

Stahl-frei-Halle mit reiner Klebe- konstruktion zur Erprobung elektronischer Geräte der Bundeswehr

Steel-free adhesively bonded construction for testing
of electronic equipment by the German Army

Sans métal Hall avec une construction en assemblage
collé pour tester des appareils électroniques de l'armée
allemande

Jens Jamnitzky
Rubner Holzbau Deutschland
Augsburg, Deutschland



Stahl-frei-Halle mit reiner Klebe- konstruktion zur Erprobung elektronischer Geräte der Bundeswehr

1. Ausgangssituation

Für die Erprobung elektronischer Geräte wurde für die Bundeswehr von den Architekten der ARGE Putzhammer-Meier in Freilassing zusammen mit H13 Ingenieure, München, eine Halle mit ca. 75 m Länge und ca. 25 m Breite geplant. Die Firsthöhe befindet sich auf ca. 9 m. Nordseitig wurde der Halle ein Anbau mit Mess-, Betriebs- und Technikräumen angefügt.



1.1. Anforderungen aus der Nutzung

Die Baubeschreibung nennt als entscheidende Anforderung aus der Nutzung an, dass ausschließlich metallfreie Baustoffe und Bauteile verwendet werden dürfen, die nicht elektrisch leitfähig und darüber hinaus nicht magnetisierbar sind. Hierzu wird angeführt:

«(...)

- «Die gesamte Konstruktion des Gebäudes ist aus Baustoffen oder Bauteilen herzustellen, die
 - metallfrei,
 - nicht magnetisierbar oder
 - elektrisch leitend sind.
- Baustoffe und Bauteile, die für sich oben genannte Eigenschaften haben, und auch Baustoffe und Bauteile, die in ihrem Zusammenwirken oben genannte Eigenschaften bewirken, dürfen nicht im Bauwerk verbleiben.
- Beispielsweise ist zu beachten
 - die ggf. für eine Schraubpressleimung erforderlichen Schrauben müssen wieder vollständig entfernt werden,
 - sämtliche Bestandteile von Baubehelfen mit oben genannten Eigenschaften müssen vollständig entfernt werden
 - etc.

- Oben genannte Vorgaben gelten für das gesamte Bauwerk und somit auch für die Fundamente (z.B. der Lagesicherung und Lagerung der Holzstützen in den Köcherfundamenten) und den sich im Baufeld befindlichen Baugrund. (...)»

[Baubeschreibung Holzbau (Tragwerk), L-IED – Halle WTD 52 Oberjettenberg; Staatliches Bauamt Traunstein]

Als weitere Anforderungen werden ein einzuhaltendes Lichtraumprofil angeführt sowie Angaben zu einigen Nutzungsparametern gemacht. Für das Holztragwerk von Interesse waren dabei die Angaben zu Temperaturen und der Feuchtebelastung. Demnach sei in der Halle ganzjährig eine Mindestlufttemperatur von 5°C einzuhalten. Höhere Temperaturen waren für die Heizperiode nicht angestrebt. Ferner würden Teile des Hallenbodens künstlich beregnet. Von einem entsprechenden Feuchteanfall war demnach auszugehen.

1.2. Beschreibung der Halle und des Tragwerks

Die Gründungsbauteile wurden in Beton mit einer Bewehrung aus glasfaserverstärkten Kunststoffstäben ausgeführt. Sämtliche tragenden Bauteile wurden als Fertigteile geplant und ausgeführt.

Die oberirdischen Bauteile wurden mit Holz und Holzwerkstoffen umgesetzt. Brettschicht-holzstützen mit Querschnitt 48 x 54 cm² wurden in den Köcherfundamenten eingespannt und vergossen. Auf den Stützen ruhen Satteldachträger aus Brettschichtholz, die über die gesamte Hallenbreite spannen und über an die Stützen angeklebte Gabeln in Ihrer Lage gesichert werden.

Die Satteldachträger, die im Regelfall alle 4,0 m angeordnet sind (in den Vordachbereichen alle 2,0 m), sind im First etwa 2,3 m hoch und 28 cm breit. Diese Binder waren in GL28h herzustellen und erhielten beidseitig eine Verstärkung durch aufgeklebtes Furnierschichtholz. Die Hauptrichtung des Furnierschichtholzes wurde senkrecht zur Binderachse ausgerichtet, die Stöße wurden mit einer nicht verklebten Überlappung ausgeführt.

Auf den Satteldachträgern liegen Dachelemente auf, die als geklebte und 2,5 m breite Tafeln konzipiert wurden. Ober- und unterseitige Furnierschichtholzplatten mit 24 cm hohen Tragriegeln ebenfalls aus Furnierschichtholz formen ca. 16 m lange und voll ausgedämmte Elemente, denen oberseitig unmittelbar die Dachabdichtung folgt. Zwischen den Elementen wurde kein Schubverbund ausgebildet. Wind und Stabilitätslasten werden aus dem Zusammenwirken der Satteldachbinder und den Dachelementen über die eingespannten Stützen in den Baugrund abgetragen. Die Kraftübertragung zwischen Binder und Dachelement erfolgt durch seitlich an die Binder bzw. unterseitig an die Elemente angeklebte sogenannte Druckriegel. Eine entsprechende Anordnung von losen und nicht verschieblichen Auflagerpunkten an den Fugen zwischen den Elementen sorgt für Kraftübertragung einerseits und die Vermeidung von Zwängungen aufgrund Feuchteänderungen andererseits. Angeklebte Klötzchen und Holznägel stellen die Lastübertragung und Halterung in Hallenquerrichtung sicher.

Die Längswände sind nach außen geneigt und werden über angeklebte Traghölzer in entsprechend geneigte Nebenstützen eingehängt. Die Nebenstützen sind wiederum mittels angeklebten Konsolen und über eingeklebte Zwischenstücke an die Hauptstützen angebunden. Ihr Aufbau ist mit den Dachelementen identisch: beidseitige Furnierschichtholzplatten werden mit Rippen und Riegeln aus Furnierschichtholz verklebt und ausgedämmt. Auch hier folgt unmittelbar die äußere Außenabdichtung, die mit der Dachabdichtung identisch gewählt wurde.

Die Giebelwände weisen einen ähnlichen Aufbau auf. Der Unterschied liegt lediglich in der Ausführung der äußeren Bekleidung, die als vorgehängte hinterlüftete Fassade geplant wurde. Die Fassadenelemente sind, senkrecht verlaufend und auf Konsolen gesetzt, den ebenfalls in Köcherfundamenten eingespannten Giebelstützen vorgelagert.

Ergänzt wird das Hallentragwerk durch die Tragkonstruktion für die der Nutzung geschuldeten, umfangreiche technische Gebäudeausrüstung, die an dieser Stelle nicht weiterverfolgt werden soll.

Als Verbindungsmittel wurden ausschließlich Holznägel, Klebstoff und Kunstharzpressholz sowie Kraftübertragung durch Formschluss gewählt.

Das Gebäude wurde in Nutzungsklasse 2 eingestuft.

2. Werkstatt- und Montageplanung

2.1. Qualitätsplanung

Die durch die ARGE Putzhammer/Meier und das Ingenieurbüro H13 durchgeführte Ausführungsplanung hatte das Ziel, alle Dimensionsänderungen der verwendeten Holzwerkstoffe aus Quellen und Schwinden zuzulassen, ohne gleichzeitig die statische Tragfähigkeit zu gefährden.

Bei der Tragwerkskonzeption wurden definierte Schwankungsbreiten der Holzfeuchte zu Grunde gelegt. Entsprechend wurden besondere Anforderungen an die Genauigkeit bei der Herstellung sowie für die Einbaufeuchten der Holzbauteile gestellt und diese über das Leistungsverzeichnis verankert. Die zulässigen Bauleranzen wurden beschränkt und die Grenzabmaße auf 50% reduziert. Dies betraf die Bauteile selbst ebenso wie die bei der Montage einzuhaltenden Grenzabweichungen. Für einzelne Fälle gab es zusätzliche Beschränkungen. Die geplanten Anschlüsse und Verbindungen (vorgebohrte Nagellöcher, kraftschlüssiges Ineinandergreifen) würden nur wenige Abweichungen verzeihen.

Um den Genauigkeitsanforderungen Rechnung zu tragen, bezog das für die Produktion verantwortliche Team diese Anforderungen in die Produktionsplanung stets mit ein. Während man bei den maschinenabgebundenen Bauteilen auf Basis einer 3D-Werkstattplanung für die Endmaße und für die Lage und Abstände von Löchern etc. – zu Recht – keine Schwierigkeiten erwartete, begegnete man den Toleranzen der zu verarbeitenden Holzwerkstoffe vorsichtiger. So wurden beispielsweise die inneren Furnierschichtholzplatten der Dach- und Wandelemente mit Übermaß bestellt und auf den eigenen Maschinen formatiert, um das Riegelwerk auf einer gesicherten Basis aufbauen zu können. Um keine Additionsfehler zu erhalten, gab es Dickenformatierungen und Schablonen. Und mit Positionsbohrungen für Dübel konnten Teilquerschnitte passgenau zusammengefügt werden. Zu guter Letzt versicherte man sich mittels Endkontrollblättern der Wirksamkeit aller Maßnahmen. Korrekturen wären zu diesem Zeitpunkt noch leichter anzubringen als bei der Montage. Die Zusammenbauzeichnungen als Basis wurden für die wesentlichen Bauteile Binder, Stützen, Dach- und Wandelemente Kontrollmaße markiert und mit den einzuhaltenden Toleranzen dargestellt. Ferner wurden an definierten Punkte Messungen der Holzfeuchte vorgenommen und ebenfalls auf dem Endkontrollblatt eingetragen. Damit konnte man auch die geforderte Eigenüberwachung nachweisen, die über das üblicherweise geforderte Maß hinausging. Ausgefüllt und mit den Signaturen der kontrollierenden Mitarbeiter versehen gingen Kopien der Kontrollblätter als eine Art Lieferschein mit auf die Baustelle.

2.2. Prüfung der magnetischen Suszeptibilität

Aus den oben angeführten Anforderungen heraus war es notwendig, alle Materialien vorab hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit und der Magnetisierbarkeit (magnetische Suszeptibilität) prüfen zu lassen. Dies stand am Beginn der Planung, um ggf. auf Materialalternativen umsteigen zu können, ohne in Zwängungen aufgrund von Beschaffungs- oder Herstellungszeiträumen zu kommen. Eine für den Holzbauer und für seine üblichen Hauptmaterialien ungewöhnliche Aufgabe. Doch auch die für den Laien eher unverdächtigen Materialien waren ausnahmslos zur Prüfung einzuschicken, und selbst für Holz und Holzwerkstoffe gab es zu Beginn keinen Persilschein durch die Physiker der Bundeswehr. Ein Problem mit den Zuschlagstoffen der Fertigbetonteile hatte zudem alle Beteiligten vorsichtig werden lassen. Die als Dämmung vorgesehene Steinwolle (Rohstoffe sind hier u.a. diverse Gesteine mit hoher magnetischer Suszeptibilität) wurde gegen Glaswolle ausgetauscht. Letztlich wurden Materialproben zu allen eingesetzten Materialien inklusive Beschichtungen, Kleber, Klebebänder, Primer, Folien, Vliese u. v. m. eingefordert und an das prüfende Institut geschickt. Im Ergebnis waren wurden alle eingeschickten Materialien zugelassen. An den Ergebnislisten, die auch andere Gewerke umfassten, war jedoch zu erkennen, dass dies nicht selbstverständlich war. Kompromisse seitens des Nutzers erzwangen allerdings die Glasscheiben, die ohne metallhaltigen Abstandshalter derzeit nicht zu erhalten sind.

3. Herstellung

3.1. Verstärkung der BSH-Binder

Die Satteldachträger aus GL28h erhielten beidseitig eine Verstärkung durch aufgeklebtes Furnierschichtholz der Rohdicke 27 mm. Neben der Verstärkung in Faserquerrichtung sollten diese die auf die Binder einwirkenden Feuchteänderungen puffern. Pro Seite waren zwölf vorkonfektionierte Einzelplatten mit Resorzinharz auf die Brettschichtbinder zu kleben, wofür das Verfahren der Schraubenpressklebung gewählt wurde. Da aufgrund der Vorgaben keine Schrauben in den Bauteilen verbleiben durften, waren nach Aushärtung der Klebefuge alle Schrauben auch wieder herauszudrehen. Auch für den Fall, dass eine Schraube abreißen sollte, war das Vorgehen zu überlegen und abzustimmen.

Der normenkonforme Schraubenabstand von 12 cm x 12 cm ergab, dass für die Schraubenpressklebung ca. 3600 Schrauben je Binderseite verlässlich im richtigen Abstand zueinander positioniert, eingedreht und später wieder ausgedreht werden mussten. Und dies bei 21 Bindern, also 42-mal.

Die Produktionsverantwortlichen leimten sich hierzu einen dünnen Dummy-Träger, der mit Ausnahme der Breite die gleichen Abmessungen wie die Satteldachbinder aufwies, zerschnitten diesen entsprechend den Verklebungsbereichen der einzelnen Arbeitsschritte und nutzte ihn als Schablone und Druckverteilerplatte. Dieses Vorgehen wurde unter Angabe und Definition aller weiteren Produktionsfaktoren mit dem Prüfenieur abgestimmt. Um die Verklebungsqualität verlässlich zu erreichen, fiel die Wahl auf Tellerkopfschrauben mit einem die Mindestvorgaben der Norm überschreitenden Durchmesser. Die nachfolgende Produktionskontrolle bestätigte die Wirksamkeit des Vorgehens. Es ergaben sich Klebfugendicken, die deutlich unter den maximal zulässigen Maßen lagen.



Weitere, von den Normvorgaben abweichende Parameter für die Schraubenpressklebung wurden intern untersucht, um den Zeitrahmen für die Produktion und auch die Kosten im Rahmen zu halten. Sie konnten jedoch trotz guter Ergebnisse wegen der Erfordernis einer Zustimmung im Einzelfall in Verbindung mit der Zeitschiene für die Ausführung leider nicht angewendet werden.

Nach dem Aushärten der Klebefuge und der Entfernung von Lastverteiler und Schrauben wurden die Binder auf der Plattenbearbeitungsanlage noch einmal formatiert.

3.2. Stützen

Herstellungsbedingt waren die Stützen sicherlich die komplexesten Bauteile. Aufgrund des Querschnitts 48 x 54 cm² waren die Stützen nach Produktion der Brettschichtholzeinzelteile mit einer Blockverklebung herzustellen. Zwei Teilquerschnitte 24 x 55,3 cm² wurden dabei mit einem fugenfüllenden Phenol-Resorzinharz zu je einem Stützenquerschnitt verklebt. Nachgeschaltet wurden die seitlichen Hölzer für die Gabellagerung der Binder ebenfalls per Blockverklebung ergänzt. In der Regel konnten in einem Pressgang zwei Stützen

mit je zwei Gabeln verbunden werden. Die Gabelbauteile hatten ihrerseits zuvor – ebenfalls per Blockverklebung – eine 10 cm starke, seitliche Aufdopplung mit Aussparungen für Kabeldurchlässe und für die Verkeilung der Binder erhalten. Die Planer schrieben vor, dass im Endquerschnitt alle Lamellen gleich ausgerichtet sein sollten. Deshalb sind Aufdopplungen und Gabeln selbst vorher aus zwei Einzelquerschnitten per Blockverklebung entstanden.

In einem letzten Blockverklebungsdurchgang wurden schließlich die Konsolenhölzer aufgeklebt. Aufgrund der planerisch geforderten Randbedingungen – Konsolenabmessungen, Lamellenorientierung, Faserrichtung, vorspringende Laschen für die Holznagelverbindung – besteht die unterste und größte Konsole allein aus zehn blockverklebten Einzelquerschnitten. Mit CAD-geplanten und maschinengebohrten Holzdübellöchern wurde die korrekte Positionierung der Bauteile zueinander sichergestellt und ein Verrutschen beim Aufbringen des Pressdrucks vermieden. Der Pressdruck wurde mittels Stahljochen aufgebracht.



Zur Vermeidung von Stahl bei der biegesteifen Anbindung der Stützen an die Gründung wählte das Ingenieurbüro H13 eine direkte Einspannung der hölzernen Stützen in Köcherfundamenten. Dies ist zulässig, wenn wie hier die Fußpunkte Umgebungsbedingungen der Nutzungsklasse 2 aufweisen. Vorgaben für die Ausführung des Einspannungsbereiches werden in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-136, Stützen aus Brett-schichtholz zur Einspannung durch Verguss in Stahlbetonfundamente gemacht. Sie sieht unter anderem vor, eine Epoxidharzbeschichtung in zwei Arbeitsgängen mit einer Zwischenlage Glasfasergewebe aufzubringen, wobei die Beschichtung mindestens 1,2 mm stark sein muss. Da aus Vorversuchen hervorging, dass die Mindestdicke in der beschriebenen Weise nicht zuverlässig erreicht werden konnte, wurde das Epoxidharz in drei Arbeitsgängen mit zwei Vlieslagen aufgebracht. Ebenfalls in Vorversuchen wurde die richtige Faltechnik für das Glasvlies erprobt, um an den Ecken die Faltdicken möglichst gering bzw. die Beschichtungsdicke möglichst gleichmäßig zu halten.



3.3. Dach- und Wandelemente

Die Wand- und Dachelemente bestehen aus Rippen aus Furnierschichtholz, die beidseits mit Furnierschichtholzplatten verklebt sind. Bei den Dachelementen sorgen Querrippen für Stabilisierung und teils auch für die Durchleitung von Kräften. Unterhalb der inneren Platten sind die sogenannten Druckriegel angeordnet, die für die Aussteifung der Halle eine wichtige Rolle spielen. Auch diese waren mit der Innenschale der Elemente zu verkleben. Weitere unterseitig anzuklebende Bauteile kamen im Vordachbereich hinzu.

Während die Längsrippen zu verkleben waren, bestand diese Forderung nur für definierte Querrippen. Andere konnten mit Steckdübeln aus Holz lagegesichert eingebaut werden. Dies brachte Vorteile für den Einbau der feuchtevariablen Dampfbremse und für den Leimauftrag auf die Rippen mit sich. Weitere Steckdübel halfen auch hier bei der Positionierung. Entstandene Hohlräume, die mit der normalen Gefachdämmung nicht geschlossen werden konnten, wurden mit zusätzlichen kleinen Streifen Dämmung aufgefüllt.



In einem ersten Klebevorgang wurden die Druckriegel mit Schraubenpressklebung angebracht. Nach dem Aushärten und Ausdrehen der Schrauben wurden die Platten gewendet und auf die exakt ausgerichteten, zu verklebenden Rippen aufgelegt. Für die folgende Schraubenpressklebung kam für die linienförmige Klebefläche ähnlich den Lastverteilerplatten bei den Binderverstärkungen eine Bohle zum Einsatz, die Schablone und Lastverteiler zugleich war. Nach erneutem Aushärten, Schrauben Entfernen und Wenden wurden die diffusionsoffene Dampfbremse eingelegt, die Querschotte eingeschoben und die Dämmung eingebracht. Es folgten wieder der Klebstoffauftrag auf den Rippen und das Schraubenpressverkleben der Furnierschichtholzplatte mittels der Verteilerlatten.

Wandelemente wurden im Prinzip ähnlich gefertigt. Die Rippenstruktur und damit die Verklebungen und das Einbringen der Folie gestalteten sich aufgrund der Fenster jedoch etwas aufwändiger.

Wegen dem Erfordernis der metallfreien Ausführung wurden die Elemente noch im Werk mit Metalldetektoren geprüft. Hineingeratene Metallteile o.ä. sollten nicht erst auf der Baustelle oder im Bauwerk entdeckt werden. Wegen der hohen Empfindlichkeit der Detektoren mussten die Elemente hierfür bis auf etwa Kopfhöhe aufgebockt werden, um Störungen durch die Bewehrung der Bodenplatte zu reduzieren und ein interpretierfähiges Ergebnis zu erhalten.



4. Montage

Die Montage war gekennzeichnet durch die hohen Anforderungen an die Genauigkeit. Besonderes Augenmerk galt dem Vergießen der eingespannten Stützen, das vor dem Einfahren von Binder und Dachelementen durchgeführt wurde. Von deren Genauigkeit in Position und Ausrichtung hingen das Gelingen der weiteren Montageschritte und das Ineinanderfügen der passgenauen Anschlüsse ab. Die Mühe zahlte sich aus. Der begleitende Ingenieur konnte in seiner montagebegleitenden Fotodokumentation Anfang August vermerken:

«Beim Ablassen – es passt exakt!!!» [LookHere! L-IED am 3.8.2016, H13-Ingenieure].

In einem ersten Montageabschnitt wurden die Holzbauteile des Anbaus zusammengesetzt und die Tragkonstruktion in den mittleren Feldern der Halle inklusive Dachelemente errichtet. Es folgten im zweiten und dritten Schritt die Montagen der benachbarten Felder über eine den Dachelementen entsprechende Länge. Mit Bauabschnitt vier und fünf wurden der Halle an beiden Enden die restlichen Felder inklusive Giebelwandelementen angefügt. Danach folgten die Längswände, später auch die innenseitigen Konstruktionen für die TGA.



Trotz vieler Überlegungen bei der Planung des Gebäudes blieben noch einzelne Klebungen auf der Baustelle durchzuführen. Für die wenigen auf der Baustelle noch vorzunehmenden Klebungen spielte das Wetter den Monteuren in die Karten. Die Temperaturen waren ausreichend und erlaubten die Klebearbeiten. Mit Schraubenpressklebung gab es am First von unten die Nut für die Federelemente der Dachelemente mit einem Deckel zu schließen und auch die Knaggen für den horizontalen Stützenanschluss waren an den Bindern zu ergänzen. Weitere Verklebungen waren primär konstruktiver Natur.

5. Rückschau

Die Genauigkeit war gerade für die Ausführenden ein wichtiges Ziel und Schlüssel zum Erfolg. Nachlässigkeiten wollte und konnte man sich bei den vielen auf Passung und Verklebung beruhenden Anschlüssen zum Stecken und Hineinrutschen nicht leisten. Moderne Technik und findige Lösungen waren hier im Umgang mit den Werkstoffen und deren Eigenschaften gleichzeitig gefragt.

Für sich genommen bedeuteten die einzelnen Verklebungen oder Aufgaben im Rahmen dieses Projektes keine wirklich neue oder große Hürde. Zur Herausforderung wurde die metall-frei – Forderung durch die Kombination und Hintereinanderschaltung verschiedener Verklebetechniken und Verklebedurchgänge, durch die gegebenen Abmessungen und Geometrien sowie durch teils ungewohnte, technische Abklärungsaufgaben. Dies alles in Planung und Ausführung auch in ein zeitliches Korsett zu bringen, das den Bauzeitenplänen entsprach, erforderte entsprechende Anstrengungen. Zusammen ergab sich ein komplexes Anforderungsprofil, das an allen beteiligten Stationen ernst zu nehmen war und ernst genommen wurde.

Es gab kaum eine Verklebungsart, die nicht zum Einsatz gekommen wäre. Und letztendlich spiegelt der Bau die Leistungsbreite in der Verklebung von Holzbauteilen wieder.