

- [ 10 ] Heier, W.: Aufschließen und Abpressen von Gras. Diss. Univ. Göttingen 1982.
- [ 11 ] Orth, H.W.: Mechanisches Dehydrieren von Halmgut nach einer Aufbereitung mit Hochfrequenzenergie. Landt. Forschung Bd. 19 (1971) Nr. 5/6, S. 147/51.
- [ 12 ] Koegel, R.G., V.I. Fomin u. H.D. Bruhn: Roller maceration and fractionation of forages. Transactions ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 2, S. 236/40.
- [ 13 ] Basken, K.E.: Reducing the energy requirements of plant juice protein production. ASAE paper No. 75-1056.
- [ 14 ] Voß, H.: Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut. Diss. TU Braunschweig 1970.
- [ 15 ] Sacht, H.O.: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 4, Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [ 16 ] Busse, W.: Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 1, Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [ 17 ] Davys, M.N.G. u. N.W. Pirie: A belt press for separating juices from fibrous pulps. J. Agric. Engng. Res. Bd. 10 (1965) Nr. , S. 142/45.
- [ 18 ] Conell, F.: The prospects of green crop fractionation. Span, Progress in Agriculture, London, Bd. 18 (1975) Nr. 3.
- [ 19 ] Mills, R.A., R.M. McDonald u. P.E. Donnelly: A screw press for extracting protein from pasture. The New Zealand Inst. of Engineers, Trans., Vol. 7, No 1/EMCh (1980).
- [ 20 ] Edwards, R.H., R.E. Miller u. G.O. Kohler: Commercial scale production of alfalfa leaf protein concentrate. ASAE paper No. 81-1524.
- [ 21 ] Prigge, H. u. W. Heier: Konservierung von Dekanterschlamm. Das wirtschaftseigene Futter Bd. 28 (1982) Nr. 1, S. 47/52.

## Physikalische Eigenschaften und elektrostatische Aufladung von Spritzflüssigkeiten

Von Eberhard Moser und Klaus Schmidt,  
Stuttgart-Hohenheim \*)

DK 632.9:632.982.1:537.2

Die elektrostatische Aufladung von Spritzflüssigkeiten im chemischen Pflanzenschutz ist eine erfolversprechende Möglichkeit, die Wirkstoffanlagerung zu verbessern, die Drift zu reduzieren und damit den Einsatz chemischer Mittel zu senken. Neben technisch-konstruktiven Gesichtspunkten sind die physikalischen Eigenschaften der auszubringenden Mittel für die Anwendung elektrostatischer Aufladeverfahren entscheidend. Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung, Randwinkel, elektrische Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl von Spritzflüssigkeiten wurden untersucht und ihre Einflüsse auf die Applikationstechnik unter besonderer Berücksichtigung der elektrostatischen Aufladung dargestellt.

### 1. Einleitung

Zunehmende Mechanisierung der Landwirtschaft, Monokulturen und ein hohes Ertragsniveau erfordern einen umfangreichen Einsatz von chemischen Mitteln für Pflanzenbehandlungsmaßnahmen. Diese Mittel dienen einerseits der Behandlung von Pflanzenkrankheiten, der Bekämpfung von Schadinsekten oder von Unkräutern, andererseits auch der zusätzlichen Düngung (z.B. mit Blattdüngern).

Eine optimale biologische Wirkung ist bekanntlich nicht nur vom Wirkstoff, sondern auch von den physikalischen Eigenschaften, insbesondere von der Mikroverteilung der Spritzflüssigkeit auf der Pflanze abhängig. Die Wirkstoffmittel werden in der Regel mit dem Trägerstoff Wasser in geringen Konzentrationen ausgebracht. Wirkstoff, Formulierungsmittel und Additive ergeben in Verbin-

dung mit Wasser unterschiedliche Eigenschaften, die zum einen die Tropfenbildung (Tropfengröße, -zahl und -verteilung) [1, 2] und den Tropfentransport (Verdunstung, Tropfenbahn), zum anderen die Anlagerung und die biologische Wirkung (Benetzbarkeit, Masse, Bedeckungsgrad, Belagsflecken-größe und -abstand) beeinflussen.

In sehr geringen Mengen auszubringende Mittel (ULV-Mittel), meist mit Ölen als Trägerstoff, besitzen wiederum größtenteils andere physikalische Eigenschaften. Die Hauptprobleme, die durch die Anwendung chemischer Mittel entstehen können – Umweltbelastung (insbesondere durch Abdrift), Rückstände in Pflanzen und Energiebedarf –, erfordern neue, verbesserte Applikationstechniken wie beispielsweise die elektrostatische Aufladung der Spritzflüssigkeiten. Verbesserte Spritzbeläge bei reduzierter Abdrift und bessere Wirksamkeit bei Anwendung kleinerer Tropfen und reduzierten Aufwandmengen sind damit realisierbar. Die heute bekannten, möglichen elektrostatischen Aufladeverfahren erfordern für ihre optimale Anwendbarkeit bestimmte physikalische Eigenschaften der Spritzflüssigkeiten. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung physikalischer Stoffeigenschaften einer größeren Anzahl handelsüblicher Pflanzenschutz-Spritzmittel (Suspensionen, Emulsionen und Lösungen in Wasser sowie ULV-Präparate), insbesondere im Hinblick auf die Effektivität elektrostatischer Auflade- bzw. Spritzverfahren [3 bis 7].

### 2. Physikalische Eigenschaften von Spritzmitteln

#### 2.1 Dichte

Nahezu alle chemischen Pflanzenschutzmittel werden in der Bundesrepublik Deutschland mit Hilfe des Trägerstoffes Wasser ausgebracht. Die verwendete Wassermenge (100 bis 2000 l/ha) ermöglicht geringe Konzentrationen der Mittel (0,05–3 %), eine relativ einfache Dosierung und gute Verteilgenauigkeit. Die Dichteunterschiede der verschiedenen untersuchten Spritzbrühen sind demzufolge erwartungsgemäß gering, die gemessenen Dichten liegen im Bereich 0,995–1,005 g/cm<sup>3</sup>; diese Dichteunterschiede haben weder Auswirkungen auf die Tropfenbildung noch auf den Tropfenflug bzw. die Gewichtskraft der Tropfen, die für die Beeinflussung der Tropfenflugbahn durch elektrostatische Kräfte maßgebend ist.

Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert.

\*) Prof. Dr.-Ing. E. Moser ist Leiter des Fachgebietes "Verfahrenstechnik für Intensivkulturen" am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim; Dipl.-Ing. K. Schmidt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am gleichen Institut.

Bei ULV-Mitteln wird der Wirkstoff meist gebrauchsfertig einem Trägerstoff auf Öl-Basis zugesetzt, teilweise werden reine Wirkstoffpräparate angewandt. Diese ergeben Dichten von 0,8 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup> und entsprechende Auswirkungen auf Tropfengröße und Kräfteverhältnisse. Insgesamt gesehen hat die Dichte bei gebräuchlichen Spritzflüssigkeiten jedoch keine oder allenfalls sehr geringe Auswirkungen auf Tropfenbildung, Anlagerung und elektrostatische Aufladung.

## 2.2 Dynamische Viskosität

Die Viskosität von Spritzflüssigkeiten beeinflusst die Durchflußmenge in den Düsen, die Tropfenbildung und in einem gewissen Maß auch die Anlagerung an den Zielflächen. Eine höhere Viskosität führt zu größeren Tropfendurchmessern und in der Regel zu einer stärkeren Spritzbelagsbildung. Die Viskosität von Flüssigkeiten ist temperatur- und druckabhängig, von nicht-newtonschen Flüssigkeiten zusätzlich geschwindigkeitsabhängig. Die gering konzentrierten Spritzflüssigkeiten, insbesondere auch die Suspensionen, können für die vergleichenden Messungen als newtonsche Flüssigkeiten angesehen werden, ihre Viskosität wurde daher ausnahmslos mit einem Kugelfallviskosimeter nach Höppler bestimmt. Dieses ist im Vergleich zu Rotationsviskosimetern zudem wesentlich einfacher bedienbar.

Die Ergebnisse der Viskositätsmessungen sind in Bild 1 dargestellt. Bei den Mitteln mit Wasser als Trägerstoff wurde zwischen Suspensionen, Emulsionen und Lösungen differenziert, wobei manche Mittel allerdings nur schwer eingeordnet werden konnten.

Emulsionen und Lösungen weisen mit Viskositäten von 1,0 bis 1,2 mPas gegenüber Suspensionen mit 1,05–1,63 mPas eine deutlich geringere Schwankungsbreite auf (zum Vergleich: Wasser  $\eta = 1,059$  mPas). Eine Viskositätsänderung von 1,0 auf 1,6 mPas ergibt bereits eine deutliche Veränderung des Tropfenspektrums, wobei insbesondere eine Senkung des Kleintropfenanteils zu erwarten ist. Bei den Lösungen ist oben im Diagramm ein zweiter Viskositätsbereich eingezeichnet. Dabei handelt es sich um Mittel, die als "driftmindernde Zusätze" angeboten werden. Diese Mittel erhöhen bereits in Konzentrationen unter 0,1 % die Viskosität von Spritzflüssigkeiten deutlich auf ca. 1,9 mPas und bewirken durch die größeren Tropfendurchmesser eine Reduzierung der Abdrift.

ULV-Präparate (rechts im Bild) liegen in der Viskosität um mindestens den Faktor 10 höher (14–58 mPas bei den untersuchten Präparaten) und die Werte sind wesentlich weiter gestreut. In der Praxis kann dies problematisch sein, weil diese Mittel oft mit Handgeräten ausgebracht werden, bei denen die Viskosität wegen druckloser Flüssigkeitszufuhr, d.h. allein durch Schwerkraft, starken Einfluß auf die Ausflußmenge nimmt. Dies gilt insbesondere auch für die elektrodynamische Zerstäubung, wo die Viskosität innerhalb enger Grenzen eingestellt werden muß [3].

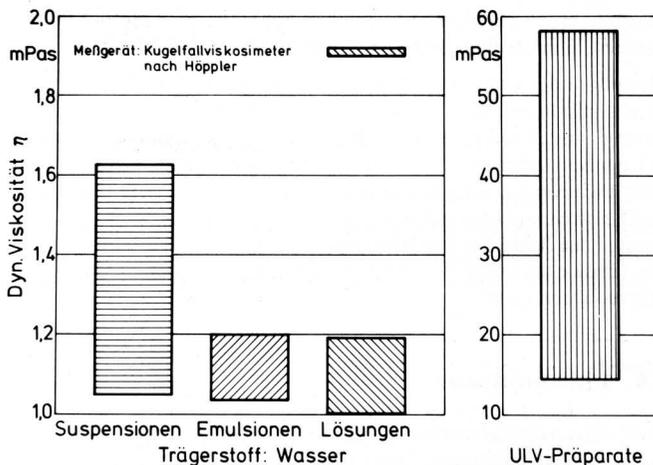


Bild 1. Dynamische Viskosität verschiedener Spritzflüssigkeiten.

## 2.3 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung von Spritzflüssigkeiten hat einen maßgebenden Einfluß auf Tropfenbildung, Benetzungsfähigkeit und maximale elektrische Ladung des Tropfens. Eine kleinere Oberflächenspannung ergibt größere Tropfendurchmesser, die Benetzbarkeit der Zielflächen, die sich im sogenannten "Randwinkel" zwischen Pflanzenoberfläche und Tropfen äußert, verbessert sich, während die maximal mögliche Tropfenladung sinkt. Die Meßergebnisse in Bild 2 zeigen, daß Pflanzenschutzmittel die Oberflächenspannung, ausgehend von Wasser (71,8 mN/m), bis auf ca. 30 mN/m verringern können. Die untersuchten Emulsionen liegen durchweg unter 40 mN/m, die Mehrzahl der Suspensionen (30 bis 73 mN/m) ebenfalls, während der Hauptteil der Lösungen bei einem überdeckten Bereich von 29–73 mN/m über 60 mN/m liegt. ULV-Präparate weisen durchweg Oberflächenspannungen zwischen 30 und 40 mN/m auf.

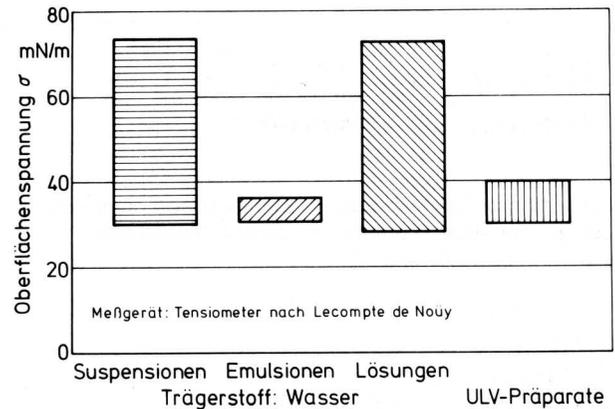


Bild 2. Oberflächenspannung verschiedener Spritzflüssigkeiten.

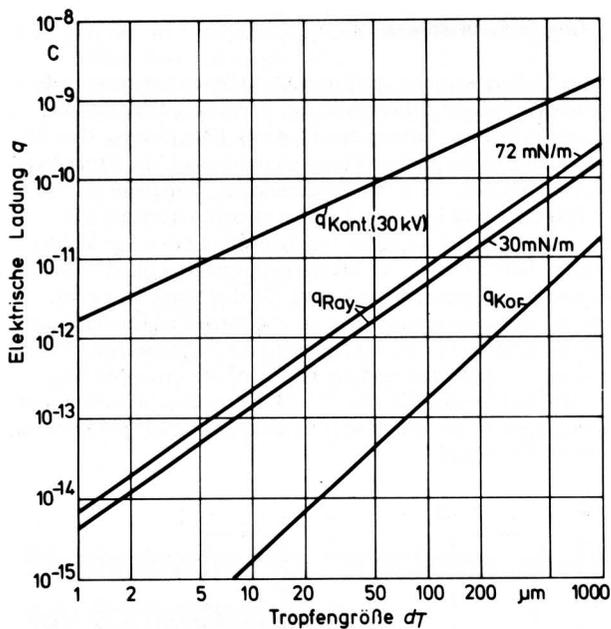
Bei elektrostatischer Aufladung begrenzt die Oberflächenspannung die maximale Ladungsmenge auf den Tropfen. Bei dieser Grenzladung ("Rayleigh-limit") zerplatzen die Tropfen durch die nach außen, entgegen der Kohäsionskraft, gerichtete elektrische Kraft [8]. Die maximale Tropfenladung wird

$$q_{Tmax} = 4 \sqrt{\pi \epsilon_0 \sigma r_T^3}$$

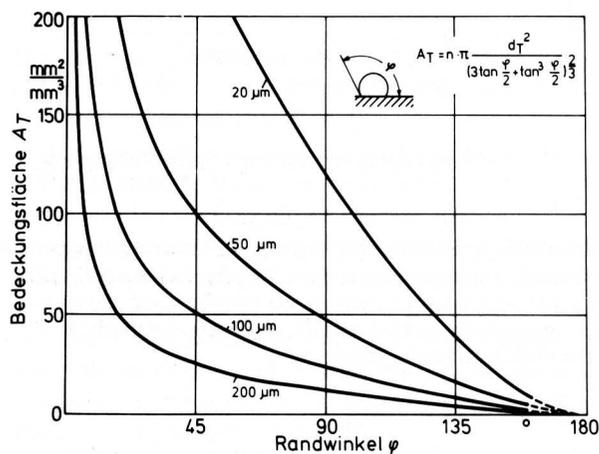
Diese Rayleigh-Grenzladung ist in Bild 3 für zwei verschiedene Oberflächenspannungen über der Tropfengröße aufgetragen. Daneben zeigt das Diagramm bei Korona- und bei Kontaktaufladung mögliche Tropfenladungen. Bei Koronaaufladung wird das Rayleigh-limit bei den im Pflanzenschutz üblichen Tropfengrößen in der Regel nicht überschritten, bei Kontaktaufladung ist dies eher möglich, wobei das Platzen von Tropfen meist zu einem engeren Tropfenspektrum und geringerer Tropfengröße führt. Bei elektrodynamischer Zerstäubung erfolgt die Tropfenbildung ausschließlich durch elektrische Kräfte, wofür die Oberflächenspannung der zerstäubten Flüssigkeit innerhalb eines engen, durch die Zerstäuberkonstruktion bestimmten, Bereiches liegen muß [3].

## 2.4 Randwinkel

In einem gewissen Maß nimmt die Oberflächenspannung Einfluß auf den Kontaktwinkel (Randwinkel) zwischen Tropfen und Pflanzenoberfläche. Dieser Randwinkel ist entscheidend für die Benetzung der Pflanzenoberfläche. Die theoretische Bedeckungsfläche eines konstanten Flüssigkeitsvolumens (1 mm<sup>3</sup>), das jeweils in Tropfen gleichen Durchmessers aufgeteilt wird, ist in Bild 4 in Abhängigkeit vom Randwinkel dargestellt. Es zeigt sich, daß die bedeckte Fläche, abhängig vom Tropfendurchmesser, bei Randwinkeln unter 45° mit abnehmendem Randwinkel stark zunimmt.



**Bild 3.** Maximale Tropfenladung bei Kontakt- und Koronaaufladung und Grenzladung bei unterschiedlichen Oberflächenspannungen (Rayleigh-limit).

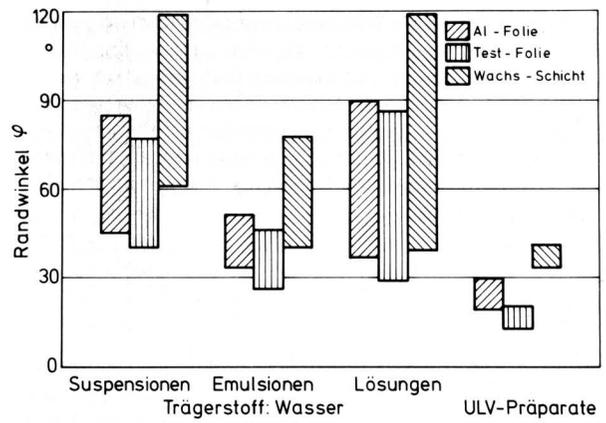


**Bild 4.** Bedeckungsfläche eines konstanten Flüssigkeitsvolumens bei verschiedenen Tropfendurchmessern in Abhängigkeit vom Randwinkel.

Außer von den Flüssigkeitseigenschaften ist der Randwinkel von den Eigenschaften der Pflanzenoberfläche abhängig. Glatte, behaarte oder bewachsene Oberflächen führen auch bei derselben Flüssigkeit zu großen Randwinkelunterschieden. Aus diesem Grunde wurden die Randwinkelmessungen auf unterschiedlichen Flächen durchgeführt:

1. Aluminiumfolie, stellvertretend für gut benetzbare Pflanzenoberflächen (Randwinkel mit Wasser:  $79^\circ$ ),
2. Wachsschicht, für schlecht benetzbare Pflanzenoberflächen (mit Wasser  $112^\circ$ ) und
3. Tropfen-Test-Folie (handelsüblich), die zur Sichtbarmachung von Spritzbelägen in den Bestand gehängt wird (mit Wasser  $69^\circ$ ).

Die Ergebnisse in **Bild 5** zeigen, daß die Tropfen-Test-Folie insgesamt am besten, die Wachsschicht erwartungsgemäß am schlechtesten benetzbar ist. Suspensionen und Lösungen weisen sehr große Streuungen auf, wobei die meisten der gemessenen Werte im oberen Teil des angegebenen Randwinkelbereichs liegen, die kleineren



**Bild 5.** Randwinkel verschiedener Spritzflüssigkeiten auf unterschiedlichen Oberflächen.

Randwinkel sind nur bei einigen wenigen Mitteln erzielbar. Von den mit Wasser ausgebrachten Mitteln benetzen Emulsionen am besten, sie erreichen annähernd die Werte der ULV-Präparate, die Randwinkel zwischen  $12^\circ$  (äußerst gut benetzend) und  $40^\circ$  erzielen.

Ein Vergleich der Werte von Oberflächenspannung und Randwinkel ergibt nur teilweise eine Abhängigkeit, d.h. eine kleine Oberflächenspannung ist nicht gleichbedeutend mit einem kleinen Randwinkel, andererseits führen große Oberflächenspannungen stets zu großen Randwinkeln.

## 2.5 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit der Spritzflüssigkeiten ist für die Auswahl eines Aufladeverfahrens ausschlaggebend. Kontakt- und Influenzaufladung sind bei schlecht leitenden Flüssigkeiten nicht anwendbar. Bei besser leitenden Flüssigkeiten und Kontaktaufladung stellt die Isolation des gesamten Flüssigkeitssystems ein Hauptproblem, insbesondere auch die Sicherheit betreffend, dar [4]. Bei Koronaaufladung und sehr gut leitenden Flüssigkeiten, z.B. Mischungen mit Flüssigdüngern, sind bereits bei niedrigen Aufladespannungen Funkenüberschläge zu erwarten.

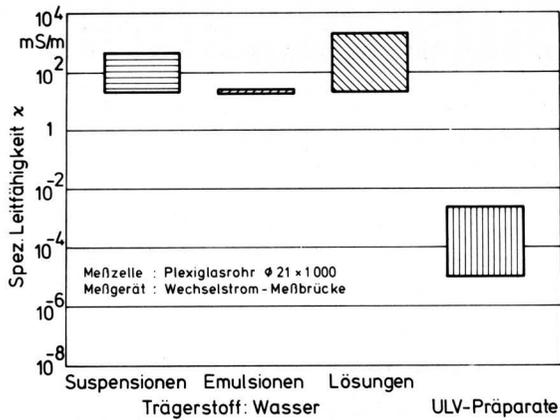
Die Messungen der Leitfähigkeit erfolgten mit einer Niederfrequenz-Widerstands-Meßbrücke in einem Meßrohr, in dem die Flüssigkeit, um ein Entmischen zu vermeiden, dauernd umgewälzt werden konnte.

Die spezifische Leitfähigkeit nahezu aller in Wasser eingebrachten Mittel liegt zwischen 20 und 40 mS/m, **Bild 6**, Flüssigdünger bewirken aufgrund des hohen Elektrolytgehaltes eine konzentrationsabhängige Leitfähigkeitssteigerung. ULV-Präparate, die meist auf Ölen basieren, sind deutlich schlechtere Leiter.

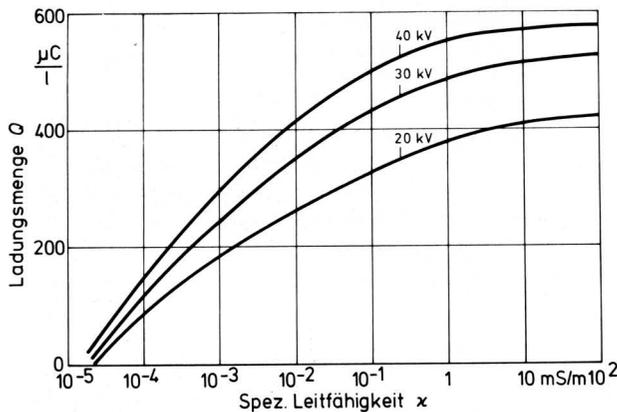
Messungen der Ladung von Tropfen wurden am Spritzschleier von Flachstrahldüsen mit Flüssigkeiten unterschiedlicher Leitfähigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse in **Bild 7** zeigen die Tropfenladungen je Liter Spritzflüssigkeit in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit bei verschiedenen Aufladespannungen. Bei ungefähr 30 mS/m (zugleich Leitfähigkeit des verwendeten Wassers), erreicht die Kontaktaufladung in der Regel den maximal möglichen Wert. Bei Mitteln mit Leitfähigkeiten unter  $10^{-4}$  mS/m sind Kontakt- und Influenzauf-ladeverfahren nicht anwendbar.

## 2.6 Dielektrizitätszahl

Beim Koronaaufladeverfahren und auch bei der Influenzaufladung ist die Dielektrizitätszahl, früher relative Dielektrizitätskonstante genannt, der Spritzflüssigkeit die für die Aufladung maßgebende Kenngröße. Die Einzeltropfenladung kann mit



**Bild 6.** Spez. elektrische Leitfähigkeit verschiedener Spritzflüssigkeiten.



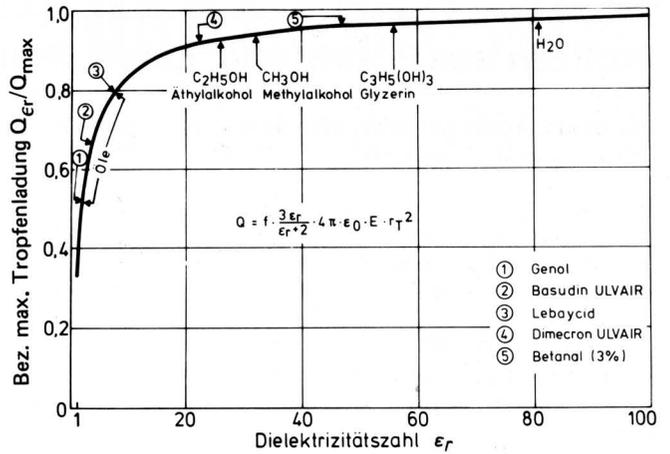
**Bild 7.** Einfluß der elektrischen Leitfähigkeit auf die Tropfenladung bei Kontaktaufladung mit unterschiedlichen Spannungen.

$$Q_T = f \frac{3 \epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \cdot 4 \pi \epsilon_0 E r_T^2$$

berechnet werden. Eine höhere Dielektrizitätszahl ergibt höhere Tropfenladungen. Bild 8 zeigt die maximalen Tropfenladungen bezogen auf den Höchstwert bei  $\epsilon_r = \infty$ . An der Kurve sind die Werte für verschiedene Flüssigkeiten und Pflanzenschutzmittel eingetragen. Wäßrige Brühen mit Dielektrizitätszahlen über 40 erreichen mehr als 90 % der Maximalladung. Tropfen von ULV-Mitteln mit Dielektrizitätszahlen zwischen 2 und 10 (...25) können 50 bis 80 (...90) % der maximalen Ladungsmenge erhalten. Ladungsmessungen am Spritzschleier von Flachstrahldüsen konnten diese Gesetzmäßigkeit bestätigen.

### 3. Zusammenfassung

Unter dem Gesichtspunkt der Anwendung elektrostatischer Aufladeverfahren im chemischen Pflanzenschutz wurden die physikalischen Eigenschaften einer größeren Anzahl von Pflanzenschutzmitteln in den für sie vorgeschriebenen Anwendungskonzentrationen



**Bild 8.** Dielektrizitätszahlen von Flüssigkeiten und Einfluß auf die Tropfenladung bei Koronaaufladung.

untersucht. Anhand der Meßergebnisse kann geklärt werden, welche Aufladeverfahren (Korona-, Kontakt- oder Influenzaufladung) bei unterschiedlichen Flüssigkeitseigenschaften einsetzbar sind. Influenz- und Kontaktaufladung (hier insbesondere bei elektrodynamischer Zerstäubung) erfordern in der Regel schärfer eingegrenzte Flüssigkeitseigenschaften als die Koronaaufladung.

### Schrifttum

- [ 1 ] *Dombrowski, N. u. W.R. Johns:* The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. Chem. Eng. Sci. Bd. 18 (1963) S. 203/14.
- [ 2 ] *Weber, C.:* Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Z. angew. Math. und Mech. Bd. 11 (1931) Nr. 2, S. 136/54.
- [ 3 ] *Coffee, R.A.:* Electrodynamic spraying. BCPC Monograph No. 24, 1979, S. 95/107.
- [ 4 ] *Law, E.:* Embedded-electrode electrostatic-induction spray-charging nozzle: theoretical and engineering design. Trans. ASAE Bd. 21 (1978) Nr. 6, S. 1096/1104.
- [ 5 ] *Moser, E., H. Ganzelmeier u. K. Schmidt:* Einflußfaktoren bei der Anlagerung elektrostatisch geladener Spritzflüssigkeiten im chemischen Pflanzenschutz. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. Bd. 33 (1981) Nr. 10, S. 145/57.
- [ 6 ] *Moser, E., H. Ganzelmeier u. K. Schmidt:* Das Anlagerungsverhalten elektrostatisch geladener Spritzflüssigkeitsteilchen in Flächen- und Raumkulturen. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. Bd. 34 (1982) Nr. 4, S. 57/64.
- [ 7 ] *Moser, E. u. K. Schmidt:* Einige Grundlagen der Elektrostatik im chemischen Pflanzenschutz. Landtechnik Bd. 38 (1983) H. 3, S. 96/100.
- [ 8 ] *Lord Rayleigh:* On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity. Proc. Royal Society, 1879, S. 184/86.