

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	1
2	Einleitung zum Bericht für das Forschungsvorhaben "Fertigungstechnologie Kleben - FTK"	11
3	Allgemeines	18
3.1	Die Klebstoffe	18
3.1.1	Epoxidharzklebstoffe	18
3.1.1.1	Aufbau von Epoxidharzen	18
3.1.1.2	Klebstoffe	24
3.1.2	Polyurethanklebstoffe	31
3.1.2.1	Die Chemie der Isocyanate	31
3.1.2.2	PUR-Klebstofftypen	36
3.1.2.3	Entwicklungsarbeiten des Verbundprojektes	41
3.1.2.4	Zusammenfassung	46
3.1.2.5	Weiterführende Literatur	46
3.1.3	Phenolharzklebstoffe	48
3.1.3.1	Allgemeines	48
3.1.3.2	Phenolharze als Klebstoffe	49
3.1.3.3	Spezielle Nitrilkautschuk-Phenolharz-Folienklebstoffe	51
3.1.3.4	Die Weiterentwicklung der Phenolharzklebstoffe	51
3.1.3.5	Erste Optimierungsphase	55
3.1.3.6	Zweite Optimierungsphase	60
3.1.3.7	Zusammenfassung	63
3.1.4	Polyesterharzklebstoffe	64
3.1.4.1	Beschreibung des Copolyesters	64
3.1.4.2	Thermoplastische, nichtreaktive Schmelzklebstoffe	67
3.1.4.3	Reaktive Schmelzklebstoffe	69
3.1.4.4	Feuchtigkeitshärtende Schmelzklebstoffe	69
3.1.4.5	Heißhärtende Schmelzklebstoffe	71
3.1.5	Anaerob-härtende Klebstoffe	76
3.1.6	Lichthärtende Klebstoffe	86
3.1.6.1	Einführung	86
3.1.6.2	Vorstellung der verschiedenen photoinitierten Klebstoffarten	87
3.1.6.3	UV-härtende Klebstoffe	91

3.1.6.4	Lichthärtende Klebstoffe	93
3.1.6.5	Kombinationshärtung	95
3.1.6.6	Lichtaktivierbare Klebstoffe	96
3.1.6.7	Zusammenfassung	97
3.1.7	Polysulfidklebstoffe und -dichtstoffe	99
3.1.7.1	Einführung	99
3.1.7.2	Chemie der Polysulfide	99
3.1.7.3	Polysulfidklebstoffe und -dichtstoffe	101
3.1.7.4	Kleben optischer Teile	103
3.2	Chemische Analytik der Klebstoffe und Oberflächenanalytik	105
3.2.1	Chromatographie	105
3.2.2	Infrarotspektroskopie	120
3.2.2.1	Einleitung	120
3.2.2.2	Apparatives	121
3.2.2.3	Abschätzung der quantitativen Nachweisgrenzen	122
3.2.2.4	Probenpräparation	125
3.2.2.5	Adhäsionreaktionen an Oberflächen	129
3.2.2.6	Anwendungsbeispiele	131
3.2.3	Kalorimetrische Untersuchungen	132
3.2.4	Meßmethoden zur Bestimmung des Aushärtungsverlaufs von reaktiven Klebstoffsystemen	136
3.2.4.1	Einführung	136
3.2.4.2	Kategorie A: Beobachtung von Einzelmolekülen	138
3.2.4.3	Kategorie B: Beobachtung von Gesamtbilanzen	140
3.2.4.4	Kategorie C: Erfassung physikalischer Kenngrößen	141
3.2.5	Beurteilung: Oberflächenanreicherungen mit GDOS/SNMS	147
3.2.5.1	Einleitung	147
3.2.5.2	Spektroskopische Methoden der Oberflächenanalytik	148
3.2.6	Oberflächenanalytik mit Augerelektronenspektroskopie (AES) und Photoelektronenspektroskopie (XPS, ESCA)	153
3.2.6.1	Einführung	153
3.2.6.2	AES	153
3.2.6.3	XPS	155
3.3	Mechanische und physikalische Untersuchungsmethoden	158
3.3.1	Torsionspendel und DMA	158
3.3.2	Zugscherversuch, Schälversuch und Schubspannungs-Gleitungsverhalten	163
3.3.3	Vergleich der mechanischen Meßmethoden	169

4	Kleben von Stahlblech	172
4.1	Probenherstellung und Anforderungen	172
4.1.1	Probenherstellung	172
4.1.2	Anforderungen	173
4.2	Physikalisch-chemische Grundlagen	177
4.2.1	Beschreibung der Fügeoberflächen	177
4.2.1.1	Einleitung	177
4.2.1.2	Herstellung	177
4.2.1.3	Eingesetzte Werkstoffe	180
4.2.1.4	Werkstoffbeschreibung	181
4.2.1.5	Oberflächenanalyse	185
4.2.2	Beschreibung der Korrosionsschutzöle	193
4.2.2.1	Begriff "Korrosion"	193
4.2.2.2	Begriff "Temporäre Korrosionsschutzmittel"	194
4.2.2.3	Anforderungen an Einfettöle	194
4.2.2.4	Ziel des Teilprojektes I im FTK-Verbundprojekt	198
4.2.2.5	Entwicklungswege	198
4.2.3	Eigenschaften der Klebstoffe	205
4.2.4	Die Haftmechanismen	209
4.2.4.1	Die Haftung am Metall	209
4.2.4.2	Der Einfluß des Öles	210
4.2.5	Die Adhäsionszone	215
4.3	Werkstoffmechanische Grundlagen	222
4.4	Untersuchungen zum Teilprojekt	229
4.4.1	Untersuchungen an der Klebstoffsubstanz	229
4.4.1.1	Chemische Untersuchungen	229
4.4.1.2	Thermomechanische Untersuchungen	241
4.4.2	Untersuchungen an den Klebverbindungen	248
4.4.2.1	Langzeitverhalten	248
4.4.2.2	Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten	271
4.4.3	Untersuchungen zum Punktschweißen und Kleben	280
4.4.3.1	Einleitung	280
4.4.3.2	Widerstandspunktschweißen	281
4.4.3.3	Kleben	283
4.4.3.4	Punktschweißkleben	283
4.4.4	Bauteilnahe Prüfungen	298
4.4.4.1	Werkstoffe, Probengeometrie und Fügeparameter	298

4.4.4.2	Torsionswechselprüfung standardisierter Bauteile	301
4.4.4.3	Torsionswechselfestigkeit klimagelagerter und ungealterter Dopplhutprofile	304
4.4.4.4	Impact-Versuch standardisierter Doppelhutprofile	309
4.4.4.5	Impact-Versuche an standardisierten Bauteilen	310
4.5	Untersuchungen am Fahrschemel	313
4.5.1	Fahrschemel	313
4.5.1.1	Wöhlerversuch zur Ermittlung der erforderlichen mechanischen Klebstoffeigenschaften	318
4.5.1.2	Wöhlerversuche mit örtlicher Temperaturbelastung	321
4.5.1.3	Wöhlerversuche zur Ermittlung der Lebensdauer nach Korrosionsbelastung	322
4.5.1.4	Untersuchungen an konstruktiv überarbeiteten Fahrschemeln	324
4.5.2	Federbeinaufnahme Vorderwagen	325
4.5.2.1	Wöhlerversuche zur Ermittlung der erforderlichen Klebstoffeigenschaften	327
4.5.2.2	Betriebslasten - Nachfahrversuche	328
4.6	Zusammenfassung zum Teilprojekt "Kleben von Stahlblech"	330
5	Kleben von Maschinenteilen	332
5.1	Das Anforderungsprofil an die spezifische Klebkonstruktion Welle/Nabe-Verbindung	332
5.2	Physikalisch-chemische Grundlagen	339
5.2.1	Beschreibung der Klebstoffe	339
5.2.2	Beschreibung der Fügeiteile	363
5.2.3	Untersuchungen an Bruchflächen	374
5.3	Werkstoffmechanische Grundlagen	384
5.4	Durchgeführte Prüfungen	387
5.4.1	Mechanische Untersuchungen	387
5.4.1.1	Festigkeitsverhalten der Rohr-Nocken-Verbindungen bei quasistatischer Torsionsbeanspruchung	387
5.4.1.2	Untersuchungen zum Kriechverhalten der Rohr-Nocken-Verbindungen in Öl bei Raumtemperatur	394
5.4.1.3	Untersuchungen zum Kriechverhalten der Rohr-Nocken-Verbindungen in Öl von 150 °C	403
5.5	Konstruktion der Verbindungen	414
5.6	Ergebnisse und Erfahrungen - Zukünftige Perspektiven	422

6	Kleben von Glas in der Feinwerktechnik	429
6.1	Einführung	429
6.2	Physikalisch-chemische Grundlagen	437
6.2.1	Beschreibung der Fügeteiloberflächen	437
6.2.2	Beschreibung der Klebstoffe	445
6.2.2.1	Mischung/Ansatz der Klebstoffkomponenten	457
6.2.2.2	Durchführung der Versuche	462
6.2.2.3	Mischen mit einem Dynamik-Mischer Typ Multivac IV	466
6.3	Werkstoffmechanische Grundlagen	471
6.3.1	Elastizitätstheorie	471
6.3.1.1	Die Differentialgleichungen des Gleichgewichts	471
6.3.1.2	Elastisches Werkstoffverhalten	473
6.3.1.3	Verzerrungs-Verschiebungs-Beziehungen	475
6.3.2	Thermoelastisches Stoffgesetz für isotropen Werkstoff	477
6.3.3	Kriechverzerrungen	478
6.3.4	Konstruktion und die Finite-Element-Methode	480
6.3.4.1	Modellbildung	480
6.3.4.2	Auswertung der FEM-Berechnungen	484
6.3.4.3	Rechnerische Ermittlung der Einflüsse auf die Temperatursteuerung	489
6.3.5	Konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung großer Temperaturspannungen bei der axialsymmetrischen Standardklebverbindung	499
6.4	Durchgeführte Untersuchungen	503
6.4.1	Untersuchungen an der Klebstoffsubstanz	503
6.4.1.1	Chemische Untersuchungen	503
6.4.1.2	Mechanische Untersuchungen	513
6.4.2	Untersuchungen an den Klebverbindungen	522
6.4.2.1	Herstellung der Probekörper	522
6.4.2.2	Interferometrisches Meßprinzip	523
6.4.2.3	Gemessener Einfluß der Klebschichtdicke auf die Oberflächendeformation eingefasster Plangläser	526
6.4.2.4	Gemessener Einfluß der Fassungswerkstoffe auf die Oberflächendeformation eingefasster Plangläser	527
6.4.3	Beschreibung der Untersuchungen	529
6.5	Fertigung von Musterbauteilen	537
6.5.1	Vergleich der Rechnungen und Messungen	537
6.5.2	Langzeiteigenschaften	541

6.6	Qualitätssicherung an den Klebungen	552
6.6.1	Ermittlung des Volumenschwundes eines Klebstoffes	552
6.6.2	Prüfungen nach DIN	571
6.7	Zusammenfassung	573
6.7.1	Beschaffenheit der zu verklebenden Linsen	573
6.7.2	Chemismus und Verarbeitung des zu verwendenden Klebstoffes	573
6.7.3	Art und Beschaffenheit der zu verklebenden Metalloberfläche (z.B. Fassungen)	574
6.7.4	Spannungsverhalten der Klebung	575
7	Kleben von rostfreiem Stahl	576
7.1	Probenherstellung	576
7.2	Konstruktion und Fertigung von Musterbauteilen	577
7.2.1	Planung und Aufbau der Arbeiten	577
7.2.2	Firmenspezifische Voraussetzungen	578
7.2.3	Fertigung der Klebungen	578
7.2.4	Maschinenbau	579
7.2.4.1	Füllrohre	579
7.2.4.2	Deckel für Füllmaschinen	580
7.2.5	Anlagenbau	581
7.2.5.1	Einblasdüsen	581
7.2.5.2	Distanzkanäle	584
7.2.6	Zusammenfassung des anwendungstechnischen Teiles	586
7.3	Physikalisch-chemische Grundlagen	587
7.3.1	Beschreibung der Fügeiloberflächen	587
7.3.2	Eigenschaften der Klebstoffen	593
7.4	Durchgeführte Untersuchungen	594
7.5	Zusammenfassung des Teilprojektes "Kleben von rostfreiem Stahl"	607
8	Flexibel integriertes System zum Kleben von Strukturbauteilen	609
8.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	609
8.2	Klebstoffsysteme für den Flugzeugbau	611
8.2.1	Stand der Technik	611
8.2.2	Bisher eingesetzte Klebstoffe und Primer	612
8.2.3	Anforderungen an neue Klebstoffe und Primer	613

8.2.4	Untersuchungen an neuen Klebstoffe	614
8.2.5	Untersuchungen an neuen Primern	617
8.2.6	Zusammenfassung	620
8.3	Die klebtechnische Fertigung im Flugzeugbau	622
8.3.1	Beschreibung des IST-Zustandes	622
8.3.1.1	Klebbauteile und Klebstoffe	622
8.3.1.2	Produktionsmengen und Variantenvielfalt	625
8.3.1.3	Prozeßschritte und Anlagentechnik	625
8.3.1.4	Zeitliche Analyse der Fertigungsvorgänge	630
8.3.1.5	Kostenrelationen in der Klebtechnik	631
8.3.1.6	Zusammenfassung	632
8.3.2	Simulation der Fertigungsabläufe in der Klebtechnik	633
8.3.2.1	Aufgabenstellung	633
8.3.2.2	Durchführung der Simulationsstudie	637
8.3.2.3	Zusammenfassung	644
8.3.3	Untersuchung zur Ablaufoptimierung bei der galvanischen Vorbehandlung	645
8.3.3.1	Aufgabenstellung	645
8.3.3.2	Durchführung der Untersuchungen	648
8.3.3.3	Zusammenfassung	652
8.3.4	Entwicklung eines Software-Systems zur Planung einer optimalen Autoklavbelegung	653
8.3.4.1	Aufgabenstellung	653
8.3.4.2	Durchgeführte Untersuchungen und Programmentwicklung	655
8.3.4.3	Zusammenfassung	660
8.3.5	Konzepte für Automatisierung und Materialfluß in der Klebtechnik	661
8.3.5.1	Aufgabenstellung	661
8.3.5.2	Definition für eine Automatisierung geeigneter Bereiche	662
8.3.5.3	Automatisierung von Arbeitsschritten	663
8.3.5.4	Zusammenfassung	673
8.3.6	Konzept für eine rechnerintegrierte Steuerung der Klebfertigung	674
8.3.6.1	Die klebtechnische Fertigung und CIM	674
8.3.6.2	Aufgaben der Informationsverarbeitung in der klebtechnischen Fertigung	675
8.3.6.3	Strukturkonzept einer rechnerintegrierten Steuerung der Klebfertigung	680

8.3.6.4	Zusammenfassung	682
8.4	Auftragen und Dosieren	683
8.4.1	Untersuchungen zum Primerauftrag	683
8.4.1.1	Stand der Technik	683
8.4.1.2	Neue Auftragsverfahren	684
8.4.1.3	Wasserdispergierbare Primer	686
8.4.1.4	Zusammenfassung	689
8.4.2	Entwicklung eines Systems zum automatischen Auftrag pastöser Klebstoffe	690
8.4.2.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	690
8.4.2.2	Anforderungskriterien	690
8.4.2.3	Auswahl und Test der Klebstoffauftragsanrichtungen	691
8.4.2.4	Funktionen für das Kleben mit Robotern	692
8.4.2.5	Versuche zum flächigen Klebstoffauftrag	693
8.4.2.6	Integration einer Dosiersteuerung für den Klebstoffauftrag in die Robotersteuerung	698
8.4.2.7	Zusammenfassung	701
8.4.3	Entwicklung eines On-line Volumenstrom-Meßsystems für den geschwindigkeitsproportionalen, robotergeführten Klebstoffauftrag	702
8.4.3.1	Einleitung	702
8.4.3.2	Problemstellung	703
8.4.3.3	Aufbau der Dosieranlage	703
8.4.3.4	Anforderungen an Durchflußmeßzellen	705
8.4.3.5	Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse	705
8.4.3.6	Anforderungen an eine praxistaugliche Dosierüberwachung	712
8.4.3.7	Zusammenfassung	714
9	Qualitätssicherung in der Klebtechnik	715
9.1	Verfahren zur Oberflächenkontrolle nach der galvanischen Vorbehandlung	731
9.1.1	Einleitung	731
9.1.2	Anforderungen an das Meßsystem	731
9.1.3	Ellipsometrie	733
9.1.4	Untersuchungen zum Anwendungsspektrum der Ellipsometrie	735
9.1.5	Parametervariationen in der Oberflächenvorbehandlung	736
9.1.6	Zusammenfassung	738

9.2	Untersuchungen zur Überwachung des Klebstoffaushärtevorgangs	739
9.2.1	Einleitung	739
9.2.2	Eignung der Meßeinrichtung für die Steuerung des Aushärteprozesses	740
9.2.2.1	Messung des mechanischen Verlustfaktors mit "Ultraschall"	740
9.2.2.2	Messungen des elektrischen Verlustfaktors "Dielektrometrie"	743
9.2.3	Einbindung des Meßverfahrens zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit in einem Klebvorgang	745
9.2.4	Zusatzzonenheizung	746
9.2.5	Zusammenfassung	747
9.3	Holografische Interferometrie an Klebverbindungen	749
9.3.1	Holografische Belastungsuntersuchungen an Klebverbindungen	750
9.3.2	Entwicklung einer geeigneten Zugprüfmaschine	751
9.3.3	Versuchsdurchführung	753
9.3.4	Ergebnisse der holografischen Untersuchung	754
9.3.5	FEM-Berechnungen	755
9.3.5.1	Modellierung der Probe für FEM-Berechnungen	755
9.3.5.2	Ergebnisse der FEM-Berechnungen und Vergleich mit dem Experiment	757
9.3.5.3	Zusammenfassung	758
9.3.6	Holografische Bauteilprüfung am Hilfsrahmen	759
9.3.6.1	Holografischer Aufbau	760
9.3.6.2	Versuchsdurchführung	763
9.3.6.3	Ergebnisse	763
9.3.6.4	Zusammenfassung	765
10	Zusammenfassung des Verbundprojektes "Fertigungstechnologie Kleben - FTK" und Ausblick	766