

# Das Phänomen der Haftung

Im ersten Beitrag der neuen Serie (Adhäsion 6, S. 22-25) wurde beschrieben, was Klebstoffverarbeiter über Kunststoffe wissen sollten. Dieser zweite Teil erklärt das Phänomen Haftung und wie man die an der Grenzfläche zwischen Klebstoff und Kunststoffoberfläche ablaufenden Wechselwirkungen näher bestimmen kann.

Henning Gleich, Andreas Hartwig, Hartwig Lohse

Während klassische Fügeverfahren wie Schrauben, Nieten, Löten und Schweißen beim Verbinden unterschiedlicher Materialien an ihre Leistungsgrenzen stoßen, zeigt die moderne Füge-technik Kleben gerade hier ihre Stärken. Klebverbindungen ermöglichen eine flächige Krafteinleitung und -verteilung in der Klebfuge. Damit sind bei geklebten Konstruktionen höhere statische und dynamische Belastungen übertragbar. Klebprozesse sind außerdem automatisierbar und es sind eine hohe Qualität, Reproduzierbarkeit und günstige Kosten realisierbar.

## Kleben von Kunststoffen

Klebtechnologisch ist besonders das Kleben von Kunststoffen interessant. Dabei spielen thermoplastische Kunststoffe eine dominierende Rolle. Aufgrund ihrer geringen Dichte bieten Kunststoffe ein hohes Gewichtseinsparungspotenzial. Die Bauteilherstellung oftmals in einem Prozessschritt (Spritzgießen) bietet zudem wirtschaftliches Potenzial. Ein weiterer Aspekt ist, dass sich die molekulare und morphologische Struktur entsprechend den mechanischen und physikalisch-chemischen Erfordernissen gezielt modifizieren lassen /1/.

Die meisten technisch und wirtschaftlich bedeutsamen Thermoplaste lassen sich je-

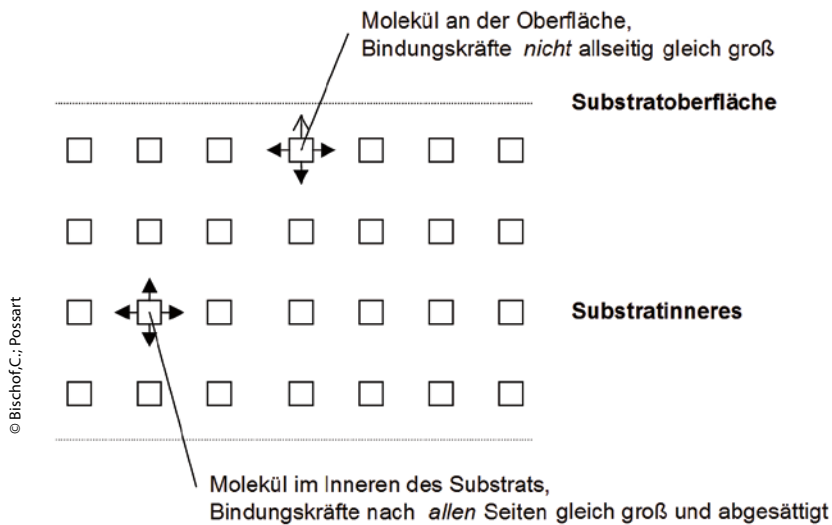
doch aufgrund ihrer strukturell bedingten niedrigen Oberflächenenergie sowie Apolarität sehr schlecht kleben. Zu diesen gehören vor allem die Polyolefine und darunter das für konstruktive Anwendungen zunehmend an Bedeutung gewinnende Polypropylen /2-7/. Diese Polymere sind nicht oder nur bedingt löslich bzw. quellbar /8/. Daher ist auch eine „Diffusionsklebung“ /9/ mit lösemittelhaltigen Klebstoffen, bei der in der sich ausbildenden Grenzflächenschicht eine wechselseitige Diffusion von Polymermolekülsegmenten der Füge-teiloberfläche und der Klebstoffmoleküle unter Ausbildung einer stoffschlüssigen Verbindung stattfindet, nahezu unmöglich. Es kommt daher primär die sogenannte „Adhäsionsklebung“ in Frage, die auf atomaren und zwischenmolekularen Wechselwirkungen, also auf Nebenvalenzkräften vorrangig polarer Gruppen in der Ober- und Grenzflächenschicht der kontaktierenden Partner (Fügeteil und Klebstoffmolekül) beruht.

Zur Verbesserung der Adhäsionseigenschaften ist eine gezielte Veränderung des molekularen, thermodynamischen bzw. morphologischen Zustandes der Kunststoffoberfläche mit Hilfe besonderer Vorbehandlungsmethoden erforderlich /10-12/. In der Praxis kommen bereits je nach Anforderung an die Adhäsionseigenschaften der Bauteile und mit dem Blick auf

den Fertigungsdurchsatz bestimmte Vorbehandlungsmethoden zum Einsatz. Diese zielen auf die chemische und / oder physikalische Oberflächenmodifikation, die sogenannte „Aktivierung“ der Oberfläche des Füge-teils hin. Entscheidendes Ziel ist im Allgemeinen, polare Gruppen in der Oberflächenschicht als notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingung für eine ausreichende Benetzung als Grundvoraussetzung für eine ausreichende Haftung zwischen Klebstoff und Kunststoffoberfläche zu erzeugen.

## Phänomen Haftung

Zahlreiche wissenschaftliche und anwendungstechnische Veröffentlichungen dokumentieren, dass das Phänomen Haftung sehr komplex ist. Es schließt mehrere Einzelbeiträge im atomaren und molekularen Bereich ein. Es wirken insbesondere Nebenvalenzkräfte, die vom molekularen Aufbau der Kunststoffe abhängen und auf polaren – z. B. Carbonyl-, Carboxyl-, Amid-, Amin- oder anderen Gruppen – beruhen oder auf unpolaren Gruppen, wie z. B. Olefin- und Diolefin-Strukturen. Der Zusammenhalt in festen Volumenphasen wird von dreidimensional wirkenden Kräften im Volumen bewirkt. An der Oberfläche wirken die Kräfte jedoch nicht in allen Raumrichtungen in gleicher Höhe (*Bild 1*).



**Bild 1** > Bindungskräfte im Inneren und an der Oberfläche eines Substrats /13/

Das führt dazu, dass sich die Atome und Moleküle an der Oberfläche in einem energiereicheren Zustand befinden. Mit den noch vorhandenen Restkräften werden Moleküle aus der angrenzenden Gas- oder Flüssigphase angezogen. Ihre Anbindung erfolgt dann durch Chemi- oder Physisorption. Dieser Mechanismus bildet die wichtigste Grundlage der Haftung.

Nach Bischof und Possart /13/ ist es auch heute noch schwierig, diese Vorgänge quantitativ zu beschreiben. Jedes Stoffsystem weist entsprechend seines atomaren und molekularen Aufbaus an der Oberfläche andere zwischenmolekulare Wechselwirkungen auf. Damit ist auch die Haftung unterschiedlich groß. Es ist inzwischen bekannt, dass die die Haftung bewirkenden Vorgänge nicht nur an den obersten Moleküllagen ablaufen, sondern sich je nach Struktur und Aufbau der Substrate über mehrere Atom- bzw. Molekülschichten erstrecken. Bei den Untersuchungen zum Adhäsionsvermögen ist also immer von der Existenz einer Oberflächen- bzw. Grenzflächenschicht mit einer bestimmten Struktur auszugehen, die sich in einem bestimmten Zustand befindet. Aus diesem Grund kann die Haftung wie folgt definiert werden: Haftung repräsentiert eine Erscheinung, die auf zwischenmolekularen Wechselwirkungen an den Phasengrenzen fest / gasförmig und fest

## Dosiertechnik



Bondexpo Besuchen Sie uns in Stuttgart  
**10.10. – 13.10.2016**  
 Halle 9 · Stand 9309

### Misch- und Dosieranlagen für

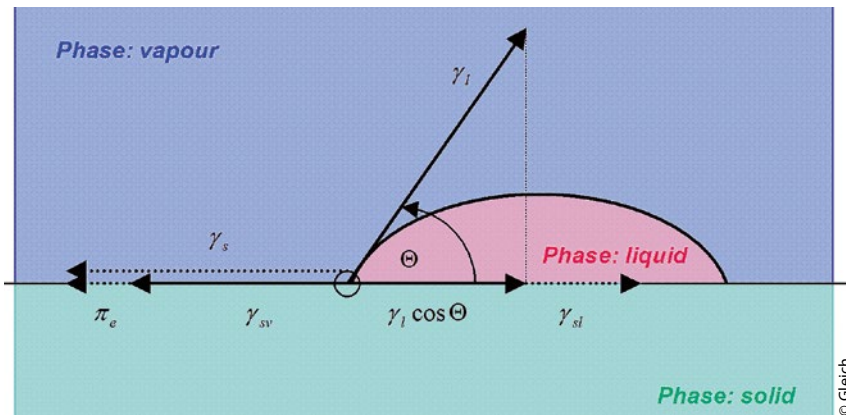
- die Verarbeitung von nieder- bis mittelviskosen Mehrkomponenten-Medien auf Basis von z.B. Epoxid, Polyurethan und Silikon
- Anwendungen in den Bereichen: Kleben, Vergießen, Abdichten, Beschichten, unter Vakuum Vergießen



Hilger u. Kern / Dopag Group

Tel.: +49 621 3705-0 • dosiertechnik@hilger-kern.de





**Bild 2** > Randwinkel  $\Theta$  am Punkt des Dreiphasen-Gleichgewichts /27/

**Legende:**

- $\gamma_l$  = Oberflächenspannung der Flüssigphase (Klebstoff)
- $\gamma_s$  = Oberflächenenergie des Substrats (Fügepart)
- $\gamma_{sl}$  = Grenzflächenenergie (zwischen Fügepart und Klebstoff)
- $\gamma_{sv}$  = Grenzflächenenergie (zwischen Fügepart und Umgebung)
- $\Theta$  = Randwinkel in Abhängigkeit von der stattfindenden Benetzung
- $\pi_e$  = Spreitdruck

/ flüssig oder fest / fest beruht und als Widerstand gegenüber einer trennenden Beanspruchung in Erscheinung tritt /13/.

**Adhäsion zwischen Polymeren**

Das Phänomen Haftung zwischen Kunststoffen, wie sie sowohl der Substratwerkstoff (Adhärend) als auch der Klebstoff (Adhäsiv) darstellen, lässt sich also auf die Wirkung nebenvalenter, das heißt physikalischer Kräfte in der Grenzflächenschicht zurückführen. Diese Nebenvalenzkräfte bilden sich zwischen Makromolekülen aus, die in ihrem chemischen Aufbau sehr unterschiedlich sein können.

Um eine gute Adhäsion und daraus resultierend eine hohe Haftung zwischen Fügepart und Klebstoff zu erreichen, ist es notwendig, dass Molekülabschnitte der beiden Partner in der Grenzflächenschicht weitgehend wechselwirken können. Voraussetzung hierfür ist u.a. eine Ähnlichkeit von Stärke und Art der molekularen Kräfte, die von beiden Oberflächen ausgebildet werden. Diese Kräfte können rein dispersiven Charakter haben oder durch Dipol-Wechselwirkungen bis hin zu Wasserstoff-Brückenbindungen gekennzeichnet sein. Nebenvalenzkräfte bestimmen aber nicht nur die mechanischen Eigenschaften (Kohäsionseigenschaften) der Kunststoffe (insbesondere Thermoplaste). Sie tre-

ten auch an der Oberfläche des Fügeparts auf. Während sich im Inneren einer homogenen Phase die physikalischen Bindungswerten benachbarter Moleküle gegenseitig weitestgehend absättigen, ist dies, wie bereits in *Bild 1* dargestellt, an der Fügepartoberfläche (Grenzfläche zwischen Fügepart und umgebender Gasphase) nicht der Fall. Hieraus resultiert die Oberflächenenergie, die die Ausbildung von Adhäsionswirkungen zur Folge hat. Je höher die Oberflächenenergie als Summe nicht abgesättigter Valenzkräfte in der Kunststoffoberfläche, desto höher ist potenziell die Kraftwirkung auf den Klebstoff. Hieraus ergibt sich bereits, dass niederenergetische Oberflächen, wie bei den meisten Kunststoffen, geringere Haftungskräfte ausbilden können als hochenergetische. Damit sich Haftungskräfte in der Grenzflächenschicht ausbilden können, muss der Klebstoff darüber hinaus diese Valenzen adäquat absättigen können. Ideale Voraussetzungen hierfür sind: atomarer Kontakt, gleichartige Valenzen und gleiche Oberflächenenergieanteile von Substrat und Klebstoff.

Der atomare Kontakt wird durch die Benetzung der Kunststoffoberfläche durch den flüssigen Klebstoff hergestellt. Viskosität, Temperatur und Zeit spielen hierbei eine wichtige Rolle. Eventuell vorhandene Kondensatschichten, Trennmittelrückstände aus dem Bauteilherstellungspro-

zess, ausdiffundierende Additive und Modifier können die Ausbildung dieses atomaren Kontaktes jedoch behindern oder auch unmöglich machen. Diese Verunreinigungen der Fügepartoberfläche müssen für eine erfolgreiche Klebung entweder weitestgehend entfernt oder aber chemisch an die Oberfläche gebunden werden (Oberflächenreinigung und -modifikation).

Die Benetzung an sich ist jedoch in erster Linie von den dispersiven und polaren Oberflächenenergieanteilen der Partner abhängig. Ist die Oberflächenspannung des Adhäsivs größer als die Oberflächenenergie der Kunststoffoberfläche, so benetzt das Adhäsiv die Substratoberfläche nicht vollständig. Ein auf die Festkörperoberfläche aufgebracht Tropfen des Adhäsivs wird einen Randwinkel deutlich größer 0 ausbilden. Mit kleiner werdender Oberflächenspannung des Adhäsivs wird dieser Randwinkel ebenfalls kleiner, bis schließlich der Randwinkel verschwindet, also vollständige Benetzung eintritt.

**Oberflächen- / Grenzflächenenergie**

Um die an der Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und einer Festkörperoberfläche ablaufenden Wechselwirkungen näher zu bestimmen, kann man z. B. einen Flüssigkeitstropfen auf dem Festkörper absetzen. Dann bildet sich an

der gemeinsamen Grenzfläche zwischen der flüssigen Phase und dem Festkörper und der umgebenden Gasphase (insbesondere Luft) in Abhängigkeit von den stattfindenden physikalischen Wechselwirkungen ein charakteristischer Randwinkel  $\Theta$  aus. Rein qualitativ kann dann die Grundaussage gemacht werden, dass sich eine gute Benetzung an einem kleinen Randwinkel zeigt und eine schlechte Benetzung zu einem großen Randwinkel führt.

Bild 2 zeigt schematisch die vektorielle Darstellung der Kräfte bzw. Energien an der Grenzfläche im 3-Phasen-Punkt mit dem Flüssigkeitstropfen, der Festkörperoberfläche und der umgebenden Atmosphäre (liquid, solid, vapour). Der sich in der Grenzfläche einstellende Gleichgewichtszustand folgt dann aus der Young'schen Gleichung /28/:

$$\gamma_s - \pi_e = \gamma_{sv} = \gamma_l \cos\Theta + \gamma_{sl} \quad (\text{Gl. 1})$$

Von spezieller Bedeutung ist hier der Spreitdruck  $\pi_e = \gamma_s - \gamma_{sv}$ . Er ist ein Ausdruck für die Erniedrigung der wahren Oberflächenenergie  $\gamma_s$  des Festkörpers durch die aus der umgebenden Gasphase an der Festkörperoberfläche adsorbierten Moleküle.

Im Vakuum ist  $\pi_e = 0$  und  $\gamma_s = \gamma_{sv}$ . Unter "realen" Bedingungen hängt der Spreitdruck vom vorliegenden Drei-Phasen-System ab und kann nur mit aufwendigeren Adsorptionsmessungen bestimmt werden.

Die Adsorption von Umgebungsmolekülen auf niederenergetischen Oberflächen, wie sie ja bei Polymeren meist vorhanden sind, ist allerdings gering /37/. Daher vernachlässigte Kaelble /25-26/ den Spreitdruck bei der Behandlung der Benetzung polymerer Oberflächen ( $\pi_e \approx 0$ ). Zisman wies weiterhin durch vergleichende Messungen nach, dass die Vereinfachung der Young'schen Gleichung zulässig ist /18/. Gleichung 1 wird damit zu:

$$\gamma_l \cos\Theta = \gamma_s - \gamma_{sl} \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Grenzflächenenergie  $\gamma_{sl}$  hängt somit von der Art und dem Umfang der Wechselwirkungen zwischen der Polymeroberfläche und der Benetzungsflüssigkeit ab. In Fortführung der Young'schen Arbeiten leitete Dupré in /29/ folgenden Zusammenhang zwischen der Adhäsionsarbeit  $W_a$  und den Größen der Young'schen Gleichung her:



Innovation in Application

## Sulzer Mixpac TecDays 2016 Reliable adhesive bonding process

September 28–29, 2016  
Empa Dübendorf  
Switzerland

# SULZER

The increased use of modern 2-component adhesives requires a reliable adhesive bonding process. Therefore it is worthwhile for you to take a deeper look into the adhesive process at the Sulzer Mixpac TecDays. Two days of new ideas and thoughts to drive your business forward.

Sulzer Mixpac AG  
Ruetistrasse 7  
9469 Haag, Switzerland  
Tel. +41 81 772 20 00  
Fax +41 81 772 20 01  
www.sulzer.com

**Get information now:**  
registration.mixpac@sulzer.com

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_1(1 + \cos\Theta) \quad (\text{Gl. 3})$$

$$W_a = \gamma_1(1 + \cos\Theta) \quad (\text{Gl. 4})$$

Gleichung 4 wird als Young-Dupré'sche Randwinkelgleichung bezeichnet. Die Adhäsionsarbeit  $W_a$  setzt sich danach aus der Summe der einzelnen Oberflächenenergien  $\gamma_1$  und  $\gamma_s$  vermindert um die Grenzflächenenergie  $\gamma_{sl}$  zusammen. Sie ist diejenige Energie, die benötigt wird, um die in der Grenzfläche (solid-liquid) in Wechselwirkung stehenden Phasen in Gegenwart der umgebenden Gasphase (vapour) zu trennen /17/.

### Grenzflächenenergie und Wechselwirkungsparameter

Betrachtet man Gleichung 3, so wird die Adhäsionsarbeit bei  $\Theta = 180^\circ$ , also bei „vollständiger“ Unbenetzbarkeit der Festkörperoberfläche durch die flüssige Phase gleich Null. Gleichzeitig nimmt die Grenzflächenenergie entsprechend Gleichung 2 ein Maximum an:

$$\gamma_{sl_{\text{Max}}} = \gamma_s + \gamma_1 \quad (\text{Gl. 5})$$

Daraus folgt, dass zum Erzielen der stärksten Adhäsion die Grenzflächenenergie ihren kleinstmöglichen Wert ( $\gamma_{sl} \leq 0$ ) annehmen muss. Finden Wechselwirkungen zwischen den beiden in Kontakt tretenden

Phasen statt, wird die Grenzflächenenergie  $\gamma_{sl}$  herabgesetzt. Solche Wechselwirkungen können chemischer und / oder physikalischer Natur sein, wobei als chemische Wechselwirkungen insbesondere die Hauptvalenzbindungen (z. B. als Folge von Löslichkeit, Diffusion, "echten" chemischen Reaktionen) und als physikalische Wechselwirkungen die Nebenvalenzbindungen (z. B. Dipol-Dipol-Kräfte, induzierte Dipol-Kräfte, Wasserstoffbrücken, Dispersionskräfte) angesehen werden können.

Zur Charakterisierung möglicher Wechselwirkungen zwischen Festkörper und Flüssigkeit führten Girifalco und Good in /21/ den Wechselwirkungsparameter  $\phi$  ein. Der Einfluss der Wechselwirkungen zweier Phasen auf die Energien der gemeinsamen Grenzfläche wird mit dem Wechselwirkungsparameter wie folgt beschrieben:

$$\gamma_{sl} = \gamma_1 + \gamma_s - 2\phi\sqrt{\gamma_1\gamma_s} \quad (\text{Gl. 6})$$

Für den Wechselwirkungsparameter  $\phi$  gibt es im Schrifttum verschiedene Ansätze. In /21/ wird sogar von der Möglichkeit des Vorliegens einer negativen Grenzflächenenergie ausgegangen. Dies ist der Fall, wenn beim in Kontaktbringen beider wechselwirkenden Phasen chemische Reaktionen auftreten, die zu einem größeren Energiegewinn führen, als die beiden Oberflächenener-

gien  $\gamma_1$  und  $\gamma_s$  in ihrer Summe. Dann kann der Wechselwirkungsparameter  $\phi$  Werte größer als 1 annehmen. Beruhen alle auftretenden Wechselwirkungen dagegen allein auf physikalischen Nebenvalenzkräften, so ist der Wechselwirkungsparameter  $\phi \leq 1$ .

Wu gab zwei Ansätze zur Abschätzung des Wechselwirkungsparameters  $\phi$  auf der Grundlage der an der Grenzfläche (Polymeroberfläche / organische Flüssigkeit) additiv auftretenden polaren und dispersiven Wechselwirkungen an /23/. Bezüglich der Oberflächenenergie  $\gamma$  von Substrat und der Benetzungsflüssigkeit wird dabei davon ausgegangen, dass sich diese aus der Summe des dispersiven  $\gamma^d$  und polaren Anteils  $\gamma^p$  ergibt.

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\phi = \frac{\sqrt{\gamma_1^d \gamma_s^d} + \sqrt{\gamma_1^p \gamma_s^p}}{\sqrt{\gamma_1 \gamma_s}} \quad (\text{Geometrisches Mittel}) \quad (\text{Gl. 8})$$

$$\phi = \frac{2\sqrt{\gamma_1^d \gamma_s^d}}{\gamma_1^d + \gamma_s^d} + \frac{2\sqrt{\gamma_1^p \gamma_s^p}}{\gamma_1^p + \gamma_s^p} \quad (\text{Harmonisches Mittel}) \quad (\text{Gl. 9})$$

Wu /24/ wies weiterhin darauf hin, dass eine möglichst vollständige Benetzung (Spreiten) einer flüssigen Phase auf einem Festkörper durch eine gute Anpassung der Polarität und über die molekulare Geometrie der beiden beteiligten Phasen erreicht werden kann. //

*Der nächste Teil dieser Serie in der Septemberausgabe erklärt, wie man die Oberflächenenergie von Kunststoffbauteilen experimentell bestimmen kann und warum die Vorbehandlung technischer Kunststoffe so wichtig ist.*

### Klebtechnisches Wissen von vielen bündeln

Serie „Kunststoffe erfolgreich kleben“ auch als Buch

Mit der Serie „Kunststoffe erfolgreich kleben“ rücken Experten aus Industrie und Wissenschaft die Leistungsfähigkeit der Klebtechnik beim Fügen von Kunststoffen mit Kunststoffen oder anderen Werkstoffen in den Mittelunkt des Leserinteresses. Nach einführenden Beiträgen über Kunststoffe, Grundlagen der Klebstoffe und Klebtechnik werden alle für das erfolgreiche Kleben von Kunststoffen wichtigen Aspekte behandelt. Zahlreiche Best Practice Beispiele aus verschiedensten Industriebranchen beleuchten die anwendungstechnischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Klebtechnik beim Fügen von Kunststoffen. Auf Basis der Serienbeiträge entsteht im Hintergrund ein umfangreiches Fachbuch. Es bündelt das im Rahmen der Serie dargestellte Wissen von mehr als 50 Autoren und bietet dem Leser / der Leserin anwendungsnahe Hilfestellung bei der erfolgreichen Lösung von Klebaufgaben in der Herstellung von innovativen Kunststoffprodukten.

Weitere Infos zum Buchprojekt: [marlene.doobe@springer.com](mailto:marlene.doobe@springer.com)

### Literaturhinweise

- /1/ Krüger, R.: Haftbestimmende Einflussgrößen beim Lackieren und Kleben von Thermoplasten, Dissertation 1980, RWTH Aachen
- /2/ Altmann, O.: Stand der Klebetechnik bei der Serienfertigung von Automobilen, Adhäsion 1991, Heft 3, S.10-16
- /3/ Cada, O; Smela, N.: Die Verklebung von Polyolefinen, ADHÄSION 18 (1974), S.198-205
- /4/ Habenicht, G.: Kleben, Springer-Verlag, München 1986, S.203 ff.

/5/ Orth, B.; Schnurr, U.: Neue Kunststoffanwendungen im Fahrzeugbau von PP und Polyacetal, *Kunststoffe* 68 (1978), S. 671-676

/6/ Jaschke, N.; Schulze, D.: Kunststoffanwendung für Automobil-Karosserieteile, *Kunststoffe* 71 (1981), S.155-158

/7/ Walter, G.: Lackierte Kunststoffteile der Automobilindustrie, Fachtagung „Lackierung von Kunststoffen“; DFO, Köln 1986

/8/ Schindel-Bidinelli, E.: Strukturelles Kleben und Dichten (Band 1), Hinterwaldner Verlag, München 1988

/9/ Dierdorf, H.-R.: Diffusionsklebung, Tagungsband: SWISS BONDING 88, 2.Fachseminar am Technikum Rapperswil, 4.-6.05.88, Hoppenstedt-Verlag, S.59-78

/10/ Armbruster, K.; Osterhold, M.: Einfluss verschiedener Vorbehandlungsmethoden auf die Oberflächenspannung von Kunststoffen, *KUNSTSTOFFE* 80 (1990) 11, S.1241-1244

/11/ Armbruster, K.; Osterhold, M.: Vorbehandlungsmethoden und Benetzungsfähigkeit von Kunststoffen, *METALLOBERFLÄCHE* 44 (1990) 11, S.517-519 /12/ Bischoff, R.: Einfluss unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlungen auf Klebbarkeit, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit von Polypropylen, (Diss. TU Berlin 1988), *Klebstoff-Dokumentum*, Hinterwaldner-Verlag, München, 1988

/13/ Bischof, C.; Possart, W.: Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen, Akademie-Verlag, Berlin 1983

/17/ Froberg, M.G.: Thermodynamik für Metallurgen und Werkstofftechniker, VEB-Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1980

/18/ Zisman, W.A.: Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution, *Advan.Chem.NY Ser* 43 (1964) pp 1-51

/21/ Girifalco, L.A.; Good, R.J.: A theorie for the estimation of surface and interfacial energies, Part I: Derivation and Applioication to interfacial tension, *J.Phys.Chem.* 61 (1957) 7, pp.904-909

/23/ Wu, S.: Polar and Nonpolar Interactions in Adhesion, *J. Adhesion*, 1973, Vol.5, pp.39-55

/24/ Wu, S.: Surface and Interfacial Tensions of Polymer Melts, II. Poly-(methylmethacrylate), Poly(n-butyl methacrylate), and Polystyrene, *The Journal of Physical Chemistry*, Volume 74, Number 3, February 5, 1970, pp. 632-638

/25/ Kaelble, D.H.: Surface and Interfaces, in: *Physical Chemistry of Adhesion*, Science Center, North American Rockwell Corp., Thousands Oaks, California, Wiley-Interscience, New York 1970, S.117-148

/26/ Kaelble, D.H.: Surface Energie Criteria of Adhesion, in: *Physical Chemistry of Adhesion*, Science Center, North American Rockwell Corp., Thousands Oaks, California, Wiley-Interscience, New York 1970, S. 149-189

/27/ Gleich, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie, Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2004

/28/ Young, Th.: *Phil.Trans.Roy.Soc.*, London 95 (1805), 65

/29/ Dupré, A.: *Théorie Mécanique de la Chaleur*, Gauthier-Villars, Paris 1869, p.369

/37/ Gleich, H.; Hansmann, H.: Niederdruck-Plasmabehandlung zur gezielten Modifizierung thermoplastischer Fügeflächen - Teil I: Einfluss der Prozessparameter und Prozessoptimierung, *ADHÄSION* 1991, Heft 1/2, S.15-19

## Die Autoren

### Prof. Dr.-Ing. Henning Gleich

(Henning.Gleich@inpro.de) leitet bei der inpro Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH in Berlin den Bereich Füge- und Werkstofftechnik.

### Prof. Dr. Andreas Hartwig

(andreas.hartwig@ifam.fraunhofer.de) ist beim Fraunhofer IFAM in Bremen Leiter der Abteilung Klebstoffe und Polymerchemie.

### Dr. Hartwig Lohse

(hlohse@hdyg.de) unterstützt mit seinem Beratungsunternehmen Klebtechnik Dr. Hartwig Lohse e.K. Anwender bei der Lösung von klebtechnischen Fragestellungen.

## Sparen Sie viel Geld beim Kartuschen -und Spritzeneinkauf



**Techcon**  
SYSTEMS  
Local Dispensing  
Solutions Worldwide



### Techcon Spritzen und Kartuschen haben das beste Preis/Leistungsverhältnis am Markt

- Low cost Verbrauchsmaterialien reduzieren Ihre Ausgaben
- Getestet von den grössten Luftfahrtunternehmen
- Techcon Spritzen und Kartuschen haben das beste Preis/Leistungsverhältnis am Markt
- Akkurate und wiederholbare Ergebnisse

**Kontaktieren Sie uns über**  
[www.TechconSystems.com](http://www.TechconSystems.com),  
 um kostenlose Muster oder  
 weitere Informationen anzufordern.



Besuchen Sie  
Techcon auf der  
FEICA, 7-9 Sept.