

**Beheizbare GFK-Schornsteinröhre Ø 4800 mm
zur Lösung der Aerosol-Emissionsproblematik
im Kraftwerk Simmering**

Dipl.-Ing. Reinhard Lux
FIBERDUR-VANCK GmbH, Werk Staffelstein

September 2001

Erfahrungen mit GFK
im Rohrleitungs- und Anlagenbau
3. Tagung 01./02. Oktober 2001 in München

1. Einleitung

Die Fiberdur-Vanck GmbH beschäftigt sich seit über 40 Jahren mit der Herstellung von Bauteilen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. Eine Vielzahl von innovativen Weiterentwicklungen gehen auf Fiberdur-Vanck zurück. Hierzu zählen auch die durchgeführten Schornsteinauskleidungen im Kraftwerk Ingolstadt und Simmering [2]. In beiden Fällen wurde technologisch neues Terrain betreten. Diese Innovationen tragen zur Weiterentwicklung der Produkte bei, mit denen Fiberdur-Vanck seit Jahrzehnten am Markt erfolgreich tätig ist. Zu diesen Produkten zählen im wesentlichen Behälter zur Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten, sowie auch GFK-Druckrohre.

Die im Jahr 2000 erfolgreich durchgeführte Sanierung eines Schornsteins im Kraftwerk Simmering wird im nachfolgenden beschrieben.

2. Beschreibung der Aufgabenstellung

Die Wienstrom AG betreibt seit Ende 1992 an ihrem Standort Simmering einen Kombinationskraftwerksblock, der sowohl mit Gas als auch mit schwerem Heizöl (2 % S) befeuert werden kann. Im Gasbetrieb kann im Gegensatz zum Ölbetrieb das Abgas, ohne die Staubabscheidung und die nasse Wäsche zu durchlaufen, über einen Bypass direkt in den Schornstein abgeführt werden. Angefahren wird der Kraftwerksblock mit Gas. In der Vergangenheit, vor der Sanierung, ist unregelmäßig beobachtet worden, dass mit dem Abgas auch Partikel und Tröpfchen aus dem Schornstein emittiert wurden, die in der nahen Umgebung herunterfielen und Schäden aufgrund der sauren Eigenschaften verursachten. Vor allem nach längeren Stillständen (z. B. Revisionen) kam es bei der Inbetriebnahme des Kessels zum sauren Auswurf.

Zur Untersuchung, welche geeigneten Maßnahmen zur Behebung dieses Problems bestehen, wurde eine Studie in Auftrag gegeben. Das Ergebnis dieser Studie war: Eine Ausschreibung mit dem Ziel, den bestehenden Schornstein, der mit einem keramischen Futtermauerwerk aus-

gestattet ist, mit einem zusätzlichen GFK-Rohr zu versehen. Dieses Rohr sollte beheizbar sein, um im Anfahrbetrieb den Schornstein auf eine Temperatur aufzuheizen, die eine Kondensation des Rauchgases an der Schornsteininnenwand sicher verhindert.

Anfang 2000 erhielt die Firma Karrena in Ratingen gemeinsam mit der Firma Fiberdur-Vanck den Auftrag zur Planung, Herstellung und Montage einer beheizbaren GFK-Schornsteinröhre. Die Funktionstüchtigkeit des GFK-Rohrs war unter Berücksichtigung folgender Betriebsdaten zu gewährleisten:

- Betriebstemperatur/REA: 90° C
- Gastemperatur/Bypass: 180° C
- Störfalltemperatur: 200° C < 3 h
- Auslegungsdruck: + 4,5 / - 8,5 mbar
- Aufheizung der Schornsteinröhre auf 60 °C Innenwandtemperatur innerhalb von 1 h Aufheizzeit.

3. Materialauswahl und Vorversuche

Fiberdur-Vanck liegen TÜV-geprüfte mechanische Materialkennwerte der einzusetzenden Laminattypen vor. Diese Materialkennwerte sind temperaturabhängig und in den meisten Fällen bis zu einer Temperatur von 100 °C sicher bekannt.

Aufgrund der geforderten hohen Einsatztemperatur von 180 °C kommen nur hochwertige Vinylesterharze in die nähere Auswahl. Zum damaligen Zeitpunkt war das einzig verfügbare Harz, welches einen genügend hohen Hintergrund an Erfahrung bei dieser Temperatur hatte, der Harztyp Derakane XZ92435 der Firma DOW, Rheinmünster.

Entsprechende Materialuntersuchungen zu diesem Harz konnten dem Anbieter Fiberdur-Vanck bereits bei Angebotserstellung vom Lieferanten zur Verfügung gestellt werden. Um diese Materialkennwerte abzusichern, wurde

die Fachhochschule Aachen, Prof. Dr. Ing. Nonhoff, mit der Erstellung eines Werkstoffgutachtens unter Berücksichtigung der Einsatztemperaturen in Auftrag gegeben.

Nachfolgende Kennwerte in Tabelle 1 wurden hierbei ermittelt und der statischen Berechnung der GFK-Schornsteinröhre zugrunde gelegt [3].

Wickellaminat		T = 20 °C	T = 180/200 °C
E_{uz}	≥	21000 N/mm ²	≥ 9500 N/mm ²
E_{ub}	≥	20500 N/mm ²	≥ 9300 N/mm ²
E_{lz}	≥	12500 N/mm ²	≥ 8500 N/mm ²
E_{lb}	≥	12000 N/mm ²	≥ 8300 N/mm ²
σ_{uz}	≥	400 N/mm ²	≥ 200 N/mm ²
σ_{ub}	≥	470 N/mm ²	≥ 200 N/mm ²
σ_{lz}	≥	125 N/mm ²	≥ 40 N/mm ²
σ_{lb}	≥	145 N/mm ²	≥ 40 N/mm ²

Tabelle 1: Kennwerte in Abhängigkeit von der Einsatztemperatur

Das Verhalten der Materialkennwerte unter Einfluss der Temperatur, welches der Harzlieferant zur Verfügung gestellt hat, zeigen Tabelle 2 und Diagramm 1.

Zugfestigkeit, MPa ⁽¹⁾	70
Zug Modul, GPa	3,5
Zug Dehnung, %	3,0
Biegefestigkeit, MPa ⁽²⁾	125
Biege E-Modul, GPa	3,5
Glasumwandlungstemp., °C	190 ⁽³⁾ / 220 ⁽⁴⁾

(1) Prüfmethode ASTM D-638, (2) Prüfmethode ASTM D-790
 (3)(4)n. DMTA-Analyse (3)Tempern 24 h 200°C (4)Anw. 230 °C

Tabelle 2: Harzeigenschaften DERAKANE XZ 92435.00 Epoxy Vinylesterharz

Neben diesen Untersuchungen wurden von Fiberdur-Vanck im eigenen Labor Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die Haftfestigkeitswerte der Überlaminatverbindungen zu überprüfen.

Biegefestigkeit und Modul von Wirrfasermatten verstärkten Laminat

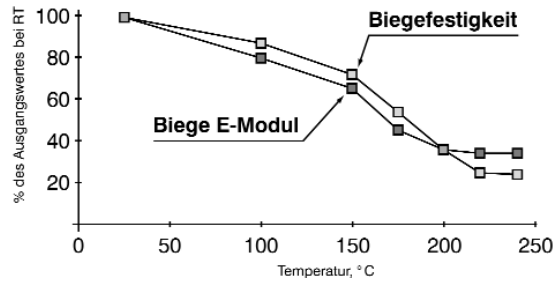


Diagramm 1: Kennwerte in Abhängigkeit der Temperatur

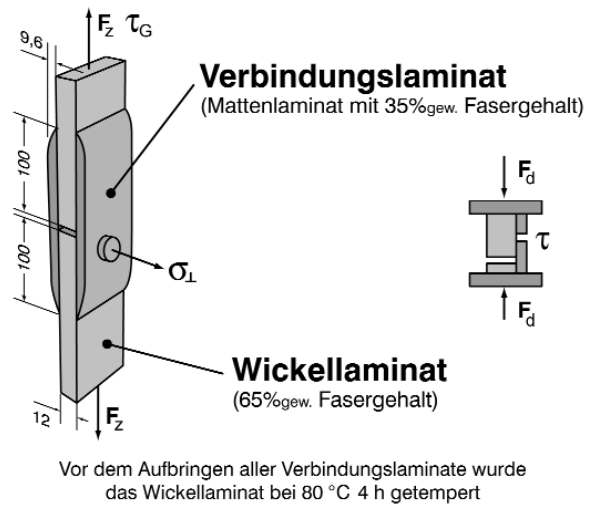


Abb. 1: Test der Überlaminatverbindung

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau der Überlaminatverbindung in einer Versuchsanordnung. Zur Ermittlung der übertragbaren Kräfte der dargestellten Probe wurde diese in eine Zug-Prüfmaschine eingesetzt und geprüft. Bei allen geprüften Überlaminatverbindungen der dargestellten Dicken kam es zum Schubversagen zwischen Überlaminatverbindung und Wickellaminat. Aus der Bruchlast und der wirksamen Fläche des Überlaminats ergibt sich das Schubversagen der Verbindung zu τ_G . Darüber hinaus wurden aus der Probe Elemente entnommen um im Schub-Druck-Versuch ohne Biegemoment-

einfluss das reine Schubversagen zu ermitteln. Zusätzlich hierzu wurde das Überlaminat bis zum Wickellaminat über Kernlochbohrung aufgebohrt und die Stirnabzugsfestigkeit σ_{\perp} ermittelt.

Schubfestigkeit τ	11	N/mm ²
Schubfestigkeit τ_G	5	N/mm ²
Stirnabzugsfestigkeit σ_{\perp}	2 - 3	N/mm ²
Barolhärte Verbindungslaminat	40 - 50	SKT

Tabelle 3: Testergebnisse Überlaminatverbindungen

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse dieser Prüfungen. Es ist zu erkennen, dass die ermittelte Schubfestigkeit τ_G um ca. die Hälfte kleiner ist, als der Schubfestigkeitswert τ , der im Schub-Druck-Versuch ermittelt wurde. Der Grund hierfür sind zusätzliche, die Probe beanspruchende, Biegemomente.

Diese Tests wurden an "frischen Laminatproben" durchgeführt. Zur Absicherung der Werte wurden die Versuche für Proben wiederholt, die eine Lagerzeit (Zeit zwischen Herstellung und Montage) von 4 Monaten hatten. Hierbei zeigte sich, dass die Schubfestigkeitswerte um ca. 15 % abfielen.

Zur Festlegung der erforderlichen Heizleistung zum Aufheizen der GFK-Schornsteinröhre innerhalb von 60 Minuten auf 60 °C Wandinnentemperatur waren ebenfalls Vorversuche erforderlich. Eine Konzeptvorprüfung ergab, dass die Beheizung der GFK-Schornsteinröhre am sinnvollsten über eine elektrische Mantelheizung zu realisieren ist. Dies ist bereits seit Jahrzehnten übliche Praxis im GFK-Behälterbau. Zur Bestimmung der erforderlichen Heizleistung wurde eine Probeplatte aus GFK mit 15 mm Wanddicke rückseitig mit einem Heizkabel versehen und zusätzlich mit 60 mm Dicke isoliert. Bei 5 °C Umgebungstemperatur wurde die Platte aufgeheizt. Auf der Innenseite und zwischen Isolierung und GFK-Platte wurde an ver-

schiedenen Punkten der Temperaturverlauf über der Aufheizzeit ermittelt. Abbildung 2 zeigt, dass in diesem Versuch die 60 °C Wandinnentemperatur in ca. 70 Minuten erreicht wurde.

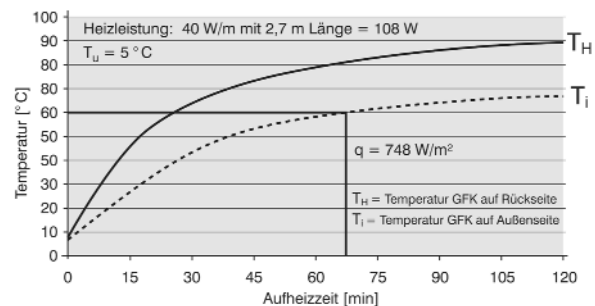


Abb. 2: Aufheizkurve einer GFK-Probeplatte

4. Konzeptauswahl und Festlegung

Von der Ausschreibung her, war bereits vorgegeben, auf welchen Ebenen des Schornsteins die GFK-Röhre abgelagert werden kann. Die hierzu erforderlichen statischen Berechnungen der Stahlbetonkonstruktion des Schornsteins lagen vor. Vom Lieferanten war jetzt festzulegen, ob die GFK-Röhre auf diesen Ebenen abgehängt oder geständert wird. Die hängende Variante ist in der Regel aufgrund der Stabilitätsbelastung einer stehenden Variante vorzuziehen. Diese Variante wurde auch zunächst angedacht, aber später nach Überprüfung der in Betrieb vorherrschenden Axialzuglasten, in Verbindung mit der hohen Temperatur an den Überlaminatverbindungen, wieder geändert. Es wurde entschieden, die Röhre in 3 Bereichen mit einer Einzelschusshöhe von ca. 55 m aufzuständern (Abb. 5).

4.1 Konstruktion

Auf Basis der festgelegten Konstruktion, wurde die statische Bemessung durchgeführt. Die wärmetechnischen Randbedingungen erlauben keine allzu großen Wanddicken, um die Einbringung der Wärme über die Rückseite zu gewährleisten. Allein schon wegen dieser Forderung, ist es sinnvoll, die GFK-Röhre rippenversteift auszuführen.

4.2 Wärmetechnische Auslegung

Zur wärmetechnischen Auslegung wurden folgende Materialkennwerte von GFK zugrunde gelegt:

$$\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$$

$$c_p = 1,11 + 4,10 \times 10^{-3} (T_{\text{GFK}} - 50) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Wie aus dem Wert der Wärmeleitfähigkeit zu ersehen ist, handelt es sich bei GFK um einen schlechten Wärmeleiter. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Wärme direkt in die GFK-Wandung einzuleiten. Als Alternative wurde untersucht, in wie weit eine rückseitige Beheizung der GFK-Röhre mit Warmluft möglich ist. Das Ergebnis einer wärmetechnischen Berechnung hat gezeigt, dass bedingt durch den engen Spalt zwischen GFK-Röhre und vorhandenem Futtermauerwerk nur durch eine sehr hohe Warmlufttemperatur die geforderten 60 °C Innenwandtemperatur erreichbar sind. Zusätzlich kann nicht sichergestellt werden, dass eine ausreichend gleichmäßige Verteilung der einzubringenden Warmluft durchführbar ist. Die statisch erforderlichen Rippenverstärkungen der GFK-Röhre stehen einer Warmluftaufheizung ebenfalls entgegen.

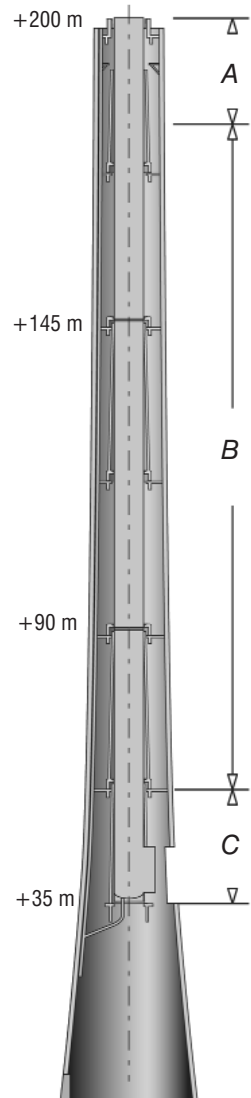


Abb. 5: Schornsteinröhre, Schnitt
 A = 18 m: doppelte Heizleistung,
 B = 124 m: einfache Heizleistung,
 C = 21 m: keine Heizung



Abb. 3: Stahl-Auflagerung

An zwei Ebenen der Schornsteinröhre waren Kompensatoren-Verbindungen vorzusehen. An diesen Stellen erfolgte die Auflagerung der darüber liegenden GFK-Röhre auf einer Stahlringkonstruktion (Abb. 3).

Darunter folgte die Anordnung des Kompensators. An der Kompensatorenstelle ist das GFK-Rohr als Schiebemuffe ausgeführt. Dadurch wird der Kompensator nur geringfügig von der Innenseite mit Medium beaufschlagt. Bei der Konstruktion der Muffen-/Kompensatorenverbindungsstelle (Abb. 4) waren der Schrumpf durch nachträgliche Aushärtungsvorgänge und die Wärmedehnung im Betrieb zu berücksichtigen.

Abb. 4: Kompensatorenstelle
 1) Auflagerung 2) Rippe 3) Kompensator

Aus Gründen der Betriebssicherheit wurden die Heizungen mehrfach redundant ausgeführt, da diese im späteren Betrieb nicht mehr erreicht werden können.

Am Schornsteinmündungsbereich wurde zur Sicherheit die doppelte Heizleistung als im übrigen Schornstein installiert. Zur Minimierung der thermischen Verluste wurde die Rückseite der GFK-Schornsteinröhre mit einer 60 mm dicken Isolierung versehen. Abb. 5 zeigt die Aufteilung der Schornsteinbereiche und Abb. 6 die Zuführung der Heizkabel zur GFK-Röhre.

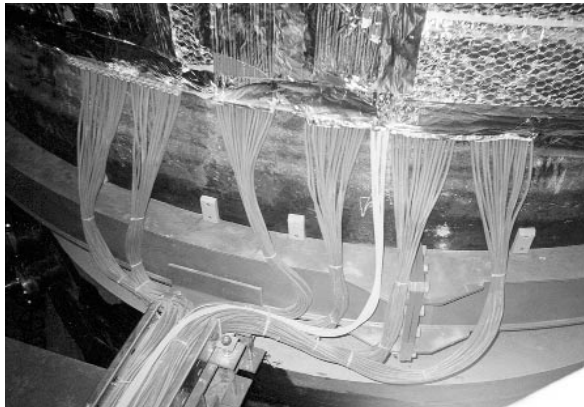


Abb. 6: Zuführung der Heizkabel

5. Fertigung der GFK-Röhre

Zur Herstellung der GFK-Schornsteinröhre wurden 40 Einzelrohrschüsse im Vertikalwickelverfahren vorgefertigt. Aufgrund der guten Erfahrung wurde das Wickellaminat nass in nass mit der Schutzschicht gefertigt. Hierdurch ist eine Blasenbildung durch Wasserdampfdiffusion nahezu ausgeschlossen. Auf die Beschreibung der Vertikalwickeltechnik wird nicht näher eingegangen. Über diese wird in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1998 ausführlich berichtet [1].

Die Vertikalwickelanlage wurde in einem vorhandenen Maschinenhaus im Kraftwerk Simmering aufgestellt. Nach dem Herstellen der Schale erfolgte das Wickeln der

Rippen im Kreuzwickelverfahren. Nach dem Entformen der vorgefertigten Rohrschüsse, wurde diese ebenfalls im o. g. Maschinenhaus zwischengelagert.

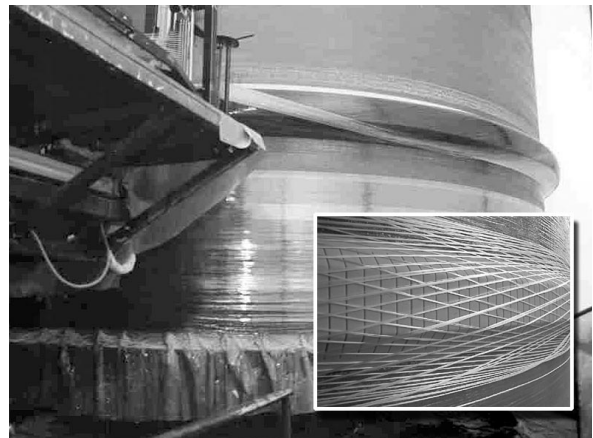


Abb. 7: Computergesteuerte Herstellung der Versteifungsrippen

6. Montage der GFK-Röhre

Die Montage einer hier beschriebenen GFK-Schornsteinröhre lässt sich für einen GFK-Hersteller nur in Zusammenarbeit mit einem erfahrenen Schornsteinbauer durchführen. Für alle beteiligten Firmen stellt diese Aufgabe hohe Anforderungen an die Logistik und die Terminplanung. Zusätzlich sind die Erfordernisse der Arbeitssicherheit zu beachten und die hohen Qualitätsanforderungen einzuhalten.

6.1 Montagevorbereitung

Die GFK-Schornsteinröhre wurde, wie bereits beschrieben, auf 3 Ebenen der Stahlbetonkonstruktion aufgelagert. In diesen Bereichen musste teilweise das Futtermauerwerk komplett entfernt werden. Hiernach erfolgte das Aufsetzen der hydraulischen Hebeanlage am Kopf des Schornsteins. Zur Ausführung der Laminierarbeiten wurde eine fahrbare Innenbühne eingebaut, die über Fahrkorb zu erreichen war. Vor Montagebeginn musste zunächst eine Montageöffnung auf +35 m Höhe geschaffen werden.

Hierzu war es erforderlich, eine Öffnung im Durchmesser von 5000 mm in eine ca. 1,5 m dicke Stahlbetondecke einzubringen.

Zur Schaffung der erforderlichen Arbeitsebenen und zur Aufbringung der elektrischen Mantelheizung sowie der Außenlamine wurden Rundgerüste aufgebaut.

6.2 Montageprinzip und Durchführung der Montage

Die Montage begann mit dem obersten Rohrschuss. An diesen wurde eine Hebevorrichtung aus Stahl montiert, die an 4 Punkten mit Aufnahmen zur Befestigung der Hebestangen versehen wurde (siehe Abb. 8).



Abb.8: Hebevorrichtung aus Stahl am obersten GFK-Schuss



Die Einbringung der einzelnen GFK-Rohrschüsse erfolgte über ein Tor im Schornsteinfuß. Die erforderliche Transportvorrichtung wurde gleichzeitig als Hebevorrichtung genutzt (Abb. 9 und 10).

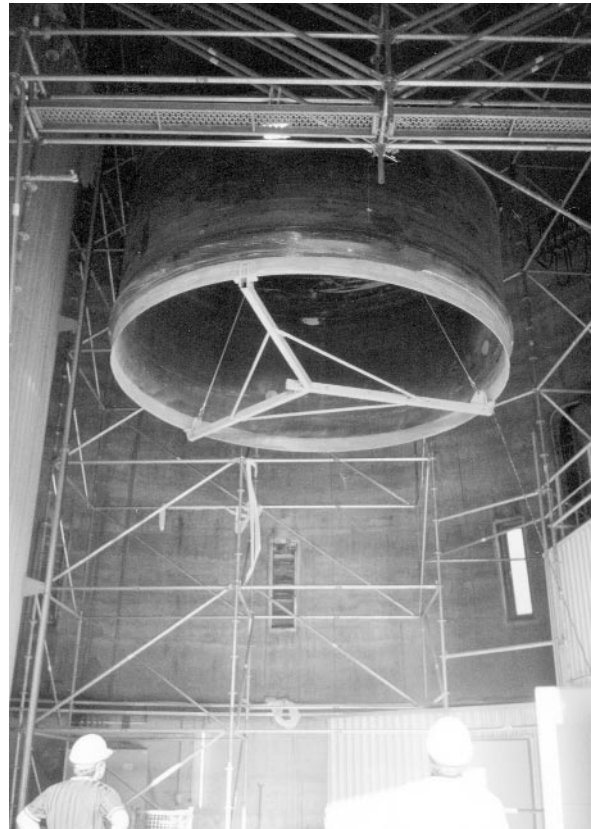


Abb.10: Rohrschuss von unten mit Hebevorrichtung

Jeder Rohrschuss wurde in diesem Verfahren bis an die bereits montierten herangezogen und fixiert. Nach der Ausrichtung und Feinjustierung wurden das äußere und innere Überlaminat aufgebracht (siehe Abb. 11).

Abb.11: Aufbringen des äußeren Überlaminats



◀ Abb.9: Einbringen eines Rohrschusses am Schornsteinfuß

Nach Aufbringen der elektrischen Mantelheizung wurde die vormontierte Einheit mit der Hebevorrichtung am Schornsteinkopf taktweise eingezogen. Danach wurden, vom Schornsteinfuß aus, weitere Rohrschüsse an die vorgefertigte Röhre herangezogen und im oben beschriebenen Verfahren angebunden.

In diesem Verfahren wurde die komplette GFK-Röhre bis zur Mündung in den Schornstein hineingezogen. Das komplette GFK-Rohr hatte im Endzustand eine Gesamtlänge von 163 m bei einem Gesamtgewicht von 102 t.

Da die Überlaminatverbindungen im Montagezustand auf Zug beansprucht sind, wurde jedes innere Überlaminat einer Qualitätsprüfung unterzogen. Hierbei wurde über die Kernlochbohrung in das Überlaminat die Haftung überprüft und dokumentiert. Es wurden bei allen Prüfungen eine sehr gute Haftung festgestellt. Somit war eine sichere Montage zu jedem Zeitpunkt gewährleistet. Die Abbildung 12 zeigt die Überprüfung der Haftfestigkeit eines inneren Verbindungslaminates, hier zwischen dem Rohrschuss 4 und 5.

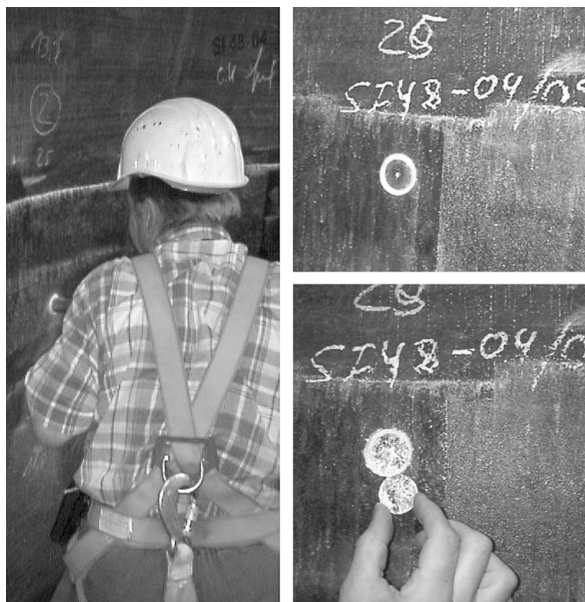


Abb. 12: Überprüfung der Haftfestigkeit

Nachdem alle Rohrschüsse montiert und die GFK-Röhre bis zur Mündung gezogen war, wurde mit dem Absetzen der Röhre auf die 3 vorgesehenen Ebenen begonnen. Zunächst wurde die Röhre auf die unterste Stahlkonstruktion abgesetzt. Hierbei war zu beachten, dass nicht das komplette Gewicht über die Konstruktion abgeleitet werden durfte. Mit Hilfe von DMS-Messungen wurde sichergestellt, dass nur die vorgesehene drittel Last des Gesamtkamins abgesetzt wurde. Hiernach wurde das untere Drittel der GFK-Röhre abgetrennt. Entsprechend verfahren wurde beim zweiten Drittel. An den Trennstellen wurden von außen Kompensatoren zur Aufnahme der Axial- und Radialdehnungen montiert. Oberhalb dieser Stelle erfolgte die Auflagerung des darüber liegenden nächsten Drittels der GFK-Schornsteinröhre über einen Stahlringträger (Abb. 4).

Nach dem Absetzen der Lasten auf den vorgesehenen Ebenen erfolgte die Demontage der Hebevorrichtungen am Schornsteinkopf und der Gerüste im Schornsteinfuß.

Der Anschluss an den Stahlringgaskanal wurde in GFK als rechteckigen Flanschanschluss ausgeführt. Wegen der großen Abmaße von 9000 x 3000 mm und der hier im Betrieb herrschenden Unterdruckkräfte wurden zusätzliche GFK-Verstärkungsrohre eingebaut.

Für die Gesamtmontage wurden nur 4 Wochen benötigt.



Abb. 13: GFK-Schornstein von unten

6. Inbetriebnahme

Vor Inbetriebnahme der GFK-Schornsteinröhre wurde eine Temperung mit der installierten elektrischen Mantelheizung vorgenommen. Abb. 13 zeigt den fertiggestellten GFK-Schornstein von unten.

In der Anfahrphase war festzustellen, ob die theoretisch ermittelten Dehnungen und Schrumpfungen in der Praxis eingehalten bzw. nicht überschritten werden. Bei unter-



Abb. 14: Kompensatorstelle während der Erwärmung

schiedlichen Betriebstemperaturen wurden die Dehnwege an den Kompensatorstellen gemessen. Es wurde hierbei eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorher theoretisch ermittelten Dehnwegen festgestellt. Die Abb. 14 zeigt eine Kompensatorstelle bei unterschiedlichen Temperaturen.

Die Funktionsfähigkeit der Heizung wurde bei der Inbetriebnahme / Abnahme geprüft. Hierbei wurde festgestellt, dass bei 20 °C Umgebungstemperatur bereits nach einer 30-minütigen Aufheizzeit die erforderliche Wandinnentemperatur von 60 °C erreicht wird. Eine Übertragung der Ergebnisse auf eine Umgebungstemperatur von 5 °C zeigt, dass hierbei die Aufheizzeit von 60 Minuten eingehalten werden kann.

Der Schornstein wurde nach den Umbauarbeiten an den Kraftwerksbetreiber übergeben und arbeitet seitdem ohne Probleme.

Literaturverzeichnis

- [1] Lux R.:
GFK-Großbehälter: eine neue Herausforderung für GFK-Hersteller
Erfahrungen mit GFK im Anlagenbau
2. Tagung 22./23. September 1998 in München
- [2] Nonhoff G., Lux R.:
Praxiserprobte GFK-Korrosionsschutzsystem für Rauchgasreinigungsanlagen
VGB Konferenz 1994, Essen
- [3] Interner Prüfbericht Fachhochschule Aachen, Prof. Dr. Ing. Nonhoff "Technologische Untersuchungen und Beurteilung von Wickellaminaten für den Einsatz bei 180/200 °C für das Bauvorhaben Liner im Schornstein der Wienstrom";
8. Juni 2000.