

Bei vielen industriellen Prozessen spielt die Adhäsion von Materialien eine entscheidende Rolle, vor allem bei der Verklebung von Bauteilen, also bei deren Wechselwirkungen mit Klebstoffen vor der Aushärtung, mit Füllstoffen oder pastösen Beschichtungen. Im hier beschriebenen Beispiel sollten die Adhäsionswechselwirkungen einer Leiterplatte mit drei verschiedenen Klebstoffen mithilfe einer Work of Adhesion Analyse genauer untersucht werden, da es bei dieser Anwendung wiederholt zu Haftungsproblemen gekommen war.

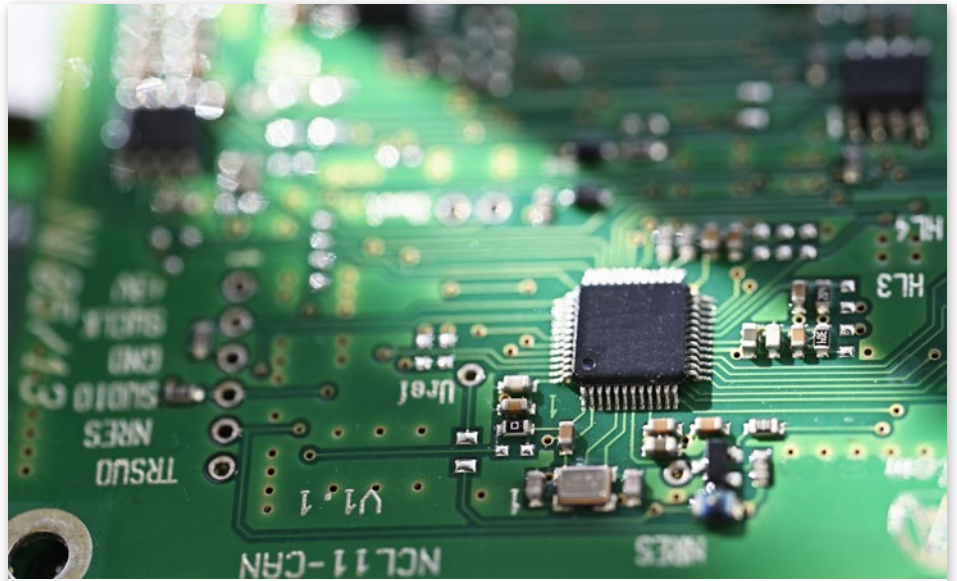


Abb. 1: Bestückte Leiterplatte

Hintergrund

Um zwei adhäsiv miteinander verbundene Phasen wieder voneinander zu trennen, muss physikalische Arbeit verrichtet werden. Sind die polaren und dispersen Anteile der Oberflächenenergie bzw. -spannung der beiden Phasen bekannt, oder zumindest theoretisch definierbar, lässt sich diese Adhäsionsarbeit, oder Work of Adhesion W_A , berechnen.

Entsprechend des Ansatzes von Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK) lautet die entsprechende Formel, die auch im Work of Adhesion Analyse-Tool der SCA 20 Software von DataPhysics Instruments verwendet wird:

$$W_A = 2 \left(\sqrt{\sigma_1^d \sigma_2^d} + \sqrt{\sigma_1^p \sigma_2^p} \right) \quad (1)$$

wobei σ_1^d und σ_1^p die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenenergie bzw. -spannung von Phase 1 und σ_2^d und σ_2^p diejenige von Phase 2 sind.

Im hier beschriebenen Beispiel ist Phase 1 die Leiterplatte, von der zunächst die Oberflächenenergie bestimmt werden muss. Phase 2 ist der jeweilige Klebstoff von dem die Oberflächenenergie mit dispersem und polarem Anteil zu ermitteln ist. Anschließend kann die Work of Adhesion für die verschiedenen Klebstoffe berechnet werden.

Weiterhin ist es möglich aus der Work of Adhesion den zu erwartenden Kontaktwinkel θ einer Flüssigkeit mit Oberflächenenergie σ_1 auf der betreffenden Festkörperoberfläche abzuschätzen, da gilt:

$$W_A = \sigma_1 (1 + \cos \theta) \quad (2)$$

So kann im Zuge der Work of Adhesion Analyse auch eine Benetzungseinschätzung für die verschiedenen Klebstoffe auf der Leiterplatte erfolgen.



Abb. 2: OCA 200 mit zusätzlicher Optik für Aufsicht im 45°-Winkel und Pikoliter-Dosiersystem PDDS

Tab. 1: Oberflächenenergie der Leiterplatte und Oberflächenspannungen der Klebstoffe

	σ_{PCB} [mN/m]	σ_{PCB}^d [mN/m]	σ_{PCB}^p [mN/m]
Leiterplatte	42	39	3
	σ_{Glue} [mN/m]	σ_{Glue}^d [mN/m]	σ_{Glue}^p [mN/m]
Klebstoff 1	25	23	2
Klebstoff 2	22	16	6
Klebstoff 3	19	18	1

Versuchsdurchführung

Oberflächenenergie der Leiterplatte

Zunächst wurde die Oberflächenenergie der Leiterplatte anhand von Kontaktwinkelmessungen mit dem optischen Kontaktwinkelmessgerät und Konturanalysesystem OCA 200 von DataPhysics Instruments bestimmt. Die verwendeten Testflüssigkeiten waren deionisiertes Wasser und Diiodmethan.

Da auf der Leiterplatte nur sehr kleine Flächen für die Kontaktwinkelmessung zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 1), wurde zur Tropfendosierung das Pikoliter-Dosiersystem PDDS verwendet, mithilfe dessen Pikoliter-kleine Tröpfchen erzeugt werden können, die eine Untersuchung selbst kleinster Probenflächen erlauben.

Zusätzlich zur Optik des OCA 200, mit welcher der Kontaktwinkel von der Seite ausgewertet wird, wurde ein Aufsicht-Beobachtungssystem TV-VS montiert, das im 45° Winkel auf die Probe gerichtet ist (vgl. Abb. 2). Das TV-VS erleichtert die Kontrolle und Dokumentation der Tropfenposition auf der Leiterplatte.

Von jeder Testflüssigkeit wurden mindestens drei Tropfen dosiert und der Mittelwert der jeweils gemessenen Kontaktwinkel errechnet. Daraus wurde anschließend die Oberflächenenergie der Leiterplatte mit ihrem dispersen und polaren Anteil nach dem Modell von Owens, Wendt, Rable und Kaelble (OWRK) berechnet.

Oberflächenspannung der Klebstoffe

Die Oberflächenspannungen der drei verschiedenen Klebstoffe wurden mit Hilfe eines optischen Kontaktwinkelmessgerät und Konturanalysesystem OCA 200 von DataPhysics Instruments bestimmt.

Mit einem Direktdosiersystem und einem elektronischen Spritzenmodul wurden hängende Tropfen der Klebstoffe erzeugt und gemäß der Pendant Drop Methode die Oberflächenspannungen inklusive polarer und disperser Anteile bestimmt.

Ergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse für die Oberflächenenergie der Leiterplatte σ_{PCB} , und für die Oberflächenspannung der drei Klebstoffe σ_{Glue} mit jeweils dispersen und polaren Anteilen sind in Tab. 1 dargestellt.

Mit diesen Ergebnissen wurde anschließend eine *Work of Adhesion* Analyse gemäß Gleichung 1 durchgeführt. Die entsprechenden *Work of Adhesion* Werte können Tab. 2 entnommen werden.

Die aus diesen Ergebnissen abgeleitete Kontaktwinkelabschätzung gemäß Gleichung 2 ergab, dass für alle drei Klebstoffe eine sehr gute Benetzung, sprich eine Spreitung auf der Leiterplatte zu erwarten ist.

Der Wetting-Envelope-Plot (vgl. Abb. 3) veranschaulicht dies graphisch. Die drei gemessenen Klebstoffe liegen weit innerhalb der 0° Einhüllenden.

Diskussion

Die *Work of Adhesion* Analyse zeigte für alle untersuchten Klebstoffe eine vollständige Benetzung der Leiterplatte. Dies sagt jedoch noch nichts über die adhäsiven Kräfte aus. Diese sind mit *Work of Adhesion* Werten im Bereich von 56,45 mN/m bis 64,79 mN/m für alle drei Klebstoffe relativ gering. Dies macht die vom Anwender berichtete schwierige Haftung im realen Prozess verständlich.

Eine Möglichkeit den adhäsiven Bindungsschwierigkeiten der involvierten Phasenpartner zu begegnen, wäre es die Oberflächenspannung der Flüssigkeit, hier also die des Klebstoffes, anzuheben, oder die Oberflächenenergie des Festkörpers, sprich der Platine, zu reduzieren.

Es ist hier zu erwähnen, dass Polymeradhäsion ein sehr komplexes Phänomen ist. Die Effektivität der fest-flüssig Verbindung und die Korrelation zur Haftkraft können nur teilweise über die Grenzflächeneigenschaften determiniert und erklärt werden.

Mechanische Eigenschaften können zumindest mit Hilfe der *Work of Adhesion* korreliert werden, um das Zusammenspiel von Festkörper mit Klebstoffen oder Beschichtungen nachzuvollziehen [1].

Zum Teil spielen Temperatureffekte eine größere Rolle, da sie grenzflächenspezifisch wirken und Bindungskräfte beeinflussen können. In Experimenten mit einer Glas-Klebstoffverbindung zeigte sich beispielsweise, dass sobald ein entsprechendes Additiv oberhalb der Testtemperatur zugesetzt wurde, sich die kohäsiv messbaren Wechselwirkungen reduzierten, was wiederum zu einer schlechteren Adhäsionskraft und zu einem Bruch an der Klebestelle führte [2].

Die hier beschriebenen Laborversuche zur Haftung der Klebstoffe auf der Leiterplatte wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. In der realen Anwendung wird der Klebstoff jedoch erhitzt und dann auf die Platine aufgebracht. Eine thermische Abhängigkeit oder auch Veränderung in den physikalisch-chemischen Eigenschaften wurde für die untersuchten Proben nicht berichtet. Dennoch ist es sinnvoll den Parameter Temperatur für eine weitere Optimierung miteinzubeziehen und damit Abweichungen zwischen Applikation und Experiment zu minimieren.

Ein weiterer Parameter, der miteinbezogen werden kann, ist die Reinheit der Platine. Verunreinigungen wie Fettschichten etc. können den Kontaktwinkel und damit die Oberflächenenergie signifikant beeinflussen.

Für die hier durchgeführten Laborversuche zur Bestimmung der Oberflächenenergie wurden keine besonderen Reinigungsschritte vor den Kontaktwinkelmessungen durchgeführt, da die in der Applikation angewendeten Reinigungsschritte der Platine unbekannt waren. Es wurde lediglich darauf geachtet, die Probenoberfläche nicht zu berühren. Auch die Oberflächenreinigung könnte jedoch für weitere Experimente berücksichtigt werden.

Tab. 2: Work of Adhesion der verschiedenen Klebstoffe auf der Leiterplatte

	Klebstoff 1	Klebstoff 2	Klebstoff 3
Work of Adhesion [mN/m]	64,79	58,44	56,45

Zusammenfassung

Adhäsionskräfte spielen in vielen Anwendungen eine Rolle und sind besonders wichtig für Lackierungs- und Beschichtungsprozesse, beim Reinigen oder auch beim Verkleben von Komponenten, wie im hier beschriebenen Fall für die Haftung von Klebstoffen auf einer Leiterplatte. Um dabei auftretende Probleme zu untersuchen, die der Anwender geschildert hatte, wurde eine *Work of Adhesion* Analyse durchgeführt.

Dazu wurde mit einem optischen Kontaktwinkelmessgerät und Konturanalysesystem OCA 200 von DataPhysics Instruments zunächst die Oberflächenenergie der Leiterplatte über Kontaktwinkelmessungen mit Pikolitertropfen bestimmt und für die drei Klebstoffe die Oberflächenspannung inklusive disperser und polarer Komponenten gemessen.

Anschließend konnten mit der SCA 20 Software für die drei Klebstoffe jeweils die *Work of Adhesion* auf der Leiterplatte berechnet und die Benetzungseigenschaften abgeschätzt werden. Hierbei wurde zwar für alle Klebstoffe eine vollständige Benetzung, sprich Spreitung auf der Platine ermittelt, jedoch auch relativ niedrige *Work of Adhesion* Werte, was die Schwierigkeiten bei der Haftung verständlich macht.

Für eine Haftungsoptimierung kann versucht werden, die Oberflächenspannung der Klebstoffe zu erhöhen oder aber die Oberflächenenergie der Leiterplatte zu reduzieren. Bei der weiterführenden Analyse ist es sinnvoll Parameter wie die Temperatur und die Oberflächenreinigung an die realen Gegebenheiten der Applikation anzupassen.

Literaturquellen

- [1] Shang, S.W., Williams, J.W. & Söderholm, K.-M. How the work of adhesion affects the mechanical properties of silica-filled polymer composites. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 29, 2406–2416 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF00363434>
- [2] Patrick E. Cassidy, James M. Johnson & Carl E. Locke (1972) The Relationship of Glass Transition Temperature to Adhesive Strength, *The Journal of Adhesion*, 4:3, 183-191, DOI: [10.1080/00218467208072222](https://doi.org/10.1080/00218467208072222)

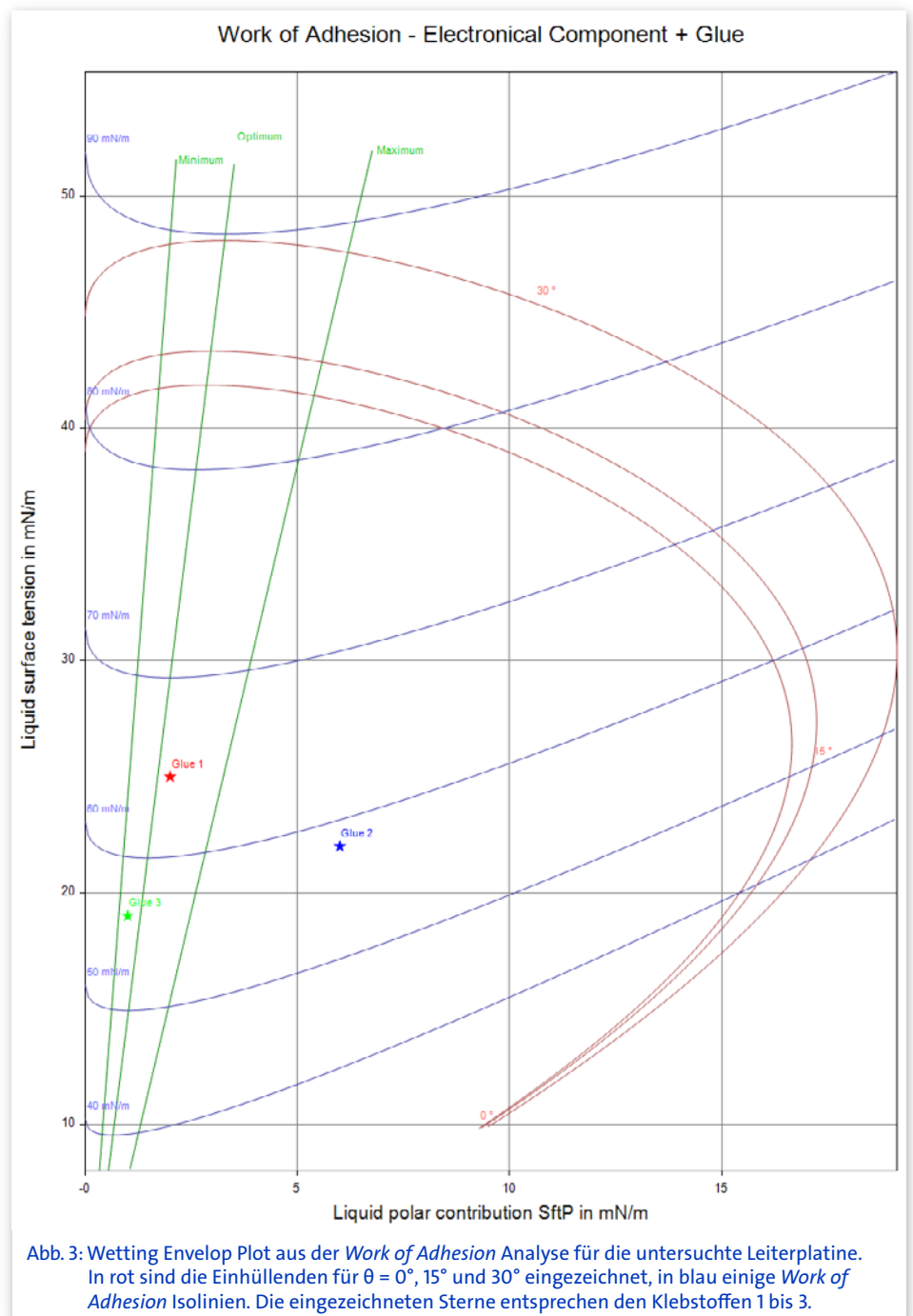


Abb. 3: Wetting Envelop Plot aus der *Work of Adhesion* Analyse für die untersuchte Leiterplatte. In rot sind die Einhüllenden für $\theta = 0^\circ$, 15° und 30° eingezeichnet, in blau einige *Work of Adhesion* Isolinen. Die eingezeichneten Sterne entsprechen den Klebstoffen 1 bis 3.