ‘Elstar’.	38
Tabelle 5. Phänologisch und behandlungstechnisch relevante Daten zur Versuchsdurchführung 2014, 2015 und 2016 der Sorten ‘Gala’ und ‘Elstar’.	39
Tabelle 6. Übersicht der in den drei Versuchsjahren (2014, 2015 und 2016) erfolgten Zählungen einzelner Blüten, Blütenbüschel und Früchten an den Versuchsbäumen. (Baum = Zählungen am ganzen Baum; Ast = Zählungen an vier markierten Ästen je Baum; m. Bb. = Zählungen an den acht markierten Blütenbüschel je Baum).....	41
Tabelle 7. Übersicht der durchgeführten Bonituren und den Blüten bzw. Früchten und den Primärblättern zu den entsprechenden Zeitpunkten während der Vegetationsperiode (vor bzw. nach der Ausdünnung, Fruchtansatz, nach dem Junifruchtfall) an den acht markierten Blütenbüscheln je Versuchsbaum in den Sorten ‘Gala’ und ‘Elstar’ in den Jahren 2015 und 2016.	44
Tabelle 8. Daten zur Probenentnahme der Indol-3-Essigsäure (IAA) Untersuchungen der Triebspitzen in den Sorten ‘Gala’ und ‘Elstar’.....	47
Tabelle 9. Übersicht zur Entnahme der Probenfrüchte für die Mineralstoffanalyse in den beiden Versuchssorten ‘Gala’ und ‘Elstar’ zum T-Stadium und zur Ernte.....	49
Tabelle 10. Durchschnittliche Anzahl Blütenbüschel an den Versuchsbäumen der Sorte ‘Elstar’ vor der Ausdünnung (-5 TnV).	51
Tabelle 11. Durchschnittliche Anzahl Blütenbüschel an den Versuchsbäumen der Sorte ‘Gala’ vor der Ausdünnung (-5 TnV).	52
Tabelle 12. Fruchtgrößenverteilung entsprechend der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis über die Versuchsjahre 2014, 2015 und 2016 der Sorte ‘Gala’.....	56
Tabelle 13. Fruchtgrößenverteilung entsprechend der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis in den Versuchsjahren 2014, 2015 und 2016 der Sorte ‘Elstar’.	58
Tabelle 14. Durchschnittliches Kalium-Calcium-Verhältnis zur Ernte in Milligramm je 100 g Frischmasse ($\text{mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{FM}^{-1}$) der Sorte ‘Gala’ in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis in den Versuchsjahren 2014 bis 2016.	59

Table 15. Durchschnittliches Kalium-Calcium-Verhältnis zur Ernte in Milligramm je 100 g Frischmasse ($\text{mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ FM}^{-1}$) der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis in den Versuchsjahren 2014 bis 2016.	61
Table 16. Primärblattfläche je Blütenbüschel [cm^2] nach maschineller Ausdünnung bei der Sorte `Gala` in den Jahren 2015 und 2016 in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis. Primärblattfläche der Kontrolle entspricht 100 %.....	67
Table 17. Primärblattfläche je Blütenbüschel [cm^2] nach maschineller Ausdünnung in der Sorte `Elstar` in den Jahren 2015 und 2016 in den Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis. Primärblattfläche der Kontrolle entspricht 100 %.	68
Table 18: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Sorte `Elstar` über die verschiedenen Varianten hinweg unter Angabe der Zielgröße anhand einer qualitativen Skala von 1 bis 10.....	112
Table 19. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Sorte `Gala` über die verschiedenen Varianten hinweg unter Angabe der Zielgröße anhand einer qualitativen Skala von 1 bis 10.	113

Abkürzungsverzeichnis

6-BA	6-Benzyladenin
$\mu\text{l L}^{-1}$	Mikroliter pro Liter
ABA	Abciscinsäure
ACO	1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure Oxidase
ACS	1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure Synthase
ATA	Auxin-Transport-Autoinhibition
AUX	Auxin
BBCH-Stadium	Biologische Bundesanstalt, Bundesortenamt und Chemische Industrie
Blübü.	Blütenbüschel
BR	Brassinosteroide
$(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	Ammoniummolybdat
ATS	Ammoniumthiosulfat
CK	Cytokinin
CH_4O	Methanol
C_2H_4	Ethylen
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	Essigsäure
E_{kin}	Kinetische Energie
FM	Frischmasse
Fr B^{-1}	Früchte pro Baum
GA_x	Gibberelline
GPS	Globales Positionierungssystem
HCL	Salzsäure
m. Bb.	markiertes Blütenbüschel am Versuchsbaum
IAA	Indol-3-Essigsäure (Auxin)
JA	Jasmonsäure
KH_2PO_4	Kaliumdihydrogenphosphat
KF	Königsfrucht
KNOX	(eng. knotted 1-like homeobox-contain-ing) Genklasse
KOB	Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee
LA	Lanthan
LF	laterale Frucht
GD	Grenzdifferenz

Abkürzungsverzeichnis

M 9	schwachwüchsige Unterlage
M	Mol
NAA	1-Naphthylelessigsäure
NaCl	Natriumchlorid
PA	Polyamin
ppm	(eng. parts per million) Anteile je Million
RIA	Radioimmunassay
ROS	(eng. Reactive Oxygen Species) Reaktive Sauerstoffspezies
SmaArt	<u>S</u> ensorgesteuerte, <u>m</u> echanische Blü <u>t</u> en <u>a</u> usdünnung in der <u>A</u> pfel <u>p</u> rodukt <u>i</u> on
SO ₄ (NH ₄) ₂	Ammoniumsulfat
Stk.	Stückzahl
SqF	Stammquerschnittsfläche
TnV	Tage nach Vollblüte

I. Vorwort

Der Apfel (*Malus domestica* Borkh.) ist unter kommerziellen Gesichtspunkten, die wichtigste Frucht der gemäßigten Klimazone. Die weltweite jährliche Apfelproduktion wird derzeit auf über 83 Millionen Tonnen geschätzt (Schwartau 2018, FAO 2018, Mimida et al. 2013) und wird nach derzeitigen Berechnungen 2025 die Produktionsmarke von 100 Millionen Tonnen überschreiten. Während im Westen die Apfelproduktion auf Grund von hohen Lohnkosten und wegfallenden Exportmärkten insgesamt rückläufig ist, wird vor allem in Polen, Südosteuropa sowie in China, weiter aufgepflanzt (Schwartau 2018).

In Deutschland nimmt die Anzahl der Obstbaubetriebe stetig ab. Trotzdem ist die Anbaufläche seit mehreren Jahren mit circa 31000 Hektar relativ konstant (Schwartau 2018). Das derzeitige Stimmungsbild und die wirtschaftliche Lage vieler obstbaureibender Betriebe hat sich nicht nur auf Grund des Russlandembargos für Obst und Gemüse, in den letzten Jahren deutlich verschlechtert. Stagnierende Auszahlungspreise bei gesteigerten Qualitätsansprüchen, innergebietslicher Preiskampf, preiswerte Importware und wegfallende Exportmärkte stellen viele Betriebe vor große Herausforderungen. Hinzu kommen fehlende Arbeitskräfte, rasant steigende Produktionskosten, zunehmende Bürokratie, vor allem seit der Einführung des Mindestlohns 2015 sowie steigende Investitionskosten unter anderem für eine geschützte Produktion und Pflanzrechte neuer Clubsorten. Auch der Klimawandel mit jährlichen zunehmenden Extremwetterereignissen wie z.B. Frost, Hagel und oder extremer Trockenheit setzt den Betrieben zu. Zu guter Letzt kommt hinzu eine breite, kaum sachlich geführte Debatte in der Gesellschaft und Politik zum Einsatz von Pflanzenschutzmittel in der landwirtschaftlichen Produktion mit der Konsequenz, nahezu jegliche Akzeptanz für Pflanzenschutzmitteln in der Gesellschaft zu verlieren. Um den Apfelanbau und die damit verbundenen Betriebe zukunftsfähig auszurichten, bedarf es entlang der gesamten Wertschöpfungskette neuer Ideen und Konzepte.

Einer dieser Ideen und Konzepte für einen zukunftsfähigen Apfelanbau umfasst eine stärkere Mechanisierung der einzelnen Produktionsschritte. Hierdurch sollen auf der einen Seite die Produktionskosten je Apfel minimiert werden und gleichzeitig auf der anderen Seite z.B. durch die Reduktion von Pflanzenschutzmitteln der ökologische Fußabdruck je Apfel verkleinert werden. Viele der Aktivitäten im Bereich der Mechanisierung werden inzwischen unter dem Begriff „Präziser Obstbau“ (eng. *Precision Horticulture*) zusammengefasst. Derzeit sind in der Apfelproduktion vor allem die Ernte, der Schnitt sowie die Handausdünnung die Kulturmaßnahmen mit dem höchsten Zeitbedarf an Arbeitskräften (Büchle 2018, K16, S447)

und damit auch die größten Kostenfaktoren. Die Handausdünnung wird vor allem dann teuer, wenn vorhergehende chemische oder mechanische Ausdünnmaßnahmen nicht effektiv gewesen sind (Costa et al. 2013, Dennis 2000). In diesem Fall kann der Zeitaufwand je Hektar bis zu 200 Stunden und mehr betragen.

Die maschinelle Blütenausdünnung, als wesentlich umweltfreundlichere Alternative zur chemischen Ausdünnung, stellt eine Möglichkeit dar den Fruchtbehang am Apfelbaum bereits zur Blüte (BBCH-Stadium 60 – 65) zu reduzieren. Die sehr gute Ausdünnwirkung der maschinellen Ausdünnung konnte bereits in der Vergangenheit durch diverse Versuchsarbeiten (Zoth 2011, Kong et al. 2009, Damerow et al. 2007b, Lafer 2003) bestätigt werden.

Hintergrund Ausdünnung: Eine Ausdünnmaßnahme ist vor allem dann notwendig, wenn der Baum mehr Früchte ansetzt als das er in guter Fruchtqualität bis zur Ernte hin entwickeln kann (Link 2018, Breen et al 2012, Fischer 1995). Da bei einer sogenannten Weißblüte bereits 7 % der Blüten für einen Vollertrag ausreichend sind (Costa et al. 2013), ist die Ausdünnung inzwischen eine jährlich wiederkehrende Standardmaßnahme im qualitätsorientierten praktischen Apfelanbau.

Zwar hat das Interesse an der maschinellen Blütenausdünnung in den letzten Jahren zugenommen, jedoch ist ein flächendeckender Einsatz der entsprechenden Ausdünnmaschinen im praktischen Obstbau bei weitem noch nicht gegeben. Ein in Teilen der Praxis fest verankertes negative Image in Punkto der Auswirkung der maschinellen Blütenausdünnung auf den Blüten- und Fruchtfall sowie das Triebwachstum könnten hierfür ausschlaggebend sein. Dabei beruhen die Beobachtungen zum Junifruchtfall und Triebwachstum nicht auf wissenschaftlich abgesicherten Daten, sondern oftmals auf praktischen Erfahrungen bzw. visuellen Einschätzungen der Obstbauern und Beratern im Feld. Zwar wird versucht seitens von Beratung ein verstärkter Junifruchtfall im Anschluss an die maschinelle Ausdünnung durch eine Ethylen-Stress-Reaktion am Baum zu erklären (Winstel 2012, Widmer et al. 2012), jedoch sind die genauen physiologischen Zusammenhänge die zu einem verstärkten Triebzuwachs oder Blüten- und Fruchtfall führen könnten bis dato nahezu unbekannt. In persönlichen Gesprächen mit Obstbauern und Beratern fällt hierzu immer wieder der Begriff der „Ethylen-Schock-Theorie“, die besagt, dass an den durch die maschinelle Blütenausdünnung entstandenen Verletzungen an Blüten und Blätter Wund-Ethylen als Stressreaktion des Baumes produziert wird und dieses wiederum zu einem verstärktem Junifruchtfall führt.

Im Rahmen des SmaArt-Projektes (Sensorgesteuerte, mechanische Blütenadünnung in der Apfelproduktion) wurden am Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB) in Bavendorf zwei Forschungsschwerpunkte zum Thema maschinelle Blütenausdünnung bearbeitet. Themenkomplex eins umfasste die technische Weiterentwicklung der `Darwin`-Ausdünnmaschine der Firma Fruit-Tec mit dem Ziel einer automatischen und adaptiven Steuerung der Spindeldrehzahl in Abhängigkeit der Anzahl Blüten je Baum. Hierzu wurden dem bestehenden System ein Kamerasystem zur Blütenerkennung, ein GPS-System zur genauen Positionierung, eine neue Steuerung und ein Bordcomputer hinzugefügt (weitere Informationen siehe KOB 2019 und BLE 2019). Themenkomplex zwei umfasste Exaktversuche zur wissenschaftlichen Untersuchung physiologischer Prozesse am Apfelbaum welche im Zuge der maschinellen Ausdünnung beeinflusst werden könnten. Hierzu zählten jene Faktoren, welche einer weiteren Verbreitung der maschinellen Ausdünnung in der Praxis im Wege stehen (Siehe vorheriger Abschnitt).

II. Stand der Wissenschaft

Die Regulierung des Fruchtbehangs durch gezielte Ausdünnung ist eine der wichtigsten, aber zugleich auch anspruchsvollsten Kulturmaßnahmen im Apfelanbau und von größter ökonomischer Bedeutung (Lordan 2018, Link 2018, Cline et al. 2018, Assirelli et al 2018, Pfeifer et al. 2018, Greene und Costa 2012, Dennis 2000). Eine Ausdünnmaßnahme ist in der Regel immer notwendig, da die meisten Apfelsorten bedingt durch ihr erblich fixiertes Ertragspotential mehr Früchte ansetzen, als sie in guter Qualität bis zur Ernte hin entwickeln können (Link 2018, Breen et al 2012, Fischer 1995).

Das erblich fixierte Ertragspotential eines Apfelbaumes basiert auf dem genetisch bedingten Erhaltungstrieb durch generative Vermehrung über möglichst viele Samen. Hierbei dient das Fruchtfleisch aus biologischer Sicht lediglich zur Anlockung von Tieren um die ausgereiften Samen freizulegen und zu verteilen. Der Obstbauer dahingegen ist mit der Tatsache konfrontiert, dass mit zunehmender Anzahl Früchte pro Baum die Fruchtqualität, gekennzeichnet durch das Kaliber und die Ausfärbung, des einzelnen Apfels abnimmt bzw. regelmäßiger, jährlicher Ertrag auf Grund von Alternanzerscheinungen ausbleibt (Tromp et al. 2005, Link 2002). Auf Grund dessen bewegen sich beide „Parteien“ in einem Konfliktfeld.

2.1. Physiologischer Hintergrund der Ausdünnung

2.1.1. Die Entwicklung des Fruchtbehangs im Jahresverlauf

In der gemäßigten Klimazone folgt der Apfel einem saisonalen Wachstumszyklus, in dem sich vegetative und generative Phasen abwechseln (Mimida et al. 2013).

2.1.1.1. Blütenknospe

Die Anlage gemischter Blütenknospen ist bei Apfel hauptsächlich an den terminalen Endknospen der sogenannten sekundären Kurztriebe, an Kurztrieben, sowie am einjährigen Holz (laterale Blüten) lokalisiert (Link 2018, Haberman et al. 2016, Hättasch et al. 2008, Tromp et al. 2005). Eine gemischte Blütenknospe (siehe Abbildung 3) besteht aus vier bis acht einzelnen Blüten, Blattanlagen und ein bis zwei Triebmeristemen (Celton et al. 2014, Eccher et al 2013, Koutinas et al. 2010, Tromp et al. 2005). Bei Apfel entwickeln sich Blütenknospen generell aus vegetativen Blattknospen. Diese Entwicklung dauert circa ein Jahr und läuft in zwei aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden ab (siehe Abbildung 2). Dabei durchlaufen vegetative Knospen bis hin zur generativen Blütenknospe im Wesentlichen drei

Entwicklungsphasen: Blüteninduktion, Blüteninitiation und Blütendifferenzierung (Koutinas et al. 2010, Hättasch et al. 2008).

In der ersten Phase (Phase I), der Blüteninduktion, wird das Meristem der Knospe von einer vegetativen auf eine generative Entwicklung umprogrammiert. Dies findet an den terminalen Endknospen der sekundären Kurztriebe in Abhängigkeit der Sorte circa drei bis sechs Wochen nach der Vollblüte statt und ist durch eine erhöhte Genexpression (z.B. *AFL2*, *MdMADS2*, *MDFT*, *AFL1* (Pinova)) in den vegetativen Knospen gekennzeichnet (Hättasch et al. 2008, Tromp et al. 2005, Callejas und Bangerth 1997). Sehr wahrscheinlich stellt Zucker in Form von Saccharose das auslösende Signal der Blüteninduktion dar (Xing et al. 2015). Hinzu kommen komplexe, hormonell gesteuerte Regelmechanismen, die ebenfalls in die Blüteninduktion und das Knospenwachstum involviert sind (Samuolienė et al. 2016, Xing et al. 2015). Beispielsweise ist das Phytohormon Cytokinin (CK) die Blüteninduktion und den Übergang von der vegetativen in die generative Phase der Blütenentwicklung involviert (Xing et al. 2015, D'Aloia et al. 2011, Amasino 2010). Auch der Gehalt an Abscisinsäure (ABA) steigt während der Blüteninduktion in den Knospen an und könnte daher ebenfalls eine Schlüsselfunktion bei der Steuerung der Blüteninduktion haben. Die Daten aus der entsprechenden Genexpressionsanalyse von Xing et al. (2015) zeigen, dass ABA auf multifaktorieller Ebene in die Regulation der Blüteninduktion involviert ist. Gibberelline (GA) wirken sich dagegen in vielen Obstarten negativ auf die Blütenbildung aus, da diese antagonistisch zu CK wirken (Xing et al. 2015, Wilkie et al. 2008).

Morphologisch zeigt sich die Blüteninduktion durch eine Verdickung der Sprossspitze (Apex) nach ungefähr 50 TnV (Mimida et al. 2013, Hättasch et al. 2008). Zu diesem Zeitpunkt sind bereits 10 bis 12 Blattanlagen in der Knospe entwickelt (Link 2018). Phase II der Blütenentwicklung ist die Blüteninitiation. Die Blüteninitiation geht einher mit einer Vielzahl an histologischen Veränderungen im Vegetationskegel (Apex). Zu diesen Veränderungen zählen unter anderem die Initiation der vier bis acht lateralen Meristemen in den Blattachsen der Hochblätter (Brakteen) aus den sich die lateralen Blüten entwickeln sowie die Initiation der Kelch-, Blüten und Fruchtblätter (Foster et al. 2003). Zeitlich findet die Blüteninitiation an den terminalen Endknospen der sekundären Kurztriebe nach circa 96 bis 109 TnV statt, wenn in Abhängigkeit der Sorte bereits 16 – 20 Blattanlagen in der Knospe entwickelt sind (Link 2018, Koutinas et al. 2010, Foster et al. 2003). In Phase III, der Blütendifferenzierung, findet die Differenzierung und Weiterentwicklung der Blütenanlagen statt. Die Differenzierung der einzelnen Blütenanlagen setzt im direkten Anschluss an deren Initiation ein (Koutinas et al.

2010). Die Blütendifferenzierung wird durch die Dormanz (Winterruhe) unterbrochen bevor sie im Frühjahr bis zur Blüte fortgesetzt wird (Link 2018).

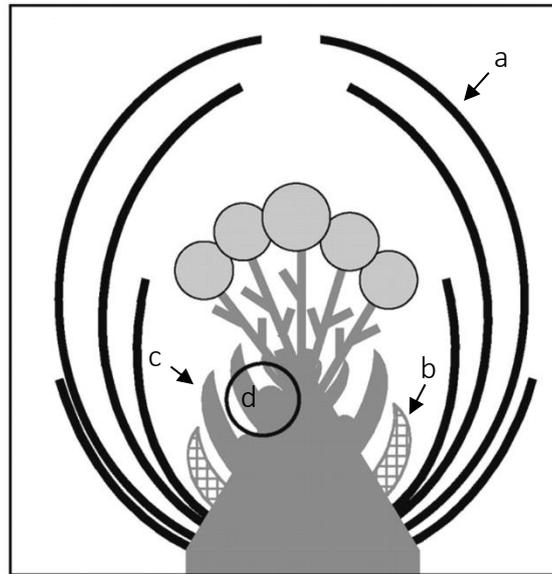
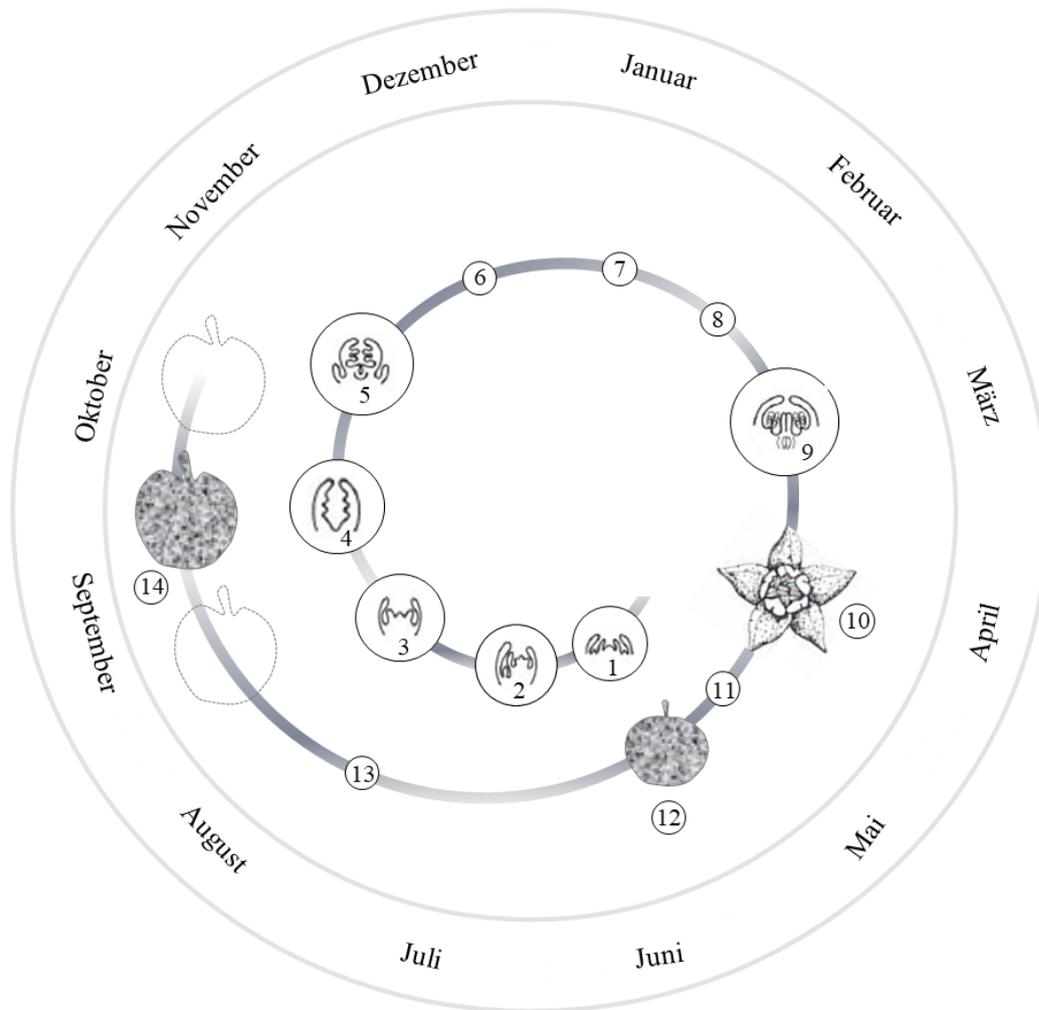


Abbildung 1. Schematische Darstellung einer gemischten Blütenknospe bei Apfel während der Dormanz im Winter. (a) Knospenschuppen; (b) Übergangsblätter; (c) Blattprimordium; (d) Triebmeristem. Verändert nach *Foster et al.* (2003).

Zwischen der Entwicklung der Blütenknospen an den sekundären Kurztrieben und der Entwicklung der lateralen Blütenknospen am einjährigen Holz liegen ungefähr fünf bis sechs Wochen (Tromp et al. 2005). Trotz der hohen zeitlichen Variabilität bei der Blütenknospenentwicklung, läuft die Blüte im Folgejahr in der Regel synchron innerhalb eines kurzen Zeitfensters ab. Die Synchronisation der Entwicklungsabläufe findet mit hoher Wahrscheinlichkeit während der Dormanz statt (Tromp et al. 2005). Ob sich grundsätzlich aus einer Blüte eine Frucht mit entsprechender Qualität entwickeln kann, steht in Zusammenhang mit deren morphologischen Entwicklungszustand zum Zeitpunkt der Blüte. Dieser morphologische Entwicklungszustand einer Blüte ist dabei abhängig von Faktoren, die die Entwicklung der Blütenknospen beeinflussen. Zu diesen zählen unter anderem der Zeitpunkt der Blüteninitiation und das Alter des Fruchtholzes (Koutinas et al. 2010).



- | | |
|---|--|
| ① Anlage der Blatt- und Achseltriebe | ⑧ Erlangung rascher Entwicklungsbereitschaft |
| ② Bildung der vegetativen Knospe | ⑨ weitgehende Differenzierung der Blütenorgane,
Tetradenbildung in den Antheren |
| ③ Beginn der Blütendifferenzierung | ⑩ Blüte |
| ④ Einwölbung des Blütenbeckers, Differenzierung
Staubblattanlagen. | ⑪ Zellteilung |
| ⑤ Anlage Gynoeceums, Weiterentwicklung Staubblätter | ⑫ T-Stadium |
| ⑥ Beginn Winterruhe | ⑬ Zellstreckung |
| ⑦ tiefste Winterruhe | ⑭ Ernte |

Abbildung 2. Zeitlicher Verlauf der Entwicklung eines Apfels von der vegetativen Knospe über die verschiedenen Entwicklungsstadien bis hin zur generativen Frucht zum Zeitpunkt der Ernte. Verändert nach *Larcher* (1995).

2.1.1.2. Die Blüte

In Deutschland beginnt der Knospenaustrieb beim Apfel (BBCH-Stadium 53) in Abhängigkeit der Region, Sorte und Witterung Mitte März bis Anfang April. Zwischen Austrieb und Vollblüte (BBCH-Stadium 65) liegen ungefähr 20 – 40 Tage (Dražeta et al. 2004). Während dieser Zeit entwickeln sich nicht nur die Primärblätter an der Blütenstandachse, sondern auch die Blüten schließen durch die Anlage der männlichen (Anthere) und weiblichen (Stigma) Sexualorgane ihre Entwicklung ab (Link 2018).

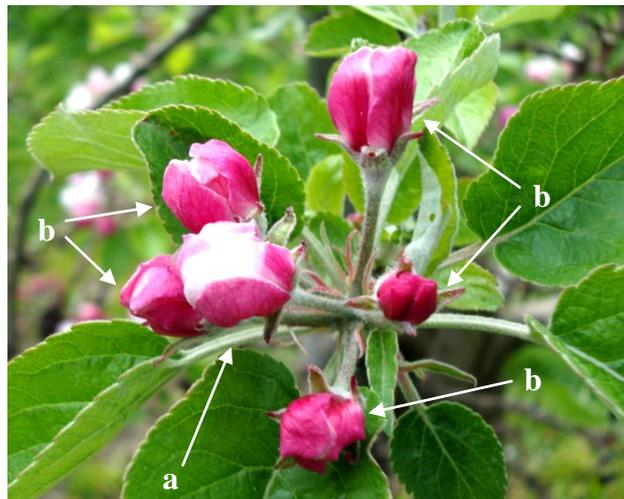


Abbildung 3. Aufsicht auf einen Blütenstand (Infloreszenz) der Sorte `Gala` zum Zeitpunkt Ballonstadium (BBCH-Stadium 59) kurz vor dem aufblühen. (a = Königsblüte, b = laterale Blüten).

Zwischen den vier bis acht Einzelblüten innerhalb eines Blütenstands (Infloreszenz, Abbildung 3) besteht eine Rangordnung auf Grund deren Position innerhalb des Blütenstandes und der zeitlichen Entwicklung. Entsprechend dieser Rangordnung öffnet sich die mittlere Blüte (Königsblüte), welche sich aus dem Apex entwickelt hat, ungefähr zwei Tage vor der ersten lateralen Blüte (Tromp et al. 2005). Erst daran anschließend öffnen sich die restlichen lateralen Blüten. Den Abschluss bildet die Blüte, welche in der Rangordnung direkt unter der Königsblüte steht. Dieser Entwicklungsvorsprung der Königsblüte gegenüber den lateralen Blüten führt über die gesamte Fruchtentwicklung hinweg zu einer besseren Versorgung mit Assimilaten (Jakopic et al. 2015, Tromp et al. 2005). Die Dauer der Blüte (BBCH-Stadium 60 – 69) ist in erster Linie vom Wetter abhängig und kann zwischen einer und mehreren Wochen variieren. Die Blüte läuft dabei nur bedingt parallel ab. Es gibt Unterschiede innerhalb einer Obstanlage, eines Baums und eines Astes. Grundsätzlich öffnen sich die Blüten am mehrjährigen Holz vor den lateralen Blüten am einjährigen Holz. Aus wieviel Blüten eines

Blütenstandes sich eine Frucht entwickelt ist unter anderem abhängig von der Befruchtung und dem Genotyp (Celton et al. 2014, Eccher et al. 2013).

Die meisten Apfelsorten sind selbstinkompatibel und benötigen daher den Pollen einer anderen Sorte für eine erfolgreiche Befruchtung (Vicens und Bosch 2000, Keulemanns et al. 1995). Nach einer erfolgreichen Übertragung der Pollen auf das Stigma der Blüte, wachsen die Pollenschläuche in die Eizelle ein und sorgen so für eine erfolgreiche Befruchtung der Blüte. Dies ist Grundvoraussetzung für eine anschließende Fruchtentwicklung. Für die Bestäubung der Blüten sind Insekten von außerordentlicher Bedeutung. Vor allem die Honigbiene (*Apis mellifera* L.) nimmt bei der Pollenübertragung eine zentrale Rolle ein (Musacchi und Serra 2018). Bienen nutzen auf der einen Seite die Farbe der Kornblätter (Petalen) der Blüte um Nahrung zu finden, indem sie den Grünkontrast zwischen Zielobjekt und Hintergrund abgleichen (Burger et al. 2010, Lehrer und Bischoff 1995). Zudem wird die Blütenstetigkeit der Bienen durch die Petalen aufrechterhalten (Chittka et al. 1999). Auf der anderen Seite spielen neben den visuellen Reizen auch Duft, Größe und Form der Blüte eine wesentliche Rolle bei der Blütenerkennung (Burger et al. 2010). Auch Blüten ohne Petalen werden von Bienen besucht, sodass auch dort eine erfolgreiche Bestäubung stattfinden kann (Williams und Brain 1985, Free 1960). Neben Honigbienen sind auch Hummeln (*Bombus terrestris* L.) für die Bestäubung von Bedeutung (Sapir et al. 2017).

2.1.1.3. Fruchtwachstum

Das Fruchtwachstum bei Apfel kann in zwei Phasen, Zellteilung und Zellstreckung, unterteilt werden (Stösser und Büchele 2018, Dash und Malladi 2012, Lakso et al. 1995). Dabei lässt sich an der Frucht der Übergang von der Zellteilungs- zur Zellstreckungsphase morphologisch am T-Stadium (BBCH-Stadium 74) erkennen (Streif und Kitemann 2018).

Der Fruchtansatz ist gekennzeichnet durch ein rasches Wachstum der Eizelle nach einer erfolgreichen Befruchtung (Tromp et al. 2005, S. 240 K. 18.2.1). Dieses rasche Wachstum ist auf einen starken Anstieg der Zellteilungsrate in der Eizelle zurückzuführen und ist verbunden mit einem hohen Bedarf an Assimilaten (Dash et al. 2013, Dash und Malladi 2012). Ein Mangel an Assimilaten während der ersten zwei bis drei Wochen nach Vollblüte kann sich daher negativ auf das Fruchtwachstum auswirken (Dash und Malladi 2012, Lakso et al. 1999, Lakso et al. 1998). Bereits bei der Keimung des Pollens und dem folgenden Pollenschlauchwachstum werden Auxine und Gibberelline gebildet und basipetal in Richtung der Wurzel transportiert. Mit einer erfolgreichen Befruchtung und der anschließenden Entwicklung des Endosperms wird die Synthese beider Phytohormone, parallel zur Zunahme der Zellteilungsrate, stimuliert

(Tromp et al. 2005, Martin et al. 1982, Martin et al. 1980). Durch den Export aus den heranwachsenden Früchten wird deren `Sink`-Wirkung verbessert, was wiederum eine stärkere Verlagerung von Nährstoffen in Richtung der Blüte ermöglicht. Dabei werden Auxin und Gibberellin hauptsächlich in den Samen der Früchte synthetisiert. Die Anzahl der Samen, die sich in einer heranwachsenden Frucht entwickeln, korreliert dabei in Abhängigkeit der Sorte mit der Anzahl der bestäubten Stigmata. Zudem hat die Anzahl der Samen einen Einfluss auf den Fruchtansatz und die Fruchtqualität (Matsumoto et al. 2012, Volz et al. 1996). Dies ist ein Hinweis auf die Bedeutung der Samen für die `Sink`-Wirkung innerhalb einer Frucht. Die Zellteilungsphase dauert circa drei bis sechs Wochen (Stösser und Büchele 2018, S. 35, Tromp et al. 2005, S 244, K. 18.3.2, Lakso et al. 1995). Während dieser Zeit werden in Abhängigkeit der Frucht und deren `Sink`-Wirkung 40 bis 60 Millionen Zellen angelegt, welche die Grundlage für die spätere Fruchtgröße bilden (Stösser und Büchele 2018, S. 35, Dash und Malladi 2012). Der Übergang von der Zellteilungs- zur Zellstreckungsphase findet innerhalb einer Frucht nicht gleichzeitig statt, sondern beginnt im Kernhaus und endet im Cortex (Tromp et al 2005, S244, K. 18.3.2).

Während der Zellstreckungsphase wird das Volumen einer Zelle in Abhängigkeit von deren Lage im Gewebe um das bis zu 560-fache vergrößert. Die Größe einer einzelnen Zelle variiert zwischen 200 und 700 μm (Stösser und Büchele 2018, S. 35). Je nach Sorte dauert die Zellteilungsphase um die 16 Wochen (Lakso et al. 1995).

Die Fruchtgröße zur Ernte wird durch die Anzahl der Zellen sowie deren Größe bestimmt. Welcher der beiden Parameter maßgeblich für die Größe der Früchte ist, hängt von inneren und äußeren Faktoren sowie auch von kulturtechnischen Maßnahmen ab (Malladi und Hirst 2010, Harada et al. 2005, Tromp et al. 2005, S. 244, K. 18.3.2, Bain und Robertson 1951). Eine frühe Ausdünnmaßnahme, verbunden mit einer Reduktion des Fruchtbehangs, fördert einen schnellen Fruchtzuwachs (Abbildung 4) während der Zellteilungsphase vor allem dann, wenn genügend Assimilate zur Verfügung stehen (Dash et al. 2013, Lakso et al. 1995). Sowohl die Anzahl als auch die Größe der Zellen sind sowohl für die Textur als auch die Fruchtfleischfestigkeit von Bedeutung und damit auch für die Lagerfähigkeit der Früchte (Stösser und Büchele 2018, S. 35).

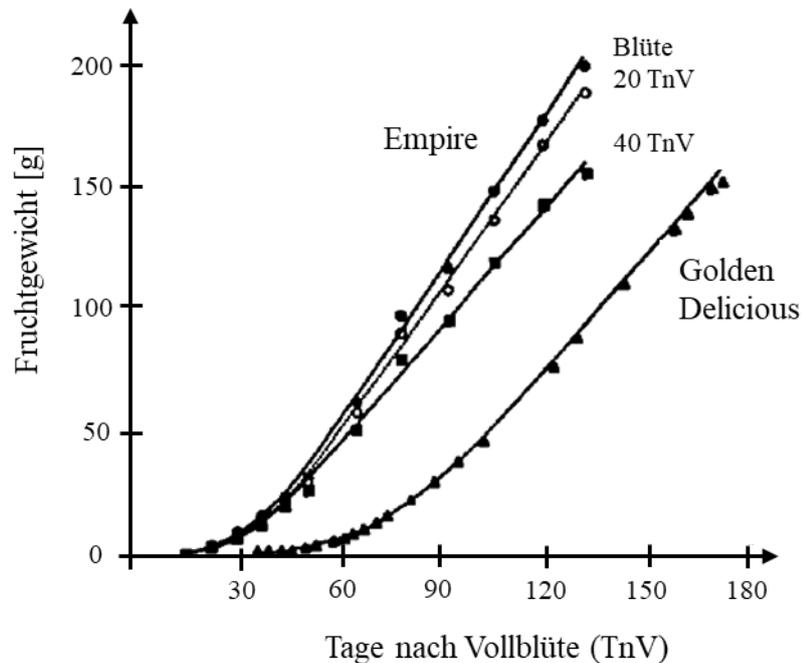


Abbildung 4. Zunahme des saisonalen Frischgewichts einer individuellen Apfelfrucht in Abhängigkeit des Zeitpunkts der Handausdünnung (0, 20 und 40 Tage nach Vollblüte (TnV) auf einen mittelstarken Fruchtbehang pro Baum in der Sorte `Empire` in Geneva (New York, USA, 1988) und `Golden Delicious` in (Bologna, Italien, 1990). Verändert nach *Lakso et al.* (1995).

2.1.2. Blüten- und Fruchtfall

Der Obstbaum verfügt über komplexe Mechanismen um selbstregulierend auf den eigenen Fruchtbehang einzuwirken. Dies erfolgt in der Regel über den Abwurf von nicht befruchteten Blüten (Nachblütefall) bzw. unterentwickelten Früchten (Junifruchtfall) (Jakopic et al. 2015, Dal Cin et al. 2005). In den meisten Fällen fällt der Blüten- und Fruchtfall jedoch zu gering aus, sodass eine deutliche Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen Ertrag (Anzahl an Früchten je Baum) und der Zielvorstellung des Obstbauern bestehen bleibt.

2.1.2.1. Physiologischer Hintergrund: Blüten- und Fruchtfall

Die Faktoren, die den Blütenfall bedingen unterscheiden sich generell von denen des Fruchtfalls (siehe Absatz Nachblütefall und Junifruchtfall). Dennoch sind die grundsätzlichen physiologischen Prozesse, die letztendlich das Abfallen der Blüten oder Früchte bewirken, in beiden Fällen identisch (Botton et al. 2011, Bangerth 2000).

Generell wird bei Apfel am Stielansatz der Blüte bzw. der Frucht ein Trenngewebe ausgebildet (Tromp et al. 2005). Die Ausdifferenzierung dieser spezialisierten Zellen im Trenngewebe findet bereits vor der Blüte, parallel zur Entwicklung der lateralen Organe, statt. Bereits zum Zeitpunkt rote Knospe (BBCH-Stadium 57) ist im Stiel ein aus 20 bis 30 Zellen breiter

Zellverbund zu sehen, aus dem sich das Trenngewebe entwickelt. Dabei ist das Trenngewebe nicht zwangsweise über die komplette Lebensdauer des Organs aktiv (Estornell et al. 2013). Die Zellen der Trennschicht sind kleiner, haben ein kompakteres Zytoplasma und sind untereinander über Plasmodesmen verbunden. Auf Grund dieser Eigenschaften sind sie eindeutig von benachbarten Zellen im Gewebe abgrenzbar (Taylor und Whitelaw 2001). Die Anzahl der Zellschichten variiert in Abhängigkeit der verschiedenen Pflanzenarten (Estornell et al. 2013, Taylor und Whitelaw 2001). Das Abwerfen von Blüten bzw. Früchten lässt sich durch eine erhöhte Genexpression im Trenngewebe, resultierend im Abbau der Zellwände und dem auflockern der Zellverbände charakterisieren. Dabei ist der entscheidende Schritt der enzymatische Abbau der pektinreichen Mittellamelle unter anderem durch Polygalacturonasen oder Cellulasen (Taylor und Whitelaw 2001). Hierbei handelt es sich im Trenngewebe um eine spezifische Polygalacturonase, die sich von anderen Polygalacturonasen welche beispielsweise in das Auflösen der Zellverbände während der Fruchtreifung involviert sind, unterscheidet (Taylor et al. 1991, Kalaitzis et al. 1997).

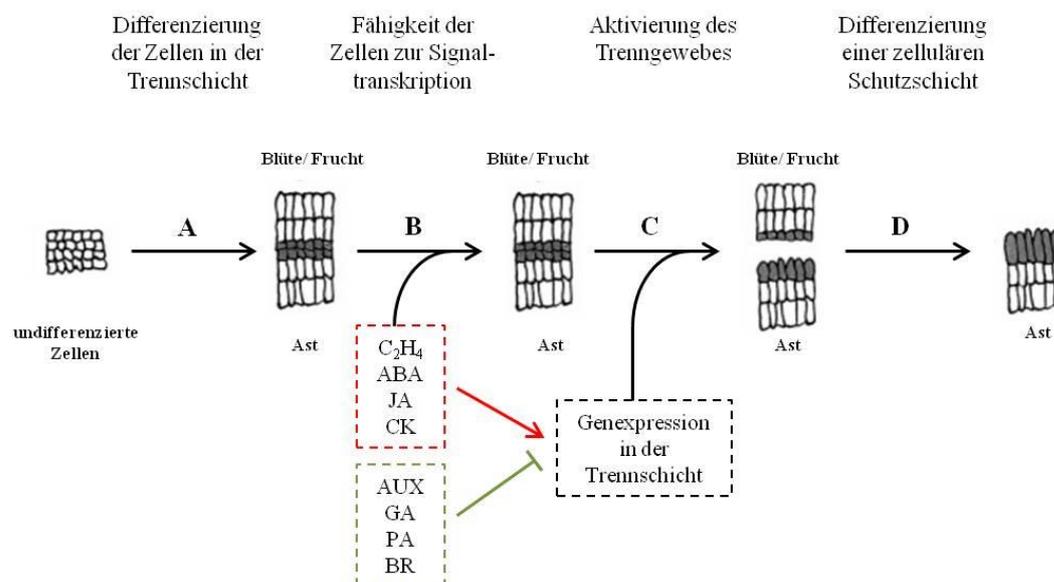


Abbildung 5. Vierstufiges Model zur Ausbildung eines Trenngewebes an der Stielbasis einer Blüte oder einer Frucht bei Apfel unter der Berücksichtigung des Einflusses der Phytohormone (Ethylen (C₂H₄), Abscisinsäure (ABA), Jasmonsäure (JA), Cytokinin (CK), Auxin (AUX), Gibberellin (GA), Polyamin (PA) und Brassinosteroide (BR)). (A) Ausbildung eines Trenngewebes durch Differenzierung der Zellen. (B) Befähigung der Zellen im Trenngewebe auf innere und äußere aktivierende Signale zu reagieren. (C) Aktivierung des Trenngewebes. (D) Bildung einer zellulären Schutzschicht auf Seite der Pflanze. Verändert nach Estornell et al. (2013) und Patterson (2001).

Nach derzeitigem Wissenstand kann der Blüten- bzw. Fruchtfall in vier wesentliche Vorgänge unterteilt werden (Abbildung 5):

- A) Ausbildung eines Trenngewebes durch Differenzierung der Zellen,
- B) Befähigung der Zellen im Trenngewebe auf innere und äußere aktivierende Signale zu reagieren,
- C) Aktivierung des Trenngewebes und
- D) die Bildung einer zellulären Schutzschicht auf Seite der Pflanze (Estornell et al. 2013, Patterson 2001).

2.1.2.2. Hormonelle Steuerung des Blüten- und Fruchtfalls

Die Ausbildung des Trenngewebes wird durch einen multifaktoriellen Reiz hormonell gesteuert (Estornell et al. 2013, Taylor und Whitelaw 2001). Dabei kann zwischen zwei Gruppen an Phytohormonen unterschieden werden, die entweder die Aktivierung des Trenngewebes fördern oder inhibieren. Ethylen und Abscisinsäure wirken als fördernde bzw. beschleunigende Signale, während Auxin und Gibberellin inhibierend wirken (Cin et al. 2007, Taylor und Whitelaw 2001, Stutte und Gage 1990). Im klassischen Blatt- und Fruchtfallmodell wird die Aktivierung des Trenngewebes durch einen konstanten Auxin-Export aus dem distalen Organ unterdrückt. Erst wenn der Auxinexport aus dem distal gelegenen Organ, voraussichtlich durch die Depolarisierung des Transportes, verringert wird steigt die Ethylenkonzentration im Trenngewebe an und das Trenngewebe wird aktiviert (Eccher et al. 2015, Botton et al. 2011, Taylor und Whitelaw 2001, Bangerth 2000). Aus diesem Grund gelten vor allem Auxine, insbesondere Indol-3-essigsäure (IAA), und Ethylen als antagonistisch wirkende Schlüsselhormone bei der Regulierung des Blüten- bzw. Fruchtfalls. Zur Aktivierung des Trenngewebes ist dabei nicht nur die absolute Konzentration jener Phytohormone im Trenngewebe entscheidend, sondern vielmehr deren Konzentrationsverhältnis. Des Weiteren ist die Sensitivität des Trenngewebes, also die Anzahl und Affinität der Rezeptoren, gegenüber fördernden und inhibierenden Signalen abhängig vom Entwicklungsstadium der Frucht (Taylor und Whitelaw 2001).

Fruchtfallereignisse laufen in der Regel nicht kontinuierlich ab, sondern können im Wesentlichen in 3 Perioden (Nachblütefall, Junifruchtfall und Vorerntefruchtfall) unterteilt werden (Link 2002).

2.1.2.3. Nachblütefall

Blüten, aus denen sich auf Grund fehlender Bestäubung oder Befruchtung keine Frucht entwickelt, werden nach der Blüte vom Baum abgestoßen (Link 2002). Diese Phase wird als Nachblütefall bezeichnet. Hintergrund ist, dass der Auxin-Export aus diesen Blüten auf Grund der fehlenden Befruchtung abgeschwächt ist und folglich das Trenngewebe durch Ethylen aktiviert wird (Tromp et al. 2005). Generell ist die Ethylen-Konzentration zu Beginn der Blütenentwicklung in den frühen Blühstadien gering. Erst mit fortschreitender Blütenentwicklung steigt die Ethylen-Konzentration in der Blüte an (Tabelle 1). Während die Ethylen-Konzentration nach erfolgreicher Befruchtung wieder absinkt, bleibt die Ethylen-Konzentration in den unbefruchteten Blüten hoch und führt damit zum Abfall der Blüten (Friedrich und Fischer 2000, Ebert und Bangerth 1985, Blanpied 1972).

Tabelle 1. Extrahierbarer Gehalt an Ethylen aus Blütengewebe bei Apfel in $\text{nl g}^{-1} \text{FM}^{-1}$ (Frischmasse) (Blanpied 1972).

Blütenstadium	BBCH-Stadium	Ethylen [$\text{nl g}^{-1} \text{FM}^{-1}$]
Grüne Knospe	56	0,03
Rote Knospe	57	0,05
Ballon Stadium	59	0,06
Vollblüte	65	0,05
Abgehende Blüte	67	0,29
<i>Abfallende Blüte</i>	71	0,28
<i>Verbleibende Blüte</i>	71	0,11

Zusätzlich können auch befruchtete Blüten auf Grund der Unterdrückung des eigenen Auxin-Exports abfallen. Die Unterdrückung durch den stärkeren Auxin-Export eines ranghöheren Organs, in diesem Fall einer weiterentwickelten Blüte, erfolgt an der Stelle, an der beide Auxin-Ströme aufeinander treffen (weitere Erläuterungen siehe Kapitel 2.1.2.4. Junifruchtfall). Im Blütenstand eines Apfels ist die Wahrscheinlichkeit am höchsten, dass die erste laterale Blüte vom Baum abgeworfen wird. Das ist jene Blüte deren Blütenblätter sich als letztes öffnen (Tromp et al. 2005, S. 260, K. 18.5.3).

Blüten, welche abgestoßen werden sollen, lassen sich am ausbleibenden Größenwuchs, den abgefallenen Blütenblättern, verwelkten Stempeln und Antheren sowie einem gelb werdenden Stiel erkennen. Je nach Jahr, Witterung, Obstanlage, Sorte, Anzahl an Blüten und sogar der

Position am Baum kann es erhebliche Schwankungen im Nachblütefall geben. Diese Schwankungen lassen sich in der Regel anhand der Bestäubungssituation erklären (Link 2002, Tromp et al. 2005, S. 260, K. 18.5.3).

2.1.2.4. Junifruchtfall – Korrelativ regulierter Fruchtfall

Eine unzureichende Versorgung des Baumes mit Assimilaten und Nährstoffen führt dazu, dass heranwachsende Früchte mit einer schwachen `Sink`-Wirkung vom Baum abgestoßen werden (Botton et al. 2011). Diese Fruchtfallphase wird als sogenannter Junifruchtfall bezeichnet und beginnt circa vier bis acht Wochen nach der Blüte (Jakopic 2015, Dal Cin et al. 2009a, Dal Cin et al. 2009b, Dennis 2003, Link 2002). Dabei ist die Wahrscheinlichkeit am Baum zu verbleiben bei gut entwickelten Früchten, die eine Vielzahl an Samen aufweisen höher. Unterentwickelte Früchte, mit einer geringen Anzahl an Samen, werden dagegen verstärkt vom Baum abgestoßen (Tromp et al. 2005, S. 260, K. 18.5.4). Der Fruchtfall kann ein vorprogrammierter Entwicklungsschritt sein, jedoch kann er auch durch biotischen oder abiotischen Stress gefördert werden (Jakopic et al. 2018, Eccher et al. 2015). Zum Zeitpunkt des Abwurfs weisen die abfallenden Früchte im Vergleich zu den am Baum verbleibenden in der Regel eine geringere Fruchtgröße auf (Tromp et al. 2005, S. 260, K. 18.5.4). Die Verlangsamung des Fruchtwachstums beginnt ungefähr eine bis zwei Wochen vor dem Abfallen (Jakopic et al. 2015). Die abfallenden Früchte sind zudem durch unterschiedliche Entwicklungsstufen des Endosperms und ein unterentwickeltes Xylem gekennzeichnet. Die Unterbrechung des Endospermwachstums lässt sich in erster Linie auf eine mangelnde Versorgung mit Nährstoffen zurückführen (Tromp et al. 2005, S. 260, K. 18.5.4).

Bei der initialen Aktivierung des Trenngewebes an jungen Früchten kann weder ein Anstieg der Ethylenkonzentration noch ein Rückgang der Auxinkonzentration im Trenngewebe festgestellt werden (Bangerth 2000). Hieraus folgt, dass junge Apfelfrüchte erst altern, nachdem deren Abfallen bereits determiniert ist (Bangerth 2000). Nach dem derzeitigen Modell von *Eccher et al.* (2015) deutet eine erhöhte Ethylen-, ABA- und `Reactive Oxygen Species` (ROS)-Biosynthese auf die Induktion des Fruchtfalls im Cortex der Früchte hin. Als Konsequenz aus dem Ethylen- und ROS-Signal unterbrechen die Samen die Embryogenese und reduzieren die Auxin-Biosynthese (Eccher et al. 2015, Eccher et al. 2013, Botton et al. 2011). Dabei scheint vor allem Ethylen, in Abhängigkeit der Ethylen-Biosynthese im Cortex sowie die Anzahl der Ethylen-Rezeptoren im Samen zu determinieren ob eine Frucht am Baum verbleibt oder abgestoßen wird (Eccher et al. 2015).

Nach *Bangerth* (2000) handelt es sich bei Apfel um einen korrelativ regulierten Fruchtfall. Dies bedeutet, dass an der Stelle innerhalb eines Fruchtstandes an der zwei Auxin-Ströme aufeinandertreffen, der Schwächere vom Stärkeren unterdrückt wird. Dabei wird der Auxin-Export jener Frucht, die abfallen wird, durch einen entsprechenden „Dominanzeffekt“ von benachbarten Früchten bzw. Trieben, durch die sogenannte Auxin-Autoinhibition vermindert. In Folge dessen steigt die Empfindlichkeit des Trenngewebes gegenüber Ethylen an und es kommt zur Aktivierung dessen (Eccher et al. 2015, Meir et al. 2010, Dal Cin 2009b, Dal Cin et al. 2009a, Meir et al. 2006, Bangerth 2000, Bangerth 1997, Gruber und Bangerth 1990, Bangerth 1989a). Der Grad der Dominanz zwischen den einzelnen Früchten hängt im Wesentlichen von den Faktoren Zeitpunkt des Fruchtansatzes, Samenanzahl je Frucht, Triebwachstum nahegelegener Triebe und Anzahl Früchte je Fruchtstand ab (Bangerth 2000). Während der Induktion des Fruchtfalls wird bereits in den Samen der abfallenden Früchte die Transkription bzw. die Genexpression der am Auxin-Transport beteiligten Enzyme reduziert. In der Folge schwächt sich deren Auxin-Export ab, wodurch die Konkurrenzfähigkeit der Früchte gegenüber dem Auxin-Export des dominierenden Organs weiter reduziert wird (Dal Cin et al. 2009a).

Innerhalb eines Fruchtstandes zeigen dominierte Früchte ein vermindertes Wachstum und einen geringeren Auxin-Export (Siehe Abbildung 6). Diese Eigenschaften können aufgehoben werden, sobald das dominierende Organ (Frucht/ Triebspitze) entfernt wird, solange noch kein kritischer Zeitpunkt erreicht ist (Bangerth 2000). Neben der Auxin-Autoinhibition, ist nach *Bangerth* (1989b) Auxin auch in der Lage seinen basipetalen Transport selbst zu stimulieren (Auxin-Autostimulation). Diese beiden Effekte, Autoinhibition und Autostimulation, beeinflussen entsprechend der Hierarchie im Fruchtstand, den Auxinexport aus einer Frucht und damit auch, ob sich ein Trenngewebe ausbildet oder nicht (Bangerth 2000). Hinzu kommt das mit zunehmender Anzahl an Früchten im Fruchtstand der Effekt der Autoinhibition des Auxin-Exports gegenüber, der am stärksten dominierten Frucht verstärkt wird. Im Umkehrschluss ist der Effekt bei wenigen Früchten je Fruchtstand gering (Bangerth 2000).

Die Intensität des Junifruchtfalls ist stark abhängig vom Jahr, der Sorte aber auch von der Wüchsigkeit eines Baumes. Zudem besteht eine Wechselwirkung zwischen dem Nachblütefall und dem Junifruchtfall. Fällt der Nachblütefall stark aus, gleichbedeutend mit einem geringen Fruchtansatz, ist in der Regel der Junifruchtfall schwächer und umgekehrt (Tromp et al. 2005, S. 260, K. 18.5.4, Link 2002).

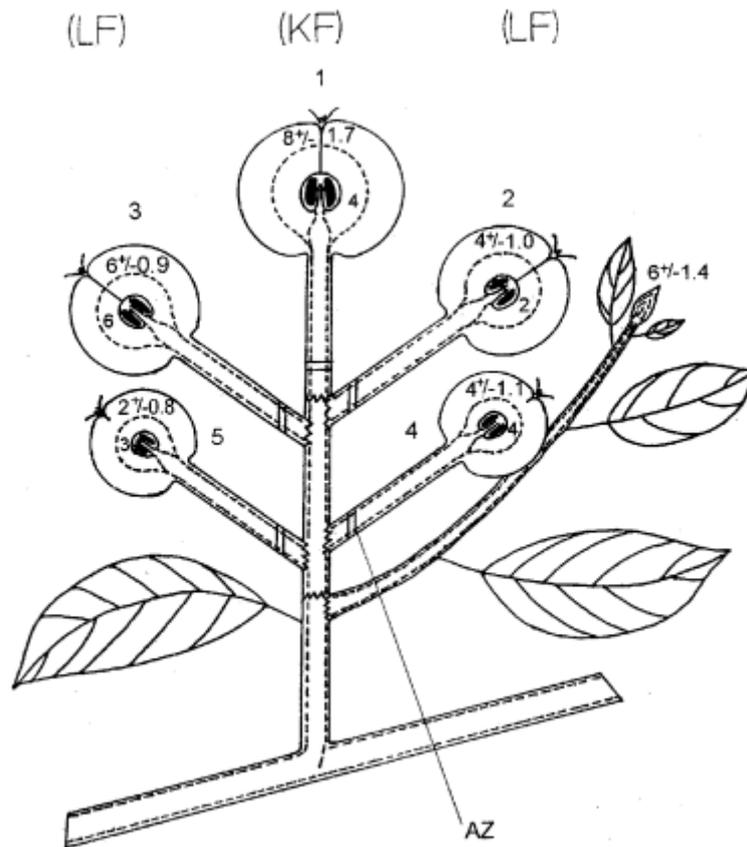


Abbildung 6. Schema eines Fruchtstandes bei Apfel, bestehend aus der Königsfrucht (1 KF), den lateralen Früchten (LF) entsprechend deren Hierarchie im Fruchtstand (2–5) und des sekundären Kurztriebes (eng. `bourse shoot`). Die Zahlen innerhalb der Früchte geben den IAA-Export (Jonagold 25 TnV.) inklusive der Standardabweichung in Nanogramm [ng] und die Samenanzahl wieder (Bangerth 2000).

2.2. Ausdünnung

Unter dem Begriff der Ausdünnung versteht man im Obstbau das Entfernen von Blüten oder Früchten durch einen aktiv gesteuerten Eingriff des Obstbauern. Das Ziel einer Ausdünnmaßnahme besteht darin den Fruchtbehang so zu reduzieren, dass jährlich konstante Erträge mit guter Fruchtqualität erzielt werden können um damit den ökonomischen Output zu steigern (Link 2018, Cline et al. 2018, Costa et al. 2013, Seehuber et al. 2014, Tromp et al. 2005, Link 2002, Dennis 2000, Link 2000, Westwood 1998, Looney 1992).

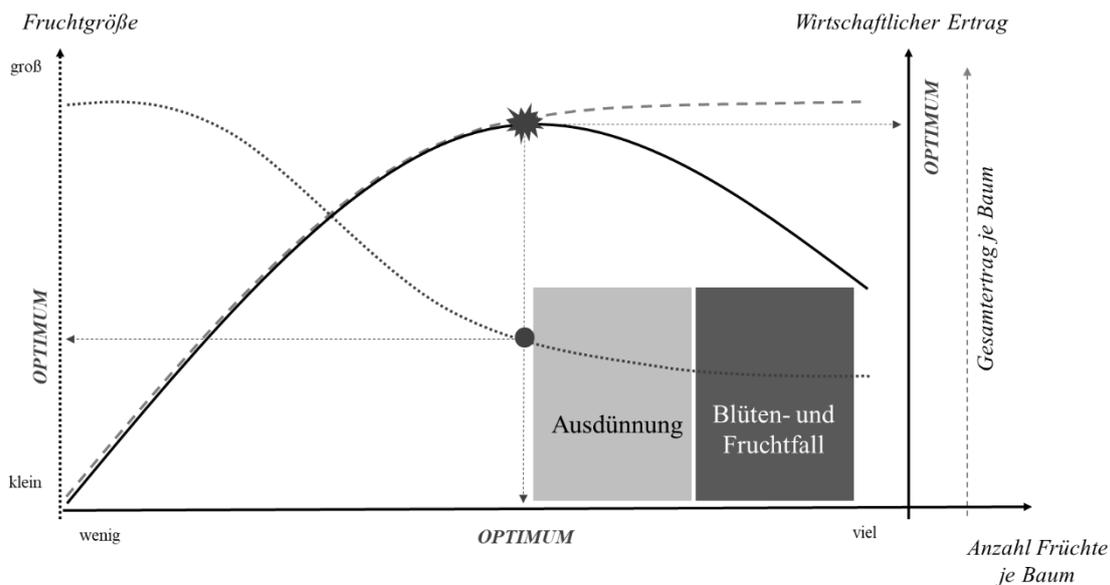


Abbildung 7. Beziehung zwischen der Anzahl an Früchte pro Baum und der Apfelfruchtgröße, sowie dem Blüten- und Fruchtfall und der Ausdünnung der Äpfel in Bezug auf Gesamtertrag [kg] und wirtschaftlichen Ertrag [€] pro Baum. Verändert nach *Costa et al.* 2018.

Der Hintergrund für die Notwendigkeit einer Ausdünnmaßnahme ist physiologisch bedingt. Auf der einen Seite setzt der Apfelbaum mehr Früchte an als er in guter Qualität bis zur Ernte entwickeln kann (Link 2018, Breen et al 2012). Bei einer sogenannten Weißblüte reicht für einen Vollertrag bereits aus, wenn sich aus sieben bis acht Prozent der Blüten erntefähige Früchte entwickeln (Seehuber et al. 2014, Costa et al. 2013). Auf der anderen Seite sind die natürlichen Fruchtfallmechanismen (Nachblütefall und Junifruchtfall) in der Regel zu schwach und zeitlich zu spät um sich positiv auf die Brechung der Alternanz auszuwirken (Costa et al. 2018).

Inwiefern sich eine Ausdünnmaßnahme positiv auf die Fruchtqualität und die Reduzierung von Alternanzerscheinungen auswirkt, ist unter anderem vom Zeitpunkt der Maßnahme und deren Effektivität abhängig. Hierzu haben diverse Versuche (Brunner 2013, Robinson et al. 2009, Koike et al. 2003, Byers und Carbaugh 2002) gezeigt, dass der Effekt einer Ausdünnmaßnahme auf die Reduktion von Alternanzerscheinungen im Folgejahr ($x + 1$) mit zunehmender Fruchtentwicklung (Vollblüte + 30 Tage) abnimmt. In Bezug hierauf zeigen sich Maßnahmen zur Blüte am effektivsten.

Hingegen können positive Effekte zur Verbesserung der Fruchtqualität auch noch später im Verlauf der Fruchtentwicklung erzielt werden. Generell gilt hierbei zu bedenken, dass sehr frühe Ausdünnmaßnahmen zwar positiv in Bezug auf Brechung der Alternanz und Förderung der Fruchtqualität zu bewerten sind allerdings auch das Risiko einer Überdünnung erhöhen, da

physiologische Entwicklungsprozesse am Baum bzw. der Frucht noch nicht weit fortgeschritten oder abgeschlossen sind. Zwar wird durch eine effektive Ausdünnmaßnahme der absolute Ertrag in Kilogramm je Hektar einer Obstanlage reduziert, im Gegenzug dafür aber der ökonomische Wert der verbleibenden Früchte gesteigert (Tromp et al. 2005). Für die Ausdünnung stehen dem Obstbauern chemische oder mechanische Maßnahmen zur Verfügung, welche ihm erlauben zu verschiedenen Zeitpunkten in der Fruchtentwicklung (Blüte bis circa 18 mm Fruchtdurchmesser (Greene 2013)) mehr oder minder gezielt den Fruchtbehang zu reduzieren (Costa et al. 2018). Um das Risiko einer Überdünnung zu reduzieren, werden in der obstbaulichen Praxis in der Regel mehrere Ausdünnmaßnahmen in einer Ausdünnstrategie kombiniert (Cline et al. 2018). Dies bedeutet es werden zu verschiedenen Zeitpunkten entlang der Fruchtentwicklung einzelne Ausdünnmaßnahmen durchgeführt um sich so dem Zielertrag schrittweise anzunähern.

Bei der Durchführung einer Ausdünnmaßnahme werden baumspezifische Unterschiede im Blüten- oder Fruchtbesatz der Bäume in der Regel kaum beachtet. Vielmehr wird eine Obstanlage als homogene Einheit betrachtet und daher uniform behandelt (Aggelopoulou et al. 2010). Teilspezifische Behandlungen beruhen bis dato ausschließlich auf den Erfahrungen des Obstbauern und erfordern eine sehr gute Kenntnis über die Verhältnisse innerhalb einer Anlage. Besonders in Obstanlagen mit heterogen Blüten- bzw. Fruchtbesatz an den Bäumen kann eine uniforme Ausdünnmaßnahme auf der einen Seite den Ertrag mancher Bäume durch Überdünnung der Bäume zusätzlich reduzieren (Hocevar et al. 2014) oder auf der anderen Seite Bäume zu schwach ausdünnen und dadurch die Kosten für eine Handausdünnung steigern. Um die Fruchtqualität und -quantität innerhalb einer heterogenen Obstanlage zu steigern, ist eine baumspezifische Betrachtungsweise der Obstbäume entscheidend (Manfrini et al. 2009).

2.2.1. Chemische Ausdünnung

Trotz der derzeit schwierigen Lage bei der Zulassung neuer Pflanzenschutzmittel, zu denen die meisten chemischen Ausdünnmittel zählen, wurden erst in den zurückliegenden Jahren 2016 und 2017 zwei „neue“ Wirkstoffe zur chemischen Ausdünnung in Deutschland zugelassen, sodass derzeit (Stand 2018) die Wirkstoffe α -Naphthylelessigsäure (NAA), Metamitron, 6-Benzyladenin (6-BA) und Amoniumthiosulfat (ATS) zur Verfügung stehen. Diese werden ergänzt durch Öl und Schwefelkalk, welche hauptsächlich im biologischen Anbau genutzt werden (Zoth 2018, Greene 2013, Widmer et al. 2012). Die Zulassung für 2-Chlorethylphosphonsäure (Ethephon) lief dagegen 2018 aus (Zoth 2018). Die Wirkung einer chemischen Ausdünnmaßnahme wird maßgeblich von der Witterung, sprich Temperatur und

Luftfeuchtigkeit, beeinflusst. Hinzu kommen weitere Faktoren wie der Applikationszeitpunkt, die Konzentration des Wirkstoffes, die Formulierung und auch Sortencharakteristika (Wang et al. 2013, Widmer et al. 2012, Greene und Costa 2012, Wertheim 2000, Forshey 1976).

2.2.2. Mechanische Ausdünnung

2.2.2.1. Maschinelle Blütenausdünnung

Erst seit den letzten zehn bis 15 Jahren hat das Interesse an der maschinellen Blütenausdünnung nicht nur im ökologischen Anbau, sondern auch in der integrierten Produktion zugenommen. Dies obwohl bereits in den 70iger Jahre beginnend eine Vielzahl an Versuchen hierzu durchgeführt wurden (Costa et al. 2018, Link 2018, Veal et al. 2011, Seehuber et al. 2013, Lafer 2010, Höhne 2001, Bertschinger 1996).

Inzwischen wird die maschinelle Ausdünnung nicht nur mehr als Alternative, sondern vielmehr als Ergänzung für eine erfolgreiche Ausdünnstrategie betrachtet (Assirelli et al. 2018, Kon et al. 2013). Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- die technische Weiterentwicklung der Maschinen,
- keine Verlängerung der Zulassungen für bestehende chemische Wirkstoffe,
- keine Zulassung neuer chemischer Wirkstoffe,
- die witterungsabhängige Ausdünnwirkung chemischer Wirkstoffe zunehmend unbefriedigend ausfällt,
- die Kostenexplosion für Arbeitskräfte und
- die Weiterentwicklung der Erziehungssysteme im Anbau (Costa et al. 2018, Greene und Costa 2012).

Gerade die von der Witterung unabhängige und umweltfreundliche Wirkweise einer maschinellen Ausdünnung sind wichtige Pluspunkte im Vergleich zur chemischen Ausdünnung (Assirelli et al. 2018, Widmer et al. 2012, Lafer 2010, Strimmer et al. 1997).

Im deutschen Kernobstanbau sind im Wesentlichen zwei Maschinentypen zur maschinellen Blütenausdünnung bekannt, wobei sich im praktischen Obstbau inzwischen hauptsächlich die `Darwin`-Maschine (Fruit-Tec; Markdorf) durchgesetzt hat. Der `Flexitree` (Clemens GmbH & CO KG; Wittlich), welcher besser bekannt ist als „Bonner System (Typ Bonn)“ hat sich dagegen nur begrenzt verbreitet. Der hauptsächliche Unterschied zwischen beiden Geräten ist die funktionelle Einheit. Beim Flexitree besteht die funktionelle Einheit aus drei oder vier Rotoren, deren Fäden vertikal in der Baumkrone arbeiten. Hierbei lassen sich die hydraulisch angetriebenen Rotoren getrennt voneinander ansteuern und deren Neigungswinkel individuell

an die entsprechende Baumform anpassen (siehe Abbildung 8) (Damerow et al. 2007b). Im Gegensatz zum `Flexitree`, ist die `Darwin`-Maschine nur aus einer funktionellen Einheit, der sogenannten Spindel, aufgebaut (siehe Abbildung 9) (Bertschinger 1996).



Abbildung 8. Ausdünnmaschine `Flexitree` (Typ Bonn) der Firma Clemens GmbH & CO KG aus Wittlich. Entwickelt von L. Damerow und M. Blanke an der Universität Bonn (Damerow et al. 2007a).

2.2.2.2. `Darwin`-Maschine

Die Idee, Entwicklung und Umsetzung der `Darwin`-Maschine ist auf Herrmann Gessler aus Friedrichshafen Anfang der 90ziger Jahre zurückzuführen. Seit 2007 wird die `Darwin`-Maschine von der Firma Fruit-Tec (Markdorf – Bodensee) weiterentwickelt und vertrieben. An dieser vertikal gelagerten Spindel werden seit 2009 im Spritzgussverfahren hergestellte Fadenleisten mit einer Fadenlänge von 60 cm montiert. Diese neuen Fadenleisten zeichnen sich im Vergleich zum ursprünglichen Fadensystem durch eine schonendere Ausdünnung und eine längere Abnutzungsdauer aus (Link 2018, Lafer 2010). Der Antrieb der Spindel erfolgt über einen Ölmotor bzw. den Ölkreislauf des Traktors, wodurch sich die Umdrehungsgeschwindigkeit ($U \text{ min}^{-1}$) der Spindel (Spindeldrehzahl) über die Steuerung der `Darwin`-Maschine stufenlos, zwischen 150 U min^{-1} und 450 U min^{-1} , variieren lässt. Über die Seitenneigung der Maschine lässt sich die Spindel der Baumsilhouette anpassen. Das

Ausdünnprinzip der `Darwin`-Maschine beruht auf dem abschlagen einzelner Blüten oder ganzer Blütenbüschel durch die in der Baumkrone wirbelnden Fäden. Da es sich hierbei nur um einen mehr oder weniger gezielten Vorgang handelt, können dabei neben dem Zielorgan Blüte auch Blätter und Äste beschädigt oder abgeschlagen werden. Maschinenseitig kann die Intensität der Ausdünnung hauptsächlich über die Drehzahl der Spindel und die Fahrgeschwindigkeit des Traktors variiert werden. Weitere Adaptionen können aber auch über die Anzahl der Fäden/ Fadenelemente erreicht werden (Zoth 2011, Lafer 2010).



Abbildung 9. Weiterentwicklung der `Darwin`-Maschine der Firma Fruit-Tec (Markdorf) mit dem SmaArt-System zur automatischen Regulierung der Spindeldrehzahl entsprechend der Anzahl an Blüten. (a) funktionale Einheit der `Darwin`-Spindel, (b) Fadenelemente mit 60 cm langen Fäden, (c) Steuerung, (d) Halterung für Kamera und GPS-Antenne, (e) Kamera, (f) GPS-Antenne und (g) Boardcomputer.

Anhand der Rotationsgeschwindigkeit der Fäden, sowie deren Verweildauer in der Baumkrone, lässt sich eine energetische Betrachtung des Ausdünnsystems `Darwin`-Maschine nach Zoth (2011) aufstellen (Tabelle 2). Dabei beruht das energetische System trivial betrachtet auf dem Eintrag von kinetischer Energie in die Baumkrone über die beschleunigte Masse der Fäden. Anhand dieser Betrachtung lassen sich in Abhängigkeit der Faktoren Spindeldrehzahl, Traktorgeschwindigkeit und der Anzahl der Fäden/ Fadenelemente, fünf verschiedene

Ausdünnintensitäten – sanft – schwach – mittel – stark – sehr stark – definieren (Link 2018, Zoth 2011). Als Richtwerte für den praktischen Obstbau gelten die Maschineneinstellungen mit einer berechneten kinetischen Energie zwischen 55-90 % E_{kin} für schwach, 91-125 % E_{kin} für mittel und 126-160 % E_{kin} für stark (Zoth 2018, Zoth 2011). Als Referenzwert wurden auf Grund der Ergebnisse diverser Versuchsanstellungen am Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB) zur maschinellen Blütenausdünnung die Parameter 10 km h⁻¹, 250 U min⁻¹ und 216 Fäden (halber Fadensatz) gewählt (Zoth 2011).

Tabelle 2. Einstufung der Ausdünnintensität der maschinellen Blütenausdünnung (Darwin-Maschine) anhand der Berechnung der kinetischen Rotationsenergie (E_{kin}), die potentiell in den Baum eingebracht werden kann. Ausdünnintensität < 55 % = sanft; 55-90 % = schwach; 91-125 % = mittel; 126-160 % = stark, > 160 % = sehr stark. Tabelle verändert nach M. Zoth (2011). (Referenzeinstellung: 10 km h⁻¹; 250 U min⁻¹; 216 Fäden).

`Darwin`-Maschine - Kinetische Energie (E_{kin}) T = kg*m ² *sec ² [Joule]											
Traktor		Spindel			Fadenzahl						
					216 (1/2)		324 (3/4)		432 (voll)		
km h ⁻¹	m sec ⁻¹	U min ⁻¹	U sec ⁻¹	U Fahr ⁻¹ m ⁻¹	T (E_{kin})	Maß [%]	T (E_{kin})	Maß [%]	T (E_{kin})	Maß [%]	
6	1,67	180	3	1,8	11,54	56	17,31	84	23,07	112	
6	1,67	200	3,3	2	14,9	73	22,35	109	29,8	145	
6	1,67	220	3,7	2,2	18,69	91	28,04	136	37,38	182	
6	1,67	240	4	2,4	22,91	112	34,37	167	45,83	223	
6	1,67	260	4,3	2,6	27,57	134	41,35	201	55,14	268	
6	1,67	280	4,7	2,8	32,65	159	48,98	238	65,31	317	
6	1,67	300	5	3	38,17	186	57,25	278	76,34	371	
10	2,78	200	3,3	1,2	11,22	55	16,82	82	22,43	109	
10	2,78	220	3,7	1,3	14,52	71	21,78	106	29,04	141	
10	2,78	240	4	1,4	18,26	89	27,38	133	36,51	178	
10	2,78	260	4,3	1,6	22,42	109	33,63	164	44,85	218	
10	2,78	280	4,7	1,7	27,02	132	40,53	197	54,04	263	
10	2,78	300	5	1,8	32,05	156	48,07	234	64,1	312	
10	2,78	320	5,3	1,9	37,51	183	56,26	274	75,01	365	
14	3,89	200	3,3	0,9	8,13	40	12,19	59	16,25	79	
14	3,89	220	3,7	0,9	10,94	53	16,42	80	21,89	106	
14	3,89	240	4	1	14,19	69	21,29	103	28,38	138	
14	3,89	260	4,3	1,1	17,87	87	26,81	130	35,74	174	
14	3,89	280	4,7	1,2	21,98	107	32,97	160	43,96	214	
14	3,89	300	5	1,3	26,52	129	39,78	193	53,05	258	
14	3,89	320	5,3	1,4	31,49	154	47,24	230	62,99	306	

Grundvoraussetzung für ein gutes Ausdünnergebnis sind ein fachgerechter Umgang mit der Maschine sowie persönliche Erfahrung. So sollte vor jeder Ausdünnkampagne die Länge der Fäden überprüft werden und gegebenenfalls zu stark abgenutzte Fadenleisten ausgetauscht werden (Fadenlänge < 50 cm), da hier keine ausreichende Tiefenwirkung mehr zu erwarten ist. Des Weiteren sollte vor bzw. auch während der Ausdünnkampagne die Ölleistung des Traktors regelmäßig überprüft werden. Bei einer zu geringen Ölleistung können beispielsweise die Spindeldrehzahlen nicht erreicht oder die Drehzahl durch den Baum bzw. die Äste zu stark gebremst werden. Ob die Ölleistung ausreichend ist kann anhand eines einfachen Tests überprüft werden. Hierzu sollte die Drehzahl der Spindel auf 450 U min^{-1} gesteigert werden. Werden 450 U min^{-1} erreicht ist genügend Ölleistung vorhanden. Um eine entsprechende Tiefenwirkung innerhalb der Baumkrone zu erreichen, sollte die rotierende Spindel nicht nur dicht an der Baumsilhouette vorbeigeführt, sondern vielmehr während der Fahrt in den Baum hineingedrückt werden ohne dabei Äste abzureißen (Link 2018, Quelle: persönliches Gespräch A. Betz - Fruit-Tec und M. Zoth - KOB). Auch das Erziehungssystem der Bäume sollte entsprechend angepasst sein. Für die Ausdünnung mit der `Darwin`-Maschine eignen sich besonders Erziehungssysteme mit schmaler Fruchtwand oder als Hecke mit oder ohne maschinellen Schnitt. Sind dagegen die Basisäste zu ausladend, kann dies eine nicht ausreichende Tiefenwirkung zur Folge haben (Link 2018, Widmer et al. 2012, Lafer 2010 Bertschinger et al. 1996).

Die Meinung zum optimalen Einsatzzeitpunkt einer maschinellen Blütenausdünnung hat sich über die Jahre hinweg verändert. Wurde Ende der 90ziger Jahre noch empfohlen zwischen dem Mausohrstadium (BBCH-Stadium 54) und dem Ballonstadium (BBCH-Stadium 59) auszudünnen (Höhne 2001, Strimmer et al. 1997, Bertschinger et al. 1996), wird derzeit die Entwicklungsphase zwischen roter Knospe (BBCH 57) und Vollblüte (BBCH-Stadium 65) als passend angesehen (Widmer et al. 2012). Hintergedanke Ende der 90ziger war jener, das zu einem sehr frühen Stadium der Blütenentwicklung vor allem der Verlust an Blattmasse geringer ist und sich hieraus weniger negative physiologische Konsequenzen in Bezug auf Blüten- und Fruchtfall ergeben (Höhne 2001). Inzwischen wird jedoch jener Zeitpunkt als optimal angesehen, zu dem die Königsblüte plus zwei bis drei laterale Blüten einer Infloreszenz geöffnet sind (Lordan et al. 2018, McClure und Cline 2015, Kon et al. 2013, Widmer et al. 2012). Ein zu später Einsatz kann dagegen auch zu Fruchtschäden führen (Kon et al. 2013, Widmer et al. 2012).

2.2.2.3. Handausdünnung

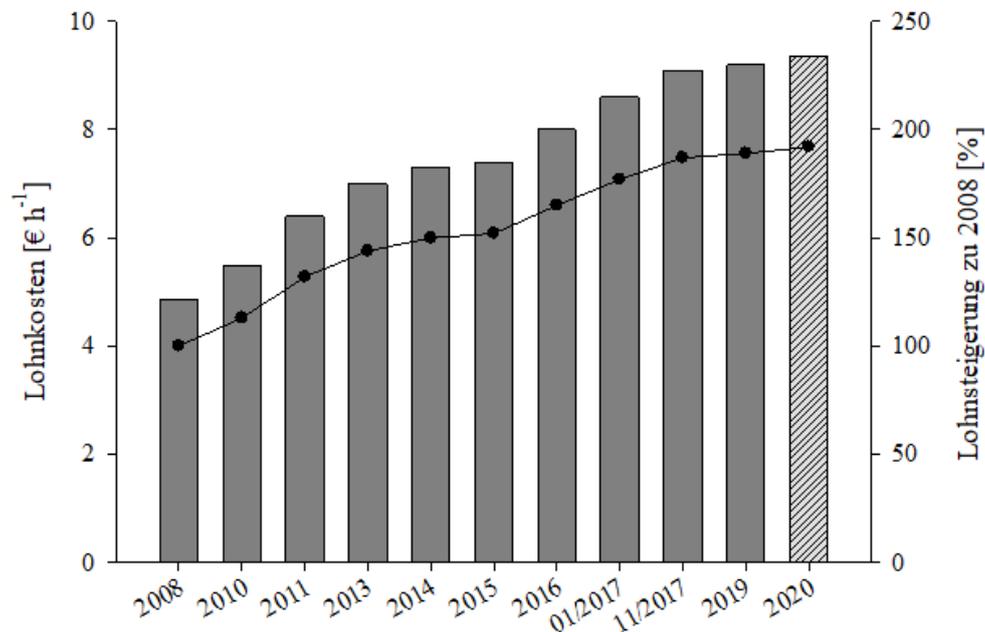


Abbildung 10. Entwicklung des Stundenlohns [€ h⁻¹] in der Landwirtschaft im Zuge der Einführung des Mindestlohns seit 2008, sowie dessen prozentuale Steigerung im Vergleich zu 2008 in Prozent [%] (BMAS 2019, Wicke 2015).

Bei der Handausdünnung handelt es sich auch um eine Form der mechanischen Ausdünnung. Dabei ist die Handausdünnung (Qualitätsausdünnung) bei einer Fruchtgröße zwischen 30-40 mm (BBCH-Stadium 74) meist der letzte Schritt einer Ausdünnstrategie. In Abhängigkeit der Sorte werden bzw. müssen hier zumeist nach dem Junifruchtfall noch einmal von Hand Korrekturen am Fruchtbehang vorgenommen werden, mit dem Ziel die Fruchtqualität der verbleibenden Früchte zu fördern und deren Ernte zu erleichtern (Link 2018). Hierbei gelten zum Beispiel für `Jonagold` andere Kriterien als für `Elstar`. Während `Jonagold` erst bei „extremen“ Überbehang zu Alternanz und schlechter Ausfärbung neigt, ist eine geringere Fruchtqualität bei `Elstar` oft schon bei leichtem Überbehang bemerkbar (Jäger 1997). Auf Grund des sehr späten Zeitpunktes, kann der Einfluss der Handausdünnung auf die Brechung der Alternanz generell als gering eingestuft werden (Link 2018, Dennis 2000).

Bei der Handausdünnung werden in der Regel sogenannte Schattenfrüchte aus dem Inneren des Baumes bzw. beschädigte, kranke oder unterentwickelte Früchte entfernt. Zudem sollte die Anzahl der Früchte je Fruchtstand auf maximal zwei reduziert werden. Am Aufwand der

Handausdünnung (Stunden Hektar⁻¹) lässt sich gut der Erfolg der Ausdünnstrategie bemessen. Während bei einer gut funktionierenden Strategie ca. 20 - 40 Stunden je Hektar für die Handausdünnung benötigt werden, kann es durchaus vorkommen, dass beim Versagen einzelner Ausdünnmaßnahmen und entsprechender Witterung bis zu 200 Stunden und mehr je Hektar nötig sind. Hierdurch wird die Handausdünnung zu einem sehr kostspieligen Verfahren (Costa et al. 2013, Dennis 2000). Ein ausufernder Aufwand für die Handausdünnung kann in Verbindung mit dem nahezu jährlich steigenden Mindestlohn (siehe Abbildung 10) zu erheblichen Kostensteigerungen je Hektar führen und damit sogar die Wirtschaftlichkeit in Frage stellen. Bei einer Pflanzdichte von 2500 Bäumen je Hektar, wird ungefähr eine Stunde benötigt um einen Apfel je Baum zu entfernen (Weber 2004).

2.2.3. Auswirkung einer Ausdünnung auf die Fruchtqualität

Die Ausdünnung ist im Apfelanbau die wichtigste Maßnahme zur Förderung der Fruchtqualität (Pfeifer et al 2018, Looney 1992). Für den Frischmarkt sind die Qualitätsparameter Fruchtgröße, Ausfärbung, Festigkeit, Geschmack und Lagerfähigkeit von besonderer Bedeutung. Daher sollten die Bewirtschaftungsmaßnahmen danach ausgerichtet werden diese Parameter zu fördern, ohne dabei ökonomische Aspekte zu vernachlässigen (Link 2000). Da es auf Grund von Wechselwirkungen nicht möglich ist alle Fruchtqualitätsparameter gleichzeitig zu fördern, muss der Obstbauer einen Kompromiss finden zwischen Qualität und Quantität der seinen Ansprüchen und denen des Marktes genügt (Link 2000). Generell lassen sich Fruchtqualitätsparameter in zwei Gruppen einteilen (Link 2000):

Gruppe I – Fruchtgröße, Ausfärbung, Beschaffenheit der Schale, Festigkeit, Zucker- und Säuregehalt.

Gruppe II – Mineralstoffe – unter anderem Kalium und Kalzium.

Die Fruchtqualitätsparameter aus der ersten Gruppe können durch eine gezielte Ausdünnung gefördert werden (Link 2018, McClure und Cline 2015, Seehuber et al. 2014, Hehnen et al. 2012, Veal et al. 2011, Seehuber et al. 2010). Der Zusammenhang zwischen der Anzahl Früchte und dem Fruchtgewicht ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Fruchtqualitätsparameter der zweiten Gruppe, welche mit einer guten Lagerfähigkeit assoziiert werden, werden in der Regel durch eine Ausdünnmaßnahme nicht gefördert. Eine Ausdünnmaßnahme kann sich sogar gegenteilig auswirken und bestimmte physiologischen Krankheiten z.B. Stippe fördern (Link 2018, Baab und Schmitz-Eiberger 2009, Link 2000, Ferguson und Watkins 1992).

Prinzipiell konkurrieren Früchte um eine begrenzte Anzahl an Assimilaten, Mineralstoffen und Stickstoffverbindungen. Dabei spielt für die Bereitstellung von Assimilaten das Blatt-Frucht-

Verhältnis eine besondere Rolle. Durch das Entfernen von Blüten und oder Früchten kann das Blatt-Frucht-Verhältnis positiv beeinflusst werden. Ein Blatt-Frucht-Verhältnis von 20-30 (Blätter) zu 1 (Frucht) wird dabei als optimal angesehen (Pfeifer et al. 2018, Westwood 1998).

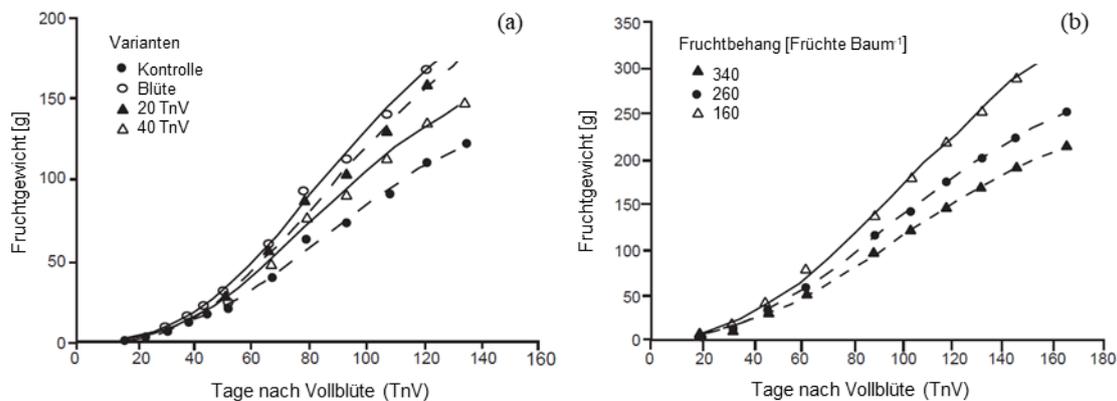


Abbildung 11. Entwicklung des Fruchtgewichts eines Apfels in Abhängigkeit des Zeitpunktes (a) (0 (Blüte), 20 und 40 Tage nach Vollblüte (TnV)) der Ausdünnung in der Sorte 'Braeburn' und in Abhängigkeit des Fruchtbehangs (b) (340, 260 und 160 Früchte pro Baum) in der Sorte 'Empire'. Abbildung verändert nach *Wünsche und Lakso* (2000b).

2.3. Vegetatives Triebwachstum

2.3.1. Physiologischer Hintergrund: Triebwachstum

Ein zu starkes vegetatives Triebwachstum an den Bäumen kann mehrere unerwünschte Folgen verursachen. Hierzu zählen unter anderem ein verzögerter Eintritt der Bäume in die Blüten- bzw. Ertragsbildung, eine Minderung der Ernte durch einen verstärkten Fruchtfall, eine verminderte Fruchtqualität auf Grund von Beschattung und Probleme bei der Bekämpfung tierischer Schädlinge (Blattläuse) bzw. pilzlicher Krankheiten (Schorf) (Miller 2002, Unrath 1999, Forshey und Elfving 1989, Miller 1988). Grundsätzlich besteht für den Obstbauern die Schwierigkeit darin, eine Balance zwischen vegetativem Wachstum und generativem Fruchten am Baum zu etablieren (Forshey und Elfving 1989).

Das Triebwachstum bei Apfelbäumen unterteilt sich, wie auch beim Wachstum der Früchte, in zwei Phasen, Zellteilung und Zellstreckung. Jedoch laufen im Gegensatz zum Fruchtwachstum beide Prozesse parallel zueinander ab. Die Zellteilung findet im Sprossvegetationspunkt der Meristeme statt. Dabei werden während der Wachstumsphase durch Zellteilung in den sogenannten undifferenzierten Stammzellen kontinuierlich neue Zellen und Zellorgane generiert. Diese Meristeme sind in den Spross- (Apikalmeristem) und Wurzelspitzen, den

Achselknospen (Lateralmeristeme) der Blätter sowie im Kambium, welches für das sekundäre Dickenwachstum verantwortlich ist, lokalisiert (Vernoux et al. 2010, Tromp et al. 2005, Friedrich und Fischer 2000). Dabei sind Meristeme befähigt ihre Aktivität selbst zu regulieren (Sablowski et al. 2007, Aida et al. 2006, Traas et al. 2001, Lyndon et al. 1998). Die Zellstreckung erfolgt in der sich dem Sprossvegetationspunkt anschließenden Differenzierungszone. In der Zellstreckung kann das Volumen einer Zelle um das 50zifache ausgedehnt werden. Hierbei wird das osmotische Potential einer Zelle durch osmotisch aktive Substanzen gesenkt, wodurch Wasser nach strömt und die Zelle ausdehnt (Friedrich und Fischer 2000).

Im Allgemeinen wird das Triebwachstum von endogenen und exogenen Faktoren bestimmt. Hierzu zählen die genetischen Merkmale der Sorte und Unterlage, Umwelteinflüsse, der Nährstoffhaushalt und die Wasserversorgung, die Baumgesundheit, das Baummanagement sowie der Fruchtbehang der Bäume (Tromp et al. 2005, S 127 ff, K 11.7).

Bei Apfelbaum (siehe Abbildung 12) kann zwischen sekundärer Kurztrieb, Kurz- und Langtrieb unterschieden werden. Der sekundäre Kurztrieb wächst an der Basis eines Fruchtstandes und steht in Konkurrenz zu den lateralen Früchten mit der geringsten Ordnung d.h. die am weitesten von der Königsblüte entfernt sind und daher am nächsten zum Austrieb des sekundären Kurztriebes (Quinlan und Preston 1971).

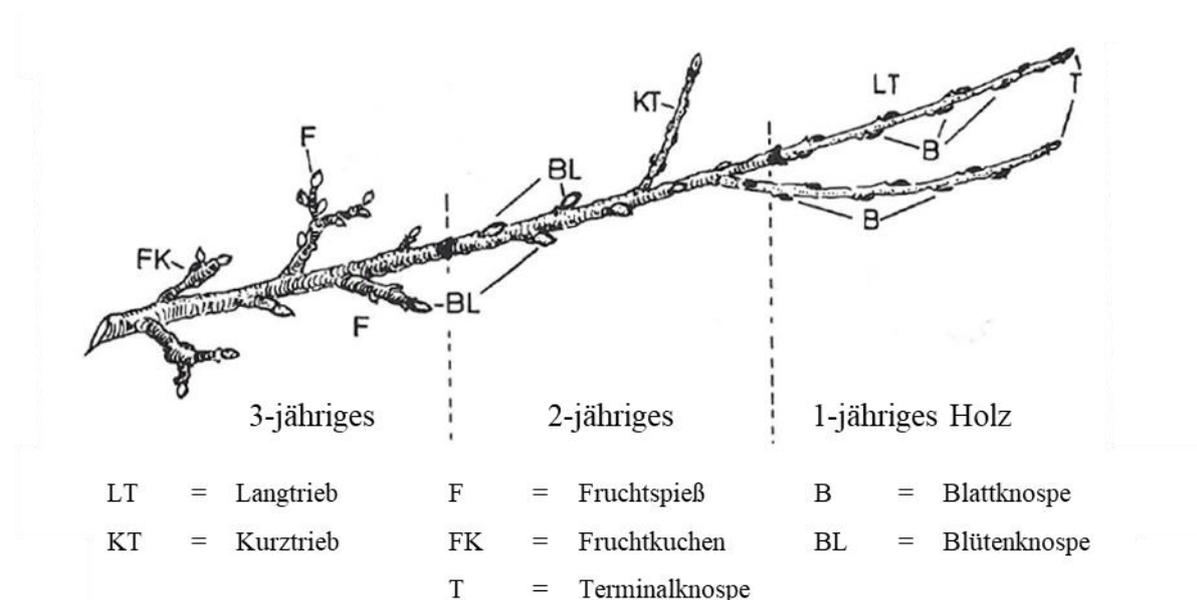


Abbildung 12. Darstellung der Triebe und Knospen beim Kernobst. Verändert nach Riess (2016).

Der Aufbau eines Kurz- oder Langtriebes ist identisch und unterteilt sich in Apikalmeristem – Internodium – Nodium – Internodium. Lediglich die Länge der Internodien unterscheidet sich zwischen beiden. Das Ende des vegetativen Wachstums wird unter anderem durch Licht-,

Temperatur-, Wasser- und Nährstoffverhältnisse definiert. Zum Ende des Wachstums bilden sich aus den zuletzt gebildeten Blattanlagen die sogenannten Knospenschuppen, welche Blüten- und Blattanlagen sowie das Meristem vor äußeren Einflüssen schützen (Lenz und Wünsche 2018, Bland 1978). Knospen an Triebspitzen (Terminalknospe) oder an Blattanlagen (Lateralknospe) werden häufig als Trieb ohne Längenwachstum bezeichnet. Laterale Knospen bleiben in der Regel auf Grund der Apikaldominanz während der Vegetationsperiode dormant (Tromp et al. 2005). Dabei wird die Apikaldominanz hormonell durch das Verhältnis von Auxin zu Cytokinin gesteuert und kann durch das Entfernen des Apex und einem damit verbundenen Anstieg an Cytokinin gebrochen werden (Lenz und Wünsche 2018, Tromp et al. 2005, Bland 1978). Im Falle der Apikaldominanz wird der Auxin-Export einer lateralen Knospe durch den stärkeren Auxin-Export der Triebspitze unterdrückt (Auxin-Transport-Autoinhibition (ATA)). Dabei wird die Auxin-Biosynthese der dominierten Knospe abgeschwächt und sie bleibt dormant (Tromp et al. 2005).

Das Triebwachstum der sekundären Kurztriebe beginnt mit der Blüte und dauert in der Regel nur zwei bis drei Wochen an. Dagegen kann das Wachstum der Langtriebe bis in den August oder gegebenenfalls auch länger andauern. Dies ist dann in erster Linie von der Nährstoff- und Wasserversorgung der Bäume abhängig (Tromp et al. 2005).

2.3.2. Hormonelle Steuerung des Triebwachstums

Für die Funktion der Sprossmeristeme, in denen das Wachstum stattfindet, ist das Zusammenspiel mehrerer Phytohormone (Auxin – Cytokinin – Gibberellin – Ethylen) von Bedeutung (Shani et al. 2006). Dieses Zusammenspiel ist sehr komplex und vielschichtig (Vernoux et al. 2010).

Zunächst ist für die Entwicklung eines Meristems aus undifferenziertem Kallusgewebe sowie für die Aufrechterhaltung der Funktion innerhalb eines Meristems Cytokinin bzw. dessen Interaktion (Crosstalk) mit Auxin von Bedeutung. Hintergrund hierfür ist, dass Cytokinin bzw. der Crosstalk mit Auxin die Zellteilung der sogenannten Stammzellen fördert und deren Differenzierung verhindert wird (Shi und Vernoux 2019, S 85, K 4 – 2.2, Zhao et al. 2010, Vernoux et al. 2010, Gordon et al. 2009, Gordon et al. 2007). Generell ist Auxin einer der Schlüsselfaktoren bei der Steuerung von Wachstumsprozessen innerhalb der Pflanze (Vanneste und Friml 2009). Auxin fördert innerhalb des Meristems unter anderem die Zellteilung, die Zellstreckung, die Differenzierung der Leitbündel und die Initiierung der lateralen Organe (Tromp et al. 2005, Reinhardt et al. 2003). Nach derzeitigem Wissensstand wird davon ausgegangen, dass vor allem unterschiedliche Auxin-Konzentrationen, räumlich oder zeitlich

bedingt, Konzentrationsgradienten oder schlicht das Fehlen von Auxin innerhalb eines Meristems zu einer differenzierten Genexpression führen und damit unterschiedliche Wachstumsmuster bedingen (Vernoux et al. 2010, Vanneste und Friml 2009, Sorefan et al. 2009, Reinhardt et al. 2003). In Abhängigkeit der Pflanzenart und deren Entwicklungszustand, können diese unterschiedlichen Auxin-Konzentration innerhalb der Zellen durch verschiedene biochemische Prozesse etabliert werden. Hierzu zählen die Auxin-Biosynthese, die Konjugation bzw. Dekonjugation von Auxin, der Abbau von Auxin und der interzelluläre Transport (Vernoux et al. 2010, Vanneste und Friml 2009). Innerhalb der Pflanze ist die Indol-3-Essigsäure (IAA) die Hauptform des Auxins. Bisher sind hierzu innerhalb der Meristeme ein Tryptophan unabhängiger und vier Tryptophan abhängige Biosynthesewege bekannt (Korasick et al. 2013, Vernoux et al. 2010, Vanneste und Friml 2009).

Neben Cytokinin und Auxin fördern auch Gibberelline die Zellteilung und Zellstreckung. Die Biosynthese von Gibberellinen wird dabei durch die sogenannten KNOX- (*knotted 1-like homeobox-containing*)-Gene im Meristem reguliert, welche für die Aufrechterhaltung der Meristemfunktion von besonderer Bedeutung sind (Shi und Vernoux 2019, S 86, K 4 – 2.2, Frigerio et al. 2006, Barley und Waites 2002). Die Kontrolle der Konzentration von biologisch aktivem Gibberellin erfolgt dabei hauptsächlich durch Gibberellin-Oxidasen, deren Synthese durch KNOX-Gene unterdrückt werden kann (Frigerio et al. 2006, Schena et al. 1991). Ebenfalls wird die Transkription einzelner an der Gibberellin-Biosynthese beteiligter Enzyme von Auxin beeinflusst, sodass auch Auxin indirekt auch die Gibberellin-Biosynthese steuern kann (Frigerio et al. 2006).

2.3.3. Einfluss des Fruchtbehangs auf das Triebwachstum

Bäume mit einem hohen Fruchtbehang wachsen in der Regel weniger stark als Bäume mit einem geringen Fruchtbehang. Unabhängig des Fruchtbehangs eines Baumes wachsen auch fruchtende Triebe weniger stark als vegetative Triebe (Pallas et al. 2018). Dabei beeinflussen Früchte das Triebwachstum auf direkte und indirekte Art und Weise. Zum einen stehen Früchte in direkter Konkurrenz mit vegetativen Organen um Assimilate, Nährstoffe und Wasser. Die vermehrte Verteilung der Ressourcen in Richtung der Früchte reduziert das Triebwachstum (Pallas et al. 2018). Dies geht einher mit einer geringeren Blattfläche fruchtender Bäume im Vergleich zu nichtfruchtenden Bäumen (Lenz und Wünsche 2018, Tromp et al. 2005, S 131, K 11.7.5, Corelli-Grappadelli und Lakso 2002). Zum anderen werden fruchtende Äste durch das Gewicht der Äpfel in eine horizontale Stellung gebogen, wodurch sich das terminale Wachstum verlangsamt. Gleichzeitig wird aber dafür der Austrieb lateraler Knospen begünstigt

(Link 2018, Tromp et al. 2005, S 131, K 11.7.5). Ausdünnmaßnahmen haben ebenfalls entsprechend ihrer Wirkung und des Zeitpunktes einen Einfluss auf das Triebwachstum der Bäume (Tromp et al. 2005, S 131, K 11.7.5).

2.3.4. Einfluss von Stress auf das Triebwachstum

In der Pflanzenwelt führt mechanisch induzierter Stress häufig zu kleineren und kompakteren Pflanzen (Depaepe und VanDerStraeten 2017, Biddington 1986). Hintergrund hierfür ist ein geringerer Längenzuwachs bei gestressten Trieben im Vergleich zu anderen Trieben ohne Stress. In der Regel geht Stress einher mit einer erhöhten internen Ethylen-Konzentration, gekennzeichnet durch einen Anstieg der ACS (1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure Synthase) und ACO (1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure Oxidase) Genaktivität, der Aktivierung der Signalübertragung sowie der Expression der Ethylen-Response-Faktoren (Depaepe und VanDerStraeten 2017, Robitaille und Leopolt 1974). Versuche mit Ethephon (2-Chlorethylphosphonsäure) zeigen, dass eine erhöhte Ethylen-Konzentration zur Reduktion der Trieblänge und zu einem größeren Triebdurchmesser führen können (Cline und Bakker 2016, Unrath 1999, Rademacher 1994, Byers 1993, Robitaille und Leopolt 1974). Im Gegensatz dazu, kann sich Ethylen in geringen Konzentrationen ($<0,1 \mu\text{l L}^{-1}$) auch positiv auf das Triebwachstum auswirken (Pierik et al. 2006) z.B. beim Tabak (Pierik et al. 2003), Weizen (Suge et al. 1997) und an *Arabidopsis* (Smalle et al. 1997). Da Ethylen sowohl das Wachstum reduzieren als auch in geringen Konzentrationen fördern kann, sollte daher in Bezug auf Ethylen und Wachstum über wachstumsbeeinflussend und nicht über wachstumsfördernd bzw. -reduzierend gesprochen werden. Zumal auch hier das Zusammenspiel mit anderen Hormonen von Bedeutung ist (Iqbal et al. 2017, Dugardeyn und VanDerStraeten 2008). Im Falle von Ethylen wird vermutlich die Auxin-Biosynthese in den Sprossspitzen reduziert und in Folge dessen das Wachstum verlangsamt (Tromp et al. 2005). Versuche an der Modellpflanze *Arabidopsis Thaliana* lassen vermuten, dass Ethylen die Auxin-Biosynthese, den Auxin-Transport und deren Signalwirkung reguliert (Muday et al. 2012).

2.3.5. Einfluss von Bioregulatoren auf das Wachstum

Eine Möglichkeit vegetatives Wachstum zu reduzieren, ist die Applikation von Prohexadion-Calcium (Miller 2002). Die Wirkung von Prohexadion-Calcium beruht dabei auf der Inhibierung bzw. Reduzierung der Gibberellin-Biosynthese ($GA_{20} \rightarrow GA_1$) für drei bis vier Wochen nach der Applikation resultierend in kürzeren Internodien (Unrath 1999, Evans et al. 1996, Rademacher 1994). Für die Wirkung ist neben der Dossierung des Wirkstoffes, der Anzahl der Applikationen und dem Zeitpunkt auch generell die Wüchsigkeit der Sorte von Bedeutung (Miller 2002).

2.3.6. Blattentwicklung und Assimilatversorgung

Das Blatt ist ein Seitenorgan des Sprosses und ist vor allem für den Gasaustausch zwischen Pflanze und Umgebung, der sogenannten Transpiration, sowie für die Bereitstellung von Assimilaten verantwortlich (Link 2002). Entsprechend der Blattentwicklung wird zwischen Primär- und Sekundärblättern unterschieden. Die Primärblätter entwickeln sich aus den Blüten- und Blattknospen am Fruchtholz. Primärblätter sind für die Bereitstellung von Assimilaten in den ersten drei bis fünf Wochen nach Vollblüte (siehe Abbildung 13) von besonderer Bedeutung für den Fruchtansatz, die potentielle Fruchtgröße bzw. im Allgemeinen die Entwicklung junger Früchte (Wünsche und Lakso 2000a, Wünsche und Lakso 2000b). Bereits zehn Tage nach Austrieb beginnen Primärblätter Assimilate zu exportieren (Hansen 1977). Zur Vollblüte werden zwischen 55 und 90 % der Assimilate von ihnen bereitgestellt.

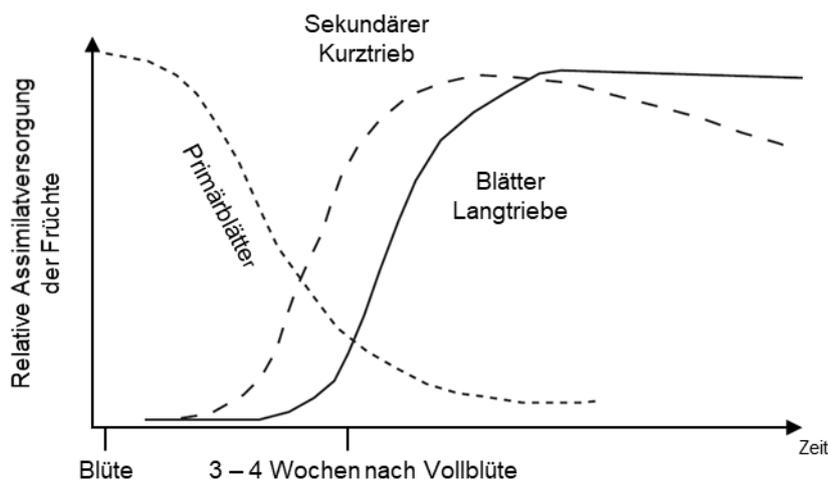


Abbildung 13. Relative Assimilatversorgung der Apfelfrüchte in Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung der Blattmasse am Blütenbüschel (Primärblätter), den sekundären Kurztrieben und den Langtrieben. Verändert nach Wünsche und Lakso (2000b).

Eine nicht intakte oder reduzierte Primärblattfläche kann sich daher negativ auf den Fruchtansatz und das Wachstum junger Früchte auswirken (Link 2002, Bertschinger et al. 2000, Proctor und Palmer 1991, Ferree und Palmer 1982). Zum Zeitpunkt der Blüte sind die Kohlenstoffreserven des Baumes nahezu erschöpft, sodass die Versorgung der Früchte stark abhängig ist von der Entwicklung der Blattfläche. Der Gesamtbedarf an Assimilaten hängt dabei wiederum von der Anzahl an Früchten und deren Wachstum ab (Lakso 2011). Besonders in den ersten ein bis drei Wochen nach Vollblüte ist die Differenz zwischen Bedarf und Versorgung unter normalen Umständen am größten. Gerade bei geringer Einstrahlung, verbunden mit einer geringen Photosyntheseaktivität, ist die Konkurrenz zwischen Früchten und Triebspitzen um Assimilate am höchsten (Lakso 2011, Bepete und Lakso 1998).

Langtriebe nutzen für ihr Wachstum in der Regel zunächst die Assimilate ihrer Blätter selbst. Erst wenn circa zehn bis zwölf Blätter mit entsprechender Blattfläche pro Trieb entwickelt sind, werden auch Assimilate in Richtung der Früchte verlagert (Lakso 2008, Grappadelli et al. 1994). Generell ist die Photosynthese-Leistung nur abhängig vom Fruchtbehang und nicht von der Art des Triebes (Pallas et al. 2018).

Neben der Versorgung mit Assimilaten kann die Primärblattfläche auch einen Einfluss auf die Calciumversorgung von Früchten haben. Versuche hierzu haben gezeigt, dass bei gleicher Fruchtgröße, Früchte mit einem weiteren Primärblattfläche-Frucht-Verhältnis einen höheren Calciumgehalt aufweisen als Früchte mit einem engeren (Lang und Volz 1998, Volz et al. 1994).

2.4. Alternanz

Der Apfel, sowie viele andere mehrjährige Baumobstkulturen, neigen zu extremen Ertragsschwankungen, der sogenannten Alternanz (eng. *alternate bearing*). Alternanz bedeutet, dass auf ein Jahr mit übermäßigem Ertrag (ON-Jahr) ein Jahr mit geringem bis keinem Ertrag (OFF-Jahr) folgt (Sharma et al. 2019, Zuo et al. 2018, Haberman et al. 2016, Shalom et al. 2014, Tromp et al. 2005). Hintergrund hierfür ist, dass die Blütenbildung für das Jahr $x + 1$ (OFF-Jahr) gleichzeitig zur Ertragsbildung im Jahr x (ON-Jahr) stattfindet. Das OFF-Jahr ist dabei gekennzeichnet durch eine geringe Anzahl an Blüten im Frühjahr und eine Vielzahl an vegetativen Knospen. Im On-Jahr ist die Situation genau umgekehrt (Zuo et al. 2018). Alternanz ist ein weltweites Problem in der Apfelproduktion mit hoher ökonomischer Bedeutung (Zuo et al. 2018, Shalom et al. 2014). In Abhängigkeit der Sorte ist die Anfälligkeit gegenüber Alternanz unterschiedlich ausgeprägt. Sorten wie zum Beispiel `Elstar`, `Fuji` oder

„Nicoter“ (Kanzi) neigen im Vergleich zu den Sorten „Gala“, „Jonagold“ oder „Golden Delicious“ zu starker Alternanz (Krasniqi et al. 2013).

Alternanz kann durch verschiedene endogene und exogene Faktoren ausgelöst werden. Hierzu zählen ein übermäßiger Fruchtbehang, Spätfröste im Frühjahr und ein starkes vegetatives Wachstum (Link 2018, S 25, K 2.3.3, Krasniqi et al. 2013, Tromp et al. 2005), aber auch durch Nährstoff-, Wasser- und Lichtmangel (Turktas et al. 2013, Yanik et al. 2013). Dabei ist Alternanz längst kein Phänomen welches gleichmäßig innerhalb einer Obstanlage auftritt. Bereits innerhalb eines Baumes oder zwischen benachbarten Bäumen kann es zu mehr oder minder starken Alternanzerscheinungen kommen (Krasniqi et al. 2013, Aggelopoulou et al. 2010). Die hierbei entstehende Heterogenität innerhalb einer Obstanlage verlangt eine differenzierte und baumspezifische Betrachtungsweise für einen optimalen Output (Manfrini et al. 2009).

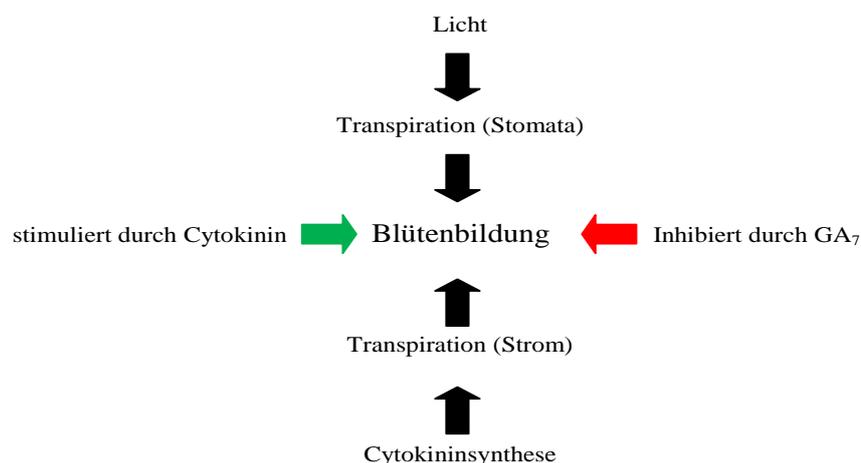


Abbildung 14. Theorie des Regulationsmechanismus der zum Auftreten von Alternanz am Apfelbaum führt unter Einbeziehung von Wechselwirkungen zwischen Lichtmangel, dem Wasserhaushalt und der Stimulation durch den Transport von basipolarem Cytokinin und der Inhibierung der Blütenbildung durch Gibberellin 7 (GA₇). Verändert nach Krasniqi et al. (2013).

Die Inhibierung der Blütenbildung im ON-Jahr beruht nach derzeitigem Kenntnisstand im Wesentlichen auf der Anwesenheit von GA₇ (Sharma et al. 2019, Zuo et al. 2018, Tromp et al. 2005, Tromp 1982, Luckwill 1970). Gibberelline werden in den Samenanlagen heranwachsender Früchte, sowie in den Meristemen der Triebspitzen synthetisiert und anschließend basipetal in Richtung der Wurzel transportiert. Dabei beruht der Effekt von GA_x voraussichtlich auf der Unterdrückung der von Cytokinin gesteuerten Signalübertragung und Prozessen innerhalb der Pflanze (Xing et al. 2015). Zusätzlich zu GA_x sind auch andere

Phytohormone direkt oder indirekt involviert. So stimuliert zum Beispiel Auxin die Gibberellin-Synthese im Meristem (Shalom et al. 2014). Zusätzlich zeigten Versuche von *Shalom et al. 2014* an Oliven, dass Auxin ein Schlüsselfaktor bei der Umwandlung von sogenannten „ON-Knospen“ in „OFF-Knospen“ ist. Auch das Level an Abscisinsäure (ABA) in den Knospen unterscheidet sich zwischen dem ON- und OFF-Jahr. Cytokinin (CK) welches aus den Wurzeln akropetal mit dem Xylemstrom in Richtung der Triebspitzen transportiert wird fördert die Blütenbildung (Krasniqi et al. 2013).

Die Stoffwechselwege bzw. die Mechanismen, die die Blüteninduktion in alternierenden Bäumen steuern sind sehr komplex und bis dato nur zu gewissen Teilen verstanden. Auf Ebene der Knospen sind eine Vielzahl an metabolischen Prozessen involviert, welche die Regulierung von Phytohormonlevel, Kohlenhydratmetabolismus und anderer Prozesse umfassen (Zuo et al. 2018).

III. Ziele der Arbeit

Im deutschsprachigen Raum hat die maschinelle Blütenausdünnung in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Trotzdem bestehen unter Beratern und Obstbauern immer noch einige Bedenken und Vorurteile, die einer weiteren Verbreitung der maschinellen Ausdünnung im Wege stehen. Diese umfassen nicht nur Fragen zur tatsächlichen Ausdünnwirkung, sondern auch zu physiologischen Prozessen am Baum. Hierzu zählt neben dem Triebwachstum auch der Einfluss der maschinellen Ausdünnung auf den Blüten- und Fruchtfall. In diesem Zusammenhang fällt oftmals der Begriff der „Ethylen-Schock-Theorie“. Diese besagt, dass es auf Grund der maschinellen Ausdünnung am Baum zu einem Ethylen-Schock kommt, wodurch der Junifruchtfall verstärkt wird (Winstel 2012, Widmer et al. 2012).

Im Rahmen des Innovationsprojektes SmaArt (sensorgestützte, mechanische Blütenausdünnung in der Apfelproduktion), gefördert durch die Deutsche Innovationspartnerschaft Agrar und der Rentenbank, wurden daher im Zeitraum zwischen 2014 und 2017 Versuche zu relevanten Fragestellungen zum Thema der maschinellen Ausdünnung durchgeführt. Diese umfassten auf der einen Seite die Entwicklung und Validierung eines Prototypen zur baumspezifischen mechanischen Ausdünnung (Nicht Teil der Dissertationsarbeit), sowie auf der anderen Seite die Erforschung physiologischer Hintergründe im Zusammenhang mit der maschinellen Ausdünnung. Dabei lag der Schwerpunkt der durchgeführten Versuche auf folgenden praxisrelevanten Fragestellungen und Hypothesen:

- Kann mittels der maschinellen Ausdünnung der Fruchtbehang zielgerichtet in Abhängigkeit definierter Parameter verändert werden?
- Welche Auswirkungen hat die maschinelle Ausdünnung auf die Fruchtqualität und ggf. die Lagerfähigkeit der Früchte?
- Wie stark werden Primärblattfläche und Blüten durch die maschinelle Ausdünnung verletzt und welche physiologischen Folgen ergeben sich daraus?
- Durch die maschinelle Ausdünnung wird der Blüten- und Fruchtfall verstärkt!
- Das vegetative Triebwachstum der Bäume wird durch die maschinelle Ausdünnung verstärkt! Wenn ja gibt es Möglichkeiten dieses zu reduzieren?
- Ist es möglich durch die maschinelle Ausdünnung der Alternanz zielgerichtet entgegenzuwirken?

IV. Material und Methoden

4.1. Versuchsstandort

Die Versuche wurde auf den Versuchsflächen des Kompetenzzentrums Obstbau Bodensee (KOB) in 88213 Bavendorf durchgeführt. Die Versuchsobstgärten des KOB liegen auf einer Höhe zwischen 470 und 500 m über dem Meeresspiegel. Bavendorf gehört mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8,2 °C und einem jährlichen Niederschlag von 950 mm zu den spätreifenden Obstbaustandorten im bundesweiten Vergleich (KOB 2010). Der Boden, mit Bodenzahlen zwischen 55 und 60 Punkten, ist als Pseudogley- Parabraunerde klassifiziert, welche am Standort durch ihre geringe Entkalkungstiefe charakterisiert ist.

4.2. Versuchsaufbau

Die dreijährigen Versuche wurden in den Sorten `Gala` und `Elstar` durchgeführt. `Gala` (Pflanzabstand 3,35 m x 0,80 m) wurde 1998 aufgepflanzt und `Elstar` (Pflanzabstand 3,20 m x 0,80 m) 2001. Beide Sorten, auf M 9 Unterlage, wurden als schlanke Spindel erzogen und auf eine Höhe von 2,50 m begrenzt. Jede Behandlungsstufe wurde mit vierfacher Wiederholung á 6 Bäume geprüft (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3. Übersicht über den Versuchsaufbau.

	Sorten		Behandlungsstufen	Wdh.	Bäume Wdh. ⁻¹
	`Gala` (1998*/ M9)	`Elstar` (2001*/ M9)			
2014	x	x	4		
2015	x	x	8	4	6
2016	x	x	11		

* Pflanzjahr

4.2.1. Ausdünnung `Darwin`-Maschine

In Tabelle 4 sind die über die Jahre 2014, 2015 und 2016 geprüften Behandlungsstufen abgebildet. Die Ausdünnung mit der `Darwin`-Maschine (Firma Fruit-Tec; Marktdorf) erfolgte mit einer Traktorgeschwindigkeit von 8 km h⁻¹ und dem Standardfadensatz (216 Fäden). Dabei wurde die Umdrehungsgeschwindigkeit der Spindel zwischen 200 U min⁻¹ (Minimum) und 400 U min⁻¹ (Maximum) variiert. 2015 und 2016 wurde zusätzlich in einigen Behandlungsstufen eine Handausdünnung in Kombination zur maschinellen Ausdünnung

durchgeführt. 2016 wurde der Versuchsaufbau mit einer zweifachen Behandlung mit Prohexadion-Calcium (Regalis Plus[®]; BASF) zur Regulierung des Triebwachstums, ergänzt.

Tabelle 4. Aufstellung der im Versuch durchgeführte Behandlungsstufen zur maschinellen Ausdünnung in Kombination mit nachträglicher Handausdünnung und dem Einsatz von Regalis Plus[®] über die Jahre 2014, 2015 und 2016 in den Sorten `Gala` und `Elstar`.

Behandlungsstufe	`Darwin`-Spindel [U min ⁻¹]	Einheitlicher Fruchtbehang *	Regalis Plus [®] [kg ha ⁻¹]	2014	2015	2015
1	200	-	-	x	x	-
2	240	-	-	x	x	x
3	280	-	-	x	x	-
4	320	-	-	x	x	x
5	UBK	-	-	-	x	x
6	240	60/ 80 Fr B ⁻¹	-	-	x	x
7	320	60/ 80 Fr B ⁻¹	-	-	x	x
8	UBK	60/ 80 Fr B ⁻¹	-	-	x	x
12	400	-	-	-	-	x
13	320	-	2 x 1,25	-	-	x
14	UBK	-	2 x 1,25	-	-	x
15	320	60/ 80 Fr B ⁻¹	2 x 1,25	-	-	x
16	UBK	60/ 80 Fr B ⁻¹	2 x 1,25	-	-	x

*Einheitlicher Fruchtbehang: `Gala` 80 Früchte pro Baum (45 t ha⁻¹); `Elstar` 60 Früchte pro Baum (35 t ha⁻¹).

4.2.2. Handausdünnung

Die Handausdünnung in den entsprechenden Behandlungsstufen erfolgte zeitnah nach der mechanischen Blütenausdünnung (Tabelle 5). Hierbei wurde stufenweise mit Scheren der Zielbehang (Früchte Baum⁻¹) eingestellt. Die Berechnung des Zielesertrags je Baum erfolgte aus der Verrechnung der Parameter Anzahl Bäume je Hektar, Zielesertrag je Hektar und dem durchschnittlichen Fruchtgewicht. Mit der Handausdünnung wurde das Ziel verfolgt, den Einfluss des Fruchtbehangs auf das Triebwachstum zu auszugrenzen.

4.2.3. Regalis-Behandlungen

Die Ausbringung des Regalis Plus® (BASF Agricultural Solutions, Ludwigshafen) erfolgte mit einem Tunnelsprühgerät (JOCO-Tunnel, Typ 12/2/01 BTIIA/ CA OSG BR 200006) zu den zwei vom Hersteller empfohlenen Einsatzzeitpunkten (2-5 cm Trieblänge, 4-5 entwickelte Blätter; 3-5 Wochen nach dem 1. Termin). Dabei wurden je Termin 1,25 kg Regalis Plus® je Hektar ausgebracht, bei einer Wasseraufwandmenge von 1000 l je Hektar.

Die phänologischen Entwicklungsdaten der beiden Versuchssorten `Gala` und `Elstar`, sowie die für die Versuchsdurchführung relevanten Daten sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Alle weiteren im Jahresverlauf anfallenden Pflege- und Pflanzenschutzmaßnahmen wurden gemäß den Richtlinien und Empfehlungen der Integrierten Produktion durchgeführt.

Tabelle 5. Phänologisch und behandlungstechnisch relevante Daten zur Versuchsdurchführung 2014, 2015 und 2016 der Sorten `Gala` und `Elstar`.

		Ausdünnung	Vollblüte (BBCH 65)	Hand*	RegalisPlus®		T-Stadium (BBCH 76)	Ernte	
					1.	2.		1.	2.
2014	`Gala`	17.04.	21.04				19.06.	15.09.	24.09.
	`Elstar`		20.04.				13.06.	01.09.	11.09.
2015	`Gala`	27.04.	30.04.	21.05.			19.06.	15.09.	25.09.
	`Elstar`		30.04.				16.06.	16.09.	25.09.
2016	`Gala`	27.04.	29.04.	26.04.	10.5.	10.06.	28.06.	22.09	4.10
	`Elstar`		30.04.				28.06.	15.09	4.10

* die Handausdünnung erfolgte in drei Durchgängen. Der erste Durchgang erfolgte zum in der Tabelle genannten Termin.

4.3. Blüten- und Fruchtzählungen

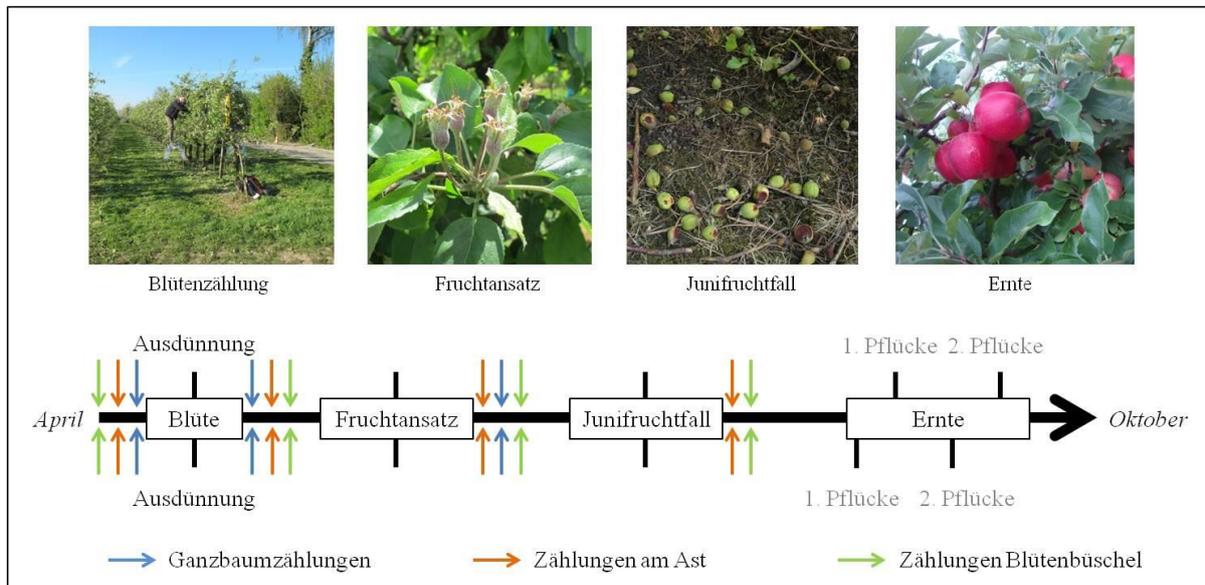


Abbildung 15. Übersicht zur Blüten- und Fruchtzählungen am ganzen Baum, an den vier Versuchsästen bzw. an den 8 markierten Blütenbüschel je Versuchsbaum in den Sorten `Gala` und `Elstar` 2014, 2015 und 2016.

Zur Datenerhebung am Baum wurden über die Vegetationsperiode hinweg mehrere Zählungen an allen Versuchsbäumen durchgeführt. Hierbei wurden je nach Zeitpunkt einzelne Blüten, ganze Infloreszenzen und/ oder Früchte erfasst. Eine Übersicht dieser Zählungen ist in Tabelle 6 bzw. Abbildung 15 zu sehen. Je nach Fragestellung wurden je Zeitpunkt bis zu drei verschiedenen Herangehensweisen bei den Zählungen gewählt.

4.3.1. Ganzbaumzählungen

Bei den Ganzbaumzählungen kann zwischen Blüten- und Fruchtzählungen unterschieden werden. Bei den Blütenzählungen, vor und nach der maschinellen Ausdünnung, wurde die Anzahl der Infloreszenzen je Versuchsbaum gezählt und zur Ermittlung der Einzelblüten mit einem sortentypischen (vor der Ausdünnung) bzw. Behandlungstufentypischen (nach der Ausdünnung) Faktor multipliziert. Bei den Fruchtzählungen dagegen, Fruchtausatz (manuell) und Ernte (Sortiermaschine), wurde die gesamte Anzahl der Früchte je Versuchsbaum erfasst.

Tabelle 6. Übersicht der in den drei Versuchsjahren (2014, 2015 und 2016) erfolgten Zählungen einzelner Blüten, Blütenbüschel und Früchten an den Versuchsbäumen. (Baum = Zählungen am ganzen Baum; Ast = Zählungen an vier markierten Ästen je Baum; m. Bb. = Zählungen an den acht markierten Blütenbüschel je Baum).

		2014	2015	2016
VOR Ausdünnung	Baum	x	x	x
	Ast	x	x	x
	m. Bb.	-	x	x
NACH Ausdünnung	Baum	x	x	x
	Ast	x	x	x
	m. Bb.	-	x	x
Fruchtansatz	Baum	-	x	x
	Ast	x	x	x
	m. Bb.	-	x	x
NACH Junifruchtfall	Baum	-	-	-
	Ast	x	x	-
	m. Bb.	-	x	x
Ernte	Baum	x	x	x
	Ast	-	-	-
	m. Bb.	-	-	-

Baum = Ganzbaumzählungen; Ast = Astzählungen; m. Bb. = markiertes Blütenbüschel

4.3.2. Astzählungen

An den Versuchsbäumen wurden zusätzlich vier in die Fahrgasse ragende Äste (zwei je Baumseite (West/ Ost)) mit einem Hängeetikett markiert. Das Hängeetikett wurde in der Mitte des Astes platziert, sodass das der Ast in einen inneren und äußeren Bereich unterteilt wurde. Um eine Verteilung in der Baumkrone zu erreichen wurde je Baumseite ein Ast aus dem unteren Teil (Basisast) und aus dem oberen Teil der Baumkrone ausgewählt. Bei diesen Zählungen wurden nicht nur die Anzahl der Infloreszenzen je Bereich erfasst, sondern auch die Anzahl der einzelnen Blüten/ Früchte je Blüten- bzw. Fruchtstand.

4.3.3. Markiertes Blütenbüschel

Je Versuchsbaum wurden acht Blütenbüschel (zwei je Versuchsaast) am Astansatz farblich markiert (siehe Abbildung 16). Die Einzelblüten jedes Blütenbüschels wurden zusätzlich mit Punkten nummeriert. Hierbei wurde innerhalb des Blütenbüschels entsprechend der Rangordnung der Königsblüte die Nummer eins geben und der ersten lateralen Blüte die Nummer zwei. Ausgehend von der Blüte Nummer zwei wurden die restlichen lateralen Blüten im Uhrzeigersinn fortlaufend nummeriert. Zum Zeitpunkt vor der Ausdünnung wurde nicht nur die Anzahl der Blüten erfasst, sondern auch die Anzahl an Primärblättern je Blütenbüschel. Weitere Zählungen und Bonituren wurden nach der maschinellen Ausdünnung, dem Fruchtansatz und nach Junifruchtfall durchgeführt.



Abbildung 16. Eines der acht je Versuchsbaum gesondert markierten Blütenbüschel, bei dem die einzelnen Blüten entsprechend ihrer Rangordnung im Blütenbüschel vor der Ausdünnung mit einem Filzstift durchnummeriert wurden. (Königsblüte = 1; erste laterale Blüte = 2; Nummerierung folgender Blüten im Uhrzeigersinn).

4.4. Ernte und Sortierung

Die Versuchsernte erfolgte als Einzelbaumernte in zwei Pflücken. Bei der ersten Pflücke (Qualitätspflücke) wurden die Versuchsbäume überpflückt und nur die gut ausgefärbten Früchte geerntet. Anschließend wurden die Äpfel baumweise und nach Pflücke getrennt mit einer Sortiermaschine (Greefa 070 175 530 (Seriennummer 20169-015) Baujahr 2005, Tricht (NL)) sortiert. Dabei wurde die Anzahl Früchte pro Baum und deren äußeren Qualitätsparameter Kaliber, Gewicht und Ausfärbung erfasst.

4.5. Bonitur Schädigungsgrad Blüten und Blätter

In Abbildung 17 und 18 sind die Boniturschemata für äußere Blatt- und Blütenschäden abgebildet. Diese beiden Schemen dienen als Grundlage für die Einstufung der durch die maschinelle Ausdünnung entstandenen Blüten- und Blattschäden. Die Bonituren erfolgten, 2015 und 2016 an den jeweils acht markierten Blütenbüscheln (siehe Kapitel 4.3.3.) je Versuchsbaum.

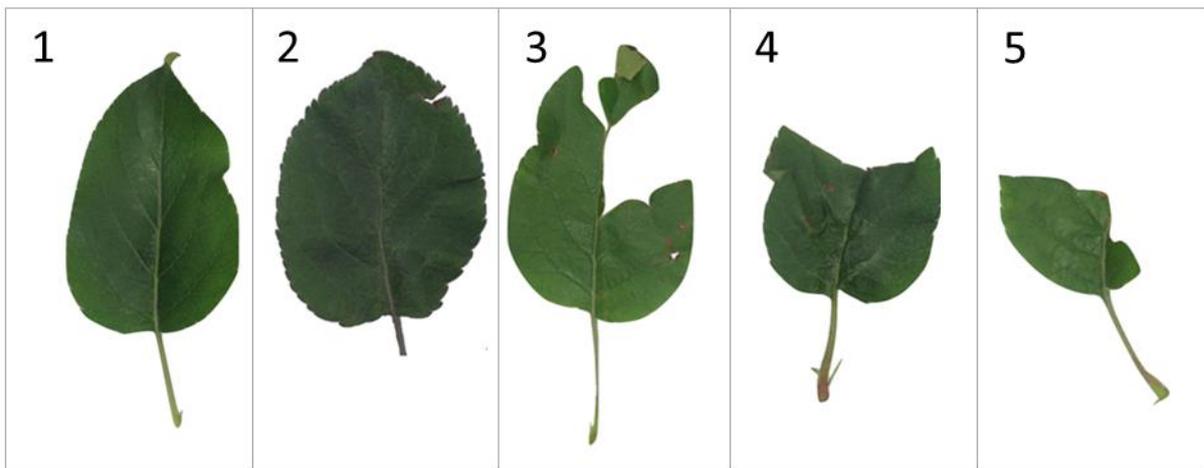


Abbildung 17. Blattboniturschema für die maschinelle Ausdünnung mechanisch verursachten äußeren Schäden an den Blattorganen in den Abstufungen 1 bis 6. [Stufe 1 = Blätter ohne Beschädigung; Stufe 2 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz bis zu 2 cm, ein Blattviertel ist beschädigt, Stufe 3 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz > 2 cm bzw. mehrfach geschlitzte Blätter, $\frac{1}{4}$ der Blattfläche ist entfernt; zwei Blattviertel sind beschädigt, Stufe 4 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz > 2 cm bzw. mehrfach geschlitzte Blätter, $\frac{1}{2}$ der Blattmasse ist entfernt; drei Blattviertel beschädigt; Stufe 5 = geschlitzte Blätter mit einem Schlitz > 2 cm bzw. mehrfach geschlitzte Blätter, $\frac{3}{4}$ der Blattmasse entfernt, vier Blattviertel beschädigt, Stufe 6 = Blätter sind abgeschlagen].

Hierzu wurde vor der maschinellen Ausdünnung die Anzahl der Blüten, sowie die Anzahl Primärblätter je markierten Blütenbüschels erfasst. Im direkten Anschluss an die maschinelle Blütenausdünnung erfolgte eine Einstufung dieser Blüten und Blätter entsprechend des Schädigungsgrades. Aus der Differenz der Blüten bzw. Blätter je Blütenbüschel vor und nach der maschinellen Ausdünnung wurde die Anzahl der abgeschlagenen Blüten (Schädigungsstufe 7) und Blätter (Schädigungsstufe 6) ermittelt. Durch die Nummerierung der Blüten im Blütenbüschel, siehe Kapitel 4.3.3., konnte jeder bonitierten Blüte ein eindeutiger Schädigungsgrad zugewiesen werden mit dem Ziel die Blüten bzw. Früchte über den Fruchtansatz hinaus bis hin zur Ernte zu beobachten.

Tabelle 7. Übersicht der durchgeführten Bonituren und den Blüten bzw. Früchten und den Primärblättern zu den entsprechenden Zeitpunkten während der Vegetationsperiode (vor bzw. nach der Ausdünnung, Fruchtansatz, nach dem Junifruchtfall) an den acht markierten Blütenbüscheln je Versuchsbaum in den Sorten `Gala` und `Elstar` in den Jahren 2015 und 2016.

		VOR	NACH	Fruchtansatz	NACH
		Ausdünnung	Ausdünnung		Junifruchtfall
2015	`Gala`	Blüten	x	x	x
		Blätter	x	x	-
	`Elstar`	Blüten	x	x	x
		Blätter	x	x	-
2016	`Gala`	Blüten	x	x	x
		Blätter	x	x	-
	`Elstar`	Blüten	x	x	x
		Blätter	x	x	-

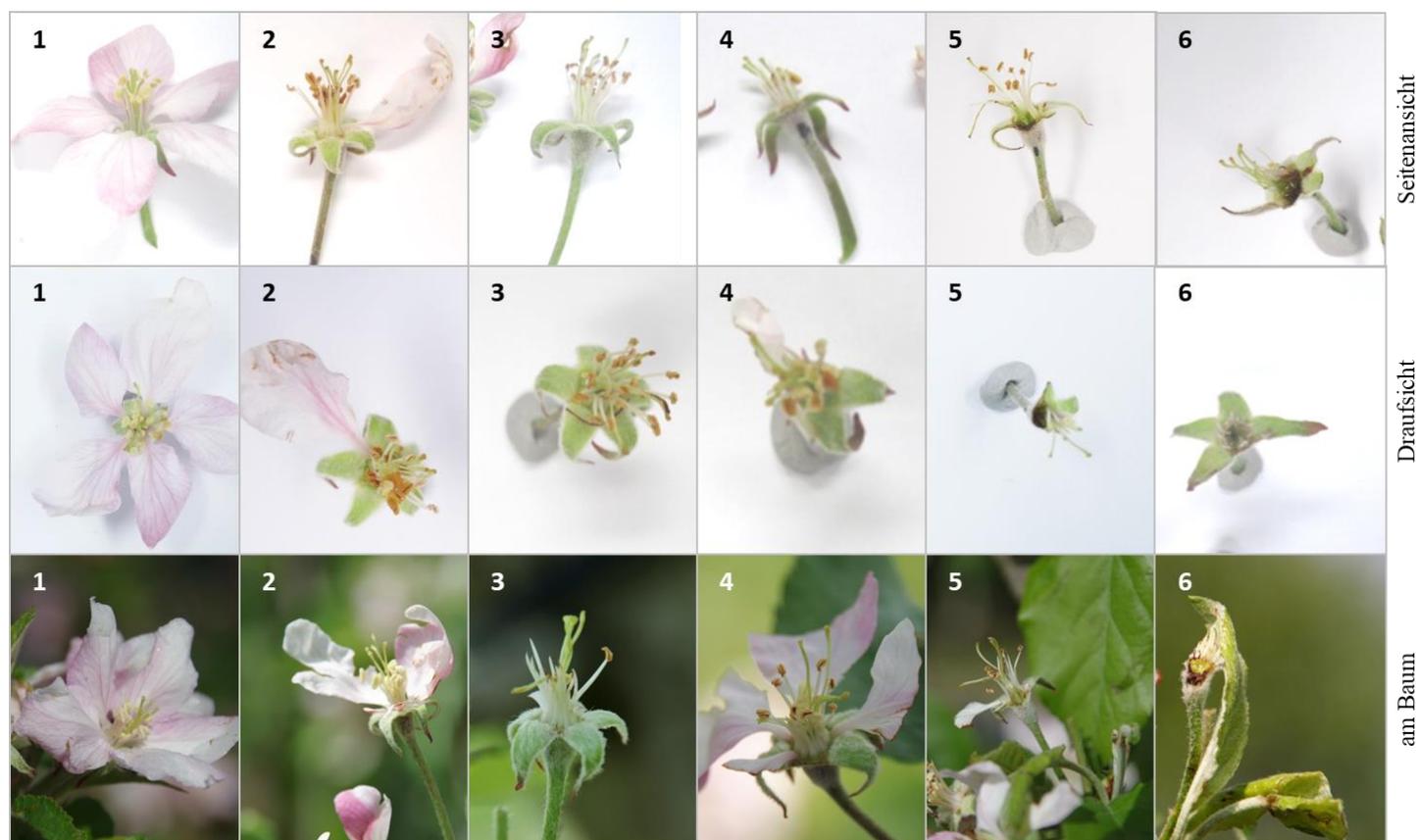


Abbildung 18. Blütenboniturschema für die durch die maschinelle Ausdünnung mechanisch verursachten äußeren Schäden an den Blütenorganen in den Abstufungen 1 bis 7. [Stufe 1 = keine sichtbaren Schäden zu erkennen; Stufe 2 = Blütenblätter sind teilweise entfernt, Anthere und Stamina sind intakt, Blütenstiel weist keine Verletzungen auf; Stufe 3 = Blütenblätter entfernt, Anthere und Stamina intakt, Blütenstiel weist keine Verletzungen auf; Stufe 4 = Ein oder mehrere Kelchblätter sind beschädigt/ entfernt, Anthere und Stamina intakt, Blütenstiel weist keine Verletzungen auf; Stufe 5 = Verletzungen an Anthere und/ oder Stamina sind zu erkennen, leichte Beschädigungen am Blütenstiel; Stufe 6 = massive Verletzungen an Anthere und oder Stamina, Blütenstiel stark beschädigt, Blüte nahezu abgetrennt; Stufe 7 = Blüte ist abgeschlagen]

4.6. Indol-3-Essigsäure (IAA) Analyse

4.6.1. Probenentnahme Triebspitzen

Nach der maschinellen Ausdünnung wurden zu je zwei Terminen (Tabelle 8) Triebspitzen aus den beiden Versuchssorten entnommen. Hierzu wurden je Probetermin, Behandlungsstufe und Wiederholung sechs komplette Blütenstände bzw. im späteren Entwicklungsverlauf Fruchtstände inklusive Neutrieb von den Versuchsbäumen abgebrochen, auf Setzplatten gesteckt und anschließend direkt ins Labor gebracht. Zur Verringerung der Verdunstung wurde die Setzplatte mit feuchten Tüchern bedeckt. Die Entnahme der Blüten-/ Fruchtstände erfolgte aus dem äußeren Bereich der Baumkrone am mehrjährigen Holz auf einer Höhe von ca. 1,70 m. Dabei wurden nur Blüten-/ Fruchtstände ausgewählt deren Neutrieb größer zwei cm gewesen ist und mindestens eine Frucht entwickelt war. Im Labor wurde der Neutrieb mit einer Rasierklinge vom Blüten-/ Fruchtbüschel abgetrennt, die Blätter entfernt und auf eine Länge von 2 cm gekürzt. Der Schnitt erfolgte in einem Winkel von 45° Grad um die Oberfläche zwischen Trieb und Pufferlösung zu vergrößern. Anschließend wurde der Trieb auf die Mikrotiterplatten gesteckt. Dabei waren die 24 Wells der Mikrotiterplatten mit 2,5 ml Phosphatpuffer gefüllt. Anschließend wurden die Mikrotiterplatten zusammen mit einem feuchten Tuch und 5 ml 10%iger Kaliumhydroxidlösung luftdicht verschlossen und unter Lichtausschluss für 20 Stunden bei 25 °C im Klimaschrank eingeschlossen. Nach Ablauf der 20 Stunden wurden die Triebspitzen aus den Wells entfernt, die Mikrotiterplatten mit einem Deckelverschlossen und bei minus 56 °C bis zur weiteren Analyse gelagert. Mittels einer Feinwaage wurde abschließend noch das Frischgewicht der Triebspitzen je Well bestimmt. Bei der Probenentnahme am 18.06.2015 wurden keine kompletten Fruchtstände mehr entnommen, sondern nur die fünf Zentimeter lange Triebspitze. Um das austrocknen dieser zu verhindern wurden die Triebspitzen direkt in ein mit Wasser gefülltes Reagenzglas gesteckt. Nach dem Entfernen der Triebspitzen, wurde an den Fruchtständen zusätzlich die Anzahl der Blätter erfasst, deren Schädigungsgrad und Blattfläche mit dem Blattflächenmessgerät (cm²). Zudem wurde die Anzahl der Früchte gezählt und deren Kaliber gemessen.

Tabelle 8. Daten zur Probenentnahme der Indol-3-Essigsäure (IAA) Untersuchungen der Triebspitzen in den Sorten `Gala` und `Elstar`.

		IAA-Proben Triebspitzen			
		1.	TnV	2.	TnV
2015	`Gala`	06.05.	6	12.05.	12
	`Elstar`	06.05.	6	18.06.	47
2016	`Gala`	17.05.	18	30.05.	31
	`Elstar`	23.05.	23	06.06.	37

4.6.2. Aufbereitung der Pufferdiffusate

Nach dem Auftauen der Proben, wurden 2015 jeweils zwei Wells zusammen, bzw. 2016 nur ein Well in ein Schnappdeckelglaschen überführt und die Wells anschließend mit 1 ml 0.1 M C₂H₄O₂ (Essigsäure) nachgespült. Anschließend wurde der pH-Wert der Proben mit 4 M C₂H₄O₂ auf einen pH-Wert zwischen 2,5 und 3 eingestellt und mit einer Pipette auf einen vorkonditionierte C₁₈ Sep-Paks aufgetragen. Die Konditionierung der C₁₈ Sep-Paks erfolgte zweimal mit 4 ml 100 % igem CH₄O (Methanol) und zweimal mit 4 ml 0.1 M C₂H₄O₂. Nach dem auftragen der Probe auf C₁₈ Sep-Paks wurden zuerst die Schnappdeckelgläser mit 4 ml 0.1 M C₂H₄O₂ nachgespült und die Essigsäure später ebenfalls auf die Sep-Paks aufgetragen. Anschließend wurden die Sep-Paks mit 4 ml 15 % Methanol in 0.1 M C₂H₄O₂ gespült. Nach diesem Schritt erfolgte das eluieren des IAA-Hormones in Schnappdeckelgläser mit 4 ml 40 % CH₄O in 0.1 M C₂H₄O₂. Das Eluat wurde folgend mit einer Pipette zu 1,2 ml auf drei RIA-Tubes pipettiert. Das Aliquot in den RIA-Tubes wurde anschließend mit einem Vakuumrotationsverdampfer über Nacht eingetrocknet.

4.6.3. Quantitative IAA-Bestimmung - Radioimmunassay (RIA)

Das RIA wurde anhand des Protokolls von *Bohner und Bangert* (1988) durchgeführt und nach der IAA Bestimmungsmethode beschrieben in *Weiler* (1981).

Die Proben (Aliquot) wurden am darauffolgenden Tag mit 50 µl Diazomethan methyliert und für 30 Minuten ins dunkle gestellt. Folgend wurden 250 µl RIA-Puffer-Lösung (0,76 g KH₂PO₄; 17,33 g NaCl in zwei ml destilliertem Wasser gelöst) hinzugefügt. Im Anschluss wurde das Pellet durch

schütteln in 50 µl Serum (ein bovin-serum; zehn RIA-Puffer (v7v)), im Tracer und dem Antikörper (B₀-Konzentration ist die Hälfte zu T-Konzentration) gelöst (Hoffmann 2014).

Als Kontrolle wurden jeweils in dreifacher Wiederholung der Tracer (T), der Tracer + Serum (N = nicht spezifisch gebunden) und Tracer + Serum + Antikörper (B₀ max. Bindung) untersucht. Im Anschluss wurden die Proben geschüttelt und für 30 min inkubiert. Folgend wurde die Lösung mit 750 µl 90ziger SO₄(NH₄)₂ Lösung gefällt, wiederum für 30 min inkubiert und bei 20 °C mit 4000 U min⁻¹ (Megafuge 1.0 R, Heraeus Instruments, Hanau) zentrifugiert. Anschließend wurde der wässrige Überstand verworfen und das ausgefällte Protein mit 750 µl 50ziger SO₄(NH₄)₂ Lösung versetzt und wiederum für 30 min zentrifugiert. Darauffolgend wurde das Pellet in 200 µl destilliertem Wasser gelöst und zwei ml Quickzint 2000 (Zinsser Analytic, Frankfurt a.M.) hinzugefügt. Die Analyse der Radioaktivität erfolgte im Liquid-Scintillator-Counter PW4700 (Phillips; Eindhoven). Durch den Vergleich zur Eichkurve des Nuclear Interace Programm konnte die Hormonkonzentration als Mittelwert der drei Proben bestimmt werden (Hoffmann 2014).

4.7. Bestimmung des Triebwachstums

Zur Bestimmung des Triebwachstums wurden über alle drei Versuchsjahre (2014, 2015 und 2016) hinweg am Ende der Vegetationsperiode Triebmessungen durchgeführt. Dabei wurde das Messprinzip über die Versuchsjahre hinweg weiterentwickelt und angepasst. 2014 wurden sechs Neutriebe aus dem äußeren Bereich der Krone mittels eines Zollstocks vermessen (drei je Baumseite (West/ Ost); im unteren, mittleren und oberen Kronenbereich). Um exaktere Aussagen über das Triebwachstum eines Baumes auch im Zusammenhang zur maschinellen Ausdünnung treffen zu können wurden 2015, die kompletten Neutriebe/ Triebzuwachs jedes einzelnen Versuchsbaumes gemessen. Dabei wurde aus jeder Wiederholung der Triebzuwachs eines Baumes mit dem Zollstock auf eine Nachkommastelle genau vermessen. Für die restlichen Bäume der Wiederholungen wurde ein vereinfachtes Messverfahren angewendet. Hierzu wurden anhand der exakten Triebmessungen mit dem Zollstock sechs Längengruppen (< 5 cm; > 5 – 15 cm; > 15 – 25 cm; > 25 - 40 cm; > 40 – 65 cm und > 65 cm) gewählt und anschließend damit die Neutriebe der restlichen Versuchsbaume gemessen. Aus den Ergebnissen 2015 konnte festgestellt werden, dass die Unterschiede zwischen dem Messen mit dem Zollstock und dem vereinfachten Verfahren vernachlässigbar waren, sodass 2016 nur das vereinfachte Verfahren mit der Einteilung der Triebe in die sechs Längengruppen angewendet wurde. Zusätzliche wurde der Triebzuwachs 2015 und

2016 an den acht markierten Blütenbüschel je Versuchsbaum erfasst um Aussagen über den Zusammenhang zwischen Triebwachstum, Blüten- und Fruchtfall dieser Blütenbüschel treffen zu können.

4.8. Mineralstoffanalyse

Pro Versuchsjahr, außer 2014, wurden aus beiden Versuchssorten jeweils zum T-Stadium (BBCH-Stadium 76) und zur Ernte Proben für die Mineralstoffanalyse (Calcium, Magnesium, Kalium, Phosphor) entnommen (Tabelle 9). Zum T-Stadium wurden im Feld 4 Früchte je Versuchsbaum, insgesamt 24 Früchte je Behandlungsstufe und Wiederholung, aus dem äußeren Kronenbereich und von Fruchtständen mit mindestens 2 Früchten entnommen. Der Probenumfang zur Ernte betrug ebenfalls 4 Früchte je Versuchsbaum bzw. 24 Früchte je Behandlungsstufe und Wiederholung. Die Entnahme der Probefrüchte erfolgte blind nach dem Sortiervorgang.

Tabelle 9. Übersicht zur Entnahme der Probenfrüchte für die Mineralstoffanalyse in den beiden Versuchssorten `Gala` und `Elstar` zum T-Stadium und zur Ernte.

		Probeentnahme	
		T-Stadium	Ernte
2014	`Gala`	-	15.09.
	`Elstar`	-	11.09.
2015	`Gala`	09.06.	15.09.
	`Elstar`	18.06.	16.09.
2016	`Gala`	29.06.	22.09.
	`Elstar`	04.07.	15.09.

Nach dem waschen der Früchte mit destilliertem Wasser im Labor, wurden die Früchte mit einem Messer zerkleinert (T-Stadium), Gewicht erfasst, gefriergetrocknet und anschließend mit einer Kaffeemühle zu einem homogenen Pulver vermahlen. Bei der Ernte wurden nach dem waschen jeweils zwei ca. 0,5 cm dicke Schnitze (Sonn- und Schattenseite) aus jeder Frucht geschnitten, gemust (Grindomix GM 200; Firma Retsch; Seriennr. 91407012B) und anschließend 100 g FM gefriergetrocknet. Im Anschluss an die Gefrier Trocknung wurden die Proben 6 Stunden bei 480 °C (AAF 1100; Firma Carbolite; Seriennr. 3/01/733) verascht und mit 2 ml 20 %-iger HCL-Lösung

versetzt. Nach der Überführung der Proben in einen 100 ml Messkolben, wurde 1 ml LA-Lösung (Lanthan) hinzugegeben und der Messkolben mit destilliertem Wasser auf 100 ml aufgefüllt. Die Analyse der Mineralstoffe Calcium, Magnesium und Kalium erfolgte mit einem Atomabsorptionsspektrometer (908AA; Firma GBC; Seriennr. 2749). Der Phosphorgehalt wurde nach der Molybdän-Blau-Methode mittels eines Spektralphotometer (U-2001; Firma Hitachi; Seriennr. 9943-001) gemessen. Hierfür wurden zu 10 ml Probenflüssigkeit nacheinander 15 ml 0,5 %-iger HCL, 1 ml $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ und 1 ml Ascobinsäure-Zinnchlorid zugegeben.

4.9. Berechnung der Stammquerschnittsfläche

An den Versuchsbäumen wurde in jedem Versuchsjahr der Umfang des Stammes 20 cm über der Veredlungsstelle gemessen. Aus dem Umfang wurde anschließend die Stammquerschnittsfläche berechnet.

4.10. Statistische Auswertung und Erstellung der Abbildungen

Die statistischen Auswertungen der Versuchsergebnisse erfolgte mit der Software SPSS (IBM® SPSS®.Statistics Version 25). Hierzu wurden ein- bzw. zweifaktorielle Varianzanalysen bzw. Kovarianzanalyse bei einem Signifikanzniveau von 5 % durchgeführt. Die Berechnung der Grenzdifferenz ($\leq 0,05$) erfolgte bei Varianzhomogenität mit dem LSD-Test und Varianzheterogenität mit dem Games-Howell-Test.

Die Aufbereitung der Daten erfolgte mit Microsoft Excel 2010 bzw. 2016. Die Abbildungen wurden mit der Software SigmaPlot® Version 12.5 (Systat Software Inc.) erstellt.

V. Ergebnisse

5.1. Blüte Versuchsbäume

Bei der Auswahl der Versuchsbäume wurden in beiden Sorten Bäume mit einer unter- bzw. überdurchschnittlichen Anzahl an Blütenbüschel aussortiert. In Tabelle 10 für Elstar und 12 für Gala sind die Ergebnisse der Zählungen dargestellt.

Tabelle 10. Durchschnittliche Anzahl Blütenbüschel an den Versuchsbäumen der Sorte `Elstar` vor der Ausdünnung (-5 TnV).

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	Ø-Anzahl Blütenbüschel je Baum `ELSTAR`								
		2014			2015			2016		
1	200	314	± 105	a	261	± 54	b	-		
2	240	323	± 66	a	257	± 61	b	293	± 104	c
3	280	334	± 91	a	256	± 46	b	-		
4	320	281	± 68	a	221	± 47	a	294	± 86	c
12	400	-			-			261	± 72	bc
5	UBK	-			267	± 45	b	308	± 88	c
6	240 + Hand	-			240	± 47	ab	261	± 95	bc
7	320 + Hand	-			221	± 52	a	297	± 66	c
8	UBK + Hand	-			254	± 48	b	285	± 106	c
13	320 + Regalis	-			-			283	± 184	c
14	UBK + Regalis	-			-			222	± 64	ab
15	320 + Regalis + Hand	-			-			308	± 75	c
16	UBK + Regalis + Hand	-			-			212	± 71	a
GD		64			29			48		
Signifikanz		n.s.			**			***		

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

Hierbei zeigte sich, dass in beiden Sorten die Anzahl der Blütenbüschel einzelner Behandlungsstufen voneinander abgewichen hat.

Tabelle 11. Durchschnittliche Anzahl Blütenbüschel an den Versuchsbäumen der Sorte `Gala` vor der Ausdünnung (-5 TnV).

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	Ø-Anzahl Blütenbüschel je Baum `GALA`								
		2014			2015			2016		
1	200	92	± 31	a	232	± 46	bc	-		
2	240	140	± 61	b	251	± 54	c	223	± 45	ab
3	280	137	± 57	b	206	± 48	ab	-		
4	320	143	± 45	b	211	± 66	ab	224	± 68	ab
12	400	-			-			228	± 67	ab
5	UBK	-			197	± 29	a	211	± 46	a
6	240 + Hand	-			210	± 52	ab	215	± 59	ab
7	320 + Hand	-			240	± 41	c	238	± 55	ab
8	UBK + Hand	-			210	± 57	ab	221	± 56	ab
13	320 + Regalis	-			-			230	± 50	ab
14	UBK + Regalis	-			-			224	± 47	ab
15	320 + Regalis + Hand	-			-			246	± 66	b
16	UBK + Regalis + Hand	-			-			216	± 66	ab
GD		38			29			33		
Signifikanz		***			**			*		

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

5.2. Ausdünnung und Fruchtbehang

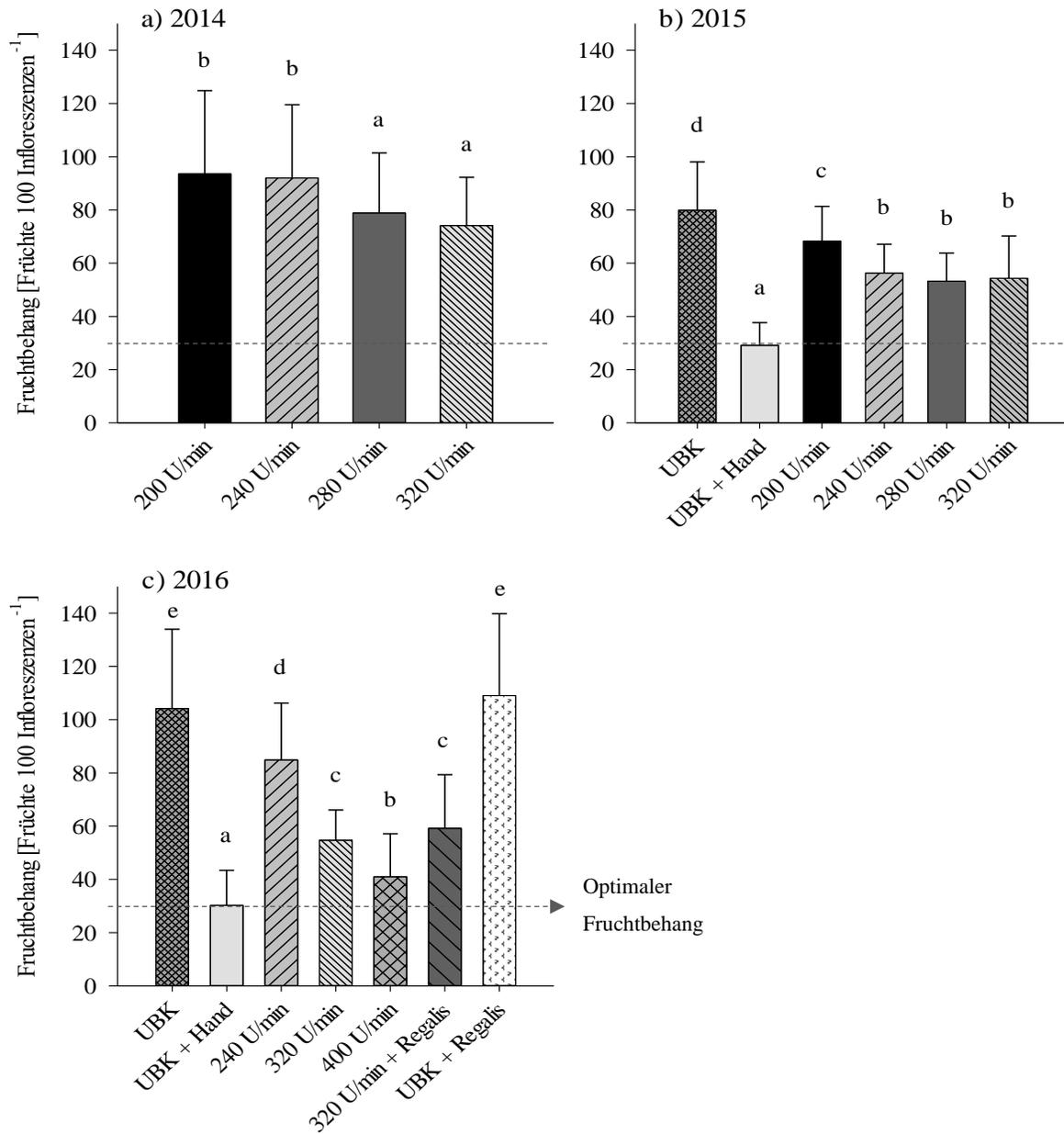


Abbildung 19. Fruchtbehang pro 100 Blütenbüschel (Infloreszenz) zur Ernte in der Sorte 'Elstar' in den Versuchsjahren 2014, 2015 und 2016 in den Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder, $p \leq 0,05$)

In allen drei Versuchsjahren konnte mittels der `Darwin`-Maschine eine Ausdünnwirkung, sprich eine Reduktion des Fruchtbehangs erzielt werden (Abbildungen 19 für `Elstar` und 20 für `Gala`). Wurde mit einer Spindeldrehzahl von 200 U min^{-1} (Traktorgeschwindigkeit von 8 km/h), nur eine geringe Ausdünnwirkung erzielt, konnte durch die stufenweise Steigerung der Spindeldrehzahl bis auf 400 U min^{-1} (Versuchsjahr 2016) die Ausdünnwirkung gesteigert und der Fruchtbehang bis auf 58 Früchte je 100 Infloreszenzen (`Gala`) bzw. 43 Früchte je 100 Infloreszenzen (`Elstar`) reduziert werden. Vergleicht man die Ausdünnwirkung bzw. den Fruchtbehang der maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen mit der Handausdünnung (UBK + Hand) bei der Ernte, so stellt man fest, dass der sortenabhängige Zielertrag in keinem der Versuchsjahre erreicht bzw. unterschritten wurde. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass keine der Maßnahmen in allen Versuchsjahren zu einer Überdünnung, d.h. einem Unterbehang der Bäume, führte.

Der Einsatz von Regalis Plus, das 2016 zur Regulierung des Triebwachstums eingesetzt wurde, hatte keinen Einfluss auf die Ausdünnwirkung und folglich auch nicht auf den Fruchtbehang der Bäume.

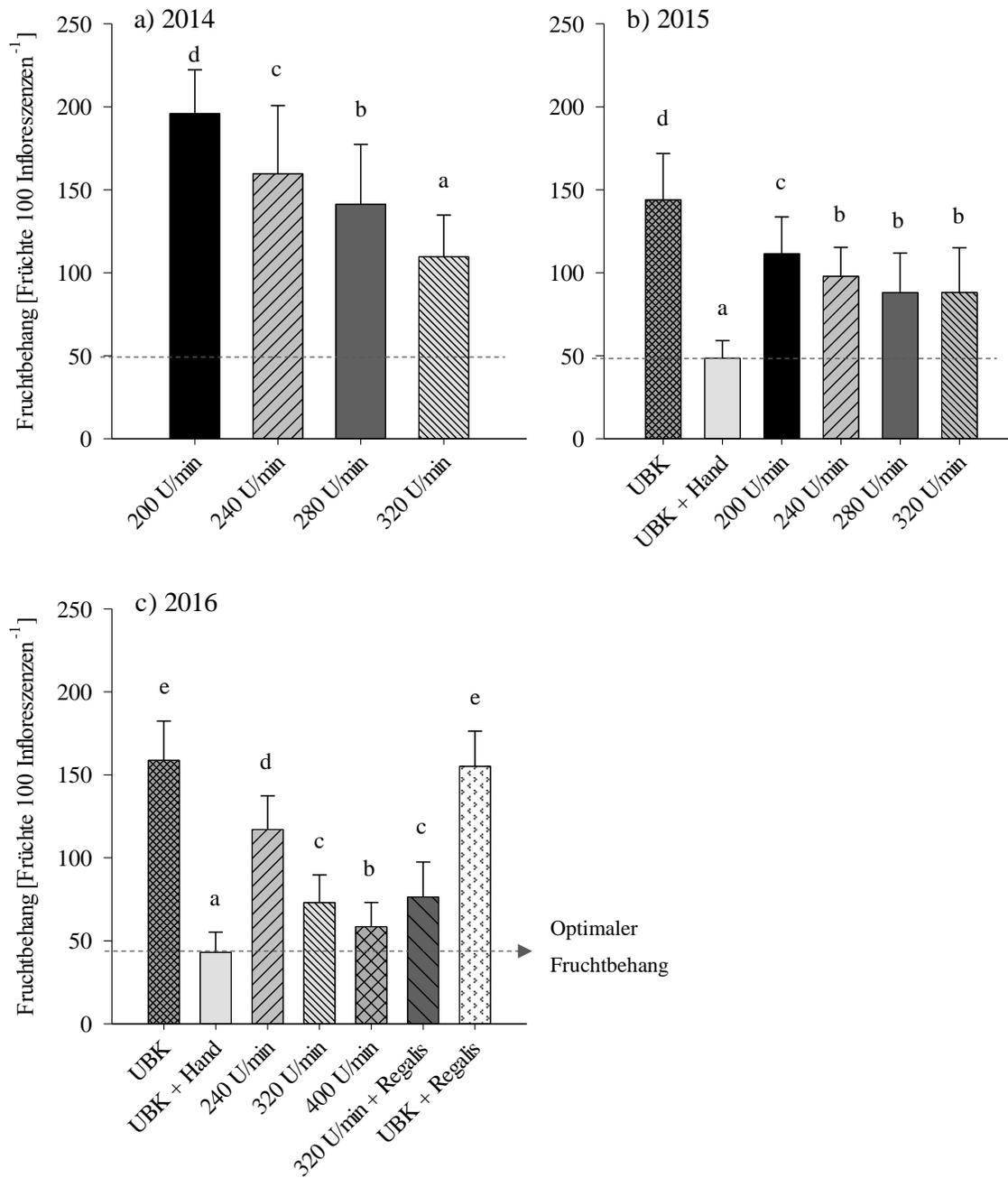


Abbildung 20. Fruchtbehang pro 100 Blütenbüschel (Infloreszenz) zur Ernte in der Sorte `Gala` in den Versuchsjahre 2014, 2015 und 2016 in den Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

5.3. Fruchtqualität

Tabelle 12. Fruchtgrößenverteilung entsprechend der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis über die Versuchsjahre 2014, 2015 und 2016 der Sorte `Gala`.

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	Ø-Fruchtkaliber [mm] `GALA`								
		2014			2015			2016		
1	200	64,79	± 3,64	a	61,70	± 2,94	b	-		
2	240	65,25	± 3,53	a	63,40	± 2,83	c	63,62	± 2,72	b
3	280	66,08	± 3,12	ab	65,97	± 2,67	d	-		
4	320	67,92	± 3,78	b	64,52	± 3,28	cd	67,97	± 2,12	c
12	400	-			-			70,16	± 1,85	cd
5	UBK	-			58,54	± 3,51	a	57,03	± 3,29	a
6	240 + Hand	-			71,51	± 2,59	f	72,52	± 1,85	e
7	320 + Hand	-			72,16	± 2,68	f	72,82	± 1,97	e
8	UBK + Hand	-			69,71	± 1,95	e	71,95	± 2,43	de
13	320 + Regalis	-			-			67,91	± 1,78	c
14	UBK + Regalis	-			-			58,79	± 3,85	a
15	320 + Regalis + Hand	-			-			73,50	± 1,99	e
16	UBK + Regalis + Hand	-			-			72,63	± 2,55	e
GD		2,66			1,62			1,80		
Signifikanz		***			***			***		

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

Nach derzeitigem Stand ist das Fruchtkaliber neben der Ausfärbung das entscheidende Kriterium bei der Beurteilung der Fruchtqualität und damit auch bei der Preisfindung seitens des Handels. Bei der Sortierung werden die Früchte in der Regel entsprechend ihres Kalibers in sogenannte Größenklassen sortiert. Derzeit werden vor allem Früchte mit einem Kaliber zwischen 70 und 85 mm gut bezahlt, sodass die Maßnahmen in der Produktion entsprechend abgestimmt sein sollten um dieses Ziel zu erreichen.

Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse in den Tabellen 12 (`Gala`) und 13 (`Elstar`) konnte festgestellt werden, dass das durchschnittliche Fruchtkaliber durch die maschinelle Blütenausdünnung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle signifikant gesteigert werden konnte. Dabei zeigte sich, unabhängig der Sorte und des Jahres, je höher die Spindeldrehzahl/Ausdünnintensität war, desto größer war das Fruchtkaliber bei Ernte. 2016 war dabei das durchschnittliche Fruchtkaliber in der Behandlungsstufe 400 U min^{-1} im Schnitt nur 2 mm kleiner als bei reiner Handausdünnung, obwohl in dieser Behandlungsstufe in `Gala` und `Elstar` knapp 40 Früchte am Baum hingen.

Durch die zusätzliche Handausdünnung im Juni bzw. Juli, konnte das Fruchtkaliber zusätzlich noch einmal in allen entsprechenden Vergleichsbehandlungsstufen teilweise erheblich gesteigert werden. Diese Steigerung des Fruchtkalibers betrug dabei mehr als 10 mm beim Vergleich der reinen Handausdünnung mit der unbehandelten Kontrolle. In den Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung war der Effekt der Handausdünnung nicht so stark ausgeprägt.

Auch führte die Behandlungen mit Regalis zu einer zusätzlichen Steigerung des Kalibers in der Sorte `Gala`. Hingegen zeigte sich keine Wirkung bei `Elstar`.

Tabelle 13. Fruchtgrößenverteilung entsprechend der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis in den Versuchsjahren 2014, 2015 und 2016 der Sorte `Elstar`.

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	Ø-Fruktkaliber [mm] `ELSTAR`								
		2014			2015			2016		
1	200	62,78	± 1,50	a	66,76	± 4,37	b	-		
2	240	64,25	± 2,44	a	68,55	± 3,02	bc	67,13	± 3,53	b
3	280	66,58	± 2,88	b	70,14	± 3,41	c	-		
4	320	66,28	± 3,38	b	69,38	± 4,09	c	71,91	± 2,27	c
12	400	-			-			71,54	± 4,02	c
5	UBK	-			63,95	± 4,57	a	63,59	± 2,03	a
6	240 + Hand	-			77,35	± 2,19	f	75,42	± 3,14	e
7	320 + Hand	-			77,18	± 2,67	f	75,08	± 2,20	de
8	UBK + Hand	-			74,61	± 3,40	d	73,83	± 2,39	d
13	320 + Regalis	-			-			71,58	± 2,60	c
14	UBK + Regalis	-			-			63,67	± 3,02	a
15	320 + Regalis + Hand	-			-			77,27	± 2,46	f
16	UBK + Regalis + Hand	-			-			74,89	± 4,48	de
GD		1,55			1,85			1,59		
Signifikanz		***			***			***		

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

5.4. Ergebnisse Mineralstoffe

Tabelle 14. Durchschnittliches Kalium-Calcium-Verhältnis zur Ernte in Milligramm je 100 g Frischmasse ($\text{mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ FM}^{-1}$) der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} + Regalis und UBK + Regalis in den Versuchsjahren 2014 bis 2016.

VAR	Behandlungsstufe [U min^{-1}]	Ø-Kalium-Calcium Verhältnis `Gala`								
		2014			2015			2016		
1	200	17,20	± 0,43	a	16,31	± 0,74	ab	-		
2	240	15,61	± 1,78	a	18,01	± 2,49	bc	16,50	± 2,14	b
3	280	17,92	± 1,36	a	18,62	± 1,35	bcd	-		
4	320	18,14	± 0,20	a	17,15	± 1,54	b	18,72	± 2,13	bcd
12	400	-			-			21,14	± 1,33	de
5	UBK	-			14,48	± 0,60	a	13,64	± 1,30	a
6	240 + Hand	-			20,66	± 2,34	cd	19,78	± 1,97	cde
7	320 + Hand	-			20,86	± 1,82	d	21,84	± 3,32	e
8	UBK + Hand	-			19,13	± 2,59	bcd	17,86	± 1,90	bc
13	320 + Regalis	-			-			18,49	± 1,84	bcd
14	UBK + Regalis	-			-			13,78	± 1,37	a
15	320 + Regalis + Hand	-			-			20,80	± 1,73	de
16	UBK + Regalis + Hand	-			-			17,05	± 2,16	bc
GD		2,15			2,67			2,88		
Signifikanz		n.s.			***			***		

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

Bei den Mineralstoffanalysen zur Ernte wurden, mit Ausnahme in `Elstar` 2016, in beiden Versuchssorten Calcium-Gehalte über $5 \text{ mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ FM}^{-1}$ gemessen. Die Calcium-Gehalte in `Elstar` 2016 lagen im Schnitt aller Behandlungsstufen bei $4,0 \text{ mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ FM}^{-1}$ und damit $1,3 \text{ mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ FM}^{-1}$ unter dem Schnitt aus 2015 und 2016. Bei Betrachtung des durchschnittlichen Kalium-Calcium-Verhältnisses zeigte sich, dass sowohl in `Gala` als auch in `Elstar` die unbehandelte Kontrolle über alle Versuchsjahre hinweg das signifikant geringste Kalium-Calcium-Verhältnis aufgewiesen hat. Die Zunahme der Ausdünnintensität führte in der Regel in beiden Sorten zu einer Steigerung des Kalium-Calcium-Verhältnisses. Eine zusätzliche Handausdünnung führte vor allem in der Sorte `Elstar` zu einem weiteren Anstieg dieses Verhältnisses wobei dagegen in der Sorte `Gala` dieser Effekt nicht zu sehen gewesen ist.

Tabelle 15. Durchschnittliches Kalium-Calcium-Verhältnis zur Ernte in Milligramm je 100 g Frischmasse ($\text{mg } 100^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ FM}^{-1}$) der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min^{-1} , 240 U min^{-1} , 280 U min^{-1} , 320 U min^{-1} , 400 U min^{-1} , 320 U min^{-1} +Regalis und UBK + Regalis in den Versuchsjahren 2014 bis 2016.

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	Ø-Kalium-Calcium Verhältnis `ELSTAR`								
		2014			2015			2016		
1	200	12,88	± 0,27	a	18,98	± 2,96	ab	-		
2	240	14,83	± 0,62	ab	20,63	± 1,77	bc	20,45	± 2,43	ab
3	280	15,75	± 1,30	b	21,8	± 3,51	bc	-		
4	320	15,45	± 1,77	b	20,59	± 2,79	bc	23,01	± 2,39	bcd
12	400	-			-			24,16	± 5,58	bcde
5	UBK	-			16,74	± 1,05	A	18,12	± 3,35	a
6	240 + Hand	-			25,61	± 2,37	D	25,03	± 4,46	bcde
7	320 + Hand	-			22,70	± 1,98	Cd	27,96	± 2,23	e
8	UBK + Hand	-			23,95	± 1,28	Cd	27,00	± 0,96	de
13	320 + Regalis	-			-			25,40	± 2,45	cde
14	UBK + Regalis	-			-			20,70	± 4,57	abc
15	320 + Regalis + Hand	-			-			27,19	± 3,02	de
16	UBK + Regalis + Hand	-			-			27,93	± 3,30	e
GD		2,16			3,43			4,88		
Signifikanz		*			***			**		

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

5.5. Beschädigung von Blüten und Blättern

5.5.1. Blatt- und Blütenbonituren

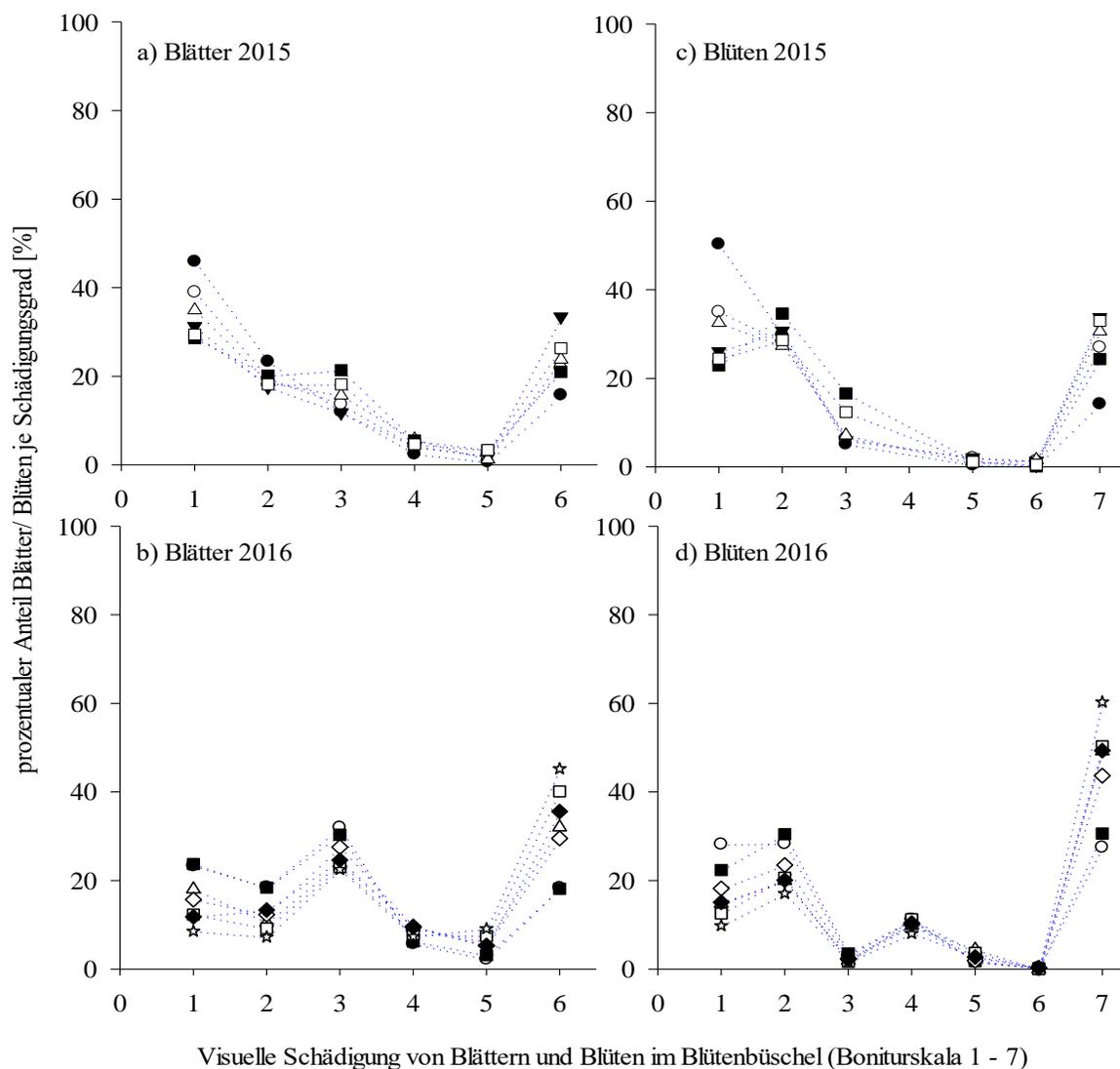


Abbildung 21. Durch die maschinelle Ausdünnung verursachte Schäden an Blätter und Blüten in Prozent [%] an der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufe in den Jahren 2015 und 2016. Datenerhebung erfolgte an 8 Blütenbüscheln je Versuchsbaum, 2015 in den Behandlungsstufen 200 U min⁻¹ ●, 240 U min⁻¹ ○, 280 U min⁻¹ ▼, 320 U min⁻¹ △, 240 U min⁻¹ + Hand ■ und 320 U min⁻¹ + Hand □. In 2016 in den Behandlungsstufen 240 U min⁻¹ ○, 320 U min⁻¹ △, 400 U min⁻¹ ☆, 240 U min⁻¹ + Hand ■, 320 U min⁻¹ + Hand □, 320 U min⁻¹ + Regalis ◇ und 320 U min⁻¹ + Regalis + Hand ◆. Schädigungsgrad 1 entspricht keiner Beschädigung. Schädigungsgrad 6 bei Blättern und 7 bei Blüten entspricht einem vollständig abgeschlagenen Organ. Die nicht maschinell ausgedünnten Varianten wurden nicht in die Abbildung mit aufgenommen, da 100 % der Blätter und Blüten der Boniturstufe 1 zugeordnet werden konnten.

2015 und 2016 wurden Blätter und Blüten von jeweils 8 Blütenbüscheln je Versuchsbaum auf durch die Ausdünnmaschine verursachte Schäden bonitiert. Die Bonitur erfolgte anhand der Boniturschemata aus Kapitel 4.5. im direkten Anschluss an die Ausdünnfahrt.

Die Ergebnisse aus den Blüten- und Blattbonituren sind in Abbildung 21 für `Gala` und in Abbildung 22 für `Elstar` dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass der Großteil der Blätter und Blüten entweder eine geringe Beschädigung (Schädigungsstufe 1 bzw. 2) aufzeigte oder vollständig abgeschlagen wurde (Schädigungsstufe 6 bei Blättern bzw. 7 bei Blüten). Dieser Trend konnte unabhängig der Sorte und Behandlungsstufe beobachtet werden.

Sowohl bei den Blättern als auch bei den Blüten war der Anteil an visuell nicht beschädigten Organen (Schädigungsgrad 1) in den Behandlungsstufen mit geringer Spindeldrehzahl am höchsten. 2015 waren 46 % der bonitierten Blätter in `Gala` und 50 % der bonitierten Blätter in `Elstar` in der Behandlungsstufe mit der geringsten Drehzahl (200 U min^{-1}) visuell intakt. 2016 wiesen bei einer Drehzahl von 240 U min^{-1} 23 % der bonitierten Blätter in `Gala` bzw. 37 % der bonitierten Blätter in `Elstar` keine visuelle Beschädigung auf. Mit Zunahme der Spindeldrehzahl sank der prozentuale Anteil intakter Blätter (Boniturstufe 1) über beide Sorten hinweg bis auf 8 % (`Gala` (2016) 400 U min^{-1}). Ähnliche Ergebnisse wurden bei der Blütenbonitur beobachtet. Auch hier fand sich der höchste Anteil visuell intakter Blüten in den Behandlungsstufen mit der geringsten Spindeldrehzahl (200 U min^{-1} (2015) und 240 U min^{-1} (2016)). Bei höheren Schädigungsgraden (Boniturstufen 2-5 (Blätter) bzw. 2-6 (Blüten)) war der Unterschied zwischen den einzelnen Behandlungsstufen nur sehr gering.

In der höchsten Schädigungsstufe (6 für Blätter und 7 für Blüten) zeigte sich im Vergleich zu Schädigungsstufe 1 ein umgekehrter Effekt. Hier war die Anzahl abgeschlagener Blüten- und Blattorgane in den Behandlungsstufen mit hoher Spindeldrehzahl am höchsten. 2015 wurden bei einer Spindeldrehzahl von 320 U min^{-1} 33 % der Blüten je Blütenbüschel in `Gala` und 22 % der Blüten je Blütenbüschel in `Elstar` abgeschlagen (14 % `Gala` und 16 % `Elstar` (240 U min^{-1})). Obwohl die Versuchsjahre 2015 und 2016 ähnliche Trends zeigten, wurden im Versuchsjahr 2016 deutlich mehr Blüten je Blütenbüschel abgeschlagen (50 % `Gala` und 41 % `Elstar` (320 U min^{-1})). In der Behandlungsstufe 400 U min^{-1} wurden sogar bis zu 60 % der Blüten in `Gala` und bis zu 48 % der Blüten in `Elstar` je Blütenbüschel abgeschlagen. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei den Blättern.

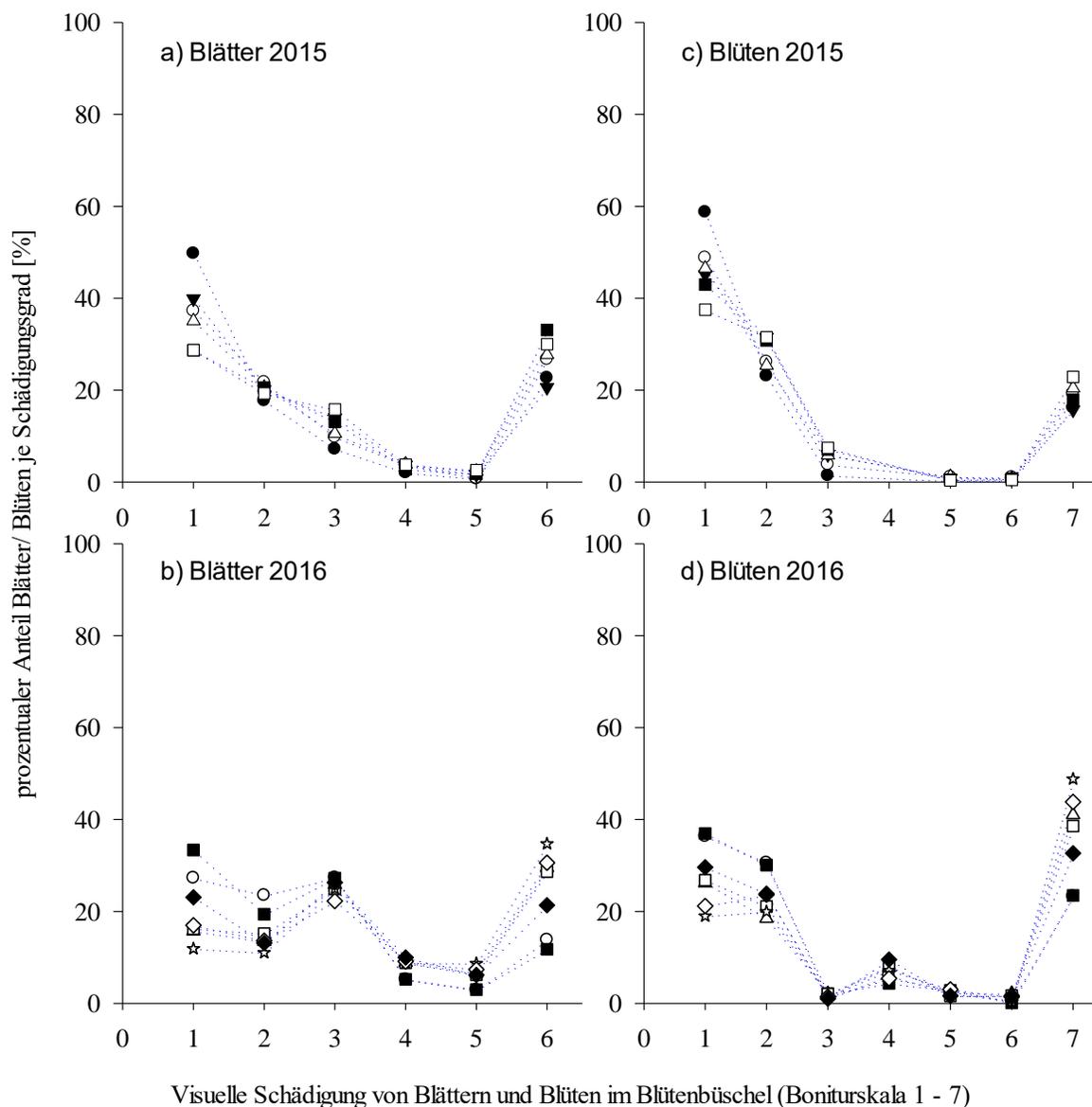


Abbildung 22. Durch die maschinelle Ausdünnung verursachte Schäden an Blätter und Blüten in Prozent [%] an der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufe in den Jahren 2015 und 2016. Datenerhebung erfolgte an 8 Blütenbüscheln je Versuchsbaum, 2015 in den Behandlungsstufen 200 U min^{-1} ●, 240 U min^{-1} ○, 280 U min^{-1} ▼, 320 U min^{-1} △, 240 U min^{-1} + Hand ■ und 320 U min^{-1} + Hand □. In 2016 in den Behandlungsstufen 240 U min^{-1} ○, 320 U min^{-1} △, 400 U min^{-1} ☆, 240 U min^{-1} + Hand ■, 320 U min^{-1} + Hand □, 320 U min^{-1} + Regalis ◇ und 320 U min^{-1} + Regalis + Hand ◆. Schädigungsgrad 1 entspricht keiner Beschädigung. Schädigungsgrad 6 bei Blättern und 7 bei Blüten entspricht einem vollständig abgeschlagenen Organ. Die nicht maschinell ausgedünnten Varianten wurden nicht in die Abbildung mit aufgenommen, da 100 % der Blätter und Blüten der Boniturstufe 1 zugeordnet werden konnten.

5.5.2. Auswirkungen auf Blüten- und Fruchtfall

Um die Auswirkungen des Schädigungsgrades der Blüten und Blätter auf den Blüten- und Fruchtfall beobachten zu können, wurden die Blüten bzw. Früchte der markierten Blütenbüschel zusätzlich zum Fruchtansatz und nach dem Junifruchtfall bonitiert.

Im Versuchsjahr 2015 lag der Prozentsatz abgefallener Blüten und Früchte in beiden Sorten bis Blüten-Schädigungsgrad 3 auf einem einheitlichen Niveau. Erst ab Blüten-Schädigungsgrad 5, nahm prozentual gesehen die Wahrscheinlichkeit zu, dass jene Blüten/ Früchte vom Baum abgeworfen wurden. Ab Blüten-Schädigungsgrad 6 entwickelte sich 2015 keine erntereife Frucht mehr aus diesen Blüten. Ein etwas anderer Trend zeigte sich 2016. Hier nahm die Wahrscheinlichkeit, dass eine entsprechende Blüte bzw. Frucht vom Baum abfallen wird bereits ab Blüten-Schädigungsgrad 2 zu. Ab einem Schädigungsgrad von 6 entwickelte sich auch im Jahr 2016 kaum eine erntereife Frucht aus diesen Blüten. In beiden Versuchsjahren konnte kein Unterschied zwischen den Blüten der unbehandelten Kontrolle und den Blüten mit dem Blüten-Schädigungsgrad 1 festgestellt werden.

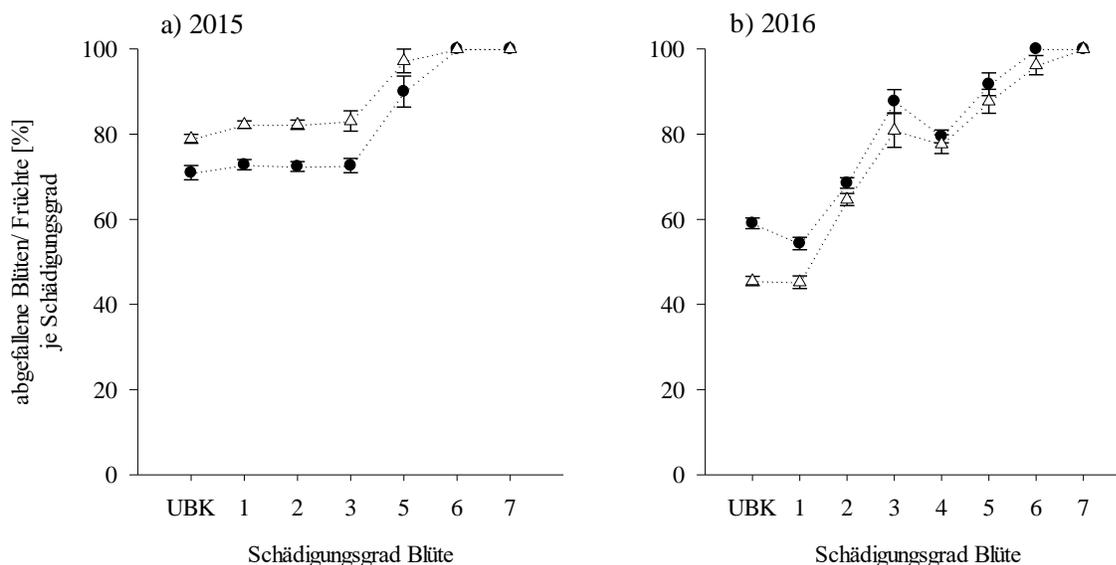


Abbildung 23. Anteil an Blüten und Früchten in Prozent [%], welche in Abhängigkeit ihrer durch die maschinelle Ausdünnung verursachten Verletzungen (dargestellt durch den Schädigungsgrad zur Blüte), während der Fruchtentwicklung bis hin zur Ernte vom Baum in den Versuchsjahren 2015 und 2016 abgefallen sind. (Gala` (Δ) und `Elstar` (●)). Fehlerindikatoren geben den Standardfehler wieder.

5.5.3. Reduktion und Schädigung der Primärblattfläche.

Aus den Messungen der Blattfläche ging hervor, dass die maschinelle Ausdünnung in beiden Versuchssorten zu einer signifikanten Reduktion der Primärblattfläche führte. Die Ergebnisse aus den Blattflächenmessungen sind in Tabelle 16 (‘Gala’) und 17 (‘Elstar’) dargestellt.

In der Entwicklung der Blattfläche zum Zeitpunkt der maschinellen Ausdünnung (BBCH 63) gibt es zwischen beiden Versuchsjahren 2015 und 2016, wie auch zwischen den Sorten, deutliche Unterschiede. So war die Primärblattfläche in beiden Sorten 2015 (\emptyset - 81,9 cm² je Blütenbüschel (‘Gala’)) deutlich weniger stark entwickelt im Vergleich zu 2016 (\emptyset – 107 cm² je Blütenbüschel (‘Gala’)). Generell zeigte sich in beiden Versuchsjahren, dass mit der Zunahme der Spindeldrehzahl die Reduktion der Blattmasse im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle signifikant zugenommen hat. 2015 konnten jedoch zwischen den Spindeldrehzahlen 200 bis 280 U min⁻¹ in ‘Elstar’ und 240 bis 320 U min⁻¹ in ‘Gala’ keine Unterschiede festgestellt werden. Hingegen konnte 2016 eine präzisere Abstufung zwischen den einzelnen Behandlungsstufen gemessen werden, woraus sich im Vergleich zu 2015 auch zwischen den Behandlungsstufen mit 240 U min⁻¹ und 320 U min⁻¹ signifikante Unterschiede ergaben. Allerdings führte die weitere Steigerung der Spindeldrehzahl bis auf 400 U min⁻¹ zu keiner weiteren Reduktion der primären Blattfläche je Blütenbüschel.

Tabelle 16. Primärblattfläche je Blütenbüschel [cm²] nach maschineller Ausdünnung bei der Sorte `Gala` in den Jahren 2015 und 2016 in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis. Primärblattfläche der Kontrolle entspricht 100 %.

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	2015		2016				
		Blattfläche [cm ²] je Blütenbüschel		Blattmasse [%]	Blattfläche [cm ²] je Blütenbüschel			Blattmasse [%]
1	200	67,9	± 6,03 b	82,8	-			
2	240	60,6	± 6,36 c	73,9	85,6	± 7,16 b		79,9
3	280	62,2	± 6,72 c	75,9	-			
4	320	62,8	± 5,73 c	76,6	72,6	± 12,82 c		67,8
5	UBK	81,9	± 6,00 a	100,0	107,2	± 12,70 a		100,0
6	240 + Hand	63,1	± 6,44 c	77,0	84,9	± 10,31 b		79,2
7	320 + Hand	63,6	± 6,35 c	77,7	67,4	± 10,68 c		62,9
8	UBK + Hand	82,7	± 6,93 a	101,0	107,4	± 11,85 a		100,2
12	400	-			68,8	± 12,06 c		64,2
13	320 + Regalis	-			74,6	± 10,07 bc		69,6
14	UBK + Regalis	-			107,2	± 13,94 a		100,0
15	320 + Regalis + Hand	-			70,3	± 9,28 c		65,6
16	UBK + Regalis + Hand	-			106,7	± 13,40 a		99,5
GD		3,61			11,16			
Signifikanz		***			***			

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

Tabelle 17. Primärblattfläche je Blütenbüschel [cm²] nach maschineller Ausdünnung in der Sorte `Elstar` in den Jahren 2015 und 2016 in den Behandlungsstufen UBK, UBK + Hand, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹+ Regalis und UBK + Regalis. Primärblattfläche der Kontrolle entspricht 100 %.

VAR	Behandlungsstufe [U min ⁻¹]	2015		2016	
		Blattfläche [cm ²] je Blütenbüschel	Blattmasse [%]	Blattfläche [cm ²] je Blütenbüschel	Blattmasse [%]
1	200	37,1 ± 2,77 b	79,4	-	
2	240	36,2 ± 3,46 b	77,4	59,4 ± 3,69 b	81,1
3	280	35,9 ± 2,39 b	76,9	-	
4	320	36,0 ± 3,00 b	76,6	47,6 ± 7,49 c	64,9
5	UBK	46,7 ± 6,52 a	100	73,2 ± 3,95 a	100,0
6	240 + Hand	34,3 ± 3,68 bc	73,4	58,9 ± 5,90 b	80,5
7	320 + Hand	32,7 ± 3,77 c	70,2	50,4 ± 7,60 c	68,9
8	UBK + Hand	48,6 ± 4,90 a	104,1	73,1 ± 5,45 a	99,9
12	400	-		47,0 ± 9,46 c	64,1
13	320 + Regalis	-		48,0 ± 9,19 c	65,6
14	UBK + Regalis	-		72,9 ± 7,42 a	99,6
5	320 + Regalis + Hand	-		52,9 ± 7,27 c	72,3
16	UBK + Regalis + Hand	-		73,7 ± 5,60 a	100,7
GD		3,62		6,67	
Signifikanz		***		***	

n.s. = nicht signifikant $P > 0,05$; * = $P \leq 0,05$; ** = $P \leq 0,01$; *** = $P \leq 0,001$

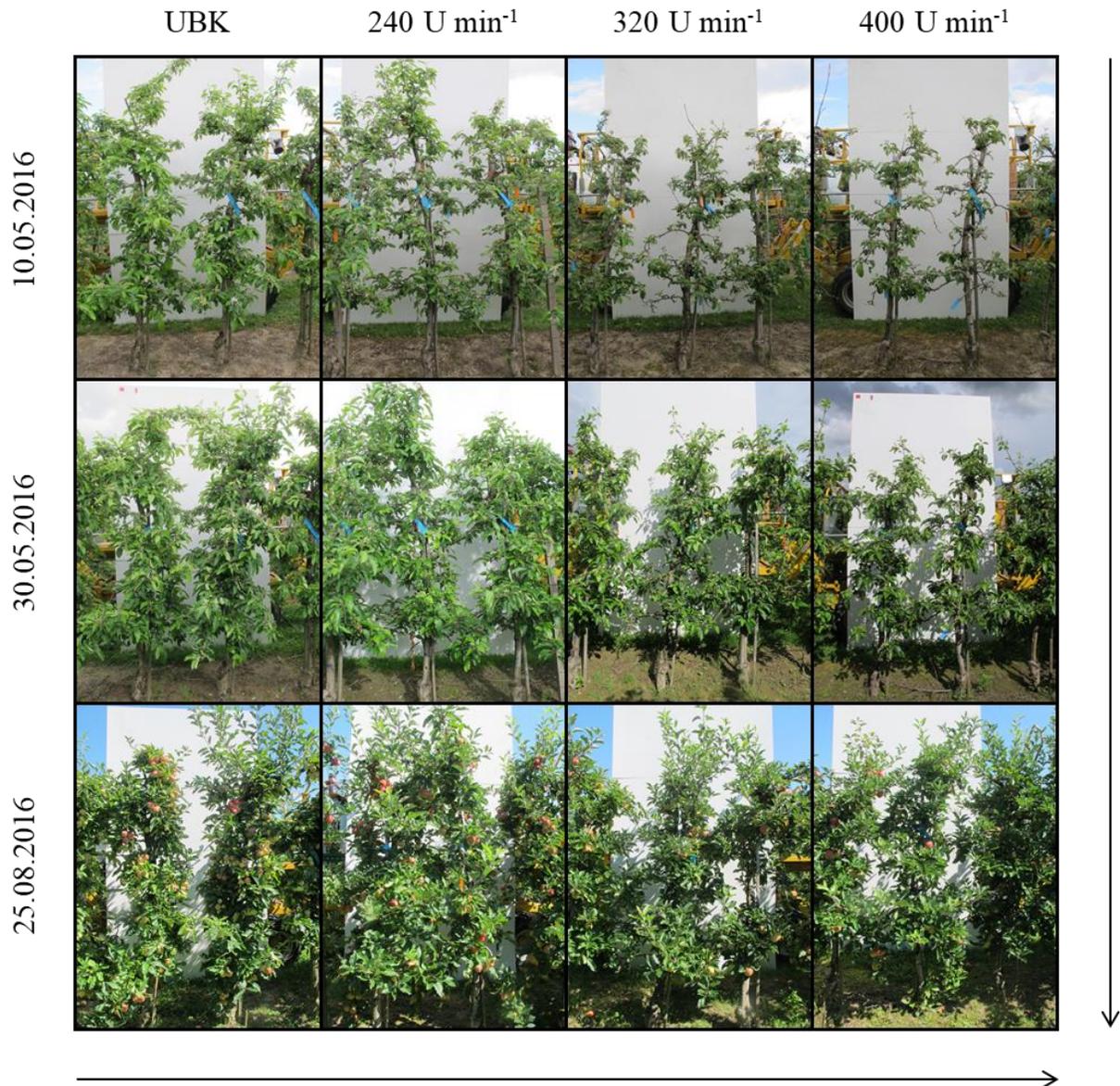


Abbildung 24. Entwicklung der Blattfläche 2016 an den Versuchsbäumen der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Zeit (10.05.2016; 30.05.2016; 25.08.2016) und der Ausdünnungsintensität in den Behandlungsstufen unbehandelte Kontrolle (UBK), 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ und 400 U min⁻¹.

Zusätzlich zu den durchgeführten Blattflächenmessungen im direkten Anschluss zur maschinellen Ausdünnung, wurde 2016 auch die Entwicklung der Blattfläche über die Vegetationszeit per Kamera (2 D Bild) festgehalten. Anhand dieser Aufnahmen konnten optische Unterschiede in der Entwicklung der Blattflächen über die Vegetationsperiode hinweg dokumentiert werden. So zeigten sich in beiden Sorten 13 Tage nach der maschinellen Ausdünnung deutliche Unterschiede in der Blattflächenentwicklung zwischen den verschiedenen Spindeldrehzahlen (Abbildung 24

(`Gala`) und 25 (`Elstar`)). 20 Tage später (30.05.2016) ist nur noch die Blattflächenentwicklung der Behandlungsstufen 320 und 400 U min^{-1} im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle bzw. zur Behandlungsstufe 240 U min^{-1} weiter rückständig. Weitere Beobachtungen zeigten, dass sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungsstufen verwachsen, sodass bis vor der Ernte 25.08.2016 keine Unterschiede mehr zu erkennen waren.

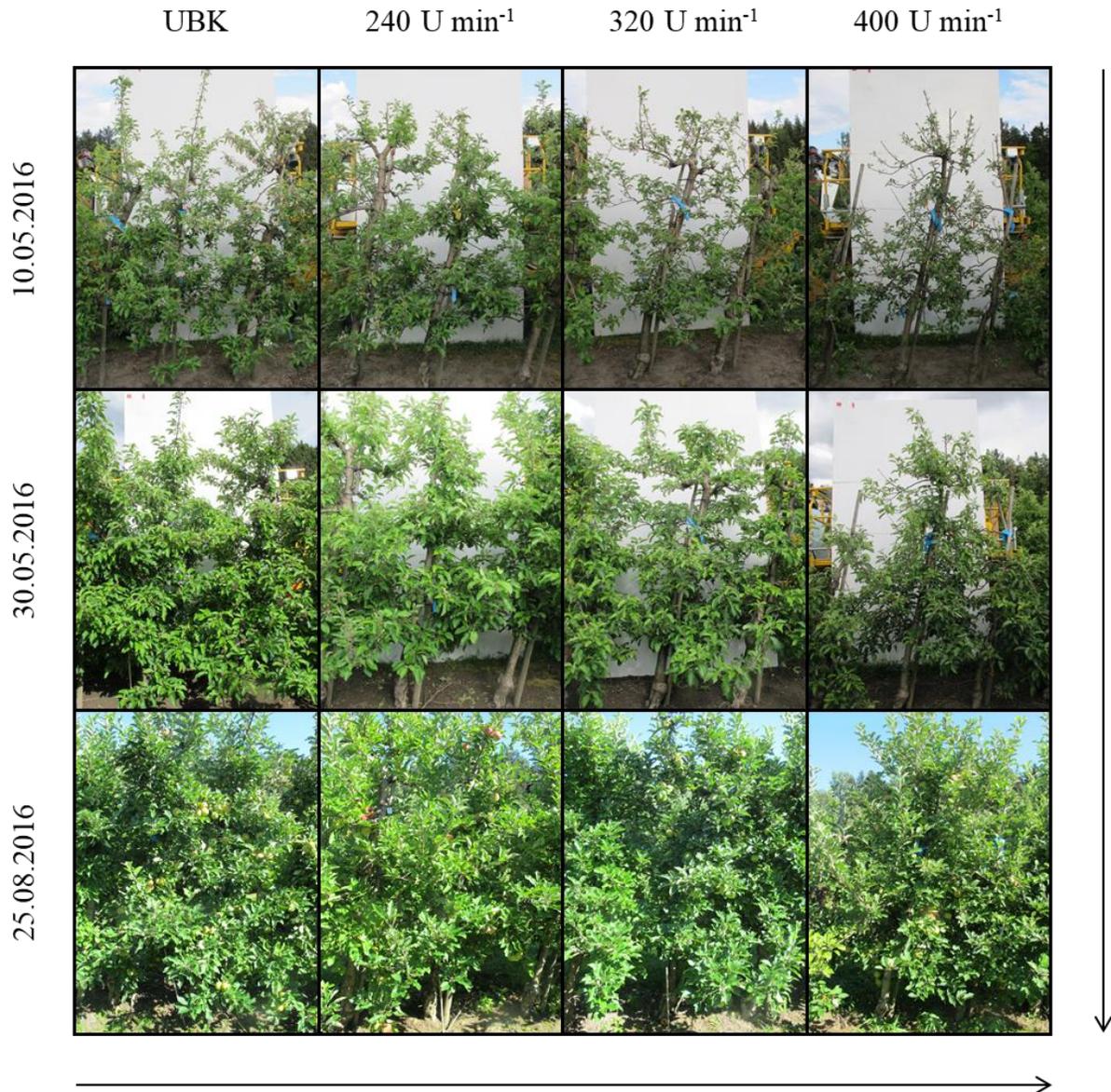


Abbildung 25. Entwicklung der Blattfläche 2016 an den Versuchsbäumen der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Zeit (10.05.2016; 30.05.2016; 25.08.2016) und der Ausdünnungsintensität in den Behandlungsstufen unbehandelte Kontrolle (UBK), 240 U min^{-1} , 320 U min^{-1} und 400 U min^{-1} .

5.6. Blüten- und Fruchtfall

5.6.1. Nachblütefall

Der Nachblütefall definiert die Anzahl an Blüten je Baum aus denen sich keine Frucht entwickeln konnte und welche im Zuge dessen vom Baum abfallen. Die Intensität des Nachblütefalls wurde hier in den Versuchen anhand der baumspezifischen Blüten- und Fruchtzählungen ermittelt. Durch die maschinelle Ausdünnung wurde bereits vor dem Einsetzen des Nachblütefalls in einigen Behandlungsstufen die Anzahl Blüten je Baum reduziert. Da die Anzahl Blüten einen Einfluss auf die Intensität des Nachblütefalls haben kann, wurde zusätzlich zur absoluten eine prozentuale Betrachtung jenes Nachblütefalls hinzugezogen (Abbildung 26). Dies lässt sich an einem Beispiel erläutern. Von einem Baum A mit 1000 Blüten werden 200 Blüten und von einem Baum B mit 100 Blüten werden 20 abgeworfen. Betrachtet man die absoluten Zahlen dann gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen Baum A und B von 180 abgeworfenen Blüten. Berücksichtigt man die unterschiedliche Ausgangssituation dann ergibt sich, dass von beiden Bäumen jeweils genau 20 % der Blüten abgeworfen wurden. Die jeweilige Betrachtungsweise ist dabei je nach Fragestellung zu wählen.

Beim Vergleich der beiden Versuchsjahre konnte in beiden Versuchsorten festgestellt werden, dass der Nachblütefall 2015 deutlich stärker ausfiel als 2016. Interessanterweise zeigte sich dieser Jahreseffekt sortentypisch konstant über alle Behandlungsstufen hinweg. 2016 fielen in `Gala` durchschnittlich 15 % weniger Blüten vom Baum als 2015. In `Elstar` fiel der Nachblütefall 2016 sogar um 20 % geringer aus als 2015. Dies entspricht ungefähr einer Differenz von 300 Blüten.

Zusätzlich zum Jahreseffekt zeigten die Ergebnisse aus den beiden Versuchsjahren eine signifikante Abnahme der Anzahl abgefallener Blüten mit der Zunahme der Spindeldrehzahl, über beide Sorten hinweg. So fielen am Beispiel `Gala` 2016 in der unbehandelten Kontrolle plus Regalis-Behandlung im Durchschnitt 683 Blüten vom Baum, dagegen in der Behandlungsstufe 400 U min⁻¹ nur durchschnittlich 253 Blüten. Dies entspricht, unter Berücksichtigung der potentiellen Anzahl an Blüten, aus denen sich eine Frucht entwickeln hätte können, einem Blütenabwurf von 58 % in der unbehandelten Kontrolle und von 55 % in der Behandlungsstufe 400 U min⁻¹.

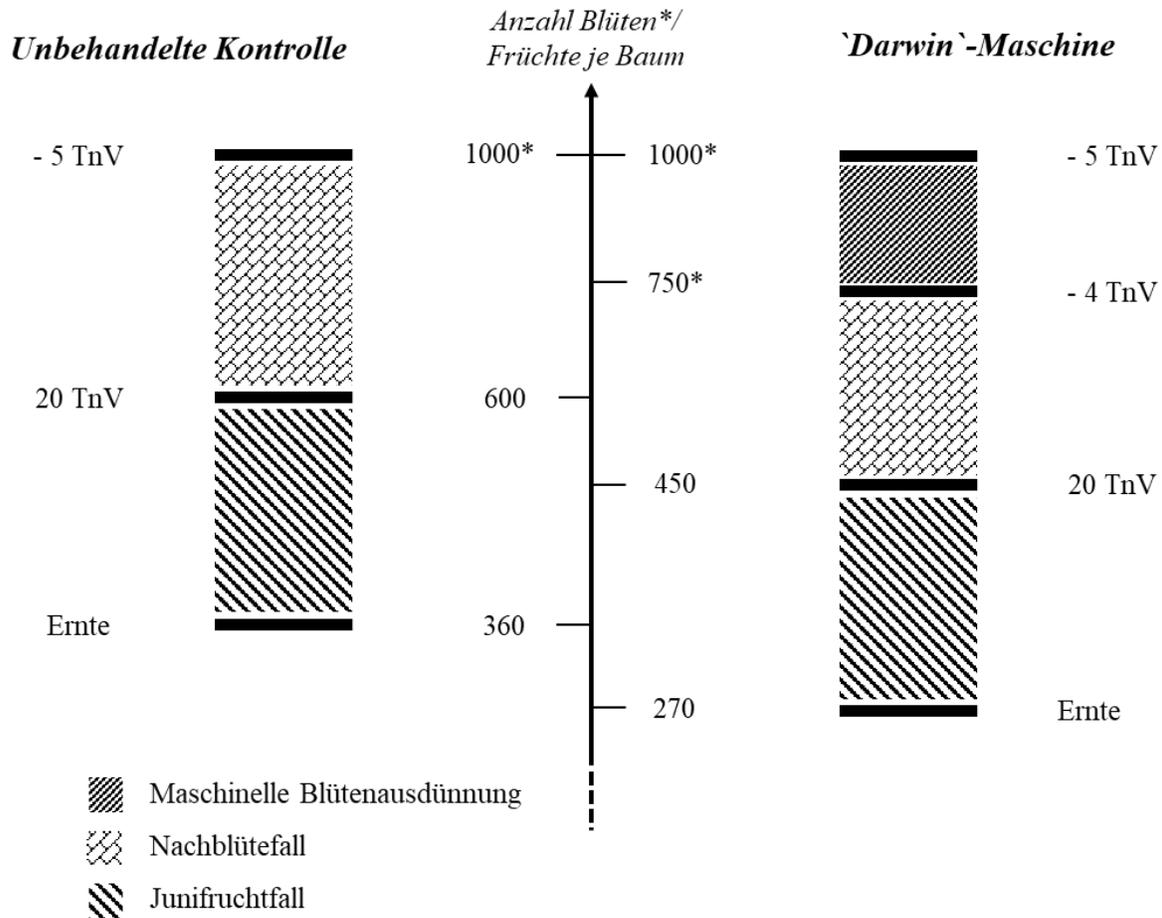


Abbildung 26. Schematischer Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Fruchtbehangs am Baum zwischen der unbehandelten Kontrolle und der mit der 'Darwin'-Maschine ausgedünnten Behandlungen.

Vergleicht man die beiden Sorten miteinander, dann fielen 2016 nur im 'Elstar'-Versuch, in der Behandlungsstufe 320 U min⁻¹ + Regalis mit durchschnittlich 215 Blüten (33 %), weniger Blüten vom Baum. Während bei der Sorte 'Gala' kein Effekt von Regalis beobachtet werden konnte, so führte die Regalis-Behandlung bei 'Elstar' insgesamt zu einer Reduktion des Nachblütelfalls.

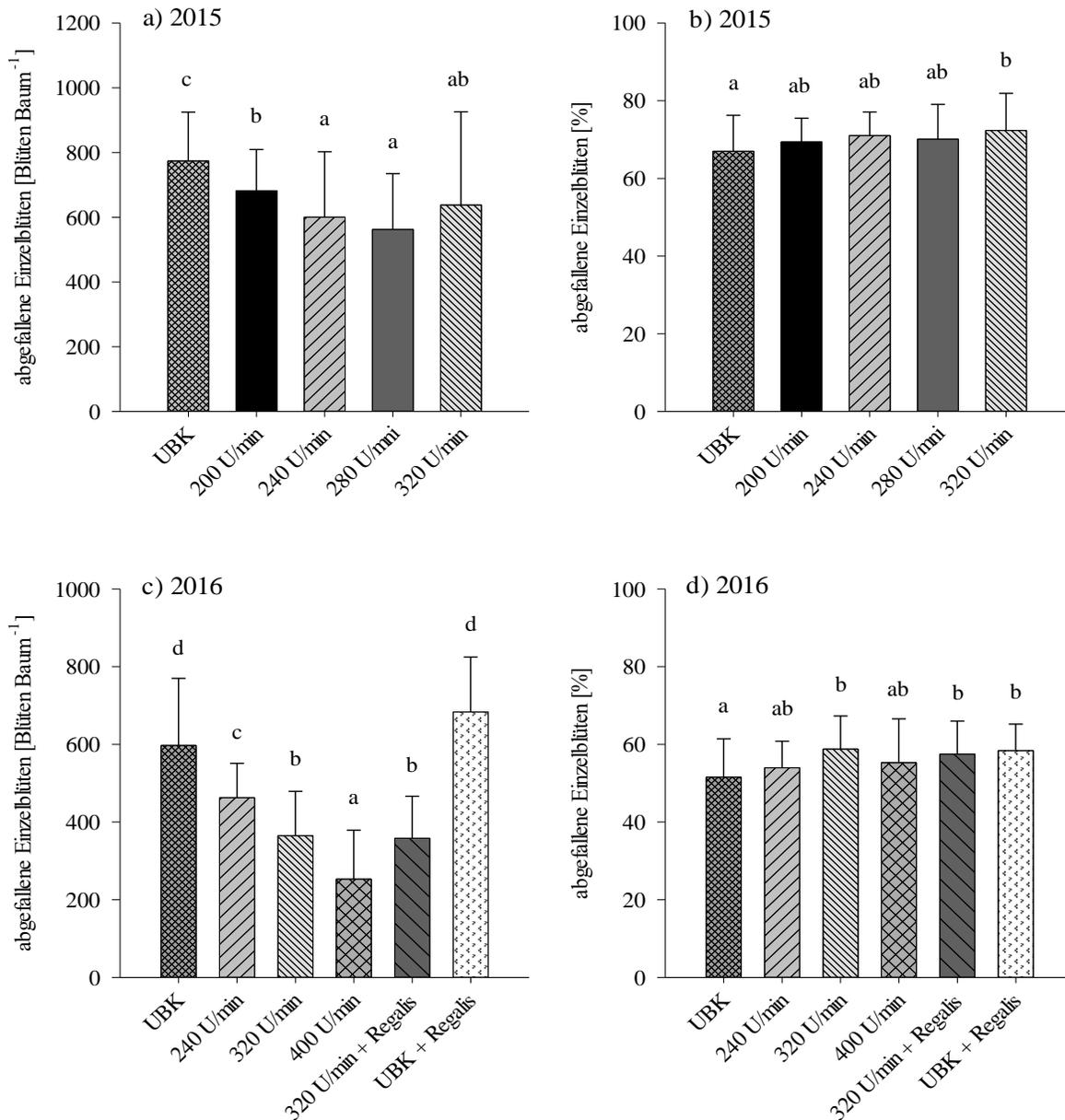


Abbildung 27. Anzahl [Blüten Baum⁻¹] bzw. Prozent [%] abgefallener Einzelblüten vor dem Fruchtansatz (Nachblütefall) der Sorte `Gala` über die Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis im Zeitraum 2015 ((a) und (b)) und 2016 ((c) und (d)). In Abbildung (a) und (c) sind die berechneten Daten aus den Zählungen dargestellt. In Abbildung (b) und (d) ist der prozentuale Anteil abgefallener Blüten nach der maschinellen Ausdünnung dargestellt. Als Berechnungsgrundlage dienten die Blüten- und Fruchtzählungen nach der maschinellen Ausdünnung und zum Fruchtansatz. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

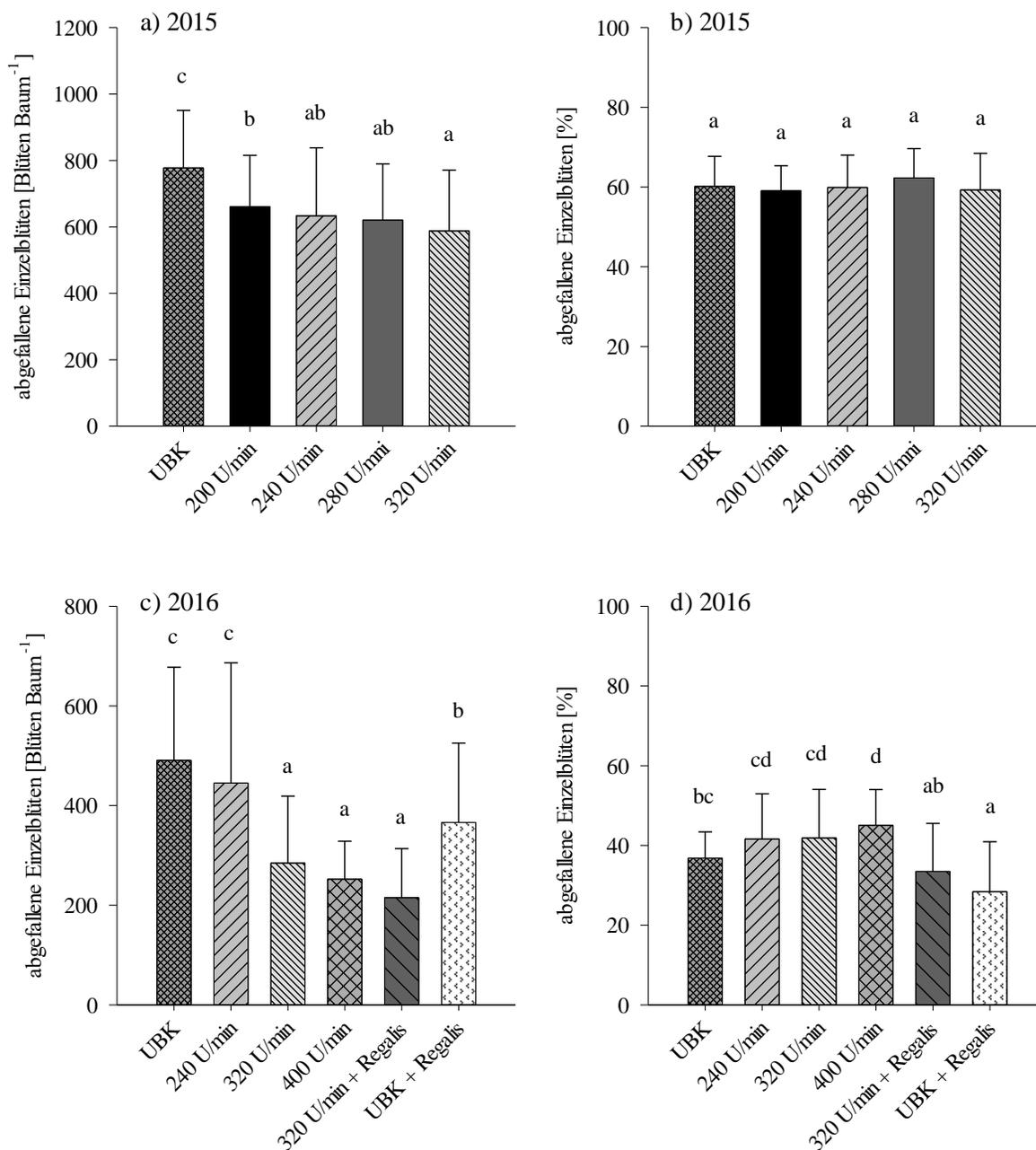


Abbildung 28. Anzahl [Blüten Baum⁻¹] bzw. Prozent [%] abgefallener Einzelblüten vor dem Fruchtansatz (Nachblütefall) der Sorte `Elstar` über die Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis im Zeitraum 2015 ((a) und (b)) und 2016 ((c) und (d)). In Abbildung (a) und (c) sind die berechneten Daten aus den Zählungen dargestellt. In Abbildung (b) und (d) ist der prozentuale Anteil abgefallener Blüten nach der maschinellen Ausdünnung dargestellt. Als Berechnungsgrundlage dienten die Blüten- und Fruchtzählungen nach der maschinellen Ausdünnung und zum Fruchtansatz. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

5.6.2. Junifruchtfall

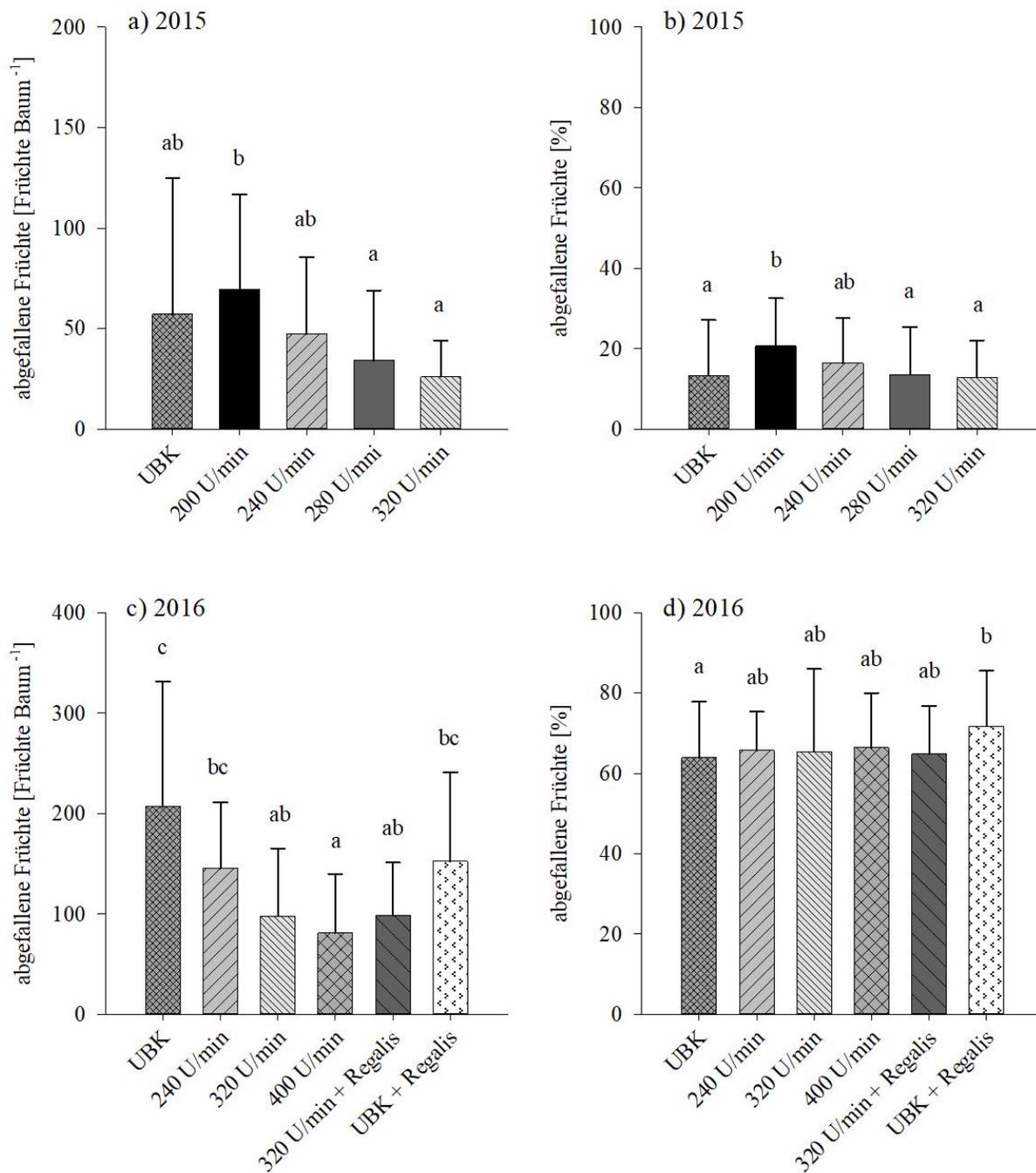


Abbildung 29. Junifruchtfall in den Jahren 2015 und 2016 der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. Die absolute Anzahl abgefallener Früchte ist in (a) und (c) und der prozentuale Anteil abgefallener Früchte (b) und (d) dargestellt. Als Berechnungsgrundlage diente die Zählung der Früchte zum Fruchtansatz und zur Ernte. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

Der Junifruchtfall bezeichnet diejenigen Früchte, welche während der Fruchtentwicklung vom Baum abgeworfen werden. Auch hier kann wie beim Nachblütefall je nach Fragestellung zwischen einer absoluten und oder prozentualen Betrachtungsweise gewählt werden.

Beim Vergleich der beiden Versuchsjahre zeigten sich deutliche Unterschiede, sowohl in der Intensität als auch zwischen den Sorten. In `Gala` fielen über alle Behandlungsstufen hinweg 2016 (Ø 66 %) deutlich mehr Früchte vom Baum als in 2015 (Ø 15 %). Hierbei gilt zu beachten, dass der Junifruchtfall 2015 im Allgemeinen sehr gering ausgefallen war. Im Gegensatz zu `Gala` war ein Jahreseffekt in `Elstar` nur bedingt zu sehen. Zwar fielen 2016 in der unbehandelten Kontrolle etwa doppelt so viele Früchte vom Baum im Vergleich zu 2015, allerdings konnten dagegen keine Unterschiede für die Behandlungsstufe 320 U min⁻¹ gezählt werden. Interessanterweise lag dabei in `Elstar` die Intensität des Junifruchtfalls in beiden Jahren, unabhängig der Behandlungsstufe, mit durchschnittlich 60,6 % (2015) bzw. 62,5 % (2016) abgeworfener Früchte ungefähr auf gleichem Niveau.

Innerhalb der Versuchsjahre konnte wie beim Nachblütefall festgestellt werden, dass mit der Zunahme der Ausdünnintensität die absolute Anzahl abgefallener Früchte signifikant abnahm. Dieser Effekt war in beiden Sorten 2016 deutlicher ausgeprägt als 2015. Wird dabei die unterschiedliche Anzahl Früchte nach dem Fruchtansatz berücksichtigt lagen die Behandlungsstufen auf einem einheitlichen, dem Versuchsjahr entsprechenden, Niveau. Beeinflussung des Junifruchtfalls durch die Regalis-Behandlungen konnte in beiden Sorten nicht festgestellt werden.

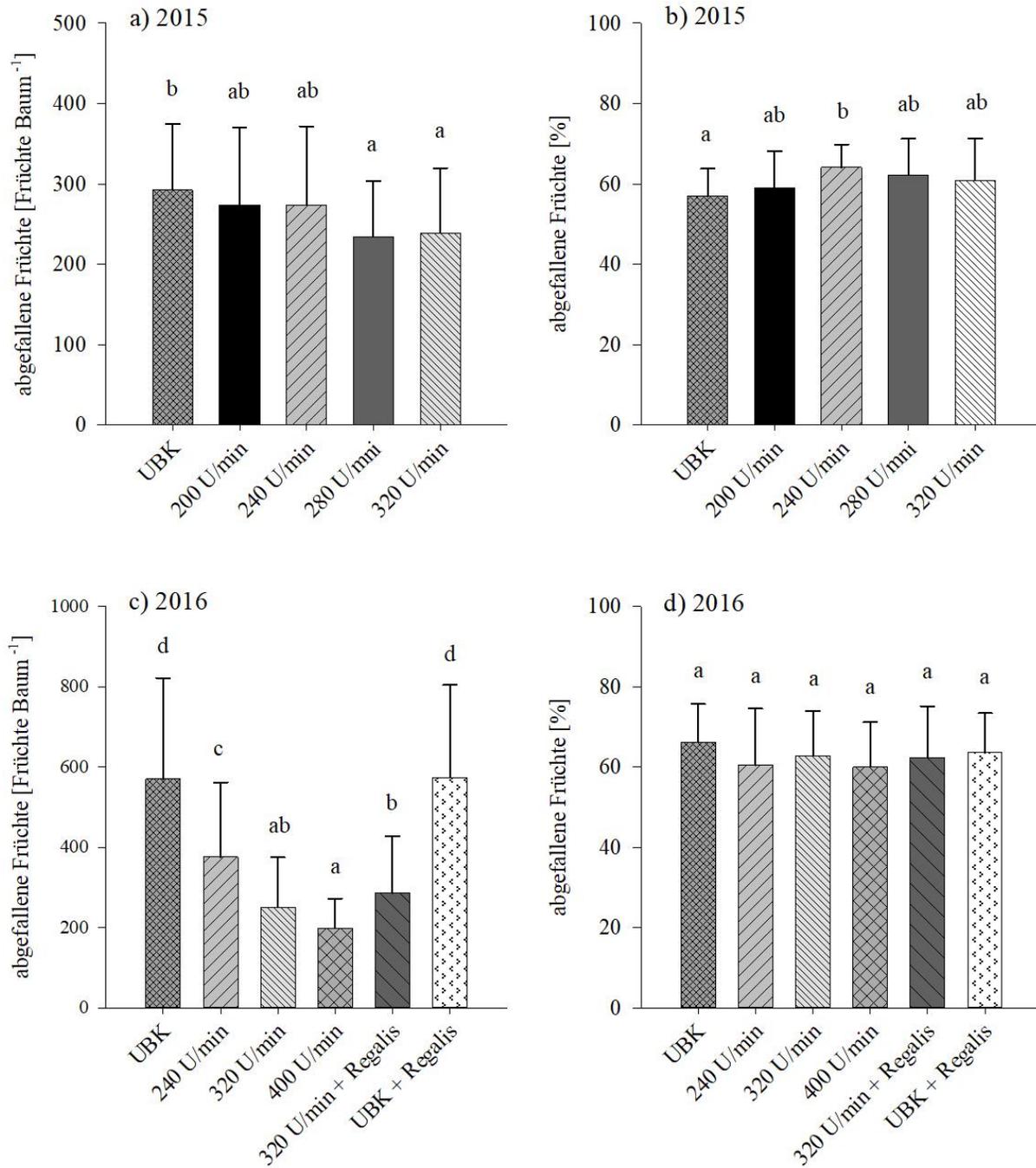


Abbildung 30. Junifruchtfall in den Jahren 2015 und 2016 der Sorte 'Elstar' in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. Die absolute Anzahl abgefallener Früchte ist in (a) und (c) und der prozentuale Anteil abgefallener Früchte (b) und (d) dargestellt. Als Berechnungsgrundlage diente die Zählung der Früchte zum Fruchtansatz und zur Ernte. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

5.7. Triebwachstum

5.7.1. Manuelle Messungen

In den Versuchsjahren 2015 und 2016 wurde an jedem Versuchsbaum der gesamtjährige Triebzuwachs mit einem Zollstock gemessen. Anhand dieser Ergebnisse konnten die durchschnittliche Trieblänge und die Anzahl der Neutriebe größer 1 cm berechnet werden.

Über beide Versuchsjahre hinweg zeigten die Versuchs bäume aller Behandlungsstufen ohne maschinelle Ausdünnung ein geringeren saisonalen Gesamtriebzuwachs als die entsprechenden Behandlungsstufen in denen maschinell ausgedünnt wurde (Abbildung 31 (`Gala`)) und 32 (`Elstar`)). Zudem zeigte sich auch hier, dass mit der Zunahme der Spindeldrehzahl (Ausdünnintensität) in der Regel auch der Gesamtwuchs der Versuchs bäume zugenommen hat.

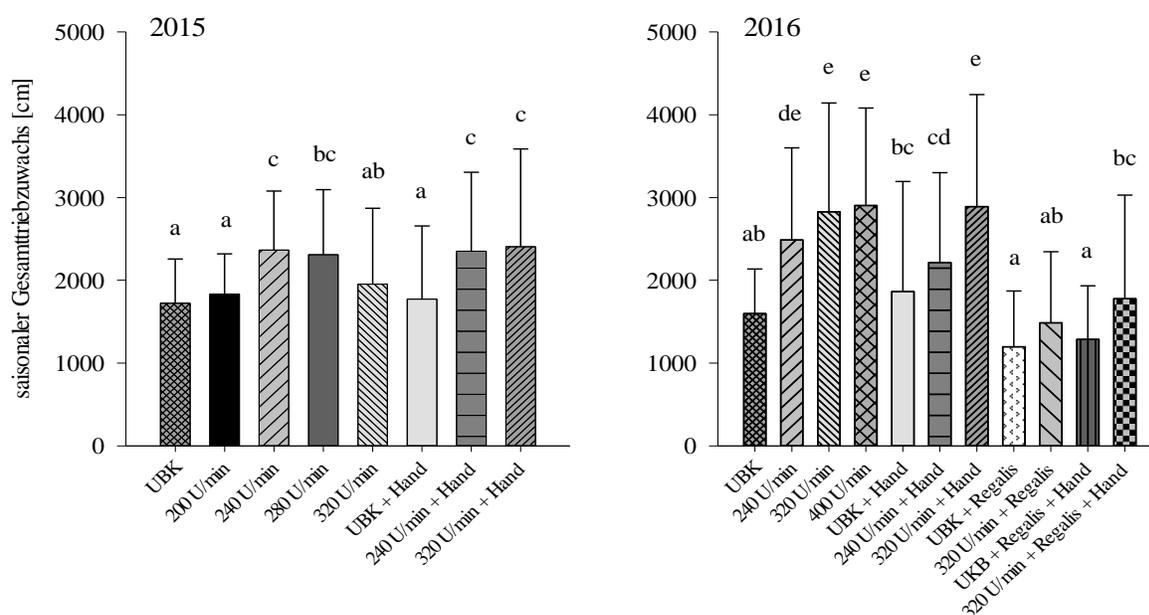


Abbildung 31. Saisonaler Gesamtriebzuwachs pro Baum in Zentimeter [cm] in den Jahren 2015 (links) und 2016 (rechts) der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

Diese beiden Effekte konnten auch mit Ausnahme `Elstar` 2015 in den Behandlungsstufen mit Handausdünnung gemessen werden, in denen gezielt der Fruchtbehang auf ein gleiches Niveau

eingestellt wurde. Zudem führte interessanterweise die Handausdünnung, nur 2016 in der unbehandelten Kontrolle der Sorte `Gala` zu einem tendenziell höheren saisonalen Gesamtriebzuwachs pro Baum. In allen anderen Fällen führte die Handausdünnung und die damit verbundene zusätzliche Reduktion des Fruchtbehanges im Juni/ Juli nicht zu einer Erhöhung des saisonalen Gesamtriebzuwachses der Versuchsbäume bezogen auf die entsprechende vergleichbare Behandlungsstufe.

Durch die zweifache Applikation von Regalis konnte gegenüber den anderen Behandlungsstufen 2016 eine signifikante Reduktion des saisonalen Gesamtriebzuwachses an jenen Versuchsbäume gemessen werden. In Folge dessen konnte das Triebwachstum und dem entsprechend der saisonale Gesamtriebzuwachs in beiden Sorten, auch trotz maschineller Ausdünnung, mindestens auf das Niveau der unbehandelten Kontrolle reduziert werden. Im Schnitt fiel dabei der saisonale Gesamtriebzuwachs je Baum um bis zu 90 % in `Gala` und um bis zu 60 % in `Elstar` geringer aus.

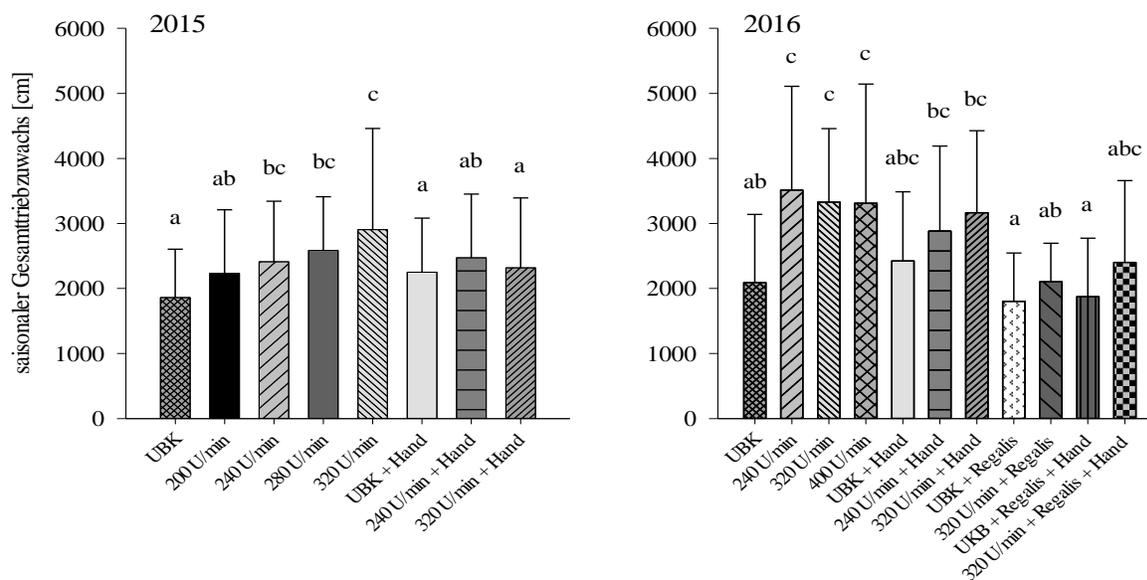


Abbildung 32. Saisonaler Gesamtriebzuwachs pro Baum in Zentimeter [cm] in den Jahren 2015 (links) und 2016 (rechts) der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

Der saisonale Gesamttriebzuwachs pro Baum ist eine Funktion aus durchschnittlicher Trieblänge multipliziert mit der Anzahl an Neutrieben. Beide Kriterien sind in den Abbildungen 33 (`Gala`) und 34 (`Elstar`) dargestellt.

Dabei zeigten die Ergebnisse, dass die maschinelle Ausdünnung, auch in Kombination mit der Handausdünnung, in `Elstar` 2015 und 2016, sowie 2015 in `Gala` zu einer Zunahme der durchschnittlichen Trieblänge führt. Nur in den Regalis-Behandlungen konnte dieser Effekt nicht gemessen werden. Dort zeigte sich 2016 unabhängig der Sorte und Behandlungsstufe eine signifikante Abnahme der durchschnittlichen Trieblänge.

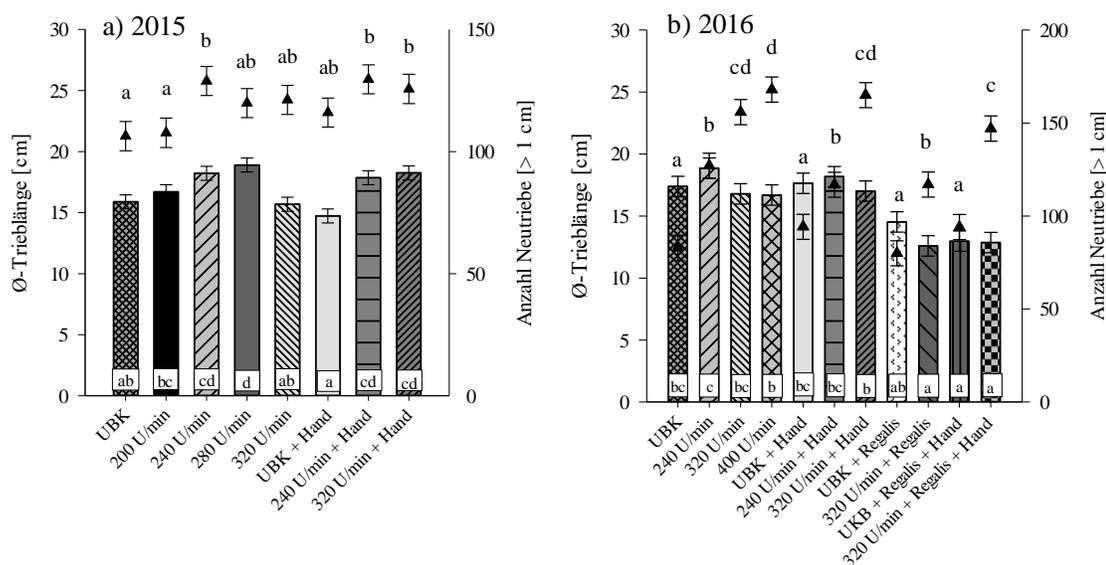


Abbildung 33. Durchschnittliche Trieblänge in Zentimetern [cm] (Balken) und Anzahl der Neutriebe größer 1 cm (Dreiecke) in den Versuchsjahren 2015 und 2016 in der Sorte `Gala` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder; p ≤ 0,05).

Die Versuchsergebnisse zeigten ebenfalls eine Zunahme der Neutriebe größer 1 cm in den Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Eine zusätzliche Steigerung der Triebanzahl durch eine zur maschinellen Blütenausdünnung ergänzende Handausdünnung konnte nicht ermittelt werden. Besonders im Jahr 2016 konnte eine deutliche Zunahme der Anzahl Neutriebe in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl gemessen werden. Interessanterweise konnte dieser Effekt auch in den Behandlungsstufen mit Regalis-Behandlung beobachtet werden.

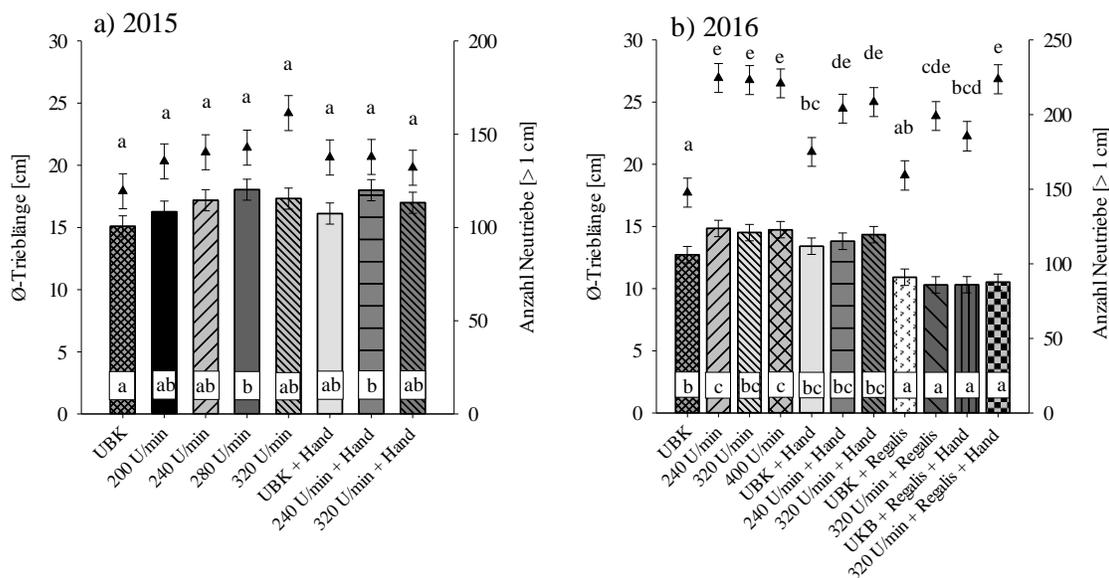


Abbildung 34. Durchschnittliche Triebblänge in Zentimetern [cm] (Balken) und Anzahl der Neutriebe größer 1 cm (Dreiecke) in den Versuchsjahren 2015 und 2016 in der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. (Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder; p = ≤ 0,05).

5.7.2. Auxin-Messungen

Zusätzlich zu den Triebmessungen wurden 2015 und 2016 Auxin-Analysen (Indol-3-Essigsäure (IAA)) an Triebspitzen durchgeführt. Hierfür wurden zu je zwei Terminen ganze Fruchtstände vom Baum entnommen und die Triebspitzen und weitere Parameter (Blattfläche, Triebblänge, Anzahlfrüchte) anschließend im Labor analysiert.

Beim Vergleich der beiden Versuchsjahre, konnte 2016 in beiden Sorten ein um ein Vielfaches höher IAA-Export als 2015 gemessen werden. In der Sorte `Gala` (Abbildung 35) konnte 2015 zu beiden Terminen, ein signifikant höherer IAA-Export aus den Triebspitzen der maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen gemessen werden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. 2016 konnten dagegen keine statistisch abgesicherten Unterschiede zwischen der maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen und der unbehandelten Kontrolle festgestellt werden. Lediglich die unbehandelte Kontrolle plus Regalis-Behandlung zeigte zum 17.05 einen geringeren IAA-Export als die Behandlungsstufen 240 U min⁻¹ und 320 U min⁻¹ und zum 30.05 einen signifikanten

geringeren IAA-Export als die Behandlungsstufe 320 U min⁻¹. Generell führten die Regalis-Behandlungen in `Gala` zu einer tendenziellen Reduktion des IAA-Exports aus den Triebspitzen.

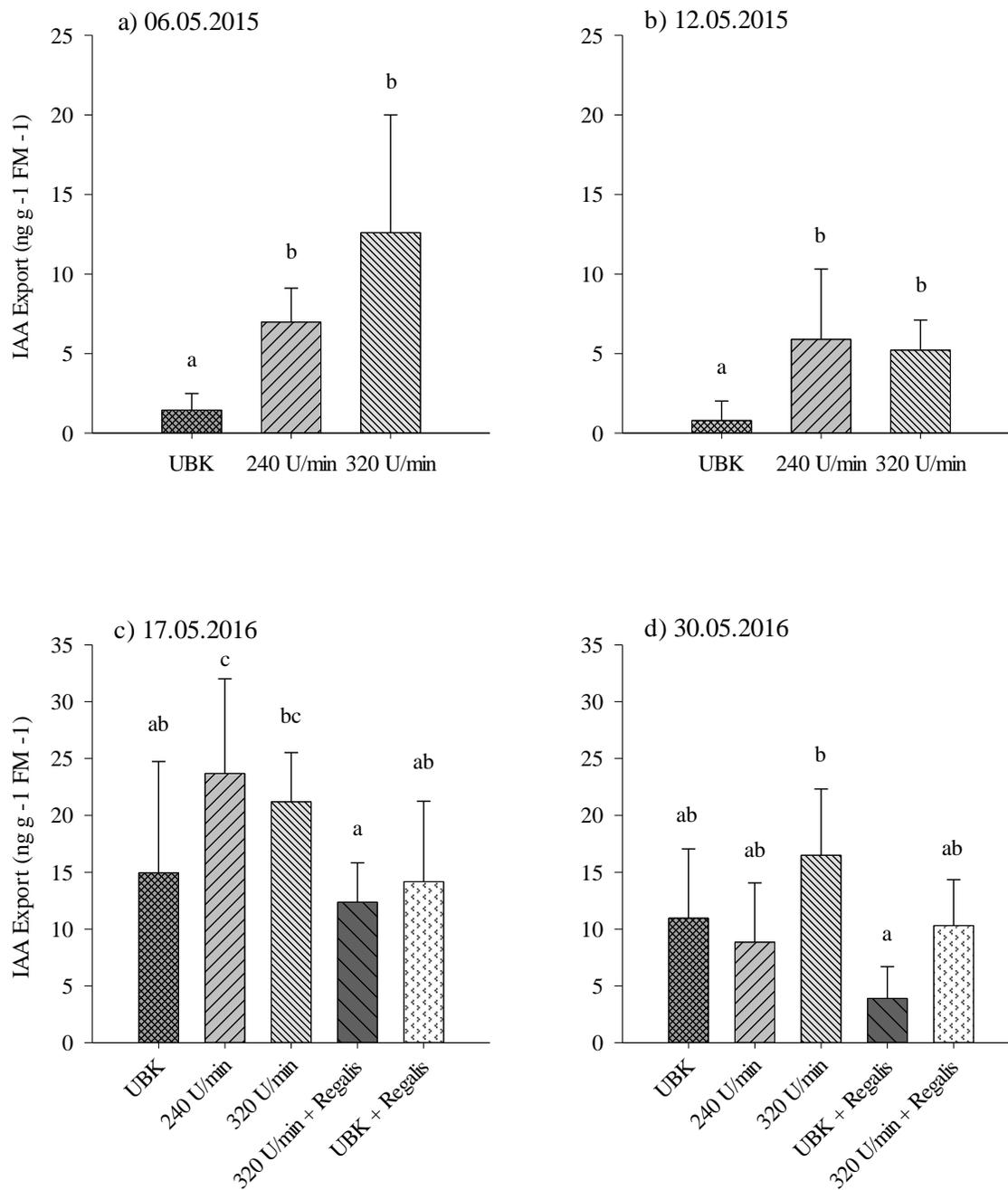


Abbildung 35. Export von Indol-3-Essigsäure (IAA) in Nanogramm je Gramm Frischmasse [ng g⁻¹ FM⁻¹] aus den Triebspitzen der Sorte `Gala` zu den entsprechenden Analyseterminen in den Versuchsjahren 2015 und 2016 und in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p \leq 0,05$).

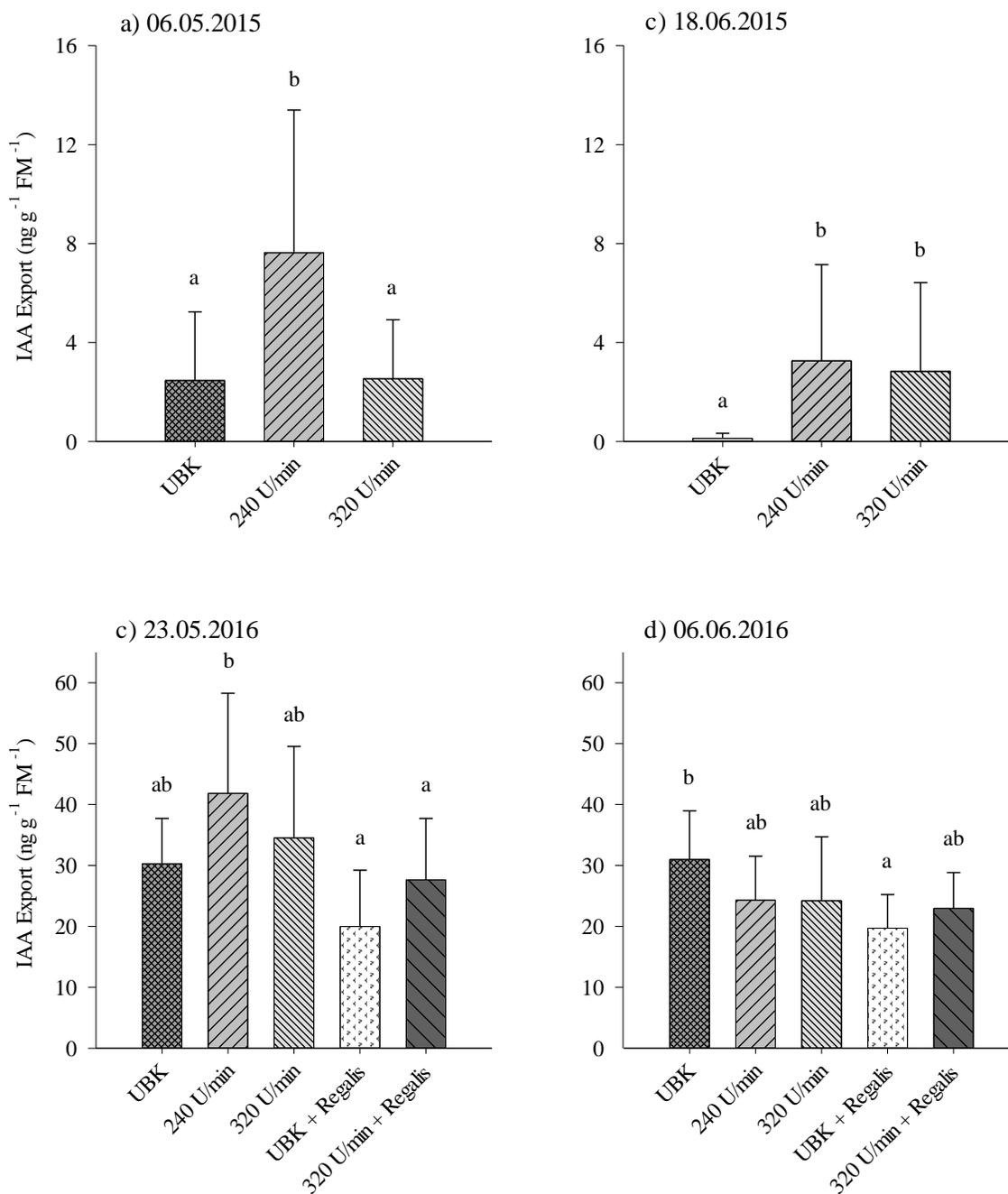


Abbildung 36. Export von Indol-3-Essigsäure (IAA) in Nanogramm je Gramm Frischmasse [ng g⁻¹ FM⁻¹] aus den Triebspitzen der Sorte `Elstar` zu den entsprechenden Analyseterminen in den Versuchsjahren 2015 und 2016 und in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 240 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis und UBK + Regalis. (Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder; $p = \leq 0,05$).

2015 konnte in `Elstar` (Abbildung 36) zum ersten Analysetermin 06.05.2015 ein signifikant höherer IAA-Export aus den Triebspitzen der Behandlungsstufe 240 U min⁻¹ gemessen werden im

Vergleich zur unbehandelten Kontrolle und zur Behandlungsstufe 320 U min⁻¹. Zum zweiten Analysetermin am 18.06 konnte dann ein höherer IAA-Export aus den maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen gemessen werden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. 2016 wurden zu beiden Analysetermin in den mit Regalis behandelten Behandlungsstufen, auch in Kombination mit der Ausdünnmaschine, ein tendenziell geringerer IAA-Export gemessen im Vergleich zu den entsprechenden vergleichbaren Behandlungsstufen. Zur ersten Analysetermin am 23.05 zeigten die maschinell Ausgedünnten Behandlungsstufen ohne Regalis-Behandlung den höchsten IAA-Export. Zum zweiten Analysetermin lag der gemessene IAA-Export aus den Triebspitzen der unbehandelten Kontrolle mit einem Wert von 30,9 ng g⁻¹ FM⁻¹ über denen der maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen.

5.8. Alternanz und Nachfolgeblüte

Das entscheidende Kriterium zur Beurteilung von Alternanzerscheinungen ist die Nachfolgeblüte der Versuchsbäume im Frühjahr des Folgejahres. Die Bonitur der Wiederblüte, gekennzeichnet anhand der Blühstärke eines Baumes, erfolgte mit Hilfe einer Bonitur-Skala von 1 bis 9. Hieraus ergaben sich für die Versuchsbäume folgende Ergebnisse (Abbildung 37).

In der Sorte `Gala` wurde die Blühstärke der Bäume im Folgejahr deutlich höher eingestuft als in der Sorte `Elstar`. Dabei führte die maschinelle Ausdünnung in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl und der damit verbundene Ausdünnungseffekt zu einer stärkeren Wiederblüte bei `Gala`. Dieser Effekt wurde durch die Handausdünnung weiter verstärkt. Interessanterweise war in beiden Sorten die Wiederblüte in der Behandlungsstufe, in der nur eine Handausdünnung erfolgte (UBK + Hand) 2016 und 2017 genauso gut wie die entsprechende Behandlungsstufen mit der maschinellen Ausdünnung.

In `Elstar` war die Nachfolgeblüte über alle 3 Versuchsjahre hinweg sehr gering und lag in der Regel im Schnitt nicht höher als Stufe 2 (2015 und 2016) und Stufe 3 (2017). Hier konnte vor allem 2017 ein positiver Effekt in den Behandlungsstufen mit Handausdünnung verzeichnet werden, allerdings war dieser bei weitem nicht ausreichend zur Vermeidung von Alternanzerscheinungen und dem damit verbundenen Ertragsausfall.

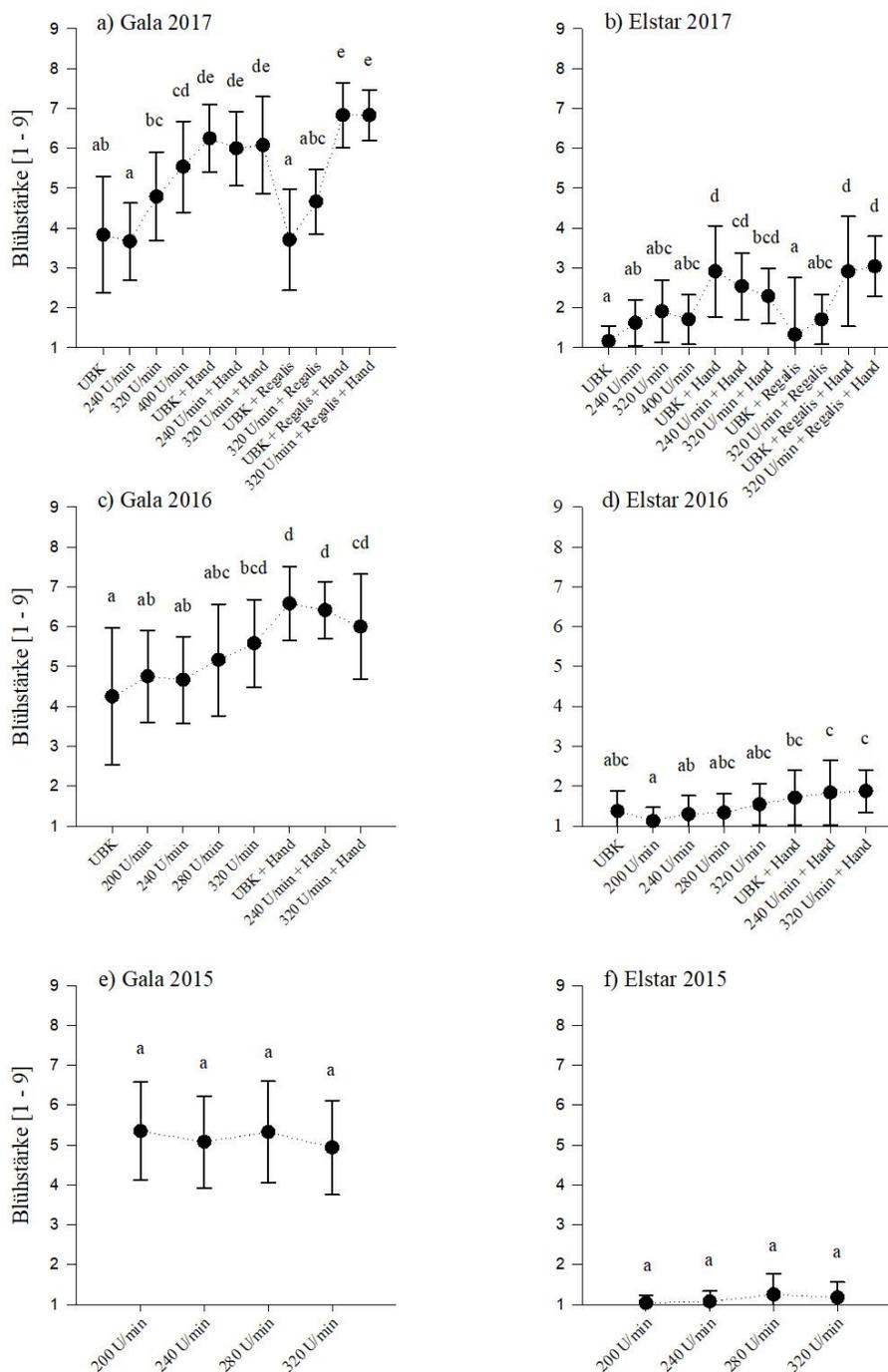


Abbildung 37. Nachfolgeblüte der Versuchsbäume aus den 3 Versuchsjahren für `Gala` (a, c, e) und `Elstar` (b, d, f) in Abhängigkeit der Behandlungsstufen UBK, 200 U min⁻¹, 240 U min⁻¹, 280 U min⁻¹, 320 U min⁻¹, UBK + Hand, 240 U min⁻¹ + Hand, 320 U min⁻¹ + Hand, 400 U min⁻¹, 320 U min⁻¹ + Regalis, UBK + Regalis, 320 U min⁻¹ + Hand + Regalis und UBK + Hand + Regalis. Die Bonitur der Blühstärke erfolgte auf einer Skala von 1 bis 9 (1 = keine Blüte; 5 = ausreichend für einen Vollertrag; 9 = Weißblüte). (Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder; p = ≤ 0,05).

physiologischen Reaktionen sowie deren Wechselwirkungen am Apfelbaum sollen im Anschluss unter den folgenden Aspekten diskutiert werden:

- Ausdünnwirkung bzw. Fruchtbehang zur Ernte und dessen Fruchtqualität,
- Schädigung von Blüten, Blättern sowie der Reduktion von Blattmasse,
- Nachblütefall und Junifruchtfall,
- Triebwachstum und
- Alternanzerscheinungen.

Es gilt hierbei zu beachten, dass keiner dieser Prozesse nur allein für sich betrachtet werden kann, sondern immer wie in Abbildung 38 zu erkennen in den Kontext zu anderen physiologischen Prozessen gestellt werden sollte.

6.1. Blüte Versuchsbäume

Bei der Auswertung der Anzahl Blütenbüschel je Versuchsbäum wurde festgestellt, dass einzelne Bäume in Abhängigkeit der Versuchsjahres bzw. der Sorte signifikant mehr oder weniger Blütenbüschel am Baum hatten als andere Bäume. Um einen statistischen Effekt dessen auf die untersuchten Parameter zu vermeiden, wurde ein Kovarianzanalyse unter Berücksichtigung der Ausgangslage durchgeführt.

6.2. Ausdünnwirkung

6.2.1. Fruchtbehang

Generell lässt sich die Ausdünnwirkung einer Maßnahme, unabhängig des Verfahrens, nicht im direkten Anschluss an die Behandlung solide beurteilen, sondern erst nach der Ernte der Versuchsbäume im Herbst. Die für die Ausdünnwirkung entscheidenden Kriterien hierbei sind, die Anzahl der Früchte und deren Fruchtqualität. Dabei resultieren beide Faktoren jedoch nicht nur aus der direkten Maßnahme der Ausdünnung, sondern auch aus physiologischen Prozessen des Systems „Apfelbaum“ zur Regulation des Fruchtbehangs (Nachblütefall, Junifruchtfall und Vorerntefruchtfall).

In jedem der zwischen 2014 und 2016 durchgeführten Versuche an den Sorten `Gala` und `Elstar` konnte mit der `Darwin`-Maschine eine von der Spindeldrehzahl abhängige Ausdünnwirkung erzielt werden. Dies zeigte sich für `Gala` über alle Versuchsjahre und bei `Elstar` über die Versuchsjahre 2015 und 2016 hinweg in einem sortentypischen, linearen Zusammenhang (`Elstar`

r^2 0,79 und `Gala` r^2 0,90) zwischen dem Fruchtbehang je Baum und der Spindeldrehzahl (Abbildung 39 (a) `Elstar` und (b) `Gala`).

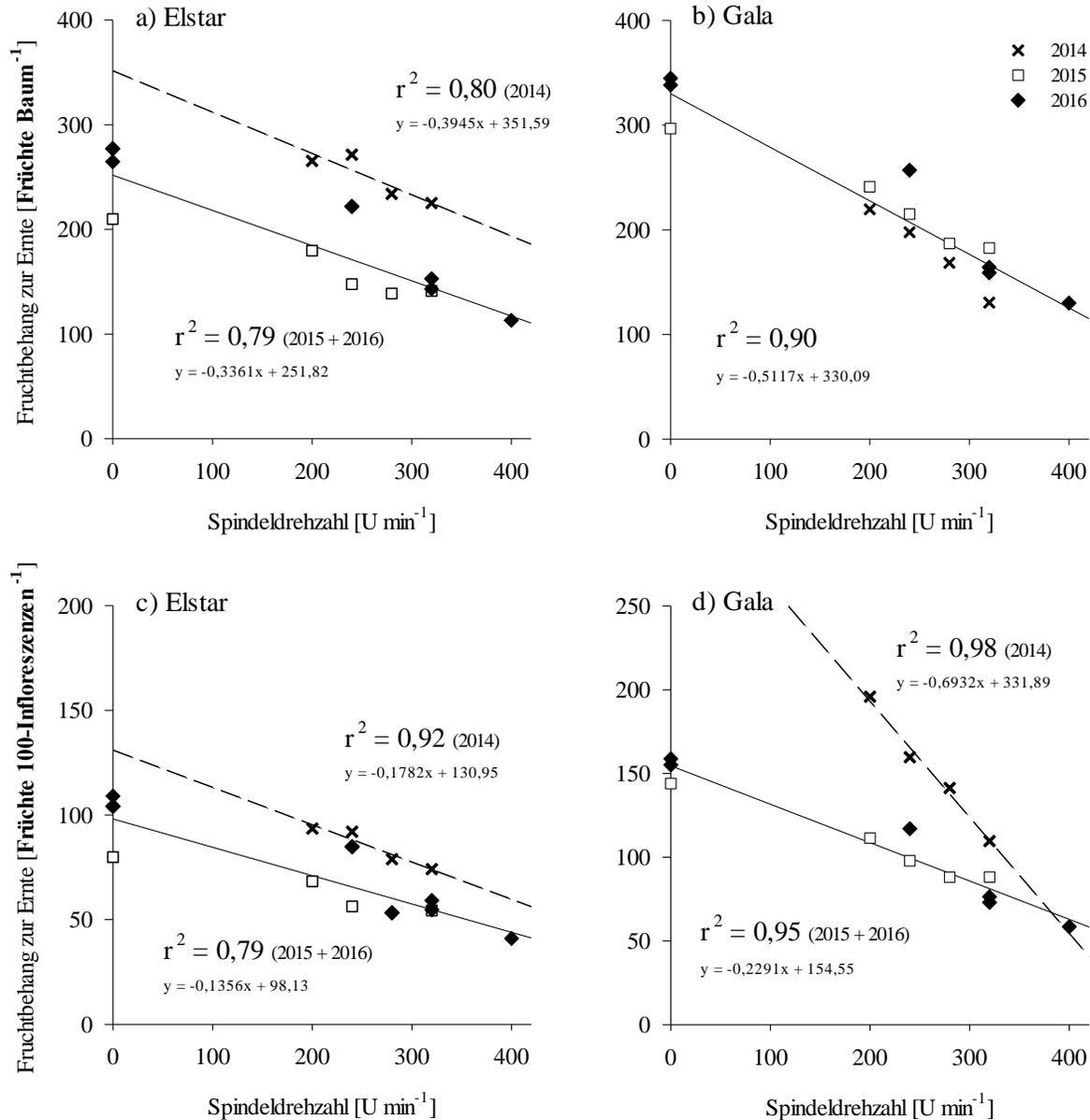


Abbildung 39. Korrelation der Spindeldrehzahl in Umdrehungen pro Minute [U min⁻¹] mit dem durchschnittlichen Fruchtbehang der Versuchsbäume zur Ernte mit der **Anzahl Früchte je Versuchsbaum** [Früchte Baum⁻¹] (Abbildung (a) `Elstar` und (b) `Gala`) und mit der **Anzahl Früchte je 100 Blütenbüschel** [Früchte 100 Blütenbüschel⁻¹] (Abbildung (c) `Elstar` und (d) `Gala`) in den Versuchsjahren 2014, 2015 und 2016 in den Sorten `Elstar` und `Gala`. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder).

Unabhängig der Sorte war die Ausdünnwirkung einer entsprechenden Spindeldrehzahl über die Versuchsjahre hinweg keinen großen Schwankungen ausgesetzt. Dies spricht für eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse und damit für einen erheblichen Vorteil im Vergleich zu anderen Ausdünnmaßnahmen. Inwiefern sich dieser Zusammenhang auch auf andere Obstanlagen der gleichen Sorten bzw. anderer Sorten übertragen lässt konnte nicht geklärt werden. In diversen anderen Studien von *Damerow et al.* (2007b), *Kong et al.* (2009), *Hennen et al.* (2012), *Kon et al.* (2013), *Seehuber et al.* (2013) und *McClure und Cline* (2015) zur maschinellen Ausdünnung konnte ebenfalls gezeigt werden, dass durch die Steigerung der Spindeldrehzahl der Ausdünn effekt verstärkt werden kann. Dabei konnte *Kon et al.* (2013) ebenfalls einen linearen Zusammenhang zwischen Spindeldrehzahl und Ausdünn ergebnis feststellen.

Die Zusammenhänge zwischen der Spindeldrehzahl und dem Fruchtbehang [Früchte Baum⁻¹] konnten in `Gala`, wie bereits erwähnt, über alle drei Versuchsjahre durch eine Regressionsgerade beschrieben werden. In `Elstar` dagegen lagen die Versuchsergebnisse aus 2014 nicht auf der gemeinsamen Regressionsgerade der beiden anderen Versuchsjahre. Dieser Effekt konnte auch in `Gala` durch die Veränderung der Betrachtungsebene (Abbildung 39 (c) `Elstar` und (d) `Gala`) und der Korrelation der Spindeldrehzahl mit dem Fruchtbehang [Früchte 100⁻¹ Infloreszenzen⁻¹] hervorgerufen werden, sodass das Versuchsjahr 2014 in beiden Sorten Abweichungen ergab. Bei Betrachtung der Anzahl an Blütenbüschel vor der Ausdünnung, war auffällig das die Anzahl im Versuchsjahr 2014 deutlich von den den aus 2015 und 2016 abweicht. So wurden in `Gala` 2014 im Schnitt 80 Blütenbüschel weniger je Versuchsbaum gezählt im Vergleich zu 2015 oder 2016. Dagegen wurden in `Elstar` um die 40 Blütenbüschel mehr 2014 im Vergleich zu 2015 und 2016 gezählt. Dies resultierte 2014 in `Elstar` über alle Behandlungsstufen hinweg in einem durchschnittlich höheren Fruchtbehang je Baum (Abbildung 19 (a)). Interessanterweise in `Gala` dagegen, war der Fruchtbehang je Baum entsprechend der Behandlungsstufe, trotz einer deutlich geringeren Anzahl an Blüten 2014, über alle Versuchsjahre hinweg gleich. Hintergrund hierfür könnte sein, dass der Nachblüte- und Junifruchtfall 2014 in `Gala` deutlich geringer ausgefallen war als in den anderen beiden Versuchsjahren, wohin gegen das mehr an Blüten in `Elstar` nicht zu einer Verstärkung des Blüten- und Fruchtfalls führte. Auch die Studien von *Kon et al.* (2013) und *McClure und Cline* (2015) zeigten unterschiedliche Ergebnisse zwischen den Versuchsjahren. *McClure und Cline* (2015) führten diese Schwankungen unter anderem auf die unterschiedliche

Architektur der Bäume zurück, während *Kon et al. (2013)* mit einem geringeren Blütenbesatz im zweiten Versuchsjahr argumentierten.

Das Ziel von Ausdünnungsversuchen ist die Annäherung an einen Zielfruchtbehang. Dieser kann in der Praxis durch eine einzelne Maßnahme oder durch die Kombination mehrerer Maßnahmen erreicht werden. In den dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuchen sollte der Zielfruchtbehang mittels maschineller Ausdünnung in Kombination mit Handausdünnung erzielt werden. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass durch die maschinelle Ausdünnung die Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen Fruchtbehang zur Ernte und dem gewünschten Zielfruchtbehang im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle auf ein Minimum reduziert werden konnte. Dies bedeutet zunächst, dass eine einzelne Ausdünnmaßnahme nicht ausreichend gewesen ist um den gewünschten Zielertrag zu erreichen, jedoch im Umkehrschluss auch, dass keine der Maßnahmen, auch nicht eine Spindeldrehzahl von 400 U min^{-1} bei 8 km h^{-1} , zu einer Überdünnung und damit zu einem Unterbehang der Versuchsbäume führte. Im Gegensatz zu den vorliegenden Versuchsergebnissen führten einzelne Maschineneinstellungen in anderen Studien, unter anderem von *Kon et al. (2013)*, auch zu einer Überdünnung, sodass sicherlich immer ein gewisses Risiko für eine Überdünnung unter bestimmten Umständen bestehen bleibt. Der Hintergrund der Überdünnung bei *Kon et al. (2013)* lag dabei vor allem in der geringen Anzahl an Blüten je Versuchsbäum im zweiten Versuchsjahr.

Ein Einfluss der zweifachen Prohexadion-Calcium-Applikation, wie bei *Greene (2008)*, auf den Fruchtbehang konnte nicht nachgewiesen werden.

6.2.2. Fruchtqualität

Der Fruchtbehang ist neben den genetischen Eigenschaften einer Apfelsorte das ausschlaggebende Kriterium für die Qualität der Früchte zum Erntezeitpunkt (*Ferree und Warrington 2003; Link 2000*). Eine effektive Ausdünnmaßnahme wirkt sich daher generell positiv auf die Fruchtqualität aus.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigten, dass wichtige Qualitätskriterien wie das durchschnittliche Fruchtkaliber und die Ausfärbung in erster Linie vom Fruchtbehang abhängig waren und damit gezielt durch maschinelle Ausdünnung beeinflusst werden konnten (Abbildung 40). Einen linearen Zusammenhang zwischen Ausdünnwirkung und Fruchtkaliber konnte auch *McArtney et al. (1996)* und *Goffinet et al. (1995)* in seinen Versuchen an `Gala` und

`Braeburn` bzw. `Empire` feststellen. Auch die Ergebnisse anderer Studien von *Strimmer et al.* (1997), *Schupp et al.* (2008), *Solomakhin und Blanke* (2010), *Veal et al.* (2011), *Hehnen et al.* (2012), *Kon et al.* (2013) und *McClure und Cline* (2015) zur maschinellen Blütenausdünnung zeigten einen positiven Einfluss zunehmender Ausdünnintensität auf das Fruchtkaliber. Interessanterweise zeigten die Ergebnisse von *Kon et al.* 2013 diesen Effekt nur in einem der beiden Versuchsjahre. Hier könnte allerdings der generell niedrige Fruchtbehang im zweiten Versuchsjahr die Effekte der maschinellen Ausdünnung verringert haben. Neben dem Fruchtkaliber zeigten einige dieser Studien (*Sinatsch et al.* 2010, *Solomakhin und Blanke* 2010, *Hehnen et al.* 2012) ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Ausfärbung der Früchte.

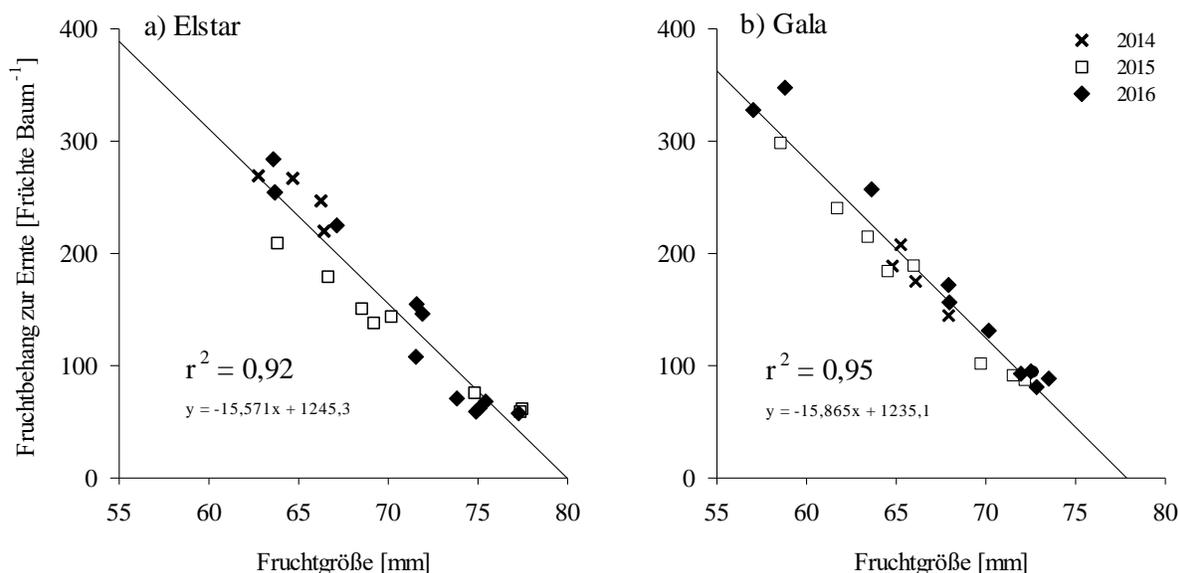


Abbildung 40. Korrelation zwischen dem Fruchtbehang [Früchte Baum⁻¹] und der durchschnittlichen Fruchtgröße [mm] bei (a) `Elstar` und (b) `Gala` in den Versuchsjahre 2014, 2015 und 2016. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder).

Neben dem generellen positiven Effekt der Ausdünnung auf die Fruchtqualität zeigte sich, dass auch der Zeitpunkt der Ausdünnmaßnahme über alle drei Versuchsjahre hinweg einen zusätzlichen positiven Einfluss auf das Kaliber und die Ausfärbung der Früchte hatte. So hatten die Früchte aus den Behandlungsstufen mit maschineller Blütenausdünnung und zusätzlicher Handausdünnung stets ein größeres Kaliber als die Früchte aus den entsprechenden Behandlungsstufen mit reiner Handausdünnung. Hintergrund hierfür dürfte sein, dass die Einstellung des gleichen

Fruchtbehangs an den Versuchsbäumen durch die Handausdünnung etwas zeitlich verzögert erfolgte. Dies würde auch die Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 2015 und 2016 erklären. 2015 erfolgte die Einstellung des gleichen Fruchtbehangs später als 2016. Im Allgemeinen erfolgte die Einstellung eines einheitlichen Fruchtbehangs in den Behandlungsstufen mit Handausdünnung bereits in der Zellteilungsphase des Fruchtwachstums und daher bevor der eigentliche Größenzuwachs junger Apfelfrüchte während der Zellstreckungsphase stattfindet (Atkinson et al. 1995). Allerdings stellte *Goffinet et al. (1995)* in seinem Versuch zur Handausdünnung an der Sorte `Empire` fest, dass bereits eine Verzögerung der Handausdünnung um zehn Tage nach Vollblüte einen negativen Einfluss auf das Kaliber der Früchte zur Ernte haben kann. Auch *McArtney et al. (1996)* konnte in seinem `Gala`-Versuch zeigen, umso später eine Handausdünnung nach der Vollblüte stattfindet, desto geringer ist der positive Effekt auf das durchschnittliche Fruchtgewicht.

Die Ausfärbung der Früchte, sprich der Anteil roter Deckfarbe, konnte in jedem Versuchsjahr mit der Abnahme des Fruchtbehangs deutlich verbessert werden. Allerdings schwankte die Ausfärbung der Früchte einzelner Behandlungsstufen, trotz eines vergleichbaren Fruchtbehangs, deutlich zwischen den einzelnen Versuchsjahren. Dies deutet auf einen starken Jahreseffekt hin. Dabei konnte vor allem festgestellt werden, dass die Ausfärbung in `Gala` unabhängig der Behandlungsstufe 2014 und 2016 deutlich besser gewesen ist als 2015. In `Elstar` dagegen war die Ausfärbung 2015 deutlich besser als 2014 und 2016 und damit genau spiegelverkehrt zu `Gala`. Ein möglicher Hintergrund könnte mit dem Erntezeitpunkt der Versuchsfrüchte verknüpft sein.

Die Applikation von Prohexadion-Calcium führte 2016 in beiden Sorten trotz eines geringeren Triebzuwachses nicht zu einer besseren Ausfärbung. Prohexadion-Calcium-Versuche zu `Gala` von *Medjdoub et al. (2005)* und *Mata et al. (2006)* konnten ebenfalls keine verbesserte Ausfärbung der `Gala`-Früchte feststellen, obwohl in deren Versuchen im Zuge der Prohexadion-Calcium-Behandlung nicht nur die Trieblänge, sondern auch die Blattfläche der Triebe reduziert wurden.

In den Vorliegenden Versuchen konnte kein negativer Einfluss der Ausdünnmaßnahme auf den Calcium-Gehalt und das Kalium-Calcium-Verhältnis der Früchte festgestellt werden. Der Calcium-Gehalt der Früchte lag Anhand der Skala von *Baab (2009)* unabhängig der Behandlungsstufe in einem normalen bis optimalen Bereich. Lediglich der Calcium-Gehalt der `Elstar`-Früchte aus dem Versuchsjahr 2016 konnte als kritisch angesehen werden. Der für die physiologische Stabilität der Frucht aussagekräftigere Parameter des Kalium-Calcium-

Verhältnisses war bei der Sorte `Gala` nahezu über alle Behandlungsstufen hinweg in einem optimalen Bereich < 20 . Bei `Elstar` konnte auch im Versuchsjahr 2016 ein „normales“ Kalium-Calcium-Verhältnis zwischen 20 und 30 gemessen werden. *Kon et al.* (2013) konnte in seinen Versuchen, wie auch in den hier vorliegenden Ergebnissen, eine Abnahme des Calcium-Gehaltes in den Früchten mit Zunahme der Spindeldrehzahl feststellen. Er begründete dies mit der Schädigung der primären Blattfläche, welche laut *Ferree und Palmer* (1982) für die Calcium-Aufnahme in die Frucht von Bedeutung ist. Zwar wurde in den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen die Primärblattfläche der Infloreszenzen beschädigt, allerdings zeigten auch die Behandlungsstufen mit ausschließlicher Handausdünnung keine höheren Calcium-Werte als die entsprechenden Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung, sodass in diesem Versuch der Einfluss der Blattschädigung auf die Calcium-Versorgung der Früchte aller Wahrscheinlichkeit nach ausgeschlossen werden kann. Im Vergleich zu den Versuchen von *Ferree und Plamer* (1982) war in den vorliegenden Versuchen der Verlust der Blattmasse durch die maschinelle Ausdünnung deutlich geringer und die Beschädigung bzw. Reduktion der Blattmasse nur auf die Primärblätter bezogen und nicht auf die Blätter der sekundären Kurztriebe. Da der Calcium-Transport in der Pflanze entlang des Transpirationsstromes im Xylem stattfindet, erfolgt die direkte Versorgung der jungen Frucht ausschließlich über deren Transpiration (Saure 2005, Schilling 2000, S.149-150), womit im Umkehrschluss die Beschädigung der Primärblätter einen geringen Einfluss auf die Calciumversorgung haben sollte. Dies deutet darauf hin, dass der beobachtete unterschiedliche Calcium-Gehalt zwischen den Behandlungsstufen in diesen Versuchen auf die Fruchtgröße und damit auf einen Verdünnungseffekt auf Grund des größeren Fruchtvolumens bei geringerem Fruchtbehang zurückzuführen ist.

6.3. Blüten und Fruchtfall

6.3.1. Beschädigung von Blüten und Blättern

Im direkten Anschluss an die maschinelle Ausdünnung kann ein Obstbaum massiv geschädigt wirken. Manche Obstbauern vergleichen diese Schäden an der Laubwand mit denen eines „schweren“ Hagelgewitters (Strimmer et al. 1997). Die entscheidende Frage hierbei ist, inwiefern sich diese „vermeintlichen Schäden“ auf den physiologischen Haushalt des Baumes auswirken bzw. welche nachfolgenden physiologischen Prozesse hierdurch beeinflusst werden könnten. Ein wesentlicher Teilaspekt dieser Promotionsarbeit war deshalb die Quantifizierung der Schäden an

Laub und Blüten nach der maschinellen Ausdünnung sowie die Evaluierung der Auswirkungen auf physiologische Prozesse.



Abbildung 41. Bäume und Blütenbüschel aus der Versuchsanlage `Gala` Q 2.1 am KOB-Bavendorf im direkten Anschluss an die maschinellen Blütenausdünnung.

Bei der Betrachtung des Ausdünnvorgangs mit einer Highspeed-Kamera (MotionBLITZ Cube; Firma Mikrotron) konnte festgestellt werden, dass es sich bei der Rotation der `Darwin`-Fäden keinesfalls um eine gleichförmige Kreisbewegung im Baum handelt. Vielmehr sorgen vor allem Äste und der Stamm dafür, dass die kreisförmige Bewegung der Fäden gebremst, abgelenkt bzw. gebrochen wird. In Folge dessen kommt es im Baum zu einer Art Querschlägereffekt, wodurch die Fäden zum einen zurückgeschlagen werden bzw. anfangen in Form von Ellipsen im Baum zu wirbeln und dadurch nicht nur eine horizontale, sondern auch eine vertikale Wirkung entfachen. Dieser Effekt wird voraussichtlich durch das gebogene Ende der Fäden verstärkt.

Die Bonitur der Blütenbüschel auf deren Schädigung zeigte in beiden Versuchsjahren gleichartige Ergebnisse für Blätter und Blüten, unabhängig der Sorte. Besonders auffällig an den vorliegenden Ergebnissen war, dass der Anteil an Blüten mit den Schädigungsgraden 3, 4, 5 oder 6 bzw. der Anteil Blätter mit den Schädigungsgraden 4 oder 5 unabhängig der Behandlungsstufe minimal ausfiel. Diese Verteilung deutet stark darauf hin, dass wenn eine Blüte oder ein Blatt von einem Faden der `Darwin`-Maschine getroffen wurde, die Wahrscheinlichkeit sehr hoch gewesen ist, dass dieses Organ auch vom Baum abgeschlagen wurde (Schädigungsgrad 7 Blüte bzw. Schädigungsgrad 6 Blatt). Diese Wahrscheinlichkeit einer Blüte/ Blatt von einem Faden getroffen zu werden nahm dann zu, wenn die Drehzahl der Spindel gesteigert wurde. Hintergrund hierfür könnte nicht nur die Zunahme der einwirkenden Kraft durch die höhere Rotationsgeschwindigkeit der einzelnen Fäden mit der Steigerung der Spindel-Drehzahl sein, sondern auch die zahlenmäßige Zunahme der Fäden, die je Flächeneinheit auftreffen. Diese Annahme lässt sich Anhand eines

Rechenbeispiels verdeutlichen. Bei einem Baumabstand von 0,8 m beträgt die Zeit in der die `Darwin`-Maschine an einem Baum verweilt 0,32 sec (Traktorgeschwindigkeit 8 km h⁻¹). Diese Zeit entspricht bei 200 U min⁻¹ 1,2 Umdrehungen der `Darwin`-Spindel je Baum [U Baum⁻¹] und bei 400 U min⁻¹ dem Doppelten (2,4 U Baum⁻¹). Da an der `Darwin`-Spindel auf jeder Höhe sechs Fadenelemente angebracht sind, wirken theoretisch bei einer Spindeldrehzahl von 400 U min⁻¹ (6 Fadenelemente x 2,4 U Baum⁻¹ =) 14,4 Fäden auf einen Teilbereich im Baum ein. Im Vergleich hierzu sind es bei 200 U min⁻¹ mit (6 Fadenelemente x 1,2 U Baum⁻¹ =) 7,2 Fäden nur die Hälfte dessen die auf einen Teilbereich im Baum einwirken. Die resultierende Folgerung aus dieser Erkenntnis wäre, dass Anhand dessen die Wahrscheinlichkeit mit der Zunahme der Spindeldrehzahl steigt, dass eine Blüte oder ein Blatt von einem Faden getroffen wird. *Zoth* (2011) nutzt eine energetische Betrachtung des Systems zur Erklärung einer steigenden Ausdünnwirkung durch die Zunahme der Spindeldrehzahl. In dieser Betrachtung wird auch die Einwirkdauer der wirbelnden Fäden im Baum berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Blüten-Schädigungsgraden 3, 4, 5 und 6 war der Anteil an Blüten Schädigungsgrades 2 in Abhängigkeit der Behandlungsstufe vergleichsweise hoch. Dabei umfasste der Blüten-Schädigungsgrad 2 jene Blüten, an denen die Blütenblätter nicht mehr vollständig bzw. Teile davon beschädigt sind. Unter Berücksichtigung der in den bisherigen Abschnitten diskutierten Punkte kann davon ausgegangen werden, dass im Großteil der Fälle die Blütenblätter dieser Blüten nicht direkt von den Fäden abgeschlagen wurden, sondern vielmehr auf indirekte Art und Weise von der Blüte abfallen sind. Dies trifft besonders dann zu, wenn der Entwicklungszustand der Blüte fortgeschritten ist und die Blüte bereits geöffnet war. Hierfür könnten mehrere Effekte bzw. deren Kombination in Frage kommen:

- Luftbewegung entstehend durch die rotierende Spindel,
- Abstreifen durch die Führung der `Darwin`-Spindel entlang der Baumsilhouette,
- Schütteln/ Reißen der Äste durch das Umschlingen jener durch die Fäden und
- indirekt durch das Abfallen anderer Blüten, Blätter und Äste.

Bei der Betrachtung des gesamten Blütenbüschels als eine Einheit, konnte kein direkter Zusammenhang zwischen dem Schädigungsgrad der Blätter und dem Schädigungsgrad der Blüten innerhalb eines Blütenbüschels ermittelt werden. Dies ist ein weiterer Hinweis auf das nicht zielgerichtete Wirbeln der Fäden im Baum und dem zufälligen Zusammentreffen von Faden und Organ.

6.3.2. Auswirkungen des Blütenschädigungsgrades

Nahezu alle Blüten, unabhängig der Sorte, deren sexuelle Vermehrungsorgane (Anthere und Stamina) visuelle Beschädigungen aufwiesen (Schädigungsgrad 5 und 6), fielen während des Nachblütefalls vom Baum. Bei den wenigen Blüten, aus denen sich dennoch eine erntereife Frucht entwickelte, kann davon ausgegangen werden, dass entweder die Befruchtung der Eizelle bereits stattgefunden hatte oder die weiblichen Sexualorgane und der Blütenboden nach der Ausdünnung noch intakt waren. Da insgesamt die Anzahl der Blüten mit Schädigungsgrad 5 oder 6 in beiden Sorten sehr gering war, ist deren Einfluss auf den Blüten- und Fruchtfall zu vernachlässigen.

Im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle zeigten visuell intakte Blüten (Boniturnote 1) der Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung die gleiche Wahrscheinlichkeit zum Blüten- bzw. Fruchtfall. Unter Berücksichtigung, dass die Blütenbüschel der maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen im Vergleich zu denen der unbehandelten Kontrolle in der Regel Schäden an benachbarten Blüten oder am Blattwerk aufwiesen ist dieses Ergebnis von besonderer Bedeutung. Aller Voraussicht nach führen Schäden an benachbarten Blüten bzw. die Reduktion der Blattfläche innerhalb des Blütenbüschels nicht zu einer Verstärkung des Blüten-/ Fruchtfall der intakten Blüten. Die Ergebnisse zu den Blüten-/ Fruchtfallwahrscheinlichkeiten der Blüten mit den Blütenschädigungsgraden 2, 3 und 4 zeigten, deutliche Unterschiede zwischen beiden Versuchsjahren. 2015 führten die Beschädigungen bis Blütenschädigungsgrad 4 in beiden Sorten nicht zu einer höheren Blüten-/ Fruchtfallwahrscheinlichkeit. Generell war hier der Blüten- und Fruchtfall in allen Schädigungsgraden sehr hoch. 2016 dagegen zeigte sich eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Blütenschädigungsgrades. Dies lässt vermuten, dass 2016 in beiden Sorten bereits eine leichte Beschädigung der Blüten einen Einfluss auf deren Neigung zum Blüten-/ Fruchtfall hatte. Dieser Unterschied zwischen den beiden Versuchsjahren legt nahe, dass nicht nur der Schädigungsgrad der Blüten entscheidend ist, sondern weitere Faktoren eine Rolle spielen.

6.3.3. Auswirkungen der Reduktion der Blattmasse

Bisher ist nicht bekannt, wie viel fotosynthetisch aktive Blattfläche tatsächlich benötigt wird, um einen Apfelbaum entsprechend seines Entwicklungszustandes ausreichend mit Assimilaten zu versorgen (Lakso 2008, Vemmos 1995). Diese Frage ist vor allem dann von Bedeutung, wenn die Folgen der Beschädigung bzw. Reduktion der Blattmasse durch die maschinelle

Blütenausdünnung beurteilt werden sollen. Bisherigen Kenntnissen zu folge kann eine Unterversorgung mit Assimilaten zum Abwurf von Früchten bzw. zu reduziertem Triebwachstum führen (Pretorius et al. 2004). Die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigten, dass die maschinelle Ausdünnung zu einer deutlichen Reduktion der Blattfläche führen kann. Wie stark diese Reduktion ausfiel, war neben der Spindeldrehzahl auch vom Entwicklungszustand der Blattfläche abhängig. Je stärker die Blattfläche unabhängig der Sorte zum Zeitpunkt der Ausdünnung entwickelt war, desto mehr Blattfläche wurde abgeschlagen. Dies konnte auch unter anderem auch in den Ausdünnversuchen von *Kon et al.* (2013) und *McClure und Client* (2015) festgestellt werden. In beiden Versuchen an den Sorten `Gala` bzw. `Gala` und `Empire` führte die Steigerung der Spindeldrehzahl zu einer stärkeren Reduktion der Blattfläche in Abhängigkeit deren Entwicklungszustandes. *Solomakhin und Blanke* (2010) berichten in ihren Versuchen von einer Reduktion der Blattfläche von bis zu 42 %, *Kon et al.* (2013) sogar bis zu 62 %. Obwohl die Primärblätter zur Assimilat-Versorgung der Blüten im Blütenbüschel beitragen (Pretorius et al. 2004), führte die Reduktion jener Primärblätter wie die Ergebnisse zeigten nicht zu einem verstärkten Fall der Blüten innerhalb des Blütenbüschels. *Proctor und Plamer* (1991) konnten in ihren Versuchen an den Sorten `Crispin`, `Golden Delicious` und `Cox` zeigen, dass sich eine manuelle Entblätterung zum Zeitpunkt der Vollblüte negativ auf den Ertrag auswirken kann, wobei der Zeitpunkt der Entblätterung eine wesentliche Rolle spielte. Je früher in der Blütenentwicklung die Entblätterung stattfand, desto größer waren dabei die Ertragseinbußen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich dabei um eine totale Entblätterung handelte und gleichzeitig die Anzahl Blüten unberührt blieb. Zudem wurde nicht erläutert ob die Ertragsverluste durch einen höheren Nachblüte- und oder Junifruchtfall zustande kamen. Auch die Ergebnisse aus den Zuckermessungen (Daten nicht dargestellt) der Blüten zeigten keinen Zusammenhang zwischen der Primärblattfläche bzw. deren Zustand und dem lösbaeren Zucker Gehalt einer Blüte. Mögliche Hintergründe hierfür könnten sein, dass Blüten ab dem Mausohrstadium bis hin zum Fruchtansatz selbst Fotosynthese betreiben können (Vemmos und Goldwin 1994, Vemmos und Goldwin 1993) und sie daher nicht nur auf die überschüssige Assimilatproduktion der Primärblätter angewiesen sind (Hansen 1971, Quinlan 1969, Priestley 1960). Auch die Versuche von *Schröder und Link* (2002) zeigten, dass in der Sorte `Elstar`, im Gegensatz zur Sorte `Jonagold`, eine manuelle Reduktion der Blattfläche um bis zu 50 % zum Zeitpunkt rote Knospe, die Anzahl Früchte je 100 Infloreszenzen nicht reduzierte.

6.4. Blüten- und Fruchtfall

6.4.1. Nachblüte- und Junifruchtfall

Die Versuche haben gezeigt, dass neben einem Jahreseffekt, in erster Linie die Anzahl der Blüten am Baum das ausschlaggebende Kriterium für die Stärke des Nachblütefalls (Abbildung 42 (a) `Elstar` und (c) `Gala`) war. Dabei führte die maschinelle Ausdünnung mit der `Darwin`-Maschine in keiner der beiden Sorten dazu, dass der Nachblütefall verstärkt wurde. Je mehr Blüten mit der Ausdünnmaschine abgeschlagen wurden, desto weniger Blüten fielen im Zuge des Nachblütefalls vom Baum. *Kon et al.* (2013) konnte in zweijährigen Versuchen an `Gala` gleiche Ergebnisse ermitteln. Auch hier zeigte die Kontrolle einen höheren Nachblütefall als die maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen, obwohl diese teilweise massive Schäden am Blattwerk, den Blüten und am Holz aufwiesen.

In der vorliegenden Arbeit ergaben sich zwischen den zwei Versuchsjahren in beiden Sorten (`Gala`, `Elstar`) Unterschiede in der Stärke des Nachblütefalls. Auf Grund dessen kann davon ausgegangen werden, dass weitere Faktoren die Stärke des Nachblütefalls beeinflusst haben. Da der beobachtete Effekt über alle Behandlungsstufen hinweg gleichmäßig war kann jedoch von einem typischen Jahreseffekt gesprochen werden (Link 2002; Tromp et al. 2005). *Kon et al.* (2013) konnte dies ebenfalls in seinen `Gala`-Versuchen feststellen. Laut *Link* (2002) und *Tromp et al.* (2005) sind diese Schwankungen hauptsächlich auf die Bestäubungssituation zurückzuführen.

Die Auswertungen zum Junifruchtfall zeigten, dass in erster Linie die Anzahl der Früchte pro Baum zum Fruchtansatz das entscheidende Kriterium für dessen Stärke waren (Abbildung 42 (a) `Elstar` und (c) `Gala`). Die maschinelle Blütenausdünnung zeigte somit ebenfalls keinen direkten Einfluss auf den Junifruchtfall. Da die Anzahl an Früchten auch abhängig von der Ausdünnintensität war, kann anhand dieser Ergebnisse lediglich von einem indirekten Einfluss der maschinellen Ausdünnung auf den Junifruchtfall ausgegangen werden. *Kon et al.* (2013) erzielte in seinen zweijährigen `Gala`-Versuchen ähnliche Ergebnisse zum Junifruchtfall. Auch in seinen Versuchen zeigten die Behandlungsstufen mit zunehmender Spindeldrehzahl einen geringeren Junifruchtfall. Dies zeigten auch die Versuchsergebnisse von *Kong et al.* (2009) mit der Bonner Ausdünnmaschine. In den Ergebnissen von *Seehuber et al.* (2014) führte die maschinelle Blütenausdünnung in `Gala` ebenfalls nicht zu einer Steigerung des Junifruchtfalls. Allerdings lag

der Junifruchtfall in der unbehandelten Kontrolle und in den maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen auf dem gleichen Niveau, sodass im Gegensatz zu den hier erzielten Ergebnissen eine Steigerung der Ausdünnintensität nicht zu einer Reduktion des Junifruchtfalls führte. Der Unterschied zwischen den beiden Ergebnissen könnte darin liegen, dass der Junifruchtfall im Versuch von *Seehuber et al.* (2014) anhand einer Skala von 1 bis 9 bonitiert und nicht die absoluten baumspezifischen Zahlen erfasst wurden.

In den Versuchen dieser Arbeit fiel der Junifruchtfall in `Elstar` im Vergleich zu `Gala` in beiden Jahren deutlich stärker aus. Der Grund hierfür könnte Sortengenetisch bedingt sein (Link 2002; Tromp et al. 2005). Dabei konnte interessanterweise in `Elstar` kein Jahreseffekt festgestellt werden. In beiden Versuchsjahren fielen im Schnitt 60 % der Früchte vom Baum. Lediglich der Fruchtbehang zum Fruchtansatz unterschied sich zwischen den beiden Jahren.

Bei `Gala` konnte dagegen nicht nur beim Nachblütefall eine jährliche Schwankung beobachtet werden, sondern auch beim Junifruchtfall. Dabei zeigten sich diese Schwankungen gegenläufig, sodass auf den höheren Nachblütefall 2015 ein schwächerer Junifruchtfall 2015 folgte. Im Jahr 2016 zeigte sich ein umgekehrter Effekt. *Kon et al.* (2013) konnte dies ebenfalls in seinen zweijährigen Untersuchungen an `Gala` beobachten. Diese Wechselwirkung wurde auch von *Link* (2000) beschrieben. Im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung konnte dabei aber nicht festgestellt werden, dass in Summe beider Ereignisse (Nachblütefall + Junifruchtfall) die gleiche Anzahl Blüten und Früchte 2015 bzw. 2016 gefallen sind.

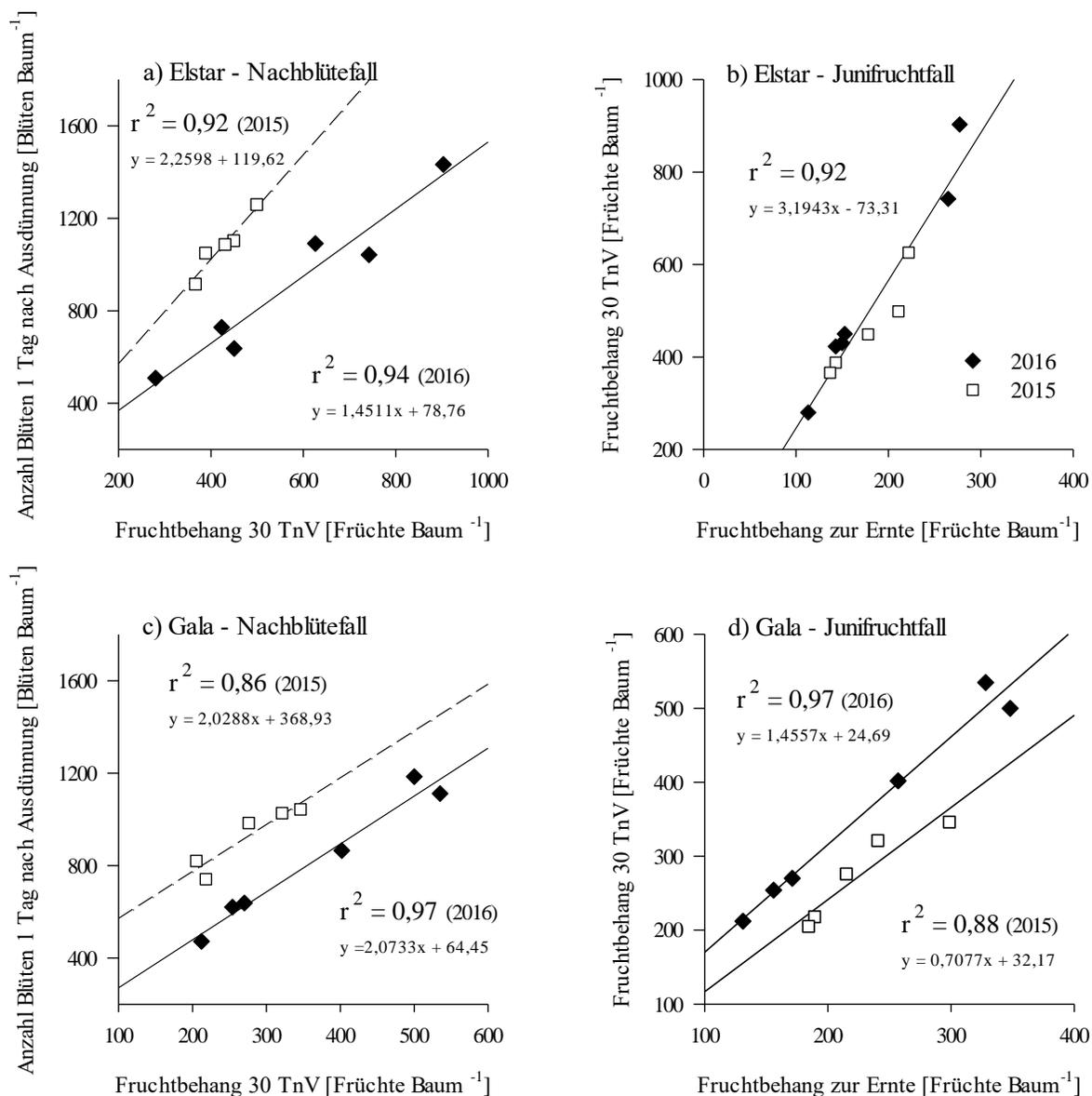


Abbildung 42. Darstellung der Intensität des Nachblüte- und Junifruchtfalls in Abhängigkeit der Anzahl Blüten (Nachblütefall) oder Früchte (Junifruchtfall) je Baum vor Eintritt der entsprechenden Blüten- bzw. Fruchtfallereignisses. Korrelationen zwischen der Anzahl Früchte pro Baum zum Zeitpunkt des Fruchtansatzes 30 Tage nach Vollblüte (TnV) [Früchte Baum⁻¹] und der Anzahl Blüten 1 Tag nach der Ausdünnung [Blüten Baum⁻¹] (a) `Elstar` und (c) `Gala` (Nachblütefall). Korrelation zwischen der Anzahl Früchte 30 Tage nach Vollblüte und der Anzahl Früchte zur Ernte [Früchte Baum⁻¹] (b) `Elstar` und (d) `Gala` (Junifruchtfall) über beide Versuchssorten `Gala` (c und d) und `Elstar` (a und b) in den Versuchsjahren 2015 und 2016 und den entsprechenden Behandlungsstufen ohne Handausdünnung. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder).

6.4.2. Einfluss von Ethylen auf den Blüten- und Fruchtfall

Ethylen ist ein Schlüsselfaktor bei der Ausbildung von Trenngewebe innerhalb einer Pflanze (Tromp et al. 2005), infolge dessen auch von Bedeutung beim Blüten- und Fruchtfall (Siehe Kapitel 2.1.2.). Wie die Versuchsergebnisse dieser Arbeit zeigten, wurden durch die maschinelle Ausdünnung teils massive Schäden unter anderem am Blattwerk verursacht. Wenn ein Blatt mechanisch beschädigt wird, wird in der Regel an den Blattwunden Ethylen als Stressreaktion gebildet (Wang et al. 2002, Ruperti et al. 2002 (Pfirsich), León et al. 2001 (Arabidopsis Thaliana und Solanaceous Pflanzen), Kende 1993 (Tomate), Yang 1984 (Apfel)). Dabei stellt sich die Frage, inwiefern sich dieses Wund-Ethylen auf die Blüten- und Fruchtfallereignisse auswirken kann. Vor allem im deutschsprachigen Raum wurde immer wieder die Vermutung geäußert, dass dieses Wund-Ethylen den Blüten- und oder Fruchtfall verstärken könnte (Widmer et al. 2012; Winstel 2012). Diese Vermutungen beruhten in erster Linie auf Beobachtungen und wurden nicht durch Messungen validiert. Auch in persönlichen Gesprächen mit Obstbauern zur maschinellen Blütenausdünnung, war diese sogenannte „Ethylen-Schock-Theorie“ immer wieder ein zentraler Punkt der Diskussionen.

Die Versuchsergebnisse aus den Blüten- und Fruchtzählungen für die Sorte `Elstar` und `Gala` zum Thema Blüten- und Fruchtfall legen nahe, dass in diesen Versuchen der Einfluss des von der Pflanze als Reaktion auf die Blattschäden gebildete Ethylen minimal bzw. nicht vorhanden gewesen ist. Hintergrund für diese Annahme ist, dass durch keinen der betrachteten Parameter eine Zunahme des Blüten-/ Fruchtfalls durch die maschinelle Ausdünnung festgestellt werden konnte. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, dass selbst innerhalb eines Blütenbüschels kein Zusammenhang zwischen der Verletzung/ Reduktion der Blattmasse und der Neigung zum Blüten-/ Fruchtfall festgestellt wurde. *Kong et al.* (2009) konnte in seinem Versuch keine Steigerung der Ethylen-Synthese im direkten Anschluss der maschinellen Ausdünnung messen und schließt daher einen Einfluss auf einen späteren Fruchtfall ebenfalls aus.

Diverse Ethylen-Messungen an mechanisch beschädigten Blättern anderer Pflanzenarten zeigen, dass bereits wenige Minuten nach der Beschädigung eines Blattes ein Anstieg der Ethylen-Konzentration zu messen ist. Dabei wird der Peak bereits nach wenigen Stunden erreicht und die Ethylen-Werte nähern sich anschließend wieder den Werten der nicht beschädigten Blätter an (Donnell et al. 1996 (Tomate), Ke und Slatveit 1989 (Gartensalat), Riov et al. 1989 (Citrus), Konze und Kwiatkowski 1981 (Bohne)). In diesen Studien erfolgte die Messung des Ethylen-Gehaltes im

Labor nach einer Inkubation und folglich einer Ethylen Anreicherung in geschlossenen Kammern. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das auf Grund einer Blattbeschädigung gebildete Ethylen an die Umgebung abgegeben und nicht intern in der Pflanze transportiert wird. Ein weiteres Indiz hierfür ist, dass beschädigte Blätter in der Regel nicht selbst vom Baum abgeworfen werden, sondern am Baum verweilen.

Versuche mit Ethephon (2-Chlorethylphosphonsäure) haben gezeigt, dass eine ausdünnende Wirkung in Abhängigkeit der Temperatur und Sorte ab 25 ppm (entspricht 25 ppm Ethylen) zur Vollblüte einsetzen kann. In der Regel sind aber deutlich höhere Ethephon-Konzentrationen > 150 ppm für einen ausdünnenden Effekt notwendig (Cunha 2005, Jones et al. 1989, Jones und Koen 1984). Geht man davon aus, dass Wund-Ethylen aus den beschädigten Blättern in den Konzentrationen aus den oben genannten Studien an die freie Umgebung abgegeben wird, dann kann davon ausgegangen werden, dass die Ethylen-Konzentration deutlich zu gering ist um einen ausdünnenden Effekt auf Basis von Wund-Ethylen hervorzurufen. Zumal eine stetige Luftbewegung im Feld weiter dazu führt, dass die Ethylen-Konzentration nach der Abgabe aus den Blättern sofort verdünnt wird. Auf Grund dessen und der zeitlichen Differenz zwischen der mechanischen Beschädigung der Blätter und dem Junifruchtfall, kann ein Ethylen induzierter Effekt der maschinellen Ausdünnung auf den Junifruchtfall ausgeschlossen werden.

Generell ist es sehr schwierig und nach bisherigem Kenntnis- und Technikstand nicht möglich, Ethylen in geringsten Konzentrationen „in vivo“ am Baum zu messen. Für die benötigten soliden Messungen gibt es (Stand 2016) kein portables Ethylen-Messgerät, das in diesen Konzentrationsbereichen im Feld zuverlässig eingesetzt werden könnten. Zwar wäre es möglich, wie in den Versuchen von *Kong et al.* (2009), das zu messende Organ in Kammern/ Tüten einzuschließen, somit das Ethylen über eine Zeitdauer X zu akkumulieren und anschließend zu messen, allerdings führt dies zu einer künstlichen Veränderung der Atmosphäre was wiederum die eingetüteten Organe in zusätzlichen Stress setzen könnte und damit das Ergebnis verfälscht bzw. nicht die Realität abbildet. Um präzise Aussagen zum Thema Ethylen-Bildung an beschädigten Blättern treffen zu können, wäre es womöglich sinnvoller entweder gezielt Vorstufen von Ethylen bzw. die Genexpression der in der Ethylen-Kaskade wirkenden Enzyme „in vitro“ zu messen.

6.5. Triebwachstum

6.5.1. Fruchtbehang und Triebwachstum

Das Triebwachstum eines Apfelbaumes wird nicht nur von der Genetik des Edelreises bzw. der Unterlage bestimmt, sondern auch von den Standortfaktoren (Klima und Boden), sowie den Bewirtschaftungsmaßnahmen seitens des Obstbauern und deren Interaktion (Tromp et al. 2005). Wie aus den Ergebnissen dieser Arbeit zu entnehmen ist, wurde in den Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung zur Blüte in den Versuchsjahren 2015 und 2016 ein stärkeres Triebwachstum im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle gemessen. Das verstärkte Triebwachstum zeigte sich dabei in beiden Sorten als Funktion einer Steigerung der durchschnittlichen Trieblänge oder einer größeren Anzahl an Neutrieben. Dabei unterschied sich das Verhältnis der durchschnittlichen Trieblänge zur Anzahl der Neutriebe zwischen den beiden Versuchsjahren, sodass 2015 in beiden Sorten das stärkere Triebwachstum vor allem durch eine größer durchschnittliche Trieblänge, bei gleicher Anzahl Trieb zustande gekommen war. 2016 hingegen durch eine größere Anzahl an Neutrieben bei gleicher durchschnittlicher Trieblänge. Laut *McArtney et al.* (1996) führt das Entfernen von Blüten (reproduktiven Sinks) zur Vollblüte zu einem verstärkten Wachstum der sekundären Kurztriebe. Dabei nimmt nicht nur die durchschnittliche Trieblänge der Triebe zu, sondern auch deren Anzahl. In dieser Studie konnte gemessen werden, dass je früher eine Ausdünnmaßnahme stattfindet, desto mehr sekundäre Kurztriebe größer 5 cm wachsen. Dies wäre eine mögliche Erklärung, warum die Anzahl der Neutriebe hier im Versuch in den Behandlungsstufen mit Handausdünnung nicht anstieg. *Seehuber et al.* (2010) und (2013) konnte in ihren Versuchen zur maschinellen Ausdünnung mit der Bonner-Maschine im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen kein verstärktes Triebwachstum an Birnen und Äpfeln visuell feststellen, trotz Unterschiede im Fruchtbehang zwischen den Versuchsbäumen. *Palmer et al.* (1997) begründete in seinem Versuch an Braeburn das verstärkte Triebwachstum an Bäumen mit geringem Fruchtbehang damit, dass in der frühen Wachstumsphase mehr Ressourcen/ Kohlenstoff für das Triebwachstum zur Verfügung stehen. Bezogen auf die vorliegenden Versuchsergebnisse würde dies bedeuten, dass trotz der Schädigung bzw. teils massiven Reduktion der Blattfläche durch die maschinelle Ausdünnung, die Fotosyntheseleistung der verbleibenden Blattfläche mehr als ausreichend war um das Triebwachstum zu fördern.

Um den Einfluss des Fruchtbehangs auf das Triebwachstum zu minimieren, wurde deshalb zeitnah nach der maschinellen Blütenausdünnung eine Handausdünnung in den entsprechenden Behandlungsstufen durchgeführt. Unerwarteterweise führte dies nicht zu einem höheren Triebzuwachs, im Vergleich zu den entsprechenden Behandlungsstufen ohne Handausdünnung. Hintergrund hierfür könnte sein, dass die Handausdünnung in beiden Sorten in drei Etappen erfolgte und der Zieelertrag in beiden Versuchsjahren erst nach dem Junifruchtfall Anfang Juli eingestellt wurde. Laut *Tromp et al.* (2005) ist das hauptsächliche Triebwachstum der sekundären Kurztriebe bereits drei bis vier Wochen nach der Vollblüte abgeschlossen. Lediglich die Langtriebe wachsen noch, je nach Versorgungsstatus des Baumes, bis zum Sommer weiter, sodass im Grunde der zusätzliche Effekt der Handausdünnung, verbunden mit einem geringeren Fruchtbehang, auf den Triebzuwachs zu gering gewesen sein könnte.

6.5.2. Auxin-Export aus den Triebspitzen

Als weiterer Indikator für das Triebwachstum der Versuchsbäume wurde der Indol-3-Essigsäure (IAA) Export aus den Triebspitzen der sekundären Kurztriebe gemessen. Hintergrund hierfür ist, dass IAA in den Triebspitzen junger wachsender Triebe gebildet und basipetal in Richtung der Wurzel transportiert wird und daher als Indikator für das Triebwachstum gilt (Bangerth 1989a, Schröder et al. 2012).

Besonders auffällig an den vorliegenden Versuchsergebnissen war, dass sich generell die messbare Menge an IAA deutlich zwischen den beiden Versuchsjahren unterschied. Mussten 2015 zwei Triebspitzen zusammengefasst werden um Werte im messbaren Bereich zu erzielen, lag man 2016 schon bereits mit einer Triebspitze innerhalb der Kalibriergerade. Inwiefern sich die Unterschiede zwischen den Versuchsjahren anhand der unterschiedlichen Zusammensetzung des Triebwachstums erklären lassen, konnte nicht geklärt werden. Um hier eine präzisere Aussage treffen zu können würden weitere Versuchsjahre und eine größere Datengrundlage helfen.

Innerhalb der Versuchsjahre zeigte sich vor allem bei `Gala` ein höherer IAA-Export aus den Triebspitzen der maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen. Das damit assoziierte verstärkte Triebwachstum konnte durch die manuellen Messungen zum Vegetationsende bestätigt werden. Ebenfalls konnten Übereinstimmungen zwischen den IAA-Analysen der Prohexadion-Calcium-Behandlungsstufen und den manuellen Triebmessungen jener gezeigt werden. Interessanterweise konnten in beiden Sorten 2016 zum zweiten Analysetermin keine Unterschiede zwischen den

Behandlungsstufen mehr festgestellt werden. Dies könnte unter anderem daran gelegen haben, dass zu diesem Zeitpunkt das Hauptwachstum der sekundären Kurztriebe einzelner Behandlungsstufen bereits abgeschlossen gewesen ist (Tromp et al. 2005) und daher der Auxinexport insgesamt reduziert war. Ebenfalls kann ein hoher Blütenbesatz das Triebwachstum verzögern und somit eine mögliche Erklärung für die Ergebnisse der zweiten IAA Messung sein (Forshey und Elvfing 1989).

6.5.3. Regalis-Behandlungen

Die zweimaligen Behandlungen mit Prohexadion-Calcium führten in `Gala` und `Elstar` zu einer signifikanten Reduktion des saisonalen Gesamtriebzuwachses. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit diversen Prohexadion-Calcium-Studien der vergangenen Jahre (Greene 2008, Greene 2007, Mata et al. 2006, Medjdoub et al. 2005, Rademacher et al. 2005, Rademacher et al. 2004, Miller 2002, Basak 2001). Dabei führten die Behandlungen in erster Linie dazu, dass die durchschnittliche Trieblänge im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle reduziert wurde, nicht aber die Anzahl der Triebe. *Basak* (2001) konnte in seinem Versuch an `Elstar` ebenfalls eine deutliche Reduktion der durchschnittlichen Trieblänge durch eine Prohexadion-Calcium-Behandlung messen. Im Gegensatz zu *Basak* (2001) blieb allerdings in den Versuchen dieser Arbeit die Anzahl der Triebe zwischen den entsprechenden vergleichbaren Behandlungsstufen konstant.

Die entscheidende Aussage der vorliegenden Ergebnisse ist jedoch, dass durch die Prohexadion-Calcium Behandlungen der Triebzuwachs in den maschinell ausgedünnten Behandlungsstufen auf das Niveau der unbehandelten Kontrolle bzw. der Handausdünnung, reduziert werden konnte.

6.5.4. Triebwachstum und Junifruchtfall

Versuche von *Quinlan und Preston* (1971) und *Gruber und Bangerth* (1990) zeigten, dass innerhalb eines Fruchtstandes das Entfernen der Triebspitze zu einem höheren Fruchtansatz führt. Bezogen auf die vorliegenden Versuchsergebnisse, bedeutet dies im Umkehrschluss allerdings auch, dass ein stärker wachsender sekundärer Kurztrieb das Gegenteil bewirken kann und somit den Fruchtansatz verringert bzw. den Fruchtfall innerhalb eines Fruchtstandes verstärkt.

Generell konnten anhand der Versuchsergebnisse keine Zusammenhänge zwischen dem Triebwachstum und dem Fruchtfall im Allgemeinen festgestellt werden.

6.5.5. Fazit Triebwachstum

Bei genauerer Betrachtung der Einzelwerte des saisonalen Gesamtzuwachses beider Sorten ist die hohe Streubreite der baumspezifischen Messwerte, unabhängig der Behandlungsstufe und Wiederholung, auffällig. Dies legt nahe, dass neben dem Fruchtbehang oder der maschinellen Ausdünnung, weitere Einflussfaktoren das Triebwachstum beeinflusst haben könnten. Hierzu können unter anderem die Baumgesundheit, die allgemeine Wüchsigkeit des Baums, der Vorjahresertrag oder der Blütenbesatz zählen (Forshey und Elvfing 1989). Interessanterweise zeigen auch die Triebmessungen an den markierten Blütenbüscheln keine Abhängigkeit des Triebzuwachses von der Anzahl Früchte je Blütenbüschel (Daten nicht veröffentlicht). Hier nahm die Trieblänge sogar tendenziell mit der Anzahl der Früchte zu.

Generell reagieren in der Pflanzenwelt die meisten Pflanzen auf mechanisch induzierten Stress unter anderem durch Wind mit einem kompakteren Wachstum (Biddington 1986). Dieses kompaktere Wachstum resultiert in den allermeisten Fällen aus einem geringeren Triebgrößenzuwachs an den gestressten Bäumen, wobei der Stress dabei einhergeht mit einer höheren internen Ethylenkonzentration (Robitaille 1974). Hierzu haben unter anderem Versuche mit Ethephon gezeigt, dass eine höhere Ethylenkonzentration zu einer Reduktion der Triebgröße bei gleichzeitiger Zunahme des Triebdurchmessers führen kann (Robitaille 1974). Diese Erkenntnisse aus der Literatur stehen konträr zu den im Versuch beobachteten und gemessenen Ergebnissen.

Die entscheidende Frage, ob es einen direkten oder indirekten Einfluss der maschinellen Ausdünnung auf das Triebwachstum der Bäume gab, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht vollständig beantwortet werden.

6.6. Einfluss der Ausdünnung auf die Alternanz

Die Brechung von Alternanzerscheinungen durch Ausdünnung ist ein zentraler Punkt in der Apfelproduktion. Neben einer sortentypischen Neigung zur Alternanz, zeigten die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auch einen zeitlichen Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt der Ausdünnmaßnahme und deren Einfluss auf die Brechung bzw. Verringerung der Alternanzerscheinungen.

Generell konnte in der Sorte `Gala`, welche bekanntermaßen eine geringe Anfälligkeit gegenüber Alternanzerscheinungen aufweist (Atay et al. 2013, Crassweiler et al. 2005), durch die maschinelle

Blütenausdünnung die Stärke der Wiederblüte im Folgejahr so verbessert werden, dass in jedem der Versuchsjahre ein Vollertrag zu erwarten gewesen wäre. Auch in anderen Studien zur maschinellen und chemischen Ausdünnung zeigte sich eine stärkere Wiederblüte in den Behandlungsstufen mit Blütenausdünnung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (Seehuber et al. 2013, Hennen et al. 2012, Weibel et al. 2008, Lafer 2003, Link 2002, Ferree und Schmid 2001, Fischer 1995).

Im Gegensatz zu `Gala` ist die Sorte `Elstar` generell sehr anfällig gegenüber Alternanzerscheinungen (Krasniqi et al. 2014). Dies zeigte sich auch eindeutig in den vorliegenden Versuchsergebnissen. So konnte zwar durch die maschinelle Blütenausdünnung die Wiederblüte der Versuchsbäume im Folgejahr leicht verbessert werden, jedoch nicht in dem Umfang, dass ein Vollertrag zu erwarten gewesen wäre. Folglich mussten als Konsequenz Ertragseinbußen im Folgejahr in Kauf genommen werden. Hierbei gilt zu erwähnen, dass die Versuche in einer `Elstar`-Anlage durchgeführt wurden, mit bereits bestehender Alternanzproblematik. Dies war gleichbedeutend damit, dass sich die Versuchsbäume bereits in einem physiologischen Ungleichgewicht zwischen wachsen und fruchten befanden, verbunden mit einem übermäßig hohen Blütenbesatz der Bäume im „ON-Jahr“. Diese Ausgangslage der Bäume kann zwar als ideal bzw. sehr praxisnah angesehen werden, allerdings erforderte allein der hohe Blütenbesatz der Bäume im „ON-Jahr“ schon generell eine sehr massive Ausdünnungsmaßnahme. Daher ist es sehr wahrscheinlich, wie auch die Ertragsdaten der verschiedenen Behandlungsstufen nahelegten (Kapitel 5.1 und 5.2), dass trotz der frühen Ausdünnmaßnahme noch zu viele Blüten bzw. Früchte an den Bäumen verblieben sind, um durch die maschinelle Ausdünnung einen alternanzbrechenden Effekt zu erzielen. In Abbildung 43 ist der Zusammenhang zwischen dem Fruchtbehang und der Nachfolgeblüte im Folgejahr beider Sorten abgebildet.

Die Hintergründe der Alternanzerscheinungen sind, wie bereits in Kapitel 2.4. erwähnt, Wechselwirkungen zwischen der Blütenknospenentwicklung und der Präsenz des Phytohormon Gibberellin, welches unter anderem in Samenanlagen der heranwachsenden Früchte synthetisiert wird. Hieraus ergibt sich, dass mit steigender Anzahl Früchte pro Baum auch der Gibberellin-Status im Baum erhöht was sich wiederum negativ auf die Bildung der Blütenknospen auswirkt (Meland 2009, Tromp et al. 2005, Hoad 1983, Buban et al. 1982). Der „optimale“ Fruchtbehang liegt laut Jäger (1997) bei der Sorte `Elstar` in Abhängigkeit des Pflanzabstandes, der Erziehungsform der Bäume und dem Baumalter im Bereich zwischen 90 und 105 Früchten (< 15 kg) je Baum. In den

Versuchen von *Krasniqi et al.* (2014) zeigten die Versuchsbäume erst bei einem Ertrag unter 10 kg je Baum keine Alternanzerscheinungen und ein ausreichende Wiederblüte im Folgejahr. Wie auch Anhand der vorliegenden Ergebnisse zu sehen war, zeigten die Versuche von *Meland* (2009) ebenfalls, dass je erfolgreicher die Blütenausdünnung, gleichbedeutend mit einem geringen Fruchtbehang der Bäume, desto höher die Wiederblüte. Zudem konnte in jenem Versuch gezeigt werden, dass nur bei einer sehr intensiven Blütenausdünnung ein Vollertrag im Folgejahr realisiert werden konnte.

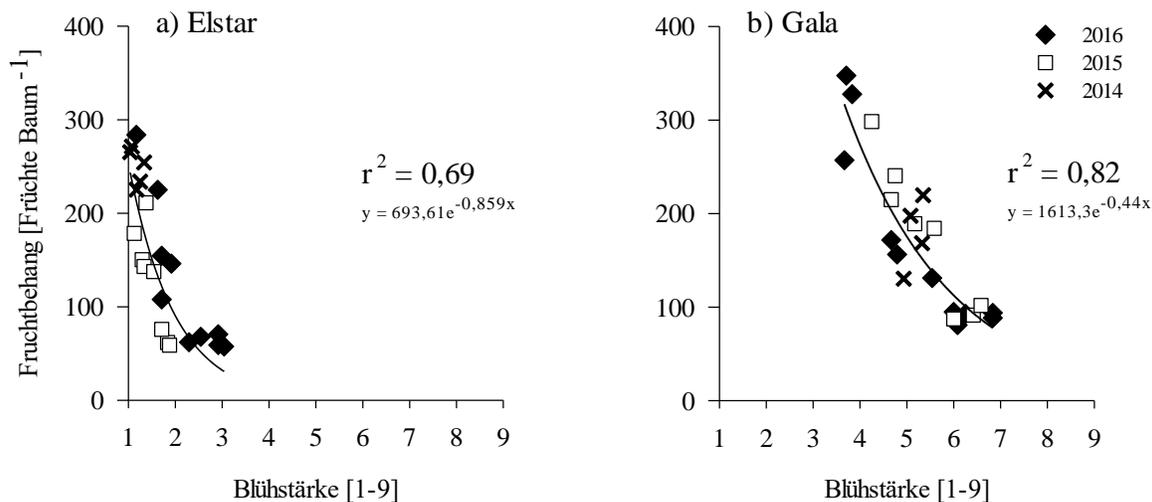


Abbildung 43. Zusammenhang zwischen dem Fruchtbehang der Bäume zur Ernte [Früchte Baum⁻¹] und der Nachfolgeblüte im Folgejahr der Sorten `Elstar` (a) und `Gala` (b) in den Versuchsjahren 2014 bis 2016. Die Nachfolgeblüte ist ausgedrückt über die Blühstärke anhand der Skala 1 bis 9. [1 = keine Blüte; 9 = Weißblüte]. (r^2 gibt den Korrelationskoeffizienten wieder).

Im Gegensatz zur Sorte `Gala` wirkte sich bei `Elstar` eine anschließende Handausdünnung nur im Versuchsjahr 2016 förderlich auf die Wiederblüte aus. Hintergrund hierfür könnte sein, dass im Versuchsjahr 2015 die Handausdünnung der Bäume im Gegensatz zu 2016 zu einem sehr späten Zeitpunkt stattgefunden hatte. Auch die Versuche von *Hehnen et al.* (2012) zeigten keinen positiven Effekt einer späten Handausdünnung nach dem Junifruchtfall, auf die Wiederblüte. Dagegen berichtet *Jäger* (1997) von einer schwachen aber trotzdem positiven Stimulierung der Wiederblüte selbst bei einer späten Handausdünnung im August kurz vor der Ernte.

Diverse Studien, unter anderem von *Harley et al.* (1942), *Fulford* (1960), *Childers et al.* (1995) und *Elsysy und Hirst* (2017) zeigten, dass das Entfernen von Blättern einen Einfluss auf die Blütenbildung haben kann. Der Einfluss hängt jedoch stark von der Intensität und dem Zeitpunkt

der Maßnahme ab (Elsysy und Hirst 2017, Tustin et al. 1996, Davis 1957). In den vorliegenden Versuchsergebnissen konnten in beiden Sorten keine negativen Auswirkungen der „Entblätterung“ bzw. der Reduktion der Blattmasse durch die maschinelle Ausdünnung auf die Blütenbildung festgestellt werden. Das könnte vor allem an der zeitlichen Differenz zwischen der Ausdünnmaßnahme und der Bildung der Blütenknospen liegen und der Tatsache, dass es sich bei der maschinellen Ausdünnung nicht um eine totale, sondern nur um eine teilweise Entblätterung handelt. Zudem sind zur Blüte in erster Linie nur Primärblätter entwickelt, die im Vergleich zu den sich im Anschluss entwickelnden Sekundärblättern nur einen geringen Teil ausmachen. Die Versuche von *Elsysy und Hirst* (2017) haben gezeigt, dass eine vollständige Entfernung der Primärblätter am Blütenbüschel keinen Einfluss auf die Blütenbildung am dazugehörigen sekundärer Kurztrieb hatte.

Praktische Erfahrungen haben gezeigt, dass es gerade bei sehr Alternanz anfälligen Sorten wie z.B. `Elstar`, `Boskoop` oder `Fuji` meistens mehrere Jahre bedarf um Alternanz wieder zu brechen. Hintergrund hierfür ist in der Regel, dass die Ausdünnmaßnahmen zur Blüte im „ON-Jahr (Weißblüte)“ viel zu schwach ausfallen um einen alternanzbrechenden Effekt zu erzielen und somit die Alternanzproblematik ins nächste Jahr mitgezogen wird.

6.7. Zusammenfassung Diskussion

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse noch einmal in Bezug auf die angeführten Versuchsfragen zusammengefasst:

Kann mittels der maschinellen Ausdünnung der Fruchtbehang zielgerichtet in Abhängigkeit definierter Parameter verändert werden?

Die vorliegenden Versuchsergebnisse zur maschinellen Ausdünnung mit der `Darwin`-Maschine haben gezeigt, dass sich die Ausdünnwirkung zielgerichtet und witterungsunabhängig über die Drehzahl der `Darwin`-Spindel steuern lässt. Hierbei konnte in der Sorte `Gala` über alle drei und in `Elstar` über zwei Jahre ein linearer Zusammenhang zwischen dem Fruchtbehang und der Spindeldrehzahl festgestellt werden. Diese Reproduzierbarkeit der Ausdünnergebnisse ist ein wesentlicher Vorteil der maschinellen Ausdünnung im Vergleich zur chemischen Ausdünnung.

Welche Auswirkungen hat die maschinelle Ausdünnung auf die Fruchtqualität und ggf. die Lagerfähigkeit der Früchte?

Die Versuche haben gezeigt, dass sich eine frühe und effektive Ausdünnmaßnahme zum Zeitpunkt der Blüte förderlich auf die Fruchtgröße und die Ausfärbung der `Gala`- und `Elstar`-Früchte auswirkt. Weitere für die Qualität der Früchte wichtige Kriterien wie das Kalium-Calcium-Verhältnis wurden nicht negativ beeinflusst. Auch dann nicht, wenn für die Mineralstoffaufnahme wichtige Primärblattfläche durch die maschinelle Ausdünnung beschädigt wurde.

Wie stark werden Primärblattfläche und Blüten durch die maschinelle Ausdünnung verletzt und welche physiologischen Folgen ergeben sich daraus?

Bei der Bewertung der von der maschinellen Ausdünnung hervorgerufenen Schäden an Blüten und Blätter konnte zwischen drei Kategorien (unbeschädigt – beschädigt – abgeschlagen) unterschieden werden. Je höher die Spindeldrehzahl desto mehr Organe wurden abgeschlagen. Starke Beschädigungen an Blüten und Blätter wurden jedoch unabhängig der Behandlungsstufe nur wenig festgestellt. Hieraus lässt sich folgern, dass die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, wenn ein Organ von einem Faden getroffen wird, dass es dann auch vom Baum abgeschlagen wird. In `Gala` wurde dadurch die Blattfläche um bis zu 37 % und in `Elstar` bis zu 36 % reduziert. Sich aus den Schäden an Blüten und Blättern ergebende negative Konsequenzen auf das Wachstum der jungen Früchte bzw. den Blüten und Fruchtfall konnten nicht festgestellt werden.

Durch die maschinelle Ausdünnung wird der Blüten- und Fruchtfall verstärkt!

Anhand der Versuchsergebnisse konnte kein Einfluss der verschiedenen Behandlungen auf den Blüten- und oder Fruchtfall beider Sorten festgestellt werden. Sowohl für die Intensität des Blüten- als auch des Fruchtfalls war die Anzahl der Blüten bzw. Früchte pro Baum das entscheidende Kriterium. So kann zusammenfassend gesagt werden, je mehr Blüten durch die maschinelle Blütenausdünnung vom Baum abgeschlagen wurden, desto geringer war die Anzahl an Blüten und Früchte, welche vom Baum abgefallen sind. Zusätzlich zeigen diese Ergebnisse, dass ein Effekt der sogenannten „Ethylen-Schock-Theorie“, falls es tatsächlich zu einem „Ethylen-Schock“ am Baum kommen sollte, zu vernachlässigen ist.

***Das vegetative Triebwachstum der Bäume wird durch die maschinelle Ausdünnung verstärkt!
Wenn ja gibt es Möglichkeiten dieses zu reduzieren?***

In den Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung wurde ein stärkeres vegetatives Triebwachstum gemessen als in der unbehandelten Kontrolle. Jedoch konnte kein direkter Zusammenhang zwischen der maschinellen Ausdünnung bzw. dem Fruchtbehang der Bäume um dem stärkeren Triebwachstum herausgestellt werden. Vielmehr deuten die Ergebnisse darauf hin, dass andere Faktoren z.B. die allgemeine Wüchsigkeit, die Baumgesundheit, der Vorjahresertrag etc. einen entscheidenderen Einfluss auf das Triebwachstum gehabt haben als die maschinelle Ausdünnung. Für den praktischen Einsatz der maschinellen Ausdünnung ist vor allem wichtig, dass durch die zweimalige Behandlung mit Prohexadion-Calcium nach einer maschinellen Ausdünnung, das Triebwachstum auf Niveau der unbehandelten Kontrolle begrenzt werden kann.

Ist es möglich durch die maschinelle Ausdünnung der Alternanz zielgerichtet entgegenzuwirken?

Die Versuche haben gezeigt, dass durch eine frühe und effektive Ausdünnmaßnahme, wie sie die maschinelle Blütenausdünnung mit der `Darwin`-Maschine darstellt, der Alternanz entgegengewirkt werden kann. So konnte in der Sorte `Gala` in den entsprechenden Behandlungen ein Vollertrag im Folgejahr erwartet werden. In der Sorte `Elstar` führte zwar die maschinelle Ausdünnung auch zu einer verbesserten Wiederblüte, jedoch nicht ausreichend für einen Vollertrag. Gerade bei der Sorte `Elstar` zeigte sich, dass die Brechung der Alternanz nicht innerhalb eines Jahres mit einer Ausdünnmaßnahme zu bewerkstelligen ist.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Sorte `Elstar` über die verschiedenen Varianten hinweg unter Angabe der Zielgröße anhand einer qualitativen Skala von 1 bis 10.

ELSTAR	<i>Zielgröße</i>	UBK	Handausdünnung	200 U min⁻¹	240 U min⁻¹	280 U min⁻¹	320 U min⁻¹	400 U min⁻¹	240 U min⁻¹ + Hand	320 U min⁻¹ + Hand	UBK + Regalis	UBK + Regalis + Hand	320 U min⁻¹ + Regalis	320 U min⁻¹ + Hand + Regalis	Skala	
															1	10
Fruchtbehang Ernte	8	1	8	2	3	4	5	6			1		5		<i>Überbehang</i>	<i>Unterbehang</i>
Fruchtgröße	8	1	7	3	4	5	5	6	8	8	1	7	5	8	<i>klein</i>	<i>groß</i>
Calcium-/ Kaliumverhältnis	1	1	¹⁰ 10	2	3	4	5	6	⁹ 9	¹⁰ 10	2	¹⁰ 10	5	¹⁰ 10	<i>eng</i>	<i>weit</i>
Beschädigung Blüten/ Blätter	1	1	1	4	5	6	7	8							<i>keine</i>	<i>stark</i>
Reduktion Primärblattfläche	1	1	1	3	4	5	5	5	4	5	1	1	5	5	<i>keine</i>	<i>stark</i>
Nachblütefall (Anzahl)	4	⁹ 9		8	7	7	6	6			8		5		<i>schwach</i>	<i>stark</i>
Junifruchtfall (Anzahl)	4	⁹ 9		8	7	7	6	6			9		6		<i>schwach</i>	<i>stark</i>
Saisonaler Triebzuwachs	3	3	4	5	6	7	8	8	6	8	3	3	4	4	<i>schwach</i>	<i>stark</i>
Nachfolgeblüte	9	1	3	1	2	2	2	2	3	3	1	3		3	<i>keine</i>	<i>Weißblüte</i>

Tabelle 19. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Sorte `Gala` über die verschiedenen Varianten hinweg unter Angabe der Zielgröße anhand einer qualitativen Skala von 1 bis 10.

Gala	Zielgröße	UBK	Handausdünnung	200 U min ⁻¹	240 U min ⁻¹	280 U min ⁻¹	320 U min ⁻¹	400 U min ⁻¹	240 U min ⁻¹ + Hand	320 U min ⁻¹ + Hand	UBK + Regalis	UBK + Regalis + Hand	320 U min ⁻¹ + Regalis	320 U min ⁻¹ + Hand + Regalis	Skala	
															1	10
Fruchtbehang Ernte	8	1	8	2	3	4	5	6			1		5		Überbehang	Unterbehang
Fruchtgröße	8	1	7	3	4	5	5	6	8	8	1	7	5	8	klein	groß
Calcium-/ Kaliumverhältnis	1	1	8	3	4	5	6	10	9	10	1	8	9	9	eng	weit
Beschädigung Blüten/ Blätter	1	1	1	4	5	6	7	8							keine	stark
Reduktion Primärblattfläche	1	1	1	3	4	5	5	5	4	5	1	1	5	5	keine	stark
Nachblütefall (Anzahl)	4	9		8	7	6	6	5			8		6		schwach	stark
Junifruchtfall (Anzahl)	4	7		6	5	4	3	3			7		3		schwach	stark
Saisonaler Triebzuwachs	3	3	4	3	5	6	7	8	6	7	2	2	3	4	schwach	stark
Nachfolgeblüte	9	4	8	5	5	5	6	7	8	8	4	8	6	8	keine	Weißblüte

Ausblick

Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass die Relevanz der maschinellen Ausdünnung für den praktischen Obstbau nicht nur in Deutschland in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. Hierfür sprechen einige technische, physiologische aber auch politische Gründe. Hierzu zählen:

- witterungsunabhängige Wirkungsweise mit einer zuverlässigen Ausdünnwirkung in Abhängigkeit der eingestellten Maschinenparameter,
- Reproduzierbarkeit der Ausdünnwirkung bei gleichen Maschineneinstellungen,
- geringer direkter Einfluss der maschinellen Ausdünnung auf physiologische Prozesse am Baum (Blüten- und Fruchtfall und Triebwachstum),
- mögliche Adaption an eine baumspezifische Ausdünnung gesteuert durch die Anzahl Blüten (SmaArt-System),
- mangelnde Alternativen in der ökologischen Produktion bei stark zunehmender Fläche unter ökologischem Anbau und
- politische Ziele zur generellen Reduktion von Pflanzenschutzmittel in der Produktion.

Um die maschinelle Ausdünnung weiter zu forcieren, sollten schwerpunktmäßig zukünftig die Bereiche technische Weiterentwicklung der `Darwin`-Maschine, baumphysiologische Hintergründe und weitere Sorten bzw. Anbausysteme bearbeitet werden.

Für die technische Weiterentwicklung der `Darwin`-Maschine hin zu einer baumspezifischen Blütenausdünnung stehen bereits die einzelnen technischen Komponenten (Kamerasystem, neue `Darwin`-Steuerung, `Darwin`-Control-Software, GPS-System), welche im Rahmen des SmaArt-Projektes entwickelt wurden, zur Verfügung. Für die Praxistauglichkeit dieses Systems, bedarf jedoch noch einiger Feldversuche um zum einen die Blütenerkennung und den Ausdünnalgorithmus zu verbessern bzw. das System auf verschiedene Bedingungen und Sorten anzupassen und auf der anderen Seite das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten, sprich die Robustheit des Gesamtsystems, zu stabilisieren. Weitergedacht könnte die Weiterentwicklung der einzelnen technischen Komponenten nicht nur für den wissenschaftlichen Bereich, sondern auch für andere Applikationen hin zu einem präzisen Obstbau von Nutzen sein. Gerade die Weiterentwicklung des Kamerasystems in Verbindung mit Algorithmus zur Blüten- bzw. Fruchterkennung könnte z.B. im Bereich Pflanzenschutz, Dünung, Ernteschätzung und Ernte ein wesentlicher Fortschritt im praktischen Obstbau darstellen bzw. im wissenschaftlichen Bereich die Datenerhebung deutlich vereinfachen und die Datenmenge (Big-Data-Ansatz) erhöhen.

Im den vorliegenden Versuchsergebnissen konnte durch die Vielzahl an Blüten- und Fruchtzählungen gezeigt werden, dass der Einfluss der maschinellen Ausdünnung auf den Blüten- und Fruchtfall gering ist. Gleiches gilt für das Triebwachstum. Auch hier basieren die Ergebnisse auf einer Vielzahl an Messungen am Versuchsbaum. Um das wissenschaftliche Verständnis für diese baumphysiologischen Prozesse weiter zu vertiefen, wäre die Untersuchung der Genexpression verschiedener Enzyme in Blätter, Blüten und Triebspitzen im Anschluss an eine maschinelle Ausdünnung interessant. Hier könnte ein besonderer Fokus auf dem Phytohormon Ethylen liegen. Die Messung von Ethylen im Feld ist derzeit im größeren und verlässlichen Umfang nicht möglich. Daher würde es sich anbieten Vorstufen von Ethylen bzw. die Genaktivität der an der Ethylenkaskade beteiligten Enzyme in vitro zu untersuchen. Hierzu könnten im direkten Anschluss an die maschinelle Ausdünnung für Blüten, Blätter und Triebspitzen entsprechend ihres Schädigungsgrades Zeitreihen erstellt werden und anschließend Anhand der Ergebnisse die Auswirkungen evaluiert werden. Um die Ergebnisse abzusichern sollten hierzu weitere Versuchssorten aufgenommen werden.

Die dreijährigen Versuche wurden an den für den Bodensee wichtigen Sorten `Gala` und `Elstar` durchgeführt. Um die vorliegenden Versuchsergebnisse weiter zu vertiefen bzw. weitere Empfehlungen für den praktischen Obstbau abzuleiten, sollten daher weitere Sorten und Erziehungssystem in die Betrachtungen mit aufgenommen werden. Zwar wurden in der Vergangenheit schon diverse Versuche mit der `Darwin`-Maschine und anderen Sorten durchgeführt, allerdings wurde hier hauptsächlich die Ausdünnwirkung untersucht und andere Parameter wie Fruchtfall oder Triebwachstum vernachlässigt. Um weitere Daten in diesem Bereich zu bekommen, würde sich ein sogenannter `Big-Data` Ansatz anbieten. Hierbei könnten in kurzer Zeit möglichst viele Daten zu verschiedenen Sorten, Anbausystemen und Regionen gesammelt werden und dadurch detailliertere und wissenschaftlich abgesicherte Empfehlungen für den Umgang mit der maschinellen Ausdünnung erarbeitet werden. Verschiedene Methoden z.B. zur Erfassung des Triebwachstum mittels LIDAR-Technik sind derzeit in der Entwicklung. Auch die Weiterentwicklung der Blüten- und Fruchterkennung macht Fortschritte, sodass schon in naher Zukunft diese Technik zum Einsatz in den Obstanlagen zur Verfügung stehen könnte. Damit allerdings so ein Ansatz von Erfolg sein kann, müssen diese Daten anschließend zentral gespeichert, verknüpft und ausgewertet werden.

VII. Zusammenfassung

Zur Erzielung regelmäßiger Erträge und guter Fruchtqualität stellt die Ausdünnung bei Apfel (*Malus domestica* L.) im heutigen Erwerbsobstbau eine der wichtigsten und zugleich anspruchsvollsten Kulturmaßnahmen dar. Hierbei wird seit einigen Jahren die maschinelle Blütenausdünnung als witterungsunabhängige und umweltfreundliche Methode verstärkt eingesetzt. Um die Auswirkungen der maschinellen Blütenausdünnung auf generative und vegetative Prozesse am Baum zu untersuchen wurde auf den Versuchsflächen des Kompetenzzentrums für Obstbau Bodensee (KOB) in Ravensburg ein dreijähriger Feldversuch, 2014 bis 2016, in den Sorten `Elstar` (Pflanzjahr 2001; M 9) und `Gala` (Pflanzjahr 1998; M 9) durchgeführt. Hierbei wurden die Parameter Fruchtbehang, Fruchtqualität, Blatt- und Fruchtentwicklung, Blüten- und Fruchtfall, Triebwachstum und Wiederblüte in beiden Sorten untersucht. Die Ausdünnung wurde mit einer `Darwin`-Maschine (Fruit-Tec; Markdorf) durchgeführt und erfolgte in allen drei Versuchsjahren kurz vor der Vollblüte (BBCH-Stadium 61-63). Hierbei wurde bei einer konstanten Traktorgeschwindigkeit von 8 km h^{-1} die Drehzahl der Spindel zwischen 200 U min^{-1} und 400 U min^{-1} variiert. Zudem wurde der Einfluss verschiedener Behandlungsstufen maschineller Ausdünnung in Kombination mit einer Handausdünnung und dem zweimaligen Einsatz von Regalis® Plus untersucht.

Die Versuchsergebnisse aller Versuchsjahre zeigten, dass der Fruchtbehang der Bäume durch die maschinelle Blütenausdünnung gezielt reduziert werden kann. Dabei konnte die Ausdünnwirkung durch Erhöhung der Spindeldrehzahl verbessert werden ohne dabei eine Überdünnung, der Versuchsbäume zu verursachen. Die reproduzierbare und witterungsunabhängige Wirkweise der maschinellen Ausdünnung konnte durch einen überwiegend linearen Zusammenhang zwischen dem Fruchtbehang je Baum zur Ernte und der Spindeldrehzahl der `Darwin`-Maschine in beiden Versuchsorten `Gala` und `Elstar` bestätigt werden. In der Sorte `Gala` reichte der alleinige Einsatz der maschinellen Ausdünnung aus um Alternanzerscheinungen im Hinblick auf einen Vollertrag im Folgejahr ausreichend zu reduzieren. Bei der stark alternanzanfälligen Sorte `Elstar` dagegen erwies sich eine Kombination aus maschineller Ausdünnung und anschließender Handausdünnung als erfolgsversprechend für eine gesteigerte Wiederblüte im Folgejahr.

Durch die maschinelle Ausdünnung konnten im Versuch sortenunabhängig die Fruchtgröße der Früchte sowie deren Ausfärbung in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl verbessert werden. Die Kombination mit einer Handausdünnung führte zu einer zusätzlichen Verbesserung des

Fruchtkalibers. Dagegen konnte kein Effekt einer Prohexadion-Calcium (Regalis® Plus) Behandlung auf die Ausfärbung der Früchte festgestellt werden.

Optisch stellt die maschinelle Ausdünnung, ähnlich eines Hagelschlags, eine massive Schädigung von Blüten und Blättern dar. In den durchgeführten Versuchen wurde eine Reduktion der Blattmasse um bis zu 37 % in `Gala` und bis zu 36 % in `Elstar` ermittelt. Der Anteil beschädigter und abgeschlagener Blüten und Blätter stieg dabei in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Verlust an Blatt- und Blütenmasse auf den Blütenfall bzw. das Fruchtwachstum der jungen Früchte konnte in diesen Versuchen nicht festgestellt werden. Zwar konnte gezeigt werden, dass ab einer gewissen Beschädigung der Blüte deren Wahrscheinlichkeit vom Baum abzufallen zunimmt, jedoch war der Anteil an Blüten mit entsprechendem Schädigungsgrad über alle Behandlungsstufen hinweg gering. Dies zeigte, dass wenn ein Faden der `Darwin`-Maschine eine Blüte trifft, die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist dass diese auch abgeschlagen wird.

Des Weiteren konnte kein direkter Einfluss der maschinellen Ausdünnung auf den Nachblütefall oder Junifruchtfall beobachtet werden. Für beide Sorten, `Gala` und `Elstar`, zeigte sich, dass vor allem die Anzahl der Blüten bzw. Früchte pro Baum vor der entsprechenden Fallperiode für die Stärke des Nachblütefalls bzw. Junifruchtfalls verantwortlich waren. Die Wahrscheinlichkeit, dass unbeschädigte Blüten vom Baum abgeworfen werden war somit in der unbehandelten Kontrolle genauso hoch wie in den Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung. Auf Grund dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss einer Beschädigung von Blättern und Blüten durch die maschinelle Ausdünnung auf das Abfallen von Blüten und Früchte vernachlässigbar gering ist. Diese Versuchsergebnisse widerlegen daher die sogenannte „Ethylen-Schock-Theorie“, welche besagt, dass die Ethylen bedingte Stressreaktion des Baumes im Anschluss an die maschinelle Blütenausdünnung der Blüten- und Fruchtfall verstärkt wird.

Als indirekter Einfluss der maschinellen Ausdünnung konnte in beiden Sorten in den Behandlungsstufen mit maschineller Ausdünnung ein verstärktes Triebwachstum gemessen werden, welches auf die Reduktion des Fruchtbehangs zurückgeführt wurde. Eine zusätzliche Handausdünnung zeigte keinen Einfluss auf das Triebwachstum. Ein direkter Zusammenhang zwischen der maschinellen Ausdünnung und dem Triebwachstum der Bäume konnte nicht festgestellt werden, da unter anderem diverse andere Faktoren wie der Gesundheitszustand und die allgemeine Wüchsigkeit der Bäume sowie der Vorjahresertrag Einfluss auf das Triebwachstum haben. Das beobachtete verstärkte Triebwachstum in den Behandlungsstufen

mit maschineller Ausdünnung konnte durch die Kombination mit einer Prohexadion-Calcium Behandlung auf das gleiche Level wie in der unbehandelten Kontrolle reduziert werden.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass die maschinelle Ausdünnung mehr als eine adäquate und umweltfreundliche Alternative zur chemischen Ausdünnung darstellt.

Des Weiteren konnten negative Auswirkungen maschineller Ausdünnung auf Blüten- und Fruchtfall sowie Triebwachstum nicht bestätigt werden.

VII. Summary

To achieve regular yields with good fruit quality, thinning is one of the most important and at the same time most demanding orchard management measures undertaken in commercial apple production (*Malus domestica* L.). Recently, the use of mechanical flower thinning as a weather-independent and environmentally friendly method has increased steadily. To better understand the effects of mechanical flower thinning on generative and vegetative processes in apple trees, a three-year field trial (2014 – 2016) with the cultivars `Elstar` (planting year 2001; M 9) and `Gala` (planting year 1998; M 9) was carried out at the Competence Centre for Fruit Growing (KOB) in Ravensburg, Germany. Relevant fruit quality and yield parameters, as well as physiological parameters for leaf and fruit development, flower and fruit drop, shoot growth and return bloom were determined. Thinning treatments were carried out with a `Darwin`-machine (Fruit-Tec; Markdorf) and took place in all three experimental years shortly before full flowering (BBCH stage 61-63). The spindle speed was varied between 200 and 400 rpm at a constant tractor speed of 8 km h⁻¹. In addition, mechanical thinning treatments were combined with hand thinning and spray applications of prohexadion calcium (Regalis® Plus; BASF).

Results of all trial years showed that mechanical thinning can reliably reduce the crop load of apple trees. In addition, the thinning effect was improved by gradually increasing the spindle speed without causing over-thinning of the trees. In both `Gala` and `Elstar`, a positive linear correlation between crop load per tree and spindle speed could be observed. In `Gala`, a single mechanical thinning treatment could reduce alternate bearing to such an extent that an adequate return bloom and crop load in the following year could be expected. In `Elstar`, a cultivar which is highly susceptible to alternate bearing, a combination of mechanical thinning followed by hand-thinning proved promising to increase return bloom in the year following treatment.

Mechanical thinning treatments increased fruit size and blush colour depending on the spindle speed. An additional hand thinning treatment led to a further improvement in fruit size. On the other hand, no effects of the prohexadion calcium treatments on fruit blush colour were observed.

Mechanical thinning, similar to hail, causes massive visual damage to flowers and leaves. A reduction in leaf mass of up to 37 % in `Gala` and up to 36 % in `Elstar` could be measured in the experiments. For leaves and flowers, the ratio between undamaged and damaged/ removed flowers and leaves increased as a function of spindle speed. However, a direct correlation between the loss of leaf mass and flower drop or growth of the young fruitlets was not observed. Although it could be shown that the probability of a flower falling off the tree increased after

a certain degree of damage to the flower, the proportion of flowers with a corresponding degree of damage was very low. This suggests if a flower is hit by a plastic filament from the `Darwin`-machine, the probability is very high that it will fall off completely.

In addition, no direct influence of mechanical thinning on flower drop immediately postbloom or June fruit drop was observed. In both `Gala` and `Elstar`, the number of flowers or fruit per tree before the corresponding fall period was mainly responsible for the strength of the flower or June drop. The probability for undamaged flowers to fall off the tree in the untreated controls was just as high as in the mechanical thinning treatments. Based on this result, it can be assumed that the leaf and fruit damage caused by the mechanical thinning treatment has a very small effect on the following flower or fruit drop. Furthermore, these results do not support the so-called "ethylene shock theory" which implies an ethylene-based stress reaction within the tree after a mechanical thinning treatment resulting in increased flower and fruit fall.

As an indirect influence of mechanical thinning, an increase in shoot growth was measured for both cultivars in all mechanical thinning treatments, this effect is most likely attributed to the reduction in crop load. An additional hand thinning treatment showed no influence on shoot growth. However, a direct link on shoot growth between the mechanical thinning treatments and the crop load could not be determined, since among other things various other factors (tree health, general tree growth or vigour, previous year's yield etc.) could have also influenced the shoot growth response. The observed increase in shoot growth in the mechanical thinning treatments was reduced to the same level as in the untreated controls by the Prohexadion-Calcium treatment.

The experimental results presented in this thesis show that mechanical thinning is an adequate and environmentally friendly alternative to chemical thinning. In addition, possible negative effects of machine thinning on flower drop and fruit fall as well as shoot growth could not be confirmed.

VIII. Literaturverzeichnis

- Aida, M. and Tasaka, M. (2006). Morphogenesis and patterning at the organ boundaries in the higher plant shoot apex. *Plant molecular biology*, 60(6), 915-928.
- Aggelopoulou, K.D., Wulfsohn, D., Fountas, S., Gemtos, T.A., Nanos, G.D. and Blackmore, S. (2010). Spatial variation in yield and quality in a small apple orchard. *Precision Agriculture*, 11(5), 538-556.
- Amasino, R. (2010). Seasonal and developmental timing of flowering. *The Plant Journal*, 61(6), 1001-1013.
- Assirelli, A., Giovannini, D., Cacchi, M., Sirri, S., Baruzzi, G. and Caracciolo, G. (2018). Evaluation of a New Machine for Flower and Fruit Thinning in Stone Fruits. *Sustainability*, 10(11), 4088.
- Atay, A. N., Koyuncu, F. and Atay, E. (2013). Relative susceptibility of selected apple cultivars to alternate bearing. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 7(20), 81-86.
- Atkinson, C. J., Taylor, L. and Taylor, J. M. (1995). The influence of temperature and water supply on apple fruit growth and the development of orchard-grown trees. *Journal of Horticultural Science*, 70(5), 691-703.
- Baab, G. and Schmitz-Eiberger, M. (2009). Das Nährelement Calcium. *European Fruit Magazine*, 06 (09), 14-17.
- Baab, G. (2009). Damit sie keinen Mangel leiden... Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau. *Besseres Obst*, 07(09), 18-21.
- Bain, J. M. and Robertson, R. N. (1951). The physiology of growth in apple fruits I. Cell size, cell number, and fruit development. *Australian Journal of Biological Sciences*, 4(2), 75-91.
- Bangerth, F. (1989a). Dominance among fruits/sinks and the search for a correlative signal. *Physiologia Plantarum*, 76(4), 608-614.
- Bangerth, F. (1989b). Polar auxin transport in fruit trees in relation to fruit drop. In *International Symposium on the Culture of Subtropical and Tropical Fruits and Crops*, 275, 461-468.
- Bangerth, F. (1997). Can regulatory mechanism in fruit growth and development be elucidated through the study of endogenous hormone concentrations? *VIII International Symposium on Plant Bioregulation in Fruit Production*, 463, 77-88.

- Bangerth, F. (2000). Abscission and thinning of young fruit and their regulation by plant hormones and bioregulators. *Plant Growth Regulation*, 31(1-2), 43-59.
- Barley, R. and Waites, R. (2002). Plant meristems: the interplay of KNOX and gibberellins. *Current Biology*, 12(20), 696-698.
- Basak, A. (2001). Growth and fruiting of 'Elstar' apple trees in response to prohexadione calcium depending on the rootstock. In IX International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production, 653, 117-125.
- Bepete, M. and Lakso, A. N. (1998). Differential effects of shade on early-season fruit and shoot growth rates in 'empire' apple. *HortScience*, 33(5), 823-825.
- Bertschinger, L., Stadler, W., Stadler, P., Weibel, F. and Schumacher, R. (1996). New methods of environmentally safe regulation of flower and fruit set and of alternate bearing of the apple crop. In II Workshop on Pome Fruit, 466, 65-70.
- Bertschinger, L., Dolega, E. and Stadler, W. (2000). Erhöhte Qualitäts- und Ertragssicherheit dank Blütenknospenmanagement. *Schweizer Zeitschrift Obst- und Weinbau*, 12, 261-265.
- Bland, J. (1978). A comparison of certain aspects of ontogeny in the long and short shoots of McIntosh apple during one annual growth cycle. University of Minnesota.
- Blanpied, G. D. (1972). A study of ethylene in apple, red raspberry, and cherry. *Plant Physiology*, 49(4), 627-630.
- BLE (2019). Projekte des Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft in den Förderprogrammen des Projektträgers BLE(ptble). Zugriff. 22.03.2019. https://service.ble.de/ptdb/index2.php?detail_id=79910&site_key=141&zeilenzahl_zae_hler=4719&NextRow=4150
- Biddington, N. L. (1986). The effects of mechanically-induced stress in plants — a review. *Plant Growth regulation*, 4, 103-123.
- Bohner, J. and Bangerth, F. (1988). Effects of fruit set sequence and defoliation on cell number, cell size and hormone levels of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) within a truss. *Plant Growth Regulation*, 7(3), 141-155.
- Botton, A., Eccher, G., Forcato, C., Ferrarini, A., Begheldo, M., Zermiani, M., Moscatello, S., Battistelli, A., Velasco, R., Ruperti B. and Ramina, A. (2011). Signaling pathways mediating the induction of apple fruitlet abscission. *Plant Physiology*, 155, 185–208.

- Breen, K. C., van Hooijdonk, B. M., Tustin, D. S., Wilkie, J. D., Bound, S. A., Middleton, S. G., and Close, D. C. (2012). Changes in fruit set of 'Gala' apple in response to environment and artificial spur extinction. In X International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems, 1058, 77-83.
- Brunner, P. (2013). Impact of metamitron as a thinning compound on apple plants. In XII International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production, 1042, 173-181.
- Buban, T. and Faust, M. (1982). Flower bud induction in apple trees: internal control and differentiation. *Horticultural Reviews*, 4, 174-203.
- BMAS (2019). Das ändert sich im neuen Jahr: Anhebung des gesetzlichen Mindestlohns. Zugriff 22.03.2019. <https://www.bmas.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/das-aendert-sich-im-neuen-jahr.html;jsessionid=59FC2436F189D8876852A5BAE73C3352>.
- Burger, H., Dötterl, S. and Ayasse, M. (2010). Host-plant finding and recognition by visual and olfactory floral cues in an oligolectic bee. *Functional Ecology*, 24(6), 1234-1240.
- Büchele, M. (2018). Betriebsmanagement im Obstbau. In: M. Büchele (Ed.) *Lucas' Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 33. Auflage. ISBN 3818618666.
- Byers, R. E. (1993). Controlling growth of bearing apple trees with ethephon. *HortScience*, 28(11), 1103-1105.
- Byers, R. E. and Carbaugh, D. H. (2002). Effects of thinning time on yield, fruit size, and return bloom of 'York' and 'Golden Delicious' apple trees. *Journal of tree fruit production*, 3(1), 55-62.
- Callejas, R. and Bangerth, F. (1997). Is auxin export of apple fruit an alternative signal for inhibition of flower bud induction? In VIII International Symposium on Plant Bioregulation in Fruit Production, 463, 271-278.
- Celton, J. M., Dheilly, E., Guillou, M. C., Simonneau, F., Juchaux, M., Costes, E., Laurens, F. and Renou, J. P. (2014). Additional amphivasal bundles in pedicel pith exacerbate central fruit dominance and induce self-thinning of lateral fruitlets in apple. *Plant Physiology*, 164(4), 1930-1951.
- Chittka, L., Thomson, J. D., and Waser, N. M. (1999). Flower constancy, insect psychology, and plant evolution. *Naturwissenschaften*, 86(8), 361-377.

- Cin, V. D., Boschetti, A., Dorigoni, A., and Ramina, A. (2007). Benzylaminopurine application on two different apple cultivars (*Malus domestica*) displays new and unexpected fruitlet abscission features. *Annals of botany*, 99(6), 1195-1202.
- Childers, N. F., Morris, J. R. and Sibbett, G. S. (1995). *Modern fruit science*. Horticultural Publications. Gainesville (Fl), 10th edition. ISBN 0938378104.
- Cline, J. A. and Bakker, C. J. (2016). Prohexadione-calcium, ethephon, trinexapac-ethyl, and maleic hydrazide reduce extension shoot growth of apple. *Canadian Journal of Plant Science*, 97(3), 457-465.
- Cline, J., Bakker, C. J. and Gunter, A. (2018). Response of ‘Royal `Gala`’ apple to multiple applications of chemical thinners and the dynamics of fruitlet drop. *Canadian Journal of Plant Science*, 99(1), 1-11.
- Corelli-Grappadelli, L. and Lakso, A. N. (2002). Fruit development in deciduous tree crops as affected by physiological factors and environmental conditions. XXVI International Horticultural Congress: Key Processes in the Growth and Cropping of Deciduous Fruit and Nut Trees, 636, 425-441.
- Costa, G. G., Blanke, M. M. and Widmer, A. (2013). Principles of thinning in fruit tree crops - Needs and novelties. *Acta Horticulturae*, 998, 17-26.
- Costa, G., Botton, A., and Vizzotto, G. (2018). Fruit thinning: advances and trends. *Horticultural Reviews*, 46, 185-226.

-
- Crassweller, R., McNew, R., Azarenko, A., Barritt, B., Belding, R., Berkett, L., Brown, S., Clemens, J., Cline, J., Cowgill, W., Ferree, D., Garcia, E., Greene, D., Greene, G., Hampson, C., Merwin, I., Miller, D., Miller, S., Moran, R., Obermiller, J., Rosenberger, D., Rom, C., Roper, T., Schupp, J. and Stover, E. (2005). Performance of apple cultivars in the 1995 NE-183 regional project planting: I growth and yield characteristics. *Journal of the American Pomological Society*, 59(1), 18-27.
- Cunha, G. A. P. D. (2005). Applied aspects of pineapple flowering. *Bragantia*, 64(4), 499-516.
- Dal Cin, V., Danesin, M., Boschetti, A., Dorigoni, A. and Ramina, A. (2005). Ethylene biosynthesis and perception in apple fruitlet abscission (*Malus domestica* L. Borkh). *Journal of experimental botany*, 56(421), 2995-3005.
- Dal Cin, V., Velasco, R., and Ramina, A. (2009a). Dominance induction of fruitlet shedding in *Malus domestica* (L. Borkh): molecular changes associated with polar auxin transport. *BMC plant biology*, 9(1), 139.
- Dal Cin, V., Barbaro, E., Danesin, M., Murayama, H., Velasco, R., and Ramina, A. (2009b). Fruitlet abscission: a cDNA-AFLP approach to study genes differentially expressed during shedding of immature fruits reveals the involvement of a putative auxin hydrogen symporter in apple (*Malus domestica* L. Borkh). *Gene*, 442(1), 26-36.
- D'Aloia, M., Bonhomme, D., Bouché, F., Tamseddak, K., Ormenese, S., Torti, S., CFoupland, G. and Périlleux, C. (2011). Cytokinin promotes flowering of *Arabidopsis* via transcriptional activation of the FT paralogue TSF. *The Plant Journal*, 65(6), 972-979.
- Damerow, L., Kunz, A. and Blanke, M. M. (2007a). Mechanische Fruchtbehangsregulierung. *Erwerbs-Obstbau*, 49(1), 1-9.
- Damerow, L., Blanke, M. M. and Schulze-Lammers, P. (2007b). Regulierung der Fruchtbehangsdichte im Kernobstanbau. *Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL. Nr 143*, 1-24.
- Dash, M. and Malladi, A. (2012). The AINTEGUMENTA genes, MdANT1 and MdANT2, are associated with the regulation of cell production during fruit growth in apple (*Malus domestica* Borkh.). *BMC plant biology*, 12(1), 98.

- Dash, M., Johnson, L.K. and Malladi, A. (2013). Reduction of fruit load affects early fruit growth in apple by enhancing carbohydrate availability, altering the expression of cell production-related genes, and increasing cell production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(4), 253-262.
- Davis, L. D. (1957). Flowering and alternate bearing. In *Proceedings of the American Society of Horticultural Science*, (70), 545-556.
- Dennis, F. G. F. G. (2000). The history of fruit thinning. *Plant Growth Regulation*, 31(1/2), 1-16.
- Dennis Jr, F. (2003). Flowering, pollination and fruit set and development. *Apples: botany, production and uses*, 153-166.
- Depaepe, T., and Van Der Straeten, D. (2017). Ethylene. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Elsevier, 2nd edition, 1, 403-410. ISBN 9780123948076.
- Donnell, P. J. O., Calvert, C., Atzorn, R. and Wasternack, C. H. M. O. (1996). Ethylene as a signal mediating the wound response of tomato plants. *Science*, 274(5294), 1914.
- Dražeta, L., Lang A., Cappellini, C., Hall, A.J., Volz, R.K. and Jameson, P.E. (2004). Vessel differentiation in the pedicel of apple and the effects of auxin transport inhibition. *Physiologia Plantarum*, 120(1), 162-170.
- Dugardeyn, J. and Van Der Straeten, D. (2008). Ethylene: fine-tuning plant growth and development by stimulation and inhibition of elongation. *Plant science*, 175(1), 59-70.
- Ebert, A. and Bangerth, F. (1985). Veränderungen im Phytohormongehalt und mögliche Beziehungen zur Fruchtentwicklung bei Apfel I. Extrahierbare IAA, GA s, ABA und Ethylen/Changes in the Levels of Phytohormones and Possible Relations to Apple Fruit Development I. Extractable IAA, GA s, ABA and Ethylene. *Gartenbauwissenschaft*, 37-41.
- Eccher, G., Botton, A., Dimauro, M., Boschetti, A., Ruperti, B., and Ramina, A. (2013). Early induction of apple fruitlet abscission is characterized by an increase of both isoprene emission and abscisic acid content. *Plant physiology*, 161(4), 1952-1969.
- Eccher, G., Begheldo, M., Boschetti, A., Ruperti, B., and Botton, A. (2015). Roles of ethylene production and ethylene receptor expression in regulating apple fruitlet abscission. *Plant physiology*, 169(1), 125-137.

- Elsysy, M. A. and Hirst, P. M. (2017). The Role of Spur Leaves, Bourse Leaves, and Fruit on Local Flower Formation in Apple: An Approach to Understanding Biennial Bearing. *HortScience*, 52(9), 1229-1232.
- Estornell, L. H., Agustí, J., Merelo, P., Talón, M., and Tadeo, F. R. (2013). Elucidating mechanisms underlying organ abscission. *Plant Science*, 199, 48-60.
- Evans, R. R., Reid Evans, J., and Rademacher, W. (1996). Prohexadione calcium for suppression of vegetative growth in eastern apples. In VI International Symposium on Integrated Canopy, Rootstock, Environmental Physiology in Orchard Systems, 451, 663-666.
- FAO (2018). Worldwide apple production – FAOSTAT. Zugriff: 22.03.2019. <http://faostat.fao.org>.
- Ferguson, I. B. and Watkins, C. B. (1992). Crop load affects mineral concentrations and incidence of bitter pit in 'Cox's Orange Pippin' apple fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(3), 373-376.
- Ferree, D. C. and Palmer, J. W. (1982). Effect of spur defoliation and ringing during bloom on fruiting, fruit mineral level, and net photosynthesis of 'Golden Delicious' apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 107, 1182-1186.
- Ferree, D. C. and Schmid, J. C. (2001). Chemical thinning 'Gala' apple in the midwest. *Journal of the American Pomological Society*, 55(2), 113.
- Ferree, D. C. and Warrington, I. J. (2003). Apples: botany, production, and uses. CABI. Oxfordshire, 1st edition. ISBN 9780851995922.
- Fischer, M. (1995). Farbatlas der Obstsorten. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart, 1. Auflage. ISBN 9783800155422.
- Forshey C. G. (1976). Factors affecting chemical thinning of apples. *New York's Food and Life Sciences Bulletin*, 64, 1-7.
- Forshey, C. G. and Elfving, D. C. (1989). The relationship between vegetative growth and fruiting in apple trees. *Horticultural reviews*, 11, 229-287.
- Foster, T., Johnston, R. and Seleznyova, A. (2003). A morphological and quantitative characterization of early floral development in apple (*Malus × domestica* Borkh.). *Annals of Botany*, 92(2), 199-206.

-
- Free, J. B. (1960). The behaviour of honeybees visiting flowers of fruit trees. *The Journal of Animal Ecology*, 385-395.
- Friedrich, G. and M. Fischer (2000): *Physiologische Grundlagen des Obstbaues*. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart, 3. Auflage. ISBN 9783800134755.
- Frigerio, M., Alabadí, D., Pérez-Gómez, J., García-Cárcel, L., Phillips, A. L., Hedden, P. and Blázquez, M. A. (2006). Transcriptional regulation of gibberellin metabolism genes by auxin signaling in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 142(2), 553-563.
- Fulford, R. M. (1960). The use of defoliating sprays for the control of biennial bearing in apple. *Journal of Horticultural Science*, 35(3), 202-213.
- Goffinet, M. C., Robinson, T. L., and Lakso, A. N. (1995). A comparison of 'Empire' apple fruit size and anatomy in unthinned and hand-thinned trees. *Journal of Horticultural Science*, 70(3), 375-387.
- Gordon, S. P., Heisler, M. G., Reddy, G. V., Ohno, C., Das, P. and Meyerowitz, E. M. (2007). Pattern formation during de novo assembly of the *Arabidopsis* shoot meristem. *Development*, 134(19), 3539-3548.
- Gordon, S. P., Chickarmane, V. S., Ohno, C., and Meyerowitz, E. M. (2009). Multiple feedback loops through cytokinin signaling control stem cell number within the *Arabidopsis* shoot meristem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(38), 16529-16534.
- Grappadelli, L. C., Lakso, A. N., and Flore, J. A. (1994). Early season patterns of carbohydrate partitioning in exposed and shaded apple branches. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(3), 596-603.
- Greene, D. W. (2007). The effect of prohexadione-calcium on fruit set and chemical thinning of apple trees. *HortScience*, 42(6), 1361-1365.
- Greene, D. W. (2008). The effect of repeat annual applications of prohexadione-calcium on fruit set, return bloom, and fruit size of apples. *HortScience*, 43(2), 376-379.
- Greene, D., and Costa, G. (2012, March). Fruit thinning in pome- and stone-fruit: state of the art. In *EUFRIN Thinning Working Group Symposia*, 998, 93-102.
- Greene, D. D. (2013). Fruit thinning in pome- and stone-fruit: State of the art. *Acta Horticulturae*, 998, 93-102.
- Gruber, J. and Bangerth, F. (1990). Diffusible IAA and dominance phenomena in fruits of apple and tomato. *Physiologia Plantarum*, 79(2), 354-358.

- Haberman, A., Ackerman, M., Crane, O., Kelner, J. J., Costes, E. and Samach, A. (2016). Different flowering response to various fruit loads in apple cultivars correlates with degree of transcript reaccumulation of a TFL 1-encoding gene. *The Plant Journal*, 87(2), 161-173.
- Hansen, P. (1971). 14C-studies on apple trees. VII. The early seasonal growth in leaves, flowers and shoots as dependent upon current photosynthates and existing reserves. *Physiologia Plantarum*, 25(3), 469-473.
- Hansen, P. (1977) Carbohydrate allocation. In *Environmental Effects on Crop Physiology* (Landsberg, J.J. and Cutting, C.V., eds). London: Academic Press, 247–258.
- Harada, T., Kurahashi, W., Yanai, M., Wakasa, Y. and Satoh, T. (2005). Involvement of cell proliferation and cell enlargement in increasing the fruit size of *Malus* species. *Scientia horticulturae*, 105(4), 447-456.
- Harley, C. P., Magness, J. R., Masure, M. P., Fletcher, L. A. and Degman, E. S. (1942). Investigations on the cause and control of biennial bearing of apple trees. US Government Printing Office, No. 1488-2016-123629.
- Hättasch, C., Flachowsky, H., Kapturska, D. and Hanke, M. V. (2008). Isolation of flowering genes and seasonal changes in their transcript levels related to flower induction and initiation in apple (*Malus domestica*). *Tree physiology*, 28(10), 1459-1466.
- Hennen, D., Hanrahan, I., Lewis, K., McFerson, J. and Blanke, M. (2012). Mechanical flower thinning improves fruit quality of apples and promotes consistent bearing. *Scientia horticulturae*, 134, 241-244.
- Hoad, G. V. (1983). Hormonal regulation of fruit-bud formation in fruit trees. *Flowering and Fruit Set in Fruit Trees* 149, 13-24.
- Hocevar, M., Širok, B., Godeša, T. and Stopar, M. (2014). Flowering estimation in apple orchards by image analysis. *Precision Agriculture*, 15(4), 466-478.
- Hoffmann, P. (2014). Lockerbeerigkeit bei Klonen von Spätburgunder (Pinot noir): Analyse von molekularen Markern und der Einfluss von Gibberellin auf die Traubenmorphologie. Dissertation Universität Hohenheim. Zugriff 22.03.2019. Veröffentlicht online: http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2015/1022/pdf/Diss_Petra_Hoffmann.pdf.
- Höhne, F. (2001). Mechanische Ausdünnung im Apfelanbau. *Obstbau*, 26(5), 242-248.

-
- Iqbal, N., Khan, N. A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A. and Khan, M. I. R. (2017). Ethylene Role in Plant Growth, Development and Senescence: Interaction with Other Phytohormones. *Frontiers in plant science*, 8, 475.
- Jäger, W. (1997). Wege aus der Alternanz. *Obstbau*, 22, 123-127.
- Jakopic J, Zupan A, Eler K, Schmitzer V, Stampar F, Veberic R (2015). It's great to be the King: Apple fruit development affected by the position in the cluster. *Scientia Horticulturae*, 194,18-25.
- Jakopic, J., Stampar, F. and Veberic, R. (2018). Daily Dynamics of Sugar and Phenol Contents in Apple Fruitlets during June Drop. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(1), 75-81.
- Jones, K. M. and Koen, T. B. (1985). Temperature effects on ethephon thinning of apples. *Journal of horticultural science*, 60(1), 21-24.
- Jones, K. M., Koen, T. B., Oakford, M. J. and Bound, S. (1989). Thinning 'Red Fuji' apples with ethephon or NAA. *Journal of horticultural science*, 64(5), 527-532.
- Kalaitzis, P., Solomos, T. and Tucker, M. L. (1997). Three different poly`Gala`cturonases are expressed in tomato leaf and flower abscission, each with a different temporal expression pattern. *Plant Physiology*, 113(4), 1303-1308.
- Ke, D. and Saltveit Jr, M. E. (1989). Wound-induced ethylene production, phenolic metabolism and susceptibility to russet spotting in iceberg lettuce. *Physiologia Plantarum*, 76(3), 412-418.
- Kende, H. (1993). Ethylene biosynthesis. *Annual review of plant biology*, 44(1), 283-307.
- Keulemans, J., Brusselle, A., Eyssen, R., Vercammen, J. and Van Daele, G. (1995). Fruit weight in apple as influenced by seed number and pollinizer. In *II Workshop on Pollination*, 423, 201-210.
- KOB (2019). Smart-Projekt – Sensorgestützte, baum-spezifische mechanische Blütenausdünnung in der Apfelproduktion. Zugriff 22.03.2019. <http://www.kob-bavendorf.de/arbeitsbereiche/ertragsphysiologie/smaart-projekt-1>.
- Koike, H., Tamai, H., Ono, T. and Shigehara, I. (2003). Influence of time of thinning on yield, fruit quality and return flowering of 'Fuji' apple. *Journal of the American Pomological Society*, 57(4), 169.

- Kon, T. M., Schupp, J. R., Winzeler, H. E. and Marini, R. P. (2013). Influence of mechanical string thinning treatments on vegetative and reproductive tissues, fruit set, yield, and fruit quality of `Gala` apple. *HortScience*, 48(1), 40-46.
- Kong, T., Damerow, L. and Blanke, M. M. (2009). Einfluss selektiver mechanischer Fruchtbehangsregulierung auf Ethylensynthese als Stressindikator sowie Ertrag und Fruchtqualität bei Kernobst. *Erwerbs-Obstbau*, 51(2), 39-53.
- Konze, J. R. and Kwiatkowski, G. M. (1981). Rapidly induced ethylene formation after wounding is controlled by the regulation of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthesis. *Planta*, 151(4), 327-330.
- Korasick, D. A., Enders, T. A. and Strader, L. C. (2013). Auxin biosynthesis and storage forms. *Journal of experimental botany*, 64(9), 2541-2555.
- Koutinas, N., Pepelyankov, G. and Lichev, V. (2010). Flower induction and flower bud development in apple and sweet cherry. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 24(1), 1549-1558.
- Krasniqi, A. L., Damerow, L., Kunz, A. and Blanke, M. M. (2013). Quantifying key parameters as elicitors for alternate fruit bearing in cv. `Elstar` apple trees. *Plant science*, 212, 10-14.
- Krasniqi, A. L., Blanke, M. M., Kunz, A., Damerow, L., Lakso, A. N. and Meland, M. (2014). Alternate bearing in fruit tree crops: past, present and future. In *International Symposium on Physiological Principles and Their Application to Fruit Production*, 1177, 241-248.
- Larcher, W. (1995). *Ökophysiologie der Pflanzen*, Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart, 5. Auflage. ISBN 3825280748.
- Lafer, G. (2003). Auswirkungen der Applikation verschiedener Bioregulatoren auf die Ertragsleistung, Fruchtqualität, Lagerfähigkeit und vegetative Entwicklung der Apfelsorten `Elstar` und `Gala`. *Erwerbsobstbau*, 45(3), 69-96.
- Lafer, G. (2010). Der optimalen Ausdünnung näher... Erfahrungen mit der mechanischen Ausdünnung in der Steiermark. *Besseres Obst*, 4, 22-25.
- Lakso, A. N., Corelli-Grappadelli, L., Barnard, J. and Goffinet, M. C. (1995). An exponential model of the growth pattern of the apple fruit. *Journal of Horticultural Science*, 70(3), 389-394.

- Lakso, A. N., Wünsche, J. N., Palmer, J. W. and Corelli-Grappadelli, L. (1999). Measurement and modeling of carbon balance of the apple tree. *HortScience*, 34(6), 1040.
- Lakso, A. N. (2008). Early fruit growth and drop-the role of carbon balance in the apple tree. In IX International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems, 903, 733-742.
- Lang, A. and Volz, R. K. (1998). Spur leaves increase calcium in young apples by promoting xylem inflow and outflow. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(6), 956-960.
- Lehrer, M. and Bischof, S. (1995). Detection of model flowers by honeybees: the role of chromatic and achromatic contrast. *Naturwissenschaften*, 82(3), 145-147.
- Lenz F. and Wünsche J. N. (2018): *Biologische Grundlagen des Obstbaus*. In: M. Büchele (Ed.) *Lucas' Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 33. Auflage. ISBN 3818618666.
- León, J., Rojo, E. and Sánchez-Serrano, J. J. (2001). Wound signalling in plants. *Journal of Experimental Botany*, 52(354), 1-9.
- Link, H. H. (2000). Significance of flower and fruit thinning on fruit quality. *Plant Growth Regulation*, 31(1/2), 17-26.
- Link, H. (2002). *Lucas' Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag. 32. Auflage. ISBN 3800155451.
- Link, H. (2018): *Biologische Grundlagen des Obstbaus*. In: M. Büchele (Ed.) *Lucas' Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 33. Auflage. ISBN 3818618666.
- Looney, N. E. (1992). Improving fruit size, appearance, and other aspects of fruit crop "quality" with plant bioregulating chemicals. In VII International Symposium on Plant Growth Regulators in Fruit Production, 329, 120-127.
- Lordan, J., Alins, G., Àvila, G., Torres, E., Carbó, J., Bonany, J. and Alegre, S. (2018). Screening of eco-friendly thinning agents and adjusting mechanical thinning on `Gala`, `Golden Delicious` and `Fuji` apple trees. *Scientia Horticulturae*, 239, 141-155.
- Luckwill, L. C. (1970). The control of growth and fruitfulness of apple trees. *Physiology of tree crops*, 237-254.
- Lyndon, R. F. (1998). *The shoot apical meristem: its growth and development*. Cambridge University Press. 1st edition. Cambridge, ISBN 9780521404570.

- Malladi, A. and Hirst, P. M. (2010). Increase in fruit size of a spontaneous mutant of ‘Gala’ apple (*Malus domestica* Borkh.) is facilitated by altered cell production and enhanced cell size. *Journal of experimental botany*, 61(11), 3003-3013.
- Manfrini, L., Taylor, J. A. and Grappadelli, L. C. (2009). Spatial analysis of the effect of fruit thinning on apple crop load. *European Journal of Horticultural Science*, 74(2), 54.
- Martin, G. C., Romani, R. J., Weinbaum, S. A., Nishijima, C. and Marshack, J. (1980). Abscisic acid and polysome content at anthesis and shortly after anthesis in pollinated, non-pollinated and non-pollinated 'Winter Nelis' pear flowers treated with gibberellic acid. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 105(3), 318-321.
- Martin, G. C., Horgan, R. and Nishijima, C. (1982). Changes in hormone content of pear receptacles from anthesis to shortly after fertilization as affected by pollination of GA3 treatment. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.
- Matsumoto, S., Soejima, J. and Maejima, T. (2012). Influence of repeated pollination on seed number and fruit shape of ‘Fuji’ apples. *Scientia horticultrae*, 137, 131-137.
- Meir, S., Hunter, D. A., Chen, J. C., Halaly, V. and Reid, M. S. (2006). Molecular changes occurring during acquisition of abscission competence following auxin depletion in *Mirabilis jalapa*. *Plant Physiology*, 141(4), 1604-1616.
- McArtney, S., Palmer, J. W. and Adams, H. M. (1996). Crop loading studies with ‘Royal Gala’ and ‘Braeburn’ apples: effect of time and level of hand thinning. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24(4), 401-407.
- McClure, K. A. and Cline, J. A. (2015). Mechanical blossom thinning of apples and influence on yield, fruit quality and spur leaf area. *Canadian journal of plant science*, 95(5), 887-896.
- Medjdoub, R., Val, J. and Blanco, A. (2005). Inhibition of vegetative growth in red apple cultivars using prohexadione-calcium. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(2), 263-271.
- Meland, M. (2009). Effects of different crop loads and thinning times on yield, fruit quality, and return bloom in *Malus x domestica* Borkh. ‘Elstar’. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84(6), 117-121

- Meir, S., Philosoph-Hadas, S., Sundaresan, S., Selvaraj, K. S., Burd, S., Ophir, R., Kochanek, B., Reid, M. S., Jiang, C.Z. and Lers, A. (2010). Microarray analysis of the abscission-related transcriptome in the tomato flower abscission zone in response to auxin depletion. *Plant Physiology*, 154, 1929–1956
- Miller, S. S. (1988). Plant bioregulators in apple and pear culture. *Horticultural reviews*, 10, 309-401.
- Miller, S. S. (2002). Prohexadione-calcium controls vegetative shoot growth in apple. *Journal of tree fruit production*, 3(1), 11-28.
- Mimida, N., Komori, S., Suzuki, A. and Wada, M. (2013). Functions of the apple TFL1/FT orthologs in phase transition. *Scientia Horticulturae*, 156, 106-112.
- Muday, G. K., Rahman, A. and Binder, B. M. (2012). Auxin and ethylene: collaborators or competitors? *Trends in plant science*, 17(4), 181-195.
- Musacchi, S. and Serra, S. (2018). Apple fruit quality: overview on pre-harvest factors. *Scientia Horticulturae*, 234, 409-430.
- Pallas, B., Bluy, S., Ngao, J., Martinez, S., Clément-Vidal, A., Kelner, J. J. and Costes, E. (2018). Growth and carbon balance are differently regulated by tree and shoot fruiting contexts: an integrative study on apple genotypes with contrasted bearing patterns. *Tree physiology*, 38(9), 1395-1408.
- Palmer, J. W., Giuliani, R. and Adams, H. M. (1997). Effect of crop load on fruiting and leaf photosynthesis of 'Braeburn'/M. 26 apple trees. *Tree physiology*, 17(11), 741-746.
- Patterson, S. E. (2001). Cutting loose. Abscission and dehiscence in *Arabidopsis*. *Plant physiology*, 126(2), 494-500.
- Peifer, L., Ottnad, S., Kunz, A., Damerow, L. and Blanke, M. M. (2018). Effect of non-chemical crop load regulation on apple fruit quality, assessed by the DA-meter. *Scientia Horticulturae*, 233, 526-531.
- Pierik, R., Visser, E. J., de Kroon, H. and Voesenek, L. A. (2003). Ethylene is required in tobacco to successfully compete with proximate neighbours. *Plant, Cell & Environment*, 26(8), 1229-1234.
- Pierik, R., Tholen, D., Poorter, H., Visser, E. J. and Voesenek, L. A. (2006). The Janus face of ethylene: growth inhibition and stimulation. *Trends in plant science*, 11(4), 176-183.

-
- Pilar Mata, A., Val, J. and Blanco, A. (2006). Differential effects of prohexadione-calcium on red colour development in 'Royal `Gala`' and 'Fuji' apples. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(1), 84-88.
- Pretorius, J. J. B., Wand, S. J. E. and Theron, K. I. (2004). Fruit and shoot growth following combined girdling and thinning of 'Royal `Gala`' apple trees. *Acta Horticulturae*, 636, 401-407.
- Priestley, C. A. (1960). Seasonal changes in the carbohydrate resources of some six-year-old apple trees. *Annual Report East Malling Research Station 1959*, 70-7.
- Proctor, J. T. A. and Palmer, J. W. (1991). The role of spur and bourse leaves of three apple cultivars on fruit set and growth and calcium content. *HortScience*, 26(6), 789-789.
- Quinlan, J. D. (1969). Mobilization of ^{14}C in the spring following autumn assimilation of $^{14}CO_2$ by an apple rootstock. *Journal of horticultural science*, 44(1), 107-110.
- Quinlan, J. D. and Preston, A. P. (1971). The influence of shoot competition on fruit retention and cropping of apple trees. *Journal of Horticultural Science*, 46(4), 525-534.
- Rademacher, W. (1994). Growth retardants: biochemical features and applications in horticulture. *Plant Bioregulators in Horticulture*, 394, 57-74.
- Rademacher, W., Van Saarloos, K., Porte, J. G., Forcades, F. R., Senechal, Y., Andreotti, C., Spinelli, F., Sabatini, E. and Costa, G. (2004). Impact of prohexadione-Ca on the vegetative and reproductive performance of apple and pear trees. *European Journal of Horticultural Science*, 69(6), 221-228.
- Rademacher, W., Spinelli, F. and Costa, G. (2005). Prohexadione-Ca: modes of action of a multifunctional plant bioregulator for fruit trees. In *X International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production*, 727, 97-106.
- Reinhardt, D., Pesce, E. R., Stieger, P., Mandel, T., Baltensperger, K., Bennett, M., Traas, J., Friml, J. and Kuhlemeier, C. (2003). Regulation of phyllotaxis by polar auxin transport. *Nature*, 426(6964), 255-260.
- Riess, H. W. (2016). *Obstbaumschnitt in Bildern*. Obst- und Gartenbauverlag. München. 33. Auflage. ISBN 9783875960457.
- Riov, J., Dagan, E., Goren, R. and Yang, S. F. (1990). Characterization of abscisic acid-induced ethylene production in citrus leaf and tomato fruit tissues. *Plant Physiology*, 92(1), 48-53.

-
- Robinson, T., Lopez, S., Iungerman, K. and Reginato, G. (2009). Crop load management for consistent production of Honeycrisp apples. *New York Fruit Q*, 17, 24-28.
- Robitaille, H. A. and Leopold, A. C. (1974). Ethylene and the regulation of apple stem growth under stress. *Physiologia Plantarum*, 32(4), 301-304.
- Rupert, B., Cattivelli, L., Pagni, S. and Ramina, A. (2002). Ethylene-responsive genes are differentially regulated during abscission, organ senescence and wounding in peach (*Prunus persica*). *Journal of Experimental Botany*, 53(368), 429-437.
- Sablowski, R. (2007). Flowering and determinacy in *Arabidopsis*. *Journal of experimental botany*, 58(5), 899-907.
- Samuolienė, G., Čeidaitė, A., Sirtautas, R., Duchovskis, P. and Kviklys, D. (2016). Effect of crop load on phytohormones, sugars, and biennial bearing in apple trees. *Biologia plantarum*, 60(2), 394-400.
- Tromp, J. (1983). Flower-bud formation in apple as affected by air and root temperature, air humidity, light intensity, and day length. *Flowering and Fruit Set in Fruit Trees*, 149, 39-48.
- Sapir, G., Baras, Z., Azmon, G., Goldway, M., Shafir, S., Allouche, A., Stern, E. and Stern, R. A. (2017). Synergistic effects between bumblebees and honey bees in apple orchards increase cross pollination, seed number and fruit size. *Scientia Horticulturae*, 219, 107-117.
- Saure, M. (2005). Die Kalziumversorgung von Äpfeln in Abhängigkeit von pflanzlichen Regelungsvorgängen. *Erwerbs-Obstbau*, 47(5), 103-116.
- Schena, M., Lloyd, A. M. and Davis, R. W. (1991). A steroid-inducible gene expression system for plant cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88(23), 10421-10425.
- Schilling, G. (2000). *Pflanzenernährung und Düngung*. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart, 1. Auflage. ISBN 978-3825281892.
- Schröder, M. and Link, H. (2002). Calcium content in apple fruits after thinning treatments in relation to crop load, fruit size and leaf area. *Acta Hort.* 594, 541-545.
- Schröder, M., Link, H. and Bangerth, K. F. (2013). Correlative polar auxin transport to explain the thinning mode of action of benzyladenine on apple. *Scientia horticulturae*, 153, 84-92.

- Schwartau, H. (2018). Obstbau weltweit, in Europa und in Deutschland. In: M. Büchele (Ed.) Lucas' Anleitung zum Obstbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 33. Auflage. ISBN 3818618666.
- Schupp, J. R., Baugher, T. A., Miller, S. S., Harsh, R. M. and Lesser, K. M. (2008). Mechanical thinning of peach and apple trees reduces labor input and increases fruit size. *HortTechnology*, 18(4), 660-670.
- Seehuber, C., Damerow, L., Kunz, A. and Blanke, M. M. (2010). Mechanische Fruchtbehangsregulierung verringerte den Junifruchtfall und verbesserte die Fruchtqualität und Fruchtgröße bei ‚Conference ‘-und ‚Alexander Lucas ‘-Birnen. *erwerbs-Obstbau*, 52(2), 45-53.
- Seehuber, C., Damerow, L. and Blanke, M. M. (2013). Concepts of selective mechanical thinning in fruit tree crops. *Acta Horticulturae*, 998, 77-84.
- Seehuber, C., Damerow, L., Kunz, A., & Blanke, M. M. (2014). Mechanische Fruchtbehangsregulierung bei Apfel verbessert Fruchtgröße, Fruchtfestigkeit, Fruchtausfärbung und die Source: Sink-Verhältnisse mit mehr Einzelfruchtständen (Singlets) bei ‚Gala‘. *Erwerbs-Obstbau*, 56(2), 49-58.
- Shalom, L., Samuels, S., Zur, N., Shlizerman, L., Doron-Faigenboim, A., Blumwald, E. and Sadka, A. (2014). Fruit load induces changes in global gene expression and in abscisic acid (ABA) and indole acetic acid (IAA) homeostasis in citrus buds. *Journal of experimental botany*, 65(12), 3029-3044.
- Shani, E., Yanai, O. and Ori, N. (2006). The role of hormones in shoot apical meristem function. *Current opinion in plant biology*, 9(5), 484-489.
- Sharma, N., Singh, S. K., Mahato, A. K., Ravishankar, H., Dubey, A. K. and Singh, N. K. (2019). Physiological and molecular basis of alternate bearing in perennial fruit crops. *Scientia Horticulturae*, 243, 214-225.
- Shi, B. and Vernoux, T. (2019). Patterning at the shoot apical meristem and phyllotaxis. *Current topics in developmental biology*, 131, 81-107.
- Sinatsch, S., Pfeiffer, B., Toups, I., Zimmer, J. and Benduhn, B. (2010). Comparison of different thinning measures for organic grown apples (cultivar ‚Pinova‘). In *Proceeding of the 14th International Conference on Organic Fruit-Growing*, 22-24.

-
- Smalle, J., Haegman, M., Kurepa, J., Van Montagu, M. and Van Der Straeten, D. (1997). Ethylene can stimulate *Arabidopsis* hypocotyl elongation in the light. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(6), 2756-2761.
- Solomakhin, A. A. and Blanke, M. M. (2010). Mechanical flower thinning improves the fruit quality of apples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(5), 735-741.
- Sorefan, K., Girin, T., Liljegren, S. J., Ljung, K., Robles, P., Galván-Ampudia, C. S., Offringa, R., Friml, J., Yanofsky, M. F. and Østergaard, L. (2009). A regulated auxin minimum is required for seed dispersal in *Arabidopsis*. *Nature*, 459(7246), 583.
- Stösser R. and Büchele M., (2018). *Biologische Grundlagen des Obstbaus*. In: M. Büchele (Ed.) *Lucas' Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 33. Auflage. ISBN 3818618666.
- Streif J. & Kitemann D., (2018). *Fruchtqualität, Ernte und Lagerung*. In: M. Büchele (Ed.) *Lucas' Anleitung zum Obstbau*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 33. Auflage. ISBN 3818618666.
- Strimmer, M. M., Kelderer M. and Pieper, K. (1997). New thinning methods in organic apple growing. *Erwerbsobstbau*, 39(5), 130-136.
- Stutte, G. W. and Gage, J. (1990). Gibberellin inhibits fruit abscission following seed abortion in peach. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 115(1), 107-110.
- Suge, H., Nishizawa, T., Takahashi, H. and Takeda, K. (1997). Phenotypic plasticity of internode elongation stimulated by deep-seeding and ethylene in wheat seedlings. *Plant, Cell & Environment*, 20(7), 961-964.
- Taylor, J. E. and Whitelaw, C. A. (2001). Signals in abscission. *New Phytologist*, 151(2), 323-340.
- Taylor, J. E., Tucker, G. A., Lasslett, Y., Smith, C. J., Arnold, C. M., Watson, C. F., Schuch, W., Grierson, D. and Roberts, J. A. (1991). Poly`Gala`cturonase expression during leaf abscission of normal and transgenic tomato plants. *Planta*, 183(1), 133-138.
- Traas, J. and Doonan, J. H. (2001). Cellular basis of shoot apical meristem development. In *International review of cytology*, 208, 161-206.
- Tromp, J. (1982). Flower-bud formation in apple as affected by various gibberellins. *Journal of Horticultural Science*, 57(3), 277-282.

- Tromp, J., Wertheim, S. J. and Webster, A. D. (2005). Fundamentals of temperate zone tree fruit production. Backhuys Publisher. Leiden (NL). 1st edition. ISBN 9057821524.
- Turktas, M., Inal, B., Okay, S., Erkilic, E. G., Dundar, E., Hernandez, P., Dorado, G. and Unver, T. (2013). Nutrition metabolism plays an important role in the alternate bearing of the olive tree (*Olea europaea* L.). *PloS one*, 8(3), e59876.
- Tustin, D. S., Stanley, C. J. and Adams, H. M. (1996). Physiological and phenological responses of apple trees to artificial reduction of the growth period from harvest to leaf fall. In VI International Symposium on Integrated Canopy, Rootstock, Environmental Physiology in Orchard Systems, 451, 383-404.
- Unrath, C. R. (1999). Prohexadione-Ca: A promising chemical for controlling vegetative growth of apples. *HortScience*, 34(7), 1197-1200.
- Vanneste, S. and Friml, J. (2009). Auxin: a trigger for change in plant development. *Cell*, 136(6), 1005-1016.
- Veal, D., Damerow, L. and Blanke, M.M. (2011). Selective mechanical thinning to regulate fruit set, improve quality and overcome alternate bearing in fruit crops. *Acta Horticulturae*, 903, 775-781.
- Vemmos, S. N. (1995). Carbohydrate changes in flowers, leaves, shoots and spurs of 'Cox's Orange Pippin' apple during flowering and fruit setting periods. *Journal of Horticultural Science*, 70(6), 889-900.
- Vemmos, S. N. and Goldwin, G. K. (1993). Stomatal and chlorophyll distribution of 'Cox's Orange Pippin' apple flowers relative to other cluster parts. *Annals of botany*, 71(3), 245-250.
- Vemmos, S. N. and Goldwin, G. K. (1994). The photosynthetic activity of 'Cox's Orange Pippin' apple flowers in relation to fruit setting. *Annals of Botany*, 73(4), 385-391.
- Vernoux, T., Besnard, F. and Traas, J. (2010). Auxin at the shoot apical meristem. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(4), a001487.
- Vicens, N. and Bosch, J. (2000). Pollinating efficacy of *Osmia cornuta* and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Megachilidae, Apidae) on 'red Delicious' apple. *Environmental Entomology*, 29(2), 235-240.

- Volz, R. K., Ferguson, I. B., Hewett, E. W. and Woolley, D. J. (1994). Wood age and leaf area influence fruit size and mineral composition of apple fruit. *Journal of horticultural science*, 69(2), 385-395.
- Volz, R. K., Tustin, D. S. and Ferguson, I. B. (1996). Pollination effects on fruit mineral composition, seeds and cropping characteristics of 'Braeburn' apple trees. *Scientia horticulturae*, 66(3-4), 169-180.
- Wang, K. L. C., Li, H. and Ecker, J. R. (2002). Ethylene biosynthesis and signaling networks. *The plant cell*, 14(1), 131-151.
- Wang, M., Wang, H., Zhang, Q., Lewis, K. M. and Scharf, P. A. (2013). A hand-held mechanical blossom thinning device for fruit trees. *Applied engineering in agriculture*, 29(2), 155-160.
- Weber, H.J. (2004). Die Handausdünnung ein absolutes Muß! Zugriff 22.03.2019. <http://www.obstbau.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/e8dea7fb20872573c125773e003fe786/00d6b9054136ca43c1256f560043162e?OpenDocument> [11/11, 2014].
- Weibel, F. P., Chevillat, V. S., Rios, E., Tschabold, J. L. and Stadler, W. (2008). Fruit thinning in organic apple growing with optimised strategies including natural spray products and rope-device. *European Journal of Horticultural Science*, 73(4), 145-154.
- Weiler, E. W. (1981). Radioimmunoassay for pmol-quantities of indole-3-acetic acid for use with highly stable [¹²⁵I]- and [³H] IAA derivatives as radiotracers. *Planta*, 153(4), 319-325.
- Westwood, N. (1998). *Temperate-Zone Pomology*. Timber Press. Los Angeles, third edition. ISBN 1604690704.
- Wertheim, S. J. (2000). Developments in the chemical thinning of apple and pear. *Plant growth regulation*, 31(1-2), 85-100.
- Wicke, M. (2015). Ernten ohne Zeitverlust – Anbau- und Arbeitsorganisation in Zeiten des Mindestlohns. *Poma*, 08.
- Widmer, A., Göllés, M. and Leumann, R. (2012). Mechanische Ausdünnung im Obstbau. Merkblatt 1-02-001. Agroscope Wädenswil.
- Wilkie, J. D., Sedgley, M. and Olesen, T. (2008). Regulation of floral initiation in horticultural trees. *Journal of experimental botany*, 59(12), 3215-3228.

- Williams, R. R. and Brain, P. (1985). Honey-bee activity when visiting flowers of the apple cultivars Cox's Orange Pippin and Golden Delicious. *Journal of horticultural science*, 60(1), 25-28.
- Winstel, M. (2012). *Bäume im Stress*. Obstblatt, WOG Raiffeisen e.G., 1.
- Wünsche, J. N. and Lakso, A. N. (2000a). The relationship between leaf area and light interception by spur and extension shoot leaves and apple orchard productivity. *HortScience*, 35(7), 1202-1206.
- Wünsche, J. N. and Lakso, A. N. (2000b). Apple tree physiology: Implications for orchard and tree management. *Compact Fruit Tree*, 33(3), 82-88.
- Xing, L. B., Zhang, D., Li, Y. M., Shen, Y. W., Zhao, C. P., Ma, J. J., An, N. and Han, M. Y. (2015). Transcription profiles reveal sugar and hormone signaling pathways mediating flower induction in apple (*Malus domestica* Borkh.). *Plant and Cell Physiology*, 56(10), 2052-2068.
- Yang, S. F. and Hoffman, N. E. (1984). Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. *Annual review of plant physiology*, 35(1), 155-189.
- Yanik, H., Turktas, M., Dundar, E., Hernandez, P., Dorado, G. and Unver, T. (2013). Genome-wide identification of alternate bearing-associated microRNAs (miRNAs) in olive (*Olea europaea* L.). *BMC plant biology*, 13(1), 10.
- Zhao, Z., Andersen, S. U., Ljung, K., Dolezal, K., Miotk, A., Schultheiss, S. J. and Lohmann, J. U. (2010). Hormonal control of the shoot stem-cell niche. *Nature*, 465(7301), 1089.
- Zoth, M. (2011). Untersuchung zur abgestuften Ausdünnungswirkung der ‚DARWIN‘-Fadenmaschine mittels Staffelung der kinetischen Rotationsenergie. *DGG-Proceedings*, Vol. 1, 2011.
- Zoth, M. (2018). Ertragsoptimierung und Qualitätssicherung im behangkritischen Jahr 2018. Homepage KOB-Bavendorf: <http://www.kob-bavendorf.de/aktuelles>. Zugriff 22.03.2019.
- Zuo, X., Zhang, D., Wang, S., Xing, L., Li, Y., Fan, S., Zhang, L. Ma, J., Zhao, C., Shah, K., An, N. and Han, M. Y. (2018). Expression of genes in the potential regulatory pathways controlling alternate bearing in 'Fuji' (*Malus domestica* Borkh.) apple trees during flower induction. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 579-589.

Eidesstattliche Versicherung

gemäß § 8 Absatz 2 der Promotionsordnung der Universität Hohenheim zum Dr.sc.agr.

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema „*Maschinelle Blütenausdünnung von Apfelbäumen*“ handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.
2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht.
3. Ich habe nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung oder -beratung in Anspruch genommen.
4. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und der strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt.

Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärung bestätige ich. Ich versichere an Eides Statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erklärt und nichts verschwiegen habe.

Ort und Datum

Unterschrift

CURRICULUM VITAE

Andreas Riehle

PERSÖNLICHE DATEN

Geburtstag und Geburtsort 28. August 1987 in Offenburg (Deutschland)
 Kontaktdaten Bruchstraße 8, 77799 Ortenberg, andreas.riehle@web.de

AUSBILDUNG

seit 09/2015 Doktorarbeit zum Thema „Maschinelle Blütenausdünnung von Apfelbäumen“ am Institut für Ertragsphysiologie der Sonderkulturen (340f), Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland (Doktorvater: Prof. Dr Jens Norbert Wünsche)
 10/2013 – 09/2015 Master of Science (M.Sc.) – Pflanzenproduktionssysteme Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland
 01/2013 – 06/2013 Erasmussester – `Swedish University of Agricultural Sciences`, Uppsala, Schweden
 10/2010 – 01/2013 Bachelor of Science (B.Sc.) – Agrarwissenschaften Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland
 09/2007 – 07/2009 Abitur – Technische Oberschule, Freiburg
 09/2004 – 07/2007 Ausbildung zum Weinküfer – Zeller Abtsberg Winzer eG., Offenburg, Deutschland

BERUFLICHER WERDEGANG

seit 07/2019 Betriebsleiter – Obst- und Weinbaubetrieb Riehle, Ortenberg, Deutschland
 seit 03/2017 Technical Manager – AgroFresh Deutschland GmbH, Frankfurt, Deutschland
 04/2014 – 02/2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter – Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB), Ravensburg, Deutschland
 09/2009 – 07/2010 Weinküfer – Weingut Manincor, Kaltern, Italien

AUSZEICHNUNGEN

10/2013 – 09/2014 Deutschlandstipendium der Südwestbank AG
 10/2012 – 09/2013 Deutschlandstipendium der ZG Raiffeisen Karlsruhe
 2007 Landes- und Bundesbester im Ausbildungsberuf Weinküfer/-in des Baden-Württembergischen Industrie- und Handelskammertag

Unterschrift: _____