

# Gibt es einen Zusammenhang zwischen Benetzbarkeit und Haftung?

## Einleitung

Die thermodynamische Adhäsionstheorie wurde im letzten Jahrhundert, von Dupré, zur Erklärung der Haftung aufgestellt /1/. Die Entwicklung der Theorie ist bis heute noch nicht abgeschlossen /2/. Sie stellt einen Zusammenhang zwischen den oberflächenenergetischen Daten einer Oberfläche und der an ihr erzielbaren Haftung her. Die Theorie ist bis heute nicht bewiesen. Es wurden bisher lediglich in Einzelfällen empirisch ermittelte Zusammenhänge aufgezeigt.

## Benetzungstheoretische Ansätze

Die Wechselwirkung zwischen einer Oberfläche und einer benetzenden Flüssigkeit zeigt Bild 1. Es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen den Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannungen:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \alpha$$

$\gamma_s$  = Oberflächenspannung des Festkörpers (solidus)

$\gamma_l$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit (liquidus)

$\gamma_{sl}$  = Grenzflächenspannung zwischen festem Stoff und Flüssigkeit

$\alpha$  = Benetzungswinkel

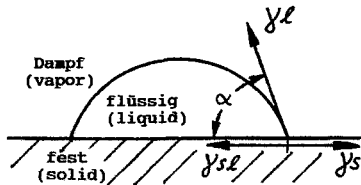


Bild 1: Benetzung eines Feststoffes durch eine Flüssigkeit

Als Adhäsionsarbeit  $W_A$  wird die Arbeit definiert, "die beim idealen Zerreißen der Grenzschicht zweier durch Adhäsion verbundener Körper geleistet werden muß" /3/. Dieser Ansatz gilt für reversible Bedingungen. Unter bestimmten Voraussetzungen, die an anderer Stelle dargestellt sind /1/, wird aus den obigen Ansätzen die Young-Dupré'sche Gleichung entwickelt.

$$W_A = \gamma_l (1 + \cos \alpha)$$

Nach dieser Gleichung wird eine hohe Haftung bei kleinem Benetzungswinkel bzw. bei großer Oberflächenspannung des Festkörpers erzielt.

## Oberflächenspannung und Haftung

Aus der Praxis kommend, wurden einfache Bezüge zwischen der Oberflächenspannung des Festkörpers und der Haftung aufgestellt. So sollen Kunststoffe bei einer entsprechenden Oberflächenspannung für das Bedrucken, Kaschieren oder Kleben geeignet sein, /6/. Für die Bedruckbarkeit von Bchern aus Polypropylen (PP) nach einer

Coronabehandlung wird eine Mindestoberflächenspannung von 38 mN/m gefordert /7/. Es wird auch eine direkte Beziehung zwischen dem Benetzungswinkel, der Oberflächenspannung und der Schälkraft dargestellt /6/. In DIN 53 364 /8/ "Benetzbarkeit von Folien" heißt es: "die Prüfung der Benetzbarkeit von Folien dient der Beurteilung von Bedruckbarkeit und Verklebbarkeit dieser Folien"/8/.

Es gibt aber auch Meinungen, daß diese Zusammenhänge nicht wirksam sind, /31/. Versuchsergebnisse stützen dies. In Bild 2 ist für unterschiedlich gebeiztes Polyoxymethylen (POM) die im Zugversuch ermittelte Klebfestigkeit in Abhängigkeit vom Benetzungswinkel aufgetragen. Die zunehmende Beizdauer kennzeichnet der Pfeil an der Kurve. Ausgangspunkt ist das unbehandelte POM. Es stellen sich für jeden Benetzungswinkel, je nach Beizvorgang, unterschiedliche Klebfestigkeiten ein. Folglich kann aus dem Benetzungswinkel kein Rückschluß auf die zu erzielende Haftfestigkeit gezogen werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen von Eilers an Polypropylen (PP) /10/.

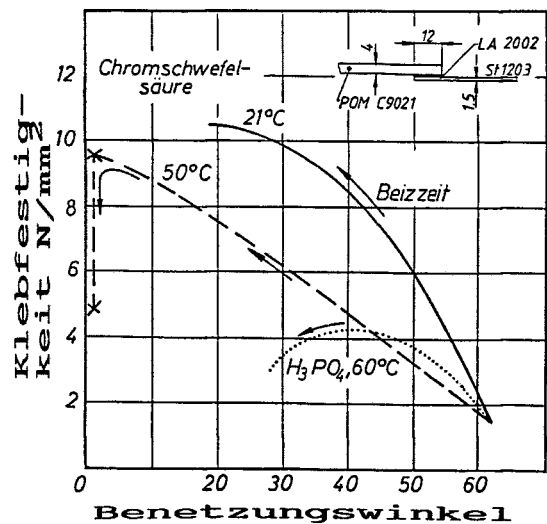


Bild 2: Zusammenhang zwischen Benetzungswinkel und Klebfestigkeit bei Anwendung verschiedener Beizverfahren

Bei der Coronabehandlung von Polyethylen (PE) in unterschiedlichen Gasen konnte ebenfalls kein direkter Zusammenhang ermittelt werden. Bild 3 zeigt die Klebfestigkeit in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung des PE. Es ergeben sich, analog zu Bild 2, je nach Prozeßgas unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Oberflächenspannung und Klebfestigkeit. Bei der Coronabehandlung in Edelgasen ändert sich die Oberflächenspannung nur wenig, die Haftung steigt jedoch beträchtlich.

Wenn auch der Zusammenhang zwischen Haftung und Benetzung je nach Behandlungsgas unterschiedlich ist, so werden hier maxi-

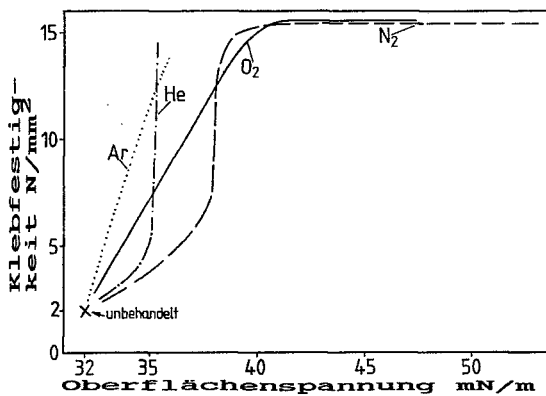


Bild 3: Klebfestigkeit von PE in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung bei Coronabehandlung in Gasen /9/

male Klebfestigkeiten immer bei Oberflächenspannungen von mehr als 40 mN/m erreicht. Dies deckt sich mit der eingangs wiedergegebenen Forderung, daß zum Bedrucken Oberflächenspannungen von min. 38 mN/m vorhanden sein müssen /7/.

Eine gute Benetzung allein kann jedoch die Haftung nicht erklären. So ist geschmolzenes PE zwar in der Lage, Aluminium zu benetzen, es haftet jedoch nicht /13/. Baumann /3/ beschreibt das Problem der "erzwungenen Benetzung": Das Benetzungsvermögen eines wässrigen Leimes kann durch oberflächenspannungsvermindernde Stoffe gezielt verbessert werden, was jedoch nicht zu einer verbesserten Haftung führen muß. So wird PE zwar von einer 20 %igen Polyvinylacetatlösung in Alkohol vollständig benetzt, die Polyvinylacetatschicht löst sich jedoch nach dem Trocknen vollständig wieder ab.

**Einfluß des benetzenden Mediums**

Bei Haftfestigkeitsuntersuchungen an niederdruckplasmavorbearbeitetem PP ergaben sich beträchtliche Unterschiede zwischen zwei Klebstoffen. Mit einem Polyurethan-Klebstoff (PU) wurden wesentlich höhere Festigkeiten erreicht als mit einem Epoxidharz (EP) /18/. Unterschiede in der Kohäsionsfestigkeit und im Verformungsverhalten der Klebstoffe erklären die großen Unterschiede nicht. Da die Oberflächeneigenschaften des Polypropylens nur von der Behandlungsdauer abhängig sind, muß der aufgetragene Klebstoff ebenfalls die Haftung beeinflussen, was bisher nicht berücksichtigt wurde.

**Erweiterte Anforderung: gleiche Oberflächenspannungen**

Dies berücksichtigt Dyckerhoff /12/, der einen erweiterten Zusammenhang zwischen Benetzbarkeit und Haftung ermittelte. Er stellte bei unterschiedlich vorbehandelten Stahlproben sowie bei verschiedenen Polymeren dann optimale Zerreißfestigkeit fest, wenn die Oberflächenspannungen von Klebstoff und Füge teil gleich sind. Krüger konnte bei seinen Versuchen diesen Zusammenhang allerdings nicht bestätigen /13/.

**Polare und disperse Oberflächenspannungen**

Fowkes bemerkte fest, daß die Oberflächenspannung aus polaren und dispersen Anteilen besteht, /14/. Für die Haftung sollen die polaren Anteile verantwortlich sein, da über die Polaritäten Wechselwirkungen zwischen der Oberfläche und dem Klebstoff bzw. Lack erzielt werden können. Die Zerlegung der Oberflächenspannung in ihre polaren und dispersen Anteile kann durch unterschiedliche Operationen vorgenommen werden /28,29,32/.

Untersuchungen von Krüger /13/ zur Lackhaftung auf verschiedenen Kunststoffen ergaben, daß bei den beiden untersuchten Lacken immer dann eine maximale Haftfestigkeit auftrat, wenn das Polaritätsverhältnis der polaren Oberflächenspannung von Lack und Polymer eins war; d.h. bei gleichen polaren Oberflächenspannungsanteilen, Bild 4. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses stellte Krüger jedoch fest, daß es zwischen den ermittelten Haftfestigkeit und den oberflächenenergetischen Daten der Verbundpartner keine eindeutige physikalische Gesetzmäßigkeit gibt.

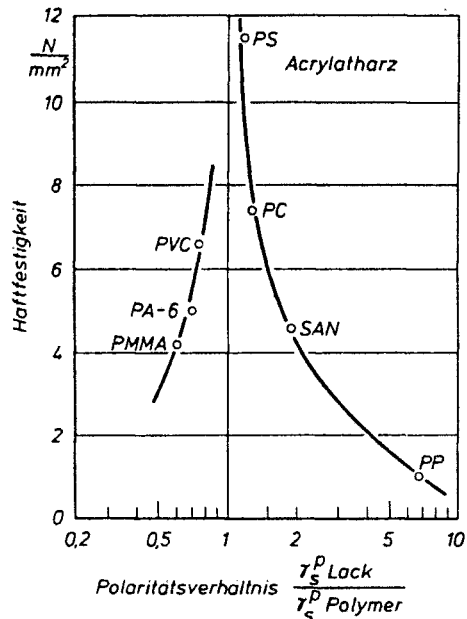


Bild 4: Haftfestigkeit eines Acrylatharz-Lackes auf verschiedenen Polymeren in Abhängigkeit vom Verhältnis der polaren Oberflächenspannungsanteile von Lack und Polymer

Etmanski und Ehrenstein /17/ kommen an Kunststoffverbindungen bezüglich der polaren Oberflächenspannungsanteile zu den gleichen Ergebnissen wie Krüger. Sie finden aber im Gegensatz zu Krüger /13/, jedoch wie Dyckerhoff /12 /, auch für ein Gesamtoberflächenspannungsverhältnis von 1 maximale Haftfestigkeiten.

**Erweiterte Anforderungen nach Wu**

Wu stellt für maximale Haftfestigkeit zwei weitergehende Bedingungen auf /15/:

- 1.) Die Polaritäten der aneinander haftenden Oberflächen müssen gleich sein.

$$X_1 = X_2 \text{ mit } X = \gamma_p / \gamma_{\text{ges}}$$

2.) Die Gesamtoberflächenspannungen müssen einander entsprechen

$$\gamma_{\text{ges } 1} = \sigma \cdot \gamma_{\text{ges } 2}$$

$\sigma$  = Wechselwirkungsparameter nach Girifalco und Good /16/, für den noch besonderer Interpretationsbedarf vorhanden ist /2/.

Dem in Bild 4 gezeigten und an anderer Stelle bestätigten Zusammenhang zwischen den Oberflächenspannungen und der Haftfestigkeit kann eine andere Untersuchung entgegengestellt werden, in der kein Zusammenhang nachweisbar war. Bischoff /18/ hat die Veränderung der Oberflächenspannung von Polypropylen bei unterschiedlicher Vorbehandlungsdauer im Niederdruckplasma gemessen und die Werte in die polaren und dispersen Anteile zerlegt, Bild 5. Es zeigt sich, daß die polaren Anteile innerhalb sehr kurzer Zeit ansteigen und danach konstant bleiben. Die Gesamtoberflächenspannung bleibt ebenfalls in weiten Bereichen in etwa konstant. Die oberflächenenergetischen Daten werden den Forderungen Wu's entsprechend aufbereitet und in Abhängigkeit von der Vorbehandlungsdauer aufgetragen, Bild 6. Der Biegeschälwiderstand - eine Möglichkeit der Haftungsmessung - ist ebenfalls wiedergegeben.

Obwohl sich bei einer Behandlung im Sauerstoffplasma die oberflächenenergetischen Daten, wie Bild 6 a zeigt, bei Behandlungszeiten von mehr als 6 s nur noch unwesentlich verändern, steigt die Haftung in Klebverbindungen mit EP bis zu einer Behandlungsdauer von 400 s beträchtlich an. Es zeigt sich weiter, daß sich die maximale Haftung von Polyurethanklebstoff (PU) und von EP bei unterschiedlichen oberflächenenergetischen Daten einstellen. Während Krüger /13/ und Etmanski/Ehrenstein /17/ maximale Haftung für das Verhältnis der polaren Oberflächenspannungsanteile von 1 ermittelten, wird hier die maximale Haftung bei Verhältnissen von 0,20 für EP und 0,55 für PU erreicht.

Bei der Vorbehandlung im Stickstoffplasma, Bild 6 b ergeben sich etwa ähnliche oberflächenenergetische Zustände wie bei der Sauerstoffplasmabehandlung. Eine Verbesserung der Haftung erfolgt jedoch nicht.

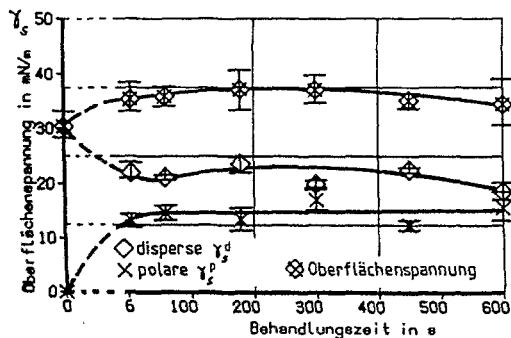
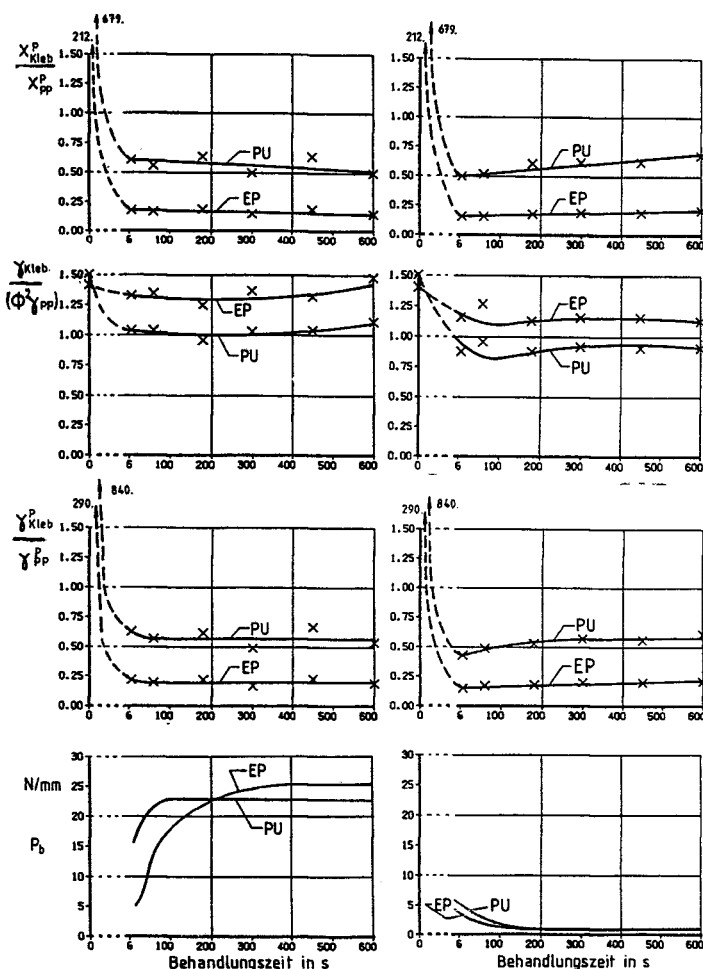


Bild 5: Veränderung der Oberflächenspannung von PP in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer im Niederdruckplasma /18/



a) Sauerstoffplasma    b) Stickstoffplasma

Bild 6: Auswertung der Oberflächenspannungen und des Biegeschälwiderstandes in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer /18/

Ähnliches hat Wahono /19/ an EPDM festgestellt, Bild 7. Das Beizen in Chromschwefelsäure erhöht die Oberflächenspannung inklusive der polaren Anteile. Die Haftung verbessert sich so weit, daß bei der Schälprüfung die EPDM-Folie zerreißt. Eine Niederdruckplasmabehandlung in Argon von 18 s Dauer erzeugte auf dem EPDM in etwa gleiche Oberflächenspannungszustände wie beim Beizen, eine Verbesserung der Haftung trat jedoch nicht ein. Die Proben versagten beim Schälen adhäsiv am EPDM bei sehr geringer Belastung. Auch eine verlängerte Behandlung, die die Oberflächenspannungen weiter erhöht, ergab keinen verbesserten Schälwiderstand.

#### Auswertung der Ergebnisse

Zusammenfassend ist festzustellen, daß es Untersuchungen gibt, die einen Zusammenhang zwischen oberflächenenergetischen Daten und Haftung herstellen, denen andere gegenüberstehen, die keinen Zusammenhang aufgezeigt haben. Bei den derzeit vorliegenden Ergebnissen kann daher noch nicht allgemeingültig geschlossen werden, ob ein Zusammenhang vorhanden ist oder nicht.

Es fallen jedoch zwei Tendenzen auf: Wird die Haftung unterschiedlicher Stoffe an-

einander untersucht, so sind Zusammenhänge erkennbar; allerdings nicht immer gleiche. Wird hingegen die Oberfläche durch Vorbehandlung gezielt verändert, sind keine Zusammenhänge feststellbar. Die Ursache hierfür ist noch ungeklärt. Ein Unterschied ist jedoch vorhanden. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Werkstoffe beeinflusst das Prüfergebnis - siehe unten, Problematik der Haftungsprüfung. Streng genommen dürfen daher Klebfestigkeiten unterschiedlicher Werkstoffe nicht zueinander in Beziehung gesetzt werden. Wird hingegen der Oberflächenzustand durch Vorbehandlung gezielt verändert, so tritt diese Beeinflussung der Ergebnisse nicht auf, diese Ergebnisse genauer.

Darüber hinaus ergeben sich noch mehr Gründe die für die unterschiedlichen experimentellen Ergebnisse verantwortlich sein können:

- die Problematik der Haftungsmessung,
- die Ansätze dieser Adhäsionstheorie,
- die Benetzungsmessung,
- die Übertragbarkeit der Benetzungsergebnisse,
- die Nichterfaßbarkeit der Grenzflächenspannung,
- die Möglichkeiten der Diffusion,
- die Möglichkeit der Bildung von Hauptvalenzbindungen.

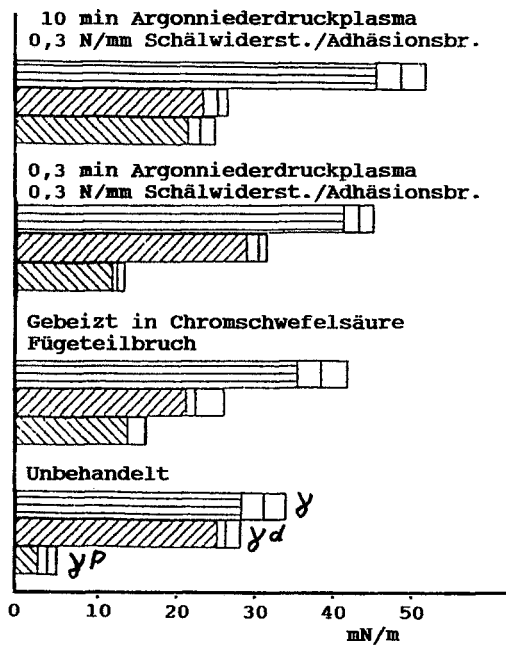
#### Problematik der Haftungsmessung

Grundsätzlich gilt, daß Adhäsion nicht meßbar ist. Gemessen wird immer nur eine Verbundfestigkeit die u.a. durch die mechanischen Eigenschaften der aneinander haftenden Partner und die Prüftechnologie beeinflusst wird. Dementsprechend können in Abhängigkeit von der Prüftechnik unterschiedliche Zusammenhänge zwischen den oberflächenenergetischen Daten und der Haftung hergestellt werden.

In Bild 8 ist für PP-Kleberverbindungen mit EP das Verhältnis der polaren Anteile der Oberflächenspannungen, die Zugscherfestigkeit und der Biegeschälwiderstand in Abhängigkeit von der Vorbehandlungsdauer im Sauerstoffniederdruckplasma aufgezeigt - Werte von Bischoff /18/ -. Betrachtet man das Verhältnis der Oberflächenspannungen in bezug zur Zugscherfestigkeit, so ergibt sich eine brauchbare Übereinstimmung der Kurvenzüge. Zum Biegeschälwiderstand ist kein Zusammenhang vorhanden. Der Biegeschälversuch macht jedoch die genaueren Aussagen /20/.

#### Ansätze der Adhäsionstheorie

Die Ansätze der Theorie weisen, in bezug auf die Haftung von Klebstoffen, Lacken und ähnlich fest haftenden Produkten Schwächen auf. Die thermodynamische Betrachtungsweise der Haftung bezieht sich auf reversible Vorgänge: nach dem Trennen muß der ursprüngliche Zustand wieder vorhanden sein. - Voraussetzung der oben gegebenen Definition der Adhäsionsarbeit



### Oberflächenspannung

Bild 7: Veränderung der Oberflächenspannung vom EPDM durch Vorbehandlung

sind reversible Vorgänge.- Dies gilt für einen Wassertropfen auf einer Scheibe. Wird der Tropfen entfernt, so ist der ursprüngliche Zustand wieder vorhanden. Bei Klebverbindungen ist dies im allgemeinen nicht der Fall; vor allem dann nicht, wenn die Verbindungen höhere Festigkeiten aufweisen. Klebverbindungen versagen, wie

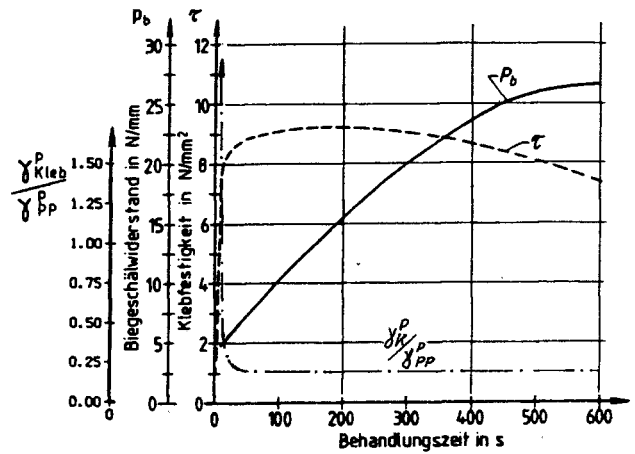


Bild 8: Veränderung von Zugscherfestigkeit, Biegeschälwiderstand und des Verhältnisses der polaren Oberflächenspannungsanteile bei einer Sauerstoffplasmabehandlung von PP

vielfältige Untersuchungen gezeigt haben, im Klebstoff oder im Grundwerkstoff.

Die Oberfläche, auf die ein Klebstoff aufgetragen wird, hat eine strukturierende Wirkung auf die unmittelbar anliegenden Bereiche des Klebstoffes /22/. Dieser Bereich kann schlechtere Eigenschaften als der Kern der Klebschicht haben, so daß hier eine Schwachzone entstanden ist, in der Versagen eintreten kann. Diese Schwachzone ist mit einer Benetzungsmessung nicht erfassbar, ebensowenig

Fortsetzung auf Seite 19

wie die oben erwähnte Schwachzone im Füge-  
teil, die bei der Vorbehandlung entstanden  
ist.

Bei einer erweiterten Betrachtung der Ad-  
häsionstheorie wird die Kohäsionsenergie  
der Stoffe in die Betrachtungen mit einbe-  
zogen /1/. Die eben erwähnten Schwachzonen  
erschweren dies, da die hier vorhandene  
Kohäsionsenergie kaum erfaßbar ist.

Die Voraussetzung, daß die freie Grenz-  
flächenenergie des festen Stoffes der  
kritischen Oberflächenspannung entspricht,  
ist umstritten. Nach Schornhorn /23/ gilt  
dies nur für amorphe Stoffe.

Bei Polymerisationsklebstoffen beeinflußt  
die Oberfläche durch katalytische Wirkung  
die Abbindegeschwindigkeit und die Festig-  
keit der Verbindung. Diese Wirkung kann  
die Benetzung kaum erfaßt.

### **Benetzungsmessung**

Der Benetzungswinkel, auf den sich viele  
Aussagen direkt oder indirekt stützen,  
ist zwar sehr leicht meßbar, wird jedoch  
von einer Vielzahl von Faktoren wie Ober-  
flächenrauigkeit, das Vor- bzw. Rück-  
schreiten des Tropfens usw. beeinflußt.

### **Übertragbarkeit der Benetzungsergebnisse**

Es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob  
die Benetzung mit einer oder mehreren,  
meist dünnflüssigen Testflüssigkeiten die  
Benetzung eines Klebstoff wiedergibt. Die  
Benetzung und der Aufbau der Haftung bei bzw.  
nach der Benetzung sind zeitabhängig. Bei  
Haftungsuntersuchung zwischen Poly-  
isobutylen und Kunststoffen ergaben sich  
für längere Kontaktzeiten wesentlich höhere  
Trennenergien /30/. Betrachtet man das  
Kleben mit Haftklebstoffen - Klebstoffe mit  
hoher Viskosität die nicht abbinden - auch  
als Benetzungsvorgang, so wird hier die  
Benetzung, die zu einer maximalen Haftung  
führt, erst nach beispielsweise 20 Stunden  
erreicht /24/. Hierzu paßt Brockmann's  
Äußerung /26/, daß die Vorgänge, die die  
Haftung ausmachen, erst nach dem Benetzen  
ablaufen.

Es gilt aber noch grundsätzliches zu  
bedenken. Eine erzwungene Benetzung  
bietet keine Gewähr für eine gute Haftung.  
Die Benetzungstheorie gilt offensichtlich  
nur für die haftungserzeugenden Bestand-  
teile eines Klebstoffes. Klebstoffe sind  
jedoch Stoffgemische aus Füllstoff, Ver-  
dünnungsmittel, Verdickungsmittel,  
Thixotropiermittel usw., sowie den haftung-  
erzeugenden Bestandteilen. Analog zu  
Baumanns Erkenntnissen können die Zusatz-  
stoffe Oberflächenspannung und Benetz-  
barkeit beeinflussen, ohne gleichzeitig die  
Haftung zu verändern. Andererseits  
beeinflussen die nicht an der Haftung  
beteiligten Füllstoffe die Klebfestigkeit  
/11/. Weiter gilt, daß Harz, Härter  
und der gemischte Klebstoff jeweils ein  
arteigenes Benetzungsverhalten zeigen  
/25/.

### **Oberflächenspannung des Klebstoffes**

Die Oberflächenspannung des Klebstoffes  
wird vielfach am festen Klebstoff gemessen  
/17/. Bischoff /18/ und Krüger /13/ haben  
festgestellt, daß die Oberflächenspannung  
eines ausgehärteten Klebstoffes oder  
Lakkes von den beim Abbindevorgang  
herrschenden Umgebungsbedingungen z.  
B. von der Oberfläche an der ein  
Klebstoff aushärtet, beeinflußt wird.  
Hier sei noch einmal auf die oben  
erwähnte Strukturierung des Klebstoffes  
durch die Oberfläche hingewiesen.  
Dieses Phänomen dürfte auch für die  
Betrachtung der Grenzflächenspannung  
von Interesse sein.

## Möglichkeit der Diffusion und des Entstehens von Hauptvalenzbindungen

Nach anderen Haftungstheorien sind Diffusionsvorgänge und Hauptvalenzbindungen an der Haftung beteiligt. - Hauptvalenzbindungen zwischen Klebstoff und vorbehandeltem Aluminium sind nachgewiesen /27/. - Beides ist durch eine Testflüssigkeit nicht erfaßt.

## Anfangshaftung und Alterung

Wichtig für die Eignung einer Klebverbindung ist die Dauerbeständigkeit der Haftung und nicht die Anfangshaftung. Zwischen beiden besteht kein Zusammenhang. Zur Alterungsbeständigkeit der Adhäsionsbindung wurde jedoch bisher kein Zusammenhang hergestellt. Folglich macht die Benetzungstheorie hierzu keine Aussagen.

## Resümee

Die große Anzahl der aufgezählten Probleme spricht dagegen, daß ein genereller Zusammenhang zwischen den benetzungsenergetischen Daten einer Oberfläche und der Haftfestigkeit besteht. In denn Fällen, wo die Adhäsionssysteme den Voraussetzungen der Adhäsionstheorie entsprechen, kann es jedoch Zusammenhänge geben.

Die Messung der Benetzbarkeit ist jedoch zur Qualitätskontrolle von Oberflächenvorbehandlungsverfahren bzw. zur Charakterisierung von Oberflächenzuständen nutzbar.

Aufgrund der oben dargestellten Probleme muß gefordert werden, durch eine umfangreiche Untersuchung die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Haftung und oberflächenenergetischen Daten zu klären. Bis dahin sollte allen neu aufgezeigten Zusammenhängen mit der notwendigen Skepsis begegnet werden.

## Literatur

- / 1/ Bischoff, Claus; Possart, Wulff; Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen, Berlin 1983
- / 2/ Possart, Wulff; Randwinkelmessungen, Thermodynamik und Folgerungen für die Adhäsion; Dechema Monographie Vol 119; Frankfurt 1990
- / 3/ Baumann, H.; Leime und Kontaktkleber, Berlin 1967

- / 4/ Matting, Alexander; Metallkleben; Berlin 1969
- / 5/ Zismann, W.A.; In: Weiß, P., Adhesion and Cohesion; Amsterdam, London, New York 1962, S. 176
- / 6/ Kalwar, Klaus; Haftung - ein Adhäsionsproblem, Coronabehandlung - eine Problemlösung; Tagungsband Lackierung von Kunststoffen; Köln 1986
- / 7/ Kühne, Günther; Bedrucken von Becherverpackungen aus Polypropylen; neue verpackung (1981) 4, S.434-442
- / 8/ DIN 53 364, Benetzbarkeit von Folien
- / 9/ Stradal, M.; Goring, D.A.I.; Polymer Eng. and Sci, 17, 38 (1977)
- /10/ Eilers, H.; Die Ermittlung fertigungsgerechter Arbeitsbedingungen für das Kleben unter dem Einfluß von Temperatur und Alterung; Dissertation Aachen 1967
- /11/ Mittrop, F.; Beitrag zum Festigkeitsverhalten von Metallklebverbindungen; Industrie-Anzeiger (1961) 23, S.16-34
- /12/ Dyckerhoff, G.A.; Über den Einfluß der Grenzflächenspannung auf die Haftfestigkeit; Dissertation, Stuttgart 1965
- /13/ Krüger, Richard; Haftungsbestimmende Einflußgrößen beim Lackieren und Kleben von Thermoplasten; Dissertation Aachen 1980
- /14/ Fowkes, F.M.; Ind. Eng. Chem. 56, 40 (1964)
- /15/ Wu, S.; Polymer Interface and Adhesion; New York, Basel 1982
- /16/ Girifalco, L.A.; Good, R.J.; Journal of Applied Polymer Science 13, 1741 (1969)
- /17/ Ehrenstein, G.; Etmanski, B.; Zuverlässigkeit von Oberflächenspannungsmeßverfahren zur Vorhersage der Haftfestigkeit von Kunststoffklebverbindungen; Tagungsband Konstruktives Kleben Paderborn 1990
- /18/ Bischoff, Reinhard; Einfluß unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlungen auf Klebbarkeit, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit von Polapropylen; Dissertation Berlin 1988 / München 1988
- /19/ Wahono, Wiyu; TU Berlin, unveröffentlichte Ergebnisse
- /20/ Rasche, Manfred; Der Zugscherversuch in der Klebtechnik; Adhäsion 34 (1990) 11, S.36-43
- /21/ Rasche, Manfred; Qualitätsbestimmende Einflußgrößen bei Kunststoff-Metall-Verbindungen; Schweißtechnische Forschungsberichte Bd 5; Düsseldorf 1986
- /22/ Kötting, Gerhard; Untersuchung der Klebschichtmorphologie und der Beanspruchungsabhängigen Deformations- und Versagensmechanismen in der Klebfuge von Metallklebverbindungen; Dissertation Paderborn 1984
- /23/ Schornhorn, K.; J. Phys.Chem. 69 (1965), 1084
- /24/ Milker, R.; Aufbau und Eigenschaften der Haftklebstoffe; Tagungsband Kleben Rapperswil 1987; Darmstadt 1987
- /25/ G. Habenicht, M. Baumann, R. Penzl, J. Kayed; Prüfung der Benetzungseigenschaften von Klebstoffen mit einer Benetzungswaage; Adhäsion 32 (1988) 6, S.17-21
- /26/ Brockmann, W.; Probleme bei der Messung von Adhäsionsvorgängen; Farbe + Lack, 79 (1973) 3, S. 213-221
- /27/ Kollak, H.; Adhäsionsmechanismen beim Kleben TUB Dokumentation Heft 21; Berlin 1984
- /28/ Owens, W.K.; Wendt R.C.; Estimation of the Surface Free Energy of Polymers; Journal of Applied Polymer Sc. 13 (1969), S.1741-1747
- /29/ Wu, S.; Polar and Nonpolar Interactions in Adhesion; J. Phys.Chemistry 74 (1970) 3, S. 632-638
- /30/ Zosel, Albrecht; Untersuchungen zum Einfluß der mechanischen und grenzflächenenergetischen Eigenschaften auf den Tack von Haftklebern; Adhäsion 30 (1986) 3, S.14-24
- /31/ Fischer, M., Schmid, R.; Die Eigenschaften des Klebstoffs und die Festigkeit der Verklebung; Adhäsion 23 (1979) 12, S.372-377
- /32/ Rabel, W.; Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren; Farbe + Lack 77 (1971) 10, S. 997-1006