

# Technical Note

## Praxis der Kontaktwinkelmessung (5)

Technical note: TN315d  
 Industry section: alle  
 Author: FT  
 Date: 12/2008



Method:



Drop Shape Analyzer –  
 DSA100

Keywords: methods, contact angle, sessile drop, surface free energy, interfacial tension

## Modelle nach Maß: vom Kontaktwinkel zur Oberflächenenergie

Die Bestimmung der freien Oberflächenenergie (OFE) eines Festkörpers ist die Königsdisziplin der Kontaktwinkelmess-technik. Die Methode macht dem Anwender wichtige Informationen zur Materialoberfläche zugänglich, etwa zur Benetzbarkeit und Adhäsivität. Um eine Messung zu planen und aus den Ergebnissen die richtigen Schlüsse zu ziehen, ist eine gute Kenntnis der zugrunde liegenden wissenschaftlichen Modelle hilfreich.

In diesem letzten Teil der Newsletterserie zur Kontaktwinkelmessung werden die wichtigsten Modelle zur Bestimmung der Oberflächenenergie (OFE) beschrieben, die Eingang in die Messpraxis (und die KRÜSS-Software) gefunden haben. Neben der sachgerechten Anwendung der Modelle geht es auch um praktische Aspekte der OFE-Bestimmung: die Auswahl der Testflüssigkeiten, geeignete Umgebungsbedingungen und Konsequenzen aus der Beschaffenheit der Festkörperoberfläche.

### Ein Exkurs über Modelle

Das Stichwort „Modell“ mag auf den einen oder anderen Leser vielleicht ernüchternd wirken: Ein über Kontaktwinkeldaten ermittelter OFE-Wert ist kein in Stein gemeißeltes Wissen über den Festkörper, sondern eine Interpretation seines Verhaltens im Rahmen des verwendeten Modells. Das gilt streng genommen für jede wissenschaftliche Aussage. Jedoch sind uns viele Formulierungen von Naturgesetzen so vertraut, dass wir ihren Modellcharakter nicht mehr wahrnehmen.

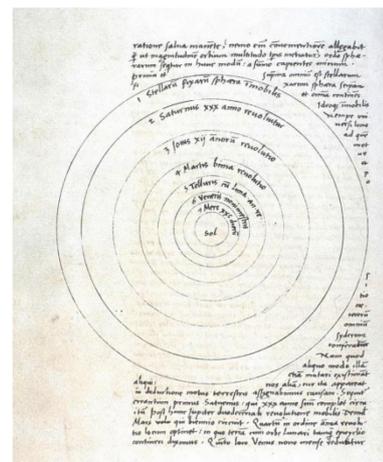


Abb. 1: Kopernikus' Modell des Sonnensystems – inzwischen durch Einstein relativiert

Der Maßstab für die Aussagekraft eines Modells ist dessen Konsistenz und die Möglichkeit, gegebene Phänomene möglichst einfach zu erklären und Vorhersagen zu treffen, die empirisch bestätigt werden können. Für den Anwender der Kontaktwinkelmess-technik ist es daher sinnvoll, sich mit den Grundlagen – und Grenzen – der verwendeten Modelle zu befassen.

## Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Oberflächenspannung (im Folgenden OFS) und OFE sind physikalisch gleichwertige Begriffe; konventionell wird ersterer für Flüssigkeiten, letzterer für Festkörper verwendet.

Bei einer Flüssigkeit resultiert die Spannung der Oberfläche daraus, dass ein an der Oberfläche befindliches Molekül im Vergleich zur Volumenphase auf weniger Nachbarmoleküle trifft, mit dem es Wechselwirkungen ausbilden kann. Der Aufenthalt an der Oberfläche ist für Moleküle einer (reinen) Flüssigkeit unattraktiver. Flüssigkeiten streben deshalb eine möglichst kleine Oberfläche an; um eine Oberfläche zu vergrößern, muss Arbeit aufgewendet werden.

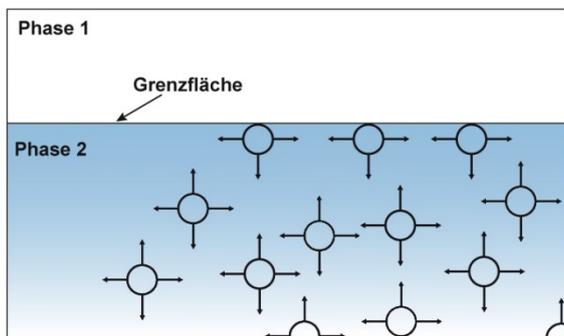


Abb. 2: Kräfte zwischen Molekülen in der kondensierten Phase und in der Grenzfläche

Mit der OFE fester Phasen verhält es sich prinzipiell genauso. Bei einem Festkörper ist es jedoch kaum möglich, die zum Vergrößern einer Oberfläche benötigte Arbeit direkt zu messen, denn diese Arbeit kann nur schwer von der Verformungsarbeit der Volumenphase unterschieden werden. Die OFE kann aber indirekt gemessen werden – anhand der Benetzbarkeit durch Flüssigkeiten. Hier kommt der Kontaktwinkel ins Spiel.

## Kontaktwinkel und Oberflächenenergie

Young stellte bereits 1805 einen Zusammenhang zwischen dem Kontaktwinkel  $\theta$  und dem Verhältnis der OFS der flüssigen ( $\sigma_l$ ) und der festen Phase ( $\sigma_s$ ) her. Die Youngsche Basisgleichung für den Kontaktwinkel lautet:

$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \cdot \cos \theta.$$

Bei bekannter OFS der Flüssigkeit und gemessenem Kontaktwinkel verbleiben demnach zwei unbekannte Größen: die OFE des Festkörpers ( $\sigma_s$ ) und die Grenzflächenspannung zwischen den Phasen ( $\gamma_{sl}$ ). Um die Beziehung zwischen diesen beiden Größen zu entschlüsseln, wurden verschiedene Modelle erarbeitet. Zumeist wird dabei die Grenzflächenspannung (GFS) aus den molekularen Wechselwirkungen zwischen den Phasen abgeleitet. Grundsätzlich gilt: Je größer die Wechselwirkungen sind, die an der Phasengrenze ausgebildet werden, desto niedriger ist die GFS.

## Zisman

Zisman [13] trug den Kosinus des Kontaktwinkels gegen die Oberflächenspannung der entsprechenden Flüssigkeiten auf. Den auf  $\cos\theta=1$  ( $\theta=0^\circ$ ) extrapolierten Wert definierte er als kritische OFS ( $\sigma_c$ ). Diese Größe sollte der OFS einer Flüssigkeit entsprechen, bei der gerade eine vollständige Benetzung stattfindet. Zisman selbst betrachtete die kritische OFS nur als Maß für die OFE des Festkörpers, setzte diese beiden Größen aber nicht gleich – im Gegensatz zu vielen späteren Anwendern des Zisman-Plots. Tatsächlich gilt, dass  $\sigma_c$  und  $\sigma_s$  praktisch nur bei unpolaren Festkörpern und Flüssigkeiten übereinstimmen und dass das Ergebnis umso ungenauer wird, je größer der Abstand zwischen dem extrapolierten Wert für  $\sigma_c$  und der Testflüssigkeit mit der kleinsten OFS ist.

Nach dem Konzept der kritischen Oberflächenspannung arbeiten noch heute die Testtinten: Aus einer Reihe von Flüssigkeiten mit definierter Oberflächenspannung wird diejenige gesucht, die den Festkörper gerade vollständig benetzt.

## Fowkes und Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (OWRK)

Fowkes [2] ging davon aus, dass für die OFS einer Phase verschiedenartige Wechselwirkungen verantwortlich sind – disperse und nicht-disperse (polare) Wechselwirkungen. Auf dieser Grundlage bestimmte Fowkes zunächst nur disperse Anteile der OFS. Owens und Wendt [9] sowie Rabel [10] und Kaelble [5] bauten auf Fowkes auf und ermittelten disperse und polare Anteile der OFS von Flüssigkeiten und der OFE von Festkörpern.

In dem Zweikomponentenmodell nach Fowkes und OWRK ergibt sich die GFS  $\gamma_{ls}$  als Summe der OFS der Einzelphasen, reduziert um die dispersiven (D) und polaren (P) Wechselwirkungen zwischen den Phasen. Diese Wechselwirkungen werden als geometrische Mittelwerte berechnet:

$$\gamma_{ls} = \sigma_l + \sigma_s - 2(\sqrt{\sigma_l^D \cdot \sigma_s^D} + \sqrt{\sigma_l^P \cdot \sigma_s^P})$$

In der DSA-Software bildet diese Formel die Grundlage sowohl für die Fowkes- als auch für die OWRK-Methode; die Methoden unterscheiden sich lediglich im Rechenweg. Bei OWRK ergeben sich polarer und dispersiver Anteil aus einer grafischen Auswertung.

Die GFS hängt nach dem Zweikomponentenmodell davon ab, ob polare und disperse Anteile mit entsprechenden Anteilen der angrenzenden Phase Wechselwirkungen ausbilden können. Zum Beispiel wird ist GFS gegenüber der polaren Flüssigkeit Wasser kleiner, wenn der Festkörper ebenfalls polar ist. Ist der polare Anteil beim Festkörper hingegen gering, dann nimmt der Wurzelterm  $\sqrt{\sigma_l^P \cdot \sigma_s^P}$  einen kleinen Wert an. Die polaren Wechselwirkungen liefern dann nur einen geringen Bei-

trag zur Verringerung der GFS; dies korrespondiert mit einer schlechten Benetzung – einem hohen Kontaktwinkel. In der folgenden Grafik werden die verschiedenartigen Wechselwirkungen durch Hände symbolisiert – nur die „passenden“ Hände können ineinander greifen.

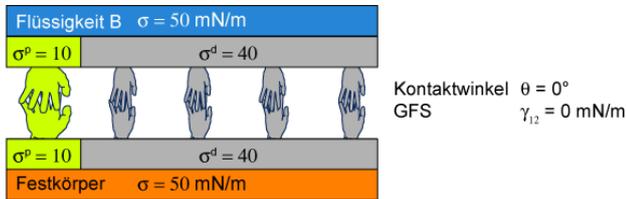


Abb. 3: Schematische Darstellung des Zwei-Komponenten-Modells des Phasenkontakts

Rabel nutzte das Modell zur Untersuchung von Polyethylen-Oberflächenbehandlungen – tatsächlich hat es sich besonders bei der Aktivierung und Beschichtung von Kunststoffen als tragfähig erwiesen. Selbst bei der Arbeit mit nur zwei Testflüssigkeiten korrelieren empirische Befunde der Benetzbarkeit und Adhäsion häufig gut mit den nach OWRK berechneten OFE-Werten und den polaren und dispersiven Anteilen – wengleich Good theoretische Einwände gegen die Berechnungsmethode des polaren Anteils vorbringt (s.u.).

Das Zweikomponentenmodell hat weit reichende Konsequenzen für die Interpretation der Benetzbarkeit. Eine GFS von 0 mN/m führt zu einem Kontaktwinkel von 0°, umgekehrt kann aber bei einem Kontaktwinkel von 0° die GFS größer als null sein. Für die Beschichtungspraxis zum Beispiel bedeutet das, dass auch bei einer optimal benetzenden Flüssigkeit die Adhäsion durch eine Rest-GFS destabilisiert werden kann.

### Fowkes (extended)

In einer jüngeren Arbeit [1] wurde ein Dreikomponentenmodell entwickelt, bei dem der polare Anteil noch einmal in einen Wasserstoffbrückenbindungsanteil ( $\sigma^H$ ) und einen Anteil der Dipol-Dipol-Wechselwirkungen ( $\sigma^P$ ) aufgespalten wurde. Die oben stehende Formel wird dabei um einen Wurzelterm erweitert;

$$\gamma_{ls} = \sigma_l + \sigma_s - 2(\sqrt{\sigma_l^D \cdot \sigma_s^D} + \sqrt{\sigma_l^P \cdot \sigma_s^P} + \sqrt{\sigma_l^H \cdot \sigma_s^H}).$$

Entsprechend werden mindestens drei Testflüssigkeiten für die OFE-Bestimmung benötigt. Diese als „Extended Fowkes“ in die DSA-Software integrierte Methode wird selten für die Materialprüfung verwendet. Für die Abschätzung der Adhäsion zweier Phasen ist sie aber von Wert, da Wasserstoffbrückenbindungen im Vergleich zu dispersiven und Dipol-Dipol-Wechselwirkungen größere Bindungsenergien haben. Die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch Wasser hängt im hohen Maße von der Fähigkeit des Festkörpers ab, Wasserstoffbrückenbindungen auszubilden.

### Wu

Wu [11;12] konstatierte, dass für eine niedrige OFE statt des geometrischen Mittelwertes der harmonische Mittelwert zwischen den jeweiligen Anteilen (dispersiv und polar) oft zuverlässigere Werte liefert. Dem Ansatz des harmonischen Mittels entspricht folgende Formel:

$$\gamma_{ls} = \sigma_l + \sigma_s - 4\left(\frac{\sigma_l^D \cdot \sigma_s^D}{\sigma_l^D + \sigma_s^D} + \frac{\sigma_l^P \cdot \sigma_s^P}{\sigma_l^P + \sigma_s^P}\right)$$

Die empirische Grundlage bilden Grenzflächen Spannungsmessungen zwischen Polymerschmelzen, also Materialien mit vorwiegend geringer Oberflächenspannung der Einzelphasen. Entsprechend wird die Wu-Methode zur OFE-Berechnung meist für Polymere mit geringer Oberflächenenergie verwendet (bis 30-40 mJ/m<sup>2</sup>).

### Säure-Base-Modell nach Oss und Good

Die Autoren Oss und Good [3; 4; 8] übernahmen die Definition des dispersiven Anteils von Fowkes, spalteten jedoch den polaren Anteil in einen Elektronenakzeptor (Säure,  $\sigma^+$ ) und einen Elektronendonatoranteil (Base,  $\sigma^-$ ) auf. Der Einwand gegen Fowkes, OWRK und Wu lautet, dass nicht alle polaren Wechselwirkungen miteinander ins Verhältnis gesetzt werden könnten – eine Lewis-Base z.B. könne nur mit sauren, aber nicht mit basischen Komponenten einer angrenzenden Phase in Wechselwirkung treten. Entsprechend sind für die polaren Wechselwirkungen in den Wurzeltermen der Gleichung jeweils die entgegengesetzten Komponenten zusammengefasst:

$$\gamma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2(\sqrt{\sigma_s^D \cdot \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^+ \cdot \sigma_l^-} + \sqrt{\sigma_s^- \cdot \sigma_l^+})$$

Trotz der theoretischen Stringenz dieses Ansatzes wird er in der Praxis vorläufig selten genutzt. Das mag damit zusammenhängen, dass die Auswahl an Testflüssigkeiten mit bekanntem basischem und saurem Anteil bisher gering ist. Hinzu kommt, dass andere Modelle wie OWRK oder Wu sich in der Praxis vielfach bewährt haben und mit weniger Messdaten auskommen als die Säure-Base-Methode. Nicht leicht zu interpretieren sind die beim Säure-Base-Modell möglichen negativen GFS-Werte.

### Equation of State (Zustandsgleichung)

Die bisher genannten Methoden bauen historisch und systematisch aufeinander auf: Nachdem der Einfluss nicht-dispersiver Wechselwirkungen bekannt war, wurden dessen Komponenten anhand verschiedener Modelle beschrieben.

Auf anderem Terrain bewegen sich Arbeiten von Neumann et al [6;7] dessen Theorie als „Equation of State“ (Zustandsgleichung) Eingang in die OFE-Bestimmung gefunden hat. Dem thermodynamischen Ansatz von Neumann zufolge ist die Aufspaltung der OFS in Wechselwirkungskomponenten nicht zielführend. Die nicht unumstrittene [vgl.4,32] Theorie kommt ohne Differenzierung von Wechselwirkungsanteilen und mit

einer einzigen Flüssigkeit mit bekannter OFS aus – der Vorteil liegt also sicherlich im schnellen Zugang zu einem OFE-Wert. Da Neumann seine Formel im Wesentlichen aus Ergebnissen für unpolare Festkörper mit niedriger Oberflächenenergie ableitet, kann sein Ansatz vor allem für diesen Bereich verwendet werden. Bei solchen Festkörpern stimmen die Ergebnisse tendenziell mit Auswertungen nach Zisman oder OWRK überein.

## Auswahl der Flüssigkeiten

Bereits in Teil 1 dieser Serie wurden einige Standard-Testflüssigkeiten genannt und der fachgerechte Einsatz für die Kontaktwinkelmessung beschrieben. Welche Flüssigkeiten geeignet sind, ergibt sich aus den Voraussetzungen der jeweiligen Modelle für die Auswertung.

## Zahl der Testflüssigkeiten

Für alle Modelle gilt, dass das Ergebnis umso zuverlässiger ist, je mehr Testflüssigkeiten verwendet werden. Bei Zisman, Fowkes, Extended Fowkes und OWRK gehen dann mehr Daten in die lineare Regression ein; bei den anderen Methoden können mehr Einzelgleichungen zur Berechnung eines arithmetischen OFE-Mittelwertes aufgestellt werden.

## Eigenschaften der Testflüssigkeiten

Bei den Mehrkomponenten-Modellen sollten die Werte der Flüssigkeits-Komponenten möglichst breit gefächert sein. Zum Beispiel sollten für Fowkes und OWRK Flüssigkeiten mit jeweils möglichst großem und möglichst kleinem polaren Anteil in der Auswahl sein. Bei nur zwei Flüssigkeiten ist Wasser und Diiodmethan eine oft verwendete Paarung. Diiodmethan ist ideal, weil es als rein dispersive oder – bei einigen Autoren – wenig polare Flüssigkeit eine recht hohe OFS hat und dadurch mit vielen Festkörpern gut messbare Kontaktwinkel ausbildet. Unpolare Flüssigkeiten, die auf fast jedem Festkörper spreiten (z.B. n-Hexan), sind für die Messung hingegen nicht geeignet.

Bei Extended Fowkes und bei der Säure-Base-Methode ist die Auswahl an Flüssigkeiten begrenzt, da bisher wenige Substanzen hinsichtlich der entsprechenden Anteile charakterisiert sind. Wasser sollte aufgrund der ausgeprägten Wasserstoffbrückenbindungen und des amphoteren Charakters (Lewis-Säure und -Base zugleich) bei beiden Methoden auf jeden Fall verwendet werden; es sei denn, es verändert die Festkörperoberfläche chemisch.

Flüssigkeitsgemische sollten nicht verwendet werden, weil die Flüssigkeiten unterschiedliche Affinitäten zum Festkörper besitzen und an der Grenzfläche ein anderes (und nicht bekanntes) Mischungsverhältnis ausbilden als in der Volumenphase.

## Konsistenz der Auswahl

Der Vergleich zwischen OFE-Daten verschiedener Proben ist umso aussagekräftiger, je ähnlicher die Messbedingungen sind – das gilt auch für die Anzahl und Auswahl der Testflüssigkeiten. Soweit möglich, sollten Festkörper, deren OFE-Werte verglichen werden sollen, mit den gleichen Testflüssigkeiten untersucht werden.

Die Datenbanken der KRÜSS-Softwareprodukte enthalten für viele Flüssigkeiten mehrere Einträge, deren Daten von verschiedenen Autoren stammen. Bei Vergleichsmessungen sollten die Flüssigkeitsdaten immer aus derselben Quelle stammen. Bei den Zweikomponenten-Modellen mit dem geometrischen Mittelwert der Anteile (Fowkes, OWRK) empfiehlt KRÜSS die Daten von Ström, denen das Modell des geometrischen Mittels zugrunde liegt. Für viele Flüssigkeiten liegen darüber hinaus Daten der Autoren Fowkes, Owens oder Rabel vor. Bei der Auswertung nach Wu ist die gewünschte Konsistenz nicht gänzlich erreichbar, da keine Flüssigkeitsdaten vorliegen, die mit dem harmonischen Mittelwert der Komponenten berechnet wurden. Deshalb werden für Wu meist dieselben Flüssigkeitsdaten verwendet wie für Fowkes oder OWRK.

## Probenvorbereitung und Umgebungsbedingungen

Feste Oberflächen haben zum Teil deutlich höhere Freie Oberflächenenergien als Flüssigkeiten. Daher neigen sie zur Passivierung, z.B. durch Ausbildung von Oxidations-, Gas- und Dampfsorptionsschichten. Die Oberflächenenergie von Festkörpern hängt deshalb stärker als die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten von der chemischen Umgebung (z.B. Luft oder Inertgas, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit) ab.

Für die Messung an hochenergetischen Proben gibt es eigene Verfahren, z.B. die Kontaktwinkelmessung an der Grenzfläche zwischen zwei flüssigen Phasen statt in Luft nach der Schultz-Methode, oder die Messung unter Inertgas. In der Regel wird der Kontaktwinkel jedoch am Dreiphasenpunkt Flüssigkeit/Festkörper/Luft gemessen.

Idealerweise wird die Festkörperprobe vor der Messung für längere Zeit bei der für die Messung vorgesehenen Luftfeuchte und Temperatur aufbewahrt – wichtig ist es, die gewählten Standardbedingungen für alle Proben gleich zu halten.

Dämpfe organischer Flüssigkeiten sollten auf jeden Fall fern gehalten werden, da sie auf vielen Proben stabile Adsorptionsschichten bilden. Der Kontaktwinkel mit Wasser wird dann höher und der berechnete OFE-Wert niedriger als bei einer unkontaminierten Oberfläche. Aus demselben Grund sind spreitende Flüssigkeiten mit hohem Dampfdruck nicht geeignet – auf einer großen Fläche rund um den dosierten Tropfen wird die Probe für die Messung mit anderen, schlechter benetzenden Flüssigkeiten unbrauchbar.

## Beschaffenheit des Festkörpers

Im Gegensatz zur Flüssigkeit finden bei einem Festkörper kaum Platzwechsel von Molekülen statt; die Oberflächenenergie beschreibt also einen statischen Zustand des Festkörpers und kein dynamisches Gleichgewicht zwischen beweglichen Teilchen. Daraus folgt, dass bei einem chemisch inhomogenen Festkörper die Oberflächenenergie ortsabhängig sein kann. Hinzu kommt, dass die makroskopische Beschaffenheit der Oberfläche den Kontaktwinkel beeinflusst.

## Rauigkeit

Die Youngsche Gleichung kann ideale Festkörper beschreiben, die glatt, eben und chemisch homogen sind. Die Rauigkeit des Materials sollte bei jeder Messung in Betracht gezogen werden: Je rauer der Festkörper ist, desto weniger können die Messwerte mit der chemischen Beschaffenheit der Oberfläche korreliert werden.

Trotzdem ist eine OFE-Berechnung für einen rauen Festkörper nicht wertlos. Bei einer Auswertung beispielsweise nach OWRK beschreibt das Ergebnis nach wie vor das Verhalten des Festkörpers gegenüber unterschiedlich polaren Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen. Der Anwender sollte sich jedoch darüber im Klaren sein, dass der Rahmen des Modells gesprengt wird. Die berechneten Werte sind nur noch empirische Kenngrößen. Als solche sind sie immer noch nützlich; jedoch sollten Unterschiede zwischen einer rauen und einer glatten Probe nicht als Unterschiede der polaren und dispersiven Wechselwirkungen interpretiert werden.

## Chemische Inhomogenität

Streng genommen ist die OFE eine Eigenschaft genau der Oberflächenposition, an der sie gemessen wird. Vor einer Messung gilt es zu entscheiden, ob ein globaler Wert für die Oberfläche gesucht wird oder ob eventuelle örtliche Unterschiede der OFE ermittelt werden sollen.

Im ersten Fall sollten für jede Flüssigkeit Tropfen in möglichst großem Abstand dosiert und ein Mittelwert des Kontaktwinkels jeder Flüssigkeit über die gesamte Probe berechnet werden. Im zweiten Fall sollte je ein Tropfen jeder Testflüssigkeit in möglichst geringem Abstand dosiert werden. Die OFE kann dann für die entsprechende Position anhand einer solchen Tropfengruppe verschiedener Testflüssigkeiten berechnet werden.

## Literatur

- [1] Chen Jie-Rong; T. Wakida, Studies on the Surface Free Energy and Surface Structure of PTFE Film Treated with Low Temperature Plasma. In: Appl. Poly. Sci 63,13 (1997), S. 1733-1739.
- [2] F. M. Fowkes, Attractive Forces at Inter-faces. In: Industrial and Engineering Chemistry 56,12 (1964), S. 40-52.
- [3] R. J. Good; C. J. van Oss, The Modern Theory of Contact Angles and the Hydrogen bond Compo-

nents of Surface Energies. In: G. I. Loeb; M. E. Schrader (Hrg.): Modern approaches to wettability. 1992, S. 1-27.

- [4] R. J. Good, Contact Angle, Wetting and Adhesion: a Critical Review. In: K. L. Mittal (Hrg.): Contact Angle, Wettability and Adhesion. Festschrift in Honor of Professor Robert J. Good. Utrecht 1993, S. 3-36.
- [5] D. H. Kaelble, Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids. In: J. Adhesion 2 (1970), S. 66-81.
- [6] D. Li; A. W. Neumann, Equation of State for Interfacial Tensions of Solid-Liquid systems. In: Advances in Colloid and Interface Science 39 (1992), S. 299-345.
- [7] E. Moy; A. W. Neumann, Solid/Liquid Interfacial Tensions from contact Angle Data and Direct Force Measurements. In: J. Coll. Interf. Sci. 119,1 (1987), S. 296-297.
- [8] C. J. van Oss; M. K. Chaudhury; R. J. Good, Interfacial Lifschitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. In: J. Chem. Rev. 88 (1988), S. 927-941.
- [9] D. Owens; R. Wendt, Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. In: J. Appl. Polym. Sci 13 (1969), S. 1741-1747.
- [10] W. Rabel, Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren. In: Farbe und Lack 77,10 (1971), S. 997-1005.
- [11] S. Wu, Calculation of Interfacial Tensions in Polymer Systems. In: J. Polym. Sci. 43 (1971), S. 19-30.
- [12] S. Wu, Polar and Nonpolar Interaction in Adhesion. In: J. Adhesion 5 (1973), S. 39-55.
- [13] W. A. Zisman, Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution. In: Advances in Chemistry 43 (1964), S. 1-51.

Auf unserer Webseite finden Sie viele weitere interessante Applikationsberichte und Technical Notes unter

<https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/literatur/applikationsberichte/>