

Compared to demolition and new construction, the approach of maintaining and upgrading buildings and structures is becoming increasingly important. Various repair and rehabilitation methods exist to improve the structural capacity of reinforced concrete components.

Der Erhaltung und Ertüchtigung von Bauwerken kommt gegenüber dem Abriss und Neubau eine wachsende Bedeutung zu. Zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen gibt es verschiedene Sanierungsansätze.

# Maintenance and upgrade of structural concrete components with carbon

## Erhalt und Ertüchtigung von Betonbauteilen mit Carbon

Compared to demolition and new construction, the approach of maintaining and upgrading buildings and structures is becoming increasingly important. Various repair and rehabilitation methods exist to improve the structural capacity of reinforced concrete components, including the application of shotcrete with supplementary reinforcement, the insertion of additional concrete steel into slots milled into the concrete specifically for this purpose, and the addition of a concrete topping to create a new compression zone. All of these methods are associated with a high degree of soiling whilst generating additional moisture, restricting the use of the building or structure, and adding weight to it [1].

For these reasons, contractors began to use steel tabs about 30 years ago to which a high-strength epoxy adhesive was applied to provide additional reinforcement [2]. However, this method is associated with well-known disadvantages, such as heavy weight, corrosion, and the propping required during the assembly process.

Since the mid-1990 s, extremely lightweight, non-corrosive carbon fiber laminates have been available to provide material characteristics that are ideally suited to reinforcing structural components. For instance, the pioneering work carried out to ensure sufficient earthquake resistance of highways in California was acclaimed on a worldwide scale.

In November 1997, the first national technical approval was granted in Germany [3+4]. Many solutions to existing problems made it possible to quickly introduce and disseminate this new method. The projects described in this article should illustrate the wide range of possible uses.

Starting this year, the specifications contained in the DAfStB guideline (volumes 591, 592, 593, 594) must be combined with a new design method for approval. A distinction is made between the design rules according to the guideline (“intermediate crack concept”) and

Der Erhaltung und Ertüchtigung von Bauwerken kommt gegenüber dem Abriss und Neubau eine wachsende Bedeutung zu. Zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen gibt es verschiedene Sanierungsansätze, beispielsweise Spritzbeton mit Zusatzbewehrung, Einfädeln von Stahlzulagen in nachträglich gefrästen Schlitzen oder Aufbetonieren einer neuen Druckzone. Diesen Methoden ist gemein, dass sie mit einem hohen Verschmutzungsgrad und zusätzlicher Feuchtigkeit, Nutzungseinschränkung und auch Gewichtszuwachs verbunden sind [1].

Diese Gründe führten dazu, dass vor etwa 30 Jahren begonnen wurde, Stahllaschen mit hochfestem Epoxidharzkleber als Zusatzbewehrung zu verwenden [2]. Die Nachteile wie hohes Gewicht, Korrosion und Abstützen bei der Montage sind bekannt.

Extrem leichte, nicht korrodierende Kohlefaserlamellen bieten seit Mitte der 1990er Jahre die idealen Materialeigenschaften, um Bauteile zu verstärken. Die Erdbebensicherung der kalifornischen Autobahnen erregte weltweite Aufmerksamkeit.

Im November 1997 wurde die erste „allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“ [3+4] erteilt. Viele Problemlösungen sorgten für eine schnelle Einführung und Verbreitung. Die hier beschriebenen Projekte sollen das breite Einsatzspektrum veranschaulichen.

Ab 2015 gilt eine Kombination aus der DAfStB-Richtlinie (Hefte 591, 592, 593, 594) und einer neuen Zulassungsauslegung. Es erfolgt eine Trennung in die Bemessungsregelungen nach Richtlinie („Zwischenrissskonzept“) und in die Materialkennwerte und Prüfungen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung.

### 1 Kohlefasern und Herstellung von CFK-Lamellen

Ende des 19. Jahrhunderts erfand Thomas Edison die Glühbirne mit einer Kohlefaser als Glühfaden. Erst seit 1960 verstärken die Kohlenstofffasern Kunststoffe. Dieser Werkstoff wird aus Polyacrylnitrilfasern (PAN) durch Verkokung bis 1.600 °C hergestellt. Durch mechanisches



Figure: HPS

In the pultrusion process, 50 roving strands with 24,000 (24k) individual filaments each are pulled through a resin bath and hardened in an oven

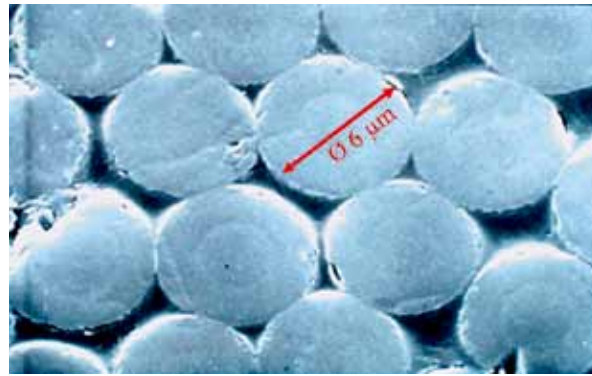
Im Strangziehverfahren (Pultrusion) werden 50 Rovingstränge mit je 24.000 dieser Einzelfasern (24 k) durch ein Harzbad gezogen und in einem Ofen erhärtet

the material characteristics and tests specified in the national technical approval.

### 1 Carbon fiber and production of CFRP laminates

At the end of the 19<sup>th</sup> century, Thomas Edison invented the light bulb that used a carbon filament to glow. Only from 1960 were carbon filaments used to reinforce plastics. This material is made from polyacrylonitrile (PAN) fiber in a coking process at temperatures of up to 1,600 °C. A marked longitudinally oriented structure forms as a result of a mechanical extension process at temperatures of up to 3,000 °C. Filaments are available with an e modulus between 200 and 800 GPa and strength levels from 2,000 to 8,000 MPa at a density of 1,8 g/cm<sup>3</sup>. Thus, the structural parameters of carbon filaments are superior to aramid or glass fibers, steel or titanium. The related benefits were primarily utilized in aircraft engineering: as early as in 1980, about 400 kg of CFRP components were installed in the Airbus A310 or Boeing aircraft [5].

In shifting one's perspective from rovings to laminates, it is worth noting that a standard, 50 mm wide and 1.2 mm thick laminate consists of approximately 1.2 million carbon filaments, each with a diameter of 1/6,000 mm. In the so-called pultrusion process, 50 roving strands with 24,000 (24k) individual filaments each are pulled through a resin bath and hardened in an oven. About 70% of the material's voids are filled with fibers. The large number of unidirectional fibers (UD laminates) makes it possible to neglect existing tensile strength variances. Laminates show a linearly elastic behavior to failure. Laminates with different e moduli can be produced by using various types of fiber. For instance, a standard type [4] has a modulus of elasticity of 170 GPa and a tensile strength of 2,800 N/mm<sup>2</sup>. Laminates are available in widths from 50 to 150 mm and thicknesses



A standard, 50 mm wide and 1.2 mm thick laminate consists of approximately 1.2 million carbon filaments, each with a diameter of 1/6,000 mm

Figure: HPS

Eine Standardlamelle von 50 mm Breite und 1,2 mm Dicke besteht aus rund 1,2 Mio. Kohlefasern mit einem Durchmesser von 1/6.000 mm

Strecken bei Temperaturen bis 3.000 °C bildet sich eine ausgeprägte längsgerichtete Struktur. Die Fasern sind erhältlich mit E-Moduli zwischen 200 und 800 GPa und Festigkeiten von 2.000 bis 8.000 MPa bei einer Dichte von 1,8 g/cm<sup>3</sup>. Diesbezüglich weisen Kohlenstofffasern im Vergleich zu Aramid- und Glasfasern, Stahl oder Titan die höchsten Werte auf. Insbesondere im Flugzeugbau wurden diese Vorteile genutzt: Bereits 1980 wurden im Airbus A310 oder Boeing rund 400 kg CFK-Bauteile eingesetzt [5].

Vom Roving zur Lamelle: Eine Standardlamelle von 50 mm Breite und 1,2 mm Dicke besteht aus rund 1,2 Mio. Kohlefasern mit einem Durchmesser von 1/6.000 mm. Im Strangziehverfahren (Pultrusion) werden 50 Rovingstränge mit je 24.000 Einzelfasern (24 k) durch ein Harzbad gezogen und in einem Ofen erhärtet. Der Füllgrad beträgt rund 70% Fasern. Durch die große Anzahl der Fasern in unidirektionaler Richtung (UD-Lamellen) kann die Streuung der Zugfestigkeit vernachlässigt werden. Die Lamellen weisen ein linear-elastisches Verhalten bis zum Bruch auf. Durch Verwendung von verschiedenen Fasertypen können Lamellen mit unterschiedlichen Elastizitätsmodulen hergestellt werden. Beispielsweise hat eine Standardtype [4] einen E-Modul von 170 GPa und eine Zugfestigkeit von



Figure: HPS

A test program was assigned to the Leipzig Materials Research and Testing Institute that specifically dealt with the "Temperature Behavior of CFRP Laminates Installed Underneath Mastic Asphalt"

Speziell zum Thema „Temperaturverhalten von CFK-Lamellen unter Gussasphalt“ wurde ein Versuchsprogramm an die MFPA Leipzig vergeben



Figure: HPS

from 1.2 to 1.4 mm. They are wound on 100 to 250 m long rolls. For instance, a 50 × 12 laminate will only weigh 25 kg per 250 m roll. It is thus easy to transport at a diameter of 90 cm.

Carbon fibers and epoxy matrix exhibit a very high chemical resistance against pollutants or harmful substances that usually occur in construction. Laminates are delivered to the job site on rolls, and the reinforcing adhesive (which is also an epoxy resin) makes it easy to apply them even in tight spots without having to use propping, lifting equipment or presses. A test beam installed at EMPA Zurich since 1970 serves to measure the long-term behavior of epoxy adhesives [6].

At a mean structural temperature of 20 °C, the structure may first be loaded when two days have passed after completion of bonding works [4]. However, if a transformer is used to apply an electrical voltage to the CFRP laminate, it acts as a resistor and heats itself up, as well as the adhesive. At 80 °C, its hardening time is reduced to two hours, which makes it possible to shorten the time to loading and to increase the glass transition temperature ( $T_g$ ) for certain types of material (Sikadur 30 LP) [8], which are used, for example, in the LC II prestressing system.

## 2 The conventional reinforcing method: bonding of non-prestressed CFRP laminates (EBR)

Adhering steel tabs has become the state of the art to upgrade buildings or structures. In the 1980 s, this method was included in the SIVV training series [10] document. However, long-term EMPA tests under weather exposure [11] showed that the corrosion behavior of primed and unprimed steel tabs may lead to problems in the long run. Other disadvantages of steel tabs include their heavy weight, tedious installation, and fire resistant dowels to be placed at either end.

From 1995, successful tests of CFRP laminates carried out at EMPA Zurich as well as tests and expert opinions published at Braunschweig University of Technology led to the development of first reinforcements where CarboDur laminates were applied to balcony slabs in Magdeburg [13], followed by other CFRP reinforcements applied to two bridges in Dresden, cracked parapet elements at Berlin Tegel Airport, and longitudinal beams at Düsseldorf Airport. The first approval granted in 1997

2.800 N/mm<sup>2</sup>. Die Lamellen werden in Breiten zwischen 50 und 150 mm und in Dicken von 1,2 und 1,4 mm angeboten und auf Rollen mit einer Länge von 100 bis 250 m gewickelt. Zum Beispiel beträgt das Gewicht der Lamelle 50 × 12 nur 25 kg pro 250-m-Rolle. Bei einem Durchmesser von 90 cm kann sie somit leicht transportiert werden.

Die chemische Beständigkeit der Kohlenstofffasern und der Epoxidmatrix gegenüber bauüblichen Schadstoffen ist sehr gut. In Rollen kommen die Lamellen auf die Baustelle, und mittels des Armierungsklebers (ebenfalls Epoxidharz) ist es einfach, sie ohne Abstützung, Hebezeug oder Anpressvorrichtung auch bei beengten Platzverhältnissen zu applizieren. Das Langzeitverhalten der Epoxidklebstoffe wird an einem Versuchsbalken der EMPA Zürich seit 1970 gemessen [6].

Die Belastung der Konstruktion darf bei einer mittleren Bauwerkstemperatur von 20 °C frühestens zwei Tage nach Beendigung der Klebarbeiten erfolgen [4]. Legt man aber mittels eines Transformators elektrische Spannung an die CFK-Lamelle, wirkt sie wie ein Widerstand und heizt sich und den Kleber auf. Bei 80 °C reduziert sich die Erhärtungszeit auf 2 Stunden. Hierdurch werden ein schnelles Belasten ermöglicht und der Glasübergangspunkt  $T_g$  bei gewissen Typen (Sikadur 30 LP) angehoben [8], eingesetzt beispielsweise beim Vorspannsystem LC II.

## 2 Die klassische Verstärkung – CFK-Lamellen schlaff aufkleben (EBR)

Für die Ertüchtigung von Bauwerken ist das Verfahren der aufgeklebten Stahllaschen Stand der Technik. In den 1980er Jahren wurden sie in die „SIVV“-Lehrgänge [10] aufgenommen. EMPA-Langzeitversuche unter Freibewitterung [11] zeigten allerdings, dass das Korrosionsverhalten sowohl von ungeprimerten wie auch geprimerten Stahllaschen langfristig Probleme bereiten kann. Die weiteren Nachteile von Stahllaschen sind ein hohes Gewicht, mühsames Anbringen und die Branddübel an jedem Ende. Nach erfolgreichen Versuchen der EMPA Zürich mit CFK-Lamellen und Versuchen und Gutachten der TU Braunschweig kam es ab 1995 zu ersten Verstärkungen mit CarboDur-Lamellen an Loggia-Platten in Magdeburg [13]. Weitere Verstärkungen mit CFK mit „Zustimmung im Einzelfall“ an zwei Brücken bei Dresden, gerissenen Brüstungselementen am Flughafen Berlin-Tegel oder Unterzügen im Flughafen Düsseldorf folgten. Nach der Erteilung der ersten Zulassung 1997 [4] folgten vielfältige Ertüchtigungen im Hoch- und Brückenbau. Durch Bemessungsbeispiele und elektronische Programme wurde das Verfahren benutzerfreundlich.

## 3 Ausgewählte Projekte aus dem Ingenieur-Hochbau

» Fachhochschule Stuttgart: Die 1998 durchgeführte Aufstockung des Hörsaalgebäudes der FH Druck- und Medientechnik bedeutete eine Verkehrslasterhöhung auf 500 kg/m<sup>2</sup>. Die Traglasterhöhung der kreuzweise gespannten Rippendecke war mit einer aufgeklebten Verstärkung aus Stahllaschen geplant. Diese können aber nur durch Futterstücke beziehungsweise Ausklinkungen gekreuzt werden. Durch Umbemessung in CFK ergab sich eine einfache Lösung. Hier sind Kreuzungen einfach auszuführen (1,2 mm Lamelle plus ca. 1 mm

[4] then gave rise to a wide variety of structural upgrades in building construction and bridge engineering. The method became user-friendly as a result of worked examples and releases of related software programs.

### 3 Selected projects from structural engineering

- » Stuttgart University of Applied Sciences: The extension of the existing auditorium at the University of Printing and Media by an additional story completed in 1998 was associated with a service load increase to 500 kg/m<sup>2</sup>. The design originally included external bonding of steel tabs to accommodate the increased load acting on the cross-span, ribbed ceiling. However, such tabs can only be arranged in crosswise direction if filling pieces or cutouts are inserted. Redesigning the project to CFRP resulted in a simple solution in which crossings are easy to install, involving a 1.2 mm laminate plus about 1 mm of adhesive. A suspended ceiling ensures the required fire safety. In other cases, an F90 covering can be mounted using screws and dowels [15].
- » Augsburg Hospital: One of the ceilings of this building had to be reinforced prior to installing a new magnetic resonance imaging (MRI) system, which created an additional load of over one tonne. Many different building services and cables are routed on the underside of the ceiling. This is where CFRP laminates had to be inserted and bonded to the surface properly. The key argument in favor of this strengthening method was that it would not alter the magnetic field of the sensitive MRI system.
- » Kaufhof department store, Hamburg, Mönckebergstrasse: The conversion of this building aimed to reposition the escalators, which meant that the structural system had to be modified. Previous central Kleber). Der Brandschutz erfolgt über eine abgehängte Decke. In anderen Fällen kann eine F90-Bepunktung angedübelt werden [15].
- » Klinikum Augsburg: Durch das Aufstellen eines neuen Kernspintomographen mit einer Zusatzlast von über einer Tonne wurde die Verstärkung einer Decke notwendig. Unterhalb der Decke verläuft ein Gewirr von Versorgungsleitungen. Hier müssen die CFK-Lamellen mit großem Geschick eingefädelt und ordnungsgemäß verklebt werden. Ausschlaggebendes Argument: Durch die Verstärkung erfolgt keine Veränderung des Magnetfeldes für das empfindliche Gerät.
- » Kaufhof Hamburg/Mönckebergstraße: Bei den Umbaumaßnahmen bestand das Ziel darin, die Rolltreppen neu anzuordnen. Dadurch musste das statische System geändert werden. Ehemalige Mittelfelder wurden zu Endfeldern und Haupt- und Nebenunterzüge des Deckensystems wurden durchgeschnitten. Mehrlasten in Folge von Deckenschließungen und Überbeanspruchung ehemaliger Mittelfelder waren die Folge. Die Untergrundvorbereitung und die Verstärkungsmaßnahme erfolgten nachts innerhalb von Staubwänden. Durch entsprechende Einstellung der Klimaanlage konnte der normale Geschäftsbetrieb tagsüber eingehalten werden. Die 2.200 m Lamellen waren in weniger als vier Wochen verklebt.
- » Parkhaus Stuttgart: Im Jahr 2000 wurde das Parkhaus am Hauptbahnhof saniert. Auf den Stell- und Fahrflächen war eine Betoninstandsetzung auszuführen. Die Maßnahme der statischen Verstärkung wurde notwendig, da im Zuge der Sanierung die Druckzone der Decken unsachgemäß herausgestemmt und zusätzlich auf dem geschwächten Querschnitt die Paletten mit den neuen Materialien gelagert wurden. Wegen der deutlich sichtbaren Durchbiegung wurde der Tragwerksplaner



Carbon reinforcements were applied to structural components of the Haus der Kulturen der Welt und Kongresshalle (HKW) in Berlin

Im Haus der Kulturen der Welt und Kongresshalle (HKW) Berlin kamen Bauteilverstärkungen mit Carbon zum Einsatz

Parts of the structural framework of the Burda-Hochhaus in Offenbach were also strengthened using this method

Auch Teile des Tragwerks im Burda-Hochhaus Offenbach wurden mittels dieser Methode verstärkt



Figure: HPS

bays became terminal bays, and main and secondary longitudinal beams of the ceiling system were cut through, which resulted in additional loads created by closing the ceiling, with subsequent overloading of previous central bays. Surface preparation and strengthening were performed at night behind dust barriers. Normal operations could be continued during the day by adjusting the air-conditioning system accordingly. A period of less than four weeks was needed to apply 2,200 m of laminates.

- » Parking garage, Stuttgart: In 2000, the parking garage at Stuttgart Main Station was repaired and refurbished. Concrete rehabilitation had to be carried out for parking lots and driveways. Structural strengthening became necessary because the compression zone of the floor was chiseled out inappropriately, and pallets with new materials were stored on the weakened cross-section. The clearly visible deflection gave rise to the involvement of the structural engineer. The new concept included bonding of  $50 \times 1.2$  laminates at an 80 cm spacing. Prior to strengthening, however, the ceiling was temporarily supported down to the basement, and subsequently pushed in upward direction in a closely monitored process. This step made it possible to bond the laminates whilst applying a small prestressing force to them. This work was concealed by spraying on mortar.

Generally speaking, parking garage refurbishment projects require a low height as well as a long-lasting resistance of both reinforcement and epoxy coating. A load test was carried out to arrive at a reliable conclusion in this regard; this test also included the verification of shear forces created by the parking of vehicles [16].

- » Fährbrücke at Lake Zurich, Switzerland: The repair of this 120 m long bridge originally constructed in 1972 as a railway line overpass [19] revealed that the top transverse reinforcement layer of the bridge decking was too thin. The bending resistance of this zone had to be increased; the low thickness of CFRP laminates made it possible to retain the original height of the superstructure. Carbon fiber strips were coated with a 5 mm Epocem layer to enable hot fixing of the bituminous seal [20]. A test program was assigned to MFGPA Leipzig (Leipzig Materials Research and Testing Institute) that specifically dealt with the “Tempera-

eingeschaltet. Das Konzept sah eine Klebearmierung aus Lamellen  $50 \times 1,2$  im Abstand von 80 cm vor. Vor der Verstärkung wurde allerdings die Decke bis in das Kellergeschoss abgesprießt und überwacht hochgepresst. Jetzt konnte die Verklebung erfolgen, wobei eine geringe Vorspannkraft in die Lamellen eingebracht wurde. Mit Spritzmörtel wurde die Maßnahme „kaschiert“.

Grundsätzlich ist bei der Parkhaussanierung sowohl der sparsame Höhengenaufbau als auch die Langzeitbelastbarkeit von Verstärkung und Beschichtung wichtig. Um hierzu eine gesicherte Aussage zu treffen, wurde ein Belastungsversuch durchgeführt, in den auch die Beanspruchung der Schubkräfte durch Einparken mit einbezogen wurde [16].

- » Fährbrücke am Zürichsee: Als die 120 m lange Brücke aus dem Jahr 1972 über einer Bahnlinie saniert wurde [19], zeigte sich im Rahmen der Instandsetzung, dass die obliegende Querbewehrung der Fahrbahnplatte zu gering war. Der Biege widerstand dieser Zone war zu erhöhen; durch die geringe Dicke der CFK-Lamellen änderte sich die Aufbauhöhe nicht. Durch Beschichten der Kohlefaserstreifen mit 5 mm Epocem konnte die Bitumendichtungsbahn aufgeflammt werden [20]. Speziell zum Thema „Temperaturverhalten von CFK-Lamellen unter Gussasphalt“ wurde ein Versuchsprogramm an die MFGPA Leipzig vergeben, um das Verhalten des Klebstoffes nach Einwirken von Temperaturen durch Einbringen von Gussasphalt bis  $240^\circ\text{C}$  zu prüfen [21].
- » B41/A623 Stützenverstärkung Johannisbrücke: Das Bauwerk ist eine fünffeldrige Verbundbrücke im Verlauf der B41/A623. Sie besteht aus zwei parallelen Überbauten, die auf innen begehbaren Stahlbeton-Rundstützen (Außendurchmesser  $d = 3,0$  m) lagern. Im Jahr 2000 wurde aufgrund von Schäden eine Instandsetzung des

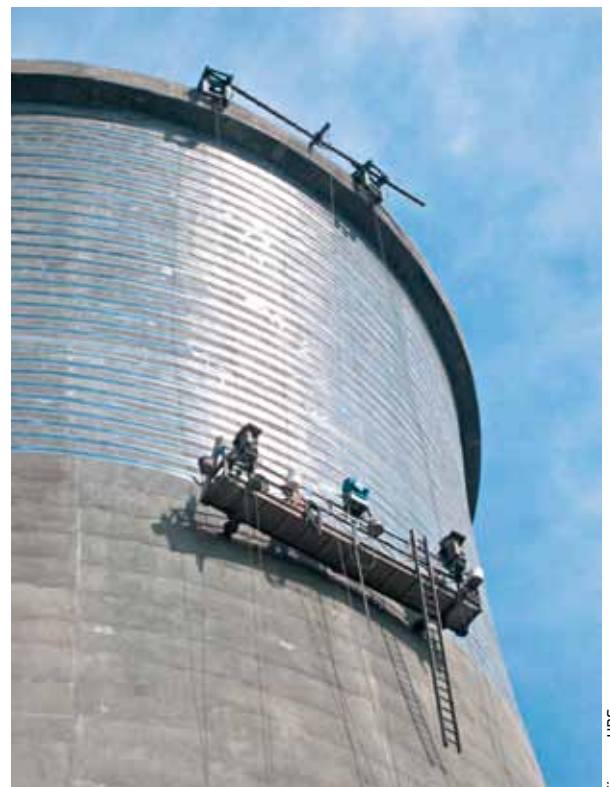


Figure: HPS

A cooling tower was reinforced with carbon in Eisenhüttenstadt, eastern Brandenburg

Im ostbrandenburgischen Eisenhüttenstadt wurde ein Kühlturm mit Carbon ertüchtigt

ture Behavior of CFRP Laminates Installed Underneath Mastic Asphalt” to verify the behavior of the adhesive after the temperature impact resulting from the placement of mastic asphalt of up to 240 °C [21].

- » B41/A623, strengthening of Johannsbrücke columns: This structure is a five-bay composite bridge on the B41/A623 federal road/highway. It is composed of two parallel superstructures supported on round reinforced concrete columns accessible from inside (with an outer diameter of 3.0 m). In 2000, damage was detected that necessitated repair of the pillar in axis IV. Defective production caused the roller bearing to slip from the plate, generating horizontal forces not covered by the design and leading to deflection of the pillar. In the course of the rehabilitation work, the bridge was lifted and the bearings were put back into their original positions. The weakening of the pillar reinforcement caused by overstraining was compensated by applying CFRP strips. Vertical S614 laminate strips and horizontal S614 laminate wraps were bonded and covered with shotcrete. In the last step, the OS-B surface protection system was applied as a finish coat.

#### 4 Reinforcement by laminate insertion into slots (NSM)

Laminates inserted into slots provide perfect strengthening because they provide a double-shear configuration in the flexural zone. They require a corresponding concrete cover in excess of 30 mm into which slots are cut. It is imperative to visually inspect the concrete cover beforehand in order to prevent destruction of the existing reinforcement. Examples of this method are the Schirnding bridge cantilever reinforcement and the parking deck at IKEA Munich.

#### 5 Reinforcement by fabric insertion

A 170 m long pedestrian bridge passes over twelve rail tracks of the main station in Riesa in the German State of Saxony. The  $\Delta$ -shaped columns were found to exhibit 0.1 to 0.6 mm wide cracks running in the longitudinal direction of the supports [23]. Too widely spaced stirrups, vibration and displacement were determined as possible causes. To ensure structural stability, the individual pairs of columns were repaired in 2000. Preparatory works not only involved surface treatment such as sand blasting but also breaking of sharp edges. An epoxy adhesive was applied to the clean surfaces, and they were enclosed by carbon fiber cloths wrapped around them horizontally (Sika Wrap 230 C). An interlocking effect was achieved as a result of the adhesive migrating through the fabric mesh. The adhesive had to be smoothed using a plastic trowel. Both sides of the fabric are completely embedded in the adhesive. A protective coating was applied in the final step.

#### 6 Reinforcement by CF grids (TRC)

CF grids are available as two- or three-dimensional structures in various geometries. In the course of repair activities, they are injected together with concrete or fixed manually using mortar. These materials provide



Figure: HPS

Fabric reinforcements are also suitable for natural stone and historic buildings, as shown in this example at the Neues Museum Berlin

Die Gewebeerstärkungen sind auch für Naturstein und historische Bauwerke geeignet, hier am Beispiel des Neuen Museums Berlin

Pfeiler in Achse IV vorgenommen. Durch Herstellfehler war das Rollenlager von der Platte gerutscht, ungeplante Horizontalkräfte entstanden und es kam zur Auslenkung des Pfeilers. Bei der Sanierung wurden die Brücke angehoben und die Lager in ihre ursprüngliche Position gesetzt. Die Schwächung an der Bewehrung des Pfeilers durch die Überdehnung wurde durch Aufkleben von CFK-Bändern ergänzt. Senkrechte Streifen und horizontale Bandagen der Lamellen vom Typ S614 wurden aufgeklebt und mit Spritzbeton überdeckt. Den Abschluss bildet eine Beschichtung mit dem Oberflächenschutzsystem OS-B.

#### 4 Verstärkung mit eingeschlitzten Lamellen (NSM)

Die optimale Verstärkung bieten eingeschlitzte Lamellen, da sie zweischnittig in der Biegezone wirken. Voraussetzung ist eine entsprechende Betondecke von > 30 mm, in welche Schlitz geschnitten werden. Eine vorherige örtliche Prüfung der Betondeckung ist unumgänglich, damit die vorhandene Bewehrung nicht zerstört wird. Beispiele dafür sind die Kragarmverstärkung der Brücke Schirnding oder das Parkdeck von IKEA München.



Figure: HPS

2,200 m of laminates were bonded in a period of less than four weeks in the Kaufhof department store building at Mönckebergstrasse, Hamburg

Im Kaufhof-Gebäude Hamburg-Mönckebergstraße wurden 2.200 m Lamellen in weniger als vier Wochen verklebt

The bending resistance of the 120 m long Fährbrücke at Lake Zurich had to be increased without altering the height of the superstructure

Bei der 120 m langen Fährbrücke am Zürichsee musste der Biege- widerstand erhöht werden, ohne die Auf- bauhöhe zu verändern



Figure: HPS

an alternative to externally applied fabrics bonded with an epoxy adhesive.

In precast construction, including façade components, it has become possible to produce very thin elements/panels because only a few millimeters of concrete cover are needed. After many years of research and development, Tudalit granted a national technical approval in September 2014.

### 7 Strengthening by subsequent prestressing: the LEOBA system (LC)

In 1997, the research conducted at EMPA Zurich with respect to prestressing with CFRP laminates [24] and the insufficient utilization of the outstanding material characteristics of CFRP strips inserted as non-prestressed reinforcement gave rise to a cooperation between the Leonhardt, André und Partner (LAP) engineering practice and Sika Construction. Laminates have a flat cross-section, which makes them easier to grasp across their entire width compared to parallel wire strands. They will not be squeezed on deviators. The specific task was to develop an anchoring system to absorb the high local stresses that act on the laminate end whilst providing the option of overhead application to make work on the job site easier [28].

LC II system (examples): A scheduled inspection of the Körschtalbrücke on the B27 federal road at Stuttgart-Möhringen revealed cracks along one of the two coupling joints. The structural reverification performed in accordance with the instructions issued by the BAST proved the necessity of applying additional reinforcement. In 2001, five CFRP tendons of the V914 type ( $90 \times 1.4$  mm) were installed above the coupling joint on each of the four webs. The vibration force of  $132 \text{ N/mm}^2$  could be reduced to  $56 \text{ N/mm}^2$  (i.e. 50% of the permissible value) by applying a total prestressing force of 825 kN per web [32].

In 2005, the same prestressing system was used to repair the coupling joint in the course of the comprehensive overhaul of the Neckartalbrücke on the A6 highway. Each of the fourteen coupling joints of the two-web "Homberg cross-section" cracked open and was bridged by nine CFRP tendons (V914) with a force of 150 kN per laminate (i.e. 1.35 MN per tensioning point). A total of 252 tensioned laminates reduced the vibration force from  $128 \text{ N/mm}^2$  to  $85 \text{ N/mm}^2$ , which lies within the permissible range [32].

Figure: HPS

The highway bridge near Montabaur was reinforced at the top and bottom of its frame decking and on the front sides of its enclosing walls

Die Autobahnbrücke bei Montabaur erhielt eine Verstärkung der Rahmendeckenober- und -unterseiten sowie der Vorderseiten der Rahmenwände



### 5 Verstärkung mit Gewebe

Eine 175 m lange Fußgängerbrücke führt über 12 Gleise des Bahnhofs Riesa/Sachsen. Bei den A-förmigen Stützen wurden Risse mit Weiten zwischen 0,1 und 0,6 mm in Längsrichtung der Stiele festgestellt [23]. Als Ursache wurden zu große Bügelabstände, Schwingungen und Verschiebungen genannt. Um die Standfestigkeit zu gewährleisten, wurde im Jahr 2000 eine Instandsetzung der Stützenpaare durchgeführt. Neben der Oberflächenvorbereitung wie Strahlen waren auch die scharfen Kanten zu brechen. Die gereinigten Oberflächen wurden mit Epoxidharzkleber gespachtelt und mit einer horizontalen Umwicklung aus Kohlefasertüchern (Sika Wrap 230 C) umschnürt. Da der Kleber durch die Maschen des Gewebes dringt, wird eine Verkrallung erreicht. Mit einer Kunststofftraufel ist der Kleber zu verschlichten. Das Gewebe wird von beiden Seiten satt eingebettet. Den Abschluss bildet ein Schutzanstrich.

### 6 Verstärkung mit CF-Grids (TRC)

CF-Grids werden in diversen Geometrien als 2D- oder 3D-Struktur angeboten. Sie werden als Verstärkung bei Instandsetzungen mit Beton eingespritzt oder von Hand eingemörtelt und stellen eine Alternative zu aufgeklebten Geweben mit EP-Klebstoff dar.

Im Fertigteilmbau (z. B. Fassadenelemente) können jetzt sehr dünne Elemente/Platten hergestellt werden, da sich die Betondeckung nur im Millimeterbereich bewegt. Nach langjähriger Forschung und Entwicklung gibt es seit September 2014 eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch die Tudalit.

### 7 Verstärkung durch nachträgliche Vorspannung: System LEOBA (LC)

Durch die Forschungsarbeiten der EMPA Zürich über das Vorspannen mit CFK-Lamellen [24] und die unbefriedigende Ausnutzung der hervorragenden Materialeigenschaften von CFK-Bändern beim schlaffen Verstärken ergab sich 1997 eine Kooperation des Ingenieurbüros Leonhardt, André und Partner (LAP) mit Sika Construction. Lamellen mit ihrem flachen Querschnitt sind im Gegensatz zu Paralleldrahtbündeln über die Breite leichter zu fassen; bei Umlenksätteln werden sie nicht gequetscht. Die Aufgabe bestand darin, ein Verankerungssystem zu entwickeln, das sowohl die hohen lokalen Spannungen am Lamellende aufnimmt als auch baustellentauglich über Kopf einzusetzen ist [28].

System LC II (Beispiele): Bei der B27-Körschtalbrücke, Stuttgart-Möhringen, waren anlässlich einer Brückenprüfung Risse im Verlauf einer der beiden Koppelfugen entdeckt worden. Bei der Nachrechnung auf die Handlungsanweisung der BAST wurde eine Verstärkung notwendig. Im Jahr 2001 wurden dann an den 4 Stegen je 5 CFK-Spannglieder V914 ( $90 \times 1.4$  mm) über der Koppelfuge eingebaut. Mit insgesamt 825 kN Vorspannkraft pro Steg konnte die Schwingweite von  $132 \text{ N/mm}^2$  auf  $56 \text{ N/mm}^2$  reduziert werden – somit auf 50% des zulässigen Wertes [32].

Im Jahr 2005 wurde bei der Generalsanierung der Neckartalbrücke der BAB A6 dieses Vorspannsystem wieder für die Koppelfugensanierung eingesetzt. Alle 14 Koppelfugen

## 8 Outlook

Bonded non-prestressed reinforcements will continue to be the main field of use of CFRP strips and CF fabrics. As prestressing systems evolve, however, the characteristics of CFRP laminates can be utilized fully. Their external prestressing will open up new options, including the repair and reinforcement of cracked structural components that can be reverted to their original, uncracked condition. "Active" reinforcing methods are available that reduce the loads acting on structural components whilst reaching their full structural capacity immediately, without any delay due to slip [35].

All tests (creep, fatigue and failure) were conducted in accordance with ETAG 013 (European Technical Approval Guideline), i.e. on the basis of the guidelines governing steel tendons. One of its most important requirements is "laminate failure before anchorage failure".

## REFERENCES/LITERATUR

- [1] Neubauer, U.: Braunschweiger Bauseminar 11. 1997
- [2] Rostásy, F., Holzenkämpfer, P. und Hankers, Ch.: Geklebte Bewehrung für Verstärkung von Betonbauteilen, Beton-Kalender 1996-II
- [3] Rostásy, F., Neubauer, U. und Hankers, Ch.: Verstärken von Betontragwerken mit geklebter Bewehrung aus CFK, BuStbB 92, 1997
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.12-29 Sika-CarboDur, 11.11.1997
- [5] Hammer, R.: Composites in the Boeing, 767ff, 1980
- [6] Meier, U.: Bauakademie Biberach, 7. Massivbauseminar 3.1998
- [7] Meier, H., und Czaderski, C.: CFK-Schubverstärkungselemente, SI + A, 43/1998
- [8] Meier, H.: Beschleunigte Verklebung von Lamellen mittels Heizgerät. 5. Internationales Kolloquium MSR Esslingen 12.1999
- [9] Andrä, H. P., und Maier, M.: Fassadensicherung von Natursteinfassaden mit Hilfe von Sika CarboDur Lamellen, Berlin 6.2001
- [10] SIVV Lehrgangs-Handbuch, 4. Auflage, Deutscher Beton-Verein, Wiesbaden
- [11] Meier, U.: EMPA/SIA-Studientagung Zürich, 9.1995
- [12] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.1-30, mit Stahlplatten ... mit dem System Sikadur 30, 4.1995
- [13] Untersuchungsbericht 1448/325 MPA Braunschweig 4.1995
- [14] Neubauer, U.: Verstärken von Betonbauteilen mit geklebten CFK-Lamellen - Berechnungsbeispiele, iBMB, TU Braunschweig 10.1998 Vorbemessungsprogramm Sika CFK-Lamellen
- [15] iBMB, TU Braunschweig: Brandschutztechnische Beurteilung der Bekleidung von Klebarmierungen an Stahlbetonbauteilen mit Promactect-Platten, 11.1997
- [16] Schenck, G., und König, G.: Belastbarkeit von CFK-Lamellen bei PKW-Überfahrten im Parkhaus. Gutachterliche Stellungnahme, Universität Leipzig, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie; 7.2001
- [17] Untersuchungsbericht 8516/8516 iBMB Braunschweig 5.1996



Figure: HPS

des zweistegigen „Homberg-Querschnitts“ waren aufgerissen und wurden jeweils mit 9 CFK-Spannlamellen (V914) mit 150 kN/Lamelle überspannt (= 1,35 MN/ Spannstelle). Die zugehörige Schwingweite wurde durch diese insgesamt 252 Spannlamellen von 128 N/mm<sup>2</sup> auf den zulässigen Bereich von 85 N/mm<sup>2</sup> verschoben [32].

## 8 Ausblick

Schlaff geklebte Verstärkungen werden auch in Zukunft die Hauptanwendung für CFK-Bänder und CF-Gewebe bleiben. Mit der Weiterentwicklung der Vorspannsysteme können die CFK-Lamellen allerdings optimal ausgenutzt werden. Durch ihre externe Vorspannung eröffnen sich neue Möglichkeiten, beispielsweise die Sanierung und Verstärkung von gerissenen Bauteilen, die in den Zustand I rückgeführt werden können. Es stehen „aktive“ Verstärkungsverfahren zur Verfügung, die die Bauteilbeanspruchung reduzieren und ohne Schlupfverzögerung ihre Tragwirkungen entfalten [35].

Alle Versuche (Dauerstand-, Dauerschwing- und Bruchversuche) wurden nach der ETAG 013 (European Technical Approval Guideline) durchgeführt; also angelehnt an die Richtlinie für Stahlspannglieder. Eine der wichtigsten Forderungen lautet: Lamellenbruch vor Verankerungsbruch.

Each of the webs of the Körchtalbrücke on the B27 Federal Road in Stuttgart-Möhringen was equipped with five CFRP tendons installed above the coupling joint

Bei der B27-Körchtalbrücke, Stuttgart-Möhringen, wurden an den Stegen je 5 CFK-Spannglieder über der Koppelfuge eingebaut



## Dipl.-Ing. Dr. rer. pol. Horst Peters

Studied construction engineering and business administration; 1981-1986 DOW Chemical, Sales and Technical Specialist Extruded PS Foams; 1987-1989 General Electric Plastic (GEP), Marketing and Sales Extruded Polycarbonate (PC); 1989-1990 Cape Boards, Düsseldorf, Construction Products Sales Manager; 1991-1994 Sika Chemie, Construction Products Marketing Manager; 1995-1997 Sika Chemie, Product Marketing Manager (PMM) and Construction Products Sales Manager; 1997-2009 Sika Deutschland GmbH, Senior Key Account Manager; 2010-2011 Sika Deutschland GmbH, Senior Key Account Manager for new flooring systems in multi-story and administrative buildings; 2011-2013 SGL Carbon Technologies GmbH, Meitingen/Wiesbaden, Global Manager Technical Sales; since April 2013 HPS - Horst Peters Solutions, establishment of a consultancy for CF/CFRP structural reinforcements; since September 2014 HP-TL strengthening solutions by Carbon, establishment of a cooperation between HPS - Entecsol (Wittstock, Germany) - IGS (Indo German Steel Hub LLP, Karnataka, India)