

- [20] *Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach*: Young's modulus dependent on deformation velocity. ASAE-Paper Nr. 82-3055, St. Joseph, Michigan, 1982.
- [21] *Rinehart, J.S. u. J. Pearson*: Behaviour of metals under impulsive loads. The American Soc. for Metals, Cleveland, Ohio, 1954.
- [22] *Arnold, P.C. u. N.N. Mohsenin*: Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 1, S. 78/84.
- [23] *Moreira, S.M.C., G.W. Krutz u. C.T. Sun*: Simulation of stresses inside the corn kernel. ASAE-Paper Nr. 81-3043, St. Joseph, Michigan, 1981.
- [24] *Zscheischler, J., M. Estler, F. Groß, G. Burgstaller, H. Neumann u. B. Geißler*: Handbuch Mais; Anbau-Verwertung-Fütterung. 3. Aufl. Frankfurt/M.: DLG-Verlag 1984.
- [25] *Wolf, M.J., C.L. Buzan, M.M. McMasters u. C.E. Rist*: Structure of the mature corn kernel. I. Gross anatomy and structural relationships. Cereal Chemistry Bd. 29 (1952) Nr. 5, S. 321/33.
- [26] *Stiefel, E.*: Einführung in die numerische Mathematik. 4. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner 1970.
- [27] *Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach*: Der Einfluß thermischer Vorbehandlung auf die statische Festigkeit von Maiskörnern. Teil 2: Versuchsergebnisse und Diskussion. Grndl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 1, S. 8/12.
- [28] *Chowdhury, M.H. u. W.F. Buchele*: Colorimetric determination of grain damage. Trans. ASAE Bd. 19 (1976) Nr. 5, S. 807/808.
- [29] *Chowdhury, M.H.*: Operators manual digital grain quality tester; Model D-810. Fa. MC Instruments, 6205 NW Karen, Kansas City, MO 64 151.
- [30] *Hertz, H.*: Prinzipien der Mechanik. Gesammelte Werke Bd. III. Leipzig: Johann Ambrosius Barth (Arthur Meiner) 1894.
- [31] *Sass, F., Ch. Bouche u. A. Leitner*: Dubbel; Taschenbuch für den Maschinenbau. Bd. 1, 13. Aufl. Heidelberg, New York: Springer 1974.
- [32] *Segler, G. u. R. Scherer*: Systematische Untersuchungen über einige physikalische Kenngrößen des Getreidekorns in Abhängigkeit vom Feuchtegrad am Beispiel der Maissorte Inra 258. Grndl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 4, S. 121/27.
- [33] *Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach*: Bulk compressibility and Poisson's constant of grains. ASAE-Paper Nr. 84-3045, St. Joseph, Michigan, 1984.

Anlagerung elektrostatisch geladener Flüssigkeitsteilchen beim chemischen Pflanzenschutz im Obstbau

Von Norbert Metz, Biberach, und Eberhard Moser, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.348:632.982.1:621.319

Trotz Neuerungen und Verbesserungen auf dem Gebiet der Pflanzenschutztechnik, die in den letzten Jahren erreicht wurden, sind weitere Bemühungen in der Applikationstechnik insbesondere bei Raumkulturen dringend notwendig. Gerade im Obstbau geht immer noch über die Hälfte der ausgebrachten Wirkstoffe durch Abdrift verloren [1]. Durch die elektrostatische Aufladung der Spritzflüssigkeit wird versucht, eine Erhöhung der Wirkstoffanlagerung zu erreichen, die Abdrift einzuschränken, Kosten zu sparen und die Umweltbelastung zu verringern.

1. Einleitung

Der Abscheidvorgang in Luft dispergierter Flüssigkeitsteilchen an Objekten ist von zahlreichen Faktoren abhängig und physikalisch nur schwer zu erfassen. Neben Flüssigkeits- und Gaseigenschaften wie Tropfengröße, -verteilung, -konzentration, Koagulationsverhalten, Tropfengeschwindigkeit, Lufttemperatur und -feuchte bestimmen im wesentlichen Form, Abmessungen, Aufbau und Struktur des Objekts die Abscheidung.

*) Prof. Dr.-Ing. E. Moser ist Leiter des Fachgebietes "Verfahrenstechnik für Intensivkulturen" am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Dr. sc. agr. N. Metz war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut und ist nun als Fachberater für Pflanzenschutz tätig.

Zur Beschreibung des Anlagerungsverhaltens müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden. So wird im allgemeinen von der Teilchenabscheidung am Einzelobjekt ausgegangen. Diese wird durch das Modell eines Zylinders im Strömungsfeld dargestellt, an dem folgende Abscheideeffekte wirken: Massenkräfte, Diffusion, elektrostatische Kräfte.

2. Massenkräfte und Diffusion

Als Massenkräfte wirken an den Teilchen Trägheitskraft und Schwerkraft. Die Trägheitskraft bedingt, daß im Luftstrom eingebettete Teilchen beim Umströmen eines Objektes nicht den Stromlinien des Trägerluftstromes folgen. Die Größe der Trägheitskraft nimmt somit Einfluß auf den Abscheidegrad η_T ; es gilt:

$$\eta_T = f(\text{Stk}, \text{Re}, \rho_T/\rho_L).$$

Hierin ist

$$\text{Stk} = \frac{C_u v_T d_T^2 \rho_T}{18 \eta_L d_0} \quad (1)$$

die Stokeszahl oder der Trägheitsparameter mit

$$C_u = 1 + \frac{0,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{d_T}$$

als Cunningham-Korrekturfaktor bei Normalbedingungen und

$$\text{Re} = \frac{v_L d_0 \rho_L}{\eta_L} \quad (2)$$

die Reynoldszahl.

Es ist

- d_0 Objektdurchmesser
- d_T Tropfendurchmesser
- v_L Luft- bzw. Strömungsgeschwindigkeit
- v_T Tropfengeschwindigkeit
- η_L dyn. Viskosität der Luft
- ρ_L Dichte der Luft
- ρ_T Tropfendichte.

Hiernach steigt der Abscheidegrad an Zylindern für konstante Reynoldszahlen mit zunehmendem Teilchendurchmesser, zunehmender Anströmungsgeschwindigkeit und abnehmendem Objektdurchmesser an. Bei kleinen Reynoldszahlen ist der Abscheidegrad geringer als bei großen, wobei in diesem Zusammenhang besonders die Strömungsgeschwindigkeit von Bedeutung ist. Ein ähnliches Verhalten ergibt sich, wenn an Stelle eines Zylinders eine umströmte Kugel (Frucht) oder eine Scheibe bzw. ein Band (Blatt) betrachtet werden. Der Cunningham-Korrekturfaktor kann für Teilchendurchmesser über $10 \mu\text{m}$ vernachlässigt werden [2, 3].

In die Stokeszahl geht die Tropfengröße quadratisch ein – je kleiner also der Durchmesser eines Teilchens und damit seine Masse ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß es am Objekt angelagert wird. Daraus erklärt sich die Abdriftgefahr kleiner Tropfen, die wegen der starken Abhängigkeit vom Durchmesser, eine vergleichsweise geringere Masse und damit Trägheit besitzen, als dies für große Tropfen der Fall ist.

Als weitere Massenkraft führt die Schwerkraft zum Absinken der Teilchen und damit zur Anlagerung auf dem Objekt durch Sedimentation. Die Sinkgeschwindigkeit, die ein Teilchen dabei erreichen kann, errechnet sich in Luft gemäß dem Stokesschen Gesetz zu

$$v_S = \frac{(\rho_T - \rho_L) g d_T^2}{18 \eta_L} \quad (3),$$

g Fallbeschleunigung

v_S Sinkgeschwindigkeit,

wobei die Dichte der Luft wegen des kleinen Wertes gegenüber der Teilchendichte ρ_T (Wasser) vernachlässigt werden kann.

Bei Werten des Teilchendurchmessers von weniger als $15 \mu\text{m}$ und mehr als $100 \mu\text{m}$ sind Korrekturen des Stokesschen Gesetzes notwendig, die in der Auflistung der Sinkgeschwindigkeit von Wassertropfen, Tafel 1, berücksichtigt wurden [4].

Die sehr geringen Werte der Sinkgeschwindigkeit bei kleinen Tropfen verdeutlichen deren hohe Abdriftgefahr durch Luftbewegungen wie Wind und Thermik. Zudem wirkt sich die Sinkgeschwindigkeit auf das Strömungsverhalten der Teilchen und damit auf das Anlagerungsverhalten am Objekt aus.

Teilchen folgen mit kleiner werdendem Durchmesser zunehmend den Strömungsumlenkungen. Bei Teilchendurchmessern unterhalb $1 \mu\text{m}$ werden sie zusätzlich durch die Brownsche Bewegung (Diffusion) beeinflusst, die eine Teilchenbewegung in Richtung auf die Objekt Oberfläche bewirken kann.

Weil sehr geringe Teilchengrößen Voraussetzung sind, kommt der Diffusion in Zusammenhang mit der Anlagerung von Sprühtropfen im Pflanzenschutz keine Bedeutung zu.

| Tropfendurchmesser d_{Tr} μm | 10 | 25 | 50 | 100 | 150 | 200 | 500 | 1000 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Sinkgeschwindigkeit v_S cm/s | 0,3 | 1,9 | 7,2 | 25 | 46 | 70 | 200 | 385 |

Tafel 1. Sinkgeschwindigkeiten verschieden großer Wassertropfen.

3. Elektrostatische Kraftwirkungen

Mit der elektrostatischen Aufladung der Spritzflüssigkeit wird versucht, durch elektrische Kraftwirkungen den Abscheidegrad der Flüssigkeitsteilchen zu erhöhen. Als Kräfte kommen in Betracht:

1. die Bildkraft
2. Feldkräfte zwischen Hochspannungsquelle und dem Zielobjekt (bei Verwendung von Koronaelektroden)
3. Feldkräfte zwischen Sprühwolke (Raumladung) und dem Zielobjekt.

Die Bildkraft erreicht die Größe des Teilchengewichts erst ab Tropfenabständen vom Objekt von weniger als $1/10 \text{ mm}$. Bild 1 zeigt hierzu die Bildkraft verschieden großer Tropfen in Abhängigkeit vom Abstand zum Objekt. Als Berechnungsgrundlage wurde eine mittlere Tropfenladung herangezogen,

$$Q_{Kor} = f \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) 4 \pi \epsilon d_T^2 E \quad (4),$$

welche sich für die Koronaaufladung ($f = 0,5$, $\epsilon = 80$, $E = 500 \text{ kV/m}$) ergibt [5].

Auch die möglichen Kraftwirkungen einer Aufladelektrode auf die Flüssigkeitsteilchen am Anlagerungsort sind sehr gering [1].

Eine ausschlaggebende Bedeutung kommt somit nur der Feldstärke zwischen der Sprühwolke und dem Objekt zu, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

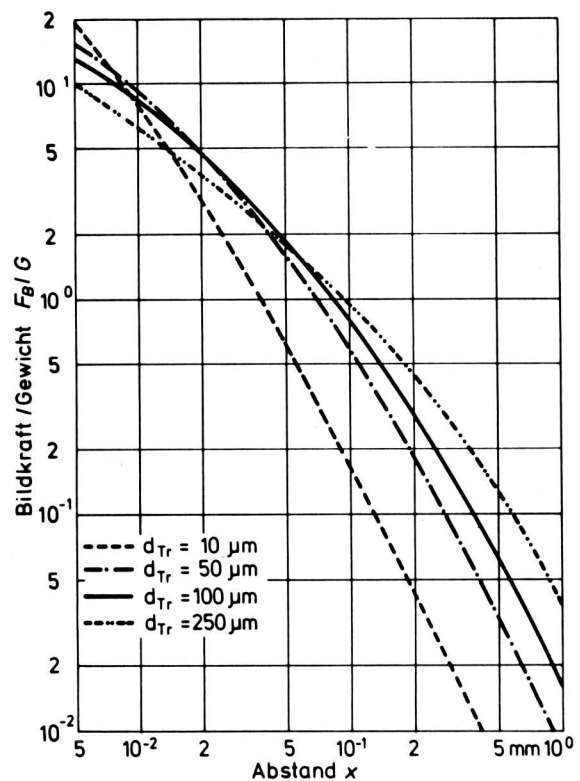


Bild 1. Auf das Tropfengewicht bezogene elektrische Bildkraft in Abhängigkeit vom Abstand Tropfen – Objekt für verschiedene Tropfendurchmesser.

Feldkräfte, die zwischen der geladenen Sprühwolke und dem Zielobjekt wirken, sind im Gegensatz zur Bildkraft auch über größere Entfernungen bedeutsam. Um dies rechnerisch zu erfassen, ist es nötig, die natürlichen Gegebenheiten der Pflanzen durch geeignete Modelle zu ersetzen. So lassen sich – wenn auch nur in grober Vereinfachung – beispielsweise Früchte durch Kugeln und eine Laubwand durch eine ebene Fläche darstellen, Bild 2.

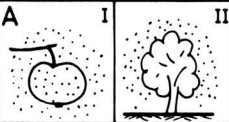
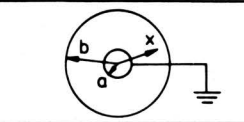
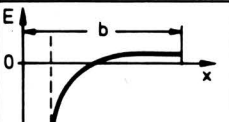

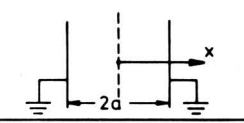
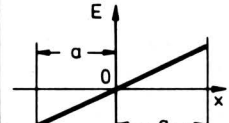

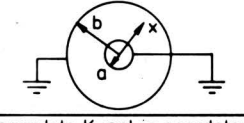
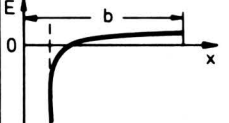
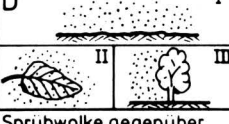
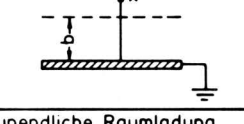
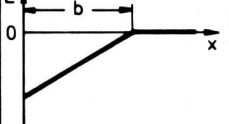
| Natürliche Verhältnisse | Modellvorstellung | Verlauf der Feldstärke | Potential φ Feldstärke E |
|--|---|---|---|
|  Apfel/Baum von Sprühwolke umgeben |  geedete Kugel in kugelförmiger Raumladung |  | $\varphi = \frac{q}{\epsilon_0} \left[\frac{b^2 - x^2}{2} + \left(\frac{a^3}{6} - \frac{ab^2}{2} \right) \frac{1}{x} \right]$ $E = \frac{q}{\epsilon_0} \left[\frac{x}{3} + \left(\frac{a^3}{6} - \frac{ab^2}{2} \right) \frac{1}{x^2} \right]$ |
|  Sprühwolke zwischen zwei Baumreihen |  Raumladung zwischen zwei unendlichen Ebenen |  | $\varphi = \frac{q}{2\epsilon_0} (a^2 - x^2)$ $E = \frac{q}{\epsilon_0} \cdot x$ |
|  Knospe im Geäst |  geedete Kugel in geedeter kugelförmiger Raumladung |  | $\varphi = \frac{q}{6\epsilon} \left[b^2 - x^2 + ab(a+b) \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{x} \right) \right]$ $E = \frac{q}{3\epsilon_0} \left(x - \frac{ab(a+b)}{2x^2} \right)$ |
|  Sprühwolke gegenüber Boden/Blatt/Laubwand |  unendliche Raumladung über der Erde |  | $\varphi = \frac{q}{\epsilon_0} \left(b \cdot x - \frac{x^2}{2} \right)$ $E = \frac{q}{\epsilon_0} (x - b)$ $E = 0 \text{ für } x \geq b$ |

Bild 2. Modelle zur Feldstärkeberechnung.

Der Betrag der elektrischen Kraft, die im Abstand x vom Objekt auf ein Teilchen wirkt, kann durchaus ein Vielfaches des Teilchengewichtes ausmachen. Als Berechnungsgrundlage dient (entsprechend den derzeitigen Aufladeverfahren) eine Raumladungsdichte $\rho = 10 \mu\text{C}/\text{m}^3$. Da diese Größe linear eingeht (vgl. Bild 2), sind die Diagramme leicht auch auf andere Raumladungsdichten übertragbar.

Aufgrund der gegenseitigen Abstoßung der geladenen Teilchen einer Raumladungswolke ist diese bestrebt, sich auszudehnen. Nur in der Nähe von Objekten werden elektrische Anziehungskräfte wirksam, wobei der Umkehrpunkt zwischen Anziehung und Abstoßung von den geometrischen Abmessungen abhängig ist. Dementsprechend unterscheiden sich bei den Beispielen A_I und A_{II} die Zonen, innerhalb denen die geladenen Teilchen sich durch Feldkräfte auf das Objekt zu bewegen. So ist gemäß Bild 3 der Bereich um einen Apfel (Beispiel A_I), in dem eine Anziehung stattfindet,

wesentlich kleiner als derjenige um einen Baum (A_{II}).

Dagegen werden alle Tropfen der Sprühwolke zwischen zwei Baumreihen (Modell B) jeweils ab der Fahrgassenmitte zu den Bäumen hingezogen, wodurch die Kraftwirkungen vergleichsweise größer sind. Ähnliche Verhältnisse finden sich bei den Modellen D in Bild 4.

Die elektrischen Kräfte steigen mit der Ausdehnung der Sprühwolke an. Bei gleicher Raumladung kommen – wie zuvor – den kleinen Sprühtropfen im Verhältnis zu ihren Gewichten die größten elektrischen Kraftwirkungen zu.

Sicherlich besitzen diese Berechnungen nur Modellcharakter, doch sind sie durchaus geeignet darzulegen, mit welchen zusätzlichen Anlagekräften beim Pflanzenschutz mit elektrostatischer Aufladung gerechnet werden kann. Die Werte für die elektrischen Anziehungskräfte mit dem z.T. über 100fachen des Teilchengewichtes stehen dabei im Einklang mit den Ergebnissen anderer Autoren [6, 7].

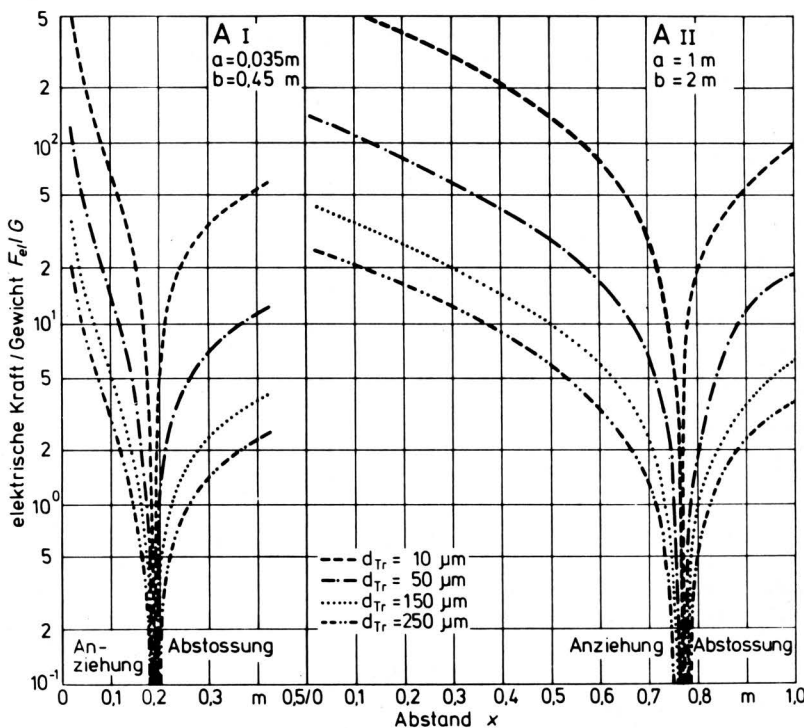


Bild 3. Auf das Tropfengewicht bezogene elektrische Kraft in Abhängigkeit vom Abstand Tropfen – Objekt für verschiedenen Tropfendurchmesser; Modell A_I und A_{II} nach Bild 2.

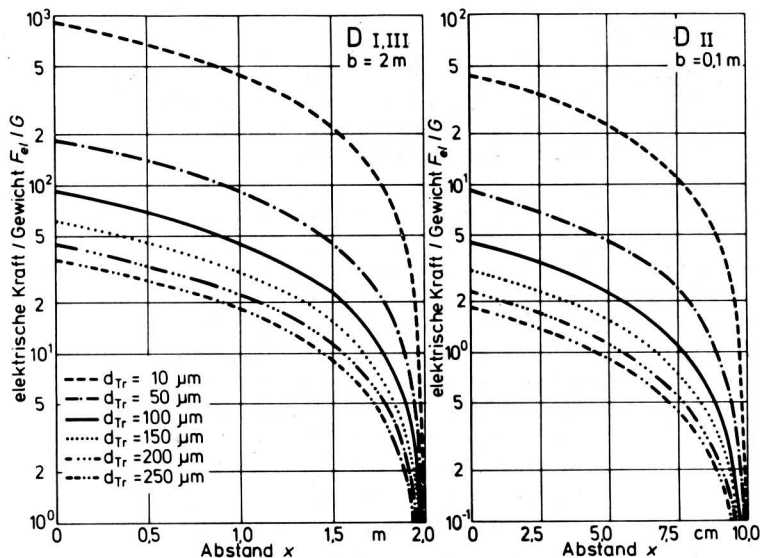


Bild 4. Auf das Tropfengewicht bezogene elektrische Kraft in Abhängigkeit vom Abstand Tropfen – Objekt für verschiedene Tropfendurchmesser; Modelle D_I bzw. D_{III} und D_{II} nach Bild 2.

4. Anlagerungsänderung durch die Aufladung

4.1 Ladungsmenge

Eine elektrostatische Aufladung von Flüssigkeitsteilchen kann nicht beliebig hoch erfolgen. So unterliegt die Tropfenoberfläche nach elektrischer Aufladung einem von innen nach außen gerichteten elektrostatischen Druck, der dem nach innen gerichteten mechanischen Druck durch die Oberflächenspannung σ entgegenwirkt und zum Tropfenzerfall führen kann. Grenzwert der Aufladung ist das sogenannte "Rayleigh-Limit" [8] mit

$$Q_{Ray} = 6,7 \pi \sqrt{\sigma \epsilon r^3} \quad (5)$$

Gelingt es, die "Kontaktaufladung", bei der die Hochspannung direkt an der Düse anliegt, mit ausreichender Spannung zu betreiben und den problematischen Ladungsabfluß einzudämmen, so können mit ihr die höchsten Tropfenladungen erzeugt werden, Bild 5.

Der theoretische Maximalwert (obere Kennlinie) kann an Luft nicht erreicht werden; Grenzwerte bilden für Festkörper die Durchschlagsladung Q_d sowie für Flüssigkeiten das Rayleigh-Limit.

Im Bereich kleiner Tropfendurchmesser bleibt die Ladungsmenge bei der Koronaaufladung geringer als bei der Kontaktaufladung.

Wie sich die unterschiedliche Aufladung der Spritzflüssigkeit auf die Stärke des Spritzbelags auswirkt, ist Bild 6 zu entnehmen. Durch die Verwendung einer zusätzlichen leistungsstarken Spannungsquelle konnte die an den Düsen anliegende Spannung von 6 kV auf 10 kV erhöht werden. Der damit verbundene Anstieg der Tropfenladung und die Steigerung der Raumladungsdichte verbessern deutlich die Anlagerung der Spritzflüssigkeit. Die höchste Anlagerungssteigerung findet im gebläseabgewandten Baumbereich (hinten) statt. Durch die Kontaktaufladung mit der Spannung 10 kV konnte in diesem Bereich sogar eine Verdoppelung der Beläge, bezogen auf Sprühen ohne Aufladung, erzielt werden. Vorne, im gebläsezugewandten Bereich, sind die Belagssteigerungen niedriger, jedoch ist auch hier der höheren Tropfenladung die bessere Wirkung zuzuordnen.

Die Wechselwirkung zwischen mechanisch-dynamischen Kräften und elektrischen Kraftwirkungen hinsichtlich der Flüssigkeitsanlagerung an den Blättern findet in diesem Beispiel einen deutlichen Niederschlag. Bei hohen Luftgeschwindigkeiten in Gebläsenähe (vorne, $v_L = 4-5$ m/s) fällt die Wirkung der elektrostatischen Aufladung der Spritzflüssigkeit deutlich geringer aus, da die mecha-

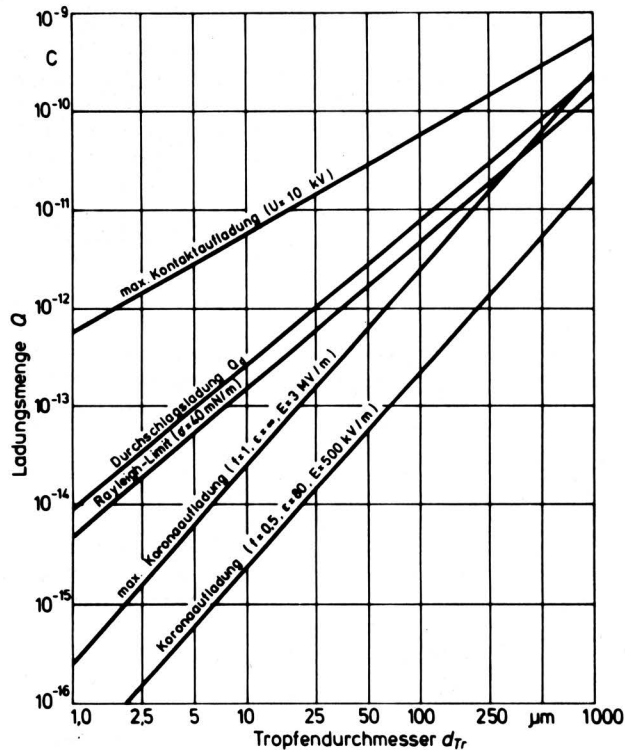


Bild 5. Ladungskennlinien, Ladungsmenge als Funktion des Tropfendurchmessers, errechnet für Spritzflüssigkeit bei verschiedenen Arten der Aufladung.

nisch-dynamischen Kräfte überwiegen. Nach ausreichender Abnahme der Luftgeschwindigkeit durch den Widerstand des Blattwerks (hinten, $v_L = 0-1$ m/s) treten die Wirkungen der elektrischen Kräfte deutlicher hervor und führen zu den höheren Belagssteigerungen.

Höheren Tropfenladungen ist somit ein höherer Wert des Spritzbelags zuzuordnen, wobei dieser Effekt bei geringeren Luftgeschwindigkeiten deutlicher ausgeprägt ist.

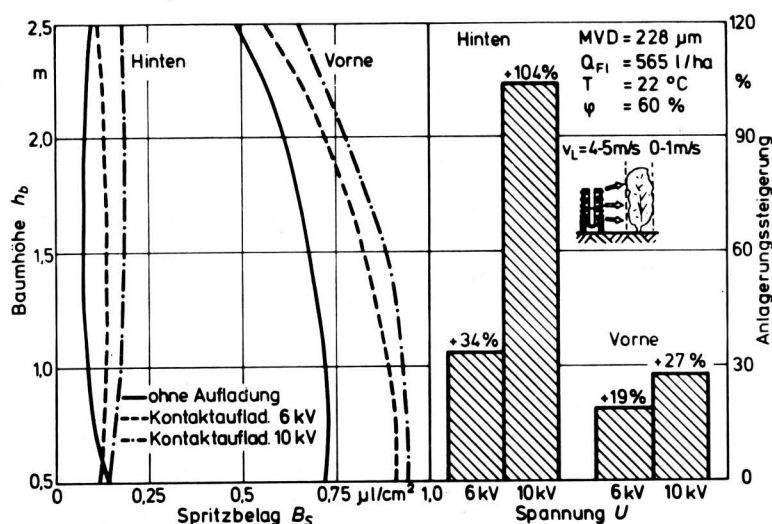


Bild 6. Spritzbelag in Abhängigkeit von der Höhe der Anlagerung (links) und Steigerung der Anlagerung durch elektrostatische Aufladung der Flüssigkeit (rechts) bei unterschiedlich starker Aufladung.

4.2 Tropfengröße

Für die Feldversuche stand u.a. ein Raumsprühergerät mit Radialgebläse zur Verfügung, das vom Hersteller mit einer Vorrichtung zur Influenzaufladung der Spritzflüssigkeit versehen war. Eine Verringerung der Luftgeschwindigkeit von 70 m/s auf 60 m/s, gemessen am Luftaustritt des Radialgebläses, hatte bei konstanter Aufwandmenge eine Vergrößerung der durch pneumatische Zerstäubung erzeugten Tropfen von 170 μm auf 275 μm (MVD) zur Folge.

Trotz der etwas geringeren Luftgeschwindigkeit wird durch die größeren Tropfen ein höherer Wert des Spritzbelags in Reihe 1 erzielt, Bild 7.

Aufgrund der besseren Umströmung kleiner Tropfen kommt der Variante mit MVD = 170 μm der geringere Belagswert zu, wobei jedoch die Influenzaufladung der Umströmung deutlich entgegenwirkt und die Abscheidung verbessert (+ 20 %).

In Reihe 2 wirkt sich dieser Unterschied wesentlich geringer aus, und nach erfolgter Geschwindigkeitsabnahme sowie einer Änderung des Tropfengrößenspektrums erfährt auch die großtropfige Variante eine Belagssteigerung durch die Influenzaufladung von knapp 20 %. Die Reduzierung der Tropfengröße ist auf eine Anlagerung großer Tropfen in der ersten Baumreihe und auf ihre Sedimentation in Gerätenähe zurückzuführen, wie auch die erhöhten Bodendriftwerte ausweisen. Eine Verringerung der Bodendrift als Folge der Influenzaufladung macht sich bei der 170 μm -Variante bereits ab 2 m Entfernung vom Sprühergerät bemerkbar. Mit zunehmender Entfernung ist für beide Tropfengrößen-Varianten eine Driftreduzierung durch die Aufladung feststellbar.

Für die großtropfige Variante ergeben sich aufgrund des größeren Tropfenvolumens und der damit verbundenen höheren Sinkgeschwindigkeit und längeren Existenzzeit der Tropfen insgesamt höhere Bodendriftwerte. Der Vergleich der Spritzbeläge und Bodendriftwerte weist dementsprechend der kleintropfigen Variante die höhere Luftdrift zu.

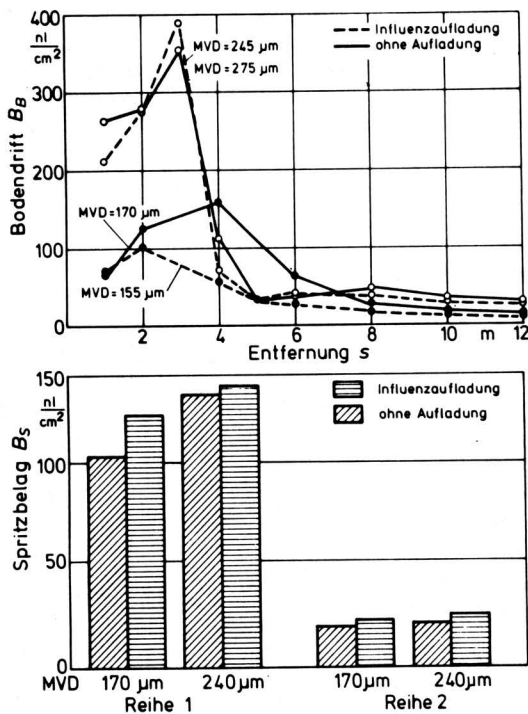


Bild 7. Abdrift von Spritzflüssigkeit auf den Boden in Abhängigkeit der Entfernung (oben) und Spritzbelag am Obstbaum (unten) für verschiedene Tropfengrößen mit und ohne Aufladung.

4.3 Aufwandmenge

Da eine Erhöhung der Aufwandmenge in der Regel mit einer Änderung der Tropfengröße einhergeht, können die zuvor erläuterten Zusammenhänge prinzipiell auch für den Einfluß der Aufwandmenge herangezogen werden, wie ein Experiment, Bild 8, bestätigt.

Bei Konstanthalten aller anderen Applikationsfaktoren vergrößert eine Erhöhung der Aufwandmenge um 50 % (von 533 l/ha auf 800 l/ha) den Belag auf der ersten Baumreihe um 84 %. Dies ist wiederum auf die höhere Anlagerungseffizienz großer Tropfen zurückzuführen. Die Wirkung der elektrostatischen Aufladung geht dementsprechend von + 32 % auf + 6 % Belagszunahme zurück.

In Reihe 2 finden sich nach Abnahme der Luftgeschwindigkeit und des Tropfendurchmessers für die elektrostatische Aufladung bei großer Aufwandmenge die höchsten Belagssteigerungen, hervorgerufen durch die Änderung des Kräfteverhältnisses zwischen mechanisch-dynamischen und elektrischen Kraftwirkungen.

Bei dem ökonomischen Zwang zur Verringerung der Aufwandmengen im Obstbau kommt der Tropfengröße eine entscheidende Bedeutung zu. Um denselben theoretischen Bedeckungsgrad zu erhalten, müssen Aufwandmenge und Tropfengröße im gleichen Verhältnis reduziert werden, wobei allerdings die Änderung der Anlagerungsrate nicht berücksichtigt wird. Im vorliegenden Beispiel geht mit einer Senkung der Aufwandmenge um 33 % (von 800 l/ha auf 533 l/ha) eine Reduzierung der Belagsmassen um 55 % einher. Die Tropfengröße wurde dabei nur um 13 % verringert. Selbst bei einer Anpassung der Wirkstoffkonzentration an die reduzierte Aufwandmenge — wie dies in der Praxis üblich ist, um dieselbe Wirkstoffmenge je ha auszubringen — läge immer noch ein Wirkstoffverlust von umgerechnet 10 % vor.

Beim Sprühen mit Koronaaufladung ergibt sich eine Änderung des Belags, die der Änderung der Aufwandmenge entspricht, was verdeutlicht, daß Umströmungen entgegengewirkt wird. Bei Anwendung der elektrostatischen Aufladung kann in diesem Falle die Aufwandmenge ohne Wirkstoffverlust reduziert werden.

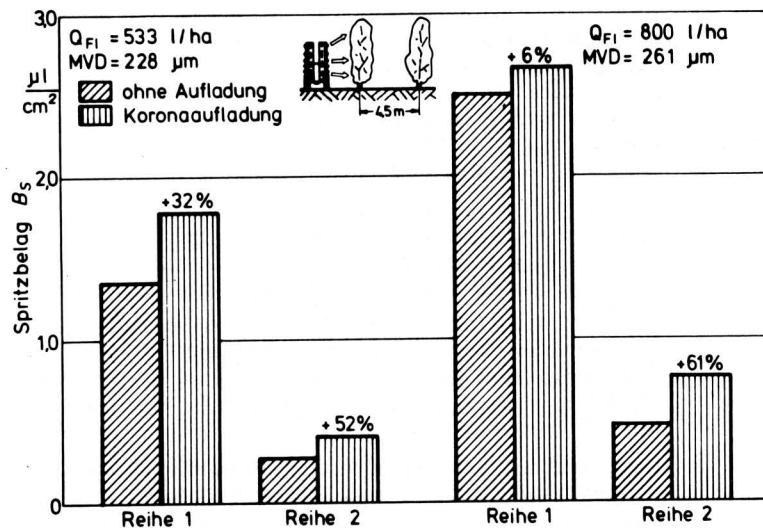


Bild 8. Spritzbelag an zwei Obstbaumreihen bei verschiedenen Aufwandmengen und Tropfengrößen mit und ohne Aufladung.

4.4 Trägerluftgeschwindigkeit

Bei einer Erhöhung der Luft- und damit auch der Tropfengeschwindigkeit ist grundsätzlich mit einer Anlagerungssteigerung zu rechnen (vgl. Abschn. 2). Dies gilt für starre Objekte und trifft für Obstbäume nicht unbedingt zu, Bild 9.

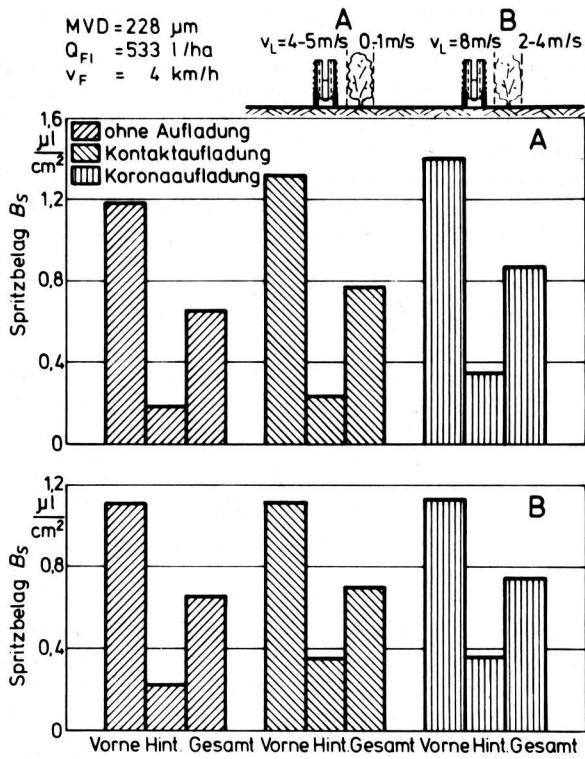


Bild 9. Spritzbelag bei verschiedenen Werten der Luftgeschwindigkeit und unterschiedlicher Aufladung.

Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit (Variante B, unten) führt zur Steigerung der mechanisch-dynamischen Kräfte, wodurch die Flüssigkeitsaufladung im gebläsenahen Baumbereich ("vorne", jeweils 1. Säule) wirkungslos bleibt. Gleichzeitig wird dort durch die verstärkte Ausrichtung der Blätter im Luftstrom etwas weniger Spritzflüssigkeit angelagert; es gelangt mehr Flüssigkeit in die gebläseabgewandte Baumhälfte, wodurch "hinten" eine Belagerhöhung eintritt. So ergibt sich beim Verfahren ohne Aufladung für beide Luftgeschwindigkeiten derselbe Wert für den mittleren Gesamtbelag. Nach Abnahme der Luftgeschwindigkeit verändern sich die Kräfteverhältnisse zugunsten der elektrischen Kraftwirkungen und führen zu einem starken Belagsanstieg im hinteren Baumbereich.

Bei der Variante A mit geringerer Luftgeschwindigkeit ist für beide Arten der Aufladung eine Belagssteigerung zu verzeichnen, die besonders im hinteren Baumbereich stark zum Tragen kommt.

Bedingt durch die Leistungsfähigkeit der zur Kontaktaufladung eingesetzten Hochspannungsgeneratoren konnte nur mit einer Spannung von 6 kV gearbeitet werden. Dies erklärt die etwas günstigere Wirkung der Koronaaufladung, die mit einer Hochspannung von 70 kV betrieben wurde.

Das Beispiel zeigt deutlich, daß theoretische Grundlagen und Laborversuche nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse im Bestand übertragbar sind. Gerade die Raumkultur Baumobstbau setzt durch eine Vielzahl biologischer Faktoren, wie u.a. Obst- und Erziehungsart, Blattflächenentwicklung sowie Oberflächeneigenschaften der Blätter, einer "Vorhersage" bezüglich Tropfenanlagerung und Abdrift deutliche Grenzen. Dennoch sind Laborversuche unumgänglich, um unter vereinfachten und kontrollierten Bedingungen Ergebnisse zu erarbeiten, die zur Klärung der Einflußparameter im Bestand beitragen.

5. Laborversuche – Einzeltropfenanlagerung

Die Komplexität der Einflüsse, welche während der Feldversuche die Anlagerung eines Teilchens am Blatt bestimmen, erschwert eine eindeutige Zuordnung zwischen Änderung der Anlagerung und auslösendem Faktor.

Nur unter Laborbedingungen können gleichbleibende Bedingungen gewährleistet und eine Beschränkung anlagerungsbeeinflussender Faktoren erreicht werden. So war es möglich, im Gegensatz zur turbulenten Luftströmung und dem Tropfenspektrum des Sprüherätes in der Praxis, hier die Anlagerung von Einzeltropfen konstanter Größe (50–250 μm) bei gleichmäßigem Luftstrom (bis 4 m/s) am Objekt (Kreisscheibe, $d_0 = 6 \text{ cm}$) zu messen und entsprechende Zusammenhänge zu untersuchen. Die Anlagerungsraten, welche sich für Tropfen verschiedener Größe in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit ergeben, sind in **Bild 10** dargestellt.

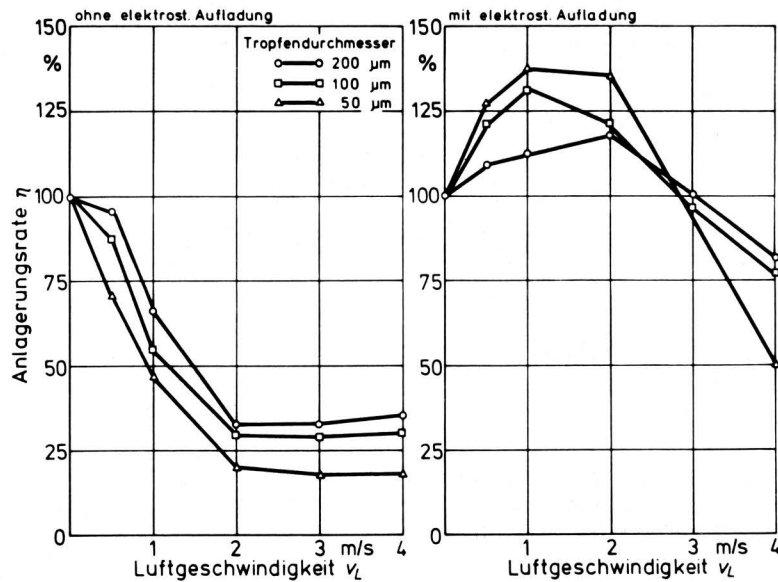


Bild 10. Anlagerungsrate an einer Kreisfläche in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, links ohne, rechts mit elektrostatischer Aufladung.

Ohne Luftstrom ($v_L = 0 \text{ m/s}$) sedimentieren die Tropfen aufgrund der Schwerkraft auf das Objekt, wobei sowohl für ungeladene als auch für geladene Tropfen $d \geq 50 \mu\text{m}$ eine vollständige Anlagerung ($\eta = 100 \%$) stattfindet.

Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit nimmt die Anlagerungsrate ab – die Umströmungsneigung der Teilchen nimmt zu. Das ist besonders der Fall bei kleinen Tropfen, die aufgrund ihrer geringen Trägheit den Stromlinien in stärkerem Maße folgen, als dies für große Tropfen der Fall ist. Bei weiterer Zunahme der Luftgeschwindigkeit tritt eine Steigerung der Anlagerungsrate ein. Der Umkehrpunkt wird dabei für große Tropfen früher, also bei geringeren Luftgeschwindigkeiten, erreicht. Für Geschwindigkeiten über 4 m/s ist entsprechend der Theorie und im Einklang mit anderen Untersuchungen eine weitere Zunahme der Anlagerungsrate zu erwarten.

Die rechte Bildhälfte beschreibt die Anlagerungsverhältnisse für geladene Tropfen. Bei geringen Luftgeschwindigkeiten erfolgt zunächst ein Anstieg der Anlagerungsrate, welcher entsprechend dem günstigen Verhältnis Ladung/Masse bei kleinen Tropfen am ausgeprägtesten ausfällt. Eine weitere Steigerung der Luftgeschwindigkeit und damit der mechanisch-dynamischen Kräfte führt zu einer relativen Abnahme der Wirkung elektrostatischer Kräfte. Entsprechend den Ergebnissen ohne Aufladung sind für größere Luftgeschwindigkeiten auch hier Umkehrpunkte der Kurven mit folgenden Anlagerungszunahmen zu erwarten, die jedoch außerhalb des Meßbereiches liegen.

Setzt man die Anlagerungsraten mit und ohne Aufladung zueinander in Beziehung, so zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Anlagerung durch die elektrostatische Aufladung, Bild 11. Dieser ist bei den kleinen Tropfen ($50\ \mu\text{m}$) entsprechend ihrer geringen Trägheit und der daraus resultierenden Eigenschaft, den Stromlinien in hohem Maße zu folgen, einerseits und der starken Auswirkung der elektrischen Kräfte aufgrund des günstigen Ladung/Masse-Verhältnisses andererseits am stärksten ausgeprägt. Mit wachsendem Tropfendurchmesser und damit zunehmender Tropfenmasse fällt der Anstieg der Anlagerung dementsprechend geringer aus.

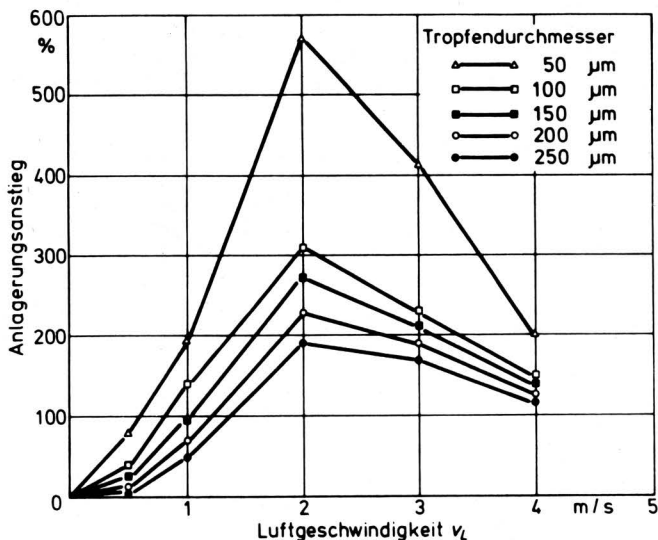


Bild 11. Änderung der Anlagerungsrate als Folge der elektrostatischen Aufladung in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit für verschiedene Tropfendurchmesser.

Eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit führt durch die Zunahme der mechanisch-dynamischen Kraftwirkungen zu einem geringeren Anlagerungsanstieg. Der durch die Aufladung hervorgerufene hohe Anstieg der Anlagerung um z.T. ein Vielfaches des Wertes ohne Aufladung steht durchaus im Einklang mit Ergebnissen, die aus der elektrischen Gasreinigung bekannt sind [9], und läßt sich durch die hohen Tropfenladungen nahe dem Rayleigh-Limit erklären.

Die Tatsache, daß für alle Tropfengrößen bei einer Luftgeschwindigkeit von $v_L = 2\ \text{m/s}$ ein Maximum vorliegt, läßt sich auf die Grenzschicht zurückführen. Diese bildet sich an der Objekt Oberfläche aus, wobei ihre Dicke wesentlich von der Geschwindigkeit des strömenden Mediums abhängt und ein Minimum durchläuft [10]. Im vorliegenden Fall scheint dies bei einer Geschwindigkeit von $2\ \text{m/s}$ der Fall zu sein. Die vorbeistromenden Tropfen können unter diesen Bedingungen näher an das Objekt gelangen, wodurch die entfernungsabhängige Bildkraft sich stärker auf den Anlagerungsanstieg infolge elektrostatischer Aufladung auswirkt.

Der Vergleich zwischen Labor- und Feldversuchen zeigt für das Tropfenverhalten weitgehende Übereinstimmung. So ist großen Tropfen und hohen Luftgeschwindigkeiten jeweils ein dementsprechend höherer Spritzbelag auf der dem Luftstrom zugewandten Objektseite zuzuordnen. Die günstigste Wirkung der elektrostatischen Aufladung hinsichtlich Anlagerungssteigerung und Abdriftreduzierung läßt sich jeweils bei geringen Luftgeschwindigkeiten und kleinen Tropfendurchmessern beobachten.

In Abhängigkeit von der Benetzbarkeit, der Gesamtblattfläche, dem Ausrichten der Blätter im Luftstrom, der herrschenden Luftgeschwindigkeit und der Tropfengröße kann es trotz einer höheren Anlagerungsrate durch das Abrollen der Tropfen oder ihr Wiederablösen von den Blättern durch den Trägerluftstrom zu einer Verfälschung der genannten grundsätzlichen Abhängigkeiten kommen. Feld- und Laborversuche stehen somit durchaus im Einklang, wobei jedoch stets die zeitlichen, biologischen, technischen und klimatischen Bedingungen zu berücksichtigen sind.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen theoretischer Überlegungen wurden in der vorliegenden Arbeit Tropfenladungen und Raumladungsdichten der geladenen Sprühwolke berechnet sowie die Wechselwirkungen zwischen mechanisch-dynamischen und elektrischen Kräften erläutert. Es zeigte sich, daß für kleine Tropfen ein günstigeres Verhältnis Ladung/Masse besteht, als dies für große Tropfen der Fall ist.

Die Bildkraft eines Einzeltropfens ist nur in unmittelbarer Nähe des Objekts ($< 0,1\ \text{mm}$) von Bedeutung, während die Feldkräfte der geladenen Sprühwolke über größere Entfernungen wirken.

Feld- und Laborversuche zeigten gleichermaßen, daß vorwiegend unterhalb einer Luftgeschwindigkeit von $3\ \text{m/s}$ eine ausreichende Wirkung der elektrostatischen Kräfte gegenüber den mechanisch-dynamischen Kräften gegeben ist.

Prinzipiell ist großen Tropfen eine höhere Anlagerungsrate zuzuordnen als kleinen, welche stärker der Luftströmung folgen, deshalb den Bestand besser durchdringen, sich jedoch nicht ausreichend auf den Blättern anlagern. Die Wirkung der elektrostatischen Aufladung hingegen ist bei kleinen Tropfen stärker ausgeprägt.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Metz, N.: Anlagerung und Abdrift elektrostatisch geladener Flüssigkeitsteilchen beim chemischen Pflanzenschutz im Obstbau. Diss. Univ. Hohenheim 1986, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) Nr. 130, 1986.
- [2] VDI-Richtlinien 3677, Filternde Abscheider. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Düsseldorf 1980.
- [3] ●Dennis, R. (Ed.): Handbook an Aerosols. Bedford, Massachusetts: GCA-Technology Division 1976.
- [4] ●Davies, C.N. (Ed.): Aerosol Science. New York: Academic Press 1967.
- [5] Cambeis, L.: Die physikalischen Grundlagen des elektrostatischen Farbsprühens. Diss. RWTH Aachen 1969.
- [6] Adams, J.: Über die natürliche und künstliche elektrostatische Aufladung beim Verstäuben von Pflanzenschutzmitteln. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 6, 1967.
- [7] Jones, C.D. u. P.R. Hopkinson: Electrical theory and measurements on an experimental charged crop spraying system. Pesticide Science, 10 (1979) S. 91/103.
- [8] Müller, H.: Untersuchungen zur elektrostatischen Zerstäubung von Flüssigkeiten für verfahrenstechnische Anwendungen. Diss. RWTH Aachen 1961.
- [9] ●Weber, E. u. E. Brocke: Apparate und Verfahren der Gasreinigung, Band 1. München: Oldenbourg 1973.
- [10] ●Zierep, J.: Grundzüge der Strömungslehre. Karlsruhe: G. Braun 1979.