



Ulrich Draugelates

Werkstoffe und Konstruktion – so werden neue Technologien möglich

Die Chemietechnik gehört in Deutschland seit Jahrzehnten zur Spitzentechnologie. Hierzu haben die Höchstleistungen der Reaktionstechnik sowie die sehr fortschrittliche Prozeßführung auf der Basis hochentwickelter MSR-Technik beigetragen. Von jeher haben aber auch die Konstruktion von Chemieapparaten und verfahrenstechnischen Maschinen sowie die ausgezeichnete Fachkenntnis über die Eigenschaften der neuzeitlichen Werkstoffe und ihrer anwendungsgerechten Herstellung und Verarbeitung hierbei eine entscheidende Rolle gespielt.

Werkstoffe und Konstruktion im Apparatebau haben auch in der Arbeit der DECHEMA von Beginn an eine wesentliche Rolle gespielt – ja sie gehörten sozusagen zu ihren Gründungsmotiven. Max Buchner begründete dies schon 1919 in seiner Denkschrift über die Ziele und Aufgaben der Fachgruppe für chemisches Apparatewesen. „Die üblichen Normen für Konstruktion beziehen sich vielfach auf veraltetes Material. Die z.Zt. vorhandenen wissenschaftlichen Unterlagen, mit denen wir uns heute bei der Konstruktion und Berechnung begnügen müssen, sind mangelhaft, weil die Theorie, wenn überhaupt eine solche besteht, nicht mit der Praxis zusammenarbeitet. Wieviel Mißerfolge sind erst auf die Wahl von ungeeigneten Baustoffen zurückzuführen ...“

Die systematische Aufbereitung vorhandener Literatur, die schon 1937 zur Herausgabe der DECHEMA-Werkstofftabelle führte, die Förderung von Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Werkstoffentwicklung und Konstruktion, aber insbesondere der Erfahrungsaustausch auf der

ACHEMA trugen ganz wesentlich zur Entwicklung dieser Fachdisziplinen und zur engeren Zusammenarbeit von Werkstoff-Entwicklern und Anwendern bei.

Insofern lag die Gründung eines DECHEMA-Fachausschusses nahe, der sich unter dem Vorsitzenden Prof. Dr. H. Wiegand (1962 bis 1974) gemeinschaftlichen Forschungsthemen über „Werkstoffe und Konstruktion im Chemie-Apparatebau“ zuwandte. Im Vordergrund standen Auswirkungen von thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen auf Anlagenbauteile und Maschinenkomponenten. Der zunehmende Zwang zu betriebssicheren und damit wirtschaftlichen Anlagen und Maschinen verstärkte die Bedeutung der wissenschaftlichen Gemeinschaftsforschung im Fachausschuß unter dem nachfolgenden Vorsitzenden Prof. Dr. H. Gräfen mit den Schwerpunkten Korrosion und Korrosionsschutz, Bauteilverhalten unter Betriebslast sowie Werkstoff- und Fertigungsprobleme für Chemieapparate.

Insbesondere die Lebensdauerbegrenzung von Anlagenteilen durch Korrosion erhöhte den gemeinschaftlichen Forschungsbedarf und führte zu dem über 20 Jahre (1974 bis 1993) geförderten Forschungs- und Entwicklungsprogramm Korrosion und Korrosionsschutz (FE-KKs) des BMFT in der Projekträgerschaft der DECHEMA. Die gemeinschaftliche Forschungsarbeit im Fachausschuß vereinte die Fachleute der großen Chemieunternehmen mit den Experten des deutschen Apparatebaus und der verfahrenstechnischen Maschinen und führte zu exzellenten Problemlösungen, die wesentlich zur Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Anlagentechnik beitragen.

Nach dem Wechsel des Vorsitzes (1993) verlagerte sich der Schwerpunkt der Tätigkeit der Arbeitsausschüsse von den Querschnittsthemen Korrosion, Lebensdauer von Anlagenteilen und Werkstoffentwicklung für Chemieapparate zu den aktuellen Fragestellungen der thermischen Entsorgung, der Einführung der mathematischen Modellierung in die Konstruktion von Anlagenteilen und der Berechnung des Bauteilverhaltens unter Betriebsbeanspruchung sowie dem physikalisch-chemischen Fragenkomplex der Adhäsion für die Verbindungstechnik und das Beschichten. Im Arbeitsausschuß „Werkstoff- und Konstruktionsprobleme bei der thermischen Entsorgung in der chemischen Industrie“ steht nach wie vor die Untersuchung von thermisch hochbelastbaren Keramiken und Feuerfestmaterial im Mittelpunkt der Tätigkeit. Die Leitung des Arbeitsausschusses ist von dem lange Jahre erfolgreich tätigen Vorsitzenden Dr. A. Kleinevoss im Jahre 1998 auf Dipl.-Ing. P. Frühauf übergegangen, und damit ist zugleich die Hinwendung zu neueren Verfahren der

thermischen Entsorgung erfolgt. Der Arbeitsausschuß „Prozeßgerechte Gestaltung und Fertigung von Apparaten“ wandte sich nach Übernahme des Vorsizes von Direktor F. Vollhardt den vielfältigen Prozessen und Anlagen für die Abfallentsorgung zu und erarbeitete in fünfzehnjähriger kontinuierlicher Ausschußtätigkeit konstruktive und werkstofftechnische Lösungen für kritische Anlagenteile unter den komplexen Betriebsbedingungen der Verbrennung, Vergasung und Rauchgasreinigung in Großanlagen. Die Ausschußmitglieder entwarfen in intensiven Expertendiskussionen neuartige Lösungsvorschläge für Konstruktion und Fertigung von Großanlagen für unterschiedliche Entsorgungsprobleme. Die Ergebnisse der Ausschußarbeit wurden zusammenfassend im Fachtreffen „Vergasung und Verbrennung von Abfällen und fossilen Brennstoffen“ zur DECHEMA-Jahrestagung 1998 dargestellt. Nach Übernahme des Vorsizes durch Dr. M. Schmitz-Niederau im Jahre 2000 stehen technologische und ökonomische Werkstoffprobleme für hochbelastete Anlagen, z. B. 9 % Cr-Stähle, Cl-Einfluß in reduzierenden Atmosphären und Duplex-Legierungen, im Mittelpunkt der Fachdiskussion.

Ein sehr breites Spektrum an konstruktionstechnischen Problemen behandelt der Arbeitsausschuß „Beanspruchungsgerechtes Konstruieren“ unter dem Vorsitz von Prof. Dr. P. Dietz und Prof. Dr. K. Strohmeier in Fachdiskussionen und Forschungsvorhaben. Die Ergebnisse des seit 1997 als DECHEMA/GVC-Gemeinschaftsausschuß geführten Expertenkreises werden in zweijähriger Folge im DECHEMA-Konstruktions-Symposium der Fachwelt

vorge stellt. Die Themen aktueller Untersuchungen betreffen u. a. die Simulation von strömungsinduzierten Schwingungen in Rohrbündelapparaten und die Analyse von Wärmespannungen in Rohrplatten sowie die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsrotoren in gradierter Hybridleichtbauweise oder die Produktmodellierung im Behälter- und Rohrleitungsbau. Die rechnergestützte Strukturauslegung von faserverstärkten Verbundbehältern ist auch Gegenstand von Fachdiskussionen im Arbeitsausschuß „Bauteilverhalten unter mechanischer Beanspruchung“ unter dem Vorsitz von Prof. Dr. E. Sommer, der sich darüber hinaus auch mit der numerischen Prozeßsimulation und Integritätskriterien von Anlagenkomponenten beschäftigt. Auch in diesem Expertenkreis gewinnen Diskussionen über die Beanspruchbarkeit von Schichtsystemen zunehmend an Bedeutung. Seit vielen Jahren wird über die Problematik der Herstellung und Betriebsbewahrung von speziellen Schichtsystemen aus Email im Arbeitsausschuß „Emailierte Apparate“ von Industriefachleuten intensiv diskutiert. Unter dem Vorsitz von Dr. B. Röddicker (1998) wird die langjährige sehr erfolgreiche Arbeit von Dipl.-Ing. R. Münster mit Untersuchungen zum Einfluß der Stahlszusammensetzung auf die Emailierbarkeit und die mikrobiell beeinflusste Korrosion von Email fortgesetzt.

Seit über vierzig Jahren werden die wissenschaftlichen Arbeiten zur Untersuchung der Adhäsion in der DECHEMA betreut und neue Forschungsergebnisse und Anwendungsmöglichkeiten in internationalen Kongressen und Symposien vorgestellt. Ein Teilgebiet hiervon wird



Abb. 1: Industrielle Gemeinschaftsforschung zwischen Grundlagenforschung und Produktentwicklung

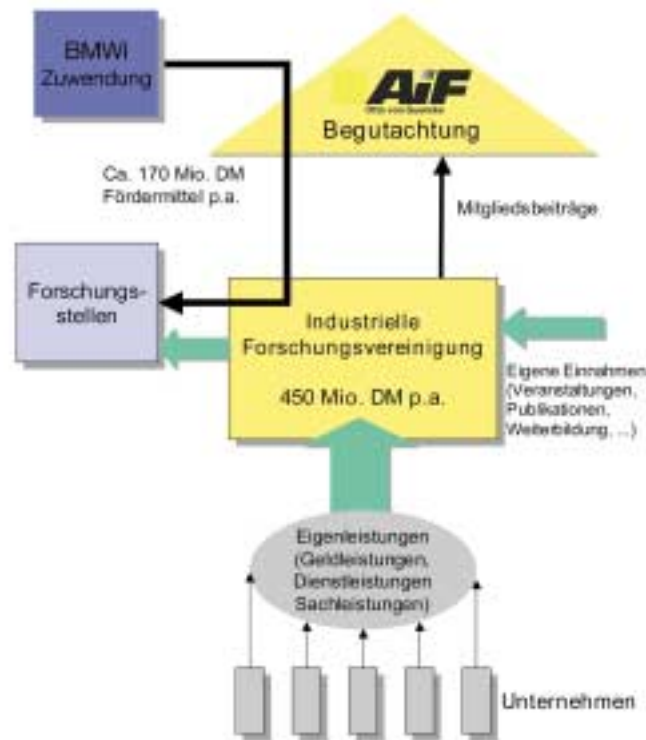


Abb. 2: Finanzierung der Industriellen Gemeinschaftsforschung für KMU durch AiF/BMWi

vom Arbeitsausschuß „Klebtechnik“ unter der Leitung von Dr. H.-G. Cordes von Fachleuten aus Industrie und Wissenschaft durch Fachdiskussionen und Forschungsprojekte auf dem zunehmend industriell interessanten Gebiet der Metallfügetechnik wissenschaftlich begleitet und gefördert. Das sehr breite Interesse der Industrie hat zur Gründung einer Fachsektion Klebtechnik (1993) geführt. Dort wird in mehreren Arbeitskreisen die neuzeitliche Fügetechnik Kleben bezüglich der Grundlagen Adhäsion und Klebstoffchemie sowie der anwendungsbezogenen Konstruktions- und Verarbeitungsprobleme in Vorträgen, Kongressen und Forschungsarbeiten behandelt.

Im Zentrum der Tätigkeit der Arbeitsausschüsse stehen die Vermittlung neuer Ergebnisse der Grundlagenforschung auf den Gebieten der Werkstofftechnik und der Konstruktion sowie die Fachdiskussion über die Nutzung dieser Forschungsergebnisse in der aktuellen Chemietechnik. Zugleich aber haben die Arbeitsausschüsse auch die Heranführung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) des Apparate- und Maschinenbaus an den neuesten Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Ziel, um damit über den Technologietransfer schnellstmöglich die Nutzung der Forschungsergebnisse in diesen Unternehmen einzuleiten. Hierbei wird nach dem Grundsatz vorgegangen, daß der Bedarf der KMU die Priorität und

den Umfang von praxisnaher angewandter Forschung und von Technologietransfermaßnahmen bestimmt.

In jahrzehntelanger erfolgreicher Praxis hat sich gezeigt, daß vor der eigentlichen Umsetzung neuen Wissens zu Produkten und Verfahren für KMU, die gewöhnlich nicht über eigene Forschungs- und Entwicklungskapazität verfügen, angewandte Forschungs- oder Entwicklungsarbeiten von kompetenten externen Forschungsstellen ausgeführt werden müssen. Diese können in Form einer direkten Auftragsforschung oder -entwicklung von den KMU an Forschungsstellen vergeben werden (Abb. 1). Daneben hat sich insbesondere im vorwettbewerblichen Bereich bei Fragestellungen von allgemeinem Interesse oder zur Lösung von branchenbezogenen Forschungsproblemen die Industrielle Gemeinschaftsforschung bewährt. Sie ist der eigentlichen Entwicklung von Produkten und Verfahren in KMU vorgelagert und stellt die Verbindung zwischen Grundlagenforschung und Praxisanwendung dar. Träger dieser Industriellen Gemeinschaftsforschung ist die 1954 gegründete Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), zu deren Mitgliedern die DECHEMA seit 1961 gehört. In den Arbeitsausschüssen werden die von den KMU benötigten Gemeinschaftsforschungsvorhaben mit geeigneten Forschungsstellen formuliert und nach Begutachtung in der AiF ihre Finan-



Abb. 3: Verstärkter Ergebnistransfer der Industriellen Gemeinschaftsforschung durch AIF-Schnittstellen-Aktivitäten

zierung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) beantragt. Für diese Art der Industriellen Gemeinschaftsforschung stellt das BMWi jährlich etwa 170 Mio. DM Fördermittel zur Verfügung (Abb. 2). Die Industrieunternehmen beteiligen sich über die Forschungsvereinigungen mit Eigenmitteln in Höhe von 450 Mio. DM im Jahr an der Finanzierung der Industriellen Gemeinschaftsforschung. Über dieses Förderprogramm werden auch zahlreiche Projekte der DECHEMA-Arbeitsausschüsse finanziert. Die Aufgabenstellung durch die Industriemitglieder in den Arbeitsausschüssen und deren Projektbegleitung stellt die Praxisnähe der angewandten Forschungsprojekte sicher.

Nach Abschluß der Forschungsarbeiten, häufig jedoch schon während der Projektlaufzeit, werden Ergebnisse durch Transfermaßnahmen der Öffentlichkeit, d. h. allen interessierten KMU, zur Verfügung gestellt durch Publikationen, Berichte und Fachdiskussionen in Ausschüssen und auf Kongressen sowie durch Labordemonstrationen oder Pilotanlagen in den Forschungsstellen oder in interessierten Unternehmen. Obwohl diese Transfermaßnahmen Teil der Industriellen Gemeinschaftsforschung sind, hat sich herausgestellt, daß die unternehmerische Nutzung der Forschungsergebnisse häufig weiterer Maßnahmen bedarf (Abb. 3). Diese von der AIF dringend geforderten Zusatzmaßnahmen zur Überwindung der Schnittstelle

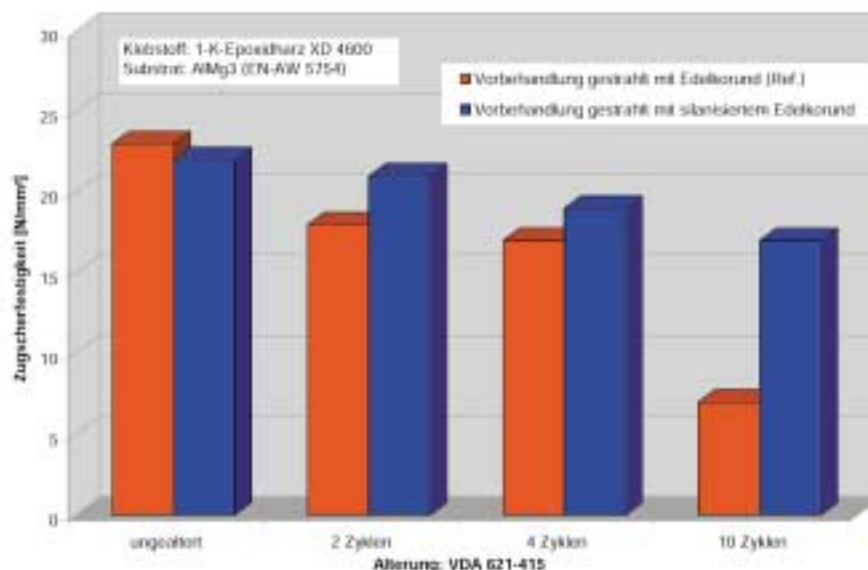


Abb. 4: Verbesserung der Alterungsbeständigkeit von Klebverbindungen durch Druckluftstrahlen mit silikatbeschichteten Korunden [1]

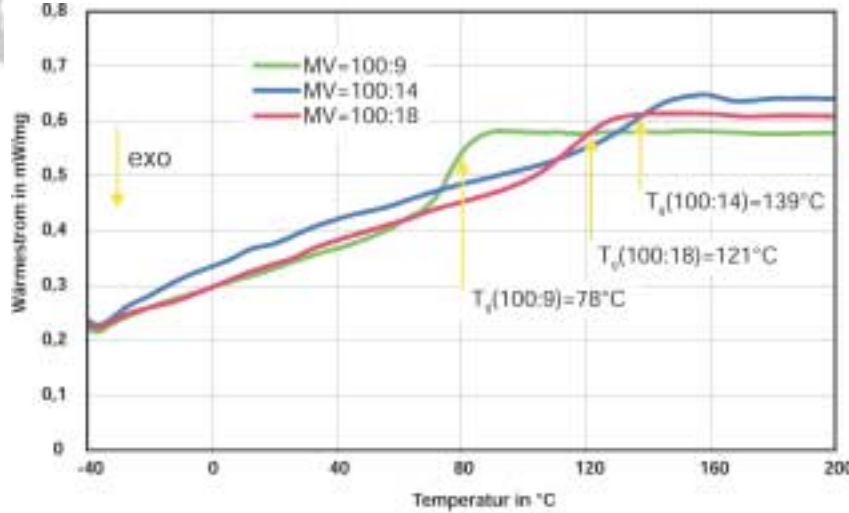


Abb. 5: Glasübergangstemperaturen T_g für drei Härtemischungen MV eines 2K-Modellepoxydklebstoffs [2]

zwischen vorwettbewerblicher Gemeinschaftsforschung und gewinnorientierter Unternehmensnutzung werden von der DECHEMA sehr erfolgreich nicht nur durch ihren internationalen AusstellungskongreßACHEMA ausgeführt und gefördert. Vielmehr sind die Forschungsstellen der DECHEMA an Personaltransfer und Firmengründung in vielfältiger Weise beteiligt. Insofern stellt die Ausschüßarbeit eine besonders wichtige Funktion der gemeinschaftlichen Forschung für KMU sicher und erfüllt damit ihren Auftrag als wissenschaftlich-technische Vereinigung für chemische Technik.

Beispielhaft sollen Ergebnisse der Fachdiskussionen und der Industriellen Gemeinschaftsforschung aus den Fachgebieten „Klebertechnik“ und „Werkstoffe und Kon-

struktion im Chemie-Apparatebau“ des Forschungsausschusses dargestellt werden.

Von besonderer Bedeutung für die aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der Füge-technik ist die Einführung der Klebertechnik mit Hilfe organischer Kleber in die großindustrielle Leichtbau-Technik. Die Anwendung des Klebens begann in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts im Flugzeugbau. Dort hat sie sich zur Herstellung von Strukturbauteilen aus Aluminiumblech hervorragend bewährt. Eine Übertragung dieser Füge-technik in die Fertigung von Leichtbaukonstruktionen der Verkehrsfahrzeuge auf Schiene und Straße hat sich jedoch aus mehreren Gründen verzögert, wird jedoch heute im Kraftfahrzeugbau und im Waggonbau zur Senkung der Karosseriegewichte immer

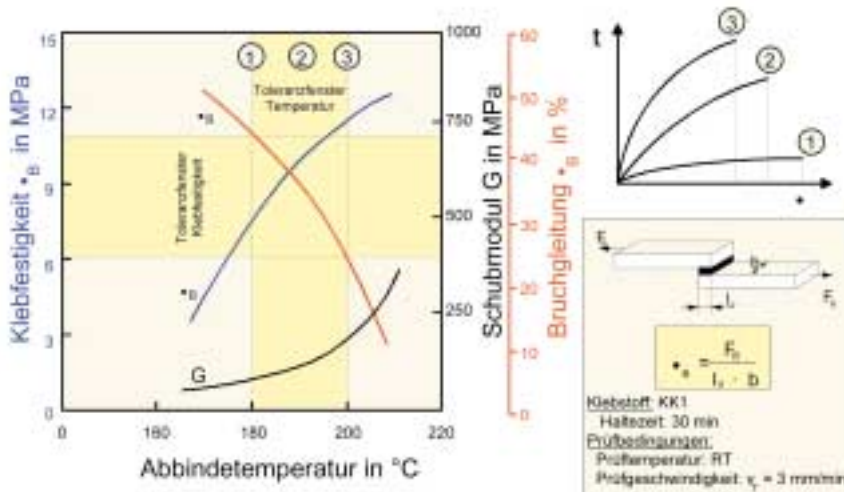


Abb. 6: Einfluß der Aushärtetemperatur auf die Festigkeit von Klebverbindungen [3]

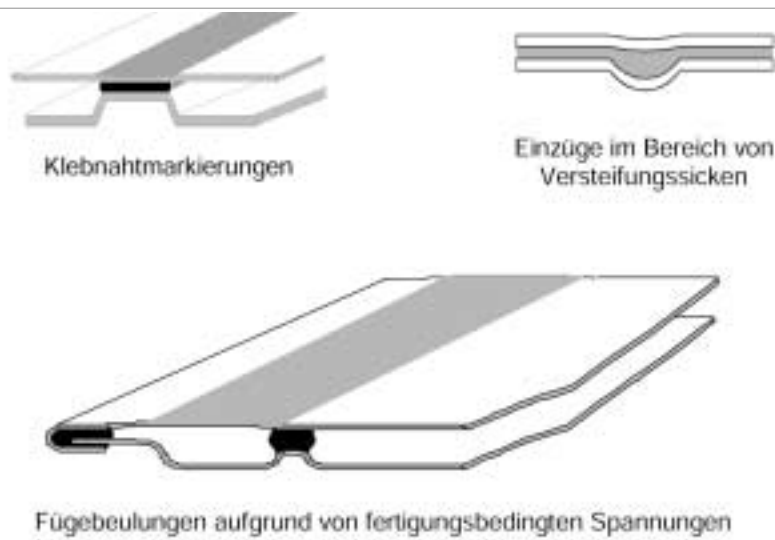


Abb. 7: Blechverformungen und Beulungen durch Aushärtekontraktion von Klebstoffen [4]

stärker herangezogen. Bei den neuzeitlichen Verfahren der Schmelzschweißtechnik durch Laser- oder Elektronenstrahl wird durch die Wärmeeinwirkung der Bereich der Schweißnaht werkstofftechnisch erheblich beeinflusst. Dies führt insbesondere dann zu großen lokalen Eigenschaftsänderungen, wenn die Strukturbleche oder -profile durch mehrstufige Herstellungs- und Vergütungsverfahren höchste Festigkeit und Verformungsfähigkeit erhalten haben. Hier vermag das Kleben als wärmearmes Fügeverfahren neue konstruktive und fertigungstechnische Problemlösungen zu realisieren. Hochfeste und dauerhafte Klebverbindungen lassen sich jedoch nur erreichen, wenn ausreichende Adhäsion zwischen Metalloberfläche und Klebstoffpolymer hergestellt werden kann. Gewöhnlich ist hierzu eine Oberflächenvorbehandlung der Fügestellen vorzunehmen. Das im Flugzeugbau übliche Anodisieren in Chromschwefelsäure erscheint jedoch für den Karosserie-Rohbau zu aufwendig und umweltgefährdend. Deshalb wird häufig zu mechanischen Vorbehandlungsverfahren gewechselt, von denen sich das Druckluftstrahlen mit Korundpartikeln als sehr vorteilhaft erwiesen hat. Obwohl jedoch zunächst hohe Festigkeitswerte von derart vorbehandelten Klebnahten erreicht werden, läßt sich durch Langzeit-Alterung ein erheblicher Festigkeitsabfall mit zunehmender Einsatzdauer erkennen (Abb. 4).

Erhebliche Verbesserungen zeigen erste Laboruntersuchungen zur Nutzung potentieller tribochemischer Effekte bei der mechanischen Oberflächenvorbehandlung, die durch einen hochenergetischen Eintrag in die Oberflächen für kurze Zeiten hochreaktive Zonen im Oberflächenmikrobereich erzeugen, die mit geeigneten Zusatzstoffen adhäsiv reagieren. Beispielsweise vermag eine Strahlvorbehandlung mit silanisiertem Korund und

nachfolgender Behandlung mit Silanprimer eine erhebliche Haftvermittlung auszulösen, die sich in einer erheblichen Steigerung der Alterungsbeständigkeit äußert. Dieses Beispiel zeigt die potentiellen Haftungssteigerungen durch grundlegende Adhäsionsuntersuchungen sowie die durch schnelle Umsetzung in der klebtechnischen Praxis möglichen Technologiesprünge.

Die Langzeitbeständigkeit von Klebverbindungen hängt jedoch auch von den Eigenschaften der Klebstoffschichten ab. Gleichmäßige Vernetzung kann nur erreicht werden, wenn insgesamt und lokal die Härtparame- ter bei reaktiven Klebstoffen optimiert und konstant gehalten werden. Großen Einfluß hierauf und auf die werkstoffmechanischen Eigenschaften der Klebschicht haben bei Zweikomponenten-Klebstoffen die Mischungsverhältnisse der Reaktivkomponenten. Auskunft über optimale Verhältnisse liefert die Glasübergangstemperatur, die ein Maß für die Netzwerkdicke darstellt. Als Beispiel mag die Messung der Glasübergangstemperatur T_g für drei Mischungsverhältnisse MV eines kalthärtenden Zweikomponenten-Modellepoxidklebstoffs dienen (Abb. 5). Aus den mischungsbezogenen Glasübergangstemperaturen läßt sich durch den Maximalwert das mittlere als optimale Mischungsverhältnis bestimmen. Dies erzeugt die größte Netzwerkdicke und läßt auf ein quasi-stöchiometrisches Mischungsverhältnis schließen. Der Alterungseinfluß läßt sich durch Wasserauslagerung bei 70 °C über vier Wochen feststellen. Nach Wasserlagerung und Rücktrocknung stellt sich eine höhere Glasübergangstemperatur ein. Dies ist offensichtlich durch Nachvernetzen des Klebstoffs verursacht [2]. Neben der Nachvernetzung tritt nach Alterungsauslagerung und Aufheizen der ausgelagerten Proben zusätzlich Verdampfen von Restwasser in

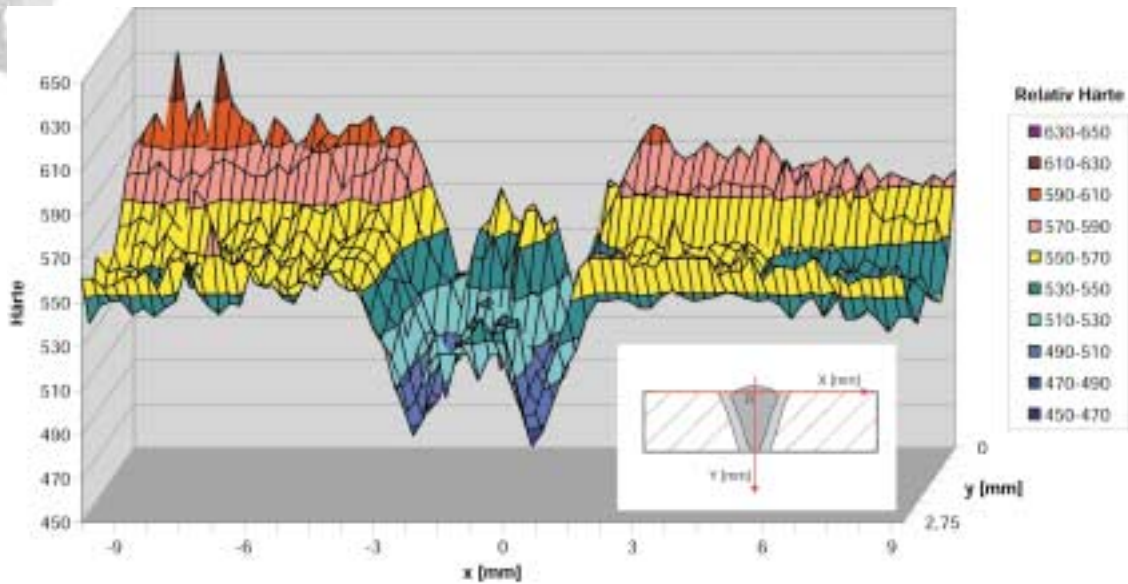


Abb. 8: Härteverlauf im Nahtquerschnitt einer Laserschweißnaht; Relative Vergleichswerte an lasergeschweißtem 17-4 PH-Stahl [5]

der Klebschicht auf. Durch diese Phänomene wird die Langzeitbeständigkeit erheblich herabgesetzt.

Neben dem Mischungsverhältnis haben auch alle anderen Prozessstufen der Fertigungsprozesskette Einfluß auf Festigkeit und Langzeitverhalten der Klebverbindungen. Zum Beispiel bewirken Schwankungen der Aushärtetemperatur erhebliche Eigenschaftsveränderungen in der ausgehärteten Klebschicht (Abb. 6). Durch Fehler in der Pro-

zeßführung können Festigkeitsänderungen von 100 % verursacht werden. Daneben können Volumenkontraktionen während des Aushärtens erhebliche Konturänderungen und Beulungen hervorrufen (Abb. 7). Die aktuellen Ergebnisse der klebtechnischen und Adhäsions-Forschung zeigen, welchen unmittelbaren Einfluß grundlagenwissenschaftliche Ergebnisse auf technologische Entwicklungen in Produktgruppen haben können, in deren Herstellung zahlreiche KMU als Zulieferer eingebunden sind. Über die

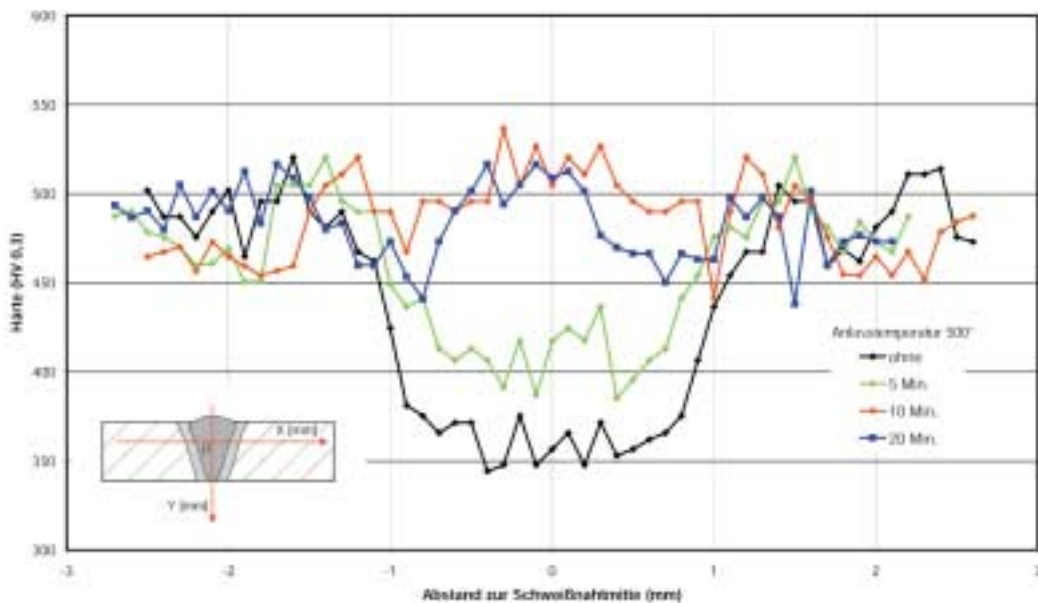


Abb. 9: Härteverlauf im Nahtquerschnitt einer Laserschweißnaht; Relative Vergleichswerte an lasergeschweißtem 17-4 PH-Stahl [5]

Industrielle Gemeinschaftsforschung können diese Unternehmen an der Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Fertigungspraxis teilhaben.

In gleicher Weise lassen sich die Vorteile der Industriellen Gemeinschaftsforschung für KMU auf dem Gebiet der Querschnittstechnologie Schmelzschweißen aufzeigen. Für hochbeanspruchte Leichtbauteile werden heute neue ausscheidungshärtbare Stähle eingesetzt. Sie besitzen martensitisches oder semi-austenitisches Gefüge und gehören zur Gruppe der nichtrostenden Stähle mit hervorragender Korrosionsbeständigkeit und sehr hoher Festigkeit und Härte. Durch Vergütung bei niedrigen Temperaturen von 482 bis 621 °C und geringen Haltezeiten von 1 bis 4 Stunden mit Luftabkühlung lassen sich auf die Anwendung optimierte mechanische Eigenschaften über den Ausscheidungsgrad einstellen. Durch Wärmeeinwirkung während des Schweißens wird in der Umgebung der Naht der Vergütungszustand aufgehoben, und damit werden mechanische Eigenschaften und Korrosionsverhalten erheblich verändert.

Schweißen im lösungsgeglühten Zustand und anschließende Vergütung erzeugt häufig Verzug und erfordert entsprechende Ofenanlagen. Der Härteabfall im Schweißgut eines 17-4PH-Stahls (H900) und in der Umgebung der Schweißnaht wird durch Auflösung der Ausscheidung einer kupferhaltigen Phase verursacht (Abb. 8). Dies läßt sich durch erneuten Vergütungsprozeß „ausheilen“. Nach vorliegenden Untersuchungen reichen hierfür prozeßintegrierte Maßnahmen zur Wärmeführung nicht aus, um den Ausscheidungsprozeß hervorzurufen. Jedoch können durch kurzzeitige Wärmenachbehandlungen deutliche Festigkeits- und Härtesteigerungen erreicht werden. Hierzu genügen Anlaßbehandlungen von 500 °C mit einer Dauer von 10 Minuten (Abb. 9). Die so erzeugten Gefügeände-

rungen und Ausscheidungen lassen sich durch lokale Erwärmungsmaßnahmen auch auf der Baustelle ausführen. Damit sind sehr praxisnahe Arbeitsanweisungen erarbeitet worden, die sich von Apparate- und Maschinenherstellern auch in KMU unmittelbar anwenden lassen. Hiermit kann eine Umsetzung der Forschungsergebnisse an sehr unterschiedlichen Produkten und Produktgruppen unmittelbar vorgenommen werden.

Fachdiskussionen und Forschungsprojekte werden in den Expertenkreisen der Arbeitsausschüsse auch in Zukunft im Mittelpunkt der gemeinsamen Arbeit stehen. Durch Wahl attraktiver und aktueller Fachprobleme soll der Kreis der teilnehmenden Unternehmen, insbesondere von KMU, auch weiterhin erheblich gesteigert werden. Problemstellungen der KMU sollen unmittelbar in Projekte der Industriellen Gemeinschaftsforschung eingebracht werden, so daß der Wissenstransfer und damit die Entwicklung neuer Technologien weiterhin beschleunigt wird.

Literatur

- [1] Brockmann, W. u. S. Emrich: Einfluß der Vorbehandlung auf die Beständigkeit von Aluminiumklebungen; Adhäsion Kleben & Dichten 44 (2000) 12, S. 34/38.
- [2] Brockmann, W. u. J. Naß: Charakterisierung von Klebstoffen mittels moderner Analysemethoden; Adhäsion Kleben & Dichten 44 (2000) 7/8, S. 20/24.
- [3] Hahn, O. u. B. Hüsgen: Erarbeitung von technologischen Grundlagen für das Kleben von Fügeteilen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten; Forschungs-Bericht AiF-Nr. 7056, Paderborn 1991.
- [4] Hahn, O., G. Meschut, M. Eis u. G. Kötting: Analyse der Entstehung von Abzeichnungen an Klebungen dünnwandiger Stahlbauteile; Forschungs-Bericht P332, Düsseldorf 2000.
- [5] Bouaifi, B.: Untersuchungen zur Schweißbarkeit von ausscheidungshärtbaren Edelstahllegierungen; AiF 12061 N, Zwischenbericht 28.2.01.