

Forschungsvorhaben P 654

Neue Konstruktionen durch Einsatz von Klebverbindungen im Stahlbau

New Adhesively Bonded Steel Structures for the Building and Construction Industry

Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau, BTU Cottbus:
Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
Dipl.-Ing. Jörg Meinz

Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen:
Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Dr.-Ing. Boris Völling
Dipl.-Ing. Björn Abeln

Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig:
Univ.-Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Klaus Dilger
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Dipl.-Ing. Marc Ullmann

Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Technische Universität Braunschweig:
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer
Dr.-Ing. Justus Medgenberg

Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik (AWOK), Technische Universität Kaiserslautern:
Prof. als Juniorprofessor Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß
Dipl.-Ing. Astrid Wagner

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dipl.-Ing. Franz-Josef Heise

Das Forschungsvorhaben (IGF-Nr. 169 ZBG) des Deutschen Ausschusses für Stahlbau DASt wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) finanziert. Das Vorhaben wurde am Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau, BTU Cottbus, dem Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen, dem Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig, dem Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Technische Universität Braunschweig und der Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik (AWOK), Technische Universität Kaiserslautern, durchgeführt. Die fachliche Begleitung des Vorhabens erfolgte durch die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf.

Inhaltsverzeichnis

1	<u>EINLEITUNG (INTRODUCTION)</u>	1
2	<u>ENTWICKLUNG KLEBGERECHTER KONSTRUKTIONEN (NEW CONSTRUCTIONS SUITABLE FOR ADHESIVE TECHNOLOGIES)</u>	4
2.1	ALLGEMEINE KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN (GENERAL CONSTRUCTION GUIDELINES)	4
2.2	BRÜCKENDECKKONSTRUKTIONEN (BRIDGE DECK CONSTRUCTIONS)	7
2.2.1	Einleitung (Introduction)	7
2.2.2	Brückenplatten mit Klebtechnik (Bridge decks with bonding technique)	9
2.2.3	Weitere konstruktive Aspekte (Further design aspects)	10
2.3	FASSADENVERSTÄRKUNG (FACADE REINFORCEMENT)	13
2.4	FASSADENANSCHLUSS (FACADE CONNECTION)	15
3	<u>KLEBSTOFFAUSWAHL UND MATERIALKENNWERTE (SELECTION OF ADHESIVES AND EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES)</u>	17
3.1	ANFORDERUNGEN AN GEEIGNETE KLEBSTOFFE (STANDARDS FOR APPLICABLE ADHESIVES)	18
3.2	KLEBSTOFFAUSWAHL (RANGE OF ADHESIVES)	19
3.3	SPEZIFISCHE VERARBEITUNGSEIGENSCHAFTEN UND APPLIKATIONSVERHALTEN (SPECIFIC PROCESSING PROPERTIES AND APPLICATION BEHAVIOUR)	21
3.4	ERMITTLUNG DER MATERIALKENNWERTE ALS GRUNDLAGE FÜR DIE KONSTRUKTION UND BERECHNUNG (EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES FOR CONSTRUCTION AND DESIGN)	22
3.4.1	Dynamisch-Mechanische Analyse (Dynamic-Mechanical Analysis)	22
3.4.2	Zugversuch (Tensile test)	23
3.4.3	Zugscherversuch (Thick-adherend tensile shear test)	27
4	<u>OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG (SURFACE PRE-TREATMENT)</u>	30
4.1	FASSADENBAU (FACADE CONSTRUCTION)	31
4.1.1	Profil Typ A: Probenvorbereitung und Vorbehandlung (Profile type A: sample preparation and surface pre-treatment)	32
4.1.2	Ermittlung der mechanischen Festigkeiten (Determination of mechanical resistance)	35

4.1.3	Profil Typ B, Probenvorbereitung und Vorbehandlung (Profile type B, sample preparation and conditioning)	38
4.2	BRÜCKENDECKKONSTRUKTION (BRIDGE DECK CONSTRUCTION)	40
4.2.1	Oberflächenvorbereitung und Vorbehandlung (Surface-preparation and surface pre-treatment)	41
4.2.2	Probennachbehandlung (Finishing treatment)	43
5	<u>UNTERSUCHUNGEN ZUR LANGZEITBESTÄNDIGKEIT</u> <u>(EVALUATION OF LONG-TERM DURABILITY)</u>	55
6	<u>FERTIGUNGSSZENARIO (SCENARIOS OF PRODUCTION)</u>	60
6.1	FERTIGUNG UNTER WERKSTATTBEDINGUNGEN (PRODUCTION UNDER FACTORY CONDITIONS)	61
6.1.1	Mischen der Klebstoffe (Mixing of adhesives)	61
6.1.2	Klebstoffauftrag (Adhesive application)	65
6.1.3	Klebstoffaushärtung (Adhesive curing)	66
6.1.4	Fixierung/Fügekräfte (Fixing / joining force)	75
6.1.5	Schwinden (Shrinkage)	76
6.2	FERTIGUNG UNTER BAUSTELLENBEDINGUNGEN (PRODUCTION ON THE CONSTRUCTION SITE)	77
6.2.1	Oberflächen (Surfaces)	77
6.2.2	Fügevorgang (Joining process)	80
6.3	DEMONSTRATOREN (DEMONSTRATORS)	86
6.3.1	Vorversuche zur Optimierung der Fertigungsfolge	87
6.3.2	Herstellung des ersten Demonstrators (Manufacturing the first mock-up)	88
6.3.3	Bau des zweiten Demonstrators (Construction of the second demonstrator)	92
7	<u>BRÜCKENDECKKONSTRUKTIONEN (BRIDGE DECK CONSTRUCTIONS)</u>	97
7.1	BAUTEILVERSUCHE UND BERECHNUNGEN (TESTS AND CALCULATIONS)	97
7.1.1	Experimentelle Untersuchungen an Großbauteilen (Testing of large components)	98
7.1.2	Numerische Untersuchungen an Großbauteilen (Numeric analysis of large components)	106
7.1.3	Experimentelle Untersuchungen an Kleinteilproben (Testing of small part specimen)	108
7.1.4	Numerische Untersuchungen an Kleinteilproben (Numeric analysis of small part specimen)	116
7.1.5	Ermüdungsversuche (Fatigue tests)	121

7.2 ERARBEITEN VON INGENIEURMODELLEN, BEMESSUNGS- UND KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN (DEVELOPMENT OF MECHANICAL MODELS, DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDELINES)	124
7.2.1 Einleitung (Introduction)	124
7.2.2 Lastannahmen (Design loads)	124
7.2.3 Modellbildung und analytische Bemessung (Modelling and analytic design)	126
7.2.4 Berechnung von schubstarrten und schubweichen Balken nach der Theorie von Bernoulli und Timoshenko (Calculation of shear-resistant and shear-elastic beams according to theory of Bernoulli and Timoshenko)	128
7.2.5 Berechnung von nachgiebigen Verbundquerschnitten mit Hilfe reduzierter Steiner-Anteile (Calculation of composite sections by means of reduced Steiner-proportion)	130
7.2.6 Berechnung nach der Sandwichtheorie (Calculation on the basis of sandwich theory)	134
7.2.7 Vergleich bestehender Berechnungsverfahren (Comparison of existing methods of calculation)	137
7.2.8 Berechnungsbeispiel: Symmetrischer Balkenquerschnitt mit zwei Zwischenschichten (Worked sample: symmetric beam cross-section with two intermediate layers)	138
7.2.9 Parameterstudie nach der Sandwichtheorie (Parametric study on the basis of sandwich theory)	151
7.2.10 Berechnung mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (Calculations with the FEM)	154

8 FASSADENVERSTÄRKUNG (FACADE REINFORCEMENT) 157

8.1 ART UND NUTZEN VON VERSTÄRKUNGSMAßNAHMEN (TYPE AND USEFULLNESS OF REINFORCEMENT MEASURES)	157
8.2 THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN (THEORETICAL INVESTIGATIONS)	160
8.3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN (EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS)	162
8.3.1 Herstellung der Probekörper (Manufacturing of test specimens)	162
8.3.2 Versuchsaufbau (Test setup)	166
8.3.3 Ergebnisse der Versuche (Test results)	167
8.4 VERBUNDVERHALTEN (COMPOSITE BEHAVIOUR)	172
8.5 KLEBFUGENBEANSPRUCHUNG (STRESS IN BONDING LAYER)	175
8.6 NACHWEISKONZEPT (CONCEPT FOR ANALYSES)	177

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
 Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen
 Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
 64287 Darmstadt, Petersenstraße 30

9 FASSADENANSCHLUSS (FACADE CONNECTION)	179
9.1 KONSTRUKTION EINES GEKLEBTEN ANSCHLUSSES (CONSTRUCTION OF A BONDED CONNECTION)	179
9.2 THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN (THEORETICAL INVESTIGATION)	180
9.3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN (EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS)	184
9.3.1 Herstellung der Probekörper (Manufacturing of test specimens)	184
9.3.2 Versuchsaufbau (Test setup)	186
9.3.3 Ergebnisse der Versuche (Test results)	188
9.4 KONSTRUKTIVE GESTALTUNG (CONSTRUCTION DESIGN)	190
10 MONITORING (MONITORING)	192
10.1 AUSGANGSSITUATION (CURRENT SITUATION)	192
10.2 MONITORINGSTRATEGIEN (MONITORING STRATEGIES)	194
10.2.1 Variante 1: Zentrales Monitoring (Centralized monitoring concepts)	195
10.2.2 Variante 2: Dezentrales Monitoring (Local monitoring concept)	197
10.3 SENSOREN FÜR DAS MONITORING VON KLEBVERBINDUNGEN (SENSORS FOR MONITORING OF BONDED JOINTS)	199
10.3.1 Einteilung der Sensoren (Sensor classification)	199
10.3.2 Sensor zur Erfassung von Relativverschiebungen (Sensor for assessment of relative displacements)	200
10.3.3 Messkonzept zur Erfassung von Delaminationen (Concept for assessment of delaminations)	208
11 QUALITÄTSSICHERUNG (QUALITY ASSURANCE)	214
11.1 QUALITÄTSMANAGEMENT IN DEN PHASEN DER KLEBUNG VON BAUTEILEN (QUALITY MANAGEMENT DUE TO THE STAGES OF ADHESIVE BONDING)	214
11.2 QUALITÄTSSICHERUNG BEI DER FERTIGUNG DER DEMONSTRATOREN (QUALITY ASSURANCE DUE TO THE PRODUCTION OF THE DEMONSTRATORS)	216
11.2.1 Zerstörungsfreie Prüfung (Non-destructive test (NDT))	216
11.2.2 Mischungsverhältnis (Mixture ratio)	217
11.2.3 Einfluss der Klebschichtdicke (Influence of the adhesive layer thickness)	220
11.2.4 Einfluss von Fehlstellen und Abstandhaltern (Influence of imperfections and spacers)	223
12 WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE (ECONOMIC FEASIBILITY STUDY)	229

13 ZUSAMMENFASSUNG (ABSTRACT)	232
--------------------------------------	------------

14 LITERATURVERZEICHNIS (LIST OF LITERATURE)	236
---	------------

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen

Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann

64287 Darmstadt, Petersenstraße 30