

Forschungsbericht / Abschlussbericht zum BMU –
Forschungsvorhaben: 032543A & 032543B

**Modularer Recht-Eck-Wärme-Speicher aus Faserverbund-
Werkstoffen-GFK TP1 & TP2**
(01.Juli 2013 bis 30.Juni 2015)

J. Bühl; R. Förster; W. Günther; M. Müller; Y. Yakowleva; C. Dennefeld; Dr. S. Moldenhauer, Dr. C.
Heinicke

durchgeführt von

TU Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Thermo- und Fluidodynamik
Apl. Prof. Dr.- Ing. habil. Christian Karcher
Arbeitsgruppe Regenerative Energietechnik

und

ed energie.depot GmbH

Dipl.-Ing. R. Förster

in Zusammenarbeit mit

Prof. Dr.- Ing. habil. Dr. Berthold Knauer
Schönbrunn

Dr.- Ing. Eckhard Wagenknecht
Berlin

Dipl.-Ing. Rolf Förster
ed energiedepot depot GmbH Radeberg

Herr Klein; Dipl.-Ing. (FH) M. Sittig
VKA Verbundwerkstoff- und Kunststoffanwendungstechnik GmbH Schönbrunn

Dipl.-Ing. (FH) H. Rinn
Rinn creativ plastics Wümbach

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0325970A gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Dieser Bericht wurde mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Trotzdem kann keine Gewähr für Fehlerfreiheit übernommen werden.

Kurzreferat

An der TU Ilmenau (Institut für Thermo- und Fluidodynamik) werden seit 1995 in Zusammenarbeit mit Industriepartnern Wärmespeicherkonzepte auf der Grundlage des Einsatzes Glasfaserverstärkter Kunststoffe (GFK) entwickelt und umgesetzt.

Die in diesem Zeitraum gemachten Einsatzerfahrungen zeigen, dass GFK die Mehrzahl der geforderten positiven Eigenschaften zum Einsatz als Wärmespeichermaterial in sich vereint. Ihre Eignung ist im praktischen Einsatz nachgewiesen.

Die Ergebnisse des vorliegenden Abschlussberichtes sind eine wesentliche Grundlage für die Entscheidung zur Entwicklungsaufnahme für die Vorbereitung einer Serienfertigung von Wärmespeicherbauelementen (Modulen) aus Faserverbundmaterialien (GFK) zur Realisierung von modular aufgebauten kubischen drucklosen (Heißwasser-) Wärmespeichern mit einer dauerhaften Innentemperaturbelastung von 95 °C in einem Speichervolumenbereich von 4 bis 32 m³.

Schlagwörter

Wärmeleitfähigkeit
Elastizitätsmodul
Glasvolumenanteil
Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)
Faserverbundwerkstoff
Verbundwerkstoff (VW)
Handlaminierverfahren (HAV)
Reaction Transfer Moulding (RTM)
Reaktion Injektion Moulding (RIM)
Water vapor transmission rate (WVTR)
Integrale Wärmedämmung
Super Wärmedämmung
Wärmedurchgang
Wärmeverluste
Speicherzeitkonstante
Nutzwärmekosten

Titel: „Modularer-Recht-Eck-Wärme-Speicher aus Faserverbund-Werkstoffen-GFK“
TP1&TP2)

Autoren: Bühl, J.; Günther, W.; Müller, M.; K.; Yakovleva, Y.; Dennefeld C.; Moldenhauer S.; Heinicke C.; Knauer, B.; Wagenknecht, E.; Förster, R.

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Thermo- und Fluidodynamik
ed.energie.depot GmbH Radeberg

Der **Bericht** besteht: aus 358 Seiten Text
Tag der Berichterstellung: 31.08.2015
Es wurden 6 Exemplare erstellt.

Eine spätere Veröffentlichung ist geplant.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Wirtschaft und Energie (BMWi) unter den Kennzeichen 032543 A & B gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

| Inhaltsverzeichnis | | Seite |
|--------------------|--|-------|
| I. | Kurzdarstellung | 007 |
| I.0 | Einleitung | 007 |
| I.1 | Aufgabenstellung | 008 |
| I.2 | Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde | 010 |
| I.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 010 |
| I.4 | Wissenschaftlich und technischer Stand (Anknüpfungspunkte) | 011 |
| I.5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 012 |
| I.6 | Kurzfassung | 013 |
| I.7 | Ergebnisse (Zusammenfassung) | 016 |
| II. | Eingehende Darstellung / Teilberichte | 018 |
| II.1 | Teilbericht 1 (TP 1) TU Ilmenau – Projekt-Management und eingehende Darstellung des modular aufgebauten Recht-Eck-Wärme-Speichers als Laborspeicher | 018 |
| II.1.0 | Arbeitspakete AP 1 & AP 2 | 020 |
| II.1.1 | Arbeitspaket 3 – Auslegung und Berechnung zur Speicherhülle | 020 |
| II.1.1.1 | Darstellung der unterschiedlichen Wandaufbauten und Berechnung der Wärmedurchgangszahlen für den 4 m ³ Laborspeicher | 021 |
| II.1.1.2 | Berechnung der zu erwartenden Speicherzeitkonstanten | 026 |
| II.1.2 | AP 4 – Erstellung der Konstruktionszeichnungen in Zusammenarbeit mit Prof. Knauer ILL und Herrn Förster ed als Grundlage für den Formenbau | 029 |
| II.1.2.1 | Darstellung und Zusammenbau des modularen Recht-Eck-Wärme-Speichers | 029 |
| II.1.2.2 | Eckmodule | 030 |
| II.1.2.3 | Bodenmodul | 031 |
| II.1.2.4 | Deckelmodul | 031 |
| II.1.2.5 | Seitenwandmodule | 031 |
| II.1.3 | Arbeitspakete 6 & 7 & 9 bis 11 – Variantenvergleich verschiedener innerer Aufbauten der Seitenwandmodule sowie unterschiedlicher Ausführungsarten der Wanddurchführungen und des Be- und Entladesystems | 033 |
| II.1.3.1 | Seitenwandmodule | 033 |
| II.1.3.2 | Medienanschlüsse des Be- und Entladesystems | 034 |
| II.1.3.3 | Be- und Entladesystem des Laborspeichers | 037 |
| II.1.4 | Arbeitspakete 5 & 8 & 12 – Konzipierung und Realisierung des Versuchsstandes zum Laborspeichertest | 040 |
| II.1.4.1 | Aufstellung des Laborspeichers an der TU Ilmenau und hydraulische Einbindung des Speichers in den vorhandenen Speicherteststand | 040 |
| II.1.4.2 | Technische Beschreibung des Versuchsstandes | 042 |
| II.1.4.3 | Installation der Messtechnik im Laborspeicher | 045 |
| II.1.5 | Arbeitspakete 13 & 14 - Versuchsdurchführung und Messauswertung | 047 |
| II.1.5.1 | Messungen zur Druck- und Temperaturfestigkeit | 047 |
| II.1.5.1.1 | Druckbelastung (Hydrostatischer Druck) | 047 |
| II.1.5.1.2 | Verformung bei dynamischer Belastung durch Druck und Temperatur | 048 |
| II.1.5.2 | Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Speicherwände | 051 |
| II.1.5.3 | Ermittlung der Speicherzeitkonstanten (V1 bis V3) | 055 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| II.1.5.4 | IR-Wärmebildaufnahmen während der Versuchsdurchführung | 058 |
| II.1.5.5 | Bestimmung der Wasserdampf-Permeabilität | 064 |
| II.1.5.6 | Temperaturprofil und Leistung bei Be- und Entladung des Labor-Speichers | 066 |
| II.1.5.6.1 | Beladung über den (Solar-) Schichtenlader | 066 |
| II.1.5.6.2 | Beladung über einen Wellrohr-Wärmeübertrager | 072 |
| II.1.5.6.3 | Entladung über einen Wellrohr-Wärmeübertrager | 073 |
| II.1.6 | Zusammenfassung und Ausblick (TP 1) | 075 |
| II.2 | Teilbericht 2 (TP2) ed Radeberg – Modularer Recht- Eck- Wärmespeicher aus Faserverbundwerkstoffen | 078 |
| II.2.0.1 | Aufgabenstellung | 080 |
| II.2.0.2 | Voraussetzungen | 080 |
| II.2.0.3 | Planung und Ablauf | 080 |
| II.2.0.4 | Wissenschaftlich-technischer Stand | 081 |
| II.2.0.5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 083 |
| II.2.1 | Ergebnis-Zusammenfassung nach Arbeitspaketen | 082 |
| II.2.1.1 | AP 1 Projektmanagement | 082 |
| II.2.1.2 | AP 2 Recherchen | 082 |
| II.2.1.3 | AP 3 Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation Speicherhülle und Verbindungstechnik | 083 |
| II.2.1.4 | AP 4 Herstellung Formen / Segmente / Laborspeicherhülle | 084 |
| II.2.1.5 | AP 5 Erstmontage Laborspeicher / Umbauten | 086 |
| II.2.1.6 | AP 6 & 7 Konstruktion / Auslegung / und Herstellung Speicherbe- und Entladung | 088 |
| II.2.1.7 | AP 8 & 9 Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation und Herstellung Funktionsmodul | 092 |
| II.2.1.8 | AP 10 & 11 Konstruktion / Auslegung / Simulation und Herstellung Einstiegsmodul | 103 |
| II.2.1.9 | AP 12 und 13: Versuchsstand konzipieren und Versuchsprogramm erstellen | 105 |
| II.2.1.10 | AP 14: Monitoring und Ergebnisbewertung – Material- und Funktionsprüfungen | 105 |
| II.2.1.11 | AP 15: Lösung der Linerproblematik (Diffusionsdichtigkeit) | 105 |
| II.2.2 | wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 105 |
| II.2.3 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 105 |
| II.2.4 | Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplanes | 106 |
| II.2.5 | Fortschritt bei anderen während der Vorhabenlaufzeit | 106 |
| II.2.6 | Erfolgte oder geplante Veröffentlichung | 108 |
| II.2.7 | Erfolgskontrollbericht: Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele | 108 |
| II.2.7.1 | Erfolgskontrollbericht: Wissenschaftlich-technische Ziele | 108 |
| II.2.7.2 | Erfolgskontrollbericht: Erfindungen / Schutzrechte | 109 |
| II.2.7.3 | Erfolgskontrollbericht: wirtschaftliche Erfolgsaussichten | 109 |
| II.2.7.4 | Erfolgskontrollbericht: wiss.-techn. Erfolgsaussichten | 109 |
| II.2.7.5 | Erfolgskontrollbericht:wiss./wirtschaftl.Anschlussfähigkeit i.d.n.Phase | 109 |
| II.2.7.6 | Erfolgskontrollbericht: Arbeiten, die zu keiner Lösung gefunden haben | 109 |
| II.2.7.7 | Erfolgskontrollbericht: Präsentationsmöglichkeiten | 109 |
| II.2.7.8 | Erfolgskontrollbericht:Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung | 109 |

| | | |
|------------------|--|-----|
| III. | Teilbericht zu TP2 – Modularer Recht-Eck-Wärmespeicher aus Faserverbundwerkstoffen-GFK (Arbeitspaket 3) Prof. Knauer ILL & Dr. Wagenknecht Berlin | 110 |
| III.1 | Themenfindungsphase | 113 |
| III.1.1 | Einleitung | 113 |
| III.1.2 | Geometrieentwicklung | 113 |
| III.1.3 | Gestaltungsprinzip | 116 |
| III.1.4 | Werkstoffkomponenten | 117 |
| III.2 | Gestaltungsphase | 117 |
| III.2.1 | Strukturkonzept | 117 |
| III.2.2 | Werkstoffdatenblätter | 124 |
| III.2.3 | Festigkeitsanalyse | 164 |
| III.2.3.1 | FEM-Teilbericht 1 als Einschub (FEM TB1) | 165 |
| TB1.1 | Allgemeines | 165 |
| TB1.2 | Geometrie des 4 m ³ Laborspeicher-Modells | 166 |
| TB1.3 | Materialkennwerte des 4 m ³ Labor-Wärmespeichers | 166 |
| TB1.3.1 | Ausgangsdaten (Kurzzeitwerte) | 166 |
| TB1.4 | Berücksichtigung von Langzeitwirkungen | 169 |
| TB1.5 | Belastung des 4 m ³ Labor-Wärmespeichers | 169 |
| TB1.6 | Berechnung der Beanspruchung des 4 m ³ Labor-Wärmespeichers | 170 |
| TB1.6.1 | Lastfall LF1: Eigengewicht | 170 |
| TB1.6.2 | Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck | 172 |
| TB1.6.3 | Lastfall LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz | 173 |
| TB1.6.4 | Lastfall LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,05 bar Innendruck | 176 |
| TB1.6.5 | Lastfall LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,10 bar Innendruck | 177 |
| III.2.3.2 | FEM-Teilbericht 2 als Einschub (FEM TB2) | 188 |
| TB2.1 | Zum neuen FEM.Modell | 188 |
| TB2.2 | Berechnung der Beanspruchungen des Wärmespeichers mit dem Halbmodell | 189 |
| TB2.2.1 | Lastfall LF1: Eigengewicht + Mannlast | 190 |
| TB2.2.2 | Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Mannlast | 191 |
| TB2.2.3 | Lastfall LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + Mannlast | 192 |
| TB2.2.4 | Lastfall LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,05 Bar Innendruck | 194 |
| TB2.2.5 | Lastfall LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,10 bar Innendruck | 195 |
| III.2.4 | Detaillieren | 216 |
| TB2.4.1 | Deckelmodul / Mannloch | 216 |
| TB2.4.2 | Eck-Modul-Verbindungen | 216 |
| TB2.4.3 | Funktionsmodulvarianten | 217 |
| III.2.4.3 | FEM-Teilbericht3: Mediendurchführung als Einschub (FEM TB3) | 218 |
| TB3.1 | Zum FEM-Modell mit Mediendurchführung Variante IV | 218 |
| TB3.2 | Berechnung der Beanspruchung des Wärmespeichers | 218 |
| TB3.3 | Lastfall LF1: Eigengewicht + Mannlast | 219 |
| TB3.4 | Lastfall LF2: Eigengewicht + Mannlast | 220 |

| | | |
|----------------|--|------------|
| TB3.5 | Lastfall LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+Mannlast | 221 |
| TB3.6 | Lastfall LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+Temperaturdifferenz + 0,05 bar Innendruck | 223 |
| TB3.7 | Lastfall LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+Temperaturdifferenz + 0,10 bar Innendruck | 225 |
| III.3 | Fertigungsphase | 234 |
| III.3.1 | Variantenentwicklung bei den auswechselbaren Seitenwandmodulen | 234 |
| III.3.2 | FEM-Teilbericht 4 – Laborwärmespeicher in Modulbauweise als Einschub (FEM 4) | 234 |
| TB4.1 | Zum FEM-Modell | 234 |
| TB4.2 | Berechnung der Beanspruchungen der Varianten 2 und 3 des Speichers | 237 |
| TB4.2.1 | Variante 2 mit Vakuum-Isolations-Paneelen | 237 |
| TB4.2.2 | Variante 3 mit Vakuum-Isolations-Paneelen und zusätzlichen Glasschaum | 240 |
| III.3.3 | FEM-Teilbericht 7 als Einschub (TB7) | 256 |
| TB7.1 | Zum FEM-Modell | 256 |
| TB7.2 | Berechnung der Beanspruchungen der Varianten 2 und 3 des Speichers | 259 |
| TB7.2.1 | Variante 2 mit Vakuum-Isolations-Paneelen– Seitenwand / Entwurf 7 | 259 |
| TB7.2.2 | Variante 3 wie Variante 2 aber mit zusätzlichem Glasschaum- Seitenwand / Entwurf 4 | 261 |
| III.3.4 | Werkzeugbau und Abmusterung | 272 |
| III.3.5 | Modulfertigung | 272 |
| III.3.6 | Modulmontage | 277 |
| III.4 | Musterzulassung | 281 |
| III.4.1 | Versuchsordnung | 281 |
| III.4.2 | Betriebserprobung | 284 |
| III.4.3 | Deformationsverhalten (Vergleich von Rechnung und Versuch) | 291 |
| III.4.4 | FEM-Teilbericht 11-4m³-Laborwärmespeicher in Modulbauweise als Einschub | 292 |
| III.5 | Vorschläge für Weiterentwicklungen | 302 |
| III.5.1 | Projektstudie für einen 3 m ³ Wärmespeicher | 302 |
| III.5.2 | Projektstudie zum Vergrößerungspotenzial bis 20 m ³ Wärmespeicher | 316 |
| III.6 | Zusammenfassung | 336 |
| III.7 | Anlage Zeichnungssatz (nur als Beilage zum gedruckten Bericht) | 337 |
| | | |
| IV. | Zusammenfassung Gesamtbericht TP 1 & 2 | 337 |
| IV.1 | Gesamtergebnisbewertung | 337 |
| IV.2 | Ausblick und weiterführende Untersuchungen | 339 |
| IV.3 | Vergleich des Arbeitsstandes mit dem bestätigten Arbeitsplan | 340 |
| IV.4 | Probleme bzw. Schwierigkeiten bei Erlangung der / des Projektziele(s) | 340 |
| IV.5 | Im Projektverlauf bekannt gewordene F- und E-Ergebnisse Dritter | 340 |
| IV.6 | Quellennachweis | 341 |
| IV.7 | Abbildungsverzeichnis | 343 |

I. Kurzdarstellung

I.0 Einleitung

Der erste Energiespeicherprozess setzte vor ca. 2 Mrd. Jahren auf der Erde mit der Photosynthese ein, der Speicherung von Solarenergie. Seither wurde in allen Energieversorgungssystemen, angefangen beim Feuerholz, Primär-Energiespeicherung betrieben.

Die Änderungen des Klimas u. a. durch die hemmungslose CO₂-Einbringung in die Atmosphäre und andere Faktoren macht immer deutlicher, dass Klima- und Energiewende existenzbestimmend für den Fortbestand der Menschheit sind. Die bisherige Speicherung von Primärenergie weicht damit zunehmend der Speicherung von Endenergie.

Die Ziele der Bundesregierung sind im Energiekonzept von 2010 festgehalten und werden fortgeschrieben. Darin sollte der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Bruttoenergieverbrauch bereits 2012 18 % betragen.

Aktuell stagniert er nach aktuellen Berechnungen des BMWI und der Anteil erneuerbarer Energien als Wärmequelle in Deutschland 2014 liegt derzeit bei 9,9 % (130.000 GWh). Die Verschiebung der Anteile ist dabei durchaus unterschiedlich. Die Solarthermie (Sonne als Wärmequelle) brachte es 2014 auf 6.900 GWh, was einen Anteil von 5 % am Energiemix bedeutet. Auch angestiegen ist der Anteil der Umweltwärme (Wärmepumpen / tiefe Geothermie) auf 10.600 GWh. Zuwachs bei Wärmepumpen gab es bei auch bei Brauchwasserwärmepumpen.

2050 soll der prozentuale Anteil der erneuerbaren Energien bei 60 % im Energieverbrauch liegen. Klimawandel und Energiewende sind u.a. existenzbestimmende Bedingungen für die Zukunft. Die Energiewende hat begonnen. Ziel der Energiewende ist eine deutliche Absenkung der Treibhaus-Gas-Emissionen (der größte Anteil daran ist der CO₂-Eintrag in die Atmosphäre).

Am 03.08.2011 hat das Bundeskabinett das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ verabschiedet. BMU und BMWI sind innerhalb der Bundesregierung zuständig für erneuerbare Energien und somit ebenfalls für die Forschungsförderung in diesem Bereich. Thematisch liegen die Schwerpunkte dabei auch auf der Förderung der Nieder-Temperatur-Solarthermie (Wärme bzw. Kälte aus Sonnenwärme), der Hochtemperatur-Solarthermie bzw. solarthermischen Kraftwerken. Um eine an 100 % Deckung gehende Versorgung für Strom und Wärme zu erreichen, ist aus jetziger Sicht ein massiver Ausbau von Wind auf dem Wasser und auf dem Land, sowie eine massive Installation von Solaranlagen (sowohl PV-Anlagen als auch Solarwärmeeanlagen) nötig.³⁾

Weitere zentrale Bausteine sind die Senkung des Heizwärmebedarfs im Gebäudesektor (sowohl im Neubau KfW 100 bis KfW 40 als auch in der Solarisierung des Gebäudebestandes) und die Optimierung der Verluste des max. um 25 % absenkbareren Warmwasserverbrauchs bezogen auf den aktuellen Verbrauch.

Eines der zentralen Themen des Förderschwerpunktes Regenerative Energieversorgungssysteme und Integration erneuerbarer Energien sind hierbei die Speichertechnologien.^{1)?}

Die Europäische Union hat beschlossen, dass ab 2021 der Heizenergieverbrauch von Neubauten gegen Null gehen soll. Eine Heizanlage wird dann im Wesentlichen vor allem für die Bereitstellung von warmem Wasser gebraucht, wobei in der Energieerzeugung die Bedeutung von Sonnen- und Windkraft steigt, mit ihrem wechselnden Dargebot im Jahresverlauf.

Die (Wärme-)Energiespeicherung nimmt hierbei eine „Schlüsselstellung“ ein! ²⁾
In der Novelle zum Marktanreizprogramm „Erneuerbare Energien für die Wärmewende“ werden neue Impulse zur Förderung der Solarthermie im Zuge der Energiewende durch das BMWi gesetzt. ^[10]

Zusammenfassung

Wärmespeicher sind ein zentrales Element für effektives Energiemanagement im Bereich Klimatisierung, Wärme- und Strombereitstellung und für die verstärkte Nutzung der Sonnenenergie und der Erreichung der Ziele der Energiewende unverzichtbar. ^[05]

Entwicklungsschwerpunkt der Anwendungs-Technologien sind:

Heizen / Kühlen / solare Nahwärme / solare Prozesswärme / verstärkte Integration solarer Technologien in den Gebäudebestand und im Neubau (Effizienzgebäude nach EnEV: KfW-Effizienzhäuser 100 / 70 / **55 / 40**). ^[05]

Einen besonderen Forschungsschwerpunkt bildet dabei die Weiterentwicklung von Wärmespeicher-Technologien: ^[12,20,30]

Weiterentwicklung effizienter innovativer Konzepte für Wärmespeicher u. a. aus neuen Werkstoffen / Werkstoffkombinationen (z. Bsp. Faserverbund-Werkstoffe).

(Wärme-) Energiespeicher in vielfältigen Ausführungen werden zunehmend zum Zentrum regenerativer Energiesysteme und damit ein Schwerpunkt innerhalb der anspruchsvollen zeitnah zu lösenden Forschungsschwerpunkte! ^[33]

Neben den Vorteilen der **modularen** platzsparenden Speicheraufstellung im „Keller“ bei maximaler Flächenausnutzung sind weitere wesentliche Vorteile gegenüber den bisher hauptsächlich eingesetzten Materialien für Wärmespeicher u.a. und sollten weiter verbessert / optimiert werden:

Deutlich geringere Wärmeverluste und damit höherer Wirkungsgrad infolge der werkstoff-spezifischen Dämmeigenschaften im Vergleich zu Stahl

Nachhaltige Steigerung der (energetischen) Speicherdichte in Verbindung mit einem optimierten thermischen Be- und Entladesystem

Hervorragende Schichtungseigenschaften

Die Massereduzierung im Vergleich zu Stahl führt zur Reduzierung des Aufwandes und damit auch der Kosten bei Transport und Montage

Preisneutral im Vergleich zu Ausführungen aus Stahl

Korrosionssicherheit und Langlebigkeit

Unter dieser Zielstellung wurde ein modular aufgebauter Labor-Wärmespeicher mit 4 m³ Speichervolumen entwickelt, realisiert und im Wärmespeichertestlabor der TU Ilmenau einem umfangreichen Mess- und Erprobungsprogramm unterzogen.

I.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben / Projekt wurde als Verbundprojekt zwischen der TU Ilmenau (TP 1) und energiedepot Radeberg (TP 2) durchgeführt. Die Projektkoordination lag bei der TU Ilmenau. Der inhaltliche Ablauf wurde durch die Formulierung von 15 Arbeitspaketen festgelegt und zeitlich entsprechend einem Balken-Zeitdiagramm organisiert.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung / Konstruktion / Realisierung / Vermessung und Laborprüfung eines modular aufgebauten Laborspeichers mit einem Speichervolumen von 4 m³.

Angewendet wird ein neuartiges Konstruktionsprinzip:

Der modular aufgebaute Recht-Eck-Speicher wird aus wenigen aber unterschiedlichen Segmenten (Modulen) zur Realisierung verschiedener Kubaturen vor Ort gefügt, wobei in jedem Modul alle erforderlichen Eigenschaften für Statik, Medien- und Temperaturbeständigkeit, Diffusionsdichtheit sowie Speicherfunktionalität und Dämmung integriert sind.

Die Herstellung und Erprobung des „Modularen Rechteck-Wärmespeichers“ (MRW) in Form eines Laborspeichers mit 4 m³ - Speicherinhalt erfolgt nach diesem neuartigen Konstruktionsprinzip. Der MRW zur „Vor-Ort-Montage“ in bestehenden Gebäuden wird aus 4 unterschiedlichen - um verschiedene Grundrisse/Höhen zu realisieren, sich wiederholenden-Segmenten gefügt, wobei in jedem Element alle erforderlichen Eigenschaften für Statik, Medien- und Temperaturbeständigkeit, Diffusionsdichtheit sowie Speicherfunktionalität und Dämmung integriert sind.

Mit der FE- Aufgabe wurden 8 Zielstellungen formuliert, die 9. wurde im Rahmen der Projektbearbeitung ergänzt:

1. Vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 95°C,
3. max. Diffusionsdichtheit,
4. stabile Schichtung auch in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,
6. Begehbarkeit,
7. U-Wert 0,11 W/m²,
8. 20% Effizienzgewinn bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
9. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Der Nachweis nachfolgender Eigenschaften ist zu erbringen:

1. Machbarkeit der vor Ort – Montage des Voll-Kunststoff-Integral-Wärmespeichers ausschließlich vom Speicherinnern aus
2. Dauertemperaturbeständigkeit 95 °C
3. Erzielung einer maximalen Dichtheit gegen Wasserdampfdiffusion und Aufbau einer stabilen thermischen Schichtung bei niedrigen großflächigen geometrischen Bedingungen.
- 4.

Die entwickelten Module lassen später die Realisierung von Speichervolumina bis zu 35 m³ Speichervolumen zu.

5. Begehbarkeit im Inneren- zum Zweck von Versuchsumbauten etc. ist der Laborspeicher durch einen Einstieg begehbar.
6. Verbesserung der Wärmedämmfähigkeit um 20 %.

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das FE-Projekt wurde als Verbundvorhaben durch die beiden Verbundpartner TU Ilmenau und ed energie.depot GmbH, Radeberg beantragt und durchgeführt, wobei die Projektkoordination in den Händen der TU Ilmenau liegen sollte.

An der TU Ilmenau im Institut für Thermo- und Fluidodynamik wird seit 1995 mit Partnern die Entwicklung von (Energie-)Wärmespeichern vorzugsweise auf der Basis von Faserverbunden im Speichervolumenbereich bis 6.000 m³ Speichervolumen entwickelt realisiert und messtechnisch begleitet.

Im Forschungsprogramm Solarthermie 2000/2000plus wurden insgesamt 22 große Solarthermische Anlagen initiiert und wissenschaftlich und messtechnisch betreut.

Für die Ergebnisbewertung der Materialgrundlagenentwicklung ist bereits ein Wärmespeichertestlabor vorhanden, welches um die Komponenten zur Materialprüfung und zur Nachweisführung (EU-Materialzulassung) der entwickelten Materialien zum Einsatz in Heißwasserwärmespeichern bei 95 °C Dauer- und hydrostatischer Druckbelastung und zur Versuchsdurchführung und den Möglichkeiten des Monitorings zu erweitern war.

Ed ist als Hersteller eines eigenen Kunststoff-Wärmespeichers, dem „Wärme-Hamster“- seit 2008 am Markt tätig.

Vergleichende Kenntnisse zum aktuellen Entwicklungsstand lagen und liegen vor.

Grundlage für die Planung und Durchführung der F/E-Arbeiten war der erreichte Erkenntnisstand im Ergebnis der Bearbeitung des Forschungsprojektes „Grundlegende Weiterentwicklung zum Werkstoff- und Bauteilverhalten von GFK-Wärmespeichern“ – FKZ 0325970A. In diesem Vorgänger-Projekt arbeiteten energie.depot sowie das Institut für Luftfahrt/Leichtbau Prof. Knauer (ILL) im Auftrag der TU Ilmenau mit.

Daraus wurde die Idee entwickelt, mit den Basiskenntnissen zum Verhalten der Verbundwerkstoffe ein neuartiges Speicherkonzept für einen „Modularen Rechteck-Wärmespeicher“ zu entwickeln und das Konzept als Laborspeicher unter dynamischen Betriebsbedingungen zu testen. Dabei sollten die Tests zur Gewinnung der Kenndaten des Materialverhaltens der Speicherhülle einerseits sowie zum Speicherbetrieb bezüglich des Be-/Entlade- und Speichervermögens andererseits gewonnen werden.

Aus diesen Erkenntnissen heraus ist eine Verwertungskonzeption für künftige Anwendungsfälle dieser neuartigen Speichergeneration zu entwickeln.

Zur fachgerechten Realisierung der FE-Aufgabe wurden von ed Unteraufträge erteilt:

1. statische Berechnung/Auslegung des Speicherkorpus an das ILL Schönbrunn sowie
2. Herstellung der Urform und der Wandelemente an Verbundwerkstoff- und Kunststoffanwendungstechnik GmbH (VKA).

Der ursprünglich im Antrag vorgesehen Unterauftragnehmer, Fa. ISOCO Schmiedefeld, konnte den geplanten Auftrag aufgrund von wirtschaftlichen Schwierigkeiten nicht ausführen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Es wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern eine umfassende Beschreibung des vorgesehenen Bearbeitungsablaufs mit Untersetzung der Inhalte der einzelnen Arbeitspakete und Festschreibung des geplanten Zeit-/Bearbeitungsablaufs in Form eines ausführlichen Balkenplans erstellt.

Die Verbundpartner sowie Unterauftragnehmer erarbeiteten in sehr enger und konstruktiver Kooperation den Antrag sowie die Planung der FE-Aufgabe. Der Verbundpartner TU Ilmenau, in der Arbeitsgruppe vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Bühl, wurde mit dem Projektmanagement beauftragt.

Die Kontrolle auf Konformität mit dem geplanten Ablauf wurde in festgelegten Projekttreffen kontrolliert und weitergeschrieben. Die Arbeitsinhalte sind in entsprechenden Protokollen und Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise dargestellt.

Die Verbundpartner sowie Unterauftragnehmer erarbeiteten in sehr enger und konstruktiver Kooperation den Antrag sowie die Planung der FE-Aufgabe. Die Arbeiten wurden entsprechend Balkenplan (Anlage 1) pünktlich und ergebnisorientiert umgesetzt. In regelmäßigen Projekttreffen wurden die erzielten Ergebnisse abgerechnet, bewertet und das weitere Vorgehen spezifiziert. Zwischenzeitlich ergab sich ein zeitlicher Vorsprung gegenüber der Planung (Meilenstein 7 „erste Laborergebnisse“ einen Monat früher). Dies wurde genutzt, um zusätzliche Messungen am Laborspeicher durchzuführen. Alle Meilensteine (1 bis 9) wurden inhaltlich und termingerecht realisiert und abgerechnet.

I.4 Wissenschaftlich und technischer Stand (Anknüpfungspunkte)

Thermische Energie macht einen wesentlichen Teil des gesamten weltweiten Energiebedarfs aus.

Neben dem Gebäudebereich besteht ein beträchtlicher Verbrauch thermischer Energie auch bei industriellen Prozessen und wärmeintensiven Dienstleistungen.

Die Energiewende wird (**muss**) sich neben dem Bereich der Stromerzeugung nun auch stärker dem Wärmesektor zuwenden!

Die (Wärme-)Energiespeicherung nimmt hierbei eine „Schlüsselstellung“ ein!

Faserverbunde zur Anwendung im Wärmespeicherbau:

Hierbei gehört Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) zur Klasse der Werkstoffe nach Maß. Bei GFK-Wärmespeichern werden besonders die Eigenschaften der thermischen und medialen Langzeitfestigkeit sowie –Steifigkeit, die Wärmedehnung, der Wärmedurchgang, die Diffusionsdichtheit, die Verarbeitbarkeit und die Herstellungskosten optimiert. Als variable Größen werden die Matrixmaterialien selbst, die Glasfasern mit ihrer spezifische Länge, der textilen Verarbeitung sowie die ein-, zwei- oder dreiaxiale Orientierungsrichtung im Bauteil, ihrem Querschnittsbereich, ihrem Masse- und Volumenanteil am Gesamtverbund sowie die Grenzschichtausbildung zwischen Faser und Matrix angesehen.

In diesem Zusammenhang steht der künftige Wärmespeicherbedarf bei der anstehenden energetischen Altbausanierung. Hier gilt es, die vorhandenen Räumlichkeiten optimal zu nutzen, was mit zylindrisch ausgeführten Speichern nur ungenügend gelingt, wobei eingesetzte Stahlspeicher schon materialbedingt Nachteile gegenüber Faserverbundmaterialien haben. Das zur Zeit meist eingesetzte Material Stahl für die Speicherinnenhülle hat in der Verlustbilanz entsprechende Defizite (Auftreten von lokalen Konvektionseffekten an der Speicherinnenwand und Wärmedurchgang). Dies kann auch entsprechenden Einfluss auf die Temperaturschichtung im Speicher und ein Absinken (Durchmischen) im Stillstand haben. Forschungs-/ Entwicklungsbedarf besteht bei der Weiterentwicklung des Innenwandmaterials (Verbundmaterial / Materialhybride / Faserverbunde mit Inliner / Faserverbunde mit Nanobeschichtung).^[016] Diese Problematik wurde u.a. an der TU Ilmenau im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht.^[016]

Vorhandene Räumlichkeiten können optimal durch rechteckig ausgeführte Wärmespeicher ausgenutzt werden. Das Problem, mit diesen Speichern durch enge Kellergänge und -Türen mit handhabbaren Massen zu kommen, soll in diesem Projekt durch die Entwicklung entsprechender Module, gelöst werden, die im Raum, ohne zusätzlich Platz zu beanspruchen gefügt werden können. Die Module sollen medialen Kontakt / Statik / Wärmedämmung in einem Sandwichverband in sich vereinen.

Die Grundlage hierzu bilden u.a. die Ergebnisse des Projektes „Grundlegende Weiterentwicklung zum Werkstoff- und Bauteilverhalten von GFK-Speichern“^[016?], um die Grundlagen und Festlegungen zu den erforderlichen Materialkennwerten und die Erreichung der EU-Zulassung für die Anwendung im Wärmespeicherbau zu erreichen. Im Ergebnis sind die Grundlagen gelegt für die sich anschließende Modulentwicklung.

Im Vorfeld wurde eine umfangreiche Literatur-, Patent- und Marktrecherche durchgeführt (s. II.1/AP 2). Ergebnis ist die Formulierung eines Konzeptes mit der Zielgröße „optimierter Wärmespeicher“ (Kombispeicher) mit deutlich verbesserten Gebrauchseigenschaften zur maximal möglichen Ausnutzung der vorhandenen Aufstell-/ Raumbedingungen im Altbau, z.B. ohne Einschränkung der vorhandenen Räumlichkeiten durch geforderte Montagefreiräume oder durch statisch bedingte Außentragekonstruktionen, keine Gewichtseinschränkungen (leichte Komponenten) und der Möglichkeit des Transportes in den Aufstellraum über beengte Treppen und durch schmale Türen.

Um größere Solarspeicher / Kombispeicher in Gebäude mit eingegrenzten Zugangsbedingungen im Zuge der energetischen Altbauanierung einzubringen, haben sich aktuell am Markt folgende Möglichkeiten / Verfahren etabliert, bzw. sind in Vorbereitung:

- (1) Stahlspeicher (kellergeschweißt):
Firmen Jenni/Schweiz, ThüSolar/Rudolstadt
- (2) drucklose Kunststoffspeicher
Firmen Haase/Großröhrsdorf, F-Save/Kassel, energie.depot/Radeberg
- (3) Entwicklung eines modularen Speichersystems Fa. CONSOLAR / ITW
Stuttgart (Modularer Warmwasser-Speicher aus ovalen Einzelmodulen)
- (4) Wärmespeicher 2-Max Fa. EBITSCH Energietechnik GmbH, Zapfendorf
Der Speicher ist zur Aufstellung im Freien / im Keller und im Erdreich gedacht.

Eine Bedarfsrecherche im deutschsprachigem Raum ergab eine Bedarfsannahme für Wärmespeicher nach diesem Konzept im Wärmespeichermarkt.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektbearbeitung erfolgte für TP 1 durch die Arbeitsgruppe „Regenerative Energien“ im Institut für Thermo- und Fluidodynamik an der TU Ilmenau und TP 2 durch energiedepot Radeberg, wobei die Projektkoordinierung durch die TU Ilmenau erfolgte. In die Projektbearbeitung wurden einbezogen Prof. Knauer ILL e.V. Schönbrunn (werkstoffwissenschaftliche, konstruktive und festkörpermechanische Berechnungen und Ergebnisse), Ingenieur-Büro Dr. Wagenknecht Berlin (spezielle FEM-Berechnungen und – Darstellungen für die Behälterwandungen und den gefügten Gesamtbehälter), VKA Verbundwerkstoff – und Kunststoffanwendungstechnik GmbH Schönbrunn (Herstellung aller Module einschließlich des Einstiegsmoduls nach Vorgabe), Rinn-Creativ Plastics Wümbach (Herstellung der Urformen und der Verbindungsdübel), va-Q-tec Kölleda (VIP-Paneele als Einsätze für die Versuchsmodule V2 und V3 zur Reduzierung des Wärmedurchganges), GBneuhaus GmbH Neuhaus (Versuchsreihen zur Möglichkeit der Wasserdampf-Diffusionsreduzierung durch Nano-Beschichtung der medienberührenden Modulflächen) u.a.

Ferner wurden zugängliche Datenbanken (Materialkennwerte, etc.) genutzt und sowohl Marktrecherchen als auch Patentrecherchen erstellt bzw. Informationen von zugänglichen genutzt.

Das Projekt wurde im Rahmen der Arbeiten der Expertengruppe der beiden Verbundpartner und deren Nachauftragnehmer in sehr guter Zusammenarbeit bewerkstelligt. Mit speziellen FEM-Berechnungen und –Darstellungen für die Behälterwandungen wurde das Ingenieurbüro Dr. Ing. Wagenknecht in Berlin beauftragt. Im Laborversuch und der Ergebnisaus- und Bewertung konnte die Plausibilität der theoretisch ermittelten und für die Konstruktion vorgegebenen Werte bestätigt und optimiert werden und entsprechende Vorgaben und Angaben für Vorschläge zur Machbarkeit einer Serienfertigung im Verwertungsplan getroffen werden.

Die Arbeitsfortschritte wurden durch Zwischenberichte der beteiligten Partner und in Arbeits-/ Projekttreffen fortgeschrieben und die jeweils weitere Vorgehensweise festgelegt.

I.6 Kurzfassung des Schlussberichtes

Der vorliegende Bericht beinhaltet die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Modularer Recht-Eck-Wärme-Speicher aus Faserverbundwerkstoffen-GFK“, TP1 & TP2 (FKZ 0325970A & 0325970B), welches von Juli 2013 bis Juni 2015 durchgeführt wurde.

Hervorzuhebende Inhalte des Forschungsvorhabens sind nachfolgend aufgeführte Arbeitspakete:

(AP 01)

Projektmanagement / Zwischenberichte / Abschlussbericht / Verwertungsplan

Verantwortlich für das Projektmanagement war der Verbundpartner, TU Ilmenau. Die Themenarbeit war straff organisiert und wurde in enger, konstruktiver und kollegialer Zusammenarbeit umgesetzt.

(AP 02)

Recherchen / Patent- und Marktanalysen

Bei den Arbeiten am FE-Thema wurde nach vergleichbaren Konzepten recherchiert und dabei speziell die Speicher der Firmen Fsave, Kassel, Bunksolar, Allicante/Spanien, Haase, Großröhrsdorf und energie.depot Radeberg gefunden und analysiert. Darüber hinaus wurden weitere Veröffentlichungen in die Patent-Recherche einbezogen:

- | | | |
|-----|--------------------------------------|--|
| (1) | DE 1904628 A (Fa. Linde) | (zylindrischer Behälter mit integrierter Dämmung, Montage von außen) |
| (2) | DE 202010017056 U1 (Fa. Bosch) | (Rahmenkonstruktion wie Flexsave) |
| (3) | US 5668922 A (private Erfinder/USA) | (kleiner Trinkwassertank aus Stahl, bestehend aus 2 Halbschalen) |
| (4) | DE 102008036669 A1 (Fa. Flexsave) | (Rahmenkonstruktion mit Innenhülle) |
| (5) | DE 19806534 C1 (privater Erfinder/D) | Erdtank mit Isolierschalen |
| (6) | ikz-Energy, | 30.09.2011, Solarspeicher mit IKEA.Prinzip (Fa- Fsave) |
| (7) | Flexsave Vario (Fa. Fsave) | |
| (8) | Haase Wärmespeicher T 400 | (GFK-Bausatz mit Isolierelementen, Montage von außen) |

(AP 03)

Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation Speicherhülle und Verbindungstechnik

Zu erreichende Zielstellungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern
2. Temperaturbeständigkeit bis 95°C
3. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 35 ... (später) 50m³
4. U-Wert 0,11 W/m²
5. 20% Effizienzzuwachs bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
6. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung

(AP 04)

Herstellung Formen / Segmente / Laborspeicherhülle

Die Herstellung der Arbeitsformen und Einzelteile für die Laborspeicherhülle erfolgte im Handlaminier-Verfahren beim Unterauftragnehmer VKA Schönbrunn erforderte Anpassungen bezüglich der Verbindungstechnik der einzelnen Module. Die Urformen wurden mit geringst möglichem Aufwand zur Abformung von einem Satz Bauteile für einen Laborspeicher ausgelegt.

(AP 05)

Erstmontage Laborspeicher / Umbauten

Zu erreichende Zielstellungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinneren
2. Temperaturbeständigkeit bis 95°C
3. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 35m³ (später 50 m³)

(AP 06)

Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation / thermische Speicherbe- und Entladung

Zu erreichende Zielstellungen:

1. stabile Schichtung in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien
2. 20% Effizienzzuwachs bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
3. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

(AP 07)

Herstellung thermische Speicherbe- und Entladung in Varianten

Aufgrund der drucklosen Konstruktion des Laborspeichers ist die Entkopplung der mit Druck beaufschlagten Be- und Entlade-Heizkreise vom Speicher erforderlich.

(AP 08)

Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation Funktionsmodule Anforderungen

1. stabile Schichtung in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien
2. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

(AP 09)

Herstellung Funktionsmodule in Varianten

Im Funktionsmodul sind alle erforderlichen Anschlüsse kompakt angeordnet:

Befüllung

Entleerung

Be-/Entlüftung (druckloser/offener Speicher)

Überlauf (druckloser/offener Speicher)

Füllstandanzeige

Anschlüsse für BES

Das Funktionsmodul wurde in mehreren Ausführungen konzipiert

(AP 10)

Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation / Einstiegsmodul

Anforderungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern
2. Begehbarkeit
3. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

(AP 11)

Herstellung Einstiegsmodul

Für die Mess- und Prüfvorgänge war die Begehbarkeit des Speichers zwingend. Dabei wurde der Zugang auf dem Dach montiert, um Sichtkontrollen auch im gefüllten Zustand zu ermöglichen.

Die Abmessungen des Einstiegsmoduls wurden mit der konstruktiven Gestaltung der Be- und Entladeeinrichtungen abgeglichen. So ist in unterschiedlichen Phasen der Messversuche eine interne Kontrolle sowie ein Austausch der Be- und/oder Entlade-Elemente jederzeit möglich.

(AP 12)

Konzeption Laborversuchsstand / Realisierung

Zur Vermessung des „Modular aufgebauten GFK-Wärmespeichers“ wurde ein im Institut TFD an der TU Ilmenau vorhandener Speicherteststand modifiziert und den spezifischen Betriebsbedingungen eines drucklosen Wärmespeichers angepasst. Zur Durchführung der im Forschungsprojekt erforderlichen Prüfungen wurde zusätzlich eine Messeinrichtung zur kontinuierlichen Temperaturmessung und Verteilung an den Innenwänden am BES und zur Beurteilung des Dehnungsverhaltens des Faserverbundmaterials unter Betriebs- und Grenzbedingungen beschafft, installiert und mit Unterstützung der Hersteller in Betrieb genommen. Diese Messeinrichtung wird nach Projektende an der TU Ilmenau im Fachgebiet TFD weiter wissenschaftlich genutzt.

(AP 13)

Erstellung des Versuchsprogramms

Die Ergebnisse sind Grundlage zur weiteren Umsetzung der Entwicklung in die Machbarkeit und Vorbereitung einer Serienproduktion. Ziel muss es sein, die Warmhalteverluste so zu minimieren, dass die Anforderungen an eine Energieeffizienzklasse A bzw. A+ erfüllt werden.

(AP 14)

Monitoring und Ergebnisbewertung / Material- und Funktionsprüfungen / Projektmanagement

Zur Messung der Temperaturen im Laborspeicher sind insgesamt 14 Temperaturfühler verbaut. Sechs davon sind zusammengefasst zu einer Messlanze und messen das vertikale Temperaturprofil in der Mitte des Speichers in unmittelbarer Nähe der Auslässe des Schichtenladers. Die anderen acht sind in zwei Gruppen, waagrecht auf unterschiedlicher Höhe, angeordnet. Sie messen das horizontale Temperaturprofil von der Mitte des Speichers bis zur Speicherwandung. So ist es möglich, die Ausbreitung des Temperaturfeldes im Speicher möglichst genau wiederzugeben. Die Erwartungen und im Pflichtenheft vorausgerechneten Werte wurden weitestgehend erreicht.

(AP 15)

Lösungsmöglichkeiten zur Wasserdampf-Diffusions-Dichtheit der medienumfassenden Faserverbundhülle

Da eingedrungene Feuchtigkeit (Wasserdampf-Diffusion) in die Einzelmodule während der Nutzungsdauer des Speichers nicht wieder aus dem Modulinneren eliminiert werden kann, ist die Transmissionsrate deutlich durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. Untersucht wurden:

Inliner

Spezielle Beschichtung der medienberührenden Wand

Modifizierung der Faserverbundstruktur

Nano-Beschichtung der medienberührenden Wand durch geeignete Beschichtungen

Im Ergebnis konnte durch ausgewählte Verfahren eine bedeutende Senkung der Transmissionsrate erreicht werden.

I.7 Ergebnisse (Zusammenfassung)

Die Erwartungen und im Pflichtenheft vorausgerechneten Werte für Konstruktion, Realisierung und messtechnische Überprüfung und Bewertung des Laborspeichers wurden erreicht.

So konnte auf Basis der Messwerte, eine Verringerung der Wärmeleitung durch die Speicherwand, bei teilweisem Ersatz der reinen PUR-Dämmung durch Vakuumpaneele, um 60 % von 0,183 W/m²K auf 0,072 W/m²K nachgewiesen werden.

Die gemessene Verformung der Speicherwände durch die Temperaturbelastung bis 90 °C, bei unterschiedlichem innerem Aufbau der Dämmung, entsprach in allen Fällen den vorausgerechneten Werten. Somit wurden die zulässigen Festigkeitswerte durch die aufgetretenen Spannungen nicht überschritten.

Der berechnete Wert der Speicherzeitkonstante von 38 Tagen (Anzahl Tage bis zum Abfall der anfänglichen Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur um ca. 63 %) konnten durch die Messungen nicht bestätigt werden. Gründe dafür lagen zum einen in den vorhandenen Wärmebrücken der Verbindungen und Anschlüsse des Laborspeichers und zum anderen an die witterungsabhängige Aufstellung im Freien.

Die Ergebnisse sind Grundlage zur weiteren Umsetzung der Entwicklung in die Machbarkeit und Vorbereitung einer Serienproduktion. Ziel muss es sein, die Warmhalteverluste so zu minimieren, dass die Anforderungen an eine Energieeffizienzklasse A bzw. A+ erfüllt werden.

Gemäß Verordnung (EG) Nr. 814/2013 der Kommission vom 02. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/RG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern, sind ab dem 26. September 2015 Speicher bis zu einer Größe von 2000 l in eine Energieeffizienzklasse einzuordnen und zudem müssen Speicher bis zur maximalen Größe von 500 l mit einem Energieeffizienzlabel gekennzeichnet sein. Größere Speicher als 2000 l, wie der hier untersuchte 4 m³ Laborwärmespeicher, sind zur Zeit nicht inbegriffen. Es kann jedoch auf eine mögliche, erreichbare Energieeffizienzklasse entsprechend der Verordnung hingewiesen werden.

Die Eingruppierung in eine der Klassen setzt die Bestimmung der Warmhalteverluste voraus. Für jede Energieeffizienzklasse gelten auf Basis des Speichervolumens bestimmte minimale und maximale Warmhalteverluste. Die Eingruppierung erfolgt durch Vergleich des Warmhalteverlustes S mit diesen Minimal- und Maximalwerten der einzelnen Energieeffizienzklassen.

Grundlage der Berechnungen bilden die spezifischen Wärmeleitungs- bzw. Widerstandsbeiwerte der einzelnen Schichten der Speicherwände. Daraus können unter Zugrundelegung einer Temperatur-Differenz, lt. EU-Verordnung 814/2013 von $\Delta T = 45 \text{ K}$ (innen 65 °C, außen 20 °C), der Warmhalteverlust S berechnet werden.

Nachfolgend sind zwei Gegenüberstellungen aufgeführt. Ein Speicher mit einer Isolierung aus reinem PUR-Schaum und ein Speicher bei dem die PUR-Isolierung in allen Seitenwänden, dem Deckel und dem Boden teilweise durch Vakuumpaneele ersetzt wurde.

Besonders hoch zu bewerten ist der erreichte Standard hinsichtlich der Dämmung des MRW. Die mittlerweile veröffentlichte Berechnungsweise für das Energielabel von Wärmespeichern ließe ein Label A⁺ für den MRW zu.

Die Herstellung der einzelnen Module hat eine Vielzahl von Ergebnissen gebracht, die bei einer künftigen Serienproduktion von Speichern dieser neuen Bauart zu berücksichtigen sind. Das betrifft sowohl die Fertigungsverfahren für die Module der Speicherhülle als auch die Konstruktionen und Technologien zur Herstellung und Montage des BES.

Der Teilbericht 2 (TP2) enthält alle werkstoffwissenschaftlichen, konstruktiven und festkörpermechanischen Ergebnisse, die zur Realisierung und erfolgreichen Nachweisführung eines Modular aufgebauten Rechteck – Wärmespeicher (4m³) notwendig waren sowie eine Weiterentwicklung ermöglichen.

Im Einzelnen wird die angewandte:

Konstruktionstechnik der Speicherentwicklung
Verbundwerkstoffentwicklung samt der Laminatplanung für die Speicherhülle und variierte Wandmodule sowie Einstiegsmodule
Hinweise zur Fertigungsüberwachung, Montage und Nutzung
FEM-Berechnung der Baugruppen (5 Teilberichte)

II. Eingehende Darstellungen - Teilberichte

Bemerkung / Erläuterung: Die ausführliche Beschreibung des Inhaltes der einzelnen Arbeitspakete innerhalb der eingehenden Darstellung wurde durch die jeweils Verantwortlichen erstellt / verfasst und entsprechend in den Abschlussbericht eingefügt.

II.1 Teil- Abschlussbericht – TP 1 TU Ilmenau – Projekt-Management und eingehende Darstellung des modular aufgebauten Recht-Eck-Wärme-Speichers als Laborspeicher

Erstellt durch Dipl.-Ing. Wolfgang Günther und Dipl.-Ing. Jürgen Bühl

| Teil-Inhaltsverzeichnis | | |
|-------------------------|--|------------|
| II. | Eingehende Darstellung / Teilberichte | 018 |
| II.1 | Teilbericht 1 (TP 1) TU Ilmenau – Projekt-Management und eingehende Darstellung des modular aufgebauten Recht-Eck-Wärme-Speichers als Laborspeicher | 018 |
| II.1.0 | Arbeitspakete AP 1 & AP 2 | 020 |
| II.1.1 | Arbeitspaket 3 – Auslegung und Berechnung zur Speicherhülle | 020 |
| II.1.1.1 | Darstellung der unterschiedlichen Wandaufbauten und Berechnung der Wärmedurchgangszahlen für den 4 m ³ Laborspeicher | 021 |
| II.1.1.2 | Berechnung der zu erwartenden Speicherzeitkonstanten | 026 |
| II.1.2 | AP 4 – Erstellung der Konstruktionszeichnungen in Zusammenarbeit mit Prof. Knauer ILL und Herrn Förster ed als Grundlage für den Formenbau | 029 |
| II.1.2.1 | Darstellung und Zusammenbau des modularen Recht-Eck-Wärme-Speichers | 029 |
| II.1.2.2 | Eckmodule | 030 |
| II.1.2.3 | Bodenmodul | 031 |
| II.1.2.4 | Deckelmodul | 031 |
| II.1.2.5 | Seitenwandmodule | 031 |
| II.1.3 | Arbeitspakete 6 & 7 & 9 bis 11 – Variantenvergleich verschiedener innerer Aufbauten der Seitenwandmodule sowie unterschiedlicher Ausführungsarten der Wanddurchführungen und des Be- und Entladesystems | 033 |
| II.1.3.1 | Seitenwandmodule | 033 |
| II.1.3.2 | Medienanschlüsse des Be- und Entladesystems | 034 |
| II.1.3.3 | Be- und Entladesystem des Laborspeichers | 037 |
| II.1.4 | Arbeitspakete 5 & 8 & 12 – Konzipierung und Realisierung des Versuchsstandes zum Laborspeichertest | 040 |
| II.1.4.1 | Aufstellung des Laborspeichers an der TU Ilmenau und hydraulische Einbindung des Speichers in den vorhandenen Speicherteststand | 040 |
| II.1.4.2 | Technische Beschreibung des Versuchsstandes | 042 |
| II.1.4.3 | Installation der Messtechnik im Laborspeicher | 045 |
| II.1.5 | Arbeitspakete 13 & 14 - Versuchsdurchführung und Messauswertung | 047 |
| II.1.5.1 | Messungen zur Druck- und Temperaturfestigkeit | 047 |
| II.1.5.1.1 | Druckbelastung (Hydrostatischer Druck) | 047 |
| II.1.5.1.2 | Verformung bei dynamischer Belastung durch Druck und Temperatur | 048 |
| II.1.5.2 | Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Speicherwände | 051 |
| II.1.5.3 | Ermittlung der Speicherzeitkonstanten (V1 bis V3) | 055 |
| II.1.5.4 | IR-Wärmebildaufnahmen während der Versuchsdurchführung | 058 |
| II.1.5.5 | Bestimmung der Wasserdampf-Permeabilität | 064 |
| II.1.5.6 | Temperaturprofil und Leistung bei Be- und Entladung des Laborspeichers | 066 |
| II.1.5.6.1 | Beladung über den (Solar-) Schichtenlader | 066 |
| II.1.5.6.2 | Beladung über einen Wellrohr-Wärmeübertrager | 072 |
| II.1.5.6.3 | Entladung über einen Wellrohr-Wärmeübertrager | 073 |
| II.1.6 | Zusammenfassung und Ausblick (TP 1) | 075 |

II.1 Teilbericht 1 (TP 1) TU Ilmenau – Projektmanagement und eingehende Darstellung des modular aufgebauten Recht-Eck-Wärme-Speichers als Laborspeicher

II.1.0 Arbeitspakete AP 1 & AP 2

Auf der Grundlage der Arbeitspaketinhalte (AP 1 bis 16) und der Zeitschiene entsprechend Balkenplan wurden die Arbeitsinhalte präzisiert und in den regelmäßig stattfindenden Projekttreffen organisiert und koordiniert. Der erreichte Arbeitstand wurde jeweils durch eingereichte Sachstands-Zwischenberichte der Projektpartner dokumentiert. In Vorträgen und Veröffentlichungen wurde die Projektentwicklung vorgestellt und vom erreichten Arbeits- und Erkenntnisstand informiert. In intensiver Zusammenarbeit aller Beteiligten erfolgte die Erarbeitung des Abschlussberichtes und in dessen Ergebnis die Empfehlung in Fortführung des Verwertungsplanes durch entsprechende Weiterentwicklung in Konstruktion und Fertigungsverfahren und der Gewinnung eines Herstellers eine mögliche Serienfertigung anzustreben.

Bei den Arbeiten am FE-Thema wurde nach vergleichbaren Konzepten recherchiert und dabei speziell die Speicher der Firmen Fsave, Kassel, Bunksolar, Allicante/Spanien, Haase, Großröhrsdorf und energie.depot, Radeberg analysiert. Darüber hinaus wurden weitere Veröffentlichungen in die Patent-Recherche einbezogen:

- | | |
|--|--|
| (1) DE 1904628 A (Fa. Linde) | (zylindrischer Behälter mit integrierter Dämmung, Montage von außen) |
| (2) DE 202010017056 U1 (Fa. Bosch) | (Rahmenkonstruktion wie Flexsave) |
| (3) US 5668922 A (private Erfinder/USA) | (kleiner Trinkwassertank aus Stahl, bestehend aus 2 Halbschalen) |
| (4) DE 102008036669 A1 (Fa. Flexsave) | (Rahmenkonstruktion mit Innenhülle) |
| (5) DE 19806534 C1 (privater Erfinder/D) | Erdtank mit Isolierschalen |
| (6) ikz-Energy, 30.09.2011, Solarspeicher mit IKEA-Prinzip (Fa- Fsave) | |
| (7) Flexsave Vario (Fa. Fsave) | |
| (8) Haase Wärmespeicher T 400 | (GFK-Bausatz mit Isolierelementen, Montage von außen) |

Die unter (1) bis (8) genannten Erfindungen haben partiell gemeinsame Ansatzpunkte mit dem MRW, insbesondere dass bei (1), (2), (4), (6), (7) und (8) von einem Bausatz kleiner Elemente ausgegangen wird, um durch deren Montage große Speicher bei gleichzeitig geringen Transportaufwendungen zu errichten. Alle genannten Erfindungen benötigen Montageraum an der Außenseite des Korpus, gleiches gilt für die unterirdische (nicht frei stehende) Erfindung nach (5).

Die Erfindung nach (3) ist nur in geringer Auswahl flexibel, sich an vorhandene Räumlichkeiten anzupassen.

Alle genannten Erfindungen mit Ausnahme von (1) gliedern ihren Bausatz in tragende, dichtende und dämmende Elemente, wobei bei (1) die Verknüpfung von tragenden und isolierenden Schichten durch jeweils vorgefertigte Formteile entsteht.

II.1.1 AP 3 - Auslegung und Berechnung zur Speicherhülle

Auf Basis der konzeptionellen Vorgaben aus vorangehenden Studien und den Pflichtenheftwerten aus dem Antrag zum vorliegenden Projekt wurde ein Gesamt-(Modul)-Wanddicke (Innenwand + innenliegende Dämmung + Außenwand) der Speicherwand von 160 mm vereinbart. Diese setzt sich aus einer inneren und äußeren Laminatschicht von 4 bis 5 mm sowie einer dazwischenliegenden Füllung aus PUR-Hartschaum zusammen. Im Zuge

einer Verbesserung der Wärmedämmung waren Varianten zu prüfen, die den PUR-Kern teilweise durch eine schlechter Wärme leitenden Schicht ersetzen.

Dazu wurde vereinbart eine Seitenwand so zu gestalten, dass diese auswechselbar ist, um das unterschiedliche Wärmedämmverhalten zu messen und bewerten zu können. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes galt es deshalb eine Abschätzung, auf die zu erwartenden Ergebnisse abzugeben.

II.1.1.1 Darstellung der unterschiedlichen Wandaufbauten und Berechnung der Wärmedurchgangszahlen für den 4 m³ Laborspeicher

In der Abb. II.1.1 sind die verschiedenen Wandaufbauten sowie die zugrunde liegenden spezifischen Größen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit, wie Wanddicke (s) und spezifische Wärmeleitfähigkeit (λ), für drei Wandtypen dargestellt.

Beim Typ I handelt es sich um die grundlegende Bauart, wobei die isolierende Füllung aus einem PUR-Hartschaumkern besteht. Anzumerken ist, dass der PUR-Kern nicht nur als Isolierschicht dient, sondern auch als wesentlicher Bestandteil ausschlaggebend für die Festigkeit der gesamten Wand ist.

Beim Typ II ist ein Teil des PUR-Hartschaumkerns durch eine zweite Isolierschicht, bestehend aus Vakuumpaneeelen, ersetzt. Um Beschädigungen an der Deckfolie der Vakuumpaneele zu vermeiden, wurden beide Seiten mit einer Schicht aus Mineralwolle versehen. Wie die Berechnung zeigt, sinkt hierbei die Wärmeleitfähigkeit der Wand auf ca. 30 % des ursprünglichen Wertes.

Der Typ III ist eine Abwandlung des Typs II. Hier wurde zu Testzwecken, auf die schützende Mineralwollschichten verzichtet und die Gesamtdicke der Vakuumpaneele von 40 auf 60 mm erhöht. Hierbei ergibt sich gegenüber dem Typ I ein nochmals verbesserter Wärmeleitwiderstand, der die Wärmeleitfähigkeit auf ca. 1/5-tel des Ausgangswertes sinken lässt.

Ausgehend von den berechneten Wärmeleitwiderständen kann eine Abschätzung der zu erwartenden Messwerte erfolgen. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass der GFK-Wärmespeicher im Freien aufgestellt wurde und dass nur eine der vier Seitenwände austauschbar gestaltet wurde.

Zur Berechnung der Wärmeverluste wurden die beiden Wärmeübergänge, des Wassers auf der Innenseite und der Luft auf der Außenseite der Wandung, zur Bestimmung des gesamten Wärmedurchgangs mit einbezogen. Des Weiteren wurde die Wärmeabgabe des Bodenmoduls an das Erdreich (Betonplatte) gesondert berechnet.

Die nachfolgenden Abb. II.1.2 bis II.1.4 zeigen als Beispiel die Berechnungen zum Wärmeverlust des gesamten GFK-Laborspeichers bei Einsatz des Seitenwandmoduls vom Typ III.

Seitenwand-1 (Typ I) mit reiner PUR-Isolierung

| Komponenten der Struktur | Stärke s [m] | λ [W/mK] | $R = s / \lambda$ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------------------|------------------|---------------------|---|----------------------|
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| PUR-Hartschaum | 0,150 | 0,030 | 5,000 | 2 |
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 3 |
| Wärmeleitwiderstand der Wand | $\Sigma R = 1/U$ | | 5,033 | [m ² K/W] |
| Wärmeleitfähigkeit der Wand | $U = 1/R$ | | 0,199 | [W/m ² K] |

Seitenwand-1 (Typ II) mit PUR-Isolierung und Vakuumpaneelen 40 mm

| Komponenten der Struktur | Stärke s [m] | λ [W/mK] | $R = s / \lambda$ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------------------|------------------|---------------------|---|----------------------|
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| PUR-Hartschaum | 0,050 | 0,030 | 1,667 | 2 |
| GFK-Laminat | 0,004 | 0,300 | 0,013 | 3 |
| Mineralwolle | 0,028 | 0,040 | 0,700 | 4 |
| Vakuumpaneel | 0,040 | 0,003 | 13,333 | 5 |
| Mineralwolle | 0,028 | 0,040 | 0,700 | 6 |
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 7 |
| Wärmeleitwiderstand der Wand | $\Sigma R = 1/U$ | | 16,447 | [m ² K/W] |
| Wärmeleitfähigkeit der Wand | $U = 1/R$ | | 0,061 | [W/m ² K] |

Seitenwand-1 (Typ III) mit PUR-Isolierung und Vakuumpaneelen 60 mm

| Komponenten der Struktur | Stärke s [m] | λ [W/mK] | $R = s / \lambda$ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------------------|------------------|---------------------|---|----------------------|
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| PUR-Hartschaumkern | 0,045 | 0,030 | 1,500 | 2 |
| Vakuumpaneel | 0,060 | 0,003 | 20,000 | 3 |
| PUR-Hartschaumkern | 0,045 | 0,030 | 1,500 | 4 |
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 5 |
| Wärmeleitwiderstand der Wand | $\Sigma R = 1/U$ | | 23,033 | [m ² K/W] |
| Wärmeleitfähigkeit der Wand | $U = 1/R$ | | 0,043 | [W/m ² K] |

Abb. II.1.1 Wandaufbauten, Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wand

Berechnungsformeln

$$R = \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n} \quad U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$

Wärmeübergangswiderstände der Luft nach EN ISO 6946

| Widerstandsbeiwert | Richtung des Wärmestroms | | | ME |
|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------|----------------------|
| | aufwärts | horizontal | abwärts | |
| innen R _{si} | 0,10 | 0,13 | 0,17 | [m ² K/W] |
| außen R _{se} | 0,04 | 0,04 | 0,04 | [m ² K/W] |

NB: bei hinerlüfteten Bauteilen wird R_{se} = R_{si} gesetzt

NB: bei erdanliegenden Bauteilen wird R_{se} = 0 gesetzt

Wärmeübergangswiderstand von ruhendem Wasser

| Ruhendes Wasser | gewählt | ME |
|---|--------------|----------------------|
| Wärmeübergangszahl zwischen 250 ... 700 | 500,00 | [W/m ² K] |
| Wärmeübergangswiderstand | 0,002 | [m ² K/W] |

Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten

| Komponenten der Struktur | Stärke s [m] | λ [W/mK] | R = s / λ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------------------------|-----------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Widerstandsbeiwert (innen, Wasser) | | | 0,002 | R _{si} |
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| PUR-Hartschaumkern | 0,045 | 0,030 | 1,500 | 2 |
| Vakuumpaneel | 0,060 | 0,003 | 20,000 | 3 |
| PUR-Hartschaumkern | 0,045 | 0,030 | 1,500 | 4 |
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 5 |
| Widerstandsbeiwert (außen, Luft) | | | 0,040 | R _{se} |
| | | | 1/U = Σ R | 23,075 [m ² K/W] |
| U = | | 0,043 | [W/m²K] | |

Abb. II.1.2 Berechnung der Wärmedurchgangszahl U der Wand vom Typ III

Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Bodenplatte

(gemäß DIN 13370)

Berechnungsformeln

Charakteristisches Bodenplattenmaß

$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P}$$

| | | | |
|--------|-----|-------|-------------------|
| Fläche | A = | 13,75 | [m ²] |
| Umfang | P = | 16,00 | [m] |

| | | |
|------|------|-----|
| B' = | 1,72 | [m] |
|------|------|-----|

Berechnung Wärmedurchlasswiderstandes R_f

| Komponenten der Struktur | Stärke s [m] | λ [W/mK] | R = s / λ [m ² K/W] | Nr. |
|--------------------------|-----------------|-------------|-----------------------------------|-----|
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| PUR-Hartschaum | 0,150 | 0,030 | 5,000 | 2 |
| GFK-Laminat | 0,005 | 0,300 | 0,017 | 3 |
| Armierter Beton | 0,200 | 2,500 | 0,080 | 4 |

| | | | |
|-------|-----------|-------|----------------------|
| 0,360 | 1/U = Σ R | 5,113 | [m ² K/W] |
|-------|-----------|-------|----------------------|

Wirksame Gesamtdicke der Bodenplatte

$$d_t = w \cdot \lambda \cdot (R_{si} + R_f + R_{se})$$

| | | | |
|---------------------|-------------------|-------|----------------------|
| Dicke Bodenplatte | w = | 0,36 | [m] |
| W-Leitzahl Erdreich | λ = | 1,50 | [W/(m·K)] |
| W-Durchlass innen | R _{si} = | 0,002 | [m ² K/W] |
| W-Durchlass Platte | R _f = | 5,113 | [m ² K/W] |
| W-Durchlass Platte | R _{se} = | 0,040 | [m ² K/W] |

| | | |
|------|------|-----|
| dt = | 2,78 | [m] |
|------|------|-----|

Berechnung bei: $d_t < B'$ $U = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B'} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t} + 1 \right)$

$$d_t > B' \quad U = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t}$$

| | | |
|-----|-------|----------------------|
| U = | 0,420 | [W/m ² K] |
|-----|-------|----------------------|

Abb. II.1.3 Berechnung der Wärmedurchgangszahl U des Bodenmoduls (Typ I)

Überschlägliche Berechnung der Wärmeverluste

Oberfläche des Bodenmoduls

| a [m] | b [m] | a x b [m ²] | Anzahl | Fläche [m ²] | U-Wert [W/m ² K] | Spez. Verlust A x U = [W/K] |
|-------|-------|-------------------------|--------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1,90 | 1,90 | 3,61 | 1 | 3,61 | 0,420 | 1,517 |

Oberfläche des Speichers ohne Boden

| a [m] | b [m] | a x b [m ²] | Anzahl | Fläche [m ²] | U-Wert [W/m ² K] | Spez. Verlust A x U = [W/K] |
|-------|-------|-------------------------|--------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1,90 | 1,90 | 3,61 | 5 | 18,05 | 0,197 | 3,556 |

Oberfläche des Bereichs mit Vakuumpaneelen

| a [m] | b [m] | a x b [m ²] | Anzahl | Fläche [m ²] | U-Wert [W/m ² K] | Spez. Verlust A x U = [W/K] |
|-------|-------|-------------------------|--------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1,17 | 1,17 | 1,37 | 1 | 1,37 | 0,043 | 0,059 |

Oberfläche des Speichers ohne Boden und ohne Bereich der Vakuumpaneele

| Fläche [m ²] | U-Wert [W/m ² K] | Spez. Verlust A x U = [W/K] |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 16,68 | 0,197 | 3,286 |

Temperaturen

| T _i [°C] | T _a [°C] | ΔT [K] |
|---------------------|---------------------|--------|
| 65,00 | 20,00 | 45 |

Vergleich der Wärmeverluste

| nur PUR [W] | PUR+Vakuum [W] | Differenz [%] |
|-------------|----------------|---------------|
| 228,3 | 218,8 | 4,1% |

Abb. II.1.4 Berechnung und Vergleich der Wärmeverluste

Wie in Abb. II.4 zu erkennen ist, verringert sich unter den gegebenen Versuchsbedingungen, bei Austausch **eines** Seitenwandmoduls vom Typ I gegen eines des Typs III, der Wärmeverlust des GFK-Laborspeichers um ca. 4 %.

Diese geringe Verbesserung ist der Tatsache geschuldet, dass von der gesamten Außenfläche des Laborspeichers von ca. 21,66 m² nur 1,37 m² mit Vakuumpaneelen versehen sind.

Geht man davon aus, den gesamten Speicher mit einem Wandaufbau gemäß Typ III auszurüsten, würde die Energieeinsparung insgesamt ca. 70 % betragen.

II.1.1.2 Berechnung der zu erwartenden Speicherzeitkonstanten

Die Speicherzeitkonstante ist ein Grundbegriff der Wärmespeicherung und drückt das Verhältnis zwischen der Speicherkapazität und den Speicherverlusten aus. Sie wird wie folgt berechnet:

$$\tau = \frac{V \cdot \rho \cdot c_p}{\Sigma(U_i \cdot A_i)}$$

Dabei ist:

| | | |
|------------------|---|--------------------|
| $\rho \cdot c_p$ | die spezifische Wärmekapazität von Wasser | [ca. 1,16 kWh/m³K] |
| U | der Wärmedurchgangskoeffizient | [W/m²K] |
| A | die Oberfläche der Speicherhülle | [m²] |
| V | das Volumen des Speichers | [m³] |

Die $\Sigma(U_i \cdot A_i)$ stellt die Summe der spezifischen Verluste in [W/K] der einzelnen Bauteile des Speichers, wie Bodenmodul, Wandmodule ohne bzw. mit Vakuumpaneelen usw., dar.

Zur Bestimmung der Speicherzeitkonstante wird der Wärmespeicher vollständig durchmischt auf eine Anfangstemperatur T_i thermisch aufgeladen und dann der Temperaturabfall gemessen. Die Speicherzeitkonstante τ entspricht genau der Zeit, in der die Temperatur im Speicher T_i um $(1-1/e)$, d. h. um ca. 63 % der Anfangstemperaturdifferenz ($T_i - T_a$) fällt (siehe Abb. II.1.5).

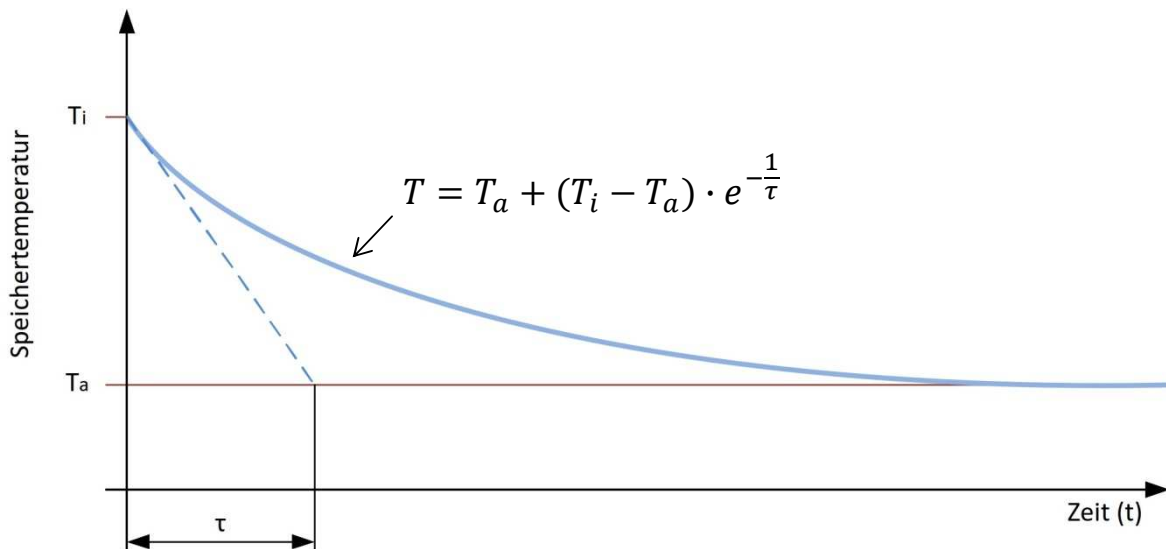


Abb. II.1.5 Speicherzeitkonstante (τ)

In Abb. II.1.6 sind die Ausgangs- und Endwerte der Berechnung zur Speicherzeitkonstante aufgeführt. Die Abb. II.1.7 beinhaltet die grafische Gegenüberstellung aller drei Fälle.

Speicherzeitkonstante

$$\tau = \frac{V \cdot \rho \cdot c_p}{A \cdot U}$$

| | |
|----------------|---------------------------|
| V | 4000 [l] |
| ρ | 1000 [kg/m ³] |
| c _p | 4,18 [kJ/kg K] |

Gesamter Speicher mit PUR

| | | |
|----------------|-------|--------------------|
| modulus (PUR) | A x U | 1,517 [W/K] |
| dicke (PUR) | A x U | 3,556 [W/K] |
| dicke (Vakuum) | A x U | 0,000 [W/K] |
| τ | | 3295923 [s] |
| T _i | | 65 [°C] |
| T _a | | 20 [°C] |
| d | | 38,1 [d] |
| T | | 36,6 [°C] |

Speicher mit Vakuumpaneele (40 mm)

| | | |
|----------------|-------|--------------------|
| modulus (PUR) | A x U | 1,517 [W/K] |
| dicke (PUR) | A x U | 3,286 [W/K] |
| dicke (Vakuum) | A x U | 0,083 [W/K] |
| τ | | 3421840 [s] |
| T _i | | 65 [°C] |
| T _a | | 20 [°C] |
| d | | 39,6 [d] |
| T | | 36,6 [°C] |

Speicher mit Vakuum

| | | |
|----------------|-------|---------------|
| modulus (PUR) | A x U | 1,517 |
| dicke (PUR) | A x U | 3,286 |
| dicke (Vakuum) | A x U | 0,059 |
| τ | | 343850 |
| T _i | | 65 |
| T _a | | 20 |
| d | | 39,8 |
| T | | 36,6 |

| Tagen | [d] | 36,6 | Prozent |
|-------|------|-------|---------|
| 0 | 65,0 | 0,0% | 0,0% |
| 5 | 59,5 | 12,3% | 12,3% |
| 10 | 54,6 | 23,1% | 23,1% |
| 15 | 50,4 | 32,5% | 32,5% |
| 20 | 46,6 | 40,8% | 40,8% |
| 25 | 43,4 | 48,1% | 48,1% |
| 30 | 40,5 | 54,5% | 54,5% |
| 35 | 38,0 | 60,0% | 60,0% |
| 40 | 35,8 | 65,0% | 65,0% |
| 45 | 33,8 | 69,3% | 69,3% |
| 50 | 32,1 | 73,0% | 73,0% |
| 55 | 30,6 | 76,3% | 76,3% |
| 60 | 29,3 | 79,3% | 79,3% |

| Tagen | [d] | 36,6 | Prozent |
|-------|------|-------|---------|
| 0 | 65,0 | 0,0% | 0,0% |
| 5 | 59,7 | 11,9% | 11,9% |
| 10 | 55,0 | 22,3% | 22,3% |
| 15 | 50,8 | 31,5% | 31,5% |
| 20 | 47,2 | 39,6% | 39,6% |
| 25 | 43,9 | 46,8% | 46,8% |
| 30 | 41,1 | 53,1% | 53,1% |
| 35 | 38,6 | 58,7% | 58,7% |
| 40 | 36,4 | 63,6% | 63,6% |
| 45 | 34,4 | 67,9% | 67,9% |
| 50 | 32,7 | 71,7% | 71,7% |
| 55 | 31,2 | 75,1% | 75,1% |
| 60 | 29,9 | 78,0% | 78,0% |

| Tagen | [d] | 36,6 |
|-------|------|------|
| 0 | 65,0 | |
| 5 | 59,7 | |
| 10 | 55,0 | |
| 15 | 50,9 | |
| 20 | 47,2 | |
| 25 | 44,0 | |
| 30 | 41,2 | |
| 35 | 38,7 | |
| 40 | 36,5 | |
| 45 | 34,5 | |
| 50 | 32,8 | |
| 55 | 31,3 | |
| 60 | 30,0 | |

Abb. II.1.6 Berechnung der Speicherzeitkonstanten

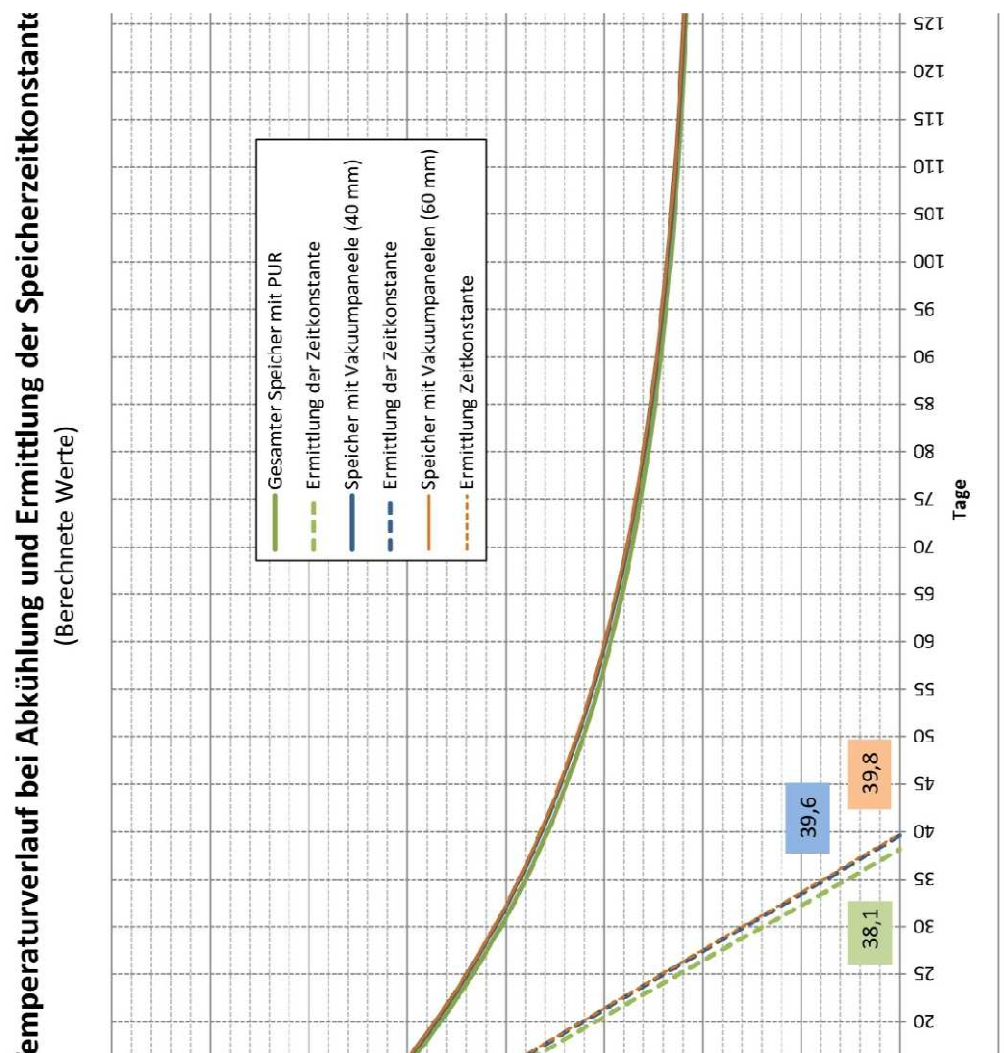


Abb. II.1.7 Gegenüberstellung der Speicherzeitkonstanten

Ausgehend von einer zu erwartenden Verbesserung des Wärmeleitwiderstands des Laborspeichers um ca. 4 %, durch Austausch eines der Seitenwandmodule mit PUR-Kern (Typ I) gegen eines mit Vakuumpaneelen (Typ II bzw. III), zeigt die Abb. II.1.7, dass sich auch die Speicherzeitkonstanten verbessern. So erhöht sich die Speicherzeitkonstante bei den Wandtypen II und III um mindestens 1,5 Tage von 38,1 auf 39,6 bzw. 39,8 Tage.

Wendet man den Wandtyp III für alle Seitenwände inkl. Deckel- und Bodenmodul an, erhöht sich die Speicherzeitkonstante um das 4-fache auf ca. 160 Tage. Hierbei handelt es sich um einen theoretischen Maximalwert. Er setzt eine lückenlose Abdeckung der gesamten Oberfläche des Speichers mittels Vakuumpaneelen ohne jegliche Wärmebrücken voraus. Dies ist allerdings nicht möglich, da bereits die Anschlüsse der Medien führenden Leitungen Wärmebrücken darstellen. Zudem können die Module selbst, aufgrund von Festigkeits- und Fertigungsgründen, nicht frei von Wärmebrücken hergestellt werden.

II.1.2 AP 4 - Erstellen der Konstruktionszeichnungen in Zusammenarbeit mit Prof. Knauer und Herrn Förster als Grundlage für den Formenbau und Fertigung

II.1.2.1 Darstellung und Zusammenbau des modularen Rechteck-Wärmespeichers

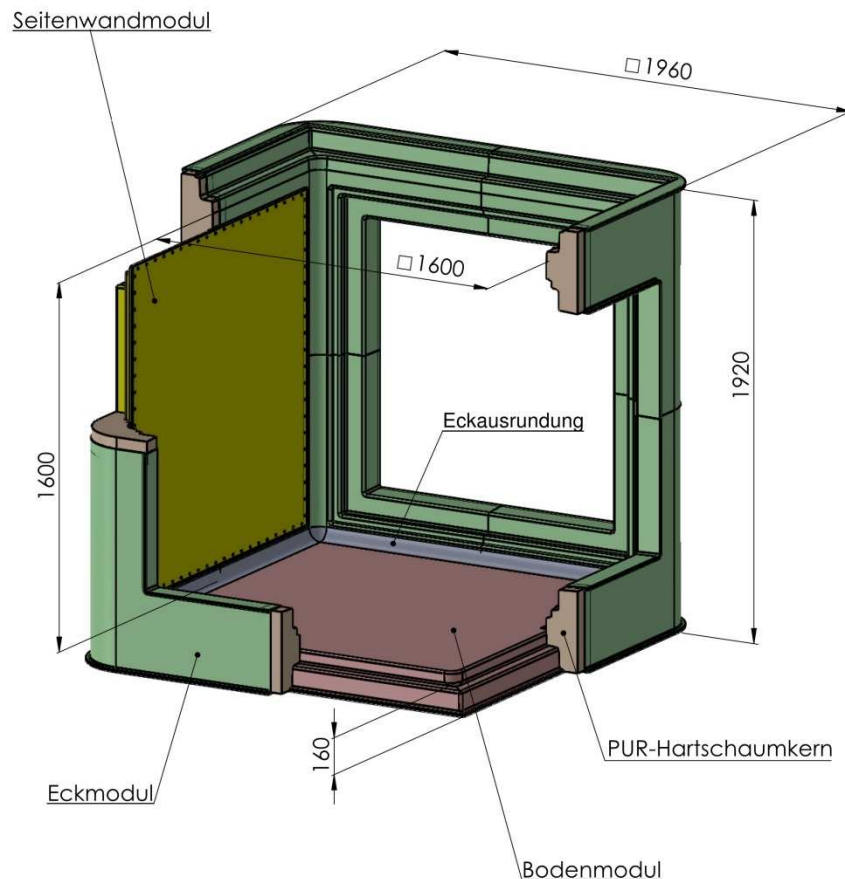


Abb. II.2.1 Bestandteile des modular aufgebauten Rechteck-Wärmespeichers

Abb. II.2.1 zeigt die einzelnen Module des GFK-Laborwärmespeichers. Er besteht aus:

| | | |
|---|------|--|
| 8 | Stck | Eckmodulen |
| 4 | Stck | Seitenwandmodulen (1 Stck davon auswechselbar) |
| 1 | Stck | Bodenmodul |
| 1 | Stck | Deckelmodul gemäß dem Bodenmodul, aber zu Montagezwecken zusätzlich mit einem Einstiegsschacht versehen (hier nicht dargestellt) |

Die Innenmaße ohne die Eckausrundungen betragen $1,6 \times 1,6 \times 1,6 = 4,10 \text{ m}^3$. Sämtliche Module bestehen aus einer zweischaligen 5 mm starken GFK-Schicht, wobei der Hohlraum mit dämmendem PUR-Hartschaum verfüllt ist. Die Standarddicke der Module beträgt insgesamt 160 mm. Da die Module im Handlaminierverfahren gefertigt werden, betragen sämtliche Radien mind. 10 mm. Notwendige Entformungsschrägen sind mit 3° ausgeführt.

Im Anhang II.A befinden sich sämtliche Zusammenbau- und Einzelteilzeichnungen sowie gesonderte Zeichnungen für den Formenbau und eine tabellarische Gesamtübersicht nach Zeichnungsnummern sortiert.

II.1.2.2 Eckmodule

Die Eckmodule bilden das äußere Gerüst des GFK-Laborspeichers. Sie bestehen aus einer inneren und äußeren Schale. Nach dem Zusammenkleben beider Schalen (die Bauteilenden sind noch verschlossen) wird der Hohlraum mit PUR-Schaum verfüllt. Die Verbindung der Eckmodule untereinander erfolgt im Inneren durch einen PUR-Hartschaumkern. Zur Erreichung der notwendigen Festigkeit werden die Stoßkanten der Eckmodule mit Laschen aus GFK-Laminat versehen (siehe Zng.-Nr. 250-10-01(b)).

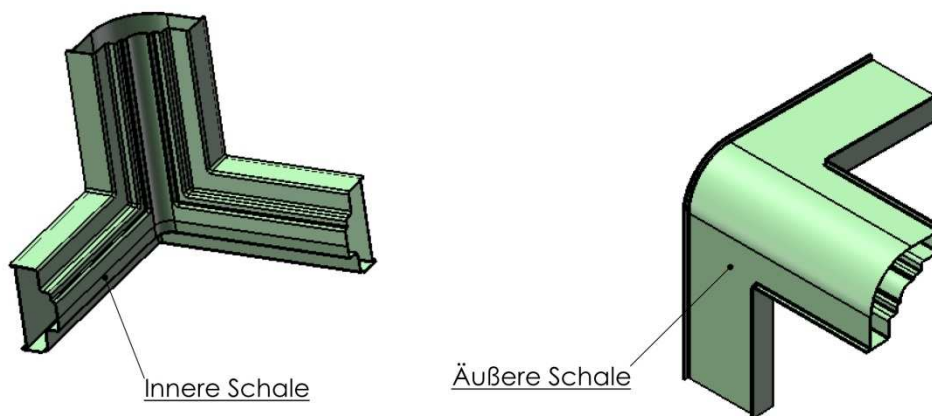


Abb. II.2.2

Zusammengesetztes Eckmodul

II.1.2.3 Bodenmodul

Das Bodenmodul als auch das Deckelmodul (gleiche Bauform) bestehen aus einer inneren Schale und einer äußeren Laminatplatte. Die Verfüllung beider Module erfolgt, wie schon bei den Eckmodulen, mit PUR-Schaum. Der Einbau in den Speicher wird über eine Verklebung zwischen den Boden- bzw. Deckelmodul und dem Eckmodulrahmen realisiert.

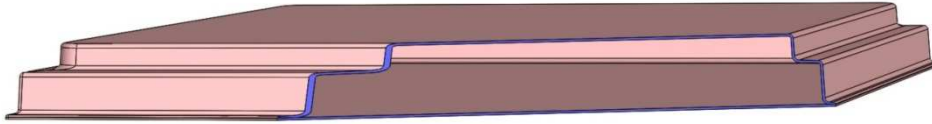


Abb. II.2.3 Schnittdarstellung des Bodenmoduls
(auch Grundform für das Deckelmodul)

II.1.2.4 Deckelmodul

Beim Deckelmodul wurde zu Montage- und Umbauzwecken, z. B. Wechsel der Seitenwandmodule, Einbau der Sensorik für den Versuchsaufbau usw., ein Einstiegsschacht vorgesehen. Die Größe wurde so festgelegt, dass nachträglich der Einbau eines Schichtenladens bzw. Wärmeübertragers möglich ist. Zudem wurden durch den Flanschdeckel des Einstiegsschachtes eine Temperaturmesslanze sowie sämtliche Sensorleitungen geführt.

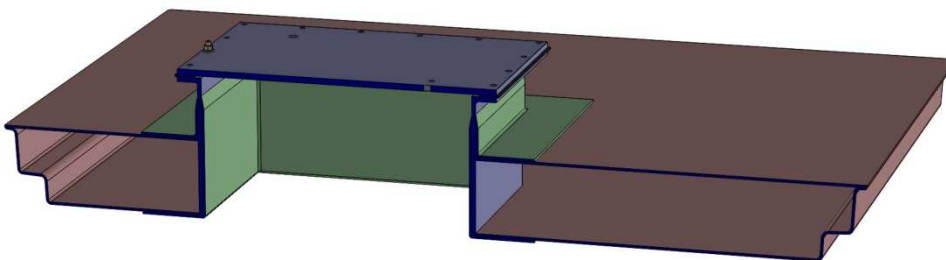


Abb. II.2.4 Schnittdarstellung des Deckelmoduls mit
Einstiegsschacht

II.1.2.5 Seitenwandmodule

Der schichtenmäßige Aufbau der Seitenwandmodule entspricht denen des Boden-, bzw. Deckelmoduls. Drei der Seitenwandmodule werden in gleicher Art und Weise wie beim Boden-, bzw. Deckelmodul fest in dem Rahmen aus Eckmodulen verklebt.

Ein Seitenwandmodul ist auswechselbar und wurde gemäß Zng.-Nr. 250-10-02(a) mit den Eckmodulen verschraubt. So war es möglich verschiedene Seitenwandmodule mit unterschiedlichem innerem, Aufbau der Isolierschicht zu testen. Im Folgenden sind die drei Typen, wie sie letztendlich ausgeführt wurden, grafisch dargestellt.

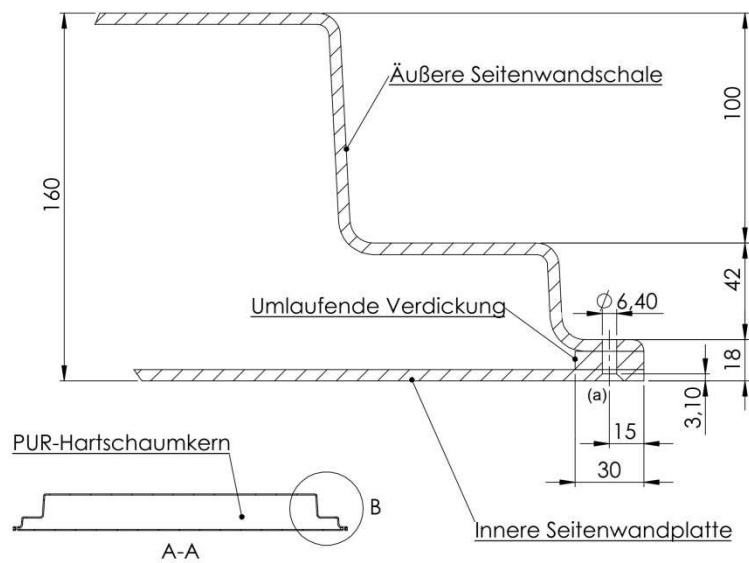


Abb. II.2.5 **Schnittdarstellung des Seitenwandmoduls vom Typs I**

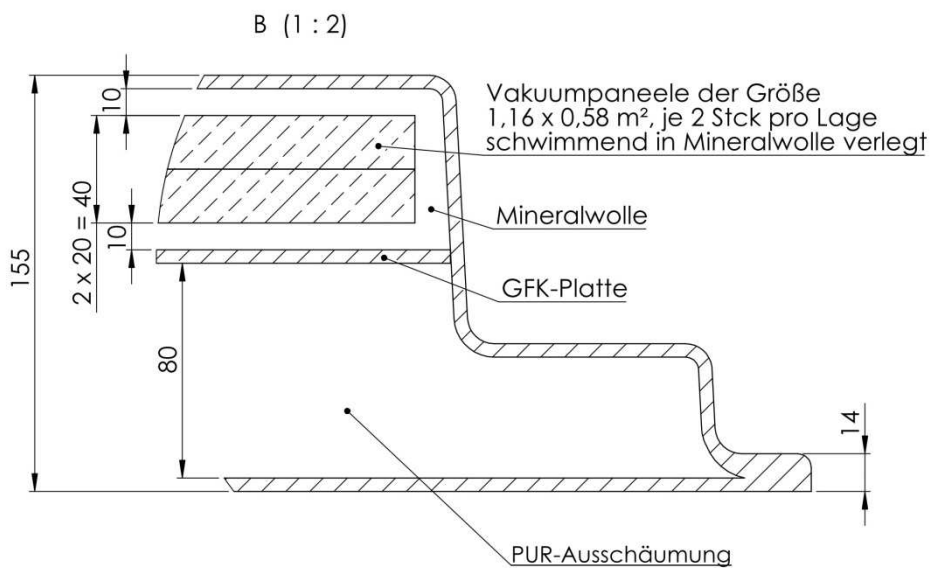


Abb. II.2.6 **Schnittdarstellung des Seitenwandmoduls vom Typs II**

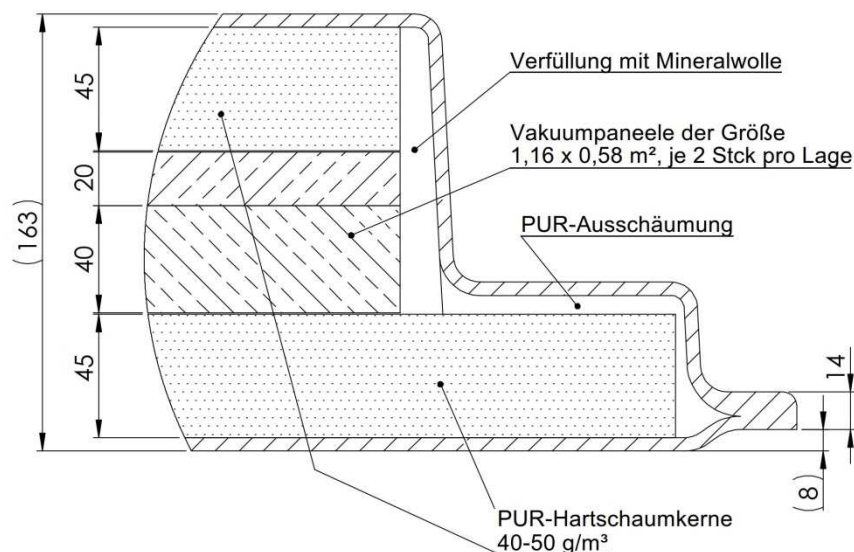


Abb. II.2.7 **Schnittdarstellung des Seitenwandmoduls vom Typs III**

II.1.3 **AP 6, 7, 9 bis 11 - Variantenvergleich verschiedener innerer Aufbauten der Seitenwandmodule sowie unterschiedlicher Ausführungsarten der Wanddurchführungen und des Be- und Entladesystems**

II.1.3.1 **Seitenwandmodule**

Zur Ausführungsart der Seitenwandmodule des Typs II und III wurden im Vorhinein mehrere Varianten vorgeschlagen (siehe dazu die Zng.-Nr. 240-11-01 bis -06 und 240-12-01 bis -03) und diskutiert.

Die für diese Varianten verwendeten Vakuumpaneele der Fa. va-Q-tec Kölleda bestehen im Kern aus einem gepressten Pulver, dessen Hauptbestandteil mikroporöse Kieselsäure ist. Der Kern wird in einem speziellen Verfahren mit einer gas- und wasserdampfdichten mehrlagigen Kunststoffolie umhüllt, evakuiert und verschlossen. Um Zerstörungen der Kunststoffhülle des Vakuumpaneels zu vermeiden, lag beim Seitenwandmodul des Typs II der spannungsfreie Einbau der Vakuumpaneele im Vordergrund. Sie wurden deshalb in eine weiche, die Vakuumpaneele umhüllende, Mineralwollschicht schwimmend verlegt. Ein Nachteil dabei ist, dass dieser Teil nicht zur Festigkeit des Moduls beiträgt. So wurde in den verschiedenen Varianten nach Lösungen zum Einbringen einer zusätzlichen GFK-Schicht diskutiert. Die Entwurfsvariante 6 (Zng.-Nr. 240-11-06) beinhaltet zudem als Besonderheit eine wabenförmige Versteifung aus GFK-Stegen. Die endgültige zum Einsatz gekommene Variante ist in Zng.-Nr. 240-11-07 dargestellt (siehe auch Abb. II.2.6).

Mit den Seitenwandmodulen des Typs III sollte ursprünglich eine andere, gegenüber den Vakuumpaneelen, kostengünstigere Isolierart getestet werden. In den Entwürfen 2 und 3 waren, wie beim Modul Typ II, zur Verbesserung der Steifigkeit wabenförmig angeordnete Laminatstege vorgesehen. Letztendlich wurde aber eine andere Variante des Typs II realisiert, in der auf die schützende Mineralwolleumhüllung der Vakuumpaneele verzichtet wurde. Hier befinden sich die Vakuumpaneele im direkten Kontakt mit den umschließenden PUR-Hartschaumkern (siehe dazu Abb. II.2.7 sowie Zng.-Nr. 240-11-04).

II.1.3.2 Medienschlüsse des Be- und Entladesystems

Für die Verbindung zwischen externen Anlagen und Ausrüstungen im Speicherinneren, wie Schichtenlader für Solarenergie und Wärmeübertrager zur thermischen Be- und Entladung für Heizenergie und Warmwasser, sind entsprechende Medienanschlüsse am GFK-Speicher erforderlich. Für die Durchführungen solcher medienführender Rohrleitungen wurde ein Seitenmodulelement des Typs I als Funktionsmodul umgerüstet.

Erste Varianten sahen für jeden Medienanschluss eine gesonderte Durchführung vor (siehe Zng.-Nr. 260-20-01 bis -04).

Variante 1 und 3 beinhalten eine Rohrdurchführung mittels Verschraubung auf der Innen- und Außenseite der Innenwand des Moduls. Die beiden Varianten unterscheiden sich darin, dass bei Variante 1 ein einlaminierendes Schutzrohr zwischen Außenschale und Innenwand des Seitenwandmoduls zur Festigkeit beiträgt, wogegen bei Variante 3 darauf verzichtet wird. Allerdings ist die Ausführung nach Variante 1 sehr aufwendig.

Bei Variante 2 und 4 wird das medienführende Rohr mittels einer Doyma-Durchführung abgedichtet. Dazu muss ein genormtes GFK-Rohr DN 80 als Futterrohr in das Seitenwandmodul eingesetzt werden. Die beiden Varianten unterscheiden sich in der Art und Weise wie das Futterrohr einlaminier wird.

Die separaten Durchführungen für jedes einzelne Rohr führen zu einem doch sehr arbeitsaufwendigen herzustellendem Funktionsmodul (siehe Zng.-Nr. 260-20-10) und wurde deshalb verworfen.

Die beiden Varianten auf den Zeichnungen Nr. 260-20-05 und -06 entsprechen denen der Variante 2 und 4, allerdings kommen hier Doyma-Dichtungssätze vom Typ CM zum Einsatz, die es gestatten, gleichzeitig mehrere Rohre durch eine Dichtungssatz zu führen. Dazu muss lediglich ein größeres Futterrohr der Nennweite DN 125 anstatt DN 80 verwendet werden. So konnte die Anzahl an Durchführungen von 9 auf 3 reduziert werden. Siehe dazu Zng.-Nr. 260-20-30(a).

Die u.a. Darstellung Abb.II.3.1 und II.3.2 zeigen die zur Anwendung gekommene Rohrdurchführungen und ihre Anordnung im Funktionsmodul.

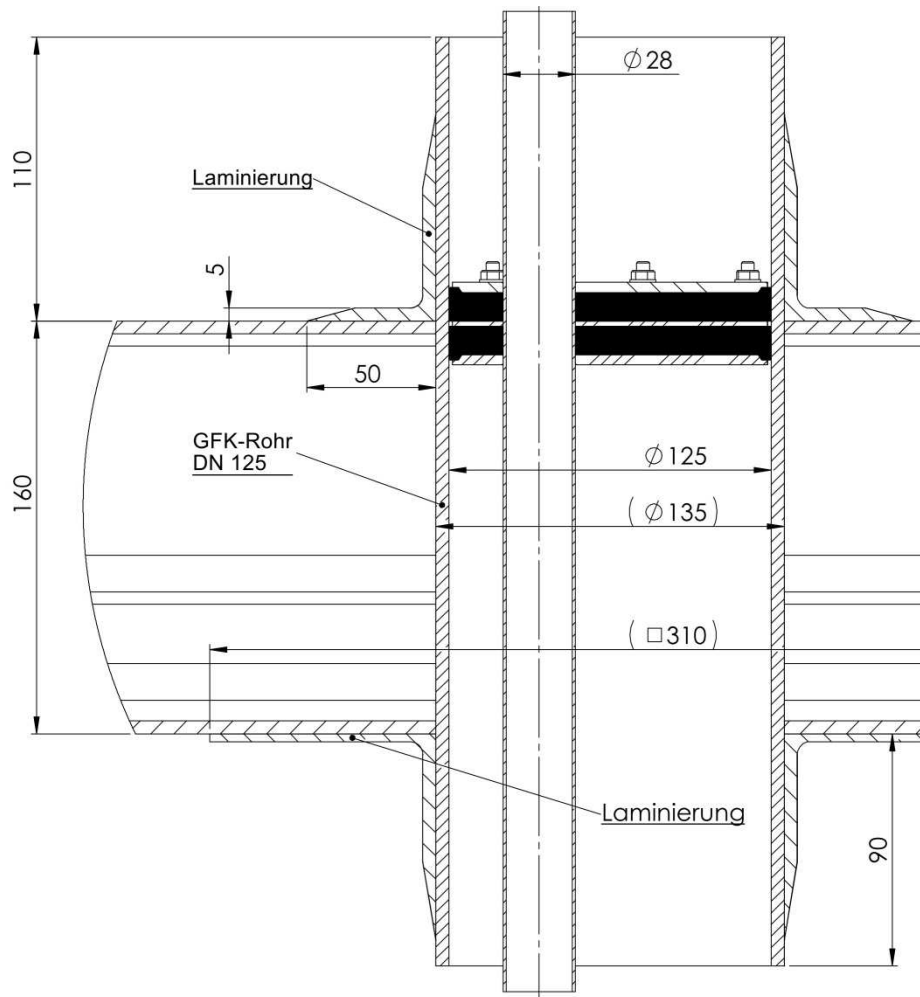


Abb. II.3.1

Rohrdurchführung mittels Doyma-Dichtungssatz CM

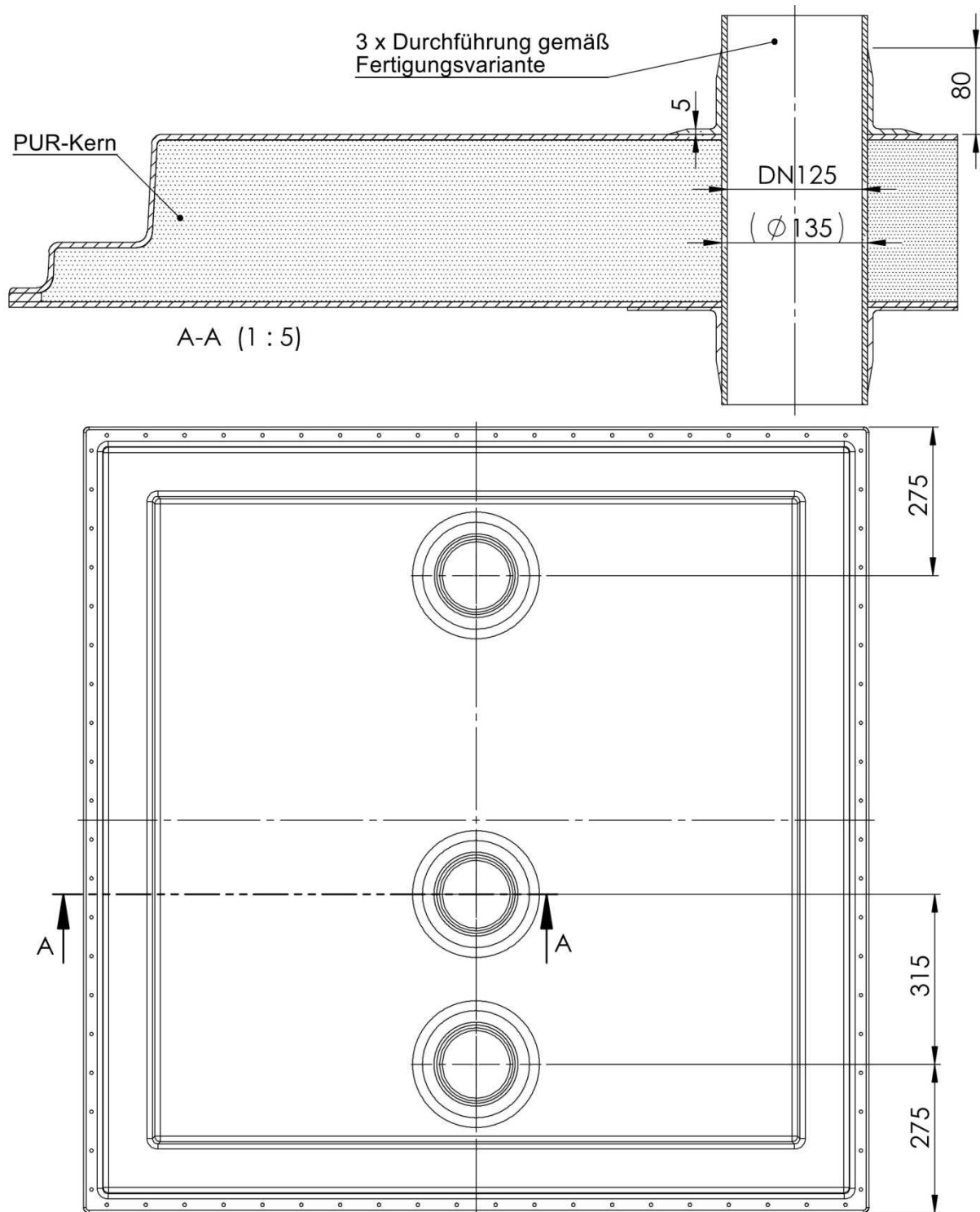


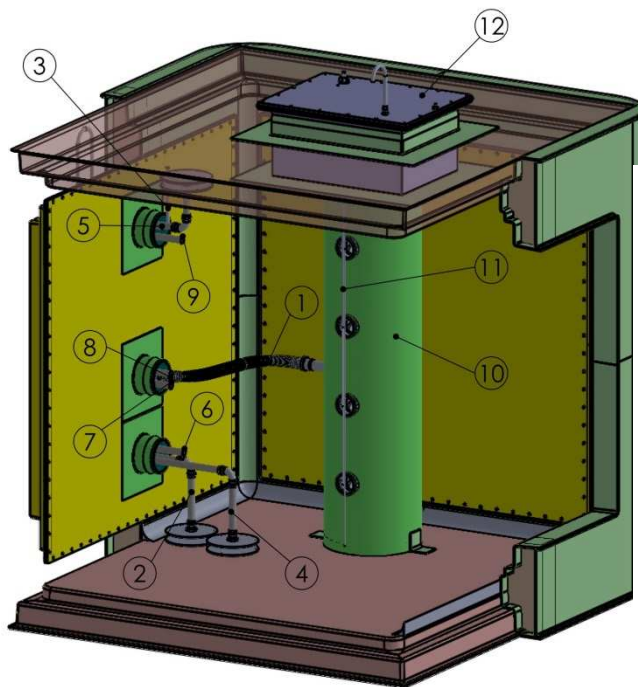
Abb. II.3.2

Anordnung der Rohrdurchführung im Funktionsmodul

II.1.3.3 Be- und Entladesystem des Laborspeichers

Die ersten Entwürfe zum Einbau des Be- und Entladesystems beruhen auf der Variante der Einzelrohrdurchführungen des Funktionsmoduls (siehe Zng.-Nr. 260-30-01, -02 und -03 sowie 260-40-01, -02 und -03). Sie sollen hier nicht weiter betrachtet werden.

Die spätere Versuchsdurchführung am GFK-Laborspeicher sah zwei Testphasen vor (siehe Kap. II.5). In der 1. Testphase war es wichtig, das Auswechseln der drei verschiedenen Seitenwandmodule zu ermöglichen. So wurden die Einbauten und Anschlüsse aufs Notwendige reduziert. Die 2. Testphase beinhaltete die Bewertung des Be- und Entladesystem in Form von Wellrohr-Wärmetauschern. Die Abb. II.3.3 zeigt die Ausführung des Laborspeichers in der 1. Testphase.



| | |
|----|--------------------------|
| 1 | Vorlauf Beladung |
| 2 | Rücklauf Beladung |
| 3 | Füllstandsregulierung |
| 4 | Vorlauf Entladung |
| 5 | Rücklauf Entladung |
| 6 | Blindstutzen (ungenutzt) |
| 7 | Blindstutzen (ungenutzt) |
| 8 | Blindstutzen (ungenutzt) |
| 9 | Blindstutzen (ungenutzt) |
| 10 | Schichtenlader |
| 11 | Messlanze |
| 12 | Einstiegsschacht |

Abb. II.3.3 Einbauten und Medienanschlüsse in der 1. Testphase

Über die Anschlüsse 1 und 2 erfolgt die thermische Beladung während der Versuche. Es ist aber auch möglich, diese Anschlüsse zur Beladung mittels Solarenergie oder auch zum Nachheizen mittels Heizkessel zu verwenden. An die mit „Blindstutzen“ bezeichneten Anschlüsse ist eine spätere Montage von Wärmeübertragern für Heiz- und Warmwasserzwecke gegeben.

Die nachfolgende Abb. II.3.4 zeigt den Laborwärmetauscher, wie er mit Wärmeübertrager ausgerüstet, in eine Haustechnikanlage zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung integriert werden könnte.

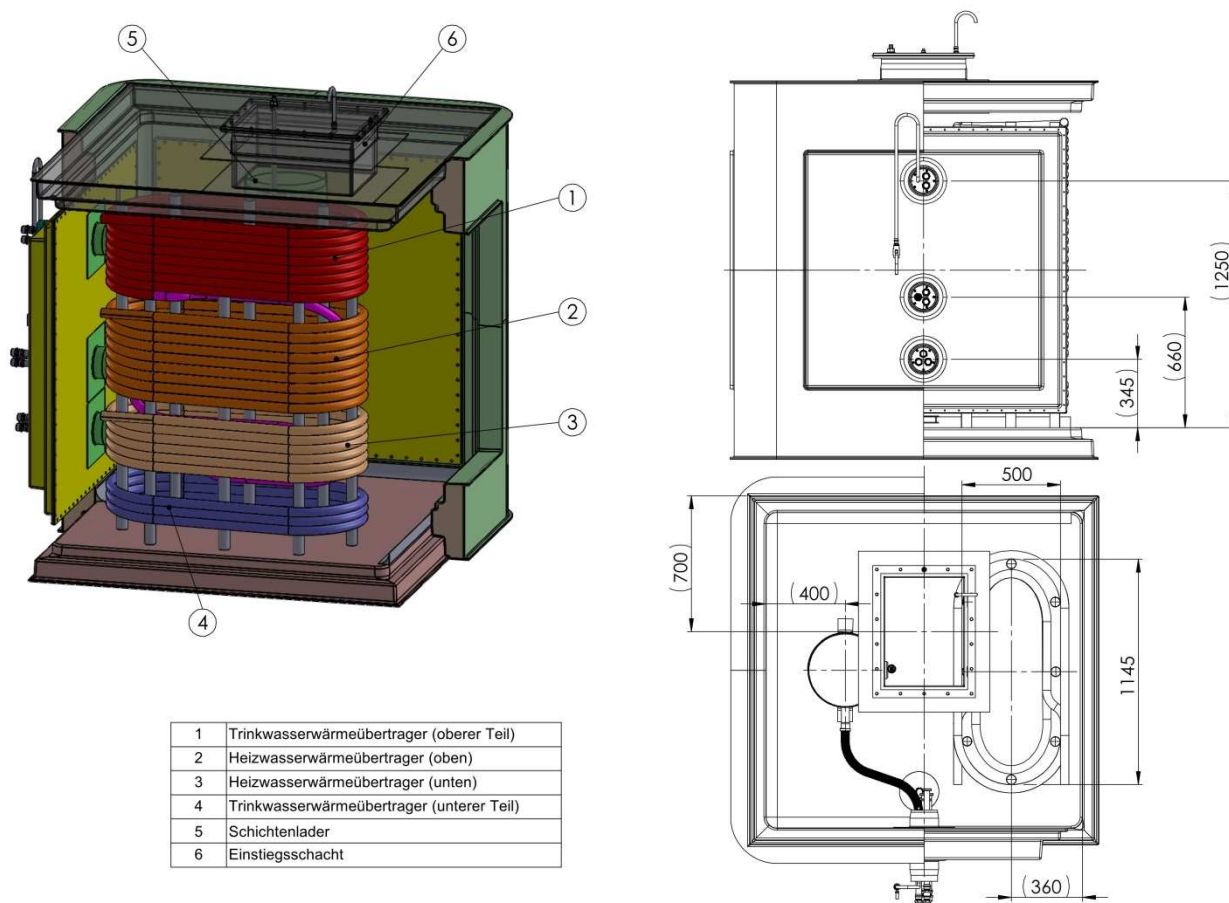


Abb. II.3.4 Voll ausgerüsteter GFK-Wärmespeicher

Für die oben erwähnte 2. Testphase kam diese Ausführung nicht zum Einsatz, sondern es wurden zwei gesonderte, unterschiedlich große Wellrohr-Wärmespeicher für die Be- und für die Entladung installiert und der Schichtenlader dafür entfernt (siehe nachfolgende Abb. II.3.5 und Abb. II.3.6). Mit diesem Aufbau konnten konkrete Aussagen über das Temperaturverhalten während des thermischen Be- und Entladungsprozess getroffen werden. Zusätzlich war eine Beurteilung möglich, inwieweit die Wellrohr-Edelstahlschichten die thermischen Schichtenaufbau beeinflusst.

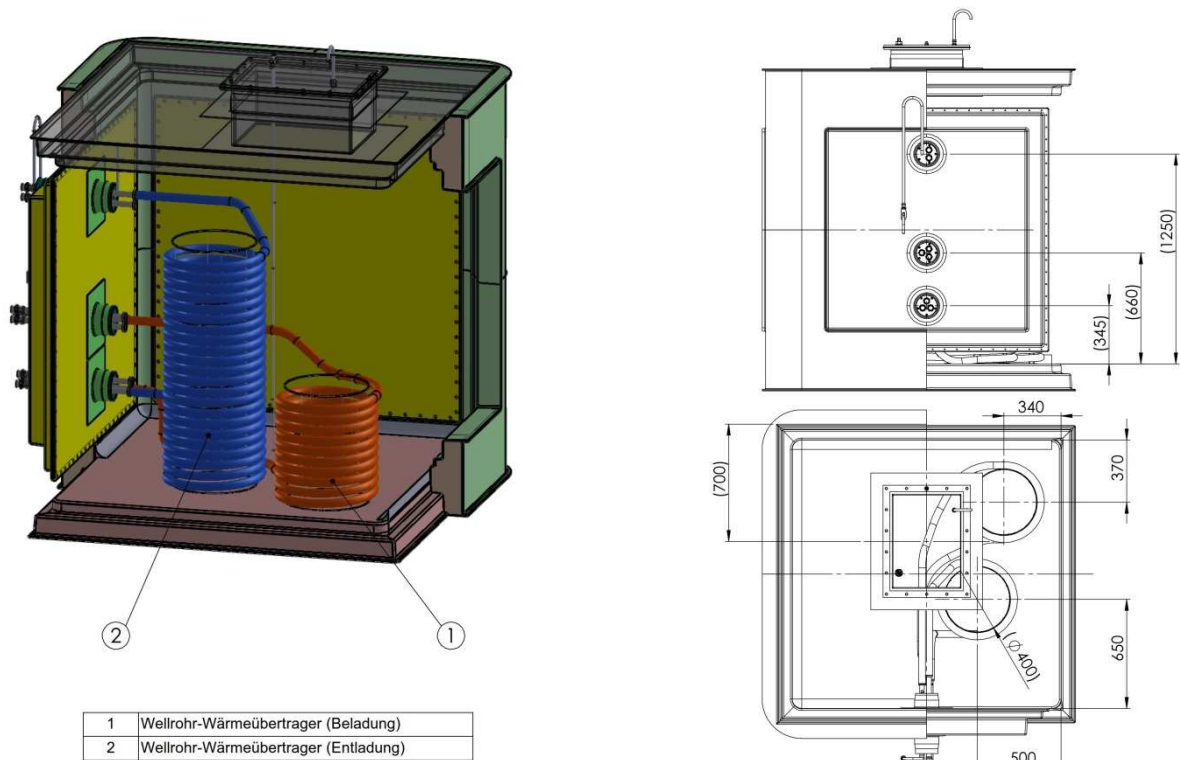


Abb. II.3.5 Einbauten in der 2. Testphase

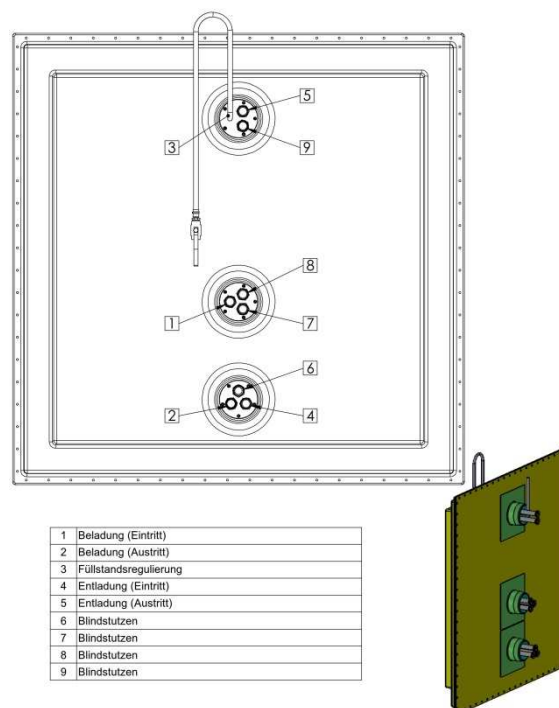


Abb. II.3.6 Medienanschlüsse in der 2. Testphase

II.1.4 AP 5, 8, 12 - Konzipierung und Realisierung des Versuchstands

II.1.4.1 Aufstellung des Laborspeichers an der TU Ilmenau und hydraulische Einbindung des Speichers in den vorhandenen Speicherteststand

Nachfolgend sind einige Aufnahmen von der Aufstellung des 4 m³ Rechteck-Laborspeichers abgebildet.



Der 4 m³ GFK Rechteck-Laborwärmespeicher (grün) wurde am 13. August 2014 auf die neu erschaffenen Betonplatte hinter dem Gebäude M der TU Ilmenau aufgestellt.

Links davon befinden sich im Kellergeschoss der Speicherteststand, des Instituts TFD mit dem Warmwasser- und Kaltwasserspeicher sowie der kompletten Messtechnik.



Am 15.09.2014 war die Verrohrung des GFK-Wärmespeichers mit dem Speicherteststand fertiggestellt. Im Anschluss wurden die Rohrleitungen mit einer Begleitheizung und Isolierung versehen.



Fertigstellung des Versuchsaufbaus im Freien. Das Lattengestell diente der Vermessung zur Verformung der Seitenwände. Obenauf befindet sich der isolierte Einstiegschacht.



Dieses Foto zeigt den späteren Austausch eines der Seitenwandmodule.



Im nebenstehenden Bild vom 21.11.2014 ist die Umhausung des Laborspeichers inkl. Rohrleitungen zu sehen. Sie diente als Schutz vor mechanischer Beschädigungen, da im selben Zeitraum Umbauarbeiten am Gebäude durchgeführt wurden (Abriss der Balkons).

II.1.4.2 Technische Beschreibung des Versuchsstands

Zur Vermessung des „Modular aufgebauten GFK-Wärmespeichers“ wurde ein im Institut TFD an der TU Ilmenau vorhandener Speicherteststand modifiziert und den spezifischen Betriebsbedingungen eines drucklosen Wärmespeichers angepasst. Die Umbaumaßnahmen betrafen insbesondere die Rohrleitungsverlegung. Da der Laborspeicher nur im Freien aufgestellt werden konnte und die überwiegende Zahl der Versuchsreihen über die Wintermonate erfolgte, wurde eine Begleitheizung der Rohre vorgesehen.

Das in Abb. II.4.1 dargestellte Strangschema zeigt den Gesamtaufbau des Versuchstands mit dem in Raum K004 befindlichen Speicherteststand incl. Messtechnik und dem im Freien stehenden 4 m³ GFK Laborwärmespeicher. Als Trennung zwischen den beiden Teilen ist eine grau hinterlegte Wand eingezeichnet. Der im Inneren des Gebäudes in großen Teilen vorhanden Speicherteststand besteht aus folgenden Komponenten:

Wärmequelle zur Beladung

| | |
|------------------|---|
| 2 m ³ | Pufferspeicher aus Stahl mit 200 mm Schaumstoffisolierung |
| 2 Stck | Elektrische Tauchheizkörper à 9 kW Heizleistung |
| 5 Stck | Temperaturfühler Pt100 1/3 DIN in Tauchhülsen (über die Speicherhöhe verteilt) |
| 2 Stck | Regelungsfühler Pt100 |
| 1 Stck | STB 95 °C (Sicherheitstemperaturbegrenzer) |

Verbraucher zur Entladung

| | |
|------------------|---|
| 2 m ³ | Pufferspeicher aus Stahl mit 40 mm Armaflex Kälteisolierung und innenliegendem Wärmetauscher |
| 1 Stck | Externes Kühlgerät 10 °C / 12 kW Kälteleistung |
| 3 Stck | Temperaturfühler Pt100 1/3 DIN in Tauchhülsen (über die Speicherhöhe verteilt) |

Zur Einregulierung der Vorlauftemperaturen und der Volumenströme sind beide Pufferspeicher mit einer Hydraulikeinheit, bestehend aus einer elektronischen Pumpe, einem 3-Wege-Mischventil, einem Ultraschall-Volumenstrommesser sowie Temperaturfühlern für Vor- und Rücklauf, versehen (siehe Abb. II.4.2). Mit Hilfe dieser Messwerte ist außerdem möglich, die jeweilige Leistung zu berechnen.

Sämtliche Temperaturfühler als auch die Messwertgeber für Volumenströme, wurden mit Hilfe zweier Datenlogger des Typs Agilent erfasst und als File auf einem PC abgespeichert (siehe dazu Abb. II.4.3 und Abb. II.4.4).

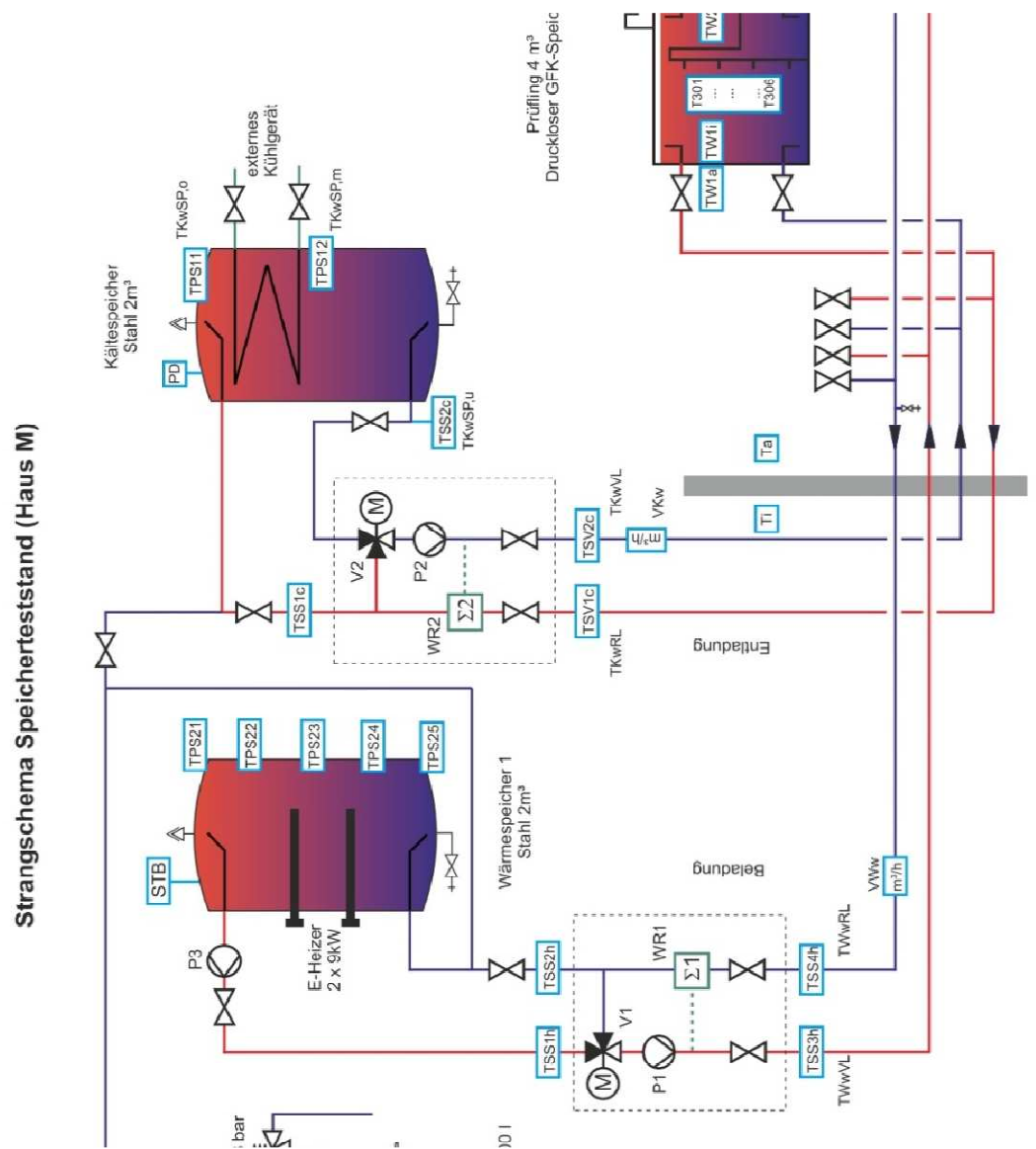


Abb. II.4.1 Versuchstand der TU Ilmenau



Abb. II.4.3 Agilent Datenlogger

Abb. II.4.2 KaltwasserPufferspeicher mit Hydraulikeinheit des Entladungskreislaufs

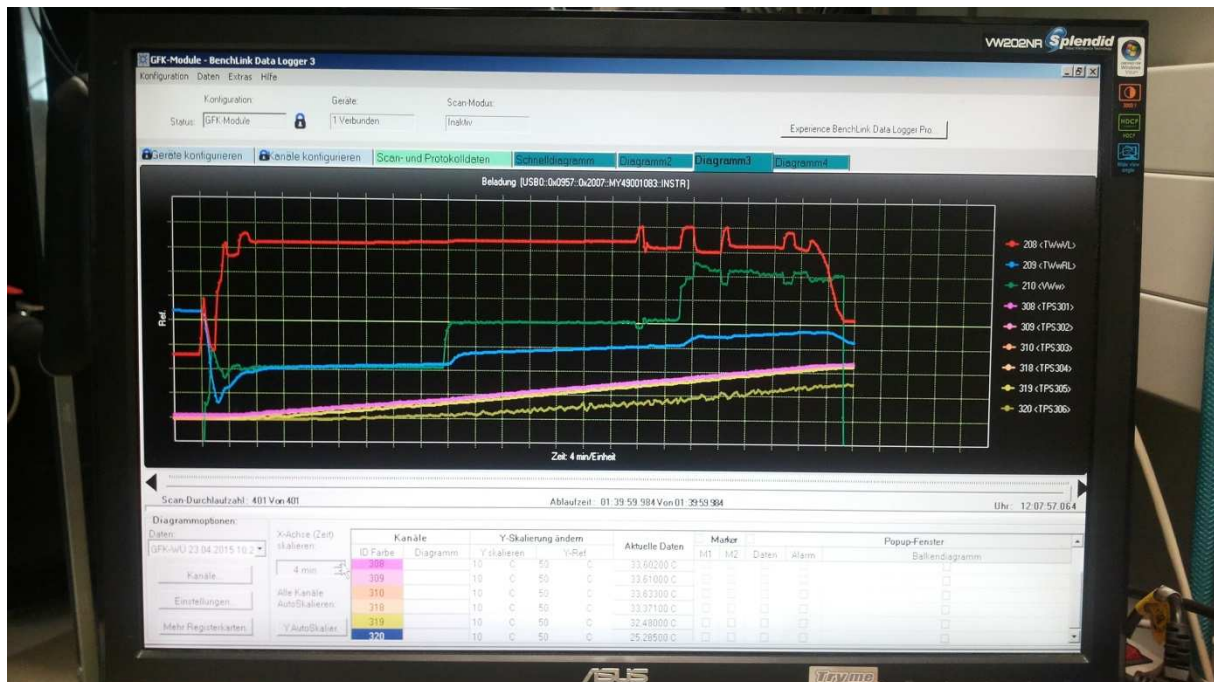


Abb. II.4.3 Beispiel einer kontinuierlich Darstellung der Messdatenerfassung am PC

Darin sind:

(rot = VL-Temperatur, blau = RL –Temperatur, grün = Volumenstrom, alle übrigen sechs Messwerte zeigen den Temperaturverlauf während der Beladung des GFK-Laborwärmespeichers mittels Wellrohr-Wärmeübertrager in der 2. Testphase)

Für die 2. Testphase wurden der 4 m³ Laborwärmespeicher umgebaut. Der Schichtenlader für die Beladung wurde entfernt und dafür zwei Wellrohr-Wärmeübertrager, jeweils einer für die Be- und einer für die Entladung installiert. In nachfolgender Abb. II.4.5 ist diese Anschlussvariante dargestellt.

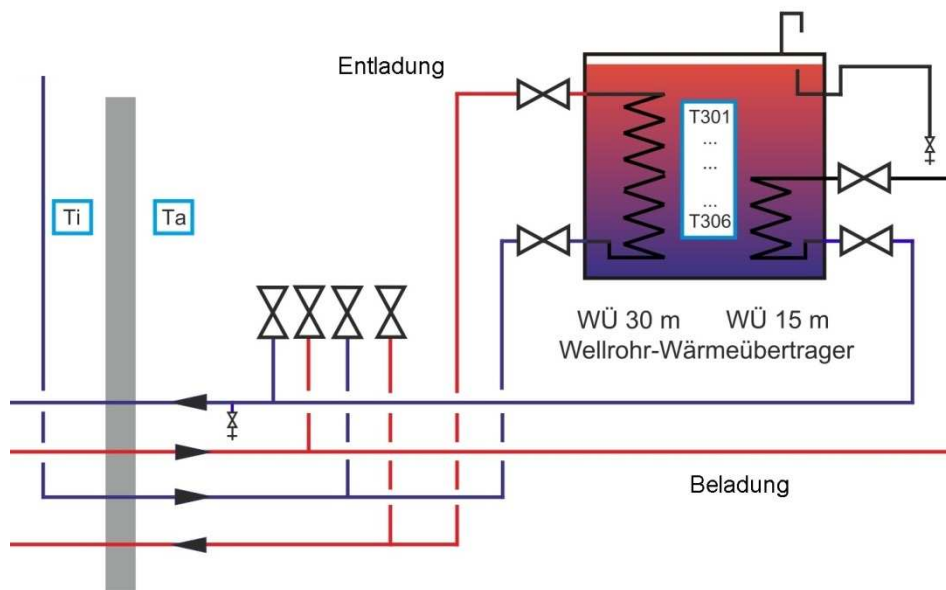


Abb. II.4.4 Anschluss des GFK-Laborwärmespeichers in der 2. Testphase

II.1.4.3 Installation der Messtechnik im GFK-Laborspeicher

Zur Messung der Temperaturen im Laborspeicher sind insgesamt 14 Temperaturfühler verbaut. Sechs davon sind zusammengefasst zu einer Messlanze und messen das vertikale Temperaturprofil in der Mitte des Speichers in unmittelbarer Nähe der Auslässe des Schichtenladers. Die anderen acht sind in zwei Gruppen, waagrecht auf unterschiedlicher Höhe, angeordnet. Sie messen das horizontale Temperaturprofil von der Mitte des Speichers bis zur Speicherwandung. So ist es möglich, die Ausbreitung des Temperaturfeldes im Speicher möglichst genau wiederzugeben.

In Abb. II.4.5 ist die Anordnung der Temperaturfühler und des Schichtenladers für die 1. Testphase dargestellt. Abb. II.4.6 zeigt hingegen den Laborspeicher mit geänderten Einbauten. Hier sind für die Be- und Entladung zwei Wellrohr-Wärmeübertrager eingebaut.

Zur Berechnung der Wärmeleitung durch die drei unterschiedlichen Seitenwandmodule des Typs I, II und III ist die Kenntnis der beiden Temperaturen auf der Innen- und Außenseite der Wand sowie des aktuellen Wärmestroms notwendig. Dazu wurde an der jeweiligen Speicherwand ein Temperaturfühlerpaar angebracht und auf der Außenseite zusätzlich eine geeichte Wärmestrom-Messplatte.

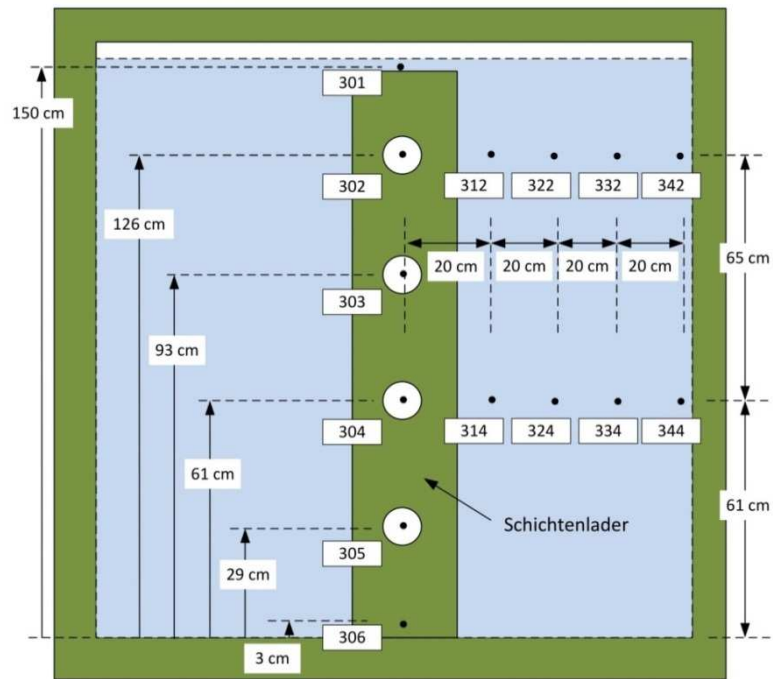


Abb. II.4.5 Temperaturmessfeld der 1. Testphase

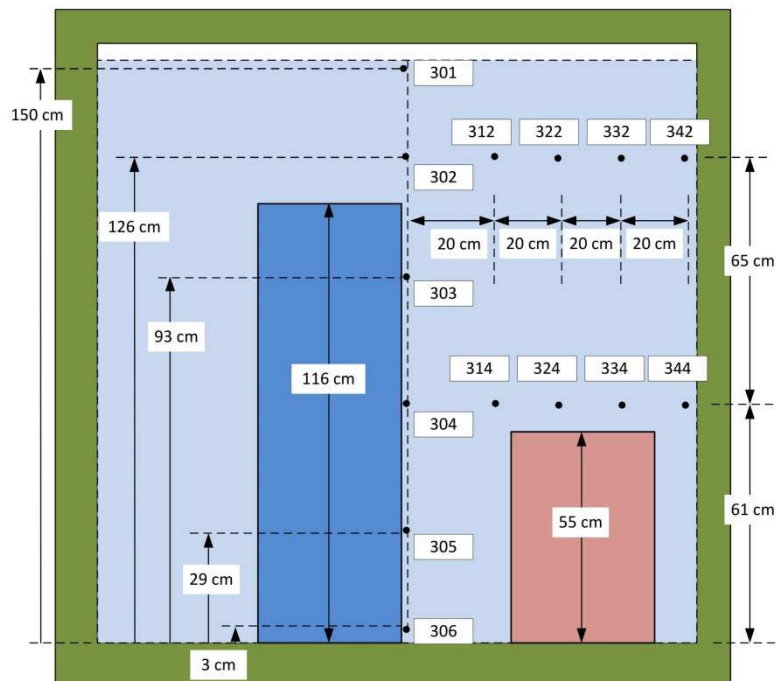


Abb. II.4.6 Temperaturmessfeld der 2. Testphase

II.1.5 AP 13, 14 – Versuchsdurchführung und Messwertauswertung

II.1.5.1 Messungen zur Druck- und Temperaturfestigkeit

Zur Beurteilung der statischen als auch dynamischen Belastungszustände der Speicherwandungen wurde ein Messaufbau realisiert, der Messungen zur Verformung zweier Seitenwände während der Befüllung und der thermischen Aufladung ermöglichte. Dazu wurde zum einen das festverklebte Seitenwandmodul 2 und zum anderen das auswechselbare Seitenwandmodul 1 ausgewählt. Abb. II.5.1 zeigt die Anordnung der Messstellen.

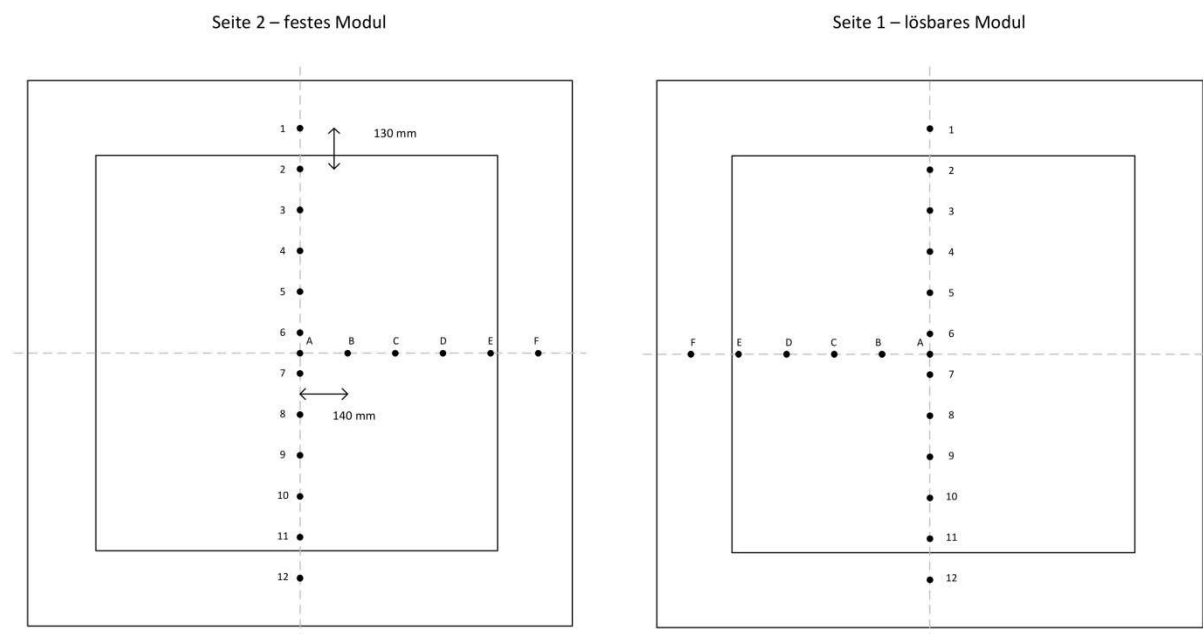


Abb. II.5.1 Anordnung der Messpunkte zur Messung der Verformungen

II.1.5.1.1 Druckbelastungstest (statischer Druck)

Am 01. und 02.09.2014 erfolgte die Erstbefüllung des „modular aufgebauten GFK-Wärmespeichers“ an der TU Ilmenau. Zum Nachweis der Festigkeit wurde der für einen drucklosen Betrieb vorgesehene GFK-Speicher, noch ohne jegliche Einbauten, mit einem geringen Überdruck von 0,05 bar beaufschlagt. Dabei konnte er den statischen Nachweis der Festigkeit erbringen. Die aufgetretene Undichtheit an der Verbindung zwischen dem auswechselbaren Seitenwandmodul und dem Eckmodulrahmen wurde durch nachträgliches Überlaminiieren der Trennfuge beseitigt.

Nach dem positiven Ergebnis dieser Prüfung wurden der Schichtenlader, die Rohrleitungsdurchführungen mit Be- und Entladetassen und sämtliche Temperatursensoren installiert. Im Anschluss daran erfolgte die Komplettierung des Versuchsstands durch die rohrleitungstechnische Verbindung des Laborspeichers mit dem vorhandenen Speicherteststand.

II.1.5.1.2 Verformung bei dynamische Belastung durch Druck und Temperatur

Während der gesamten Versuchsdurchführung vom September 2014 bis Mitte Mai 2015 wurden, parallel zu den laufenden energetischen Messungen, die Verformungen der Speicherwände beim Befüllen und Entleeren sowie bei thermischer Belastung von bis zu 90 °C erfasst.

Die Ergebnisse der Vermessung der Seitenwand 2 spiegeln hierbei die Zustände eines normalen Betriebs in der Praxis am besten wieder. Das liegt vor allem daran, dass dieses Seitenwandmodul, wie auch in der späteren Realität, fest mit den Eckmodulen verklebt ist und so auftretende Kräfte auf diese besser verteilt werden. Die drei verschiedenen Typen I, II und III des auswechselbaren Seitenwandmoduls 1 verhielten sich dagegen vollkommen anders. Dies lag zum einen an unterschiedlichen inneren Aufbauten der Wände hinsichtlich Isolierschichten und zum anderen an der geänderten Einbausituation der Module. So muss davon ausgegangen werden, dass das Seitenmodul Typ I von Beginn an unter hohen Spannungen eingesetzt war. Zwar traten bei der Erst- und Zeitbefüllung des Speichers ähnliche Verformungen wie bei der festen Seitenwand 2 auf, aber bei thermischen Belastungen verformte sich diese Wand kaum noch. Anders dagegen bei den Wandtypen II und III. Hier war die Verformung dieser Seitenwände bei Befüllung und thermischer Belastung ähnlich der der Seitenwand 2.

Im Ergebnis der Messungen wurde festgestellt, dass die größte Verformung bei der Erstbefüllung des Speichers und bei der ersten thermischen Aufladung eintrat. Alle weiteren Befüllungen und thermischen Aufladungen des Speichers führen zu immer geringeren Verformungen. So führte die Befüllung und 4. thermische Beladung des Laborspeichers nur noch zu einer Verformung am Mittelpunkt der Wand zu einer Verformung von ca. 4 mm. Bei der Erst- und Zweitbefüllung des Speichers mit kaltem Wasser betrug die Durchbiegung an dieser Stelle ca. 6 mm bzw. 4 mm und bei der ersten thermischen Aufladung sogar 16 mm.

Nach einem Erkalten des Speichers geht die Verformung der Seitenwand 2 kaum zurück, erst nach dem Entleeren zeigt sich ein leichter Rückgang der Verformung. So beträgt die bleibende Restverformung der Seitenwand 2 nach 9 Monaten ca. 15 mm (siehe dazu Abb. II.5.2).

| | | fester Abstand, oben | | fester Abstand, unten | | Abstand Mitte Platte | |
|--|--|----------------------|------|-----------------------|------|----------------------|------|
| | | 18,0 | 23,0 | 23,0 | 24,0 | 20,5 | 23,5 |

| | | Temperaturen | | Abstand, mittig | | Berechnete Auswölbung | | Bemerkungen |
|----------|---------|--------------|---------|-----------------|-------------|-----------------------|-------------|------------------------------------|
| Datum | Uhrzeit | tSp [°C] | ta [°C] | Wand-III [mm] | Wand 2 [mm] | Wand-III [mm] | Wand 2 [mm] | |
| 21.04.15 | 11:15 | 18,6 | 19,0 | 10,5 | 9,5 | 10,0 | 14,0 | leer |
| 22.04.15 | 13:45 | 9,1 | 6,4 | 6,5 | 8,0 | 14,0 | 15,5 | nach Befüllung mit 4000 l |
| 23.04.15 | 7:50 | 9,7 | 5,5 | 5,5 | 8,0 | 15,0 | 15,5 | .." |
| 27.04.15 | 7:30 | 83,7 | 11,8 | -2,0 | 7,0 | 22,5 | 16,5 | nach thermischer Beladung |
| 11.05.15 | 7:35 | 41,0 | 9,3 | 0,5 | 6,5 | 20,0 | 17,0 | nach Entleerung u. Abkühlung |
| 12.05.15 | 8:00 | 15,0 | 13,0 | 9,0 | 8,5 | 11,5 | 15,0 | Leerstand, Wand-III innen: 11,5 mm |
| 02.06.15 | 8:00 | 13,0 | 12,5 | 12,5 | 8,5 | 8,0 | 15,0 | Leerstand |

Abb. II.5.2 Restverformung am 02. Juni 2015

Auf eine Darstellung aller Messwerte wird hier verzichtet, da es den Rahmen des Berichtes sprengen würde. Hinsichtlich der genauere Analyse zur Festigkeit der Speicherwand wird auf den Teilbericht von Prof. B. Knauer verwiesen.

In den folgenden Abbildungen sind einige Messwerte und ihre grafische Darstellung aufgeführt.

Feste Seitenwand 2 - Thermische Erstbelastung

| Absolute Werte [mm] | | (Abstand senkrecht 130 mm) | | | | | | | | | | | (Abstand waagrecht 140 mm) | | | | | | |
|---------------------|------------|----------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Datum/Zeit | Temp. [°C] | Rand | Seitenmodul | | | | | | | | | | Rand | Halbes Seitenmodul | | | | | Rand |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | A | B | C | D | E | F |
| 02.10.14 10:45 | 15,0 °C | 46,30 | 50,35 | 50,60 | 50,10 | 50,20 | 50,05 | 50,20 | 50,00 | 49,85 | 51,35 | 51,55 | 40,45 | 50,00 | 50,50 | 50,95 | 51,95 | 51,55 | 39,35 |
| 02.10.14 14:30 | 40,0 °C | 46,00 | 50,55 | 50,60 | 50,10 | 50,30 | 50,45 | 50,20 | 50,10 | 50,05 | 51,55 | 51,35 | 40,40 | 50,05 | 50,05 | 51,05 | 52,40 | 51,95 | 40,25 |
| 07.10.14 09:45 | 34,5 °C | 45,70 | 50,35 | 50,15 | 48,75 | 48,00 | 47,85 | 47,20 | 47,15 | 47,70 | 50,60 | 51,35 | 40,50 | 48,00 | 48,25 | 49,25 | 51,35 | 51,80 | 39,65 |
| 07.10.14 14:50 | 59,5 °C | 46,00 | 50,50 | 50,30 | 48,45 | 47,45 | 47,00 | 46,90 | 46,85 | 47,75 | 50,60 | 51,35 | 40,40 | 46,80 | 47,00 | 48,30 | 50,90 | 52,00 | 39,15 |
| 09.10.14 07:45 | 53,0 °C | 46,00 | 50,75 | 49,30 | 45,30 | 42,70 | 41,20 | 40,60 | 40,80 | 43,10 | 48,75 | 51,05 | 40,30 | 41,45 | 42,60 | 45,50 | 49,90 | 51,70 | 39,60 |
| 09.10.14 15:50 | 79,0 °C | 46,80 | 50,20 | 48,40 | 43,50 | 40,50 | 38,60 | 38,00 | 38,10 | 40,95 | 47,70 | 50,80 | 40,05 | 38,50 | 39,90 | 43,25 | 48,85 | 51,60 | 39,65 |
| 10.10.14 09:45 | 76,0 °C | 45,75 | 50,40 | 48,20 | 42,50 | 38,75 | 36,65 | 35,75 | 36,50 | 39,65 | 47,00 | 50,50 | 39,80 | 36,70 | 38,50 | 42,50 | 48,30 | 51,55 | 39,55 |
| 13.10.14 09:45 | 56,7 °C | 46,05 | 50,75 | 48,35 | 42,50 | 38,35 | 36,65 | 35,55 | 35,90 | 39,50 | 47,00 | 50,30 | 39,95 | 36,35 | 38,40 | 42,35 | 48,50 | 51,30 | 39,40 |
| 23.10.14 14:20 | 90,0 °C | 46,00 | 50,40 | 47,70 | 41,60 | 37,60 | 35,30 | 34,35 | 34,45 | 38,15 | 45,80 | 49,65 | 38,80 | 35,25 | 37,40 | 41,65 | 48,00 | 51,05 | 39,10 |
| 24.10.14 09:10 | 86,0 °C | 46,00 | 50,70 | 48,15 | 41,80 | 37,45 | 35,25 | 34,10 | 34,50 | 38,15 | 45,90 | 49,65 | 39,00 | 35,20 | 37,30 | 41,75 | 48,45 | 51,65 | 39,55 |

| Differenz [mm] | | (Abstand senkrecht 130 mm) | | | | | | | | | | | (Abstand waagrecht 140 mm) | | | | | | |
|----------------|------------|----------------------------|-------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Datum/Zeit | Temp. [°C] | Rand | Seitenmodul | | | | | | | | | | Rand | Halbes Seitenmodul | | | | | Rand |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | A | B | C | D | E | F |
| | 15,0 °C | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 02.10.14 14:30 | 40,0 °C | 0,30 | -0,20 | 0,00 | 0,00 | -0,10 | -0,40 | 0,00 | -0,10 | -0,20 | -0,20 | 0,20 | 0,05 | -0,05 | 0,45 | -0,10 | -0,45 | -0,40 | -0,90 |
| 07.10.14 09:45 | 34,5 °C | 0,60 | 0,00 | 0,45 | 1,35 | 2,20 | 2,20 | 3,00 | 2,85 | 2,15 | 0,75 | 0,20 | -0,05 | 2,00 | 2,25 | 1,70 | 0,60 | -0,25 | -0,30 |
| 07.10.14 14:50 | 59,5 °C | 0,30 | -0,15 | 0,30 | 1,65 | 2,75 | 3,05 | 3,30 | 3,15 | 2,10 | 0,75 | 0,20 | 0,05 | 3,20 | 3,50 | 2,65 | 1,05 | -0,45 | 0,20 |
| 09.10.14 07:45 | 53,0 °C | 0,30 | -0,40 | 1,30 | 4,80 | 7,50 | 8,85 | 9,60 | 9,20 | 6,75 | 2,60 | 0,50 | 0,15 | 8,55 | 7,90 | 5,45 | 2,05 | -0,15 | -0,25 |
| 09.10.14 15:50 | 79,0 °C | -0,50 | 0,15 | 2,20 | 6,60 | 9,70 | 11,45 | 12,20 | 11,90 | 8,90 | 3,65 | 0,75 | 0,40 | 11,50 | 10,60 | 7,70 | 3,10 | -0,05 | -0,30 |
| 10.10.14 09:45 | 76,0 °C | 0,55 | -0,05 | 2,40 | 7,60 | 11,45 | 13,40 | 14,45 | 13,50 | 10,20 | 4,35 | 1,05 | 0,65 | 13,30 | 12,00 | 8,45 | 3,65 | 0,00 | -0,20 |
| 13.10.14 09:45 | 56,7 °C | 0,25 | -0,40 | 2,25 | 7,60 | 11,85 | 13,40 | 14,65 | 14,10 | 10,35 | 4,35 | 1,25 | 0,50 | 13,65 | 12,10 | 8,60 | 3,45 | 0,25 | -0,05 |
| 23.10.14 14:20 | 90,0 °C | 0,30 | -0,05 | 2,90 | 8,50 | 12,60 | 14,75 | 15,85 | 15,55 | 11,70 | 5,55 | 1,90 | 1,65 | 14,75 | 13,10 | 9,30 | 3,95 | 0,50 | 0,25 |
| 24.10.14 09:10 | 86,0 °C | 0,30 | -0,35 | 2,45 | 8,30 | 12,75 | 14,80 | 16,10 | 15,50 | 11,70 | 5,45 | 1,90 | 1,45 | 14,80 | 13,20 | 9,20 | 3,50 | -0,10 | -0,20 |

Abb. II.5.3 Gelb dargestellt sind die mittels Messschieber ermittelten Werte. In der darunter befindlichen Tabelle sind die Differenzen zum Ausgangszustand aufgeführt

In Abb. II.5.4 ist die Auswölbung der festen Wand 2 von bis zu 16 mm während dieser ersten thermischen Aufladung grafisch dargestellt.

Es folgt die Darstellung zur Verformung in der Abkühlungsphase und nach dem Entleeren des Speichers im Zeitraum von 75 bis 95 Tagen nach der Aufheizphase (Abb. II.5.5). Man erkennt den nur geringen Rückgang der Verformung.

Abb. II.5.6 zeigt, ausgehend von der verbliebenen Restverformung (Zustand 16.03.2015), die zusätzliche Auswölbung der Seitenwand 2 nach ca. 6,5 Monaten Gesamtversuchsdauer. Auch hier ist festzustellen, dass sich die Wand 2 nur noch im geringen Maße verformt.

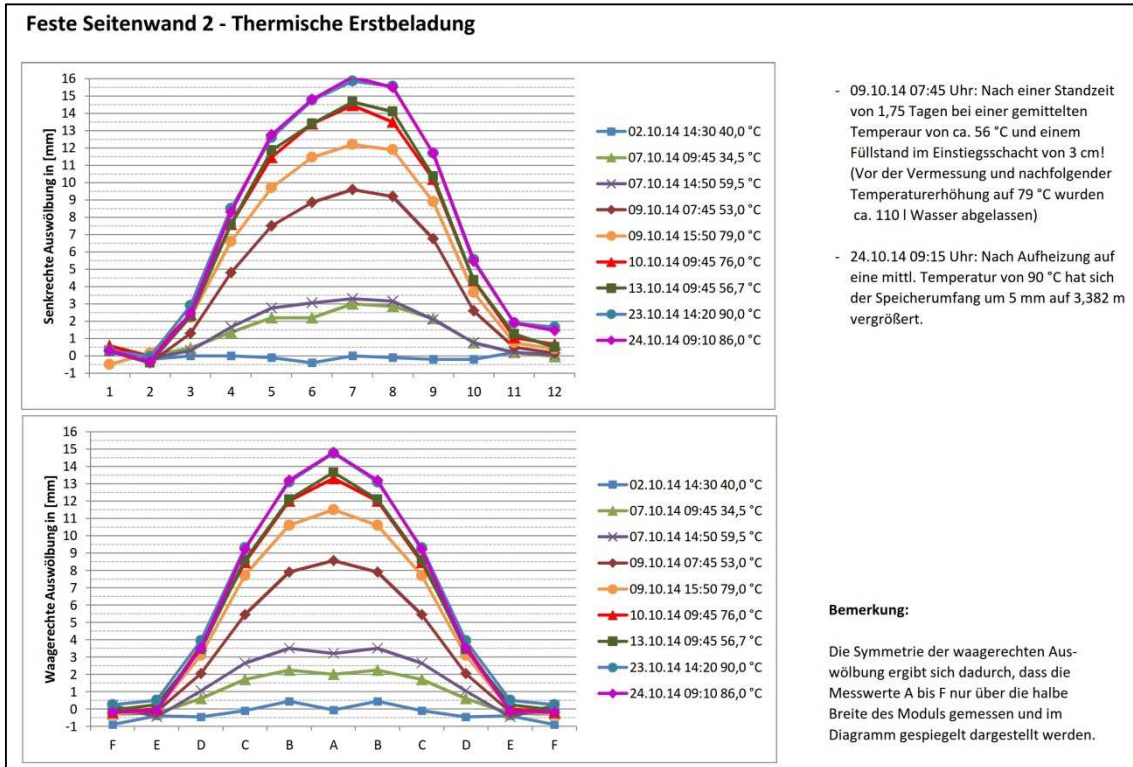


Abb. II.5.4 Verformung von Wand 2 während der ersten thermische Beladung

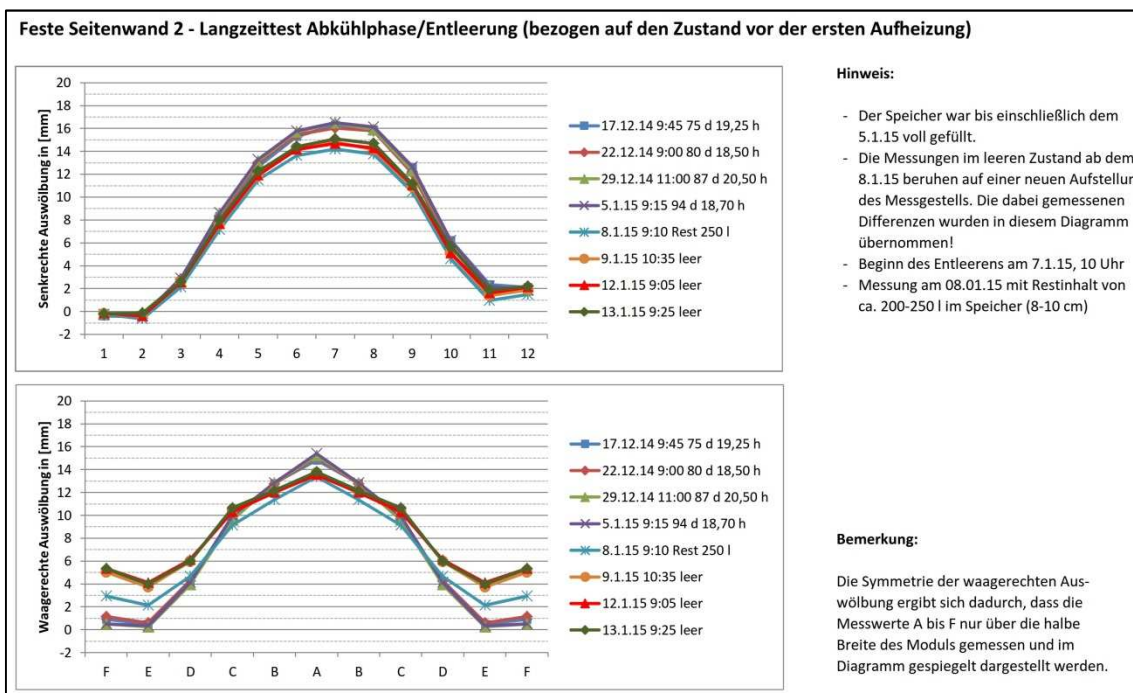


Abb. II.5.5 Verformung von Wand 2 während der Abkühlphase

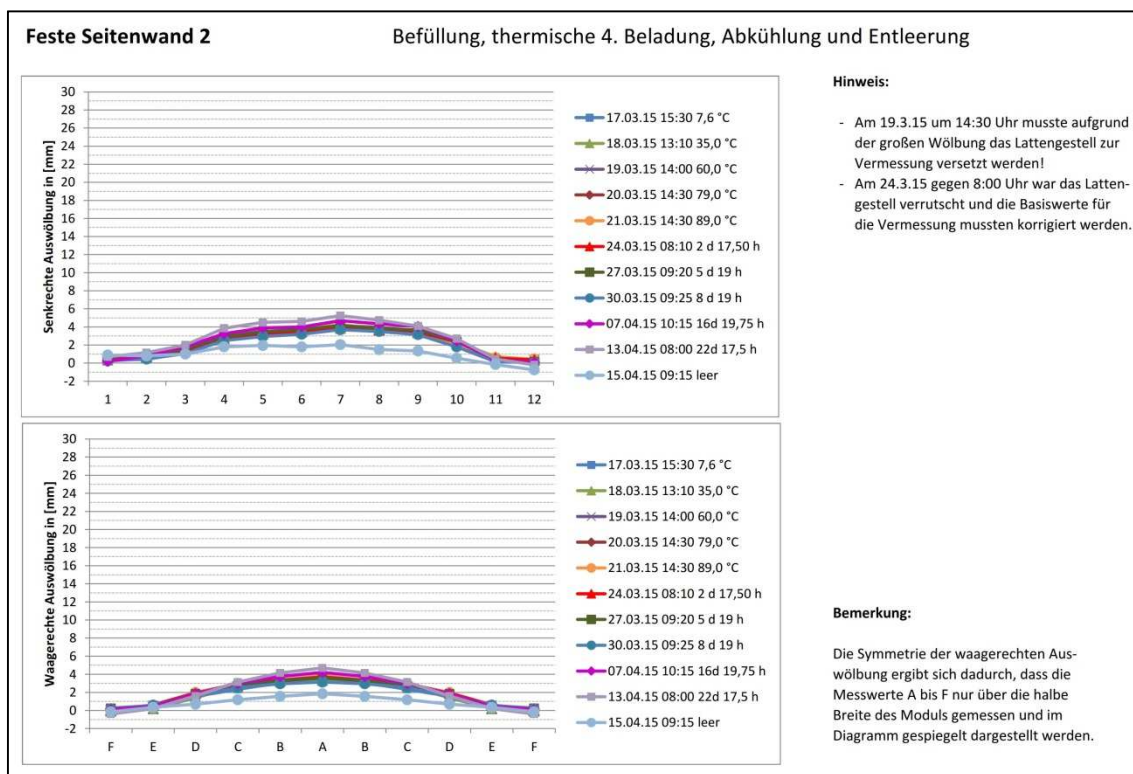


Abb. II.5.6 Verformung von Wand 2 während der vierten thermischen Aufladung

II.1.5.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Speicherwände

Für alle drei Typen der Seitenwandmodule:

- Typ-I Zng.-Nr. 240-10
(150 mm PUR-Hartschaumkern)
- Typ-II Zng.-Nr. 240-11-07
(40 mm Vakuumpaneele, 50 mm PUR-Ausschäumung,
55 mm Mineralwolle)
- Typ-III Zng.-Nr. 240-12-04
(60 mm Vakuumpaneele, 90 mm PUR-Hartschaumkerne)

wurden parallel zu den Langzeitmessungen zur Ermittlung der Speicherzeitkonstanten der Wärmedurchgang gemessen. Zu diesem Zweck war auf beiden Seiten der GFK-Speicherwand ein Temperatursensor sowie auf der Außenseite zusätzlich eine Wärmestrommessplatte angebracht. In den folgenden Abbildungen sind jeweils beispielhaft einige Messreihen jeden Typs dargestellt.

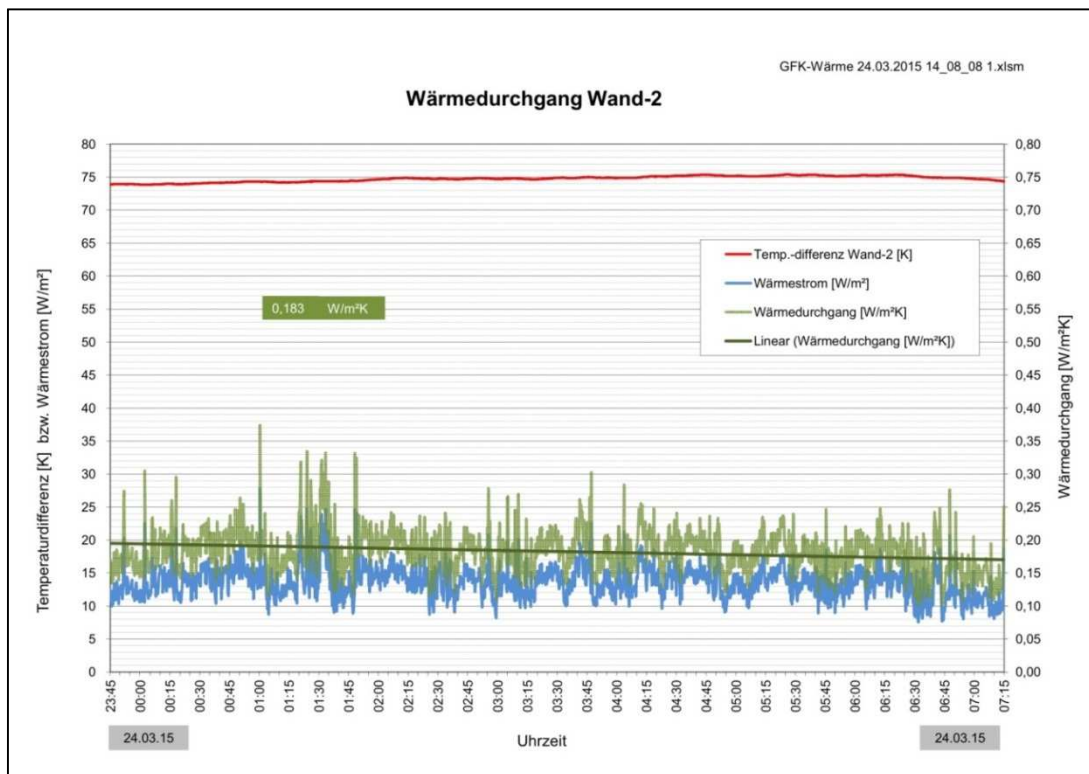


Abb. II.5.7 Fest verklebtes Seitenwandmodul, Typ-I

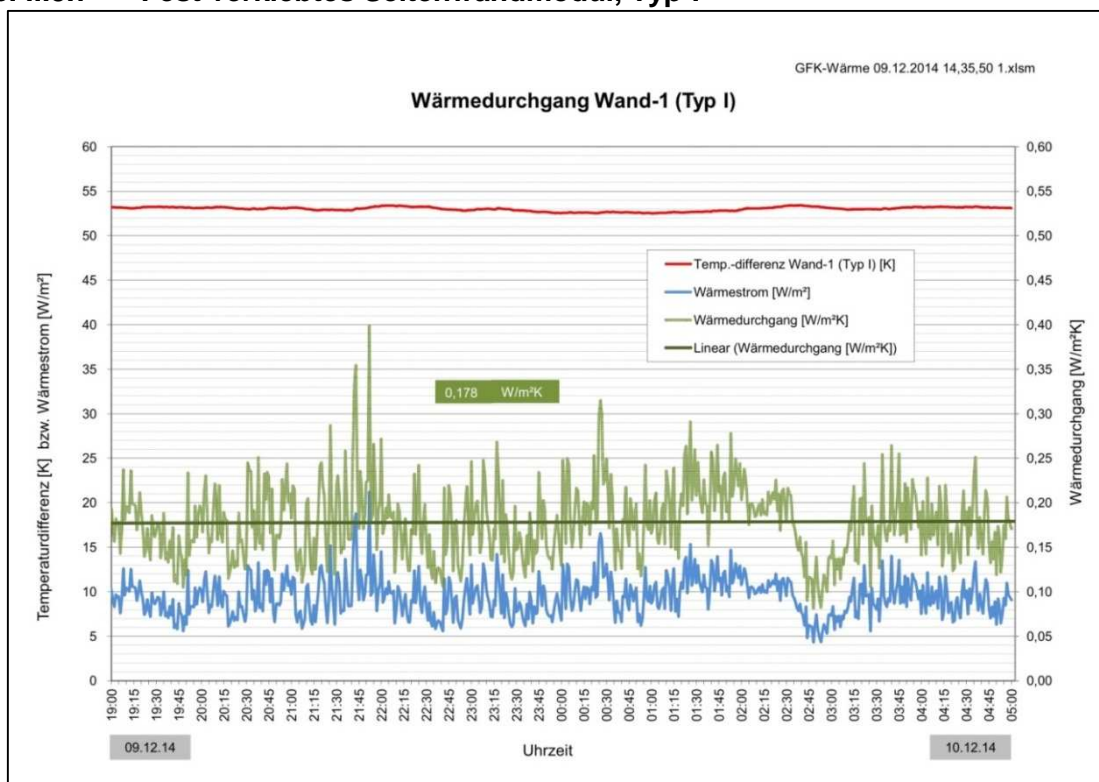


Abb. II.5.8 Auswechselbares Seitenwandmodul, Typ-I

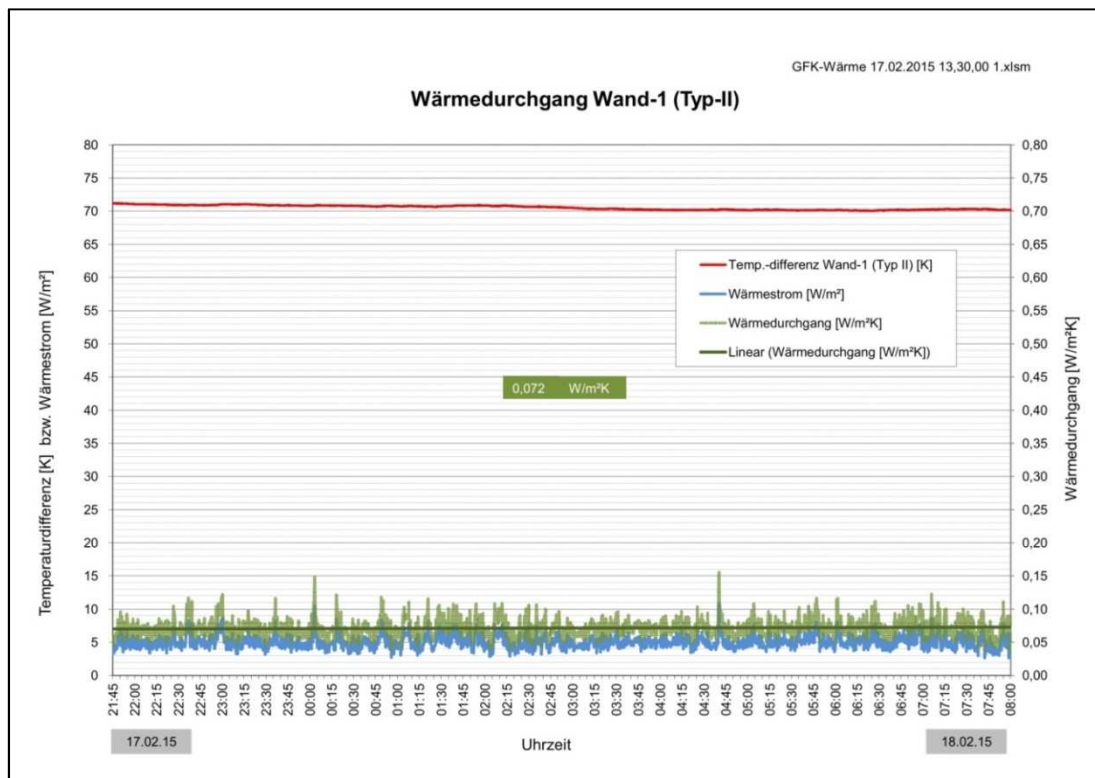


Abb. II.5.9 Auswechselbares Seitenwandmodul, Typ-II

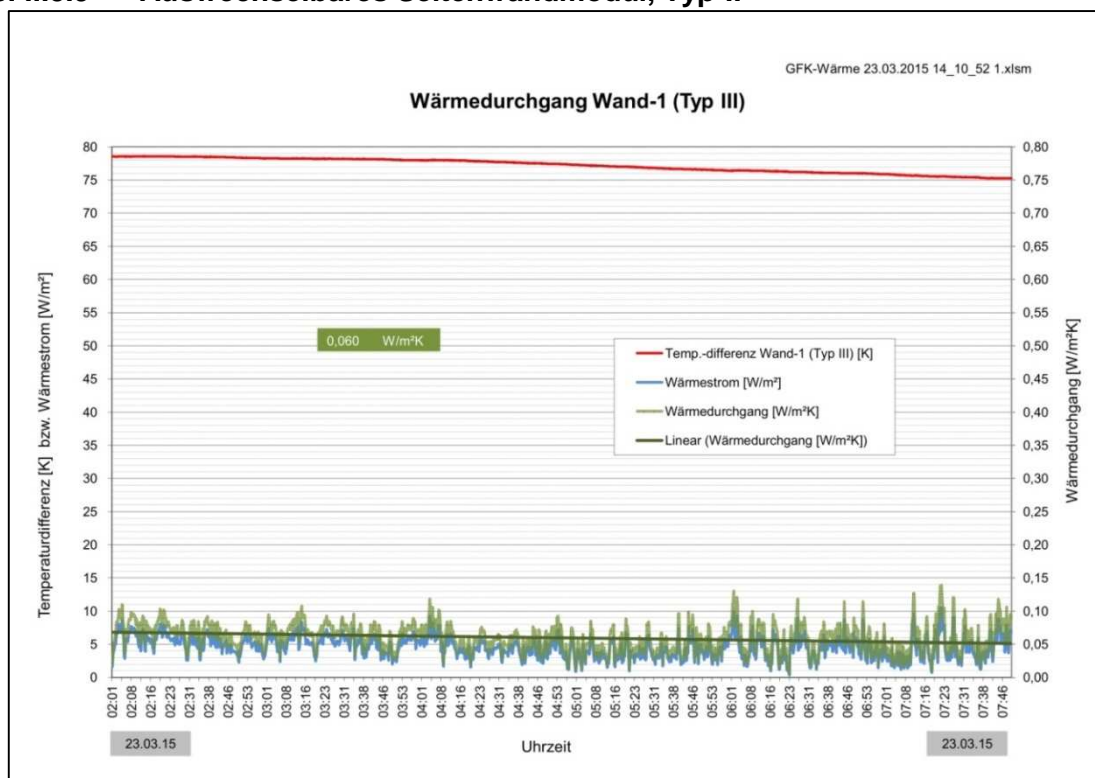


Abb. II.5.10 Auswechselbares Seitenwandmodul, Typ-III

überstellung der Wärmeleitfähigkeit durch die GFK-Wände

wand-1 (Typ I) mit reiner PUR-Isolierung

| Stärke s [m] | λ [W/mK] | $R = s / \lambda$ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------|---------------------|---|--------------|
| 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| 0,150 | 0,030 | 5,000 | 2 |
| 0,005 | 0,300 | 0,017 | 3 |
| $\Sigma R = 1/U$ | | | 5,033 |

wand-1 (Typ II) mit PUR-Isolierung und Vakuumpaneelen 40 mm

| Stärke s [m] | λ [W/mK] | $R = s / \lambda$ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------|---------------------|---|---------------|
| 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| 0,045 | 0,030 | 1,500 | 2 |
| 0,004 | 0,300 | 0,013 | 3 |
| 0,028 | 0,040 | 0,700 | 4 |
| 0,040 | 0,003 | 13,333 | 5 |
| 0,028 | 0,040 | 0,700 | 6 |
| 0,005 | 0,300 | 0,017 | 7 |
| $\Sigma R = 1/U$ | | | 16,280 |

wand-1 (Typ III) mit PUR-Isolierung und Vakuumpaneelen 60 mm

| Stärke s [m] | λ [W/mK] | $R = s / \lambda$ [m ² K/W] | Nr. |
|------------------|---------------------|---|---------------|
| 0,005 | 0,300 | 0,017 | 1 |
| 0,046 | 0,030 | 1,533 | 2 |
| 0,060 | 0,003 | 20,000 | 3 |
| 0,046 | 0,030 | 1,533 | 4 |
| 0,005 | 0,300 | 0,017 | 5 |
| $\Sigma R = 1/U$ | | | 23,100 |

Äußere Gesamtoberfläche des GFK-Spe
 $A = 21,66$

| berechnet | gemessen |
|-----------------------------|----------|
| $U_{Typ I} = 0,199$ | 0,183 |
| $A \cdot U_{Typ I} = 4,303$ | 3,964 |
| Mittelw. | Min. |
| | Max. |

| berechnet | gemessen |
|------------------------------|----------|
| $U_{Typ II} = 0,061$ | 0,072 |
| $A \cdot U_{Typ II} = 1,330$ | 1,553 |
| Mittelw. | Min. |
| | Max. |

| berechnet | gemessen |
|-------------------------------|----------|
| $U_{Typ III} = 0,043$ | 0,073 |
| $A \cdot U_{Typ III} = 0,938$ | 1,581 |
| Mittelw. | Min. |
| | Max. |

Abb. II.5.11 Gegenüberstellung der drei Wandtypen

Abb. II.5.11 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Werte zu den vorher berechneten Werten aus Kapitel II.1.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss man beachten, dass die Messungen nicht unter Laborbedingungen stattfanden. Da der GFK-Speicher im Freien aufgestellt war, war er somit den jeweiligen Witterungsbedingungen, wie Wind und Regen, ausgesetzt. Ein Vergleich der berechneten Werte mit den gemessenen Werten für die Wärmeleitfähigkeit der Wand ergab für den Wandaufbau der Typen-I und -II doch eine recht gute Übereinstimmung. Beim Wandtyp-II (mit 40 mm Vakuumisolierung) zeigte sich in den Messwerten gegenüber des Typs-I (reine PUR-isolierung) ein bis auf 40% gesenkter Wärmedurchgang.

Davon abweichend sind die Messwerte des Wandtyps-III. Zum einen wurde eine größere Streuung der Messwerte beobachtet, zum anderen trat, die lt. Wandaufbau zuerwartende weitere Verringerung der Wärmeleitfähigkeit (der Durchschnittswert lag wie beim Wandtyp-II bei ca. $0,073 \text{ W/m}^2\text{K}$), nicht ein. Als Grund dafür können im Wesentlichen zwei Punkten aufgeführt werden. Erstens waren die Witterungsbedingungen bei den Messungen bedeutend schlechter (Langanhaltener Regen verursachte einen größeren Wärmeübergang von der Außenoberfläche der Wand an die Luft) und zweitens kann eine Beschädigung eines 40 mm starken Vakuumpanels nicht ausgeschlossen werden. Dies bestätigte sich auch durch gesonderte Wärmebildaufnahmen von dieser Wand (siehe dazu Abschnitt II.5.4).

II.1.5.3 Ermittlung der Speicherzeitkonstanten

Die Messungen der realen Speicherzeitkonstante während der Abkühlphase über einen längeren Zeitpunkt brachten nicht die erhofften Ergebnisse. Zu unterschiedliche waren die Umgebungsbedingungen im Freien. Schon ein Vergleich der Abb. II.5.12 und II.5.13 zeigen, welchen großen Einfluss die Witterungsbedingungen hatten. Beide Speicherzeitkonstanten wurden ohne Austausch des Wandmodultyps hintereinander aufgenommen. Trotzdem verschlechterte sich die Speicherzeitkonstante um nahezu 4 Tage. Grund war, dass bei der ersten Messung der gesamte Speicher voll umhaust war (siehe Kap. II.4.1) während er bei allen anderen späteren Messungen im Freien stand. Dies zeigt deutlich, welchen hohen Einfluss die Witterungsbedingungen für die Speicherzeitkonstante hatten. Die Außentemperaturen schwankten zwischen -10 °C und $+15 \text{ °C}$. Dazu kam Wind, Regen und sogar Schnee. So waren dann auch die Messungen zu den Wandmodultypen II und III (Abb. II.5.14 und Abb. II.5.15) wenig aussagekräftig. Statt eine minimalen Verbesserung ergab sich nochmals eine Verschlechterung um ca. 3,5 Tage. Derartige Messungen sollten zukünftig nur in einem Raum unter konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt werden.

Der anfängliche Unterschied in Abb. II.5.12 von ca. 4 Tagen zwischen dem lt. Theorie berechneten und dem im Versuch gemessenen Wert ist zum Teil auch dadurch zu erklären, dass eine Reihe von Wärmebrücken am Laborspeicher existierten, welche das Ergebnis negativ beeinflussten. Siehe dazu das folgende Kapitel II.5.4.

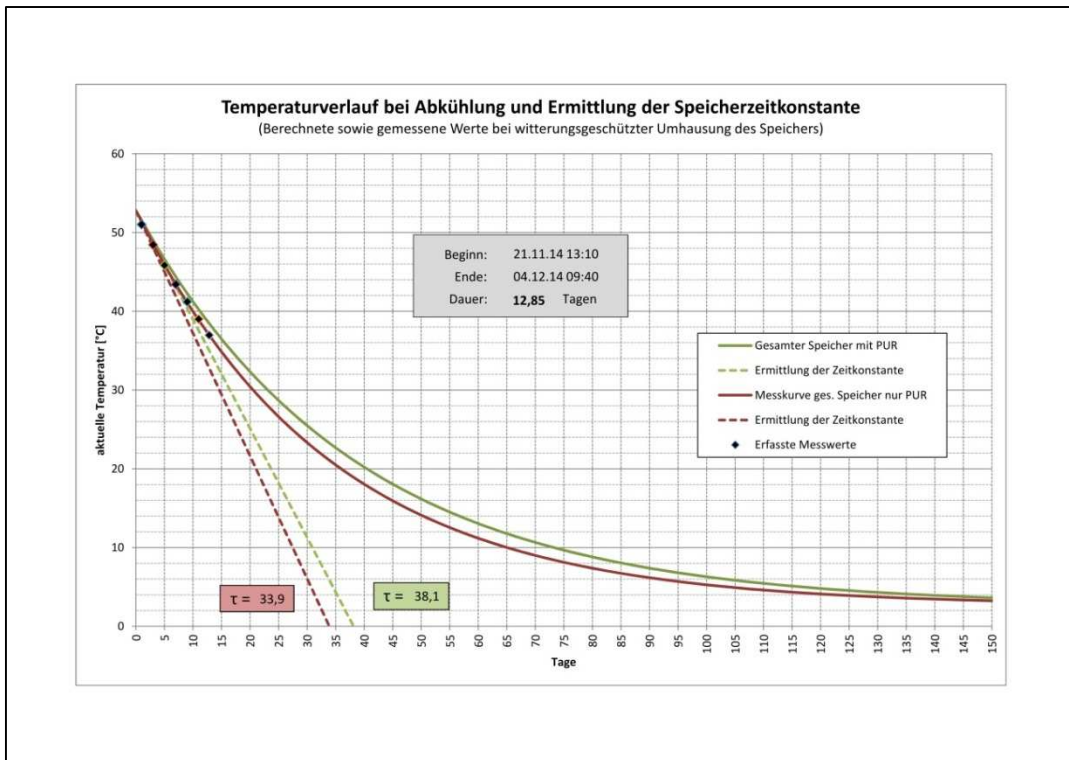


Abb. II.5.12 Abkühlkurve Wandtyp I, „umhaust“

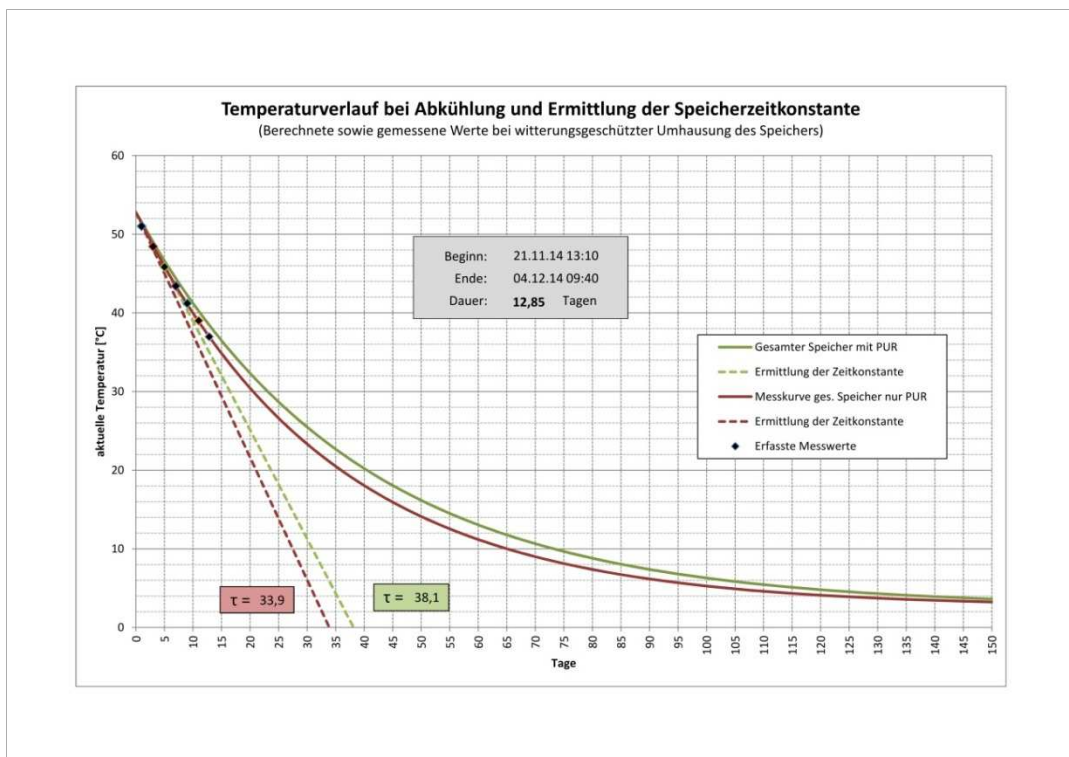


Abb. II.5.13 Abkühlkurve Wandtyp I, im „Freien“

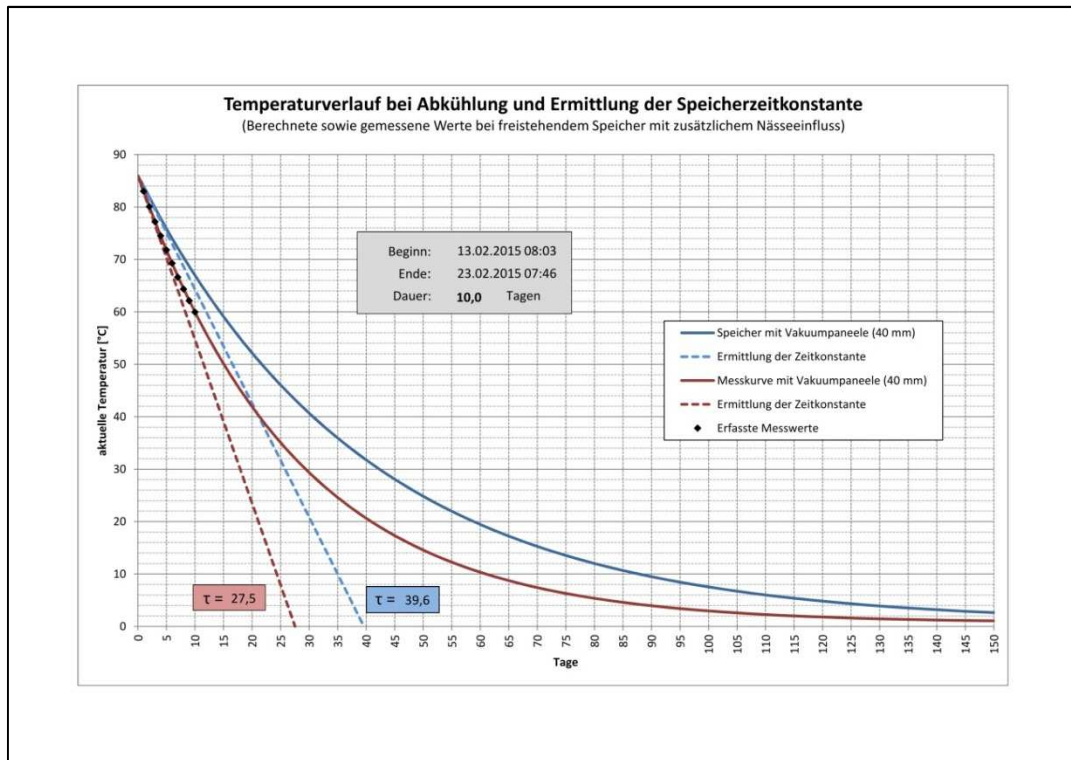


Abb. II.5.14 Abkühlkurve Wandtyp II, im „Freien“

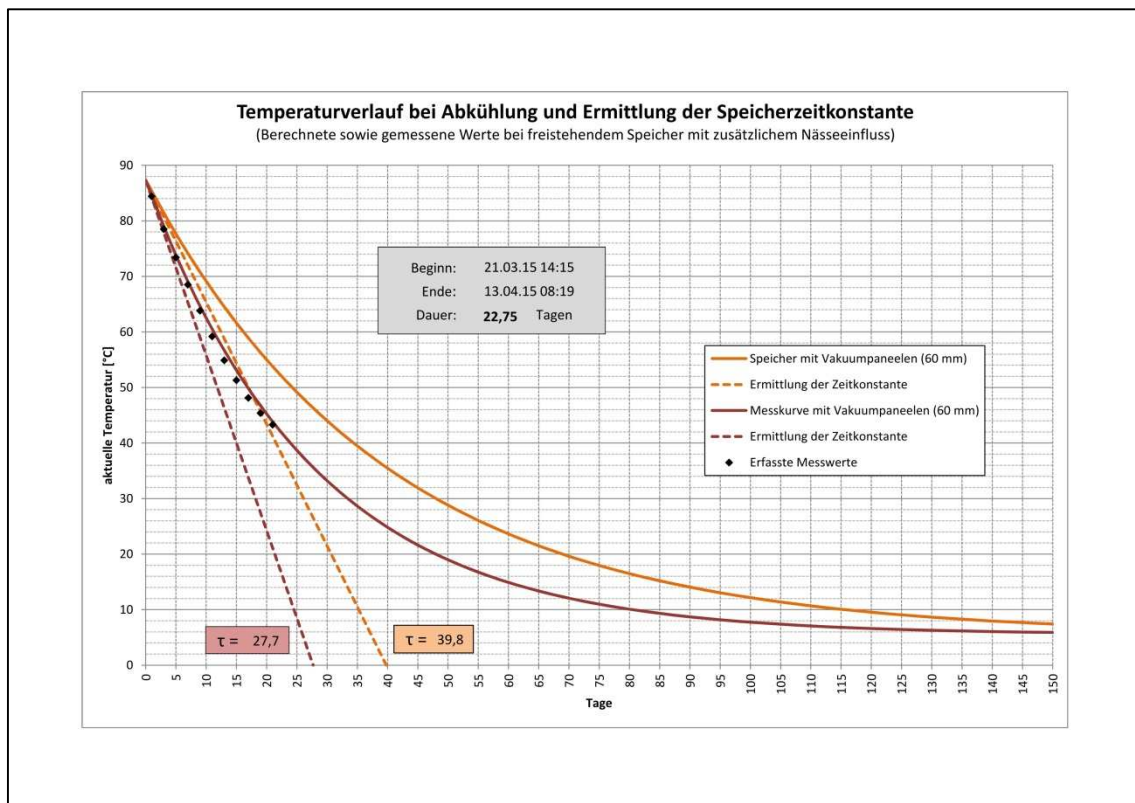


Abb. II.5.15 Abkühlkurve Wandtyp III, im „Freien“

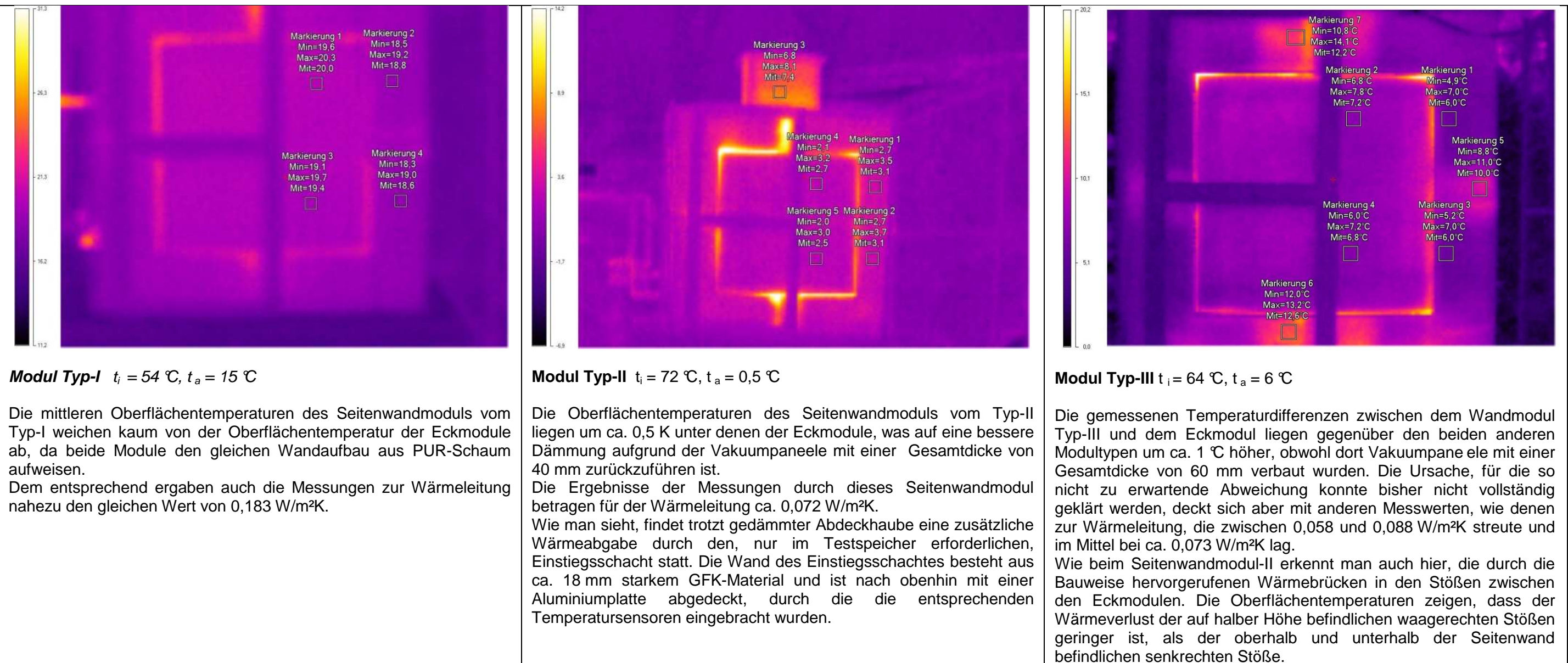
II.1.5.4 IR-Wärmebildaufnahmen während der Versuchsdurchführung

In den nachfolgenden IR-Wärmebildern werden zum einen die drei verschiedenen Seitenwandmodule gegenübergestellt und zum anderen auf Besonderheiten dieses Versuchsmusters des modular aufgebauten GFK-Laborwärmespeichers hingewiesen.

Da die Aufstellung des Laborspeichers im Freien erfolgte, lagen witterungsbedingt größere Unterschiede in den Außentemperaturen und somit auch bei den Wandtemperaturen vor. Zu beachten ist, dass sich, durch die Zuweisung der Farbskalen auf unterschiedliche Temperaturgrenzen zwischen minimaler und maximaler Temperatur, die Farbtemperaturen in den Aufnahmen der verschiedenen Wandtypen untereinander nicht vergleichen lassen.

Ansicht auf die austauschbaren Seitenwandmodule Typ-I, -II und -III

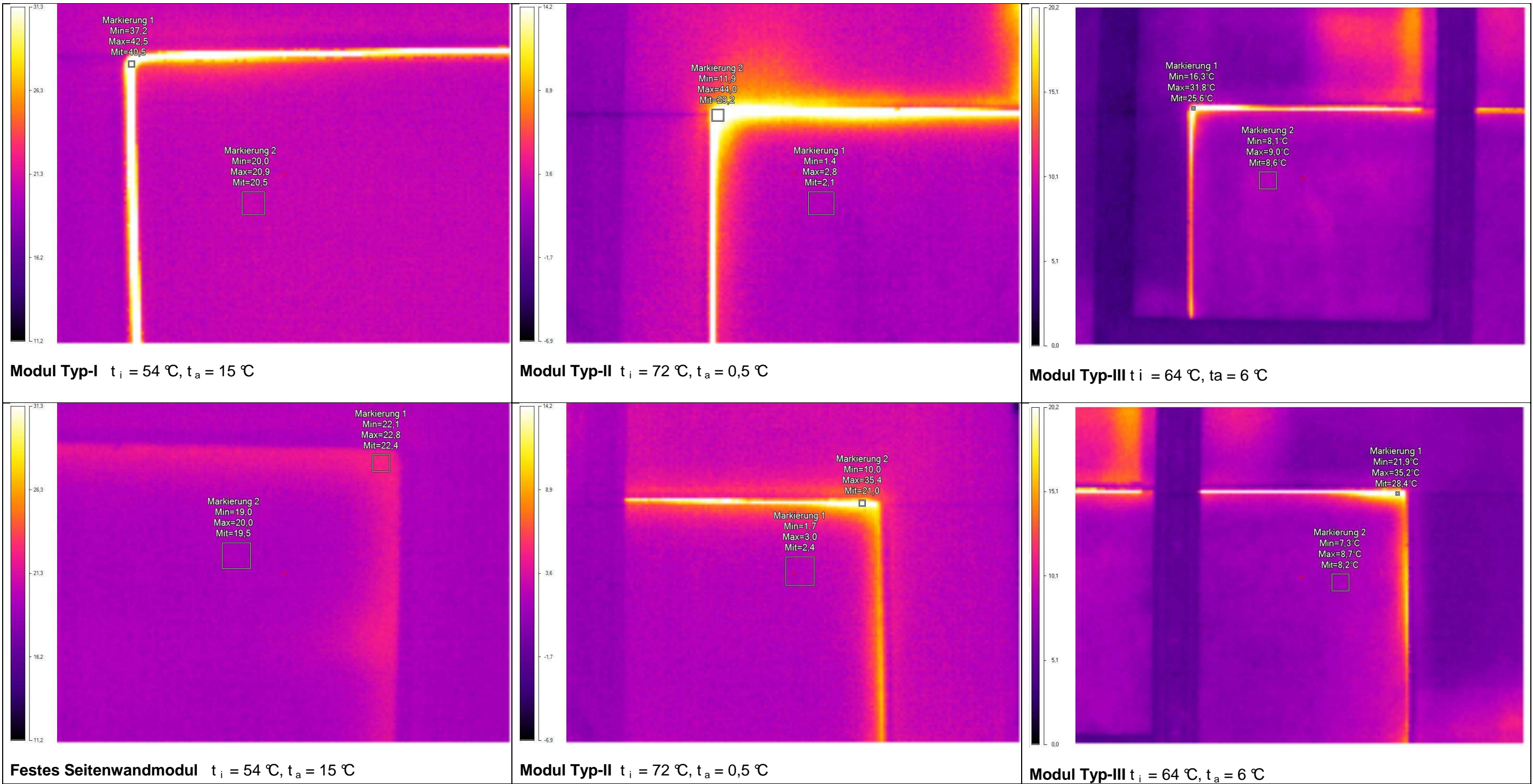
(Bei dem Schatten in der linken Hälfte des Bildes handelt es sich um das Gestell zur Vermessung der Verformung)



Ansicht auf die Montagefugen der austauschbaren Seitenwandmodule Typ-I, -II und -III sowie der Klebefuge einer festen Wand

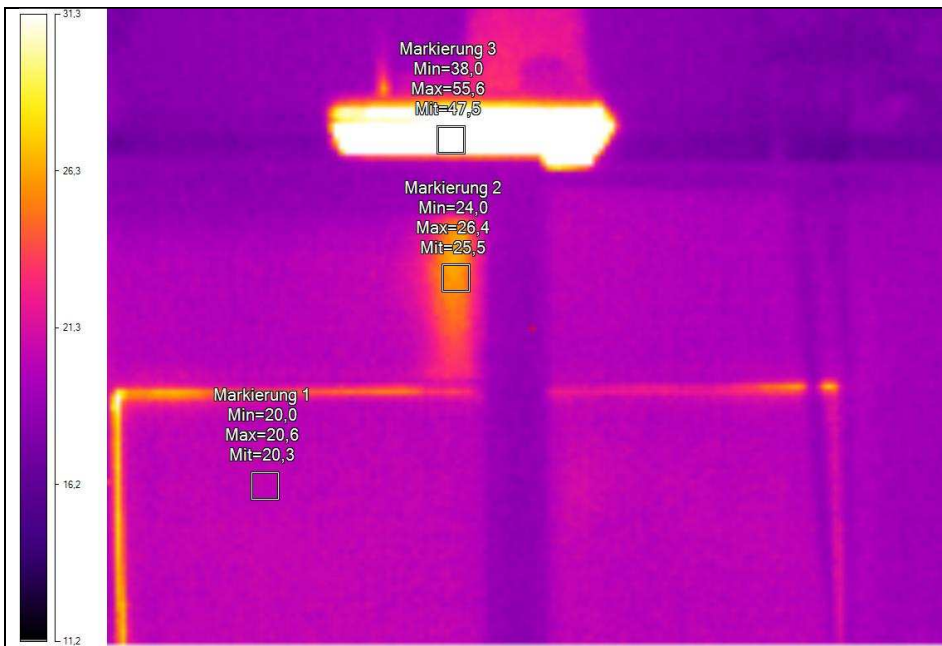
Wie zu erwarten zeigen sich auch größere Wärmebrücken in den Montagefugen der Seitenwandmodule, die zu einem erhöhten Wärmeverlust führten. Diese Montagefugen sind im Normalfall so nicht vorhanden. Zum Test unterschiedlicher Wandaufbauten wurde dieser GFK-Laborspeicher so konstruiert, dass das Seitenwandmodul auf einer Speicherseite austauschbar war. Die Gegenüberstellung der Montagefuge einer fest verklebten Wand und des lösbaren Seitenwandmoduls Typ-I (siehe die beiden linken Abbildungen) zeigt deutlich, dass in der Klebefuge des festen Moduls so gut wie keine Wärmebrücke existiert. Die Temperatur in der Fuge liegt nur geringfügig höher als die der Seitenwand selbst.

Wie in den anderen Abbildungen zu erkennen, weisen die Montagefugen der einzelnen Module aufgrund von Fertigungstoleranzen zusätzlich auch noch unterschiedliche Größen auf.



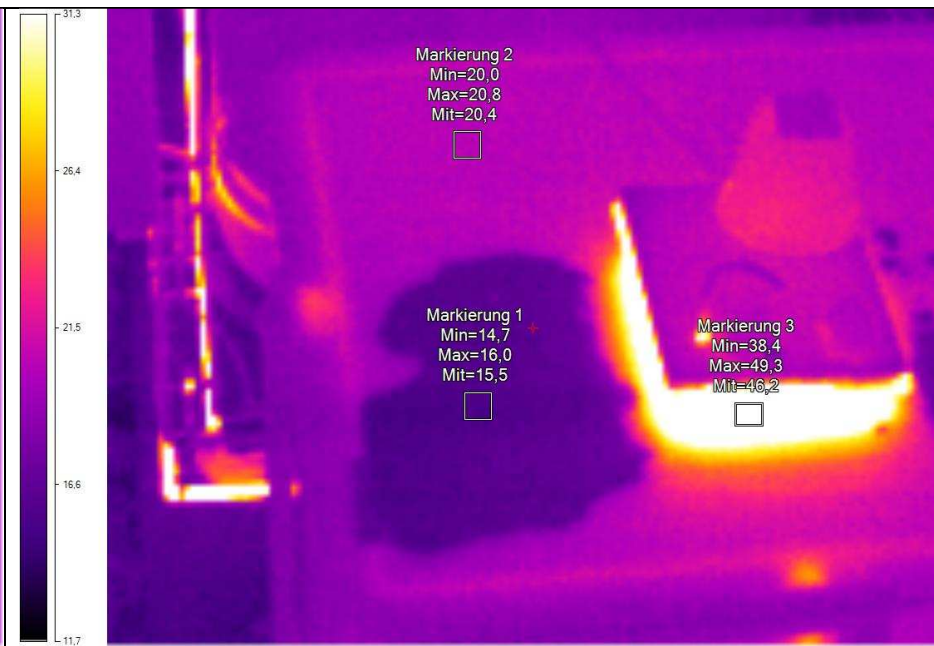
Wärmebrücke Einstiegsschacht

Wie bereits erläutert, musste für die geplanten Umbaumaßnahmen ein gesonderter Einstiegsschacht auf dem Deckelmodul montiert werden, der zusätzlich zur Aufnahme der Messtechnik diente. Die folgenden Aufnahmen zeigen die Temperaturen am Einstiegsschacht vor und nach der Anbringung einer zusätzlichen gedämmten Abdeckung.



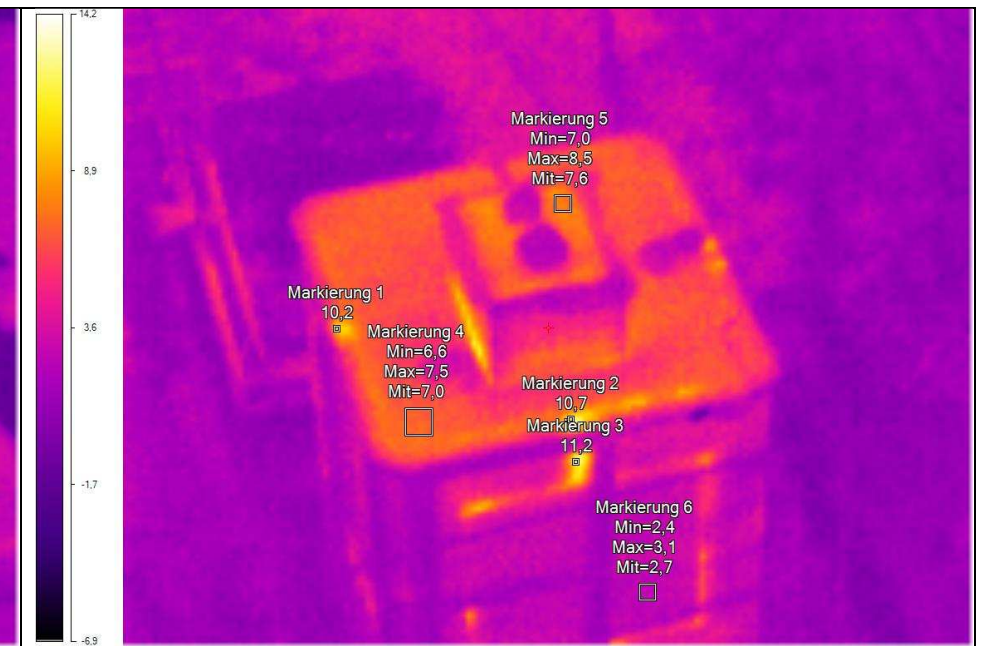
Modul Typ-I $t_i = 54 \text{ °C}$, $t_a = 15 \text{ °C}$,
Flanschunterseite des freiliegenden Einstiegsschachts

In dieser und in der nebenstehenden Wärmebildaufnahme ist der erhöhte Wärmeverlust durch den Einstiegsschacht zu erkennen. Die Oberflächentemperatur liegt hier ca. 35 K über der Temperatur der übrigen Speicher Oberfläche.



Modul Typ-I $t_i = 54 \text{ °C}$, $t_a = 15 \text{ °C}$,
Blick auf Deckelmodul mit freiliegendem Einstiegsschacht

Um diesen Wärmeverlust zu minimieren und die Messergebnisse nicht zu verfälschen, wurde der gesamte Einstiegsschacht vor der Durchführung der energetischen Versuchsreihen, wie in der rechten Aufnahme zu sehen, mit einer Dämmhaube versehen. Bei dem dunklen Fleck neben dem Einstiegsschacht handelt es sich um eine Regenwasserpfütze, durch welcher die Verdunstungskälte zur Absenkung der Oberflächentemperatur des Deckelmoduls führte.

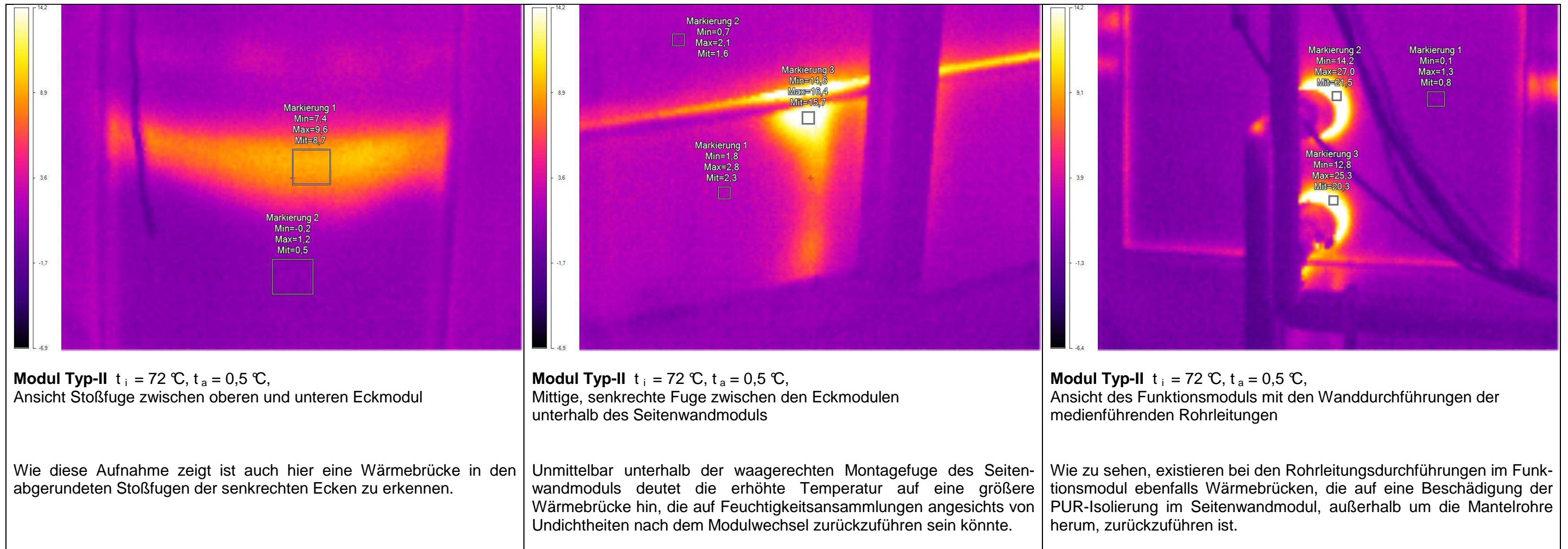


Modul Typ-II $t_i = 72 \text{ °C}$, $t_a = 0,5 \text{ °C}$,
Blick auf Deckelmodul mit abgedecktem Einstiegsschacht

Wie in dieser Aufnahme zu sehen, konnte so die Oberflächentemperatur des Einstiegsschachts annähernd auf das gleiche Niveau wie die des Deckelmoduls gesenkt werden.

Sonstige Wärmebrücken

Wie bereits erläutert, weisen die Stöße zwischen den Eckmodulen auf Schwachpunkte in der Isolierung hin. Ebenso ist die nachträgliche Montageweise der Mantelrohre für die Durchführungen der Medienanschlussrohre zu überdenken.



Beurteilung der Vakuumisolierung im Seitenwand-Modul Typ-III

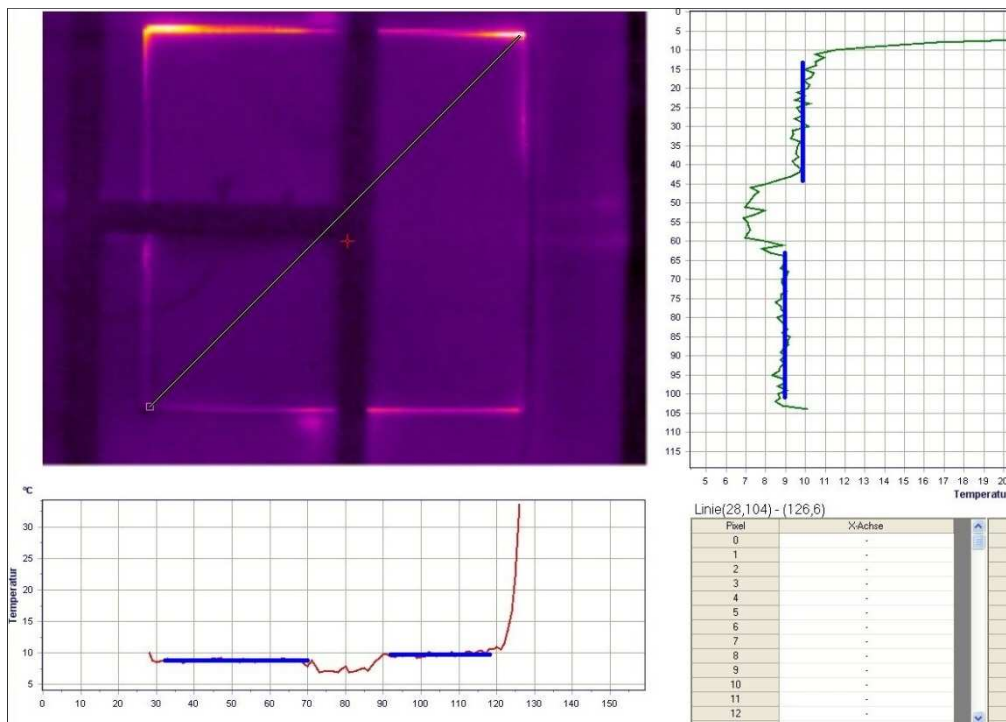


Abb. II.5.15 Diagonaler Oberflächentemperaturverlauf des Seitenwand-moduls-III

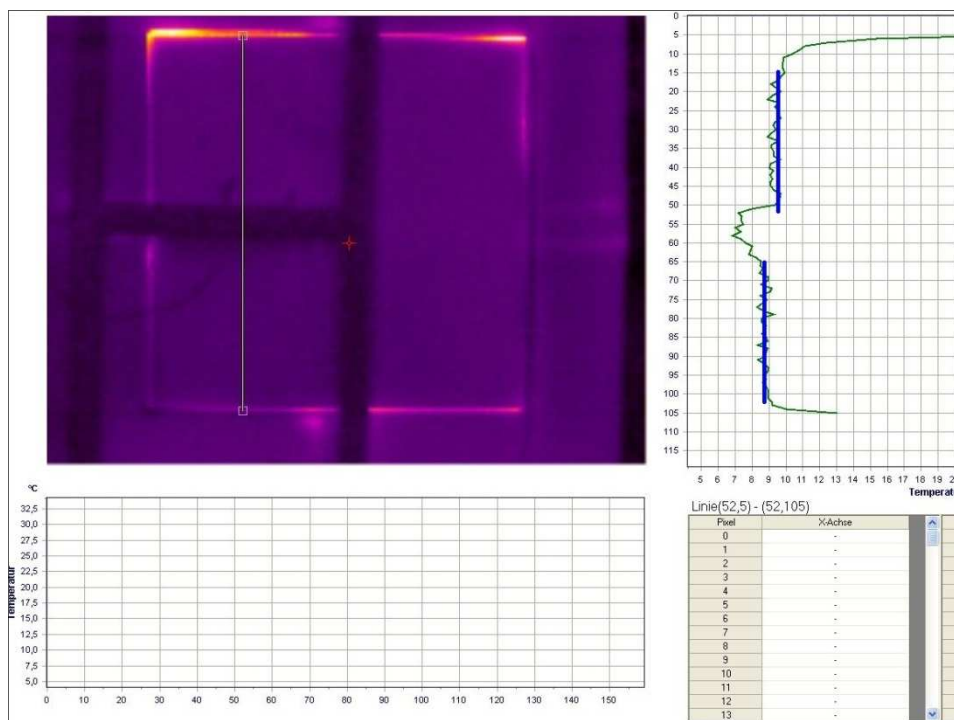


Abb. II.5.16 Oberflächentemperaturverlauf linke Seite

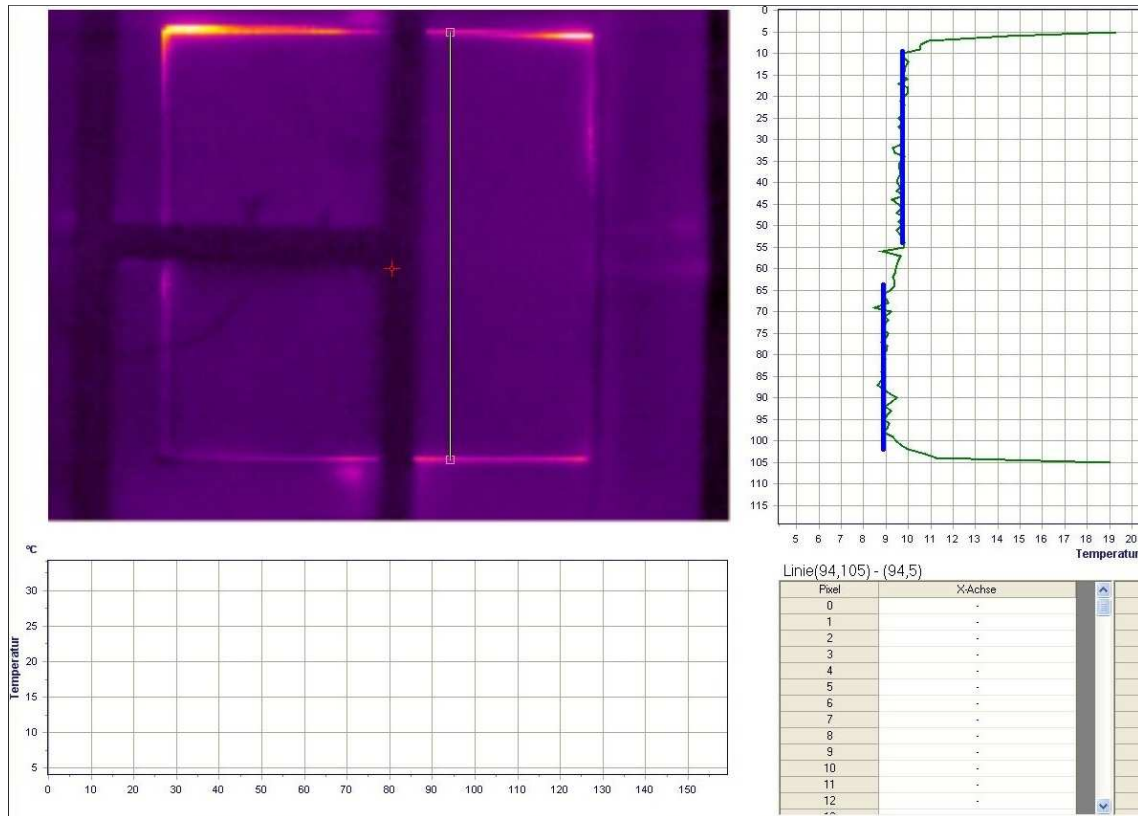


Abb. II.5.17 Oberflächentemperaturverlauf rechte Seite

Die obigen Abbildungen der Temperaturprofile über die Seitenwand des Typs-III lassen erkennen, dass ein fehlerhaftes Vakuumpaneel verbaut sein könnte. Die gesamte untere Hälfte der Seitenwand weist eine um ca. 1 K niedrigere Oberflächentemperatur als die obere Hälfte auf. D.h., die Trennfuge zwischen dem defekten und dem intakten 40 mm Vakuumpaneel befindet sich waagrecht in der Mitte der Wand.

Aus diesem Grund war es auch erforderlich, unterschiedliche Messungen zur Bestimmung des Wärmedurchgangs durchzuführen. Diese ergaben für den Bereich des intakten Paneels ca. 0,059 W/m²/K und für den Bereich des defekten Paneels ca. 0,087 W/m²/K. Der mittlere Wärmedurchgang von ca. 0,073 W/m²/K entspricht somit annähernd, dem des Seitenwandmoduls vom Typ II.

II.1.5.5 Bestimmung der Wasserdampf-Permeabilität

Zur Bestimmung der Permeabilität wäre es erforderlich, den Feuchtegehalt vor und nach den Versuchsdurchführungen zu kennen. Da aber die Module teilweise vor Ort bei der Fa. VKA Schönbrunn ausgeschäumt oder durch vorgefertigten PUR-Schaumelemente ergänzt wurden, liegen dazu keine Messwerte vor. Aus diesem Grund geben die nachfolgenden Betrachtungen nur eine Abschätzung zur Wasserdampf-Permeabilität wieder.

Am Ende aller Versuchsreihen wurden aus zwei verschiedenen Seitenwänden Proben entnommen und auf ihren Wassergehalt überprüft. Dazu wurden das Gewicht sowie das Volumen bestimmt. Nach Trocknung mittels Silikalgel wurde die Proben den Umgebungsbedingungen des Labors ausgesetzt und dieser Zustand als Ausgangswert festgelegt.

Da der Laborspeicher während der Versuchsreihen nie ständig gefüllt war, wurde als Basis für die Dauer der Wasserdampf-Permeation Nettotage angesetzt, d.h. die Anzahl der Tage in der der Speicher gefüllt war minus den Tagen in der die Permeation durch Leerstand in entgegengesetzter Richtung abgelaufen ist. Diese Annahme ist deshalb begründet, da bei Leerstand, durch Um- bzw. Einbauten und Reparaturen, die Temperaturen innerhalb des Speichers in diesem Zeitraum zwischen 25 °C und 35 °C lagen.

Die Auswertung dazu ist in Abb. II.5.17 und Abb. II.5.18 dargestellt. Überschlänglich und unter den getroffenen Annahmen würde sich daraus eine Wasserdampf-Diffusion von ca. unter 1 g/m²d ergeben. Offen bleibt dabei, ob diese Diffusion zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Speicherwände und damit zu der gemessenen, anscheinend von der Zeitdauer der Versuche abgängigen Verschlechterung der Speicherzeitkonstante führte. Dazu wären weitergehende Untersuchungen notwendig, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht realisiert werden konnten.

| Datum | Zeit | Probe Wand 4 (PUR) | Probe Wand 1 (Typ-III) | ME | Bemerkung |
|---------|-------|--------------------|------------------------|-----|---|
| 12. Mai | 10:45 | 16,09 | 5,29 | [g] | bei Entnahme aus der Wand |
| 13. Mai | 13:08 | 15,89 | 5,24 | [g] | nach Trocknung mit Silikalgel |
| 18. Mai | 11:00 | 15,71 | 5,23 | [g] | nach Trocknung mit Silikalgel |
| 19. Mai | 09:05 | 15,82 | 5,25 | [g] | bei Umgebungsbedingungen |
| 20. Mai | 07:55 | 15,81 | 5,25 | [g] | bei Umgebungsbedingungen |
| 21. Mai | 07:50 | 15,81 | 5,24 | [g] | bei Umgebungsbedingungen (=Einbauzustand) |

| | | | | |
|-----------------|--------------|--------------|--------------------|--|
| Differenz | 0,28 | 0,04 | [g] | Wasseranteil gegenüber Einbauzustand |
| Volumen | 342 | 126 | [cm ³] | |
| GFK-Innenfläche | 35,26 | 35,26 | [cm ²] | durch die der Wasserdampf diffundiert (Außenfläche der Wandung unberücksichtigt) |

Abb. II.5.18 Feuchtigkeitsmessungen

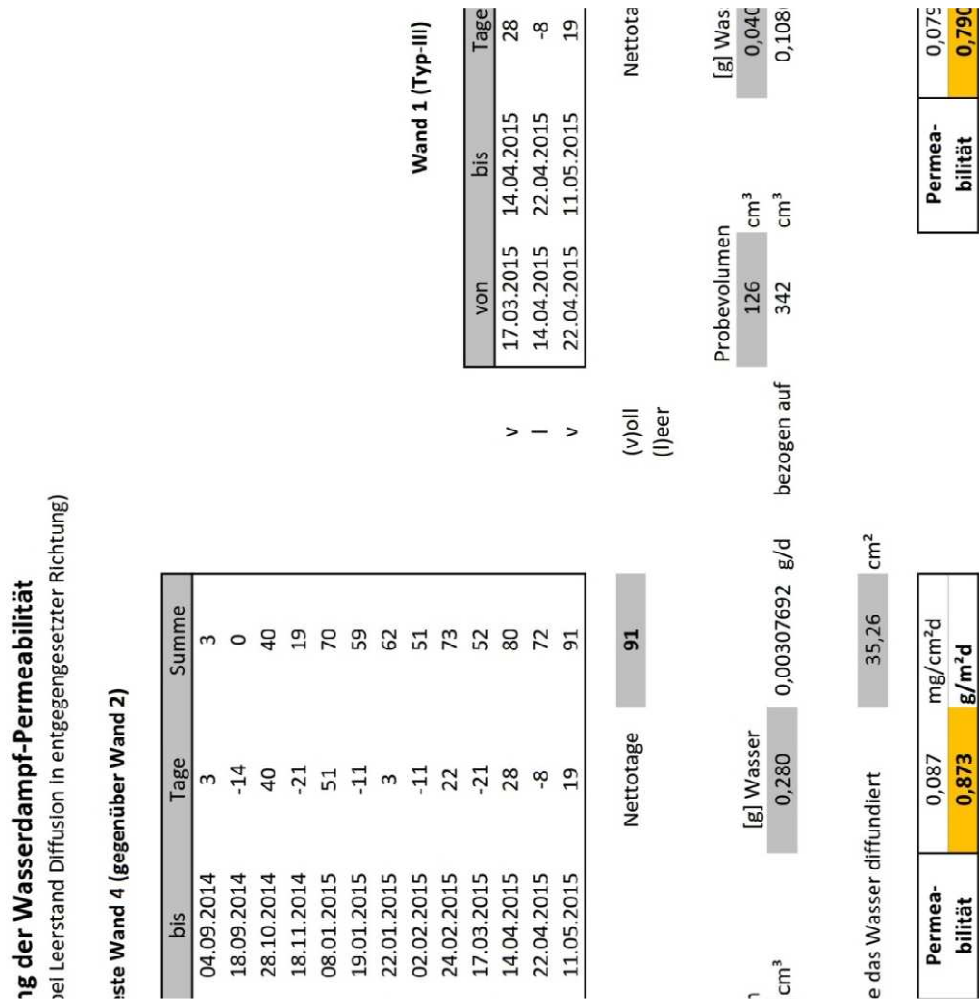


Abb. II.5.19 Wasserdampf-Permeabilität

II.1.5.6 Temperaturprofil und Leistung bei Be- und Entladung des Laborspeichers

Der Versuchsaufbau (siehe Kap. II.4) gestattete es, die Leistungen als auch das Temperaturprofil während der Be- und Entladung aufzunehmen und diese miteinander zu vergleichen. Die Abbildung des Temperaturprofils erfolgte nicht nur senkrecht in der Mitte des Speichers, sondern auch auf zwei festgelegten Höhen von 1,26 m und 0,61 m über dem Boden in waagerechter Ausbreitung, von der Mitte des Speichers bis zur Innenseite des auswechselbaren Seitenwandmoduls. Dies ermöglichte Aussagen, über die Güte der Schichtenladung bzw. zur möglichen Durchmischung während des Be- und Entladungsprozesses sowie im statischen Zustand in der Abkühlphase zu treffen.

II.1.5.6.1 Beladung über den (Solar-)Schichtenlader

Nachfolgend ist eine typische Beladung mittels Schichtenlader dargestellt. Die übertragende Wärmeleistung betrug 60 kW, bei einem Volumenstrom von 1,0 m³/h und einer Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von ca. 53 K. Man erkennt deutlich, dass das Heizmedium an der obersten Öffnung des Schichtenladers in 1,26 m Höhe (T302) austritt und dabei eine stetige Temperaturschichtung aufgebaut wird. Die Abb. II.5.19 zeigt die Temperaturen in der Mitte des Speichers unmittelbar vor den Austrittsöffnungen des Schichtenladers sowie Leistung, Volumenstrom und Temperaturen von Vor- und Rücklauf.

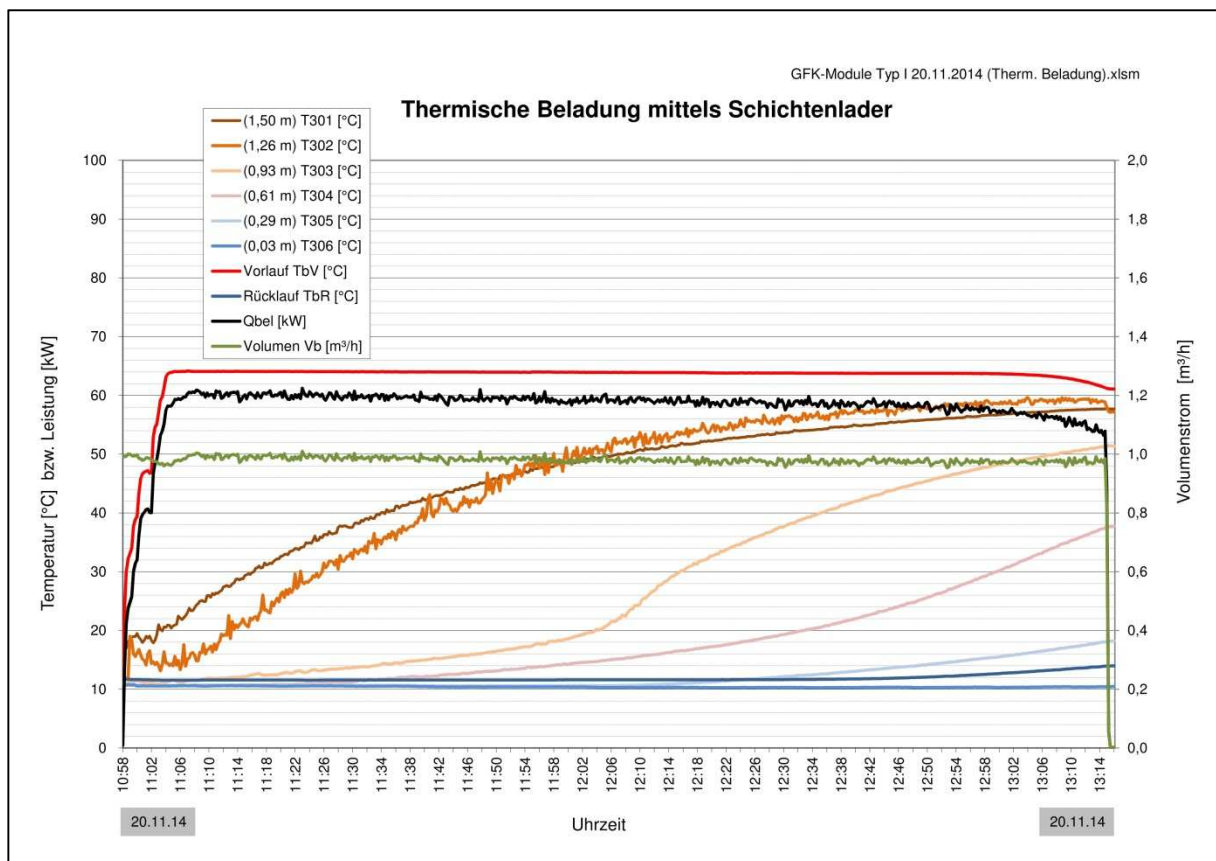


Abb. II.5.20 Thermische Beladung mittels Schichtenlader

Die Abb. II.5.20 bis II.5.24 zeigen den etappenweisen Aufbau des gesamten Temperaturfeldes in vertikaler Ausbreitung als auch in horizontaler Ausbreitung von der Mitte des Wärmespeichers bis zur Außenwand. Auf der gestrichelten Linie sind die vertikalen Temperaturen (T301 bis 306) in der Mitte des Speichers und auf der roten bzw. blauen Linie die horizontale Temperaturverteilung in 1,26 m bzw. 0,61 m Höhe abgebildet. Auf der rechten Seite befindet sich die Speicherwand. Der genaue Zeitpunkt der jeweiligen Messung ist in der Überschrift des Diagramms zu finden.

An den horizontalen Temperaturverteilungen ist zu erkennen, dass sich zu jedem Zeitpunkt eine absolut stabile Schichtung im Speicher aufbaut, die weder durch den Medieneintritt (T302) noch von der Temperatur an der Außenwand beeinflusst wird. Lediglich beim Heizmedieneintritt (T302) während der thermischen Beladung ist eine leicht höhere Temperatur festzustellen. Selbst 20 Stunden nach der Beladung (Abb. II.5.24) bleibt mit einem sehr geringen Temperaturabfall die Temperaturschichtung vollkommen erhalten. Dies machen auch die Abb. II.5.25 bis II.5.27 sehr deutlich. Hier sind noch einmal die Temperaturen des gesamten Zyklus (thermische Beladung mit nachfolgender Abkühlung) auf der kontinuierlichen Zeitachse dargestellt.

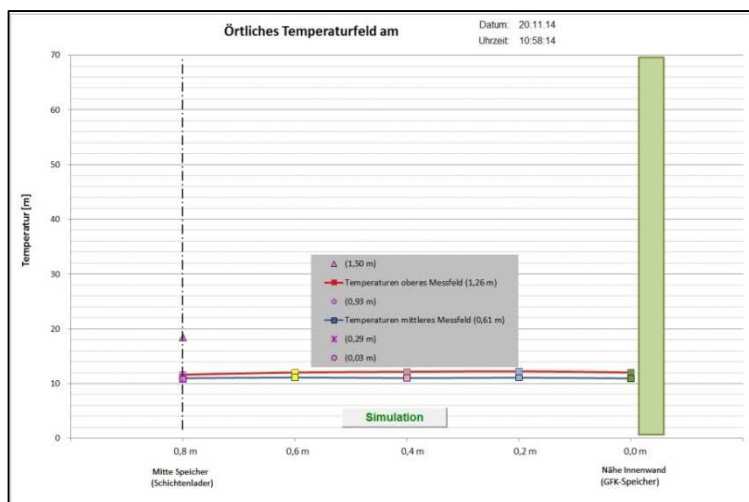


Abb. II.5.21
 Temperaturfeld vor Beginn
 der Beladung

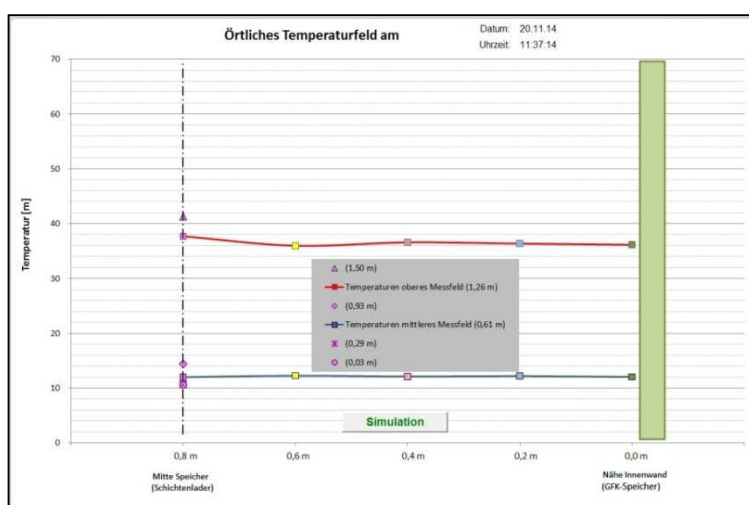


Abb. II.5.22
 Temperaturfeld nach 40 min

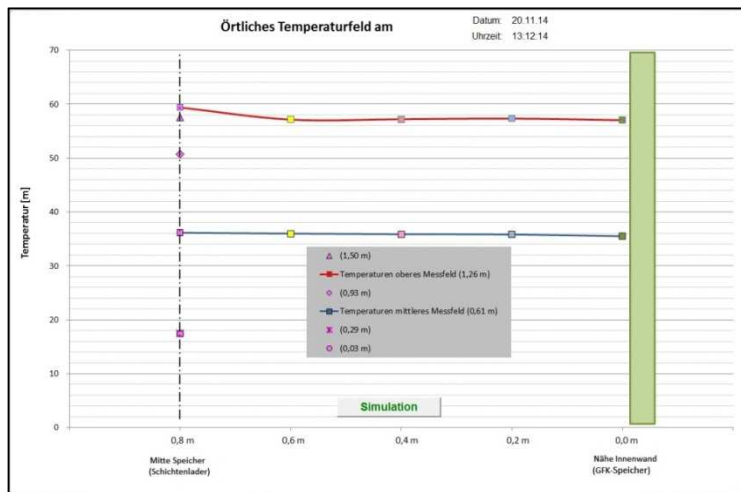


Abb. II.5.23
 Temperaturfeld nach 2 h 15 min

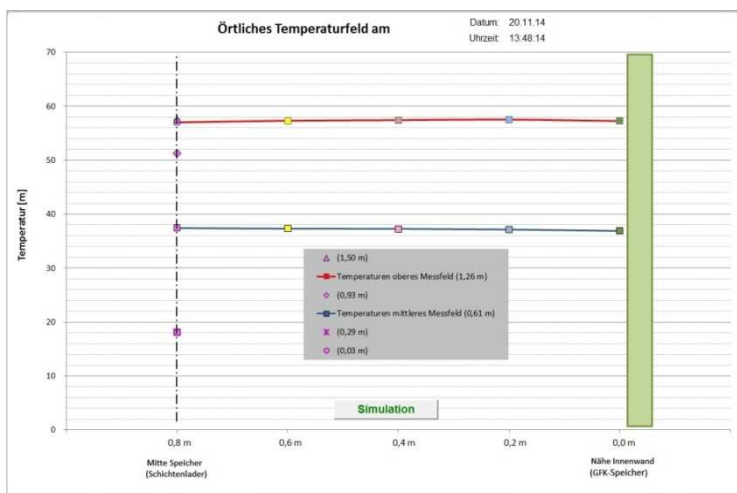


Abb. II.5.24
 Temperaturfeld nach 2 h 50 min

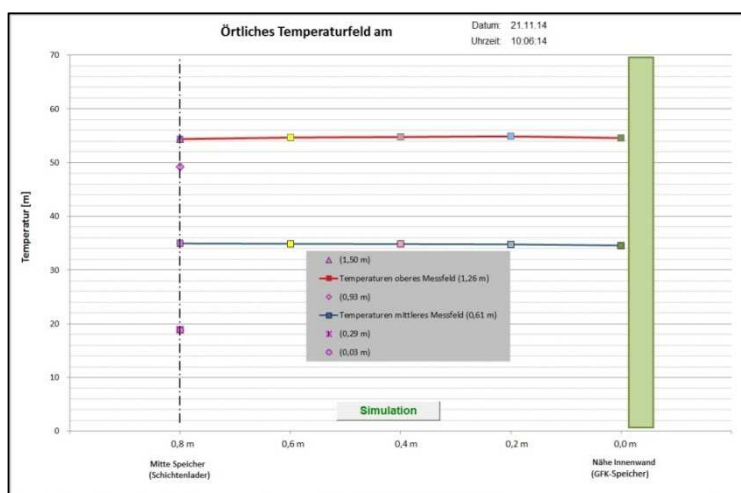


Abb. II.5.25
 Temperaturfeld nach einer Abkühlhase von 20 h

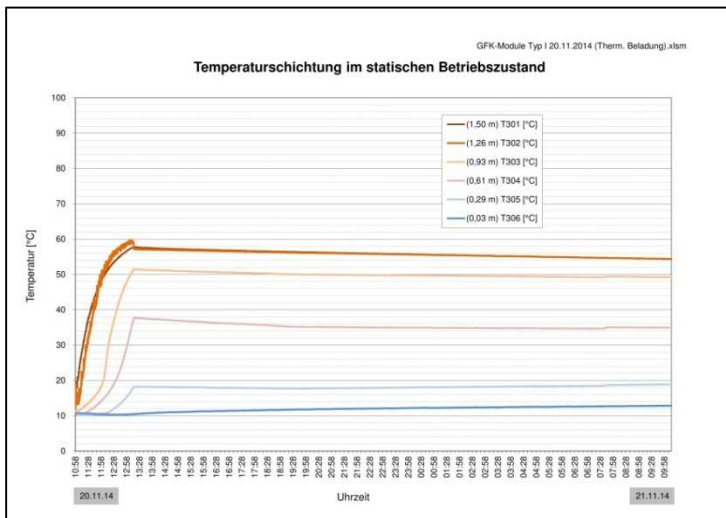


Abb. II.5.26
Gesamter Temperaturverlauf
Beladung und Abkühlung
Mitte des Wärmespeichers

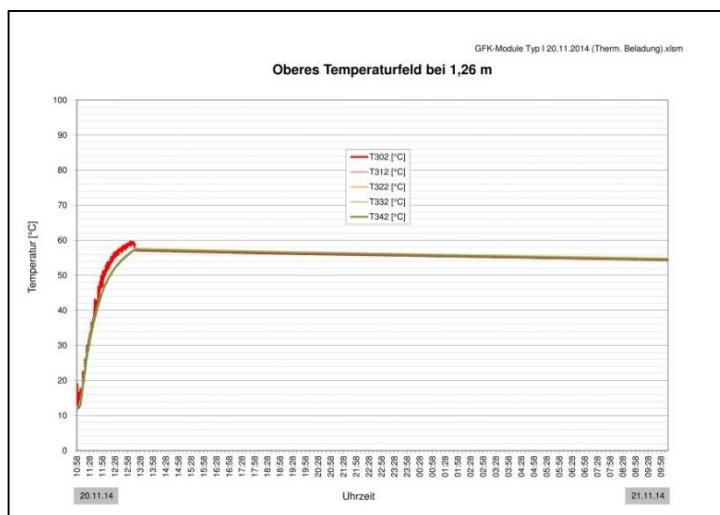


Abb. II.5.27
Gesamter Temperaturverlauf
Beladung und Abkühlung
oberes Temperaturfeld in
1,26 m Höhe über OK Boden

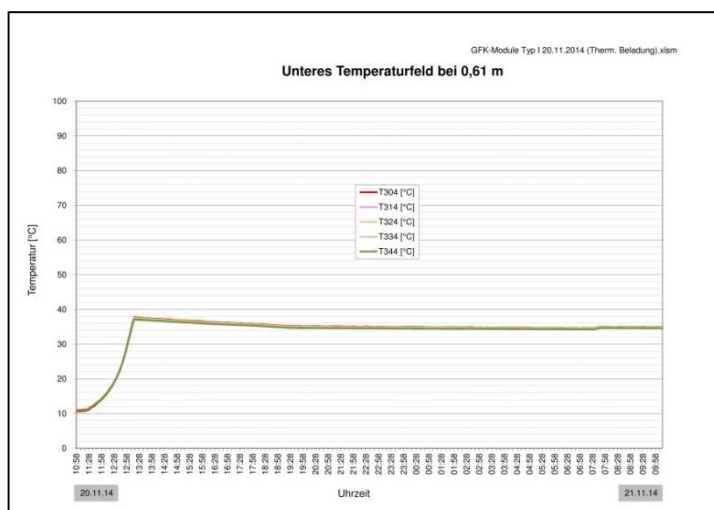


Abb. II.5.28
Gesamter Temperaturverlauf
Beladung und Abkühlung
oberes Temperaturfeld in
0,61 m Höhe über OK Boden

Zur Ermittlung der Speicherzeitkonstanten muss ein voll durchmischter Wärmespeicher mit gleich bleibender vertikaler Temperaturverteilung vorliegen, sodass über die gesamte Oberfläche der gleiche Wärmestrom vorhanden ist. Gleichzeitig verlangt der Nachweis der Temperaturbeständigkeit des GFK Labor-Wärmespeichers eine möglichst hohe Speichertemperatur. Um beide Forderungen zu erfüllen, wurde der Wärmespeicher etappenweise bis zu einer Speichertemperatur von 90 °C aufgeladen.

Der Grund für die schrittweise Aufladung lag vor allem daran, dass die Umlaufpumpe, durch die drucklose Betriebsweise des GFK-Laborspeichers, keine höhere Temperatur zuließ. Jede weitere Erhöhung der Vorlauftemperatur hätte zu Kavitation in der Umlaufpumpe und zum Stillstand des Volumenstroms geführt. Die beiden folgenden Abb. II.5.28 und II.5.29 zeigen eine derartige voll durchmischte Aufladung. Zwischen den einzelnen Aufladungen lag jeweils ein Tag, außer zwischen dem Abbruch und der Nachladung bei 60 °C. Hier betrug der Zeitraum der Abkühlphase vier Tage.

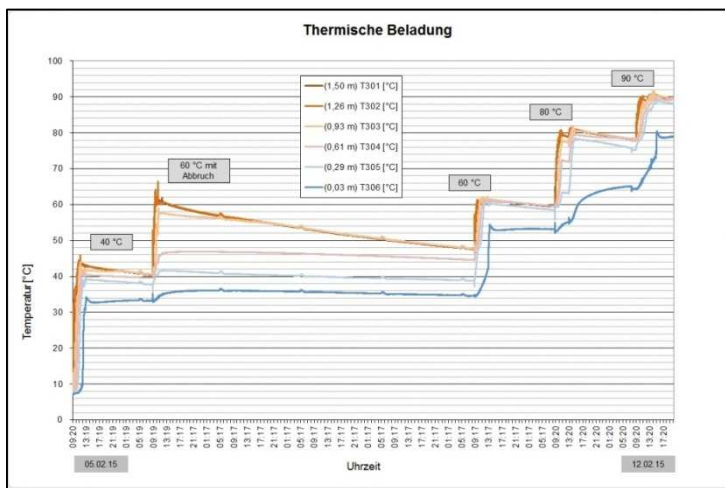


Abb. II.5.29
 Schrittweiser Temperatur-
 anhebung mit vollständiger
 Beladung

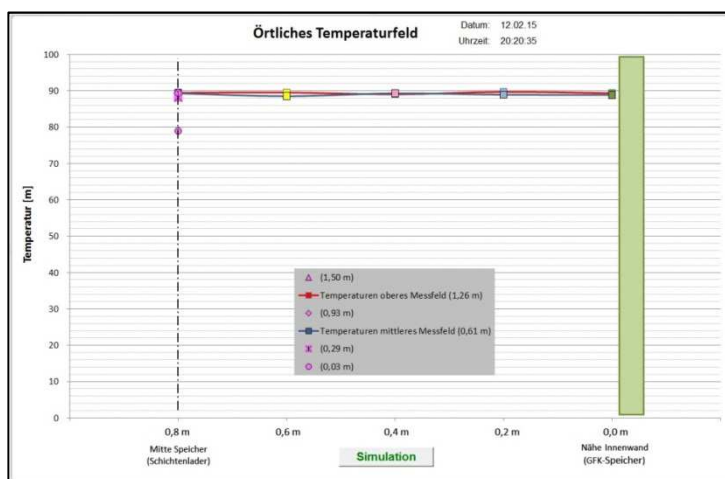


Abb. II.5.30
 Temperaturprofil nach
 vollständiger Beladung

Die von den übrigen Speichertemperaturen abweichende Temperatur (T306) zeigt, dass unmittelbar über dem Boden (ca. 3 cm) mit 80 °C eine um 10 K niedrigere Temperatur herrscht. Die Ursache hierfür ist in der etwas zu hohen Anordnung der Rücklauffasse von ca. 10 cm über dem Boden zu suchen. Bei einer thermischen Beladung mit ca. 92 °C fließt das Heizwasser überwiegend aus dem oberen Austritt des Schichtenladers bei 1,26 m Höhe in den Speicher ein, wärmt diesen von oben her durch und tritt in einer Höhe von ca. 10 cm über dem Boden wieder aus. So bleibt das Wasser zwischen dem Rücklauf und dem Boden als ruhende Schicht stehen.

Wird der Labor-Wärmespeicher mit einer Vorlauftemperatur unterhalb der Temperatur der untersten Austrittsöffnung des Schichtenladers (T305) beladen, so strömt das zufließende Wasser überwiegend auch nur dort aus und die unmittelbar darunterliegende Bodenschicht wird somit leichter durchmischt. Abb. II.5.30 zeigt diesen Effekt und macht auch die Funktionsweise einer Beladung über den Schichtenlader deutlich.

Die leichten Schwingungen der Temperaturen (zittriger Verlauf), einhergehend mit denen des Volumenstroms, zeigen, aus welcher Austrittsöffnung des Schichtenladers das Heizmedium gerade strömt

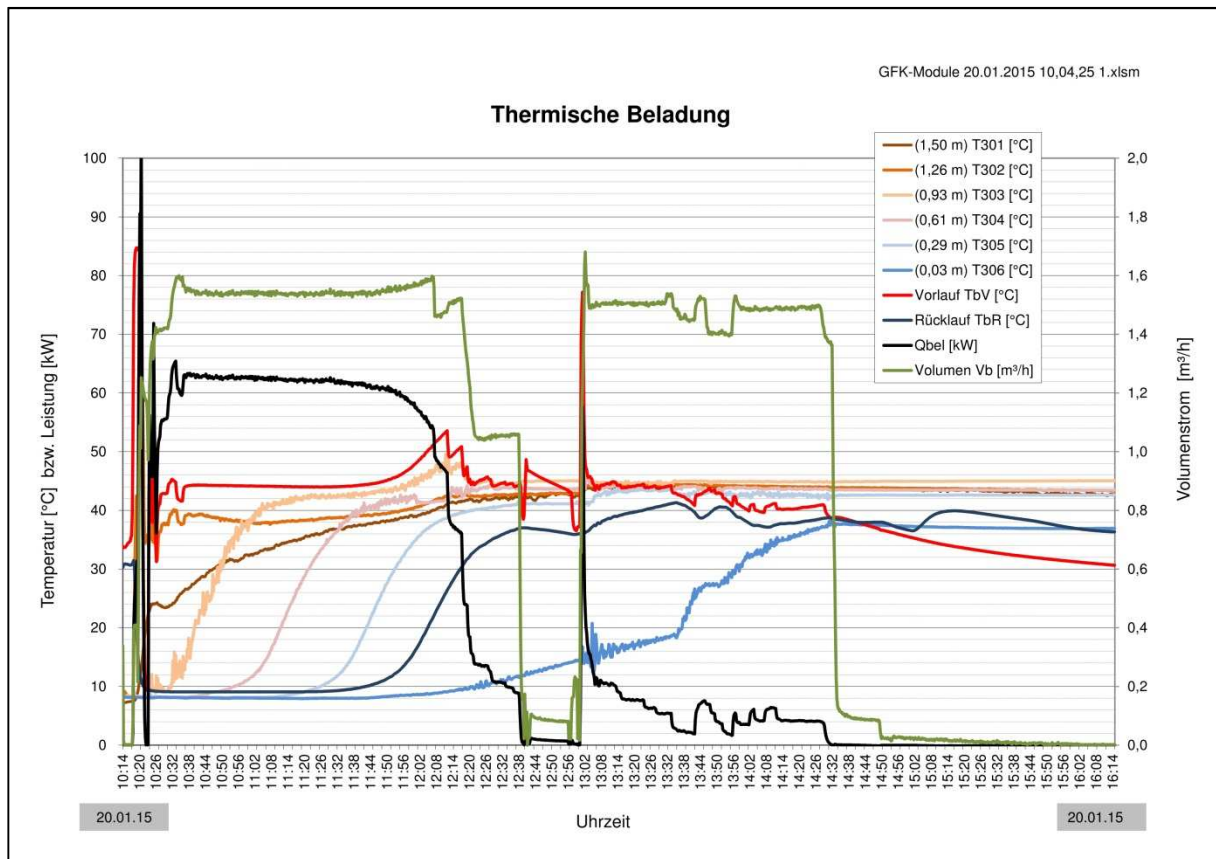


Abb. II.5.31 Thermische Beladung mit niedriger Vorlauftemperatur

II.1.5.6.2 Beladung über einen Wellrohr-Wärmeübertrager

Die Untersuchungen zur thermischen Beladung des Speichers über einen Wellrohr-Wärmeübertrager dienten nicht als Vergleich zur Beladung mittels Schichtenlader, sondern zur Ermittlung der übertragbaren Wärmeleistung. Deshalb wurde er einfachheitshalber auf der Bodenfläche des Speichers montiert. Für einen Vergleich wäre er damit auch falsch positioniert.

Die Leistung für das verwendete Edelstahl-Wellrohr DN 32 wird vom Hersteller mit 3,5 bis 4 kW/m angegeben. Der Wärmetauscher war als Spirale mit einer Gesamtlänge von 15 m ausgeführt. Dies entspricht einer möglichen Gesamtleistung von ca. 52,5 bis 60 kW. Die tatsächlich erreichbare Leistung ist natürlich stark vom Volumenstrom und der Temperaturdifferenz abhängig.

Wie die nachfolgende Abb. II.5.31 zeigt, wurde dieser Wert, bei einem Volumenstrom von ca. 1 m³/h und einer Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt von ca. 50 K, erreicht. Der Volumenstrom von 1 m³/h entspricht dabei einer Strömungsgeschwindigkeit im freien Querschnitt des Edelstahl-Wellrohrs von ca. 0,35 m/s. Bei einem Volumenstrom von 1,5 m³/h (ca. 0,5 m/s) und einer Temperaturdifferenz von ca. 45 K lag die erzielte Leistung bei bis zu 80 kW und damit über 5 kW/m.

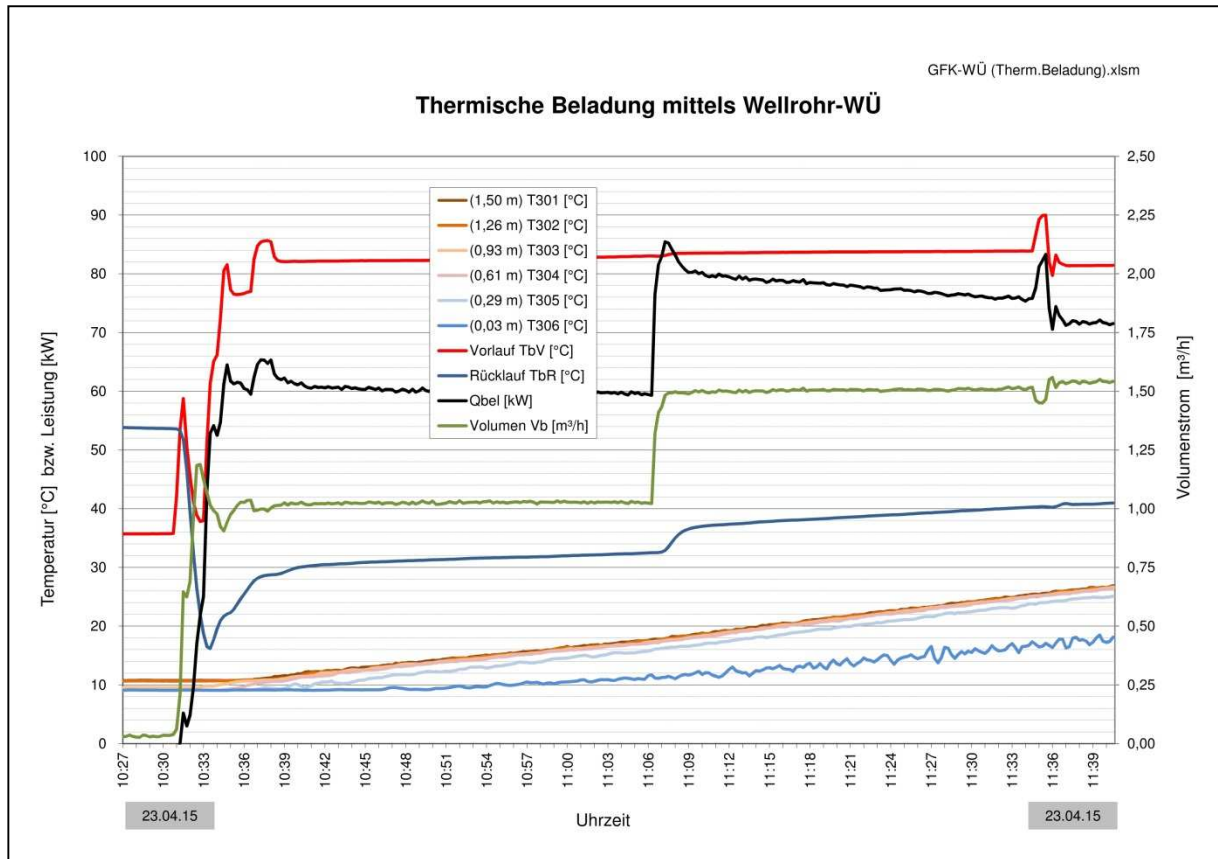


Abb. II.5.32 Thermische Beladung mit Wellrohr-Wärmeübertrager

II.1.5.6.3 Entladung über einen Wellrohr-Wärmeübertrager

Geht man wieder von den Herstellerkennwerten und der Tatsache aus, dass die Gesamtlänge des Edelstahl-Wellrohrs bei diesem Wärmeübertrager 30 m beträgt, kann man bei gleichen Betriebsparametern die doppelte Leistung bis 120 kW erzielen. Dies ist aber aufgrund der vorhandenen maximalen Temperaturdifferenz ($\Delta T = T_{eR} - T_{eV}$) von 58 K und einem Volumenstrom von max. 1,1 m³/h begrenzt.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot c_V \cdot \Delta T \quad \text{mit: } c_V = 1,16 \text{ kW}/(\text{m}^3\text{K}) \text{ spezifische Wärmekapazität}$$

Damit liegt die Höchstleistung bei 74 kW. In Abb. II.5.32 wird dieser Wert um 10:30 Uhr kurzfristig erreicht. Danach fällt, bedingt durch die fortschreitende Speicharentladung, die Austrittstemperatur an der Entnahmestelle in 1,16 m Höhe (T_{eR}) ab und die Leistung verringert sich kontinuierlich.

Anzumerken ist, dass die Austrittstemperatur zu keiner Zeit, die in dieser Höhe vorherrschende Speichertemperatur (zwischen T302 und T303, siehe dazu Abb. II.4.6) erreicht. Rückwirkend kann man daraus schlussfolgern, dass der überwiegende Teil des Wellrohrs in der gewünschten Temperaturzone liegen sollte. Da bei gleicher Leistung die erforderliche Wärmeübertragerfläche nicht beliebig verringert werden kann, bedeutet dies eine großflächigere Verlegung des Wellrohrs in der jeweiligen Temperaturzone.

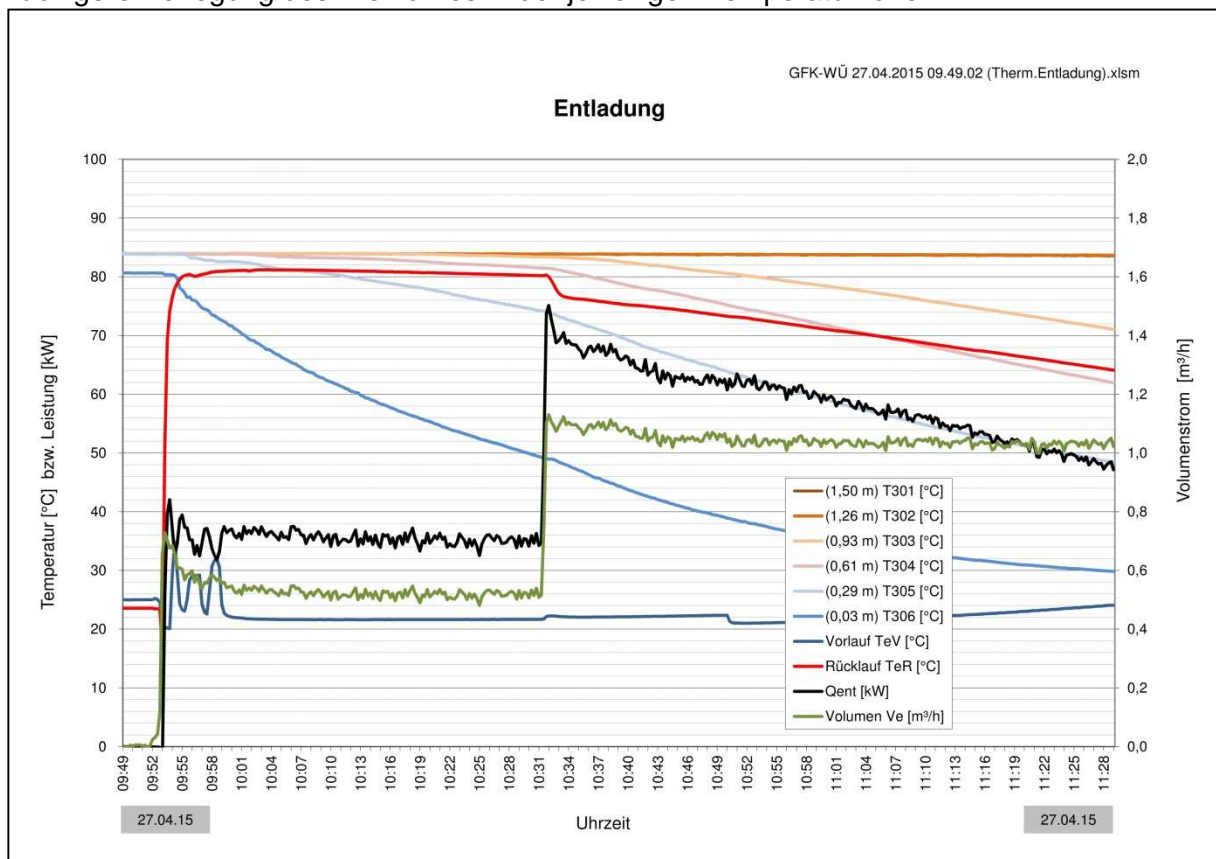


Abb. II.5.33 Thermische Entladung mit Wellrohr-Wärmeübertrager

Die Entladung wurde gegen 11:30 Uhr abgebrochen, um die Speichertemperaturen im ruhenden Betriebszustand zwei Tage lang zu beobachten. Ziel war, den Einfluss des thermisch gut leitenden Edelstahl-Wellrohrs der Wärmeübertrager in Bezug auf die Temperaturschichtung zu erhalten. Wie aus der Abb. II.5.33 zu entnehmen ist, nahmen zwar die Temperaturen im Bereich der Wärmetauscher geringfügig ab, aber eine Durchmischung fand nicht statt.

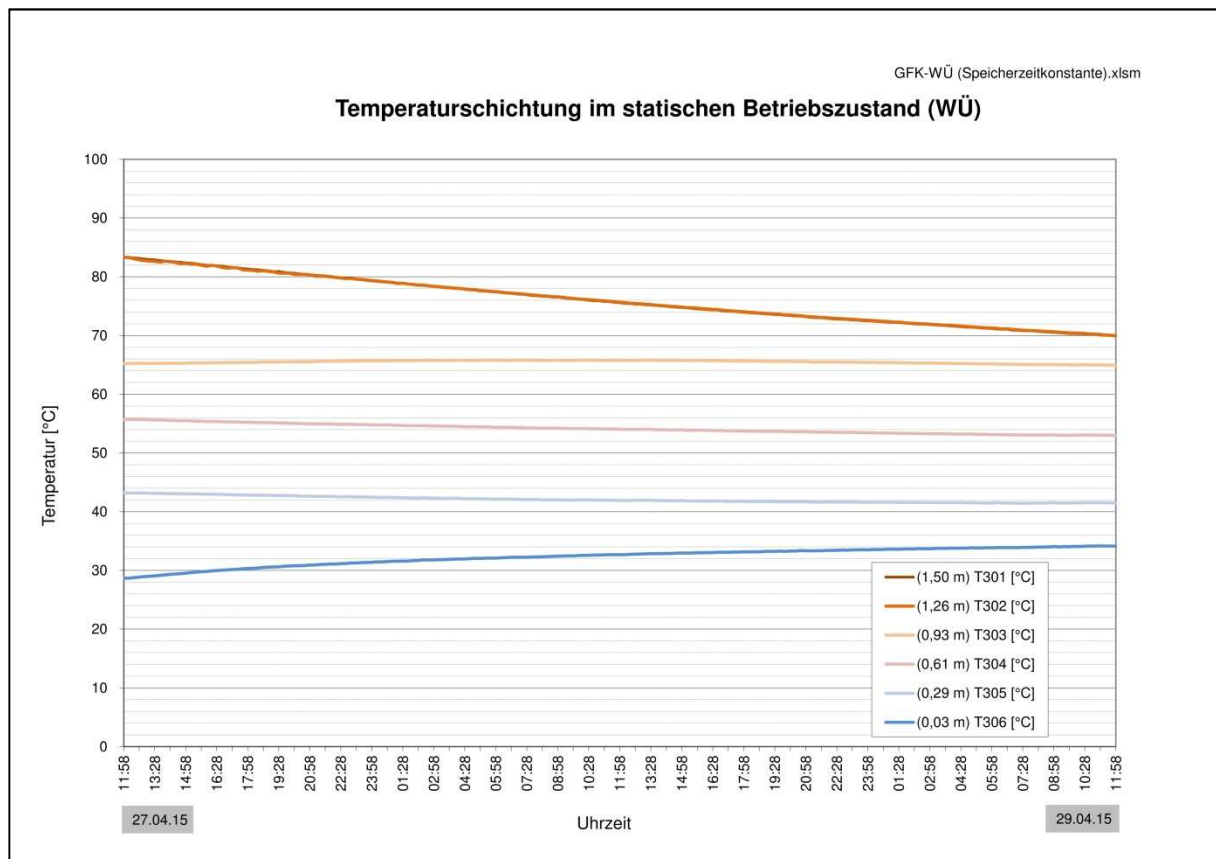


Abb. II.5.34 Thermische Entladung mit Wellrohr-Wärmeübertrager

II.1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erwartungen und im Pflichtenheft vorausgerechneten Werte wurden weitestgehend erreicht.

So konnte auf Basis der Messwerte, eine Verringerung der Wärmeleitung durch die Speicherwand, bei teilweisem Ersatz der reinen PUR-Dämmung durch Vakuumpaneele, um 60 % von 0,183 W/m²K auf 0,072 W/m²K nachgewiesen werden.

Die gemessene Verformung der Speicherwände durch die Temperaturbelastung bis 90 °C, bei unterschiedlichem innerem Aufbau der Dämmung, entsprach in allen Fällen den vorausgerechneten Werten. Somit wurden die zulässigen Festigkeitswerte durch die aufgetretenen Spannungen nicht überschritten.

Der berechnete Wert der Speicherzeitkonstante von 38 Tagen (Anzahl Tage bis zum Abfall der anfänglichen Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur um ca. 63 %) konnten durch die Messungen nicht bestätigt werden. Gründe dafür lagen zum einen in den vorhandenen Wärmebrücken der Verbindungen und Anschlüsse des Laborwärmespeichers und zum anderen an die witterungsabhängige Aufstellung im Freien.

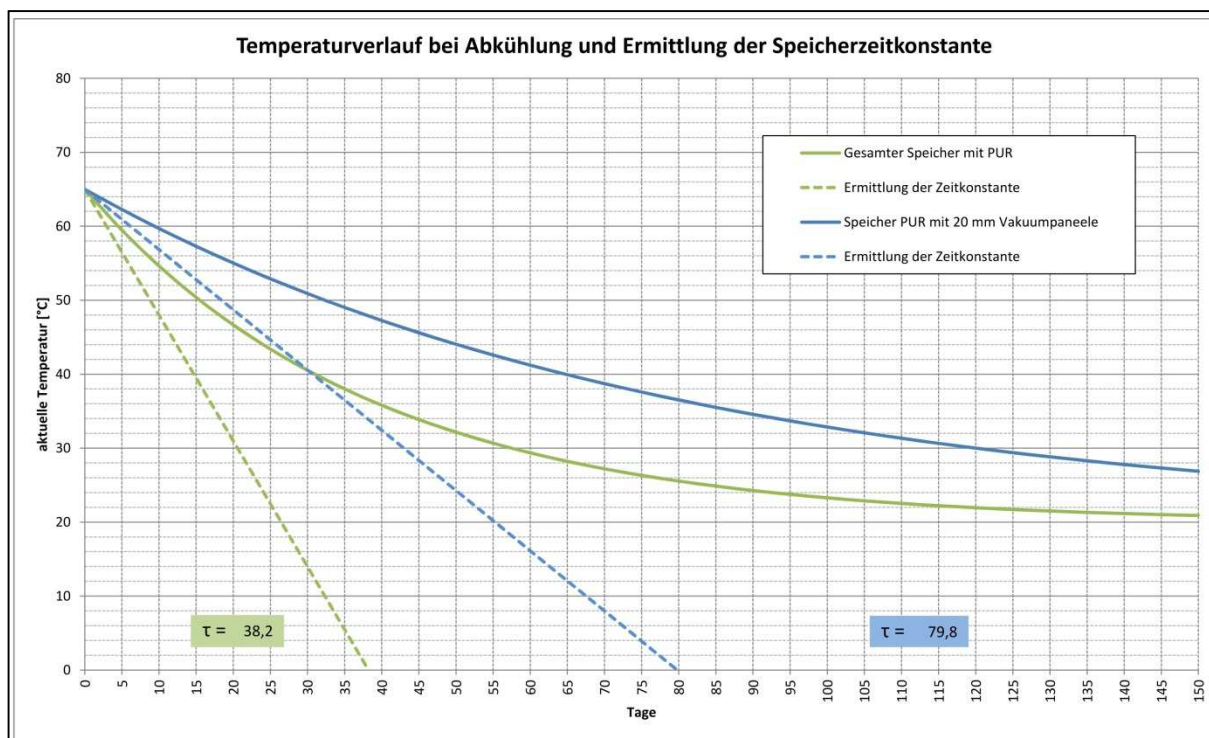
Die Ergebnisse sind Grundlage zur weiteren Umsetzung der Entwicklung in die Machbarkeit und Vorbereitung einer Serienproduktion. Ziel muss es sein, die Warmhalteverluste so zu minimieren, dass die Anforderungen an eine Energieeffizienzklasse A bzw. A+ erfüllt werden.

Gemäß Verordnung (EG) Nr. 814/2013 der Kommission vom 02. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/RG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern, sind ab dem 26. September 2015 Speicher bis zu einer Größe von 2000 l in eine Energieeffizienzklasse einzuordnen und zudem müssen Speicher bis zur maximalen Größe von 500 l mit einem Energieeffizienzlabel gekennzeichnet sein. Größere Speicher als 2000 l, wie der hier untersuchte 4 m³ Laborwärmespeicher, sind zurzeit nicht inbegriffen. Es kann jedoch auf eine mögliche, erreichbare Energieeffizienzklasse entsprechend der Verordnung hingewiesen werden.

Die Eingruppierung in eine der Klassen setzt die Bestimmung der Warmhalteverluste voraus. Für jede Energieeffizienzklasse gelten auf Basis des Speichervolumens bestimmte minimale und maximale Warmhalteverluste. Die Eingruppierung erfolgt durch Vergleich des Warmhalteverlustes S mit diesen Minimal- und Maximalwerten der einzelnen Energieeffizienzklassen.

Grundlage der Berechnungen bilden die spezifischen Wärmeleitungs- bzw. Widerstandsbeiwerte der einzelnen Schichten der Speicherwände. Daraus können unter Zugrundelegung einer Temperatur-Differenz, lt. EU-Verordnung 814/2013 von $\Delta T = 45 \text{ K}$ (innen 65 °C, außen 20 °C), der Warmhalteverlust S berechnet werden.

Nachfolgend sind zwei Gegenüberstellungen aufgeführt. Ein Speicher mit einer Isolierung aus reinem PUR-Schaum und ein Speicher bei dem die PUR-Isolierung in allen Seitenwänden, dem Deckel und dem Boden teilweise durch Vakuumpaneele ersetzt wurde.



Energieeffizienzklasse von Warmwasserspeichern

Speichervolumen **4000** Liter

Unverbindliche Referenzwert **119,8** [W]
 Maximalwert ab 26.09.2017 **246,5** [W]

| Warmhalteverluste [W] | | Label |
|-----------------------|-------|-------|
| von | bis | |
| --- | 92,7 | A+ |
| 92,7 | 125,8 | A |
| 125,8 | 175,6 | B |
| 175,6 | 246,5 | C |
| 246,5 | 306,1 | D |
| 306,1 | 402,9 | E |
| 402,9 | 476,9 | F |
| 476,9 | --- | G |

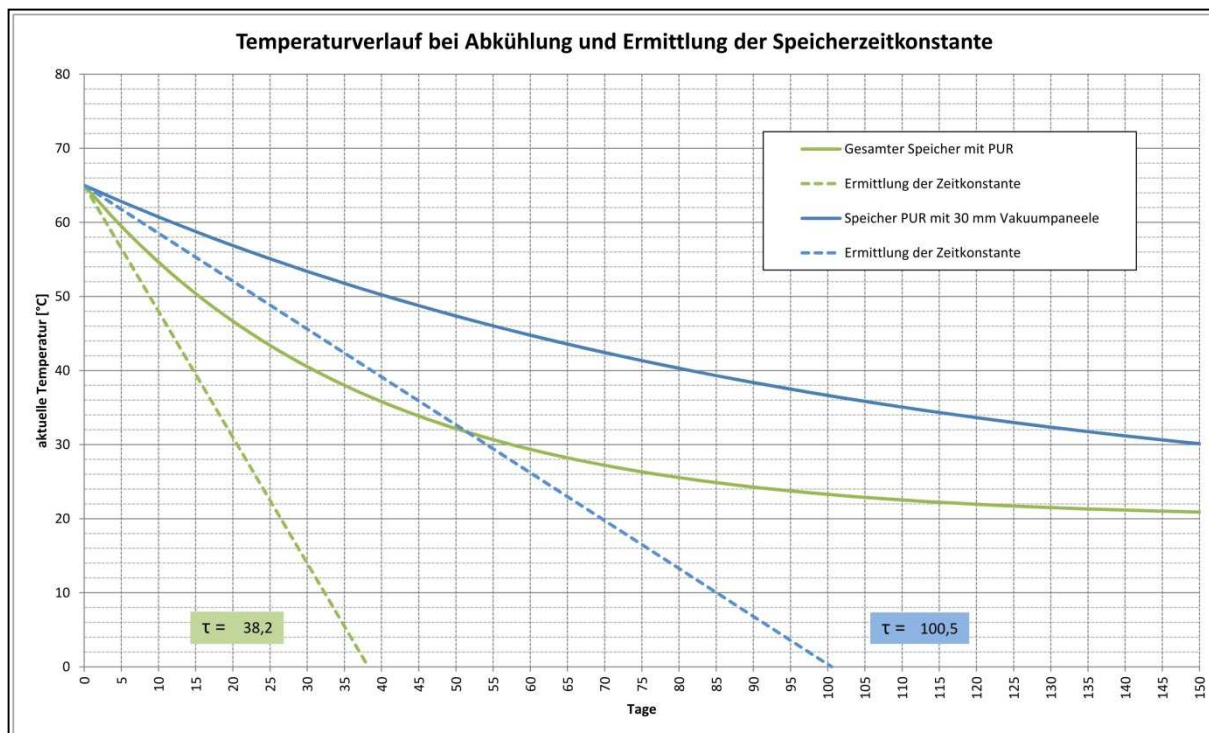
Warmhalteverlust (S)

Effizienzlabel

Gesamter Speicher mit PUR **227,9** [W]
 PUR mit Vakuumpaneeelen **109,1** [W]

| |
|---|
| C |
| A |

Abb. II.6.1 Erreichbare Energieeffizienzklasse A, bei 20 mm Vakuumisolierung



Energieeffizienzklasse von Warmwasserspeichern

Speichervolumen **4000** Liter

Unverbindliche Referenzwert **119,8** [W]
 Maximalwert ab 26.09.2017 **246,5** [W]

| Warmhalteverluste [W] | | Label |
|-----------------------|-------|-------|
| von | bis | |
| --- | 92,7 | A+ |
| 92,7 | 125,8 | A |
| 125,8 | 175,6 | B |
| 175,6 | 246,5 | C |
| 246,5 | 306,1 | D |
| 306,1 | 402,9 | E |
| 402,9 | 476,9 | F |
| 476,9 | --- | G |

Warmhalteverlust (S)

Effizienzlabel

Gesamter Speicher mit PUR **227,9** [W]
 PUR mit Vakuumpaneelen **86,6** [W]

| |
|----|
| C |
| A+ |

Abb. II.6.2 Erreichbare Energieeffizienzklasse A, bei 30 mm Vakuumisolierung

II.2 Teilbericht 2 (TP 2) ed Radeberg - Modularer Rechteck-Wärmespeicher aus Faserverbundwerkstoffen-GFK

Erstellt durch Dipl.-Ing. Rolf Förster

| Teil-Inhaltsverzeichnis | | |
|-------------------------|--|-----|
| II.2 | Teilbericht 2 (TP2) ed Radeberg – Modularer Recht- Eck- Wär- mespeicher aus Faserverbundwerkstoffen | 078 |
| II.2.0.1 | Aufgabenstellung | 080 |
| II.2.0.2 | Voraussetzungen | 080 |
| II.2.0.3 | Planung und Ablauf | 080 |
| II.2.0.4 | Wissenschaftlich-technischer Stand | 081 |
| II.2.0.5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 083 |
| II.2.1 | Ergebnis-Zusammenfassung nach Arbeitspaketen | 082 |
| II.2.1.1 | AP 1 Projektmanagement | 082 |
| II.2.1.2 | AP 2 Recherchen | 082 |
| II.2.1.3 | AP 3 Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation Speicher- hülle und Verbindungstechnik | 083 |
| II.2.1.4 | AP 4 Herstellung Formen / Segmente / Laborspeicherhülle | 084 |
| II.2.1.5 | AP 5 Erstmontage Laborspeicher / Umbauten | 086 |
| II.2.1.6 | AP 6 & 7 Konstruktion / Auslegung / und Herstellung Speicherbe- und Entladung | 088 |
| II.2.1.7 | AP 8 & 9 Konstruktion / Auslegung / Berechnung / Simulation und Herstellung Funktionsmodul | 092 |
| II.2.1.8 | AP 10 & 11 Konstruktion / Auslegung / Simulation und Herstellung Einstiegsmodul | 103 |
| II.2.1.9 | AP 12 und 13: Versuchsstand konzipieren und Versuchsprogramm erstellen | 105 |
| II.2.1.10 | AP 14: Monitoring und Ergebnisbewertung – Material- und Funktionsprüfungen | 105 |
| II.2.1.11 | AP 15: Lösung der Linerproblematik (Diffusionsdichtigkeit) | 105 |
| II.2.2 | wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 105 |
| II.2.3 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 105 |
| II.2.4 | Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplanes | 106 |
| II.2.5 | Fortschritt bei anderen während der Vorhabenlaufzeit | 106 |
| II.2.6 | Erfolgte oder geplante Veröffentlichung | 108 |
| II.2.7 | Erfolgskontrollbericht: Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele | 108 |
| II.2.7.1 | Erfolgskontrollbericht: Wissenschaftlich-technische Ziele | 108 |
| II.2.7.2 | Erfolgskontrollbericht: Erfindungen / Schutzrechte | 109 |
| II.2.7.3 | Erfolgskontrollbericht: wirtschaftliche Erfolgsaussichten | 109 |
| II.2.7.4 | Erfolgskontrollbericht: wiss.-techn. Erfolgsaussichten | 109 |
| II.2.7.5 | Erfolgskontrollbericht:wiss./wirtschaftl.Anschlussfähigkeit i.d.n.Phase | 109 |
| II.2.7.6 | Erfolgskontrollbericht: Arbeiten, die zu keiner Lösung gefunden haben | 109 |
| II.2.7.7 | Erfolgskontrollbericht: Präsentationsmöglichkeiten | 109 |
| II.2.7.8 | Erfolgskontrollbericht:Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung | 109 |

II.2.0.1 Aufgabenstellung

Herstellung und Erforschung eines Modulare Rechteck-Wärmespeichers (MRW) in Form eines Laborspeichers von 4 m³ Inhalt mit neuartigem Konstruktionsprinzip. Der MRW zur vor-Ort-Montage in bestehenden Gebäuden wird aus 4 unterschiedlichen -um verschiedene Grundrisse/Höhen zu realisieren, sich wiederholenden- Segmenten gefügt, wobei in jedem Element alle erforderlichen Eigenschaften für Statik, Medien- und Temperaturbeständigkeit, Diffusionsdichtheit sowie Speicherfunktionalität und Dämmung integriert sind.

Mit der FE- Aufgabe wurden 8 Zielstellungen formuliert, die 9. wurde im Rahmen der Projektbearbeitung ergänzt:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 97°C,
3. Diffusionsdichtheit,
4. stabile Schichtung in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,
6. Begehbarkeit,
7. U-Wert 0,11 W/m²,
8. 20% Effizienz Zuwachs bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
9. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

II.2.0.2 Voraussetzungen unter denen der FE-Auftrag ausgeführt wurde

Das FE-Projekt wurde als Verbundvorhaben durch die beiden Verbundpartner TU Ilmenau und ed energie.depot GmbH, Radeberg beantragt.

Grundlage für die Planung und Durchführung der F/E-Arbeiten war der erreichte Erkenntnisstand im Ergebnis der Bearbeitung des Forschungsprojektes „Grundlegende Weiterentwicklung zum Werkstoff- und Bauteil-verhalten von GFK-Wärmespeichern“ – FKZ 0325970A. In diesem Vorgänger-Projekt arbeiteten energie.depot sowie das Institut für Luftfahrt/Leichtbau Prof. Knauer (ILL) im Auftrag der TU Ilmenau mit.

Da heraus wurde die Idee entwickelt, mit den Basiserkenntnissen zum Verhalten der Verbundwerkstoffe ein neuartiges Speicherkonzept –einen Modulare Rechteck-Wärmespeicher- zu entwickeln und das Konzept in Form eines Laborspeichers unter dynamischen Betriebsbedingungen zu testen. Dabei sollten die Tests zur Gewinnung der Kenndaten des Materialverhaltens der Speicherhülle einerseits sowie zum Speicherbetrieb bezüglich des Be-/Entlade- und Speichervermögens andererseits gewonnen werden.

Aus diesen Erkenntnissen heraus war eine Verwertungskonzeption für künftige Anwendungsfälle dieser neuartigen Speichergeneration zu entwickeln.

Ed ist als Hersteller eines eigenen Kunststoff-Wärmespeichers, dem „Wärme-Hamster“- seit 2008 am Markt tätig. Zur fachgerechten Realisierung der FE-Aufgabe wurden von ed Unteraufträge erteilt:

1. statische Berechnung/Auslegung des Speicherkorpus an das ILL sowie
2. Herstellung der Urform und der Wandelemente an Verbundwerkstoff- und Kunststoff-anwendungstechnik GmbH (VKA). Der ursprünglich im Antrag vorgesehen Unterauftragnehmer, Fa. ISOCO, konnte den geplanten Auftrag aufgrund von wirtschaftlichen Schwierigkeiten nicht ausführen.

II.2.0.3 Planung und Ablauf des Auftrages

Die Verbundpartner sowie Unterauftragnehmer erarbeiteten in sehr enger und konstruktiver Kooperation den Antrag sowie die Planung der FE-Aufgabe. Der Verbundpartner TU Ilmenau, in der Arbeitsgruppe vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Bühl, wurde mit dem Projektmanagement beauftragt.

Die Arbeiten wurden entsprechend Balkenplan (Anlage 1) pünktlich und ergebnisorientiert

umgesetzt. In regelmäßigen Projekttreffen wurden die erzielten Ergebnisse abgerechnet, bewertet und das weitere Vorgehen spezifiziert. Zwischenzeitlich ergab sich ein zeitlicher Vorsprung gegenüber der Planung (Meilenstein 7 „erste Laborergebnisse“ einen Monat früher). Dies wurde genutzt, um zusätzliche Messungen am Laborspeicher durchzuführen. Auch alle anderen Meilensteine 1 bis 9 wurden bzw. werden ebenso termingerecht erreicht.

II.2.0.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Vorfeld wurde eine umfangreiche Literatur-, Patent- und Marktrecherche durchgeführt (s. II.1/AP 2). Ergebnis ist die Formulierung eines Konzeptes mit der Zielgröße optimierter Wärmespeicher (Kombispeicher) mit deutlich verbesserten Gebrauchseigenschaften zur maximal möglichen Ausnutzung der vorhandenen Aufstell-/ Raumbedingungen im Altbau, z.B. ohne Einschränkung der vorhandenen Räumlichkeiten durch geforderte Montagefreiräume oder durch statisch bedingte Außentragkonstruktionen, keine Gewichtseinschränkungen (leichte Komponenten) und der Möglichkeit des Transportes in den Aufstellraum über beengte Treppen und durch schmale Türen.

Um größere Solarspeicher / Kombispeicher in Gebäude mit eingegrenzten Zugangsbedingungen im Zuge der energetischen Altbauanierung einzubringen, haben sich aktuell am Markt folgende Möglichkeiten / Verfahren etabliert:

(1) Stahlspeicher (kellergeschweißt):

Firmen Jenni/Schweiz, ThüSolar/Rudolstadt

(2) drucklose Kunststoffspeicher

Firmen Haase/Großröhrsdorf, F-Save/Kassel, energie.depot/Radeberg

(3) Entwicklung eines modularen Speichersystems Fa. CONSOLAR / ITW Stuttgart

(4) Wärmespeicher 2-Max Fa. EBITSCH Energietechnik GmbH, Zapfendorf

Der Speicher ist zur Aufstellung im Freien / im Keller und im Erdreich gedacht.

Faserverbunde zur Anwendung im Wärmespeicherbau:

Hierbei gehört Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) zur Klasse der Werkstoffe nach Maß. Bei GFK-Wärmespeichern werden besonders die Eigenschaften der thermischen und medialen Langzeitfestigkeit sowie –Steifigkeit, die Wärmedehnung, der Wärmedurchgang, die Diffusionsdichtheit, die Verarbeitbarkeit und die Herstellungskosten optimiert. Als variable Größen werden die Matrixmaterialien selbst, die Glasfasern mit ihrer spezifische Länge, der textilen Verarbeitung sowie die ein-, zwei- oder dreiaxiale Orientierungsrichtung im Bauteil, ihrem Querschnittsbereich, ihrem Masse- und Volumenanteil am Gesamtverbund sowie die Grenzschichtausbildung zwischen Faser und Matrix angesehen.

II.2.0.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Thema wurde im Wesentlichen innerhalb der Expertengruppe der beiden Verbundpartner und deren Nachauftragnehmer in sehr guter Zusammenarbeit bewerkstelligt. Mit speziellen FEM-Berechnungen und –Darstellungen für die Behälterwandungen wurde das Ingenieurbüro Dr. Ing. Wagenknecht in Berlin beauftragt. Das Projekttreffen am 19. Juni 2014 fand unter Teilnahme des Projektträgers Jülich in Radeberg statt. Auch die Zusammenarbeit mit dem PtJ war stets konstruktiv und hilfreich.

II.2.1 Ergebnisse im Einzelnen mit Gegenüberstellung der Ziele geordnet nach Arbeitspaketen (AP)

II.2.1.1 AP 1: Projektmanagement

Verantwortlich für das Projektmanagement war der Verbundpartner, TU Ilmenau. Die Themenarbeit war straff organisiert und wurde in enger, konstruktiver und kollegialer Zusammenarbeit umgesetzt.

II.2.1.2 AP 2: Recherchen

Bei den Arbeiten am FE-Thema wurde nach vergleichbaren Konzepten recherchiert und dabei speziell die Speicher der Firmen Fsave, Kassel, Bunksolar, Allicante/Spanien, Haase, Großröhrsdorf und energie.depot, Radeberg analysiert. Darüber hinaus wurden weitere Veröffentlichungen in die Patent-Recherche einbezogen:

- | | | |
|-----|--|--|
| (1) | DE 1904628 A (Fa. Linde) | (zylindrischer Behälter mit integrierter Dämmung, Montage von außen) |
| (2) | DE 202010017056 U1 (Fa. Bosch) | (Rahmenkonstruktion wie Flexsave) |
| (3) | US 5668922 A (private Erfinder/USA) | (kleiner Trinkwassertank aus Stahl, bestehend aus 2 Halbschalen) |
| (4) | DE 102008036669 A1 (Fa. Flexsave) | (Rahmenkonstruktion mit Innenhülle) |
| (5) | DE 19806534 C1 (privater Erfinder/D) | Erdtank mit Isolierschalen |
| (6) | ikz-Energy, 30.09.2011, Solarspeicher mit IKEA.Prinzip (Fa- Fsave) | |
| (7) | Flexsave Vario (Fa. Fsave) | |
| (8) | Haase Wärmespeicher T 400 | (GFK-Bausatz mit Isolierelementen, Montage von außen) |

Die unter (1) bis (8) genannten Erfindungen haben partiell gemeinsame Ansatzpunkte mit dem MRW, insbesondere dass bei (1), (2), (4), (6), (7) und (8) von einem Bausatz kleiner Elemente ausgegangen wird, um durch deren Montage große Speicher bei gleichzeitig geringen Transportaufwendungen zu errichten. Alle genannten Erfindungen benötigen Montageraum an der Außenseite des Korpus, gleiches gilt für die unterirdische (nicht frei stehende) Erfindung nach (5).

Die Erfindung nach (3) ist nur in geringer Auswahl flexibel, sich an vorhandene Räumlichkeiten anzupassen.

Alle genannten Erfindungen mit Ausnahme von (1) gliedern ihren Bausatz in tragende, dichtende und dämmende Elemente, wobei bei (1) die Verknüpfung von tragenden und isolierenden Schichten durch jeweils vorgefertigte Formteile entsteht.

Der MRW baut auf der im Rahmen der FE-Arbeit entwickelten Integralbauweise mit Statik, Dichtung und Dämmung in jedem der originär gestalteten Bauelemente auf, welche bei gleichem strukturellen Aufbau nunmehr lediglich noch unterschiedliche Geometrie: - Eckkörpermodul, -Randwinkelmodul, - Seiten-/Bodenmodul und -Dachmodul aufweisen, um aus einer gewissen Anzahl immer gleicher Module einen Bausatz für Speicher unterschiedlichster Längen-/Breiten-/Höhenkombination zu konfigurieren, ohne für verschiedene Abmessungen zusätzliche Formen/Vorrichtungen und Verbindungselemente herstellen zu müssen.

Die Module werden ausschließlich mit einander verklebt, so dass sich eine selbst tragende Konstruktion im Vergleich zur Rahmen- bzw. Schalenkonstruktion der o. g. Erfindungen ergibt, die darüber hinaus durch den Verzicht auf metallische (Wärme leitende) Montageelemente wie Verschraubungen, Spannbänder usw. keinerlei Wärme-/Kältebrücken zulässt.

Außerdem erfolgt die Montage vollständig vom Innenraum des Behälters. Lediglich 1 Seiten- oder die Dachfläche müssen für die Anschlussleitungen zugänglich sein und in Verbindung mit der quaderförmigen Geometrie kann der Raum praktisch vollständig als Speicher genutzt werden.

Darüber hinaus ist der MRW ebenso stehend im Freien verwendbar.

Auch wenn die in (1) bis (8) genannten Erfindungen teils durchaus in einzelnen Details ähnliche Ansätze zu unserer Erfindung aufweisen, so ist aber mit der im Rahmen der FE-Arbeit vorgelegten technischen Lösung der Integralbauweise in ihrer Gesamtheit in Kombination mit einer Reihe völlig neu entwickelter Details eine sehr anspruchsvolle Erfindung mit einem hohen Maß an ingenieurtechnischer und erfinderischer Leistung entstanden.

Zur Thematik der Schichtenbe- und Schicht erhaltenden Entladung wurden die Veröffentlichungen der TU Ilmenau, TU Chemnitz und diverser Hersteller analysiert und auf mögliches Entwicklungspotenzial bezüglich des Laborspeichers untersucht. Dabei standen folgende Anforderungen im Vordergrund:

Stabiler Schichtenaufbau

Stabile Schichtenerhaltung, auch im dynamischen Betrieb

Hohe Langzeitbetriebssicherheit durch einfache Systeme ohne bewegliche mechanische und Regelelemente

Korrosionsfreiheit

Langlebigkeit

Für die solare Schichtenbelastung wurde das Konstruktionsprinzip „ConSens“ (TU Ilmenau mit darauf basierender Weiterentwicklung durch TU Chemnitz im Rahmen der Programme Solarthermie 2000 und Solarthermie 2000 plus) weiterentwickelt.

Die Recherchen zur Schichtenbe- und Schicht erhaltenden Entladung zeigten die Problematik der wenig beachteten Schicht erhaltenden Entladung.

II.2.1.3 AP 3: Konstruktion/Auslegung/Berechnung/Simulation Speicherhülle und Verbindungstechnik

Zu erreichende Zielstellungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 97°C,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,
6. U-Wert 0,11 W/m²,
7. 20% Effizienz Zuwachs bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
8. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

In diesem Arbeitspaket wurde der Korpus als selbst tragendes/dämmendes/dichtendes (Integralfunktion) ausgelegt, konstruktiv bearbeitet und unter Einbindung der Wanddurchführungen (AP 8) mittels FEM berechnet.

Detaillierte Ergebnisse von Konstruktion und Berechnung zur Speicherhülle sowohl des Laborspeichers mit 4m³ Inhalt sowie einer künftigen Baureihe des MRW sind im Bericht unserer Unterauftragnehmer ILL (Prof. Knauer) und IB Dr. Wagenknecht enthalten.

Die Resultate basieren auf einer intensiven Zusammenarbeit aller Beteiligten. Dabei wurden mehrere Varianten zur Konstruktion des Behälterkorpus sowie der Verbindungstechnik und

der verwendbaren Kleber untersucht. Ergänzend zu den Zielstellungen 1 bis 8 des FE-Themas wurde zusätzlich die künftige, im Rahmen einer Serienfertigung erforderliche einfache und reproduzierbar sichere Montage durch Installateure ohne GFK-Ausbildung als Zielstellung formuliert.

Dabei wurde auf den Ergebnissen aus den Untersuchungen zu unterschiedlichen Klebern zur sicheren Verklebung der Speichermodule aus dem Forschungsprojekt „Grundlegende Weiterentwicklung zum Werkstoff- und Bauteil-verhalten von GFK-Wärmespeichern“ – FKZ 0325970A- aufgebaut und weitere Kleber untersucht (s. Bericht ILL Prof. Knauer).

Die Zielstellungen für dieses Arbeitspaket wurden vollumfänglich erreicht.

II.2.1.4 AP 4: Herstellung Formen/Segmente Laborspeicherhülle

Zu erreichende Zielstellungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 97°C,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,
7. U-Wert 0,11 W/m²,
8. 20% Effizienzgewinn bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
9. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Die Herstellung der Arbeitsformen und Einzelteile für die Laborspeicherhülle (Bild1 und 2) erfolgte im Handlaminier-Verfahren beim Unterauftragnehmer VKA Schönbrunn erforderte Anpassungen bezüglich der Verbindungstechnik der einzelnen Module. Die Urformen wurden mit geringst möglichem Aufwand zur Abformung von einem Satz Bauteile für einen Laborspeicher ausgelegt. Die so „abgespeckt“ hergestellten Formen führen zu höheren Toleranzen der darin hergestellten Formteile als bei hochwertigen Arbeitsformen mit wesentlich höherer Stabilität der Arbeitsform selbst. Generell sind bei der Technologie des Handlaminier-Verfahrens die auftretenden Toleranzen größer als bei industriellen Verfahren. In Summe führte das zu Maßabweichungen und im Ergebnis zu Klebspalten bis zu 10mm. Dieser Fakt ist nur für den Laborspeicher zutreffend, da bei einer Serienfertigung, z. B. im Vakuum-Infusionsverfahren, Toleranzen im 1/10mm-Bereich technischen Standard darstellt. Im Ergebnis der Vermessung der einzelnen Module wurde deshalb für die Montage des Laborspeichers entschieden, anstatt der getesteten und favorisierten Kartuschen-Kleber Klebharz auf Vinylesterbasis mit Glas-Faseranteil zu verwenden (BÜFA-Bonding Paste 0119/Technisches und Sicherheits-Datenblatt siehe Anlage 2 und 3). Zusätzlich wurden die Klebestellen überlaminiert, um sicher zu gehen, bei den Laborversuchen die Bauteileigenschaften zu ermitteln und nicht wegen eventueller Undichtheiten an den Verbindungsstellen verfälschte Ergebnisse zu erhalten (s. Bild 5 und 6).



Bild II.1 Alle vorgefertigten Segmente/Module für Speicherhülle

Darüber hinaus wurde über das geplante Laborspeicherkonzept hinaus ein Seitenwandmodul in der Weise gestaltet, dass es durch eine spezielle Schraubverbindung austauschbar ist. So konnten Wandmodule unterschiedlichen Aufbaues, speziell hinsichtlich ihres Isolationsvermögens und der Permeations-Eigenschaften getestet und vermessen werden.

Zur Vereinfachung der Montage wurden spezielle Verbindungsdübel aus Polyurethan hergestellt und als Führung /Verbindungshilfe zwischen den Rahmen-/Eckmodulen eingesetzt (s. Bild 3).



Bild II. 2 Rahmen-/Eckmodul
Zustand nach der Rohteilherstellung/
unbearbeitet



Bild II.3 Rahmen-/Eckmodul
mit Verbindungsdübel (rot) und
mit Beschnitt und Anschliff

Um unverfälschte Messergebnisse bezüglich der Wandung wie
Wärmedurchgangswiderstand
Stillstandverluste (Langzeit)
Temperatur-Schichtverhalten im Aufbau
Temperatur-Schichtstabilität im stationären Betrieb

zu erhalten, wurde im Rahmen der Bearbeitung festgelegt, dass der Laborspeicher in der Testphase 1 nur mit der Beladesäule ausgestattet wird, um „Störgrößen“ in Form von weiterer Be- und Entladetechnik ausschließen zu können.

Die konstruktiven Lösungen sind Bestandteil des Zeichnungssatzes zum Laborspeicher (s. Teilbericht TU Ilmenau bzw. ILL Prof. Knauer).

Die Zielstellungen 8 und 9 gelten für ein künftiges, aus den Erfahrungen des FE-Themas abzuleitendes Serienprodukt und konnten aufgrund der Spezifik zur Herstellung eines einzelnen Labormusterspeichers nicht erreicht werden

II.2.1.5 AP 5: Erstmontage Laborspeicher/Umbauten

Zu erreichende Zielstellungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 95°C,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,

Aufgrund der vorhandenen technischen und räumlichen Bedingungen sowie der Nähe zur TU Ilmenau erfolgte die Vor-Montage durch energie.depot beim Hersteller der Einzel-Elemente, VKA GmbH, in Schönbrunn. Von dort wurde der Laborspeicher-Rohling zur TU Ilmenau transportiert (s. Bild 4).



Bild II.4 Transport nach Ilmenau

Nach einem ersten Füll- und Füllüberdruckversuch wurden in einer zweiten Montageaktion die Doyma-Wanddurchführungen und der Solar-Schichtenlader montiert. Die Anschlüsse für Vor- und Rückläufe zur Entladung und weiterer Belademöglichkeiten wurden vorerst abgedichtet, um unverfälschte Messergebnisse für das Schichtlademodul zu bekommen.



Bild II.5 Teilmontage Module verklebt



Bild II.6 Teilmontage Modulverbindungen überlaminiert

Als Verbindungshilfe zwischen den Rahmen-/Eckmodulen Außerdem wurden die speziellen Verbindungsdübel aus Polyurethan nach Bild 3 verwendet.

Die Montage des Laborspeichers war aufgrund der Toleranzen infolge der Herstellung der Elemente der Speicherhülle im Handlaminier-Verfahren relativ aufwändig und nicht ausschließlich von innen möglich. Folgende konstruktive und technologische Veränderungen müssen bei der Überführung in die Serie umgesetzt werden:

- Spaltmaße 1-2 mm
- deutliche Reduzierung der Schrumpfungen (vor allem Winkel-)
- Vorbereitung der Klebflächen beim Hersteller/nicht auf der Baustelle (z. B. Verwenden von Abreißgewebe bzw. automatisiertes Aufrauen)
- Optimierung der Deckschichtendicke zur Reduzierung von Materialeinsatz und zur Gewichtseinsparungen der Einzelteile

Ein Seitenwandmodul wurde durch eine Schraubverbindung austauschbar gestaltet (s. Bild 7). Es wurde nach der Montage zusätzlich abgedichtet (s. Bild 8). Drei verschiedene Seitenwandmodule mit jeweils unterschiedlichem Wandaufbau wurden im Versuch getestet. Die genaue Spezifizierung ist im Teilsachbericht des ILL/Prof. Knauer dargestellt.



Bild II.7 Seitenwand für Austauschmodul



Bild II.8 Austauschbares Seitenwandmodul abgedichtet

Bei den Versuchen kam es zu geringfügigen Undichtheiten, vor allem bei Austauschmodulen V II und V III. Die Ursachen waren die Temperatur- und Last bedingten Verformungen des Korpus in Verbindung mit den durch das Handlaminierverfahren in einfachen Formen entstandenen Toleranzen.

Zielstellung 1 wurde für den speziellen Versuch nicht angestrebt, ist aber bei einem Serienprodukt erreichbar.

II.2.1.6 AP 6 und 7: Konstruktion/Auslegung und Herstellung Speicherbe- und -Entladung

Zu erreichende Zielstellungen:

1. stabile Schichtung in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien,
2. 20% Eeffizienzgewinn bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
3. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Aufgrund der drucklosen Konstruktion des Laborspeichers ist die Entkopplung der mit Druck beaufschlagten Be- und Entlade-Heizkreise vom Speicher erforderlich. Dies erfolgt beim Laborspeicher mittels Edelstahl-Wellrohr-Wärmetauschern. Auch das spezielle Schichtlademodul zur Simulation der solarthermischen Beladung wird flexibel durch ein Edelstahl-Wellrohr angeschlossen.

Bild 9 zeigt die für die einzelnen Anwendungen in einem Schichtspeicher vorgesehenen Temperaturebenen.

Bei der Schichtbeladung und der Schicht erhaltenden Entladung von Wärmespeichern wird das natürliche Vermögen von Wasser, stabile Schichten unterschiedlicher Temperaturen zu bilden, ohne sie im Ruhezustand zu vermischen, technisch ausgenutzt.

Bei drucklosen Speichern gelingt das besonders gut, weil das Speichermedium Wasser „nur“ zum Wärmespeichern und -austausch verwendet, nicht aber ständig dynamisch verwirbelt wie in Druckspeichern, bei denen die Heizkreise direkt am Speicher angeschlossen sind und das Speichermedium so auch durch angeschlossene Heizkessel, Heizkörper usw. und wieder zurück fließt.

Zudem erhält die Kunststoffinnenhülle ($\lambda_{\text{GFK}} = 0,15 \dots 0,3 \dots 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) eine aufgebaute Schichtung wesentlich stabiler als ein Wärme leitendes Material wie z. B. Stahl ($\lambda_{\text{St}} = 48 \dots 50 \text{ W/m}^2\text{K}$).

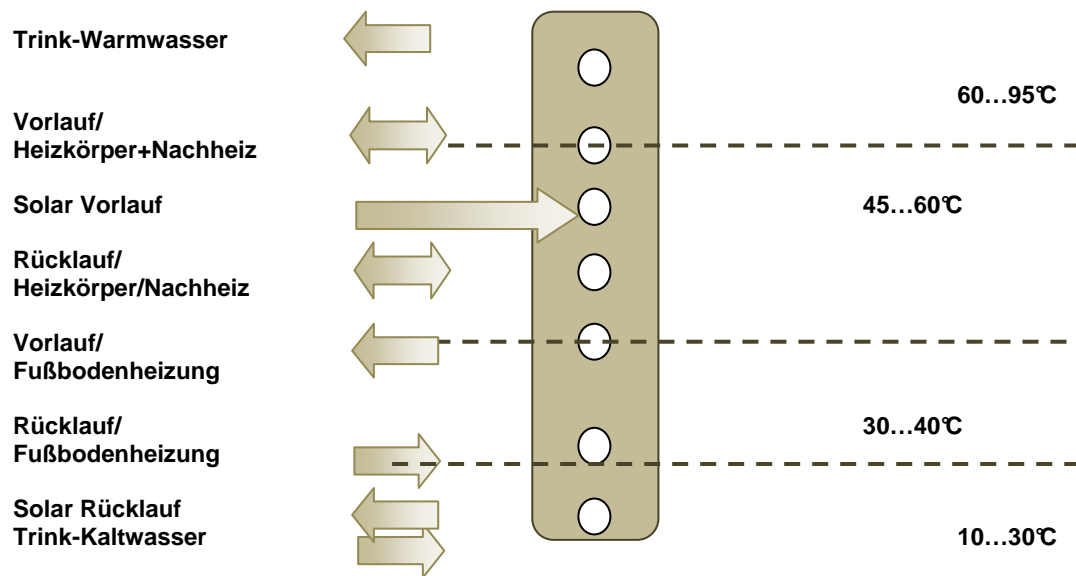


Bild II. 9 Prinzipdarstellung der Temperaturebenen im Wärmespeicher

Nachdem in der Testphase 1 (Kennwertermittlung für die Speicherhülle) nur ein Wärme-Beladekreis angeschlossen wurde, kam in Phase 2 der Messungen ein Be-/Entladesystem mit Edelstahl-Wellrohr-Wärmetauschern zum Einsatz. Die ursprünglich geplante Lösung mit quasi rechteckförmiger Anordnung ist aus Bild 6 ersichtlich.

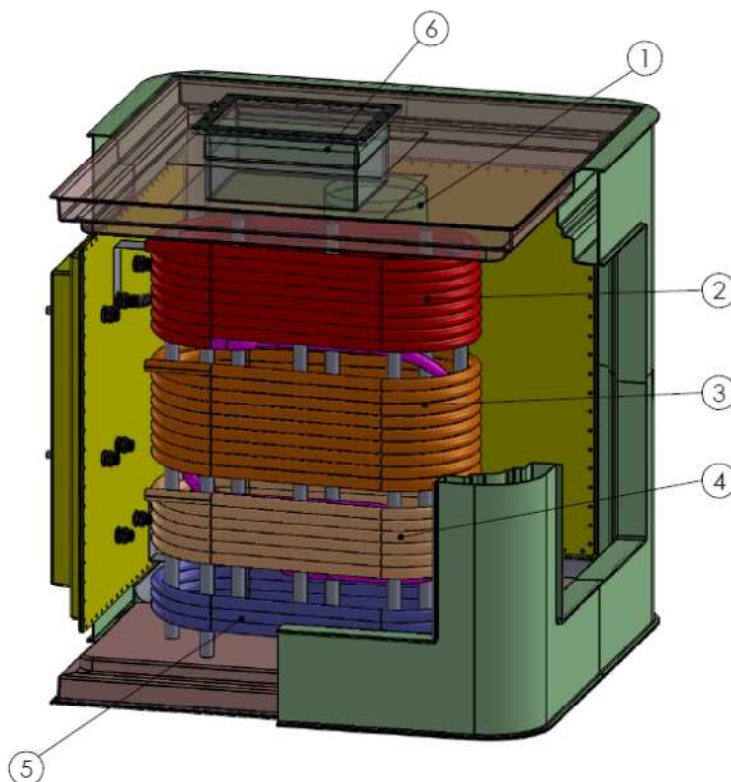


Bild 10 Anordnung interne Wellrohr-Wärmetauscher in unterschiedlichen Höhen/Temperaturschichten

Die quasi-Rechteckform ergab sich aus der Anforderung, die Wärmetauscher durch den rechteckigen Querschnitt des Einstieges (s. Bild 10/Pos.6) nachzurüsten.

Das nachzurüstende BES sollte folgenden Elementen enthalten:

Solar-Schichtenladesäule: Pos. 1

Wärmetauscher zur Trinkwassererwärmung: Pos. 5 und 2/Pos.5: kalte Speicherzone (Abkühlen des Bereiches des Solar-Rücklaufes)/Pos. 2: heiße Speicherzone zur schnellen Aufheizung des Trinkwarmwassers auf die erforderliche Zapftemperatur

Wärmetauscher zur Speichernachheizung bzw. zur Entnahme von Wärme für Hochtemperaturheizkreis (Heizkörper): Pos.3

Wärmetauscher zur Entnahme für Niedrigtemperaturheizkreis (Fußbodenheizung): Pos. 4

Dazu wurde die technische Machbarkeit mit dem Ziel einer einfachen kostengünstigen Lösung vorher getestet. Dazu wurde ein Wärmetauscher mit einer Wellrohrlänge von 15.000 mm (V~15 Liter) ausgewählt und entsprechend vorgefertigt (Bild 11). Das entspricht einer Wärmeübertragungsfläche von 3,345 m² und einer möglichen Leistungsübertragung –je nach Volumenstrom und ΔT - von ca. 10...20 kW.

Die geringe Höhe des Trägers ermöglicht die kompakte Anordnung des Wellrohrtauschers in der gewünschten bzw. gewählten Temperaturschicht.



Bild II.11 Wärmetauscher auf flachem Gestell gewickelt/im Dichtheitsversuch

Kenndaten Wellrohr:

| Materialkenndaten | Einheit | |
|---|---------------------|------------------------|
| Material | | V4A 1.4404 (AISI 316L) |
| Wanddicke | mm | 0,3 |
| Innendurchmesser Welle | mm | 34,6 |
| Außendurchmesser Welle | mm | 41,1 |
| Oberfläche | m ² /m | 0,223 |
| Gewicht | kg/m | 0,557 |
| Inhalt | dm ³ /m | 1,167 |
| Temperaturbereich | °C | -270...+600 |
| Betriebsdruck, zul. | bar | 6 |
| Wärmeleitkoeffizient λ | W/m ² *K | 15 |
| Wärmedurchlasswiderstand R _D | m ² *K/W | 2 ⁻⁵ |

Im Verlaufe der Testphase ergab sich die Notwendigkeit, die angedachte Lösung für die Messphase 2 zu modifizieren. Bei der Installation des in Bild 10 gezeigten BES wäre der Austausch des Seitenwandmoduls (V III mit Vakuumpaneel) aus Platzgründen konstruktiv nicht möglich gewesen. Die Arbeitsgruppe hatte daraufhin entschieden, der V III gegenüber dem BES die Priorität einzuräumen. Dies entstand letztendlich auch aus der im Verlaufe der Themenbearbeitung bekannt gewordenen Forderung, Wärmespeicher mit einem Energielabel zu zertifizieren. Wohl wissend, dass es sich bei der FE-Aufgabe und dem Laborspeicher um Speicher größer 2.000 l handelt, für die noch kein Energielabel vorgeschrieben ist, ging es bei der Speicherentwicklung vordringlich um die nachhaltige Effizienz des Systems, welche in erster Linie von der Speicherhülle bestimmt wird.

Zur Simulation der solaren Beladung kam ein rein auf physikalischen Prinzipien des Schichtverhaltens von Wasser beruhender Schichtenlader zum Einsatz, der keinerlei elektromechanische Schalt- und/oder Steuerelemente benötigt.

Im ersten Beladeversuch ist der ilm.ed-Schichtenlader eingesetzt (Bilder 12 und 13). Er ist eine Weiterentwicklung des ilm.ed-Lademoduls, welches wiederum auf der Consens-Lösung (Solarthermie 2000 und 2000+) beruht. Dabei wird auf einfache, preiswerte, weil in Großserie hergestellte Bauteile (HT-Rohr) zurückgegriffen. HT-Rohr ist bis 110°C dauerhaft temperaturbeständig. Es wird in einer GFK-Hülle montiert, um eine dauerhafte Stabilität der Konstruktion zu erreichen. Diese Schichtlademodul eignet sich sowohl für den Anschluss an eine solare Trennstation (Glykol-Druckanlage) als auch an ein drain back System (Speicherwasser wird direkt im Kollektor erwärmt).



**Bild II.12 Schichtlader ilm.ed/
HT-Rohr Geweih**



**Bild II.13 Schichtlader ilm.ed mit GFK-Rohrhülle/
ohne Dämmung**

Im Versuch wurde der Schichtenlader gedämmt ausgeführt (s. Bild 14), wobei die Wirkung der Dämmung des Schichtlademoduls als äußerst gering eingeschätzt wird. Deshalb wird die künftige Variante ohne Dämmung (s. Bild 15) ausgeführt, um auch hier die kostengünstigste Lösung zu erzielen.

Für den weiter entwickelten Schichtenlader bot das neue Messsystem im Labor der TU

Ilmenau alle Voraussetzungen, um die Konstruktion der bisherigen Lösung zielgenau den Anforderungen aus der Hydraulik und Temperaturverteilung im Speicher in Abhängigkeit von Volumenströmen/Solarangebot/Beladebedarf usw. anzupassen.



Bild II.14 Schichtlader int. gedämmt



Bild II.15 Schichtlader o. Dämmung

Die Zielstellungen im AP 6/7 wurden erreicht.

II.2.1.7 AP 8 und 9: Konstruktion/Auslegung/Berechnung/Simulation und Herstellung Funktionsmodul

Zu erreichende Zielstellungen:

1. stabile Schichtung in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien,
2. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Im Funktionsmodul sind alle erforderlichen Anschlüsse kompakt angeordnet:

Befüllung
Entleerung
Be-/Entlüftung (druckloser/offener Speicher)
Überlauf (druckloser/offener Speicher)
Füllstandanzeige
Anschlüsse für BES

Das Funktionsmodul wurde in mehreren Ausführungen konzipiert (Bild II.16).

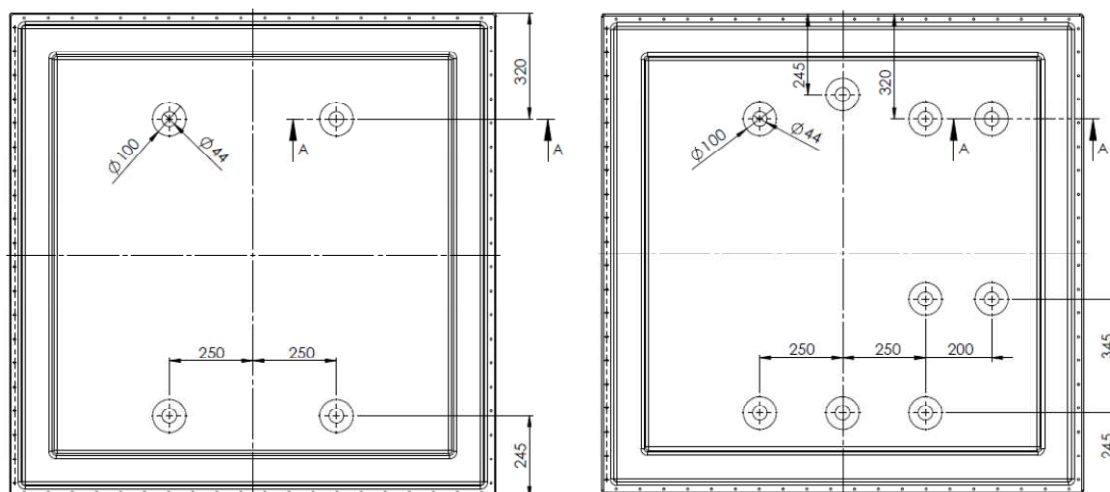


Bild II.16 Funktionsmodul Variante 1 (links) und 2 (rechts)

Bei der Konstruktion der Anschlüsse stellt die Durchdringung der Speicherhülle eine besondere Herausforderung dar: Der Speicher als vollständige Kunststoffkonstruktion wird bei der Integration in ein hydraulisches Anlagenkonzept (z. B. Heizungssystem) mit Systemelementen aus der Haustechnik gekoppelt. Dies sind –wie auch die Funktionselemente Befüllung/Entleerung/Be-/Entlüftung/Überlauf/Füllstandanzeige– in der Regel metallische Rohrleitungsanschlüsse in unterschiedlichsten Dimensionen und Ausführungen.

Bei schwankenden Fluid- und Umgebungstemperaturen entstehen zwischen Kunststoff- und metallischen Bauteilen ganz unterschiedliche Wärmeausdehnungen, die bei einer Durchdringung, die diese Unterschiede nicht berücksichtigt, zu Undichtheiten führen können.

Weiterhin ist zu beachten, dass der Installateur genormte, einfache Anschlusspunkte benötigt, sehr häufig aber auch außerordentlich robust zu Werke geht, so dass gerade dieses Detail sehr genau zu betrachten ist.

Hilfreich ist auch die Gestaltung in einer Weise, die Verwechslungen von Vor- und Rückläufen bzw. der Anschlüsse für unterschiedliche Energiequellen und Energieverbraucher trotz Kennzeichnung verhindert oder zumindest erschwert.

Außerdem sollte aus Gründen der Temperaturschichtterhaltung jede Rohrleitung seitlich in der passenden Temperaturebene durch die Behälterwand geführt werden (s. Abb. 1). Nur so kann die Stabilität das Schichtungsverhalten des Speichers gewährleistet und die gewünschte energetische Effizienz des Speichers und des Gesamtsystems erreicht werden.

Bekannte Lösungen bezüglich von Wanddurchführungen sind:

-GFK-Flansch (Bild 17) als Wanddurchdringung mit flachdichtendem Übergang auf Metallflansch
>sicher, aber aufwendig und teuer (Vorwiegend bei gekrümmten Flächen verwendet)



Bild II.17 GFK-Stutzen in der GFK-Wandung eines zylindrischen Behälters einlamiert, außerhalb der Dämmung mit Stahlflansch, flachdichtend verbunden

-Wandverschraubungen, metallisch

- >preiswerter Standard,
- >unsicher durch Verdrehen der Durchführung in der GFK-Wand beim Anschluss durch den Installateur
- >Übergang auf interne Wellrohr-Wärmetauscher schwierig, ggf. Verschraubung im Behälter später nicht zugänglich

-elastische Wanddurchführungen (Bild 18, 19)

- >preiswert
- >nur im Bereich außerhalb des Flüssigkeitsstandes
- >d. f.: alle Leitungen durch das Dach führen und damit nicht in der Temperaturebene



Bild II.18 Wellrohrtauscher mit angeschweißter Glattrohrwanddurchführung / EPDM-Tülle

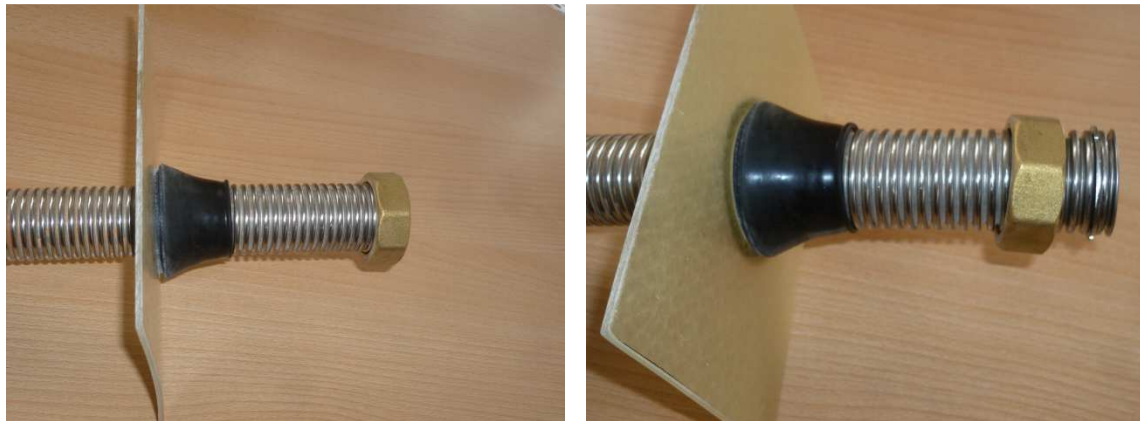


Bild II.19 Wellrohr direkt durch EPDM-Tülle geführt (Anschluss mittels Überwurfmutter)

- (In Bild II.20 Doyma-Wanddurchführung)
- > sicher bei der Durchführung von Glattrohr
 - > Durchführung in der Temperaturebene möglich
 - > Einkauf teuer, aber sehr einfache schnelle Montage



Bild II.20 Doyma-Wanddurchführung, unmontiert

Die aufgezeigten Varianten nach dem Stand der Technik zeigen alle spezifische Vor- und Nachteile, so dass nach einer verbesserten Möglichkeit gesucht wurde. Dabei entstand folgende Lösung:

-Neu entwickelte Wanddurchführung:

In Abb. 21 ist die neu entwickelte Lösung dargestellt, die die Montage der Durchführung im mit Fluid beaufschlagten Bereich und den Anschluss an Wellrohr, Solar-Schichtlader, Diffusoren usw. und extern an handelsübliche Pressrohrsysteme (Sunpress, Mapress usw.) ermöglicht.

Diese Wanddurchführung wurde in Form einer Erstmusterserie umgesetzt. Die besonderen Anforderungen wie unterschiedliche Wärmeausdehnungen zwischen Speicherhülle (GFK/PUR/GFK) und

Wanddurchführung (Messing)
Installationsfreundlichkeit
Funktionssicherheit
wurden in einer Vorversuchsreihe getestet.

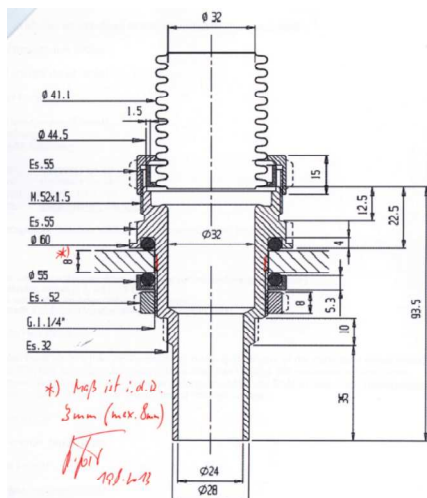


Bild II. 21 Wanddurchführung neu

je 1 x O-Ring außen/innen
=2 Dichtebenen

Die Vor-Tests ergaben (erwartungsgemäß), dass sich die Durchführungen nicht für stark gekrümmte Flächen eignen (siehe Bild II.22)



Bild II.22 Durchführung durch stark gekrümmte Wandung ($\varnothing=700$ mm), undicht

In einem weiteren Versuch wurden die Durchführungen durch eine Behälterwandung mit annähernd ebener Fläche geführt und gleichzeitig auf der Innenseite mit Edelstahl-Wellrohr verbunden.

Die erste Welle des Wellrohres wird beim Anziehen der 6-Kant-Mutter mittels eines Spezialklemmringes zusammen gequetscht und gegen die Dichtfläche im Innern der Durchführung gepresst. Es ist kein zusätzliches Dichtelement/Dichtmittel vorgesehen. Allerdings ist das Verschrauben mittels Maulschlüssel SW 55 ausgesprochen kraft- und

zeitaufwändig. Die Versuche durch die fast ebene Wandfläche –ohne Temperaturbeaufschlagung– verliefen prinzipiell erfolgreich, es wurde keine Undichtheit festgestellt (Bild 23). Das Verschrauben gegen die Behälterwand wird mit einem Spezialsteckschlüssel (SW 52/Bild 25) durchgeführt.



Bild II.23 Wellrohranschluss an Wanddurchführung erste Welle Klemmring

Im Ergebnis der Versuche bleiben aber Zweifel bezüglich der absoluten Druckdichtheit der Verbindung Wanddurchführung/Edelstahlwellrohr (Systemdruck z. B. im Trinkwasserkreislauf 6 bar).

Auch der Anschluss durch einen Installationsbetrieb beinhaltet zumindest die Gefahr, dass z. B. mit großen Rohrzangen die Wanddurchführung in der GFK-Bohrung verdreht und damit die Durchführung undicht wird.

Vorteil dieser Durchführung allerdings ist, dass das Edelstahl- Wellrohr je nach benötigter Übertragungsleistung auf die gewünschte Größe projektspezifisch von handelsüblicher Rollenware abgelängt und mit der Durchführung verbunden werden kann. Endlos-Rollenware ist auch preisgünstiger als Wellrohr-Wärmetauscher in Form vorgefertigter Coils.



Bild II.24 Durchführung durch fast ebene (leicht gekrümmte) Fläche, dicht

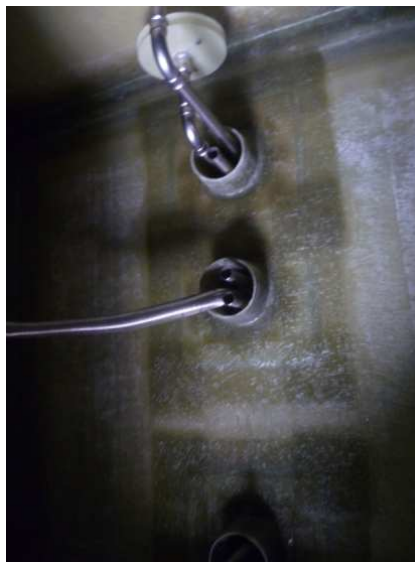


Bild II.25 Spezialsteckschlüssel für Wandverschraubung

Im Ergebnis aller Versuche hat sich die Arbeitsgruppe für das industriell in Großserie hergestellte Industrieprodukt -die Doyma-Wanddurchführung entschieden (s. Bild II.20, II.26, II.27).



**Bild II.26 Hüllrohr für Doyma-Wand-
führung, laminiert**



**Bild II.27 Doyma-Wanddurchführung
mit Rohrleitungen**

Dafür ist aber die Verwendung von Glattrohr als Rohrdurchführung durch die Doyma-Dichtung erforderlich bzw. vorteilhaft.

Hierfür wurde die neu entwickelte Wanddurchführung nochmals modifiziert (s. Bild II.28).



Bild II.28 modifizierter Wellrohranschluss für Doyma-Wanddurchführung, bestehend aus 5 Einzelteilen: Glattröhrhülse, 3 O-Ringe, Sicherungsring; (Wellrohr in Bedarfslänge)

Im Laborspeicher wurden drei Doyma-Durchführungen in GFK-Hüllrohre montiert, die ihrerseits in unterschiedlichen Höhen (Temperaturzonen) in der Behälterwandung einlamiert sind (Bild II.29).

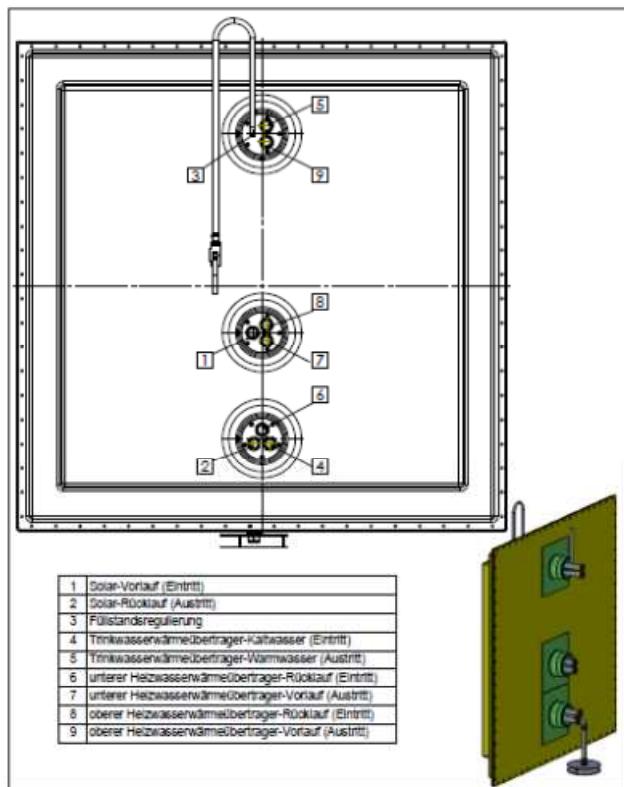


Bild II.29 Funktionsmodul mit Anschlüssen (oben/heiße Zone)

oben/heiße Zone:

Doyma1:

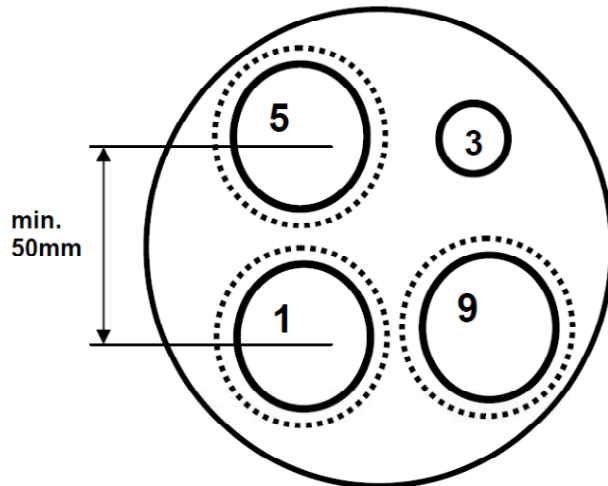
Pos. 5: WW

Pos. 1: Solar-VL:

Pos. 9: Hz oben VL

Jeweils Wellrohr mit Außendurchmesser 45mm/Anschweißstutzen 28mm
(Stutzen wird durch Doyma geführt)

Pos. 3: ÜL: Glattrohr Außendurchmesser 15mm



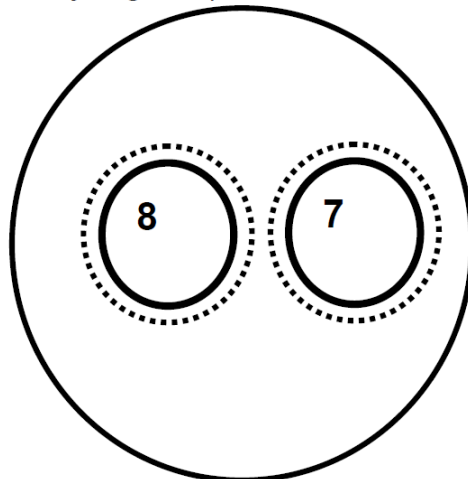
Mitte/warme Zone:

Doyma2:

Pos. 7: Hz unten VL

Pos. 8: Hz oben RL

Jeweils Wellrohr mit Außendurchmesser 45mm/Anschweißstutzen 28mm
(Stutzen wird durch Doyma geführt)



Unten/kalte Zone:

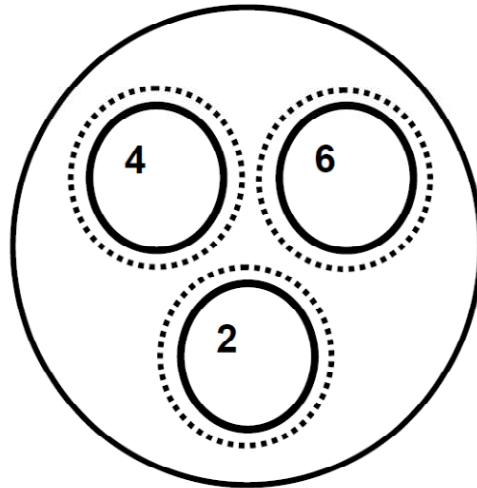
Doyma3:

Pos. 4: KW

Pos. 6: Hz unten RL

Pos. 6: Solar-RL:

**Jeweils Wellrohr mit Außendurchmesser 45mm/Anschweißstutzen 28mm
(Stutzen wird durch Doyma geführt)**



Abkürzungen:

Hz = Heizung; KW=(Trink-)Kaltwasser; WW=(Trink-)Warmwasser; RL=Rücklauf; VL=Vorlauf

Nach der Vormontage der Doyma-Wanddurchführungen (s. Bild 30) und der für den jeweiligen Versuch notwendigen internen Be-/Entladeeinrichtungen wurden die Anschlüsse außerhalb des Speichers mit den technischen Energiesystemen des Labors verbunden. Im Bild 31 sind für den speziellen Versuch nicht benötigte Anschlüsse „blind“ verschlossen (s. rote Kreise)



Bild II.30 Vormontage Wanddurchführungen



Bild II.31 Anschluss an Energiesysteme des Labors

Für die Füllstandanzeige werden gegenwärtig bei drucklosen Speichern ausnahmslos Schaugläser oder –röhrchen unterschiedlicher Bauart eingesetzt, die nach dem Prinzip verbundener Gefäße den Füllstand außerhalb des Behälters anzeigen (Bild 32).



Bild II.32 Füllstandanzeige, konventionell

Das Schauglas ist die preiswerteste Möglichkeit der Füllstandanzeige, jedoch für eine Außenaufstellung nicht geeignet. Die beim Schauglas auftretenden Temperaturverluste sind bei Langzeitspeichern oder anderen Hocheffizienzkonzepten nicht akzeptabel.

Dann können z. B. elektronische Bauteile (Bild 33 und 34) verwendet werden, welche über mehrere Sensoren den Füllstand anzeigen und aktiv Signale generieren, um z. B. eine automatische Nachspeisung zu realisieren. Dabei sind die unterschiedlichen Füllstände infolge verschiedener Temperatur-Ladezustände zu beachten.

WF-902 GSM Unit for Water level monitor and alarm System



Bild II.33 elektronische Füllstandmessung

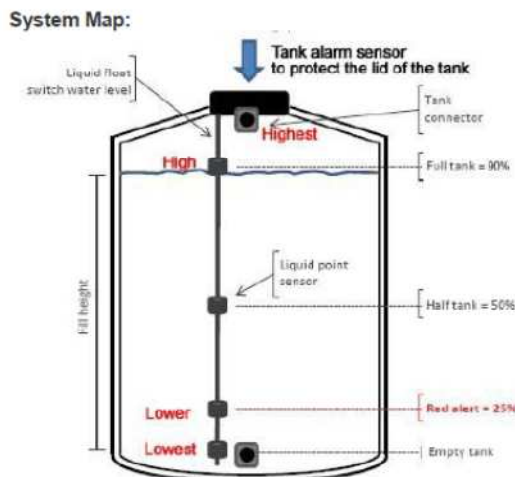


Bild II.34 elektronische Füllstandmessung/Prinzip

Die Zielstellungen für das Funktionsmodul wurden vollständig erreicht.

II.2.1.8 AP 10 und 11: Konstruktion/Auslegung/Berechnung/Simulation und Herstellung Einstiegsmodul

Zu erreichende Zielstellungen:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Begehbarkeit,
3. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Das Einstiegsmodul wurde aus 2 Gründen konzipiert:

für eine künftige Speichergeneration:

Die Revisionsöffnung würde ein künftiges Serienprodukt im Vergleich zum Wettbewerb deutlich aufwerten, weil damit Wartung, Nachrüstung oder ggf. auch eine Reparatur im Speicher ohne großen Aufwand möglich wäre.

für den Laborspeicher:

Für die Mess- und Prüfvorgänge war die Begehbarkeit des Speichers zwingend. Dabei

wurde der Zugang auf dem Dach montiert, um Sichtkontrollen auch im gefüllten Zustand zu ermöglichen.

Die Abmessungen des Einstiegsmoduls wurden mit der konstruktiven Gestaltung der Be- und Entladeeinrichtungen abgeglichen. So war in unterschiedlichen Phasen der Messversuche eine interne Kontrolle sowie ein Austausch der Be- und/oder Entlade-Elemente jederzeit möglich (Bild II.35).

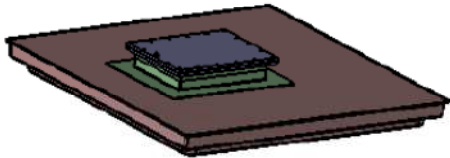


Bild II.35 Einstiegsmodul

Das Einstiegsmodul ist für den Laborspeicher im Dachelement montiert (s. Bild 36 und 37). Die Abmessungen des Einstiegsmoduls wurden mit der konstruktiven Gestaltung der Be- und Entlade-Einrichtungen abgeglichen. Für eine künftige Baureihe ist der Einstieg seitlich zu platzieren. Obwohl die Speichermontage ausschließlich vom Speicherinneren her erfolgt, muss für den Antransport der Einzelteile sowie für den heizungstechnischen Anschluss immer eine Seite zugänglich sein, die dann für einen Seiteneinstieg vorzusehen wäre.



**Bild II.36 Einstiegsmodul
angeordnet**

Die Zielstellungen im AP wurden erreicht.



Bild II.37 Einstiegsmodul im Dach

II.2.1.9 AP 12 und 13: Versuchsstand konzipieren und Versuchsprogramme erstellen

Diese Aufgaben wurde vom Verbundpartner TU Ilmenau realisiert, wobei entsprechende Abstimmungen vor allem bei den Tests zur Speicherbe- und –entladung erfolgten. Konzipierung und Ergebnisse siehe zusammengefasst im Berichtsteil TP 1/ TU Ilmenau Seite 39 bis 44.

II.2.1.10 AP 14: Monitoring und Ergebnisbewertung - Material- und Funktionsprüfungen

Diese Aufgaben wurde vom Verbundpartner TU Ilmenau realisiert, wobei entsprechende Abstimmungen vor allem bei den Tests zur Speicherbe- und –entladung erfolgten. Konzipierung und Ergebnisse siehe zusammengefasst im Berichtsteil TP 1/ TU Ilmenau Seite 45 bis 76.

II.2.1.11 AP 15: Lösung der Linerproblematik (Diffusionsdichtigkeit) Zu erreichende Zielstellungen:

Diffusionsdichtheit:

Die Problematik zur Diffusionsdichtheit ist ausführlich unter II.1.5.5 Bestimmung der Wasserdampf-Permeabilität (TP 1) dargestellt.

II.2.2 wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

| Schlüssel-Nr. | Kostenart | Bisherige Kalkulation | nach Antrag 31.3.2015 | Über/Unterschreitung |
|---------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 0813 | Material | 56.060,00 € | 42.000,00 € | 42.103,28 |
| 0823 | FE-Fremdleistg. | 32.000,00 € | 32.000,00 € | 29.326,00 |
| 0837 | Personalkosten | 142.932,00 € | 156.112,00 € | 171.769,05 |
| 0838 | Reisekosten | 5.500,00 € | 6.380,00 € | 6.380,00 |
| 0881 | Selbstkosten | 236.492,00 € | 236.492,00 € | 249.578,33 |
| 0882 | Eigenmittel | 118.246,00 € | 118.246,00 € | 131.322,33 |
| 0883 | Zuwendung | 118.246,00 € | 118.246,00 € | 118.246,00 |

In der Position Material wurde weniger benötigt. Grund hierfür war die Änderung der Konstruktion. Der Laborspeicher war ursprünglich aus Eck- und Längsmodulen, bestehend aus GFK-Profilen /U-, Doppel-T u. a.) und den Boden-, Dach- und Wandmodulen konstruiert. Im Rahmen der Dimensionierung entstand dann die Variante mit erweiterten Eckmodulen und gleichen Abmessungen für Länge, Breite und Höhe. Das allerdings sowie zusätzliche Maßnahmen wie z. B. die Herstellung und Montage der Austauschmodule erhöhten den personellen Aufwand und erforderten zusätzliche Fahrten nach Ilmenau.

II.2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die zu leistende Arbeit war über den Balkenplan und den darin enthaltenen Arbeitspaketen definiert.

Alle Arbeitspakete wurden in vollem Umfang abgearbeitet und zusätzliche Leistungen erbracht. Das betrifft insbesondere die Planung, Vorbereitung und Durchführung der Arbeiten im Zusammenhang mit dem Austausch der Seitenwandmodule sowie der praktischen Voruntersuchungen der Varianten zur Be- und Entladung des Speichers. Der Austausch des Seitenwandmoduls gestaltete sich als sehr aufwändig, weil zum einen die

Austauschbarkeit erhalten zum anderen wiederum die Dichtheit unter Laborbedingungen „im Freien“ erreicht werden sollte. Der Austausch aber ermöglichte den Test zusätzlicher Varianten des Wandaufbaues und somit wesentliche Erkenntnisse für die Erfordernisse einer künftigen Serienfertigung auf der Basis der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse.

II.2.4 voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit Ergebnisse im Sinne Verwertungsplan

Nach der Projektbearbeitung ist nunmehr der Schwerpunkt auf die Verwertung zu legen, denn das Interesse in Fachkreisen ist vorhanden. GFK-Speicher werden allerdings heute von Fachleuten und Nutzern i. d. R. als Problemlöser angesehen und häufig erst dann eingesetzt, wenn alle Möglichkeiten, einen Stahlspeicher zu verwenden, erschöpft sind: Das betrifft i. d. R. sehr beengte Zugänge und niedrige Höhen in Aufstellräumen vorhandener Gebäude. Die Erhöhung der Akzeptanz des GFK-Speichers und damit das Erreichen wirtschaftlicher Stückzahlen gelingen nur durch überdurchschnittliche Vorteile und deren breite Bekanntmachung.

Diese Vorteile sind:

- einfachste/sichere Montage
- beste Energieeffizienz
- höchste Lebensdauer
- deutlich besseres Preis-/Leistungsverhältnis zu Stahl.

Die Akteure im Wärmemarkt wie Hersteller von Heizungen, Planer/Architekten und vor allem das Heizungsbauhandwerk arbeiten sehr konservativ und müssen von diesen Vorteilen der neuen Speichergeneration überzeugt werden.

Dazu sind Aktivitäten in 3 Haupt-Richtungen erforderlich:

Hersteller-Akquise zur Serienfertigung der Segmente der Speicherhülle in einem hoch wirtschaftlichen Industrie-Verfahren mit einem Minimum an Fertigungstoleranzen (Interessenten sind vorhanden)

Optimierung der Montage, um künftig Unternehmen zu erreichen, die sich bisher vor Laminierarbeiten und der damit verbundenen Verantwortung zur Dichtheit des errichteten Wärmespeichers gescheut haben. Das schafft neue Multiplikatoren, die die Stückzahlforderung maßgeblich beeinflussen.

Erarbeitung eines umfassenden Vertriebs- und Marketingkonzeptes, weil der Erfolg der Serienfertigung zwangsläufig mit den Kosten des Wärmespeichers und diese wiederum von der Stückzahl abhängen. Hierzu müssen frühzeitig strategische Partnerschaften zwischen Akteuren des Wärmebereiches hergestellt und langfristig abgesichert werden.

Die Firma SINOI aus Nordhausen, bekannt als einer der bedeutendsten Hersteller von Rotorblättern für Windkraftanlagen, ist dabei besonders interessiert, um im Rahmen einer Arbeitsgemeinschaft mit den Forschern deren Ergebnisse künftig zu einem serienreifen Produkt und einer ebensolchen Fertigung weiter zu entwickeln.

II.2.5 Fortschritt bei anderen während der Vorhabenlaufzeit

In Fortschreibung des Verwertungsplanes wurde eine umfangreiche Recherche sowohl zur künftigen zahlenmäßigen Marktentwicklung von Wärmespeichern als auch zur Entwicklung und Einordnung von Kunststoffwärmespeichern, insbesondere im Volumenspeicherbereich von 1 bis 10 m³ abgeschlossen (siehe nachfolgende Tabelle).

Zu erwähnen sind insbesondere:

der derzeitige Entwicklungsstand der Neuentwicklung Sandwich-Modularspeicher „ModSto“ der Fa. Consolar,
 die Neuentwicklungen Bunksolar Hybridmodule nach Maß auf Kundenwunsch
 und die Neuentwicklungen der Fa. enersolve, z. Bsp. der Baureihe „Modulo Quader“

Entwicklungen im direkten Vergleich zum vorliegendem und als 4 m³ Labor-Wärmespeicher realisiertem Konzept sind nicht festgestellt wurden.

Die liegt sicher auch in der Ideensicherung durch eine Patentanmeldung begründet.

| Hersteller | S.-Volumenbe-reich (l) | S.-Tem- peratur (°C) | Max. Betr. -Dru. (bar) | S.-Form | S.-Mat. | Wärmedäm- mung (mm) | Ferti- gung |
|------------|--|----------------------|------------------------|--|------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Ebitsch | 10.000 | 95 | druckl . | oval | GFK | PU integr. (200) | Eigen |
| Ebitsch | 14.200 | 95 | druckl . | oval | GFK | PU integr. (200) | Eigen |
| Ebitsch | 18.500 | 95 | druckl . | oval | GFK | PU integr. (200) | Eigen |
| Roth | 850 | 90 | 3 | Ovalzylinder | Kunststoff | EPS (135) | Eigen |
| Roth | 325 | 90 | 3 | Ovalzylinder | Kunststoff | EPS (135) | Eigen |
| Roth | 500 | 90 | 3 | Ovalzylinder | Kunststoff | EPS (135) | Eigen |
| Roth | 475 | 90 | 3 | Ovalzylinder | Kunststoff | EPS (135) | Eigen |
| Haase | 9.300... 30.000 ¹ | 90 | 3 | Zyl. | GFK | MiWo (250) | Eigen |
| Haase | | | | | | | |
| Bunksolar | 800 | | | Zyl. | PP | | Eigen |
| Bunksolar | | | | | | | Eigen |
| Bunksolar | 1.000 | | | Zyl. | PP | | Eigen |
| Bunksolar | | | | | | | Eigen |
| Bunksolar | 1.200 | | | oval | PP | | Eigen |
| Bunksolar | | | | | | | |
| Bunksolar | 1.500 | | | oval | PP | | Eigen |
| Bunksolar | | | | | | | |
| Bunksolar | 1.800 | | | oval | PP | | Eigen |
| Bunksolar | | | | | | | |
| Bunksolar | 2.500 ... 25.600 | 90 | druckl . | Zyl. | PP | PU | Eigen |
| Bunksolar | 4.635 | 85 | druckl . | Rechteck, mit Innenversteifung, Einzelmodule | Mehr- schicht Kunststoff El. | PU (200) | Eigen |
| Bunksolar | 1.200 ... 13.520 | 85 | druckl . | -II- | -II- | PU (200) | Eigen |
| Consolar | 926 | 90 | 4 | Zyl. | St. | Alu-Folie+20mm Luftspalt+EPS(95) | Eigen |
| Consolar | Neuentwicklung Sandwich-Modularspeicher ³ | | | | | | |

Tabelle: Marktübersicht Kunststoffspeicher (Quelle TU I 062015)

II.2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung

Mit der Teilnahme an verschiedenen Konferenzen und Veranstaltungen wurden Informationen zum Ergebnisstand der Laborspeicherentwicklung und der Erprobungsergebnisse berichtet, so beim „Innovationstag Energiespeicher – Basis und Chance der Energiewende“ im September 2014 an der TU Dresden oder an den „Zukunftstechnologietagen 2014“ in Cottbus im November 2014 (Poster siehe Anlage 4), dem 25. Solarthermie Symposium 2015 in Kloster Banz, dem Expertentreffen zum Projekt HeizSol 2015 in Würzburg u.a. Veranstaltungen. Mit Abschluss der Forschungsberichtes sind weitere Veröffentlichungen geplant.

II.2.7 Erfolgskontrollbericht: Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele

Die Umsetzung der Energiewende gestaltet sich extrem anspruchsvoll. Zunehmend setzt sich dabei die Erkenntnis durch, dass vom gesamten „Energie“verbrauch Deutschlands nur 20 % „Strom“bedarf sind, aber 50 % Wärme und Kälte. Hier sind große Einsparpotenziale noch brachliegend, da die bisherige Wärme- und Kälteversorgung weitestgehend auf fossilen Energieträgern basiert und zugeschnitten auf den Bedarf entsprechend bereit gestellt wird (Wärmegrundlast + Wärmespitzenlast). Dies ist bedingt durch die durch viele (u.a. fluktuierend ...) Faktoren beeinflussten zur Verfügung stehenden regenerativen Energien so nicht mehr möglich. Gefragt ist neben der intelligenten Bereitstellung und Anwendung als Schlüsselfunktion eine sichere und preiswerte Energiespeicherung, hier Wärme- und Kältespeicherung. Im Ergebnis des Projektes wurde ein modular aufgebauter 4 m³- Laborspeicher auf der Grundlage von Faserverbundmaterialien realisiert und vermessen. Dieser Speicher kann die Grundlage für die weitere Entwicklung einer Vor-Serien-Entwicklung darstellen, wobei ein Industriepartner hierzu gewonnen werden konnte. Die **Förderpolitischen Ziele** sind somit erreicht wurden.

II.2.7.1 Erfolgskontrollbericht: Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Erwartungen / Zielstellungen und im Pflichtenheft vorausgerechneten Werte aus dem FE-Antrag wurden erreicht:

1. vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 95°C,
3. Diffusionsdichtheit
4. stabile Schichtung in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,
6. Begehbarkeit,
7. U-Wert 0,11 W/m²,
8. 20% Effizienzgewinn bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
9. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Besonders hoch zu bewerten ist der erreichte Standard hinsichtlich der Dämmung des MRW. Die mittlerweile veröffentlichte Berechnungsweise für das Energielabel von Wärmespeichern ließe ein Label A⁺ für den MRW zu.

Die Herstellung der einzelnen Module hat eine Vielzahl von Ergebnissen gebracht, die bei einer künftigen Serienproduktion von Speichern dieser neuen Bauart zu berücksichtigen sind. Das betrifft sowohl die Fertigungsverfahren für die Module der Speicherhülle als auch die Konstruktionen und Technologien zur Herstellung und Montage des BES.

Der Teilbericht TP 2 (TP2) enthält alle werkstoffwissenschaftlichen, konstruktiven und

festkörpermechanischen Ergebnisse, welche zur Realisierung und erfolgreichen Nachweisführung eines modular aufgebauten Recht-Eck-Wärmespeichers (4 m³ Speichervolumen) notwendig waren und damit eine Weiterentwicklung ermöglichen.

II.2.7.2 Erfolgskontrollbericht: Erfindungen/Schutzrechte

Zur Realisierung des Laborspeichers wurde die Erfindungsanmeldung zum Modularprinzip, welche im Ergeniss des Vorprojektes entstand, genutzt.

II.2.7.3 Erfolgskontrollbericht: wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modularskonzept gute Aussichten auf Verwirklichung durch Überführung der Entwicklung durch Weiterentwicklung bzw. einem Vorserien-Prototyp hat.

Unter II.5 ist detailliert der Vorschlag zum weiteren Vorgehen und V. erwerthen der Ergebnisse dargelegt.

II.2.7.4 Erfolgskontrollbericht: wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten

Die Entwicklung und ihr aktueller Entwicklungsstand wurden zum 24. Solarthermie Symposium 2014 und 2015 in Kloster Banz vorgestellt. Für das Symposium 2016 soll eine Bewerbung für den Innovationspreis eingereicht werden.

II.2.7.5 Erfolgskontrollbericht: wissenschaftliche/wirtschaftliche Anschlussfähigkeit einer nächsten Phase

Die Notwendigkeit einer wissenschaftlichen Weiterentwicklung besteht unbedingt in der weiteren Entwicklung zur „Super“-Wärmedämmung. Zur Minimierung der Warmhalteverluste des Wärmespeichers gibt es diesbezüglich trotz der erreichten Ergebnisse noch Entwicklungspotenzial.

Gleiches gilt für die weitere Reduzierung der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit.

II.2.7.6 Erfolgskontrollbericht: Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Wasserdampfdurchdringung der inneren Speicherwand ist im Rahmen der Forschungsaufgabe verringert, aber noch nicht endgültig gelöst.

II.2.7.7 Erfolgskontrollbericht: Präsentationsmöglichkeiten

Die Ergebnisse werden in Fachsymposien und –Messen sowie im Rahmen von Publikationen in Fachzeitschriften präsentiert. Hier vor allem

- Solarthermie Symposium Kloster Banz
- Tagung der Deutschen und Europäischen Solarthermieplattform (DSTTP und ESTTP)
- OTTi: Speicherfachkonferenz
- Fachveranstaltungen zur Energiespeicherung
- Fachmessen (Heizung / Sanitär)

II.2.7.8 Erfolgskontrollbericht: Einhaltung des Zeitplanes

Der Zeitplan wurde exakt eingehalten. Bei den Kosten gab es einen erhöhten Aufwand an Personalkosten, bedingt durch Konkretisierungen im Verlauf der Themenbearbeitung und Gehaltserhöhungen. Die Mehrkosten werden vollständig aus Eigenmitteln des Zuwendungsempfängers (ed energie.depot GmbH) beglichen. Aufgrund der Entscheidungen während der Bearbeitung zu speziellen zu untersuchenden Schwerpunkten gab es Verschiebungen zwischen den einzelnen Kostenarten.

III. Teil-Berichte (TP 2) ed Radeberg - Modularer Rechteck- Wärmespeicher aus Faserverbundwerkstoffen-GFK

Teilbericht Prof. Knauer / Dr. Wagenknecht

Konstruktion der Lamine, Module, FEM – Berechnung der Module und Verbindungen, Werkzeugbau und Fertigungsüberwachung, Nachweise und Deformationsverhalten im Anwendungsfall, Weiterentwicklungen.

Verantwortliche: Dipl.-Ing. Rolf Förster

Dipl.-Ing. Jürgen Bühl

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Berthold Knauer Schönbrunn

Dr.-Ing. Eckhard Wagenknecht Berlin

Dipl.-Ing. Rolf Förster ed Radeberg

Dipl.-Ing. Wolfgang Günther TUI (Zeichnungsausführung,

Vermessung)

(Teil-) Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------|--|------------|
| III. | Teilbericht zu TP2 – Modularer Recht-Eck-Wärmespeicher aus Faserverbundwerkstoffen-GFK (Arbeitspaket 3) Prof. Knauer ILL & Dr. Wagenknecht Berlin | 110 |
| III.1 | Themenfindungsphase | 113 |
| III.1.1 | Einleitung | 113 |
| III.1.2 | Geometrieentwicklung | 113 |
| III.1.3 | Gestaltungsprinzip | 116 |
| III.1.4 | Werkstoffkomponenten | 117 |
| III.2 | Gestaltungsphase | 117 |
| III.2.1 | Strukturkonzept | 117 |
| III.2.2 | Werkstoffdatenblätter | 124 |
| III.2.3 | Festigkeitsanalyse | 164 |
| III.2.3.1 | FEM-Teilbericht 1 als Einschub (FEM TB1) | 165 |
| TB1.1 | Allgemeines | 165 |
| TB1.2 | Geometrie des 4 m ³ Laborspeicher-Modells | 166 |
| TB1.3 | Materialkennwerte des 4 m ³ _Labor-Wärmespeichers | 166 |
| TB1.3.1 | Ausgangsdaten (Kurzzeitwerte) | 166 |
| TB1.4 | Berücksichtigung von Langzeitwirkungen | 169 |
| TB1.5 | Belastung des 4 m ³ Labor-Wärmespeichers | 169 |
| TB1.6 | Berechnung der Beanspruchung des 4 m ³ Labor-Wärmespeichers | 170 |
| TB1.6.1 | Lastfall LF1: Eigengewicht | 170 |
| TB1.6.2 | Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck | 172 |
| TB1.6.3 | Lastfall LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz | 173 |
| TB1.6.4 | Lastfall LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,05 bar Innendruck | 176 |
| TB1.6.5 | Lastfall LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,10 bar Innendruck | 177 |
| III.2.3.2 | FEM-Teilbericht 2 als Einschub (FEM TB2) | 188 |
| TB2.1 | Zum neuen FEM.Modell | 188 |
| TB2.2 | Berechnung der Beanspruchungen des Wärmespeichers mit dem Halbmodell | 189 |
| TB2.2.1 | Lastfall LF1: Eigengewicht + Mannlast | 190 |
| TB2.2.2 | Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Mannlast | 191 |
| TB2.2.3 | Lastfall LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + Mannlast | 192 |
| TB2.2.4 | Lastfall LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,05 Bar Innendruck | 194 |
| TB2.2.5 | Lastfall LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0,10 bar Innendruck | 195 |
| III.2.4 | Detaillieren | 216 |
| TB2.4.1 | Deckelmodul / Mannloch | 216 |
| TB2.4.2 | Eck-Modul-Verbindungen | 216 |
| TB2.4.3 | Funktionsmodulvarianten | 217 |
| III.2.4.3 | FEM-Teilbericht3: Mediendurchführung als Einschub (FEM TB3) | 218 |
| TB3.1 | Zum FEM-Modell mit Mediendurchführung Variante IV | 218 |
| TB3.2 | Berechnung der Beanspruchung des Wärmespeichers | 218 |

| | | |
|----------------|--|------------|
| TB3.3 | Lastfall LF1: Eigengewicht + Mannlast | 219 |
| TB3.4 | Lastfall LF2: Eigengewicht + Mannlast | 220 |
| TB3.5 | Lastfall LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+Mannlast | 221 |
| TB3.6 | Lastfall LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+Temperaturdifferenz + 0,05 bar Innendruck | 223 |
| TB3.7 | Lastfall LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+Temperaturdifferenz + 0,10 bar Innendruck | 225 |
| III.3 | Fertigungsphase | 234 |
| III.3.1 | Variantenentwicklung bei den auswechselbaren Seitenwandmodulen | 234 |
| III.3.2 | FEM-Teilbericht 4 – Laborwärmespeicher in Modulbauweise als Einschub (FEM 4) | 234 |
| TB4.1 | Zum FEM-Modell | 234 |
| TB4.2 | Berechnung der Beanspruchungen der Varianten 2 und 3 des Speichers | 237 |
| TB4.2.1 | Variante 2 mit Vakuum-Isolations-Paneelen | 237 |
| TB4.2.2 | Variante 3 mit Vakuum-Isolations-Paneelen und zusätzlichen Glasschaum | 240 |
| III.3.3 | FEM-Teilbericht 7 als Einschub (TB7) | 256 |
| TB7.1 | Zum FEM-Modell | 256 |
| TB7.2 | Berechnung der Beanspruchungen der Varianten 2 und 3 des Speichers | 259 |
| TB7.2.1 | Variante 2 mit Vakuum-Isolations-Paneelen– Seitenwand / Entwurf 7 | 259 |
| TB7.2.2 | Variante 3 wie Variante 2 aber mit zusätzlichem Glasschaum- Seitenwand / Entwurf 4 | 261 |
| III.3.4 | Werkzeugbau und Abmusterung | 272 |
| III.3.5 | Modulfertigung | 272 |
| III.3.6 | Modulmontage | 277 |
| III.4 | Musterzulassung | 281 |
| III.4.1 | Versuchsanordnung | 281 |
| III.4.2 | Betriebserprobung | 284 |
| III.4.3 | Deformationsverhalten (Vergleich von Rechnung und Versuch) | 291 |
| III.4.4 | FEM-Teilbericht 11-4m³-Laborwärmespeicher in Modulbauweise als Einschub | 292 |
| III.5 | Vorschläge für Weiterentwicklungen | 302 |
| III.5.1 | Projektstudie für einen 3 m ³ Wärmespeicher | 302 |
| III.5.2 | Projektstudie zum Vergrößerungspotenzial bis 20 m ³ Wärmespeicher | 316 |
| III.6 | Zusammenfassung | 336 |
| III.7 | Anlage Zeichnungssatz (nur als Beilage zum gedruckten Bericht) | 337 |

III.1 Themenfindungsphase

III.1.1 Einleitung

In Zeitraum 2010/2013 konnten mit Mittel des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ein Forschungsvorhaben zur grundlegenden Weiterentwicklung zum Werkstoff- und Bauteilverhalten von GFK-Wärme (Langzeit) Heißwasserspeichern erfolgreich bearbeitet werden.

Dabei wurden grundlagenorientiert:

eine neue Basisstruktur für Rechteckbehälter gefunden
(Patent DE102012020 448.5)

Laminatpläne für selbsttragende, dämmende und dichtende Modulhüllen entwickelt,
FEM- Berechnungen für Modulverbindungen als ebene einschnittige Überlappung sowie einfache Laschung und für Ecken unter zweiachsiger Belastung mit und ohne PUR - Kern – Stützung durchgeführt,
und mit einer Musterdimensionierung abgeschlossen

Im Folgenden kam es darauf an, die Annahmen auch experimentell zu belegen und als Modulbauweise für spätere Anwendungen vorzubereiten.

III.1.2. Geometrieentwicklung

Bei der Problemaufbereitung für die konkrete Entwicklung werden für die in Breite, Höhe und Gewicht vorgegebenen Einschränkungen bei den Einzelelementen (speziell für den Transport und die Montage) im Sinne maximaler Integration analysiert:

Eckkörper

Randwinkel

Seitenplatten

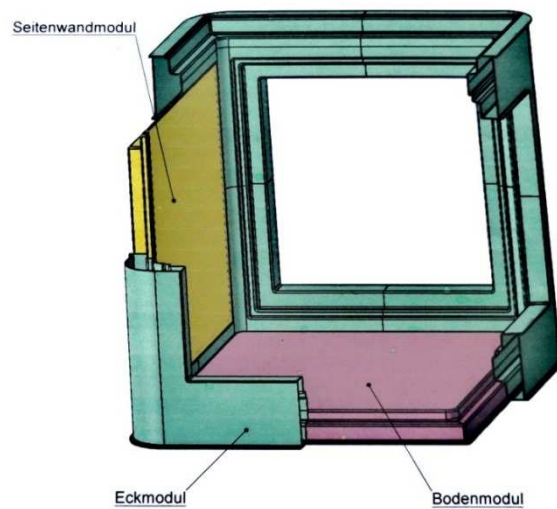
Bodenplatten

Abdeckplatten

Dabei wurde der größte Effekt bei der Neugestaltung des Eckkörpermoduls als „Dreibein“ gesehen und es wurde möglich, ihn als maßlich gleiches Teil im Speicher 8mal zu verwenden (Abb.III.1.1 & Abb.III.1.2).



Abbildung III.1.1 Integral - Wärmespeicher- ARGE Modulbauweise (Bodenwanne + Abdeckung)



Außenmaße: L x B x H 1,92 x 1,92 x 1,92 = 7,08 m³
 Innenmaße: L x B x H 1,60 x 1,60 x 1,60 = 4,10 m³
 (abzüglich Eckausrundungen und Innenliner)

Abbildung III.1.2 Nach Vorlagen von Prof. B. Knauer auf Basis der ARGE Patentanmeldung DE 10 2012 020 448.5 gezeichnet mit 8 x „Dreibein“ als Hauptgestaltungs- element für den 4 m³ Labor-Wärmespeicher

Für die Verbindung der Eckmodule (Dreibein) miteinander sowie den Plattenmodulen kamen stoff- und formschlüssige Verbindungen in Frage (Abb. III.1.3.), wobei sich das Z-Prinzip bei der Bewertung und Gestaltung durchgesetzt hat.

| Bewertungskriterien | V I Versetzte Doppelwand nach Nut- und Z- Prinzip | V II Nut- Steg- Prinzip | V III Nut- Federprinzip | V IV Komplette Halbzeug- Kombi - Lösung |
|---|---|-------------------------------|-------------------------------|--|
| 1. K.o. - Kriterium | | | | |
| Machbarkeit | + | + | + | + |
| Montierbarkeit | + | + | + | + |
| 2. Punktbewertung | | | | |
| Funktionssicherheit (Dichtheit) | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Verfahrenssicherheit (Realisierung der Module) | 2 | 3 | 3 | 4 |
| Formbeständigkeit bis 95°C H₂O- Einwirkung | 3 | 2 | 2 | 4 |
| Wärmedämmvermögen ($k < 0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) | 3 | 3 | 3 | 2 |
| Montagefreundlichkeit | 5 | 4 | 3 | 4 |
| Summe | 17 | 15 | 14 | 17 |

K.o.- Kriterium - Verlangt die Erfüllung der Festforderung zum Verblieb im System

Punkteskala:

| | |
|-----------|--------------|
| 4 Punkte: | sehr gut |
| 3 Punkte: | gut |
| 2 Punkte: | befriedigend |
| 1 Punkte: | genügend |
| 0 Punkte: | ungenügend |

Abbildung III.1.3 Varianten von Modulverbindungsmöglichkeiten mit Bewertungen nach dem K.O.- Kriterium sowie einer Punkteskala

In Umsetzung der 4 m³ Kubatur als Festforderung sowie von 150 mm Dämmungsdicke für die Funktionsstruktur ergaben sich die in Abb. III.1.2. angegebenen Hauptmaße.

III.1.3 Gestaltungsprinzip

Während alle Vorplanungen von serientauglichen Schalenbauweisen im Injektionsverfahren (RTM) oder Infusionsverfahren ausgingen, d.h. von umlaufenden Tragschichten und geschlossenen Kräftepfaden, war es für die nun an-stehende Einzelfertigung im Handauflegeverfahren (HAV) notwendig, Halbschalen zu entwerfen und über Überlappungen die Kräfte ein- und umzuleiten.

Alle Eckmodule, Boden- und Seitenwandmodule weisen deshalb zusätzliche Falze in den Formwerkzeugen und „Nasen“ am Formteil auf (Abb. III.1.4)

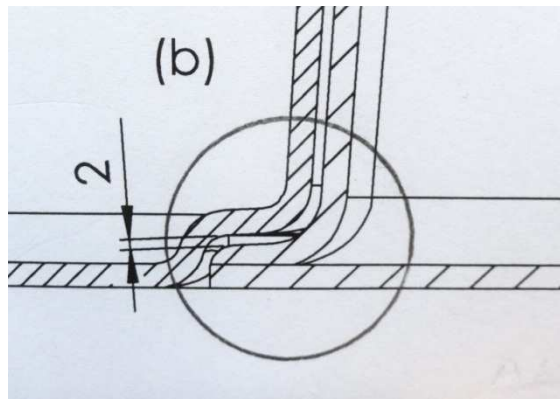


Abbildung III.1.4 Gestaltungsbeispiel für Halbschalen Verbindungen am Eck- und Bodenmodul

Dem Charakter eines „Versuchsstandes“ entsprechend wurden mehrere Isolationsarten für die Seitenwandmodule geplant und die Seitenwandmodule selbst als auswechselbare Platten im der Rahmenkonstruktion der Dreibein- Eckmodule montiert. Als Verbindungsmittel wurden Metallschrauben und Aluminiumstäbe (Abb.III1.5) vorgesehen.

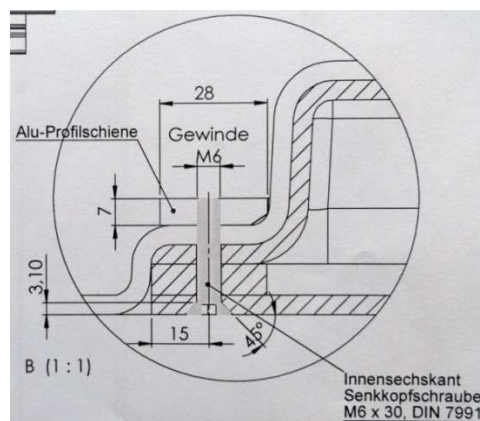


Abbildung III.1.5 Einlamierte Alu-Profilschienen und Metallschrauben als Verbindungsmittel für die auswechselbaren Seitenwandmodule

III.1.4 Werkstoffkomponenten

Für die Vordimensionierung der Module, die Erstellung der Zeichnungssätze sowie die FEM-Berechnung und Nachweisführung war es erforderlich für 7 Werkstoffgruppen, davon 4 Faserverbundarten bzw. 5 polymere Basisgruppen, Datenblätter zu erarbeiten.

(Für diesen Abschlussbericht werden die Endergebnisse aus 4 Sachberichten zusammengefasst und dabei auch auf Rückschläge sowie offene Fragen hingewiesen)

Bei der Tragschicht-Laminatentwicklung gab es eine große Zahl von möglichen Ausführungen.

Als Variationsbreite sei angeführt:

Matrixmaterial MM: Thermoplaste (PP, EP, PA, PPO.), Duroplaste (UP, EP, VE, PF, PI, PUR..) mit jeweils vieltausendfachen Spezifikationen nach molekularen Typen, Beimischungen, Härtern,...

Verbund – Verstärkungsmaterial VM:

Art: Glasfaser, Kohlefaser, Aramidfaser, Gesteinsfaser..

Faseranteil: 40 – 75%, auch je nach Verarbeitungsverfahren zuordenbar

Faseranordnung: orthogonal, diagonal, Kurzfaser – Langfaser, multiaxial, Endlosmatte...

Bindungsart: Leinwand, Körper, Atlas, pulvergebunden, genäht

Ausführung von Mischverbunden 1., 2. und 3. Art, teilweise auch mit Teilchenverbunden

Verbundrealisierung:

Druck- und Temperaturführung, Einsatz von Schichten und Haftvermittlern

Konditionierung: Nachhärtung/Tempern

Beachtung der verfahrensbedingten Gestaltungsregeln, d.h. auch der Fließwege und damit wieder die Entstehung von Inhomogenitäten und Anisotropien.

III.2 Gestaltungsphase

III.2.1 Strukturkonzept

Der Vorentwurf als grob dimensionierte Formgebung und seine maßstäbliche Ausarbeitung (teilweise im Maßstab 1:1) stammt von B. Knauer.

In Verbindung mit den ausgewählten Verbundkomponenten und der Bestimmung / Ermittlung der Verbundeigenschaften konnte nach der zeichnerischen Bearbeitung an der TUI die 1.dimensionierte Ausführung an E. Wagenknecht für die 1.FEM – Berechnung bereitgestellt werden.

In der für die Konstruktion mit den typisierten schrittweisen Anpassungs- bzw. Iterationsvorgängen mit ihren Vor- und Rückgriffen wurden auch die einzelnen Module mit entsprechenden Ausarbeitungen und weiteren FEM-Berechnungen untersetzt. Auch werden die Materialeigenschaften der Verbunde und die geometrischen Variablen (Schichtenzahl, Gesamtdicke, Überlappungslänge u.a.) für die sichere Aufnahme der mechanischen, thermischen und medialen Beanspruchung ausgelegt.

Die Ergebnisse wurden als zeichnungsgerechte Vorlagen Herrn W. Günther (TUI) zur Ausführung zur Verfügung gestellt.

Als Beispiel: Eckmodul (Abb. III.2.1)
Bodenmodul (Abb. III.2.2)

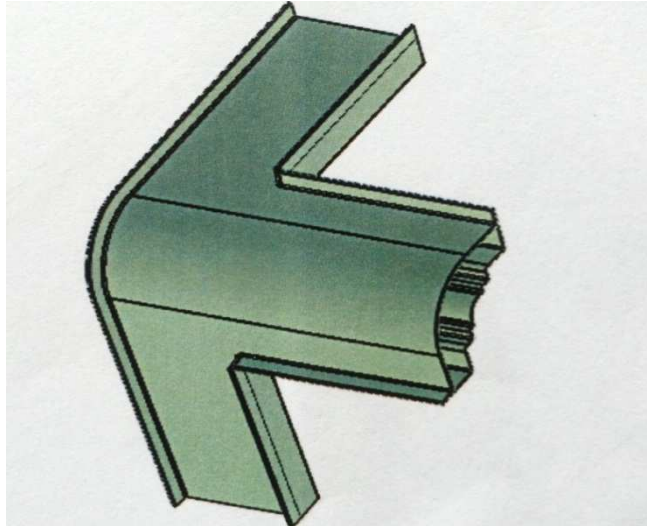


Abbildung III.2.1 Innen- und Außenschale eines Eckmoduls nach der Verklebung und vor dem Ausschäumen

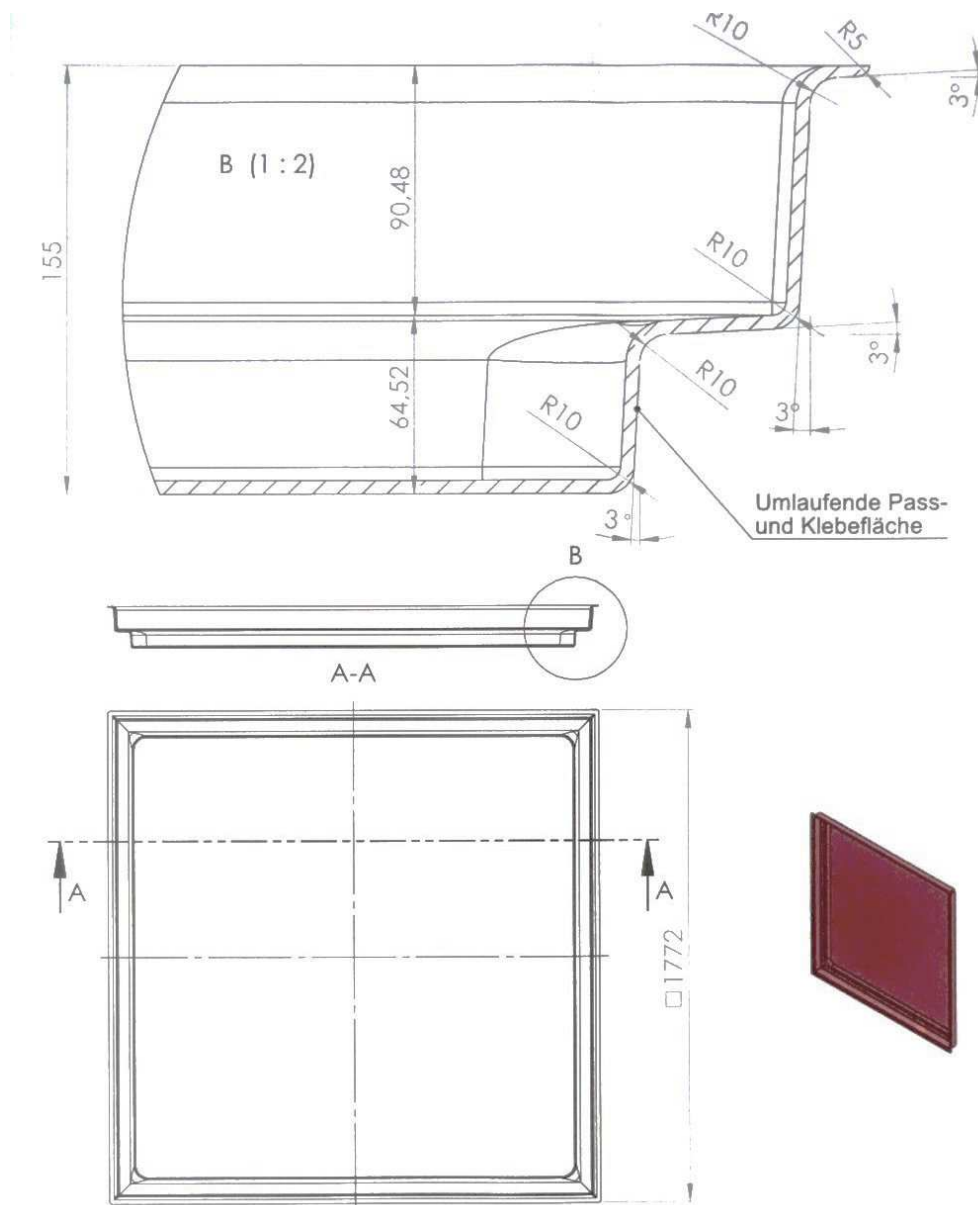


Abbildung III.3.1 Innen- und Außenschale eines Eckmoduls nach der Verklebung und vor dem Ausschäumen

Mit den nachfolgenden Blättern 1, 2, 3, 4 wird die Endfassung der Nomenklatur des Zeichnungssatzes belegt:

4 m³ Laborwärmespeicher

| Zeichnungsnummer | Benennung | Zeichnung | Bemerkung | Bearbeiter | Datum gepr. |
|-------------------|--|---|---------------------------|------------------------------|----------------------|
| | Deckblatt | 4m³ Labor-Wärmespeicher | Modulbauweise | | |
| 200-10 | Zusammenbauzeichnung | | | | |
| 200-10-01 | Zusammenbauzeichnung mit Bauteilbezeichnung | Konstruktionszeichnung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau / Kn. | 17.10.2013 |
| 200-10-02 (b) | Eckverbindung Schnittdarstellung incl. Montagefugen | Konstruktionszeichnung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau / Kn. | 17.10.2013 |
| 210-10 (a) | Eckmodul | Gesamtdarstellung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 210-10-01 | Eckmodul - Äußere Schale | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 210-10-02 (a) | Eckmodul - Innere Schale | Konstruktionszeichnung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 210-20 | Eckmodul | Gesamtdarstellung | | Fa. Rinn Wümbach /Kn. | 21.01.2014 |
| 210-20-01 | Eckmodul - Äußere Schale | Formenbau | Verlängerung der | Fa. Rinn Wümbach /Kn. | 21.01.2014 |
| 210-20-02 | Eckmodul - Innere Schale | Formenbau | Schenkel und Kanten | Fa. Rinn Wümbach /Kn. | 21.01.2014 |
| 210-30 | Eckmodul - Innere Schale Eckmodul - Äußere Schale | Laminatpläne | | Fa. VKA Schönbrunn /Kn. | vgl. Sachbericht 2/3 |
| 220-10 | Bodenmodul | Gesamtdarstellung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 220-10-01 | Bodenmodul - Platte | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 220-10-02 | Bodenmodul - Innere Schale | Konstruktionszeichnung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 220-20-02 | Bodenmodul - Innere Schale | Formenbau | Kantenverlängerung | Fa. Rinn Wümbach /Kn. | 28.02.2014 |
| 220-30 | Bodenmodul - Schale Bodenmodul - Platte | Laminatpläne | | Fa. VKA Schönbrunn /Kn. | vgl. Sachbericht 2/3 |
| 230-10 | Deckelmodul | Gesamtdarstellung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 21.01.2014 |
| 230-10-01 | Deckelmodul Durchführungen | Konstruktionszeichnungen | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 21.01.2014 |
| 230-30 (c) | Deckelmodul/Einstiegsschacht | Gesamtdarstellung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 08.01.2014 |
| 230-30-01 (a) | Dom mit Flanschring | Konstruktionszeichnung | | VKA / TU /Kn. | 08.01.2014 |
| 230-30-02 (d) | Flanschdeckel | Konstruktionszeichnung | | VKA / TU /Kn. | 08.01.2014 |
| 230-30-03 (a) | Flachdichtung | Konstruktionszeichnung | | VKA / TU /Kn. | 08.01.2014 |
| 230-40 | Deckelmodul/Einstiegsschacht Durchführungen | Laminatpläne | | Fa. VKA Schönbrunn /Kn. | vgl. Sachbericht 2/3 |

| Zeichnungsnummer | Benennung | Zeichnung | Bemerkung | Bearbeiter | Datum gepr. |
|------------------|--|--------------------------|---|-------------------------|----------------------|
| 240-10 | Seitenwandmodul-I | Gesamtdarstellung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 240-10-01 | Seitenwandmodul-I - Innere Platte | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 240-10-02 | Seitenwandmodul-I - Äußere Schale | Konstruktionszeichnung | PUR-Hartschaumkern | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 240-10-03 (a) | Seitenwandmodul-I - Umlaufende Verdickungsprofile | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 17.10.2013 |
| 240-11 | Seitenwandmodul-II | | | | |
| 240-11-01 | Seitenwandmodul-II - Entwurf 1 | Gesamtdarstellung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | TU Ilmenau /Kn. | 08.05.2014 |
| 240-11-02 | Seitenwandmodul-II - Entwurf 2 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 08.05.2014 |
| 240-11-03 | Seitenwandmodul-II - Entwurf 3 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 08.05.2014 |
| 240-11-04 | Seitenwandmodul-II - Entwurf 4 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 08.05.2014 |
| 240-11-05 | Seitenwandmodul-II - Entwurf 5 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 13.05.2014 |
| 240-11-06 | Seitenwandmodul-II - Entwurf 6 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 05.06.2014 |
| 240-11-07 | Seitenwandmodul-II - Fertigung | Gesamtdarstellung | Vakuumpaneele | TU Ilmenau /Kn. | 22.10.2014 |
| 240-12 | Seitenwandmodul-III | | | | |
| 240-12-01 | Seitenwandmodul-III - Entwurf 1 | Gesamtdarstellung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | TU Ilmenau /Kn. | 13.05.2014 |
| 240-12-02 | Seitenwandmodul-III - Entwurf 2 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 05.06.2014 |
| 240-12-03 | Seitenwandmodul-III - Entwurf 3 | Gesamtdarstellung | | TU Ilmenau /Kn. | 05.06.2014 |
| 240-12-04 | Seitenwandmodul-III - Fertigung | Gesamtdarstellung | Sonst. Vakuumisolier. | TU Ilmenau /Kn. | 10.01.2015 |
| 240-20-02 | Seitenwandmodul-I - Äußerere Schale | Formenbau | Kantenverlängerung | Fa. Rinn Wümbach /Kn. | 28.02.2014 |
| 240-30 | Seitenwandmodul-I - Schale Seitenwandmodul-I - Platte | Laminatpläne | | Fa. VKA Schönbrunn /Kn. | vgl. Sachbereich 2/3 |
| 240-31 | Seitenwandmodul-II - Schale Seitenwandmodul-II - Platte | Laminatpläne | | Fa. VKA Schönbrunn /Kn. | vgl. Sachbereich 3/4 |
| 240-32 | Seitenwandmodul-III - Schale Seitenwandmodul-III - Platte | Laminatpläne | | Fa. VKA Schönbrunn /Kn. | vgl. Sachbereich 3/4 |
| 250-10 | Modul-Verbindungen | | | | |
| 250-10-01 (b) | Verbindung der Eckmodule | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 28.10.2013 |
| 250-10-02 (a) | Verbindung Seitenwandmodul | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 28.10.2013 |
| 250-10-03 (b) | Alu-Profilschienen | Konstruktionszeichnung | | TU Ilmenau /Kn. | 28.10.2013 |

| Zeichnungsnummer | Benennung | Zeichnung | Bemerkung | Bearbeiter | Datum gepr. |
|-------------------|--|--------------------------|---|---------------------|-------------------|
| 260-10 (a) | Beladeeinrichtungen Schichtenlader | Gesamtdarstellung | | e.d / TU | 26.02.2014 |
| 260-20 | Be- und Entladungseinrichtungen Medienanschlüsse durch Seitenwand | | | | |
| 260-20-01 | Variante 1 - Schutzrohr DN 100 | Zusammenbauzeichnung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | e.d / VKA / TU /Kn. | |
| 260-20-02 | Variante 2 - Doyma-Durchführung | Zusammenbauzeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | |
| 260-20-03 | Variante 3 - Kernbohrung ohne Schutzrohr | Zusammenbauzeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 13.01.2014 |
| 260-20-04 | Variante 4 - Durchführung-Doyma 2 | Zusammenbauzeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 03/04.03.2014 |
| 260-20-05 | Variante 5 - Durchführung Doyma-multi | Zusammenbauzeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 24.07.2014 |
| 260-20-06 (a) | Fertigung - Durchführung Doyma-Teststand | Zusammenbauzeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 24.07.2014 |
| 260-20-10 | Anordnung der Durchführungen im Seitenwandmodul | Konstruktionszeichnung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | e.d / VKA / TU /Kn. | 05.03.2014 |
| 260-20-20 | Anordnung der Doyma-multi Durchführungen im Seitenwandmodul | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 24.07.2014 |
| 260-20-30 (a) | Fertigung der Doyma-multi Durchführungen im Seitenwandmodul des Teststandes | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU /Kn. | 24.07.2014 |

| Zeichnungsnummer | Benennung | Zeichnung | Bemerkung | Bearbeiter | Datum gepr. |
|------------------|---|------------------------|---|----------------|-------------|
| 260-30 | Be- und Entladungseinrichtungen 1. Testphase (ohne WÜ) | | | | |
| 260-30-01 (c) | Einbauten Übersichtsdarstellung | Gesamtdarstellung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | e.d / TU | 31.01.2014 |
| 260-30-02 (c) | Einbauten Hauptmaße | Aufstellung | | e.d / TU | 31.01.2014 |
| 260-30-03 (a) | Medienanschlüsse | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU | 29.01.2014 |
| 260-30-11 (b) | Einbauten Übersichtsdarstellung Teststand | Gesamtdarstellung | | e.d / TU | 24.07.2014 |
| 260-30-12 (b) | Einbauten Hauptmaße, Teststand | Aufstellung | | e.d / TU | 24.07.2014 |
| 260-30-13 (a) | Medienanschlüsse, Teststand | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU | 24.07.2014 |
| 260-40 | Be- und Entladungseinrichtungen 2. Testphase (mit WÜ) | | | | |
| 260-40-01 (a) | Einbauten Übersichtsdarstellung | Gesamtdarstellung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | e.d / TU | 31.01.2014 |
| 260-40-02 (a) | Einbauten Hauptmaße | Aufstellung | | e.d / TU | 31.01.2014 |
| 260-40-03 (a) | Medienanschlüsse | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU | 29.01.2014 |
| 260-40-11 | Einbauten Übersichtsdarstellung | Gesamtdarstellung | Diese Varianten sind nicht zur Ausführung gekommen. | e.d / TU | 11.03.2015 |
| 260-40-12 | Einbauten Hauptmaße | Aufstellung | | e.d / TU | 11.03.2015 |
| 260-40-13 (a) | Medienanschlüsse | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU | 24.07.2014 |
| 260-40-21 | Einbauten Übersichtsdarstellung Teststand | Gesamtdarstellung | | e.d / TU | 20.05.2015 |
| 260-40-22 | Einbauten Hauptmaße, Teststand | Aufstellung | | e.d / TU | 20.05.2015 |
| 260-40-23 | Medienanschlüsse, Teststand | Konstruktionszeichnung | | e.d / VKA / TU | 20.05.2015 |

Entwurf von Speichertypen der Größen 3, 6, 10, 13, 17 und 20 m³

| 300-01 | Speichertypen | | | | |
|-----------|--------------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|------------|
| 300-01-01 | Typ WS 1 | Zusammenbauzeichnung | PUR-Hartschaumkern | Knauer/TU Ilmenau | 12.01.2015 |
| 300-01-02 | Typ WS 3 | Zusammenbauzeichnung | PUR-Hartschaumkern | Knauer/TU Ilmenau | 12.01.2015 |
| 300-01-03 | Typ WS 6 (incl. Tabelle aller Typen) | Zusammenbauzeichnung | PUR-Hartschaumkern | Knauer/TU Ilmenau | 12.01.2015 |

III.2.2 Werkstoffdatenblätter

Die nachfolgenden 7 Datenblöcke wurden aus 4 Sachberichten, die im Verlauf der Themenbearbeitung schwerpunktartig erstellt wurden, zusammengefasst und stellen den erreichten Datenstand beim Abschluss des Themas dar.

Der Bericht enthält damit geprüfte Werkstoffangaben für Wärmespeicher mit langzeitiger Wasserfüllung bis 95°C und einem Füllvolumen bis 50 m³.

Die mechanische Werkstoffanalyse wurde an Probekörpern und speziellen Bauteilen u.a. nach folgenden Normen durchgeführt:

Zugprüfung ASTM D 3039 – 14
Druckprüfung DIN EN 2850:1992 -10
Biegung – Dreipunkt DIN EN 2746: 1998 – 11
Schub – Schubrahmen DIN SPEC 4885: 2014 – 01

Die thermische Werkstoffanalyse

Wärmeformbeständigkeit HDT nach DIN EN ISO
Veraschung nach DIN EN ISO 3451
Thermomechanische Analyse ISO 11359 – 2: 1999 – 10

Bei der Bezeichnung musste aus methodischen Gründen mit doppelten Indizes gearbeitet werden:

Zugbeanspruchung als Indizes z bzw. t (tensile)

Druckbeanspruchung d bzw. c (compression)

Biegebeanspruchung b (bend)

Schubbeanspruchung sxy (als Interlaminar) mit wechselndem Vorzeichen

Scherbeanspruchung sz (als Intralaminar) (sher) mit wechselndem Vorzeichen

Während für die Lamine als schichtenweise aufgebaute inhomogene anisotrope Festkörper die Normung der Prüfverfahren weitgehend abgeschlossen ist, gilt dies nicht für polymere Hartschäume. Um diese gleichberechtigt mit den Traglaminaten bei FEM-Berechnungen zu behandeln, war es notwendig, eine Reihe von Sonderprüfungen zu definieren und durchzuführen.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Feuchtigkeitsaufnahme, der Permeations-, der Transmissionsraten u.ä.

Der **Abschnitt III.2.2** wird untersetzt in:

Blatt I: Trag- und Deckschichten (bestehend aus MM, VM, Verbunde) für alle Einzelflächen, Einzelmodule, Baugruppen und den gesamten Kubus

Blatt II: Kernschichten – PUR (für alle Schichtenmodule, nur teilweise bei Seitenwandmodul V II/III)

Blatt III: Montageklebstoffe auf Basis von Methacrylaten, PU, EP, Silicon und VE

Blatt IV: GFK-UD-Träger-, GFK-Wickel- sowie Pultrusionsprofile für hochtragende statische Verbände

Blatt V: Liner als Auskleidungen mittels GFK, duroplastischen Reinharzschichten o.a.

Blatt VI: Örtliche Einlagen (Hilfsprofile, metallische Verbindungsmittel als Schrauben, Dichtungen u.a.)

Blatt VII: Neuartige Kernschichten (für Seitenmodule V II und III)

Blatt I: Trag- u. Deckschichten aus GFK, spez. auch Aussagen zu Zwischenschichten

Für die Baureihe werden Laminatdicken zwischen 3 und 5 mm aus unterschiedlichen MM und Verstärkungsarten benötigt. Die Tragschichten vom **Grundtyp 1** stellen in der Regel ein Mischlaminat in der Reihenfolge x y x y x aus 5 Einzelschichten dar:

Glasmatte 450 g/m² (pulvergebunden)

Glasgewebe 600g/m²

Glasmatte 450g/m² (pulvergebunden)

Glasgewebe 600g/m²

Glasmatte 450 g/m² (pulvergebunden)

Als Tragschichten sind sie beidseitig mit Reinharz versiegelt.

Der Glasanteil im Verbund beträgt $\psi = 40\%$ (Masse)

Die Dichte des Gesamtverbundes entspricht 1,52 g/cm³

Die mittlere Dicke beträgt 4,0 - 4,5 mm

Beim **Grundtyp 2** werden die Glasmatten von 225 g/m² und die Gewebe von 450g/m² als Körperbindung im Wechsel mit insgesamt 7 Lagen für stark profilierte Teile bei gleichem Glasgehalt aber erhöhter Dicke von 4,5 bis 5,0 mm eingesetzt. Die Verstärkungsmaterialien sind mit MM typischen Haftvermittlern ausgerüstet.

Als **Matrixmaterial 1 (MM 1)** werden:

EP – VE – Harz DERA KANE 470 – 300

(bis 98°C Dauertemperatur) für Innenschichten

bzw. **DERAKANE 411/350** (bis 80°C Dauertemperatur),

als **MM 2:**

UP – Orthophthal – Harz PALATAL U541 TV – 08 V

(bis 80°C Dauertemperatur) für Außenschichten genutzt.

Als experimentell gestützte Stoffkernwerte und elastische Kenngrößen bei GFK - Mischlaminaten ($\psi = 40\%$) sowie bei den fertigungsbedingten Zwischenschichten aus dem Reinharz ergeben sich bei Kurzzeit – und Raumtemperaturbeanspruchung:

| Kennwerte | Tragschichten (urspr. Werte) | Rechenwerte | | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | MM1-Verbund | MM2-Verbund | Reinharz-ZW. |
| Stoffkenngr. | | | | |
| ζ [g/ cm ³] | 1,52 | 1,52 | 1,52 | 1,1 |
| γ [-] | 0,247 | 0,247 | 0,247 | -- |
| ψ [-] | 0,40 | 0,40 | 0,40 | -- |
| elast. Kenngr. | | | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | 9.600 | 9.800 | 11.380 | 4.300 |
| E_{yz} [N/mm ²] | 9.600 | 9.800 | 11.380 | 4.300 |
| E_{zz} [N/mm ²] | 4.000 | 3.000 | 3.000 | 4.300 |
| E_{xd} [N/mm ²] | 9.900 | 6.800 | 7.000 | 4.300 |
| E_{yd} [N/mm ²] | 9.900 | 6.800 | 7.000 | 4.300 |
| E_{xb} [N/mm ²] | 9.750 | 8.400 | 7.258 | 4.300 |
| E_{yb} [N/mm ²] | 9.750 | 8.400 | 7.258 | 4300 |
| ν_{xy} | 0,16 | 0,14 | 0,14 | 0,4 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 3600 | 1378 | 1312 | 1320 |
| α_x [T ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ |
| α_y [T ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ |
| α_z [T ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ |

Tab. III.1.1 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

Für Festigkeitskennwerte gilt (gleichfalls nur bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung):

| Festigkeits- Kennwert | Tragschichten Ausgangslaminat (ursp. Richtwerte) | Rechenwerte | | |
|--|--|-------------|-----------------|----------|
| | | MM1-Verbund | MM2- Verbund | Reinharz |
| R_{xz} [N/mm ²] | 164 | 145 | 140 | 70 |
| R_{yz} [N/mm ²] | 164 | 145 | 140 | 70 |
| R_{zz} [N/mm ²] | 60 | 60 | 60 | 70 |
| R_{xd} [- II -] | 170 | 160 | 155 | 70 |
| R_{yd} [- II -] | 170 | 160 | 155 | 70 |
| R_{xb} [- II -] | 220 | 186 | 230 | 110 |
| R_{yb} [- II -] | 220 | 186 | 230 | 110 |
| Schubfestigkeit | | | | |
| R_{xy} [N/mm ²] (Interlaminar) | 60 | 37,8 | 40,4 | 38 |
| R_{yx} [N/mm ²] (Interlaminar) | 60 | 38,9 | 40,4 | 38 |
| ϵ_{xz} [%] | 1,8 | 2,4 | 2,0 | 2,0 |
| γ_{xy} [%] | 7,2 | 7,0 | 5,6 | 6,0 |
| Scherfestigkeit (Intralaminar) | | | | |
| R_z [N/mm ²] | 28 | 26 | 24 | 26 |

Tab III.1.2 Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

Aus den intern hinterlegten, gemessenen bzw. berechneten Werkstoffdaten unter Zeit-, Temperatur-, teilweise auch medialen und Verarbeitungseinflüssen, konnten spezielle Abminderungsfaktoren ermittelt werden, die beim Bauteil multiplikativ in die Dimensionierung eingehen. Für die Tragschichten wird bei den elastischen Kennwerten der Medieneinfluss vernachlässigt, da im Allgemeinen nur die nicht im Festigkeitsverband berücksichtigten Liner bzw. Gelcoatschichten im direkten Kontakt zum Speichermedium/ Erdeinbettung o.a. stehen.

| Bauteilgruppe elast. Kenngrößen ^{x)} | Tragschichten (urspr. Wert) | Rechenwerte | | |
|--|--------------------------------|-------------|------|----------|
| | | MM1 | MM2 | Reinharz |
| Zeiteinfluß 10 ⁴ h | 1,6 | 1,6 | 1,4 | 2,0 |
| Temperatureinfluss | | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,2 | 1,2 | 1,4 |
| 80°C | 1,8 | 1,5 | 1,8 | 2,0 |
| 95°C | 2,0 | 1,8 | 2,0 | 3,0 |
| Festigkeitskenngr.^{xx)} | | | | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,8 | 1,8 | 2,0 | 2,0 |
| Temperatureinfluss | | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,25 | 1,30 | 1,4 |
| 80°C | 2,0 | 1,35 | 1,40 | 2,0 |
| 95°C | 2,5 | 1,5 | 1,60 | 3,0 |
| Medieneinfluss | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Sicherheit | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Tab. III.1.3 Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern

^{x)} für die Verformungs- und Stabilitätsrechnung

^{xx)} für die Berechnungen gegen Festigkeitsversagen

Alle Kennwerte sind an die Einhaltung der folgenden Norm und zeichnungsgebundenen Vorgaben gebunden:

zum Matrix- und Verstärkungsmaterial

die Laminatpläne mit allen Einzelschichten nach Reihenfolgen und Überlappungen

die ordnungsgemäße Verarbeitung zur Erreichung des Glasmasseanteils von >40%

bei geringen Luftanteilen $\leq 3\%$ und dem Vermeiden von Harzaufschäumungen

die Einhaltung der Mindestradien und Entformungsschrägen

Die Verarbeitung darf nur durch qualifiziertes Fachpersonal erfolgen.

Mit dem am Beginn definierten Laminataufbau für **Grundtyp I** und MM 1 werden im Wesentlichen die Wand-, Boden- und Deckelmodule (Innenabdeckungen) gefertigt, gleichfalls alle Einbauten sowie der Einstiegsschacht.

Mit gleichem Laminataufbau und MM 2 werden die äußeren Schalen der Eckmodule sowie die der Boden- und Seitenmodule realisiert.

Das Traglaminat wird in den Zeichnungen zur Erreichung des Glasanteiles bei den ebenen Platten als auch bei den profilierten Teilen mit 5mm angegeben, aber nur mit 4mm Schichtstärke bei der Dimensionierung/Statik gerechnet. (Wenn die 5 Lagen (3xMatte, 2xGewebe) als Einzelschichten behandelt werden, ergeben sich nur rein rechnerisch wegen der Reinharzzwischenschichten insgesamt ein höherer Wert).

Es gilt beim vorliegenden Laminataufbau für 450g/m² Matte 0,75 mm/Lage und für 600g/m² Glasgewebe 1,05 mm/Lage (Grundtyp III).

In der Regel wechseln sich Matte- und Rovinggewebelagen ab. In Sonderfällen kommen Kombinationen als Glaskomplexe mit 1,8 mm/Lage zur Anwendung, z.B. für die 3 mm Lamine der 3 - 20 m³ ARGE-Ausführung (Grundtyp IV).

Bei den Eckmodulen werden für die Profile mit engen Radien Matte zu je 225g/m², Glas-Feingewebe mit Atlas- oder Körperbindung zum Laminataufbau eingesetzt.

Nach entsprechenden Vorversuchen wurde bei den Eckmodulen der Lagenaufbau von Innen nach Außen in folgender Abfolge festgelegt und realisiert:

0. Gelcoat-/Reinharz-Versiegelungsschicht in vorbereiteter Form
1. 2x Matte 225g/m² danach Zwischenhärten
2. 1x Matte (s.o.)
1x Gewebe (Körperbindung, 450g/m²)
1xMatte (s.o.) danach Zwischenhärten
3. 1x Gewebe (s.o.)
1x Matte (s.o)

Mit den insgesamt 6 leichten Mattelagen (MA 111-225-20-S) und drei Gewebelagen (Glasseide Oschatz 450 K) wurden der geforderte 40% Glasanteil bei einer Dicke zwischen 4,5 - 5mm erreicht und gleichzeitig eine gute Oberfläche erzielt. Für nachfolgende Klebprozesse kann bei den entsprechenden Stellen Abreißgewebe eingelegt werden.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung werden zur Steigerung der Wärmebeständigkeit bei ggf. Änderung des Speichermediums in die engere Wahl genommen:

MM 3: Atlac 382 (DSM Composite Resins) Bisphenol A UP (vgl. auch Blatt IV) mit HDT = 120°C

MM 4: VE 2003 HLU (BÜFA-Resin) mit HDT = 120°C

MM 5: EP CeTePox AM 3352 A/B MV 100:25 (Labor SINOI: DSC) mit HDT = 110°C

Alle drei MM besitzen bei einer sehr guten chemischen Widerstandsfähigkeit eine Wärmeformbeständigkeit (HDT) von über 110°C bei einer Glasübergangstemperatur von 137°C aufwärts. Bei den VM sind keine Sonderentwicklungen notwendig.

Während in der 1. Phase der Themenbearbeitung das RTM- und das HA-Verfahren dominierten, wird in der abschließenden Phase das Infusionsverfahren mit betrachtet. Bei letzterem sind Vereinfachungen beim Formenbau und eine beachtliche Steigerung des Glasgehaltes möglich. Allerdings sind die Fertigungstoleranzen sehr eng. Bei den von SINOI bereit gestellten Platten des EP-Standard-Systems von 4mm Stärke aus MM 5 und 5 Lagen biachsialen 1200 g/m² Gewebe wurde ein Glasmasseanteil von 73 % bzw. 58 % Glasvolumenanteil gemessen. Das bedeutet mehr als eine Verdoppelung des wirksamen Verstärkungsmaterialanteiles (2,35x) ohne eine entsprechende Steigerung der Verstärkungswirkung.

Übertragen auf die Festigkeits- und Steifigkeitswerte ergaben sich bei VKA-Prüfungen in x- und y-Richtung bei

der Biegefestigkeit $186 : 266 = 1 : 1,43$

dem Biegemodul $8400 : 8620 = 1 : 1,03$,

d.h. das Laminat ist zwar hochfest, aber nicht hochsteif, eher biegeweich bei hohen Verformungen. Die bei VKA gemessenen Werte sind damit noch 30% unter den bei SINOI/IMA gemessenen Werten und damit unsicher zur gängigen Verstärkungstheorie.

Für Lamine vom **Grundtyp III** wurden in der letzten Bearbeitungsphase noch an der TUI Zugprüfungen an den für die Seitenwandlamine V II und V III von Innen medial beaufschlagten Flächen durchgeführt.

Als Mittelwerte ergaben sich:

E-Modul Zug

$8744 \text{ MPa} : 7252 \text{ MPa} = x- : y\text{-Richtung}$

Zugfestigkeit

$157 \text{ MPa} : 118 \text{ MPa} = x- : y\text{-Richtung}$

Bruchdehnung

$3,093 \% : 2,944 \% = x- : y\text{-Richtung}$

Blatt II: Kernschichten – PUR – Hartschaum

Die Kernschichten sollten bevorzugt aus Blockschaum aber auch aus freigeschäumten bzw. zwischen den Deckschichten geschäumten PUR – Komponenten (Eckmodule) geschaffen werden.

Im Verlauf der Entwicklung hat sich jedoch die ausschließliche Realisierung im Freiformverfahren zwischen den Deckschichten bzw. einer Deckschicht und einer Hilfsvorrichtung durchgesetzt.

Durch Einhaltung der vorgegebenen Mischungsverhältnisse und Umgebungstemperaturen wurden dimensionsstabile Kernschichten geschaffen, wobei die entstandenen Verarbeitungsdrücke problemlos mit Tischlerplatten, Beilagen und Schraubzwingen abgefangen wurden.

Als Musterrezepturen werden folgende Schäume genutzt:

Typ 1: **Bauder FOAM B2 40** (max. 3% Wasseraufnahme,
Dauerwärmeinsatztemperatur -80 bis + 140°C)

Typ 2: **Lamoltan NG 57** oder **ISOKO** (für nicht beheizbare Formen geeignet) (max. 3% Wasseraufnahme, Dauerwärmeinsatztemperatur -30 bis + 120°C) , auch als UNIZELL-Schaum HR-AT von der VOSSCHEMIE eingesetzt.

Typ 3: **Bauder FOAM E33** Dauerwärmeinsatztemperaturen -80°C bis 130°C, (du rch die Senkung der Schaumdichte auf 33 kg/m³ reduzieren sich die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte vom Typ 1 auf bis zu 50 %)

Bei dem gewählten Konstruktionsprinzip steht im Vordergrund die Hohlraumverschäumung (maschinelle Verarbeitung, Handverschäumung).

| Kennwerte | PUR-Kernschicht | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | (urspr. Wert) | Rechenwert | Rechenwert | Rechenwert |
| Stoffkenng. | | | | |
| $\bar{\Sigma}$ [g/ cm ³] | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,033 |
| Geschlossen- | | >90% | 90-95% | >95% |
| zelligkeit [%] | | | | |
| elast. Kenng. | | | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | (Querzug) 6,0 | 12 | 17,5 | 5,0 |
| E_{yz} [N/mm ²] | (- II -) 6,0 | 12 | 17,5 | 5,0 |
| E_{zz} [N/mm ²] | 6,0 | 12 | 17,5 | 5,0 |
| E_{xd} [N/mm ²] | 7,5 | 7,5 | 10,0 | 7,0 |
| E_{yd} [N/mm ²] | 7,5 | 7,5 | 10,0 | 7,0 |
| E_{xb} [N/mm ²] | 5,4 | 5,4 | 9,0 | 6,0 |
| E_{yb} [N/mm ²] | 5,4 | 5,4 | 9,0 | 6,0 |
| ν_{xy} | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 3,0 | 3,5 | 4,3 | 2,3 |
| α_x [T ⁻¹] | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} |
| α_y [T ⁻¹] | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} |
| α_z [T ⁻¹] | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} |

Tab III.2.1 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

Bei der Ermittlung der Kennwerte und Kennfunktionen wurde auf Herstellerangaben zurückgegriffen, gleichfalls auf das eigene Archiv unter Einbeziehung von diversen Dissertationen sowie Diplom- und Masterarbeiten.

Für die Boden-, Deck- und Wandmodule wurde ausschließlich UNIZELL-SCHAUM HR-AT eingesetzt.

| Festigkeits- Kennwert | PUR-Kern | Rechenwert | | |
|-------------------------------|--------------------------------|------------|-------|--------|
| | (Schaum) (ursp. Richtwerte) | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
| R_{xz} [N/mm ²] | (Querzug) 0,40 | 0,30 | 0,45 | 0,35 |
| R_{yz} [N/mm ²] | 0,40 | 0,30 | 0,45 | 0,35 |
| R_{zz} [N/mm ²] | 0,40 | 0,30 | 0,45 | 0,35 |
| R_{xd} [- II -] | 0,35 | 0,30 | 0,35 | 0,27 |
| R_{yd} [- II -] | 0,35 | 0,30 | 0,35 | 0,27 |
| R_{xb} [- II -] | 0,50 | 0,45 | 0,60 | 0,32 |
| R_{yb} [- II -] | 0,50 | 0,45 | 0,60 | 0,32 |
| Schubfestigkeit | | | | |
| R_{xy} [N/mm ²] | 0,25 | 0,20 | 0,30 | 0,12 |
| R_{yx} [N/mm ²] | 0,25 | 0,20 | 0,30 | 0,12 |
| Wärmeleitf. [W/mK] | | <0,024 | 0,025 | <0,022 |
| Scherfestigkeit | | | | |
| R_z [N/mm ²] | 0,17 | 0,17 | 0,25 | 0,12 |

Tab III.2.2 Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

Zum Einfluss von Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit (Diffusionsanteile aus Speichermedium bzw. dem den Speicher umgebenden Medium (Kelleratmosphäre, Erdreich) können nur Abschätzungen vorgenommen werden. Hier erfolgt eine Absicherung über die Dissertation an der TUD von Manfred Just: "Beitrag zum Langzeitverhalten von Stützelementen mit einem Stützkern aus freongetriebenem Polyurethan- Hartschaumstoff" nach Messungen bis 104 h unter komplexen Klimaeinflüssen.

| Bauteilgruppe elast. Kenngrößen x) | PUR -Kernschicht (urspr. Richtwerte) | Rechenwerte | |
|---------------------------------------|---|-------------|---------|
| | | Typ 1 | Typ 2/3 |
| Zeiteinfluss 104h | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| Temperatureinfluss | | | |
| 50°C | 1,2 | 1,25 | 1,25 |
| 80°C | 1,4 | 1,45 | 1,45 |
| 95°C | 1,6 | 2,0 | 2,0 |
| | | | |
| Festigkeitskenngr. | | | |
| Zeiteinfluss 10⁴h | 1,6 | 2,0 | 2,0 |
| Temperatureinfluss | | | |
| 50°C | 1,2 | 1,25 | 1,25 |
| 80°C | 1,4 | 1,45 | 1,45 |
| 95°C | 1,6 | 2,0 | 2,0 |
| Medieneinfluss | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Verarbeitungseinfluss | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Sicherheit | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Tab. III.2. 3 Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern

Die Kennwerte bei Hartschaum sind stark vom Verarbeitungsverfahren und der Geometrie des Endproduktes abhängig ($\pm 10\%$). Sie gelten auch erst 4 Wochen nach Durchführung des Schäumprozesses, d.h. nach dem "Reifen".

Für die Ausfüllung der Eckmodule galt es eine Sondertechnologie zu entwickeln, da eine räumlich eng begrenzte Ausfüllung von gleichzeitig drei Schenkeln des Eckmoduls realisiert werden musste.

Von der VOSSCHEMIE wurden die Komponenten A und B des PU-Systems UNIZELL-Schaums HR-AT für das Ausschäumen im Eigenansatz bereitgestellt.

Dies waren Behälter für:

- Komponente A HR-AT 3,5 kg
- Komponente B Typ II 5 kg (schwarze Farbe = Isozyanat = Gift!)

In dem gleichen Mischungsverhältnis von 0,7 : 1 wurden kleine Mengen, z.B. 525g A mit 750g B mit einander zur Reaktion gebracht, in dem zunächst der Teil der Komponente A aufgeschäumt (mit Rührwerk) wurde, danach galt es die Komponente B hinzu zumischen und innerhalb von 25 s in das Bauteil einzubringen.

Um jeweils einen Schenkel in senkrechter Füllhaltung zu haben und jegliches Weglaufen der noch flüssigen Mischung in einen anderen Schenkel zu vermeiden, war es notwendig, einzelne Kammern mittel bereits ausgehärtetem Schaum abzugrenzen.

Das Ausschäumen der 3 Schenkel eines Eckmoduls in jeweils 3 Chargen benötigte 1h. Für die Verarbeitung der Komponenten A und B zu freigeformtem PUR-Schaum gelten spezielle Sicherheitsvorschriften. Als Mischungsverhältnisse für den **TYP 2** werden 100 : 145 Gewichtsteile bzw. 100 : 127 Volumenteile angesetzt. Die ermittelte Startzeit bei Raumtemperatur beträgt 37 Sekunden, die Abbindezeit 110 Sekunden und die Steigzeit 210 s.

Einen weiteren Einsatzfall für PUR-Hartschaum beim Wärmespeicher stellen die **Verbindungsglieder** (Dübel) zwischen den Eckmodulen dar. Für den Labor-Wärmespeicher werden 12 Verbindungsglieder in zwei verschiedenen Ausführungen benötigt. Diese sog. "Dübel" werden aus einem vorgefertigten Schaumblock herausgefräst.

Da bei diesem Schäumansatz eine Dichte von $> 40 \text{ kg/m}^3$ gemessen wurde, kann bei den beiden letztgenannten Fällen mit den in den Tabellen benannten Kennwerten vom **Typ 2** gearbeitet werden.

Die bei der Montage erforderliche Nachbearbeitung von PUR-Hartschaum war völlig gefahr- und problemlos.

Für die Weiterentwicklung des ARGE-VIPs- Systems ist es notwendig, verstärkt mit PUR-Plattenmaterial zu arbeiten, da das Einschäumen bei engen Wandabständen von 40 bis 60 mm auf erhebliche Fließwiderstände stößt.

III/1

Blatt III: Klebstoffe (zur Schubübertragung) und Spachtel (zum Fugenausgleich)

Da es sich beim ARGE - Wärmespeicher meist um eine ohne Formschluss, d.h. ausschließlich als kraftschlüssig gefügte Klebekonstruktion handelt, waren vom Kleber selbst zu fordern:

höchste Schlag-, Scher-, Druck- und Stirnabzugfestigkeit

Spaltüberbrücken bis 10mm über einen längeren Zeitraum und bei Temperaturfeldern bis 95°C

Ausgewählt wurden zunächst zwei 2- Komponentenkleber als Strukturklebstoff auf der Basis von

a) Methacrylat:

Typ 1: Crestabond M1-20 (belastbar bis 100°C)

b) 2K-Polyurethan

Typ 2: OTTO COLL P 520

(Da vom Typ OTTO COLL P 520 zugesagte Prüfergebnisse nicht geliefert wurden, werden die an PU/GFK mit Macroplast UK 1366 gemessenen und gleichwertigen Werte genutzt)

| Kennwerte | Zwischen- und Klebstoffschichten | Typ 1 Rechenwerte | Typ 2 |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Stoffkenngr. | (urspr. Werte) | | |
| ζ [g/ cm ³] | 1,2 | 1,02 | 1,5 |
| γ [-] | | | |
| ψ [-] | | | |
| elast. Kenngr. | | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | (850) 1050 | 600-850 | 1300 |
| E_{yz} [N/mm ²] | (850) 1050 | 600-850 | 1300 |
| E_{zz} [N/mm ²] | 600 | 600-850 | 1300 |
| E_{xd} [N/mm ²] | 2000 | 1600 | 1500 |
| E_{yd} [N/mm ²] | 2000 | 1600 | 1500 |
| E_{xb} [N/mm ²] | 4000 | 2700 | 2000 |
| E_{yb} [N/mm ²] | 4000 | 2700 | 2000 |
| ν_{xy} | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 450 | 400 | 400 |
| α_x [T ⁻¹] | 80×10^{-6} | 80×10^{-6} | 80×10^{-6} |
| α_y [T ⁻¹] | 80×10^{-6} | 80×10^{-6} | 80×10^{-6} |
| α_z [T ⁻¹] | 80×10^{-6} | 80×10^{-6} | 80×10^{-6} |

Tab. III.3 1 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

Mit dem Klebstoff Macroplast UK 1366 wurden bei Bruchversuchen sowohl mit Klebstoffdicken von 1mm als auch mit 3mm und einer Verklebung mit Mischlaminaten vom Typ1 des Traglaminates überwiegend kompletter Bruch im GFK - Streifen (gekröpfte Überlappung) erreicht.

(Für diesen Klebstoff existieren auch Modifizierungen mit einer Temperaturbeständigkeit bis 100°C)

Trotz dieser günstigen Möglichkeiten wurde die Konstruktion infolge der schlechten Kooperationsneigung der Herstellerfirma in der Folge auf Produkte der Firma BÜFA umgestellt.

| Festigkeits- Kennwert | Zwischen- sowie Klebstoff- schichten (urspr. Werte) | Rechenwert | |
|--|--|------------------|-------|
| | | Typ 1 | Typ 2 |
| R_{xz} [N/mm ²] | (Stirnabzug- 40 | 19 | 12 |
| R_{yz} [N/mm ²] | festigkeit) 40 | 19 | 12 |
| R_{zz} [N/mm ²] | 40 | 19 | 12 |
| R_{xd} [- II -] | 80 | 40 | 58 |
| R_{yd} [- II -] | 80 | 40 | 58 |
| R_{xb} [- II -] | 100 | 60 | 90 |
| R_{yb} [- II -] | 100 | 60 | 90 |
| Schubfestigkeit | | Klebschichtdicke | |
| | 1mm | 3mm | 1,0mm |
| R_{xy} [N/mm ²] $l_{ü}=80\text{mm}$ | 18 | 5,5 | 7,6 |
| R_{yx} [N/mm ²] $l_{ü}=115\text{mm}$ | 7 | 5,3 | 6,4 |
| ϵ_{xz} [%] | 6 | 70 | 4 |
| γ_{xy} [%] | 6 | 70 | 4 |
| Scherfestigkeit | | | |
| R_z [N/mm ²] | 12 | 10 | 18 |

Tab.III.3 2 Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

| Bauteilgruppe elast. Kenngrößen ^{x)} | Zwischen- und Klebstoffschichten (urspr. Werte) | Rechenwerte | |
|--|---|-------------|------|
| | | Typ1 | Typ2 |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| Temperatureinfluss | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,1 | 1,2 |
| 80°C | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
| 95°C | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| | | | |
| Festigkeitskenngr. ^{xx)} | | | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,8 | 1,6 | 1,6 |
| Temperatureinfluss | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,1 | 1,2 |
| 80°C | 2,0 | 2,0 | 2,2 |
| 95°C | 2,5 | 2,5 | 3,0 |
| Medieneinfluss | 1,0 | 1,2 | 1,2 |
| Verarbeitungseinfluss | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Sicherheit | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Tab. III.3.3 Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern
x) für die Verformungs- und Stabilitätsrechnung
xx) für die Berechnungen gegen Festigkeitsversagen

III/4

Beim Einsatz aller Klebstoffe zur Verbindung mit GFK / Formteilen, GFK / Gelcoatoberflächen ist ein Entfetten mit Lösungsmittel (Aceton) und vollständiges Entfernen von Trennmittelresten erforderlich. Die Haftflächen müssen sauber, fettfrei, trocken und tragfähig sein.

Die Kennwertangaben gelten meist nur bis zu Klebstoffschichtdicken von ≤ 3 mm, auch wenn vom Hersteller als Lückenfüllmaß 1-25 mm angegeben werden. (Im vorliegenden Fall wurden ohne Schaden beide Lastfälle erfüllt)

Bei der Verarbeitung und Aushärtung darf keinerlei Feuchtigkeit auftreten. Nach der Aushärtung wird eine Temperaturbeständigkeit von 100°C erreicht.

Zur Verarbeitung der Zweikomponenten-Kleber gelten als Technische Daten:

| | |
|---|-------------------|
| Verarbeitungszeit (100g, 23°C/50 % rel. Luftfeuchtigkeit) [min] | ~ 45 |
| Verarbeitungstemperatur von/bis [°C] | +5 / +35 |
| Viskosität bei 23°C | pastös, standfest |
| Dichte Komp. A bei 23°C nach ISO 1183-1[g/cm ³] | ~ 1,4 |
| Dichte Komp. B bei 23°C nach ISO 1183-1[g/cm ³] | ~ 1,57 |
| Temperaturbeständigkeit von/bis [°C] | - 30 / + 80 (1) |
| Erreichen der Funktionsfestigkeit bei Eckwinkel-Klebungen bei 23°C/50rLf nach [h] | ~ 6 |
| Erreichen der Endfestigkeit bei 23°C/50% rLf nach [d] | ≥ 3 |
| (1) kurzfristig +100°C | |

Nach umfangreichen Recherchen und Messungen wurden im weiteren Verlauf der Arbeiten die Entscheidungen für die Abschlussrechnung und den Bauteilversuch zu Gunsten des Klebharzes/der Paste

BÜFA 740 – 0119 = Klebharz 0119 = BÜFA-Bonding-Paste

gefällt und in der Praxis erfolgreich umgesetzt.

BÜFA®-Bonding Paste 0119 ist ein vorbeschleunigtes Klebharz auf **Vinylester- Basis** VE Klebharz eignet sich hervorragend für die strukturelle Verklebung von GFK Bauteilen, wo für das entstehende Bauteil eine hohe Wärmeformbeständigkeit (HDT) von Bedeutung ist. Neben der exzellenten Chemikalien- und der Hydrolysebeständigkeit, überzeugt das Kleberharz hinsichtlich seiner hervorragenden Verarbeitungseigenschaften.

Produkt Eigenschaften:

Härtet mit Standard MEKP aus
besitzt gute Thixotropie – hohe Standfestigkeit an senkrechten Flächen
Gute Durchhärtung
keine Rissbildung bis zu Klebstoff-Schichtstärken von 30mm
Gute statische Festigkeit
Gute dynamische Festigkeit
Hohe HDT (bis 105°C)
Gute Beständigkeit gegen Hydrolyse und Chemikalien

Bei der **Verarbeitung (Raumtemperatur 20 - 30°C)** ist die Gelierzeit bis 30min (auch 40min) einstellbar.

Die Viskosität beträgt 1.300.000 - 1.800.000 mPas.

Bei frisch gefertigten GFK-Teilen kann innerhalb von 24 h ohne weitere Vorbehandlung mit dem Klebprozess begonnen werden.

Bei Teilen, die nicht innerhalb von 24h weiter gefügt werden, sollte an den zu verklebenden Stellen mit Abreißgewebe (Peel Ply) gearbeitet werden. Das Gewebe wird direkt vor der Verklebung entfernt. Das Laminat ist bis auf das Glas abzuschleifen und mit Aceton zu reinigen.

Generell ist zu gewährleisten, dass alle Fügebauteile öl-, fett-, staub- und rückstandsfrei sind.

In den nachfolgenden Tabellen werden nur Kennwerte aufgeführt, die an "Reinharz"-Prüfkörpern bzw. GFK-Verklebungen ermittelt werden.

| Kennwerte | 740 - 0119 | |
|--------------------------------|---------------------|--|
| Stoffkenngr. | | |
| ζ [g/cm ³] | 1,4 | |
| γ [-] | 4,0% | |
| ψ [-] | 5,6% | |
| elast. Kenngr. | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | 4.400 | Alle elastischen Kennwerte setzen eine Nachtemperierung voraus: 24h bei 80°C oder 5h bei 100°C |
| E_{yz} [N/mm ²] | 4.400 | |
| E_{zz} [N/mm ²] | 4.400 | |
| E_{xd} [N/mm ²] | ∅ | |
| E_{yd} [N/mm ²] | ∅ | |
| E_{xb} [N/mm ²] | ∅ | |
| E_{yb} [N/mm ²] | ∅ | |
| ν_{xy} | 0,4 | |
| G_{xy} [N/mm ²] | 400 | |
| α_x [T ⁻¹] | 60x10 ⁻⁶ | |
| α_y [T ⁻¹] | 60x10 ⁻⁶ | |
| α_z [T ⁻¹] | 60x10 ⁻⁶ | |

Tab.III.3.4 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Klebstoffe/Spachtel)

Es werden keine Angaben zu Metall-Metall-Verklebungen gebracht.

Der Klebstoff enthält Glasfaseranteile von 6% und besitzt damit besonders gute Steifigkeitseigenschaften.

Die Verarbeitung auch unter schwierigen Witterungsverhältnissen erwies sich als problemlos.

Es konnten beachtliche Spaltbreiten überbrückt werden.

Nach den realisierten Kurz- und Langzeit Belastungsversuchen ab Sept./Okt. 2014 zeigten sich alle Annahmen als berechtigt.

Problematisch erweist sich bei den beachtlichen Bauteilgrößen sicher noch die Nachtemperung. Hier wird in Absprache mit dem Hersteller auf die Langzeitwirkung infolge Prozesstemperung gesetzt.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus dem Verzicht der Speicheraufstellung in einer Versuchshalle, da die Möglichkeit der Speicheraufstellung in einem Laborraum zum Versuchszeitraum nicht gegeben war.

Die Freiluftaufstellung des Speichers und Montage der Seitenwandmodule II und III in der Winterperiode erforderte zusätzliche Wärmequellen zur Gewährleistung der Verarbeitungstemperatur von 20 - 30°C.

| Festigkeits-Kennwert | 740 - 0119 | |
|---|------------|---|
| R_{xz} [N/mm ²] | 40 | Reinharzprüfkörper nach Nachhärtung (s. Tab. 3.4) |
| R_{yz} [N/mm ²] | 40 | |
| R_{zz} [N/mm ²] | ∅ | |
| R_{xd} [- II -] | ∅ | |
| R_{yd} [- II -] | ∅ | |
| R_{xb} [- II -] | ∅ | |
| R_{yb} [- II -] | ∅ | |
| Schubfestigkeit/ Zugscherfestigkeit | | Gebunden an Klebschichtstärke von 1mm ^{x)} und einer Nachhärtung (s. Tab. 3.4) |
| R_{xy} [N/mm ²] $l_{ü}=12,5\text{mm}$ | 11 | |
| R_{yx} [N/mm ²] $l_{ü}=25\text{mm}$ | 9,7 | |
| ϵ_{xz} [%] | 1,9 | |
| γ_{xy} [%] | 3,2 | |
| Scherfestigkeit | ∅ | |
| R_z [N/mm ²] | ∅ | |

Tab. III.3.5 Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Klebungen von GFK/Spachtel)

^{x)} bei Klebschichten von > 1mm (bis 4mm) nur 75% erreicht

| Bauteilgruppe | 740 - 0119 |
|--|---------------------|
| elast. Kenngrößen ^{x)} | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,6 |
| Temperatureinfluss | |
| 50°C | 1,2 |
| 80°C | 2,2 |
| 95°C | 3,0 |
| | |
| Festigkeitskenngr. ^{xx)} | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,6 |
| Temperatureinfluss | |
| 50°C | 1,2 |
| 80°C | 2,2 |
| 95°C | 3,0 |
| Medieneinfluss | 1,2 |
| Verarbeitungseinfluss | 1,4 ^{xxx)} |
| Sicherheit | 1,5 |

Tab. III.3.6 Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern (Klebungen/Spachtel)

- ^{x)} für die Verformungs- und Stabilitätsrechnung
^{xx)} für die Berechnungen gegen Festigkeitsversagen
^{xxx)} wegen Unsicherheiten im Verarbeitungs- und Nachtemperierungsprozess (Prozesstempern)

Blatt IV: UD –Träger (GFK) und Wickellamine

Ob durch das Wickeln oder die Pultrusion hergestellt, immer werden mit UD betont einachsige (unidirektionale)Verstärkungen realisiert, die in Faserrichtung hohe und senkrecht dazu sehr niedrige mechanische Kennwerte aufweisen. Besonders durch unterschiedliche Wickelwinkel oder durch Zwischenlagen aus Gewebe und Matte werden auch Querfestigkeiten erreicht, die über denen des Reinharzens liegen.

Für die Erweiterung der Modulbauweise waren im Vorgängerprojekt U- und I- Profile einbezogen worden. Deren Kennwerte aus dem Programm "GFK - Standardprofile" werden als Tragprofile in der 1. Spalte dokumentiert.

Für die Herstellung von kompakten Großwärmespeichern waren waggonähnliche - Wickelkörperformen entwickelt worden. Die damit erzielten Kennwerte der Wickellamine werden hier mit angegeben. Dabei wird zwischen der inneren (Typ 1) und äußeren Deckschicht (Typ 2) unterschieden. Neben dem Laminataufbau unterscheiden sich die beiden Typen auch in der Nachbehandlung. Typ 1 wird mit Heißluft bei 80°C über 8h nachgehärtet (getempert), bei Typ 2 wirkt nur die natürliche Nachhärtung durch Alterung. Bei Typ 3 werden aus dem Sortiment von Rotaver die Kennwerte der getemperten Lamine mit einer Dicke < 10 mm angegeben.

Als Matrixmaterialien kommen zum Einsatz:

DERAKANE 411 /350(meist innere Deckschichten, Dauertemperaturbeständigkeit 80°C)

oder **DERAKANE 470 /300** (Dauertemperaturbeständigkeit 95°C), Palatal 541 D V 08

(äußere Deckschichten, Dauertemperaturbeständigkeit 80°C),

Atlac 382 (HDT> 115°C)

(Infolge der hohen Glasgehalte wirkt sich ein Wechsel bei den Matrixmaterialien im Raumtemperaturbereich kaum auf die mechanischen Eigenschaften aus.)

Mithin bedeuten:

Typ 1: Deckschicht Innen, ohne CSS, Dicke 8 - 10mm, i.sp.6xUmfangwickl., 4xKreuzwickl.,
 Nachtemperung

Typ 2: Deckschicht Außen, Dicke < 10mm, im speziellen 5 - 6mm, 4xUmf., 2xKreuz., keine
 Nachtemp.

Typ 3: Deckschichten nach Rotaver 1(als quasiparallele Wicklung mit Gelegeeinlagen),
 10mm, Nachtemperung

| Kennwerte | Tragprofile ^{xx)} | Rechenwerte: | | |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| | | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
| Stoffkenngr. | | (getempert) | (ungetempert) | (getempert) |
| ζ [g/ cm ³] | 1,77 | 1,81 | 1,79 | 1,77 |
| γ [-] | 0,48 | 0,51 | 0,49 | 0,48 |
| ψ [-] | 0,65 | 0,68 | 0,66 | 0,64 |
| elast. Kenng. | | | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | 23000 | 18000 | 17000 | 21500 |
| E_{yz} [N/mm ²] | 7000 | 11000 | 10500 | 10500 |
| E_{zz} [N/mm ²] | 4000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| E_{xd} [N/mm ²] | 27000 | 18000 | 17500 | 21500 |
| E_{yd} [N/mm ²] | 12000 | 11000 | 10500 | 10500 |
| E_{xb} [N/mm ²] | 23000 | 16500 | 14200 | 15500 |
| E_{yb} [N/mm ²] | 5000 | 8650 | 7400 | 9000 |
| ν_{xy} | 0,3 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 2800 | 3000 | 5200 | |
| α_x [T ⁻¹] | 7×10^{-6} | 7×10^{-6} | 7×10^{-6} | |
| α_y [T ⁻¹] | 18×10^{-6} | 18×10^{-6} | 18×10^{-6} | |
| α_z [T ⁻¹] | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} | |

Tab. III.4.1 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

^{xx)} $x \hat{=} \parallel, y \hat{=} \perp$

^{x)} $x \hat{=} \text{Umfangsrichtung}, y \hat{=} \text{Axial} = \text{Zylinderlängsrichtung}$

| Festigkeits- Kennwert | Tragprofile ^{xx)} | Rechenwerte Wickellaminat ^{x)} | | |
|---|----------------------------|---|-------|---------|
| | | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
| R _{xz} [N/mm ²] | 240 | 300 | 300 | 300 |
| R _{yz} [N/mm ²] | 50 | 120 | 100 | 125 |
| R _{zz} [N/mm ²] | 50 | 60 | 60 | 60 |
| R _{xd} [- II -] | 150 | 200 | 200 | (150) |
| R _{yd} [- II -] | 70 | 100 | 100 | (150) |
| R _{xb} [- II -] | 240 | 324 | 324 | 250 |
| R _{yb} [- II -] | 120 | 120 | 100 | 120 |
| Schubfestigkeit | | | | |
| R _{xy} [N/mm ²] (Interlaminar) | 40 | 40 | 40 | (50) |
| R _{yx} [N/mm ²] (Interlaminar) | 40 | 40 | 40 | (50) |
| ε _{xz} [%] | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 3,1/3,5 |
| γ _{xy} [%] | 5 | 5 | 5 | |
| Scherfestigkeit (Intralaminar) | | | | |
| R _z [N/mm ²] | 25 | 20 | 25 | (50) |

Tab. III.4.2 Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

^{x)} x $\hat{=}$ Umfangsrichtung, y $\hat{=}$ Axial = Zylinderlängsrichtung / ^{xx)} x $\hat{=}$ ||, y $\hat{=}$ \perp

| Bauteilgruppe | Tragprofile | Wickelschichten | | |
|---|-------------|-----------------|-------|-------|
| | | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 |
| elast. Kenngrößen^{x)} | | | | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,6 |
| Temperatureinfluss | | | | |
| 50°C | 1,3 | 1,3 | 1,3 | |
| 80°C | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,4 |
| 95°C | 1,8 | 1,8 | 1,8 | |
| Festigkeitskenngr.^{xx)} | | | | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,0 |
| Temperatureinfluss | | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,3 | 1,4 | |
| 80°C | 2,0 | 1,5 | 1,8 | 1,4 |
| 95°C | 2,5 | 1,8 | 2,0 | |
| Medieneinfluss | | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Sicherheit | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Tab. III.4.3 Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern

^{x)} für die Verformungs- und Stabilitätsrechnung / ^{xx)} für die Berechnungen gegen Festigkeitsversagen

Bei den Profilizieh- und Wickelstrukturen werden aus UD- Gewebe- und Roving-schichten (=Rapports) der Tragverband geschaffen.

Dazu einige Normbeispiele:

| UD / Roving Laminat tangential, getemperte Lamine | | | | | | |
|---|-----------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|
| Laminataufbau: | | M+F+z(U+F) +M | | | | |
| Vorlaminat (M+F) | | 1050 | | | | [g/m ²] |
| Roving +/-90° (2F) | | 1200 | | | | [g/m ²] |
| unidirektionales Gewebe (U) | | 380 | | | | [g/m ²] |
| Abschlusslaminat(M) | | 450 | | | | [g/m ²] |
| Vlies | | 30 | | | | [g/m ²] |
| Glasmasseanteil (Mittelwert) | | 65,0 | | | | [Gew.-%] |
| Glasvolumenanteil (Mittelwert) | | 48,1 | | | | [Vol.-%] |
| Rapport z: | | 1580 | | | | [g/m ²] |
| Anzahl Rapporte z | Masse Glas g/m ² | Dicke t mm | Schnittlast n N/mm | Biege- Moment Nm/m | E-Modul (Zug) N/mm ² | E-Modul (Biegung) N/mm ² |
| 2 | 4660 | 3,9 | 1550 | 1200 | 21000 | 19000 |
| 3 | 6240 | 5,2 | 2080 | 2160 | 21000 | 19000 |
| 4 | 7820 | 6,5 | 2610 | 3390 | 21000 | 19000 |
| 5 | 9400 | 7,8 | 3130 | 4890 | 21000 | 19000 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| 32 | 52060 | 43,3 | 17350 | 150090 | 23000 | 21000 |
| 33 | 53640 | 44,6 | 17870 | 159340 | 23000 | 21000 |
| 34 | 55220 | 45,9 | 18400 | 168860 | 23000 | 21000 |

(vgl. auch DIN 18820)

Als Wickellaminataufbau für Behälter mit Innen- und Außendruckbelastung hat sich z. B. bewährt:

| | |
|---|---------------------|
| Standardinnenliner | 3 mm |
| 3 x Kreuzwicklung | 3 x 1,2 mm = 3,6 mm |
| 5 x Umfangwicklung mit Zwischenlagen von UD-Gelegen | |
| | 5 x 1,2 mm = 6 mm |
| 5 x Kreuzwicklung | 5 x 1,2 mm = 6 mm |
| Kreuzwicklungm pur | 0,4 mm / Lage |

Anwendung fand dies u.a. bei einem Transportbehälter mit 12 m³ Füllvolumen und $p_i = \pm 0,75$ bar.

Bei stationären Druckspeichern wurde die Umfangwicklung auch ohne Zwischenlagen von UD-Gelegen ausgeführt. Es ergab sich dann eine Dicke von 0,4 mm/Lage.

Für ein Sortiment von Druckwärmespeichern bis 6 bar und Innendurchmessern von 1,5 bzw. 1,8 m Durchmesser mit Füllvolumina von 4 bis 6 m³ stehen bei VKA Schönbrunn entsprechende Dimensionierungsvorschriften und Wickelprogramme zur Verfügung.

Für UD-Laminat als Rotorblätter der Fa. SINOI mit EP-Harz des Systems CeTePox AM 3321 AxxP 183B mit 72% Glasmasseanteil werden als Rechenwerte für E-Zug in x-Richt. 39000 MPa und für die Zugfestigkeit in x-Richtung 750 MPa sowie bei der Druckbeanspruchung E-Druck in x-Richtung 40500 MPa und für die Druckfestigkeit 550 MPa benannt.

Im Abschnitt I/3 war bereits auf erhebliche Abweichungen zwischen den allgemein gültigen Normwerten und den vom Verarbeiter benannten Rechenwerten bei Geweben hingewiesen worden, nunmehr muss dies auch für die UD-Laminat angemerkt werden.

Blatt V: Liner als Auskleidung

Zur Abdichtung des Speicherinnenraumes und zum Schutz der Trageschichten vor medialen Einflüssen durch das Speichermedium bzw. die Einbettung stehen unterschiedlichste Liner als Stand der Technik zur Verfügung:

Reinharzschichten, Gelcoat

GFK als Chemieschutzschichten

Thermoplaste, z.B. PP, PE-HT-Folien mit Alu.-Zwischenfolie)

Metallfolien, z.B. Alu., Edelstahl

Gummierungen, auch als eigenständige Gummisackeinlage

Silikonbeschichtungen, aliphatisches Polyketon (verstärkt, unverstärkt, flammgeschützt)

Beim Festigkeitsverband werden die Trageigenschaften der Liner vernachlässigt. Die Liner müssen jedoch ein hohes Dehnvermögen aufweisen, um ohne eigenes Versagen bis zum Bruch der Tragschicht den Verformungen zu folgen.

Bewährt haben sich zugleich als MM:

Typ 1: Palatal P 069-02 als CSS-Orthophthal-GFK - Verbund (sog. Chemieharz)

Typ 2: DERA KANE

480-300 (bis 95°C) als EP-VE-GFK-Verbund

| Kennwerte | Reinharz | mit Tragschichten (nur zum Vergleich) | Typ 1 | Typ 2 |
|--------------------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|
| Stoffkenngr. | | | | |
| ζ [g/ cm ³] | 1,2 | 1,52 | 1,47 | 1,52 |
| γ [-] | | 0,247 | 0,202 | 0,247 |
| ψ [-] | | 0,40 | 0,34 | 0,40 |
| elast. Kenngr. | | | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | (850) 1050 | 9.600 | 9000 | 12.000 |
| E_{yz} [N/mm ²] | (850) 1050 | 9.600 | 9000 | 12.000 |
| E_{zz} [N/mm ²] | 600 | 4.000 | 6000 | 6.500 |
| E_{xd} [N/mm ²] | 2000 | 9.900 | 7000 | 9.000 |
| E_{yd} [N/mm ²] | 2000 | 9.900 | 7000 | 9.000 |
| E_{xb} [N/mm ²] | 4 000 | 9.750 | 8550 | 8.100 |
| E_{yb} [N/mm ²] | 4 000 | 9.750 | 8550 | 8.100 |
| ν_{xy} | 0,4 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 450 | 3.600 | 2500 | 2.500 |
| α_x [T ⁻¹] | 80×10^{-6} | 25×10^{-6} | 25×10^{-6} | 25×10^{-6} |
| α_y [T ⁻¹] | 80×10^{-6} | 25×10^{-6} | 25×10^{-6} | 25×10^{-6} |
| α_z [T ⁻¹] | 80×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} |

Tab. III.5.1 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung

Beim **Typ 1** wurde der Liner wie folgt aus 3 Einzelschichten aufgebaut:

Glasmatte (pulvergebunden) 300g/m²

Komplexgewebe bestehend aus 1x Rovinggewebe 600g/m² und 1x Glasmatte 450g/m²

Glasvlies 40g/m²

Beim Typ 2 wurde eine Schicht Glasmatte 300 g/m² als integraler Bestandteil der Tragschicht aufgebracht, der gesonderte Nachweis der mechanischen Eigenschaften ist daher nicht möglich, er ist auch nicht erforderlich, da die Tragwirkung vernachlässigt wird und die Reinharzwerte für die Funktionserfüllung ausreichen.

Tab. III.5.2 Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile

| Festigkeits-Kennwert | Reinharze | mit Tragschichten | Typ 1 | Typ 2 |
|---|-----------------|-------------------|-------|-------|
| R_{xz} [N/mm ²] | 40 | 164 | 100 | 150 |
| R_{yz} [N/mm ²] | 40 | 164 | 100 | 150 |
| R_{zz} [N/mm ²] | 40 | 60 | 60 | 60 |
| R_{xd} [- II -] | 80 | 170 | 170 | 190 |
| R_{yd} [- II -] | 80 | 170 | 170 | 190 |
| R_{xb} [- II -] | 100 | 220 | 130 | 210 |
| R_{yb} [- II -] | 100 | 220 | 130 | 210 |
| Schubfestigkeit | | | | |
| R_{xy} [N/mm ²] $\ell\dot{u}=80mm$ | (Spitzenwert)18 | 60 | 10,0 | 10,0 |
| R_{xy} [N/mm ²] ^{x)} $\ell\dot{u}=115mm$ | (Mittelwert) 7 | 60 | 6,0 | 6,0 |
| ϵ_{xz} [%] | 70 | 1,8 | 2,0 | 3,0 |
| γ_{xy} [%] | 70 | 7,2 | 6,0 | 7,8 |
| Scherfestigkeit | | | | |
| R_z [N/mm ²] | 12 | 28 | 22 | 24 |

Da beim 4 m³ Musterwärmespeicher das Linerproblem bis II/2014 nicht endgültig geklärt war, wurde bei der Fugenabdichtung noch experimentelle Arbeit geleistet.

Dazu wurden einmal mit der Dichtmasse **NOVASIL**, einem Silikonklebstoff und zum anderen einem Metallklebband **Scotch 3M** umfangreiche Versuche mit unterschiedlichen Überlappungslängen auf GFK im ausgehärteten und nichtausgehärteten Zustand durchgeführt.

Im Ergebnis gelang es, den Speicher und seine auswechselbaren Module mit NOVASIL zuverlässig abzudichten. Damit wurde gleichzeitig ein neuer Typ von Liner erschlossen. Scotch 3M wurde verworfen, da nur eine Haftklebung möglich wurde. Eine Einbeziehung der mechanischen Kennwerte in die Tabellen entfällt.

Im Bodenbereich des Musterspeichers traten vermutlich durch örtliche Überbeanspruchung bei der Montage der lösbaren Seitenwände Mängel/Undichtheiten bei der Abdichtung mit 2 Mattelaminaten auf, was offensichtlich nicht reichte.

| Bauteilgruppe | Reinharz | mit | | |
|--------------------------------|----------|---------------|-------|-------|
| | | Tragschichten | Typ 1 | Typ 2 |
| elast. Kenngrößen | | | | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,6 | 1,6 | 1,55 | 1,4 |
| Temperatureinfluss | | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,5 | 1,22 | 1,2 |
| 80°C | 1,8 | 1,8 | 1,42 | 1,4 |
| 95°C | 2,0 | 2,0 | 1,71 | 1,6 |
| Festigkeitskenngr. | | | | |
| Zeiteinfluss 10 ⁴ h | 1,8 | 1,8 | 1,6 | 1,5 |
| Temperatureinfluss | | | | |
| 50°C | 1,5 | 1,5 | 1,3 | 1,3 |
| 80°C | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,6 |
| 95°C | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 1,9 |
| Medieneinfluss | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 1,2 |
| Verarbeitungseinfluss | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| Sicherheit | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Tab. III.5.3 Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern

Generell wird deshalb künftig als Mindestdicke bei Abdichtlaminaten für Eck- und

Überlappungsbereiche festgelegt:

4 Lagen Matte 450 g/m²

2 Lagen Gewebe 600 g/m²

Die Abfolge ist: Matte Gewebe Matte Matte Gewebe Matte

Es ist mit einem Harzüberschuss zu arbeiten!

Über die Wärmespeicherproblematik hinausgehend wird für Liner als Chemieschutzschicht (CSS) folgende Schichtenfolge empfohlen:

| | | | |
|---|--|--|--|
| CSS besteht generell aus 3 Schichten, wobei die 1. Schicht dem Medium zugewandt ist und entsprechend bei der Harzauswahl berücksichtigt werden muß. | | | |
| | CSS 1 | CSS 2 | CSS 3 |
| geeignet für Medien | anorg. basisch-oxidierend (Ammoniak, NaOCL, NAOH..) | organische Basen; Säuren (Ameisensäure, Essigsäure,..) | anorganische Säuren (H ₂ SO ₄ , HCL, HNO ₃ ..) |
| 1. Schicht | A-Glas oder ECR-Glas-Vlies und evtl. zusätzlich Feinschicht | wahlweise Feinschicht oder Vliesschicht mit A-Glas oder Synthesefasern | |
| 2. Schicht | Textilglasmatte mit einem Glasgewichtsanteil von 20 - 30% (E-Glas) | | C-Glas-Stapelfasergewebe oder Matte aus ECR-Glas mit 25 - 30% Glasgewichtsanteil |
| 3. Schicht | Textilglasmatte mit 25 - 30% Glasgewichtsanteil (E-Glas, mindest 450 g/m ² , nicht emulsionsgebunden) | | |

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die bisher ausgewählten Innenliner noch nicht den langzeitigen Anforderungen bei Wärmespeichern genügen.

Als Kriterien werden von F. Ochs (Leoben 2008) benannt:

-wasserdampfdicht < 0,001 g/m²/d bei 95°C

Nach J. Bühl weisen EPDM-Bahnen von 1,5 mm Stärke etwa 40 mg/m²/d auf.

Die GFK-Lamine von **Blatt I Grundtyp I und II** liegen zwischen 0,3 bis 2,5 g/m²/d und damit noch zwei Zehnerpotenzen über dem gewünschten Wert. Weitere Untersuchungen mit EP-Laminaten und Keramiksichten werden im Teilbericht der TUI dokumentiert.

Beim **Laminatgrundtyp III** wurden Permeationswerte zwischen 0,346 / 0,378 g/m²/d gemessen.

Blatt VI: Örtliche Einlagen

Bei der Krafteinleitung in Kunststoffbauteile müssen oft hohe örtliche Kraftflüsse durch Verstärkungen, meist aus Metallen oder Elastomeren gefertigten Einlagerungen, aufgenommen und abgefangen werden.

Im speziellen Fall müssen die Seitenwandmodule mehrfach lösbar als Schraubenverbindungen montiert werden.

Dies ist auch wegen des Wechsels beim Konstruktionsprinzip von Seitenmodul I, II und III erforderlich.

In die Eckmodule werden für das Einschneiden der Schraubenprofile Al-Stäbe eingeschäumt.

Als Schrauben, auch im Einstiegschachtbereich, werden Edelstahlausführungen genutzt.

Für die Dichtungen kommt EDMP-Gummi zum Einsatz.

| Kennwert | AlMgSi | EDMP |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Dichte g/cm ³ | 2,8 | 1,2 |
| E - Modul [N/mm ²] | 7000 | 500 |
| Y | 0,3 | 0,5 |
| G [N/mm ²] | 2700 | 250 |
| α | $22,8 \times 10^{-6}$ | 130×10^{-6} |
| R _{xz} [N/mm ²] | 270 | 5 - 9 |
| ϵ_B % | 12% | 200-400% |

Tab. III.6.1 Kennwerte für örtliche Einlagen

Die Dichtungen haben die Charakteristik:

EDMB schwarz, ca. 70 shore A mit KTW

Für die Alu.-Profilleisten wurden der Querschnitt von 30 mm x 8 mm ausgewählt und die Einzelabschnitte ohne spezielle Vorbehandlung in den Eckmodulen fixiert sowie eingeschäumt.

Im Verlauf der Entwicklung wurde nur eine Wandmoduleseite zum Auswechseln vorbereitet. Dadurch wurden auch nur ein Viertel der vorgesehenen Metallstäbe eingeschäumt und damit auch die Gefahr von Wärmebrücken.

Blatt VII: Neuartige Kernschichten (für Seitenmodule II und III)

Die Wärmeleitfähigkeiten der innerhalb des Themas geplanten Kernschichten liegen in den Bereichen:

VI < 0,024 - 0,025 W/mK (PUR-Hartschaum)

VII < 0,0053 W/mK (VIP 1) (Anfangswert 0,0035)

VIII 0,038 - 0,052 W/mK (VIP 2)

1. Vakuumisulationspaneele (VIPs)

Für die Seitenwandmodule II und III sollen als Kernschicht druckstabile, gasdicht verpackte und luftleer gepumpte Vakuumisulationspaneele (VIPs) eingesetzt werden.

Dabei soll bei minimaler Dicke eine bisher nicht erreichte extrem hohe Wärmedämmung eintreten. Die über mehrere Jahrzehnte hinweg als funktionsfähige Wärmedämmung mit einem Anfangswert von 0,0035 W/mK vom Anbieter benannt, wird in 6 Dickenabstufungen angeboten: (Tab. 7.1):

Die Paneele sind mit Alu-Folien umhüllt.

Die Alu-Folien können verschiedene Dicken aufweisen.

Tab.

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Dicke in mm | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 |
| Wärme- Widerstand in m² K/W | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 |
| U-Werte in W/m²K | 0,50 | 0,33 | 0,25 | 0,20 | 0,16 | 0,12 |
| Flächengewicht kg/m² | 2,2 | 3,1 | 4,0 | 4,9 | 5,8 | 7,6 |

III.7.1

VIP-Sortiment / Die Dämmkerne bestehen aus mikroporösem Kieselsäurepulver mit einem Kugeldurchmesser < 0,005 mm *) Bei 10 und 15 mm starken Paneelen liegt ein Teil der Randlasche auf der Paneelfläche.

Die Umhüllung besteht aus mehrfach metallisierten Schichten in Verbindung mit Glasfasergeweben.

Das Produkt besitzt eine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt Berlin: Z-23.11-1658

| | |
|-------------------------|--|
| Farbe | schwarz |
| Äußere Erscheinung | plattenförmig (kein Folienüberstand, glatte Kanten*) |
| Dichte | 180 -210 kg/m ³ |
| Wärmeleitfähigkeit | |
| Anfangswert | <0,0053W/mK |
| inkl. Alterung | 0,0080W/mK |
| bei Belüftung | 0,020W/mK |
| Temperaturbeständigkeit | -70 - +110°C |
| Feuchtebeständigkeit | 0 - 60% |
| Innendruck | <5mbar |
| Standardabmessung | 1100x600mm, 500x600mm |
| Längentoleranzen | +2 /-5mm |
| Stärketoleranzen | ±1mm |
| U – Anfangswert | 0,25W/m ² K |
| U – Alterungswert | 0,40W/m ² K |
| Flächengewicht | 4kg/m ² |
| Druckbelastbarkeit | 150 kPa bei 10% Stauchung |
| Lebensdauer | 60Jahre |

Tab. III.7.2 Physikalische Angaben zu VIP - Dämmplatten

Bei der konstruktiven Behandlung und Anwendung sind zu beachten:

Die Hüllen dürfen mechanisch nicht beschädigt werden, d.h. kein Sägen, Bohren, Kratzen

Die Platten dürfen keiner örtlichen Druckbeanspruchung ausgesetzt werden. Es ist bestenfalls eine gleichmäßige flächige Druckbelastung (vgl. Tab. 7.2).

Im Einbauraum sind punktuelle Belastungen auf Druck, Zug, Schub auszuschließen.

Empfohlen wird eine komplette Einhausung.

Das Gesamtbauteil darf keinen langandauernden Schwingungen, Stoßwellen und anderen dynamischen Belastungen ausgesetzt werden

Die Einhausung muss die Einwirkung hoher Temperaturen, hoher Feuchten und den Zutritt aggressiver Gase auf die VIPs verhindern. Die komplette Einhüllung der VIP-Dämmplatten soll als Dampfsperre wirken können.

Vakuuminulationspanelee zeichnen sich durch folgende Kennwerte aus:

| Kennwerte | VIP | (2 x 20mm) | |
|--------------------------------|---|------------|--|
| | | ⊥ verlegt | |
| Stoffkenngr. | | | |
| ζ [g/ cm ³] | 0,180 -0,210 | | |
| Geschlossen- | | | |
| zelligkeit [%] | Kieselsäurepulver, Kugeldurchmesser < 0,005mm | | |
| elast. Kenng. | Die in der Konstruktion in Gesteinswolle eingebetteten Paneele sind frei verformbar, die Eigensteifigkeit wird deshalb für die x, y, z –Richtungen vernachlässigt. | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | | | |
| E_{yz} [N/mm ²] | | | |
| E_{zz} [N/mm ²] | | | |
| E_{xd} [N/mm ²] | | | |
| E_{yd} [N/mm ²] | | | |
| E_{xb} [N/mm ²] | | | |
| E_{yb} [N/mm ²] | | | |
| ν_{xy} | | | |
| G_{xy} [N/mm ²] | | | |
| α_x [T ⁻¹] | Da VIP in der Konstruktion in Gesteinswolle eingebettet, wird die Wärmedehnung in x – y – Ebene vernachlässigt. Die AL – Umhüllung wirkt sich nicht nach außen aus. | | |
| α_y [T ⁻¹] | | | |
| α_z [T ⁻¹] | | | |

Tab III.7.3 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Kernschicht II)

| Festigkeits - Kennwert | VIP | (2 x 20mm) ⊥ verlegt |
|-------------------------------|--|----------------------|
| R_{xz} [N/mm ²] | In der Konstruktion in Gesteinswolle eingebettet, die Eigenfestigkeit wird deshalb vernachlässigt. Durch die steife GFK – Umhüllung der Schale liegt jegliche örtliche Belastung weit unter $R_{zd} \leq 0,150$ N/mm ² | |
| R_{yz} [N/mm ²] | | |
| R_{zz} [N/mm ²] | | |
| R_{xd} [- II -] | | |
| R_{yd} [- II -] | | |
| R_{xb} [- II -] | | |
| R_{yb} [- II -] | | |
| Schubfestigkeit | | |
| R_{xy} [N/mm ²] | | |
| R_{yx} [N/mm ²] | | |
| Wärmeleitf. [W/mK] | | |
| Scherfestigkeit | keine Angaben (s.o.) | |

Tab III.7.4: Festigkeitskennwerte und Schub-Aussagen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Kernschicht II)

Zum Einfluss von Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit (Diffusionsanteile aus Speichermedium) bzw. den Speicher umgebenden Medien (Kelleratmosphäre, Erdreich) können nur Abschätzungen vorgenommen werden.

Da die VIP bei dieser Konstruktion kein Bestandteil des tragenden Verbandes sind, entfallen für die Statik auch alle Angaben zu Abminderungen und Sicherheiten.

(Vakuuminisulationspaneele mit der Produktbezeichnung "va-Q-plus B" sind selbst noch als Entwicklungsprodukte anzusehen, ohne dass im Laufe der Themenbearbeitung sich weitere Konstruktionshinweise zwingend ergaben)

2. Superdämmung für Seitenwandmodul V III

Da bisher kein überzeugender 2. Beispielfall für die Superdämmung gefunden wurde, wird nur vom

neuartigen Seitenwandmodul V III gesprochen.

Beim Seitenwandmodul V III sollten zunächst in der „Einhausung“ (analog V II) spezielle Glasschäume zum Einsatz kommen.

Als Lieferformen werden Platten mit den Dicken 40, 50, 60, 70, 80, 90 und 100mm angeboten.

| Kennwerte | Typ F | Typ W + F |
|---|---|--------------------|
| Stoffkenngr. | | |
| ζ [g/ cm ³] | 0,165 | 0,10 |
| Geschlossen- zelligkeit [%] | Die Eigensteifigkeit des Glasschaumes (Steifenmodul ~ 100 N/mm ²) kann wegen der starren Einbettung nicht vernachlässigt werden. | |
| elast. Kenngr. | | |
| E_{xz} [N/mm ²] | | |
| E_{yz} [N/mm ²] | | |
| E_{zz} [N/mm ²] | | |
| E_{xd} [N/mm ²] | | |
| E_{yd} [N/mm ²] | | |
| E_{xb} [N/mm ²] | | |
| E_{yb} [N/mm ²] | | |
| ν_{xy} | | |
| G_{xy} [N/mm ²] | | |
| α_x [T ⁻¹] | 9×10^{-6} | 9×10^{-6} |
| α_y [T ⁻¹] | 9×10^{-6} | 9×10^{-6} |
| α_z [T ⁻¹] | 9×10^{-6} | 9×10^{-6} |

Tab III.7.5 Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung für Kernschicht III

| Festigkeits - Kennwerte | Typ F | Typ W + F |
|-------------------------------|---|-----------|
| R_{xz} [N/mm ²] | 0,15 | 0,10 |
| R_{yz} [N/mm ²] | 0,15 | 0,10 |
| R_{zz} [N/mm ²] | 0,15 | 0,10 |
| R_{xd} [- II -] | 1,60 | 0,40 |
| R_{yd} [- II -] | 1,60 | 0,40 |
| R_{xb} [- II -] | 0,55 | 0,30 |
| R_{yb} [- II -] | 0,55 | 0,30 |
| Schubfestigkeit | unbekannt, vgl. Blatt 2 PUR-Schaum | |
| R_{xy} [N/mm ²] | | |
| R_{yx} [N/mm ²] | | |
| Wärmeleitf. [W/mK] | 0,052 | 0,038 |
| Scherfestigkeit | unbekannt, vgl. Blatt 2 PUR-Schaum | |
| R_z [N/mm ²] | | |

Tab. III 7.6: Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Kernschicht III)

VII/5

Zum Einfluss von Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit (Diffusionsanteile aus Speichermedium) bzw. den Speicher umgebenden Medien (Kelleratmosphäre, Erdreich) können nur Abschätzungen vorgenommen werden (vgl. Blatt 2 PUR-Schaum). Im Allgemeinen sollte, da kein polymeres Material, keine Zeitabminderung angesetzt werden.

Es wurden die statischen Berechnungen für die Seitenwandmodule V III mit den Kennwerten von Glasschaum durchgeführt und der Zuverlässigkeitsnachweis erbracht. Dies allerdings nur nach dem Einbringen eines Kreuzrasters aus GFK.

Aus fertigungstechnischen Gründen wurde in der Folgezeit auf das Einbringen der GFK-Kassettenraster verzichtet und auch auf eine spezielle Einhausung. Der Seitenwandmodul V III wird endgültig mit den benannten VIPs-Platten in der neutralen Ebene bei vollständiger Einbettung in PUR-Hartschaumschichten und nur einer äußeren GFK-Umhüllung ausgeführt.

III.2.3 Festigkeitsanalyse

Die Dimensionierung des Musterspeichers erfolgt für die sichere Aufnahme der Belastungen durch:

Füllung mit 4m³ Brauchwasser

Temperatur des Speichermediums zwischen $\geq T_R \div +95^\circ\text{C}$, d.h. 75K

druckloser Betrieb, d.h. hydrostatische Belastung 2m

kurzzeitiger Abnahmedruck von 0,05 bar über 1h

Berstdruck = 0,1 bar

Langzeitbelastung 10⁴h

Als Lastfälle werden (meist in Kombination) gerechnet:

LF 1: Eigengewicht (EG)

LF 2: Eigengewicht + hydrostatischer Wasserdruck (EG + HWD)

LF 3: Eigengewicht + Temperaturbelastung 75K

LF 4: EG + HWD + T95 +0,05 bar Innendruck

LF 5: EG + HWD + T95 +0,01 bar Innendruck

LF 6: EG + HWD +0,05 bar Innendruck (alles mit Zeitkennwerten)

(Durch die Aufstellung des Speichers an der TUI im Freien erhöhte sich die Temperaturbelastung an mehreren Tagen auf 95K, ohne in der Berechnung Berücksichtigung zu finden.)

Im weiteren Text werden die

FEM – Berechnungen 1 bis teilweise 11 für die Speicherhülle (beginnend mit Teilbericht 1 und 2)

als Einschübe dokumentiert.

Die Quellenangaben erfolgen nur einmal am Schluss des Gesamtberichtes.

III.2.3.1 FEM-Teilbericht 1 als Einschub (FEM TB 1)

TB 1.1 Allgemeines

Der Wärmespeicher besteht nach [3] aus 3 unterschiedlichen Sandwichmodulen aus GFK-Deckschichten mit PUR- Hartschaum- Kernen, die sowohl durch Verklebung als auch durch Verschraubung zu einem kubischen Behälter gefügt werden (Bilder 1 bis 6 des Bildteils).

Die unterschiedlichen Sandwichmodule sind:

- Eckmodule
- Boden- / Deckmodule
- Seitenwandmodule

Die Bilder 3 und 4 zeigen je zwei Eckmodule, die auf halber Höhe mit GFK-Laminaten überlascht sind.

Die Deckschichten der Sandwichmodule umhüllen die PUR-Hartschaum-Kerne am ganzen Umfang. Sie werden im Folgenden als GFK-Mäntel bezeichnet.

In der Modellbildung des Sandwichbehälters werden geschichtete NKTP32-Schalenelemente für die GFK-Mäntel der Module verwendet. Der PUR- Kern der Sandwichmodule sowie die versteifenden Aluschiene und GFK-Profile wurden durch NKTP4-Solid-Elemente abgebildet. Die Elemente erlauben beliebige orthotrope Kennwerte für die Materialhauptachsen.

Der Boden- und Deckmodul sind in die Eckmodule eingeklebt, die Seitenwandmodule mit den Eckmodulen verschraubt. Die zur Verschraubung verwendeten Berührungsflächen von Eckmodul und Seitenwandmodul (umlaufend) sind in den Eckmodulen durch Aluminium-Schiene verstärkt, in den Seitenwandmodulen durch GFK-Rechteckprofile (Versteifungsprofile).

Bild 10 zeigt die Einbindung von Aluschiene und GFK-Profil in die Module. Die Querschnittsabmessungen derselben stimmen im Modell nicht mit den Originalabmessungen überein. Gleiche Versteifungswirkung und gleiches Gewicht werden jedoch durch entsprechende Anpassung erreicht (vgl. Pkt. 3.1)

In den Bildern 7 bis 9 des Bildteils ist die jeweilige Material-Hauptachsenrichtung x in den orthogonalen GFK-Mänteln der Module dargestellt. In allen Mantelbereichen verläuft sie horizontal in der Mantelfläche. Die y -Richtung orthogonal dazu ebenfalls in der Mantelfläche. Die z -Richtung steht senkrecht auf der Mantelfläche.

Alle späteren Spannungsangaben zu den GFK-Mänteln beziehen sich auf diese Material-Hauptachsen. Das gilt auch für die Klebstoffschichten und Reinharzschichten zwischen den Mantelflächen.

Die Spannungsangaben für alle Solid-Elemente (PUR-Kern der Module, Aluschiene, GFK-Versteifungsprofile) beziehen sich auf das globale Koordinatensystem des Modells, das in den Bildern unten rechts dargestellt ist.

Zu bemerken ist, dass im Ausgangszustand die Seitenwandmodule nur an den Verschraubungsflächen der Seitenwandmodule kraftschlüssig mit den Eckmodulen verbunden sind. Alle anderen Berührungsflächen der Seitenwandmodule sind unverbunden.

TB 1.2 Geometrie des 4m³- Labor-Wärmespeicher-Modells

Außenabmessungen des Behälters: Länge 1960mm, Breite 1960mm, Höhe 1920mm

Nutzbare Füllhöhe: 1600mm

| | |
|--------------------------------------|---|
| Breite des Flüssigkeitsspiegels: | 1600mm |
| Länge des Flüssigkeitsspiegels: | 1600mm |
| Manteldicke der Sandwichmodule: | t _M = 4mm |
| Maximale Dicke der PUR-Kerne: | t _K = 160mm (150mm) |
| Querschnitt der Alu-Schienen: | b _{MA} = 36mm, t _{MA} = 21mm |
| Querschnitt der GFK-Versteifung: | b _{MG} = 36mm, t _{MG} = 18 mm |
| Dicke der Reinharz-Schichten: | t _{RH} = 0.2mm |
| Dicke der Klebstoffschichten: | t _{KL} = 1.0mm |
| Rundungsradius in den Eckmodulen: | R _i = 55mm; R _a = 215mm |
| Überlaschungs- Dicken der Eckmodule: | t _ü = 5 und 10mm |
| Überlaschungs- Länge der Eckmodule: | l _ü = 2 x 125mm = 250mm |

TB 1.3 Materialkennwerte des 4m³ – Labor-Wärmespeichers

Für jedes Material sind 13 Materialkennwerte und 9 Festigkeitswerte erforderlich. Für die Ermittlung der Kennwerte, welche die Langzeiteinwirkungen berücksichtigen, werden die in der Tabelle 1 angegebenen Ausgangsdaten entsprechend [1] verwendet:

TB 1.3.1 Ausgangsdaten (Kurzzeitkennwerte)

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52x10 ⁻⁹ | 0.033x10 ⁻⁹ | 1.02x10 ⁻⁹ | 1.1x10 ⁻⁹ | 1.52x10 ⁻⁹ | 2.8x10 ⁻⁹ |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E _x [N/mm ²] | 8300 | 6.0 | 1225 | 4300 | 8300 | 7000 |
| E _y [N/mm ²] | 8300 | 6.0 | 1225 | 4300 | 8300 | 7000 |
| E _z [N/mm ²] | 3000 | 6.0 | 1225 | 4300 | 3000 | 7000 |
| v _{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| v _{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| v _{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G _{xy} [N/mm ²] | 1378 | 2.3 | 400 | 1320 | 1378 | 2700 |
| G _{xz} [N/mm ²] | 1300 | 2.3 | 400 | 1320 | 1300 | 2700 |
| G _{yz} [N/mm ²] | 1300 | 2.3 | 400 | 1320 | 1300 | 2700 |
| α _x [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| α _y [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| α _z [K ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| F _{xc} [N/mm ²] | 160 | 0.27 | 40 | 70 | 160 | 270 |
| F _{xt} [N/mm ²] | 145 | 0.35 | 19 | 70 | 145 | 270 |
| F _{yc} [N/mm ²] | 160 | 0.27 | 40 | 70 | 160 | 270 |
| F _{yt} [N/mm ²] | 145 | 0.35 | 19 | 70 | 145 | 270 |
| F _{zc} [N/mm ²] | 60 | 0.27 | 40 | 70 | 60 | 270 |
| F _{zt} [N/mm ²] | 60 | 0.35 | 19 | 70 | 60 | 270 |
| F _{sxy} [N/mm ²] | 38 | 0.12 | 5.4 | 38 | 38 | 260 |
| F _{syz} [N/mm ²] | 26 | 0.12 | 10 | 26 | 26 | 260 |
| F _{szx} [N/mm ²] | 26 | 0.12 | 10 | 26 | 26 | 260 |

Tabelle TB 1.1 Kurzzeit-Kennwerte für die Materialhauptachsen

Die Kennwerte unterhalb der leeren Zeile der Tabelle TB 1.1 sind die Materialfestigkeiten:
 F_{xc} , F_{xt} , F_{yc} , F_{yt} , F_{zc} , F_{zt} : **Druck-/ Zugfestigkeiten in Richtung der Materialhauptachsen**
 F_{sxy} , F_{syz} , F_{sxz} : **Scherfestigkeiten bezüglich der Materialhauptachsen**
Da im Modell die Querschnittsabmessungen der GFK-Versteifungsprofile und der Alu-Schienen nicht dem Original entsprechen, müssen die E-Moduln und die Dichte entsprechend angepasst werden.

Kriterien: Gleiches Gewicht wie das Original
 Gleiche Biegesteifigkeit wie das Original

| | GFK-Versteifungsprofil | | AlMgSi -Schiene | |
|-----------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|
| | b [mm] | t [mm] | b [mm] | t [mm] |
| Original O | $b_{OG} = 30$ | $t_{OG} = 8$ | $b_{OA} = 28$ | $t_{OA} = 7$ |
| Modell M | $b_{MG} = 36$ | $t_{MG} = 18$ | $b_{MA} = 36$ | $t_{MA} = 21$ |
| Dichte ρ_o | $1.52 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ | | $2.8 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ | |

Tab. TB 1.2 Querschnittsabmessungen und Dichten

Umrechnung Dichte : $\rho_M = \rho_O \times (b_O \times t_O) / (b_M \times t_M)$
 Umrechnung E-Modul: $E_M = E_O \times (b_O \times t_O^3) / (b_M \times t_M^3)$

In der nachfolgenden Tabelle TB 1.3 sind die so berechneten Ersatzwerte eingetragen. Die Werte der Tabelle 3 wurden als Kurzzeitwerte (charakteristische Werte) im Weiteren zu Grunde gelegt:

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst Derakane. | AlMgSi |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52x10 ⁻⁹ | 0.033x10 ⁻⁹ | 1.02x10 ⁻⁹ | 1.1x10 ⁻⁹ | 0.56x10 ⁻⁹ | 0.73x10 ⁻⁹ |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E_x [N/mm ²] | 8300 | 6.0 | 1225 | 4300 | 607 | 202 |
| E_y [N/mm ²] | 8300 | 6.0 | 1225 | 4300 | 607 | 202 |
| E_z [N/mm ²] | 3000 | 6.0 | 1225 | 4300 | 219 | 202 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 1378 | 2.3 | 400 | 1320 | 101 | 78 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 1300 | 2.3 | 400 | 1320 | 95.1 | 78 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 1300 | 2.3 | 400 | 1320 | 95.1 | 78 |
| α_x [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| α_y [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| α_z [K ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| F_{xc} [N/mm ²] | 160 | 0.27 | 40 | 70 | 160 | 270 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 145 | 0.35 | 19 | 70 | 145 | 270 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 160 | 0.27 | 40 | 70 | 160 | 270 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 145 | 0.35 | 19 | 70 | 145 | 270 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 60 | 0.27 | 40 | 70 | 60 | 270 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 60 | 0.35 | 19 | 70 | 60 | 270 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 38 | 0.12 | 5.4 | 38 | 38 | 260 |
| F_{syz} [N/mm ²] | 26 | 0.12 | 10 | 26 | 26 | 260 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 26 | 0.12 | 10 | 26 | 26 | 260 |

Tab. TB1.2.3 Für die nachfolgenden Berechnungen zu Grunde gelegte Kurzzeitwerte

Die Schubmoduln G_M wurden entsprechend den Originalverhältnissen G_O/E_O umgerechnet.

Mit den so ermittelten Ersatzsteifigkeiten für die GFK-Profile und die Alu-Schienen werden in den jeweiligen Lastfällen die Biegeverformungen derselben realistisch erfasst, nicht jedoch die Spannungen in diesen. Die berechneten Spannungen müssen mit den Faktoren

GFK-Profil: $F_G = E_{OG} / E_{MG} = 8300 / 607 = 13.67$

sowie

Alu-Schiene: $F_A = E_{OA} / E_{MA} = 7000 / 202 = 34.65$

multipliziert werden, um die realen Werte zu erhalten.

TB 1.4 Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen

Als Abminderungsfaktoren für die Steifigkeitskennwerte werden verwendet:

| | GFK | PUR | Klebstoff | Reinharz | AlMgSi |
|---|------|-----|-----------|----------|--------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.6 | 3.4 | 1.6 | 1.6 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.8 | 2.0 | 1.4 | 1.8 | 1.0 |
| $\Pi_{t,E}$ | 2.88 | 6.8 | 4.0 | 2.88 | 1.0 |

Tab. TB 1.2.4 Abminderungsfaktoren für die Materialsteifigkeiten

Als Abminderungsfaktoren für die Festigkeiten werden verwendet:

| | GFK | PUR | Klebstoff | Reinharz | AlMgSi |
|---|------|------|-----------|----------|--------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.8 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 1.5 | 1.0 |
| Medieneinfluss | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| Sicherheit | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| $\Pi_{t,F}$ | 4.86 | 8.64 | 8.64 | 4.86 | 1.8 |

Tab. TB 1.2.5 Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten

Die Abminderungsfaktoren wurden entsprechend dem Sachbericht [1] festgelegt. Eine Ausnahme bildet der Abminderungsfaktor für den Zeiteinfluss auf den PUR Hartschaum. Dieser Abminderungsfaktor wurde in Anlehnung an die Angabe in DIN EN 14509, Anhang E, Abschnitt E.7.6 [2] festgelegt.

TB 1.5 Belastung des 4m³ Labor- Wärmespeichers

Der Behälter ist innen bis zu einer Füllhöhe von maximal 1.6m mit Wasser gefüllt, was einem hydrostatischen maximalen Wasserdruck von 0.016 N/mm² am Boden des Behälters entspricht, der bis zur Höhe von 1.6 m auf Null absinkt. Diese Belastung wurde auf die Innenwände des Behälters aufgebracht.

Das Eigengewicht des Behälters wurde in der Berechnung durch Eingabe der Dichten und einer vertikalen Erdbeschleunigung von -9810mm/s^2 automatisch berücksichtigt.

Als Temperaturbelastung wurde eine Temperaturdifferenz zwischen Behälterinnenwand und der Außenwand von $\Delta T = 75\text{K}$, folgend aus $T_i=95^\circ\text{C}$ und $T_a=20^\circ\text{C}$, angesetzt.

TB 1.6 Berechnung der Beanspruchung des 4m³ Labor-Wärmespeichers

Es werden die folgenden Lastfälle für den Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet:

LF1: Eigengewicht (EG)

LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck (EG+ HWD)

LF3: Eigengewicht + Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenwand von $\Delta T=75\text{K}$ (EG+HWD+T95)

LF4: EG + HWD + T95 + 0.05bar Innendruck

LF5: EG + HWD + T95 + 0.10bar Innendruck

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen und das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

$$E_d / R$$

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Die Lastfälle LF2 bis LF5 sind Lastkombinationen. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet, da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind.

(Die Temperatur darf 95°C nicht wesentlich überschreiten, um ein Kochen und erhöhten Dampfdruck zu vermeiden, werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt)

Die Berechnung erfolgt mit dem FEM-Programm NISA von EMRC, Troy, USA.

TB 1.6.1 Lastfall LF1: Eigengewicht (EG)

Im Lastfall LF1 werden Langzeitwerte für die Materialkenngrößen verwendet, die aus den Kurzzeitwerten durch die entsprechenden Abminderungsfaktoren der Tabellen 5 und 6 gewonnen werden, in denen aber der Temperatureinfluss ausgeschlossen wurde:

| | GFK | PUR | Klebstoff | Reinharz | AlMgSi |
|--|-----|-----|-----------|----------|--------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.6 | 3.4 | 1.6 | 1.6 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95\text{°C}$ | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| $\Pi_{t,E,G}$ | 1.6 | 3.4 | 1.6 | 1.6 | 1.0 |

Tab.1.5 Abminderung der Steifigkeitskenngrößen E, G

| | GFK | PUR | Kleb-stoff | Rein-harz | AlMgSi |
|---|------|------|------------|-----------|--------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.8 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Medieneinfluss | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| $\Pi t, F = \gamma M$ | 2.16 | 2.88 | 2.3 | 2.16 | 1.2 |
| Sicherheit γR | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Π | 3.24 | 4.32 | 3.45 | 3.24 | 1.8 |

Tab. 6: Abminderung der Festigkeitskenngrößen

Für das FEM- Programm wird der Sicherheitsbeiwert für den Tragwiderstand γ_R , multipliziert mit den γ_M –Werten der Festigkeiten, verwendet. Damit kann das Verhältnis E_d / R_d durch das Programm ermittelt und ausgegeben werden. Die nachfolgende Tabelle 7 stellt die so ermittelten Eingabewerte für die Materialkenngrößen des Lastfalls LF1 dar.

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52×10^{-9} | 0.033×10^{-9} | 1.02×10^{-9} | 1.1×10^{-9} | 0.56×10^{-9} | 0.73×10^{-9} |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E_x [N/mm ²] | 5188 | 1.76 | 766 | 2688 | 379 | 202 |
| E_y [N/mm ²] | 5188 | 1.76 | 766 | 2688 | 379 | 202 |
| E_z [N/mm ²] | 1875 | 1.76 | 766 | 2688 | 137 | 202 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 861 | 0.68 | 250 | 825 | 63 | 78 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 813 | 0.68 | 250 | 825 | 59 | 78 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 813 | 0.68 | 250 | 825 | 59 | 78 |
| α_x [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 80×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} | 22.8×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 80×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} | 22.8×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 40×10^{-6} | 60×10^{-6} | 80×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} | 22.8×10^{-6} |
| F_{xc} [N/mm ²] | 49 | 0.063 | 12 | 22 | 49 | 150 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 45 | 0.063 | 6 | 22 | 45 | 150 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 49 | 0.063 | 12 | 22 | 49 | 150 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 45 | 0.063 | 6 | 22 | 45 | 150 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 19 | 0.063 | 12 | 22 | 19 | 150 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 19 | 0.063 | 6 | 22 | 19 | 150 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 12 | 0.028 | 2 | 12 | 12 | 144 |
| F_{svz} [N/mm ²] | 8 | 0.028 | 3 | 8 | 8 | 144 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 8 | 0.028 | 3 | 8 | 8 | 144 |

Tab. TB 1.2.7 Für den Lastfall LF1 (und LF2) verwendete Langzeitwerte

Ergebnisse des Lastfalls LF1

Da die Auslastung der verwendeten Materialien sehr gering ist, werden nur die Verformungen des Speichers und die Verhältniszerte E_d / R_d in der nachfolgenden Tabelle 8 dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---------------------|--------------------|------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 0.00972 / - 0.0165 | | keine | | keine | |
| U_y [mm] | 0.00972 / - 0.0165 | | | | | |
| u_z [mm] | 0.0 / - 0.351 | | | | | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.00109 | 0.00719 | 0.00375 | 0.00154 | 0.000657 | 0.000865 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.00598 | 0.00719 | 0.00445 | 0.00329 | 0.000657 | 0.000865 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.00183 | - | - | 0.000542 | 0.000988 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.00380 | 0.00443 | 0.00190 | 0.00143 | 0.00107 | 0.000404 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 0.0234 | - | - | 0.00371 | 0.000439 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 0.0234 | - | - | 0.00371 | 0.000439 |

Tab. TB 1.2.8 Ergebnisse des Lastfalls LF1: EG

Für diesen Lastfall wird für alle Beanspruchungskomponenten der Materialien das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ erwartungsgemäß erfüllt. Die maximale Verformung $u_z = -0.351$ mm kennzeichnet die maximale Durchbiegung des Deckmoduls.

TB 1.6.2 Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck (EG + HWD)

Für den Lastfall LF2 werden dieselben Langzeitwerte für die Materialkenngrößen nach Tabelle DB 1.2.7 verwendet wie für den Lastfall LF1.

Die nachfolgende Tabelle zeigt wieder die maximalen Verformungen des Wärmespeichers sowie die E_d / R_d -Verhältnisse:

Ergebnisse des Lastfalls LF2

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---------------------|------------------|--------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 0.4092 / - 12.84 | | außen : $\max \Delta_x = 0.74$ | | außen : $\Delta_z = 0.11$ (oben) | |
| U_y [mm] | 0.4106 / - 12.83 | | $\max \Delta_y = 0.74$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 0.3228 / - 1.153 | | innen: - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.184 | 0.715 | 0.037 | 0.079 | 0.131 | 0.200 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.139 | 0.715 | 0.095 | 0.033 | 0.131 | 0.201 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.387 | - | - | 0.029 | 0.131 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.134 | 0.879 | 0.056 | 0.010 | 0.214 | 0.092 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 1.034 | - | - | 0.145 | 0.063 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.034 | - | - | 0.145 | 0.063 |

Tab. TB 1.2.9 Ergebnisse des Lastfalls LF2: EG + HWD

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, wird in diesem Lastfall die vollständige Auslastung des PUR-Hartschaumes erreicht, während alle anderen Materialien sehr gering ausgelastet sind.

Durch den HWD wird eine horizontale Aufweitung des Wärmespeichers von

$$u_x = u_y = -13.01 \text{ mm}$$

errechnet. Bild 11 des Bildteils zeigt die Spannungen σ_{yz} und σ_{xz} im PUR-Hartschaum.

Die Bereiche maximaler Beanspruchung sind deutlich zu erkennen, ebenso auch die Symmetrie zur x-y-Diagonale.

Auch für diesen Lastfall wird für alle Beanspruchungskomponenten der Materialien das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ erfüllt, für den PUR-Hartschaum jedoch grenzwertig.

TB 1.6.3 LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz (EG + HWD + T95)

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Lastfällen LF1 und LF2 ist zur Ermittlung der Langzeitkennwerte für die verwendeten Materialien hier der Temperatureinfluss mit zu berücksichtigen, so dass alle Abminderungsfaktoren der Tabellen 10 und 11 zum Tragen kommen:

| | GFK | PUR | Klebstoff | Reinharz | AlMgSi |
|---|------|-----|-----------|----------|--------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.6 | 3.4 | 1.6 | 1.6 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.8 | 2.0 | 1.4 | 1.8 | 1.0 |
| $\Pi_{t,E,G}$ | 2.88 | 6.8 | 4.0 | 2.88 | 1.0 |

Tab TB 1.2.10 Abminderungsfaktoren für die Materialsteifigkeiten

| | GFK | PUR | Klebstoff | Reinharz | AlMgSi |
|---|------|------|-----------|----------|--------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.8 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 1.5 | 1.0 |
| Medieneinfluss | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| $\Pi_{t,F} = \gamma_M$ | 3.24 | 5.76 | 5.76 | 3.24 | 1.2 |
| Sicherheit γ_R | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Π | 4.86 | 8.64 | 8.64 | 4.86 | 1.8 |

Tab. TB 1.2.11 Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten

Die sich ergebenden Langzeitwerte sind in der Tabelle **Tab. DB 1.2.12** dargestellt, wobei auch hier das Produkt aus γ_M und γ_R bei der Abminderung der Materialfestigkeiten verwendet wird:

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52x10 ⁻⁹ | 0.033x10 ⁻⁹ | 1.02x10 ⁻⁹ | 1.1x10 ⁻⁹ | 0.56x10 ⁻⁹ | 0.73x10 ⁻⁹ |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E_x [N/mm ²] | 2882 | 0.88 | 306 | 1493 | 211 | 202 |
| E_y [N/mm ²] | 2882 | 0.88 | 306 | 1493 | 211 | 202 |
| E_z [N/mm ²] | 1041 | 0.88 | 306 | 1493 | 76 | 202 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 478 | 0.34 | 100 | 458 | 35 | 78 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 451 | 0.34 | 100 | 458 | 33 | 78 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 451 | 0.34 | 100 | 458 | 33 | 78 |
| α_x [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| α_y [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| α_z [K ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 80x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 22.8x10 ⁻⁶ |
| F_{xc} [N/mm ²] | 33 | 0.031 | 4.6 | 14 | 33 | 150 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 30 | 0.041 | 2.2 | 14 | 30 | 150 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 33 | 0.031 | 4.6 | 14 | 33 | 150 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 30 | 0.041 | 2.2 | 14 | 30 | 150 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 12 | 0.031 | 4.6 | 14 | 12 | 150 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 12 | 0.041 | 2.2 | 14 | 12 | 150 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 8 | 0.014 | 0.6 | 8 | 8 | 144 |
| F_{svz} [N/mm ²] | 5 | 0.014 | 1.2 | 5 | 5 | 144 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 5 | 0.014 | 1.2 | 5 | 5 | 144 |

Tab. DB 1.2.12 Für den Lastfall LF 3 verwendete Langzeitwerte

Ergebnisse des Lastfalls LF3

In der nachfolgenden Tabelle 13 werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---|---------------|------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|---------|
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| u_x [mm] | 0.09 / -23.29 | | außen : $\max \Delta_x = 1.93$ | | außen : $\Delta_z = 0.53$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.09 / -23.29 | | $\max \Delta_y = 1.93$ | | $\Delta_z = 0.32$ (unten) | |
| zu [mm] | 1.86 / - 3.48 | | innen : - | | innen: - | |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 11.90 | -0.0651 | -2.833 | 2.946 | -10.989 | 38.254 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 10.01 | -0.0650 | -3.080 | 2.797 | -10.992 | 38.358 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.0296 | - | - | -2.612 | 19.733 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.267 | -0.0365 | 0.4092 | 0.331 | -4.410 | -20.243 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.0321 | - | - | 3.331 | 10.301 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.0322 | - | - | 3.331 | 10.291 |

| | | | | | | |
|----------------------------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|
| max ϵ_{xx} [-] | 0.00364 | -0.0694 | 0.00321 | 0.00163 | 0.00288 | 0.00429 |
| max ϵ_{yy} [-] | 0.00346 | -0.0692 | 0.00287 | 0.00154 | 0.00288 | 0.00301 |
| max ϵ_{zz} [-] | - | 0.0348 | - | - | 0.00221 | 0.00223 |
| max ϵ_{xy} [-] | -0.00684 | -0.108 | 0.00409 | 0.000722 | -0.00922 | -0.00752 |
| max ϵ_{yz} [-] | - | -0.0948 | - | - | 0.00738 | 0.00383 |
| max ϵ_{xz} [-] | - | -0.0950 | - | - | 0.00739 | 0.00382 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.397 | 2.10 | 0.616 | 0.210 | 0.333 | 0.255 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.334 | 2.10 | 0.670 | 0.200 | 0.333 | 0.256 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.72 | - | - | 0.218 | 0.132 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.408 | 2.60 | 0.682 | 0.0413 | 0.551 | 0.141 |
| E_{dvy} / R_{dvy} | - | 2.29 | - | - | 0.666 | 0.072 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.30 | - | - | 0.666 | 0.072 |

Tab. TB1.2.13 Ergebnisse des Lastfalls LF3

Der Tabelle DB.1.2.13 ist zu entnehmen, dass der PUR-Hartschaum das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ nicht erfüllt. Diese Überschreitung der Tragfähigkeitsgrenze liegt jedoch nur in sehr kleinen Bereichen vor. Bild 14, Ausschnitt rechts, zeigt den betroffenen Bereich beispielhaft für die σ_{xx} -Spannung (Ecke Seitenwandmodul-Eckmodul). Der zur x-y-Diagonale gespiegelte Bereich ist in derselben Größenordnung mit der σ_{yy} -Spannung betroffen. Diese Überschreitung ist jedoch für die Tragfähigkeit der Wärmespeicherkonstruktion als unbedeutend einzuschätzen.

Die Auslastung der anderen Materialbereiche ist gering bis angemessen und erfüllen das Bemessungskriterium.

Hervorzuheben ist die Aufweitung des Speichers von $\max u_x = \max u_y = -23.28\text{mm}$

Sie liegt damit bei $0.0146 \approx 1/70$ der Spannweite.

Im Bild 12 des Bildteils ist die resultante Verformung an den Mantelflächen des Speichers ohne PUR-Hartschaum dargestellt. Man erkennt die Symmetrie zur x-y-Diagonalen und die etwas unterschiedliche Aufweitung von Innenwand und Außenwand der Seitenwandmodule. Der PUR-Schaum nimmt nicht nur Schub auf, sondern auch Druck senkrecht zur Mantelfläche, was die unterschiedliche Aufweitung bewirkt.

Bild 13 zeigt die Orte der maximalen Normalspannungen (σ_{xx}) in den Ecken von Seitenwandmodul und Eckmodul der Modulmäntel an der Außenseite des Speichers .

Im Bild 15 sind die maximalen Spannungen (σ_{yy}) in den Klebschichten zwischen Boden-/ Deckmodul und Eckmodulen. Die Materialhauptachsenrichtung y ist quer zur Längsausdehnung der Klebflächen gerichtet (vgl. Bild 8).

Das Bild 16 zeigt die maximalen Spannungen (σ_{xx}) in den Reinharz-Schichten zwischen den Eckmodul-„Nasen“ sowie den Reinharzschichten zwischen den Mantelflächen des Boden- und Deckmodul-Randes.

Im Bild 17 sind die maximalen Spannungen (σ_{yy}) in den Alu- und GFK-Profilen dargestellt. Die in der Legende angegebenen Spannungen sind noch nicht wie in der Tabelle 13 mit dem Korrekturfaktoren F_A und F_G multipliziert (vgl. Pkt 3.1.)

Bild 18 zeigt beispielhaft die Lage der vertikalen Spalte und einen horizontalen Spalt oben an der Außenseite des Wärmespeichers. Die jeweilige maximale Spaltweite ist in der Tabelle 13 angegeben. Die horizontale Spaltweite unten ist etwas geringer als die obere.

TB 1.6.4 LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0.05bar Innendruck (EG + HWD + T95 + 0.05bar)

Als Eingabewerte für die Materialien werden die dieselben Werte wie für den Lastfall LF3 verwendet (Tabelle 12). Der Innendruck von 0.05bar wurde auf alle Innenwände einschließlich der Innenwand des Deckmoduls zusätzlich aufgebracht.

Ergebnisse des Lastfalls LF4

Auch für diesen Lastfall werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 14 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|--|-----------------|---------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 0.39 / -37-26. | | außen : $\max\Delta_x = 2.62$ | | außen : $\Delta_z = 0.95$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.39 / -37.25 | | $\max\Delta_y = 2.65$ | | $\Delta_z = 0.55$ (unten) | |
| zu [mm] | 15.17 / - 2.944 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 16.66 | -0.0766 | -2.961 | 4.098 | -13.96 | 57.28 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 14.78 | -0.0765 | -3.376 | 4.327 | -13.96 | 57.38 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.0379 | - | - | -2.77 | 28.11 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.62 | -0.0435 | 0.419 | 0.499 | -5.36 | -28,24 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.0404 | - | - | 4.37 | 15.21 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.0405 | - | - | 4.37 | 15.18 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00511 | -0.0815 | 0.00324 | 0.00227 | 0.00346 | 0.00640 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00450 | -0.0814 | 0.00316 | 0.00239 | 0.00346 | 0.00641 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0500 | - | - | 0.00216 | 0.00325 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.00757 | -0.129 | 0.00419 | 0.00109 | -0.0112 | -0.01049 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.119 | - | - | 0.00969 | 0.00565 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.119 | - | - | 0.00969 | 0.00564 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.56 | 2.47 | 0.644 | 0.293 | 0.423 | 0.382 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.49 | 2.45 | 0.734 | 0.309 | 0.423 | 0.383 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.92 | - | - | 0.231 | 0.187 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.45 | 3.11 | 0.698 | 0.0623 | 0.670 | 0.196 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 2.89 | - | - | 0.874 | 0.106 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.89 | - | - | 0.874 | 0.105 |

Tab. TB1.2.14 Ergebnisse des Lastfalls LF4

Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, dass der Deckmodul jetzt durch den zusätzlichen Innendruck eine deutliche Aufwölbung um 15.17mm erfährt und die horizontale Aufweitung auf 37.25mm angewachsen ist (Bild 19 des Bildteils).

Ferner sind auch die Bemessungskriterien für die Komponenten des PUR-Hartschaums noch stärker verletzt. Es gilt hier jedoch weiterhin, dass die entsprechenden Bereiche nur klein sind und die Tragfähigkeit der Konstruktion nicht beeinträchtigt sein dürfte.

Da der Lastfall LF4 mit 0.05bar Innendruck nur kurzzeitig wirksam wird und Lastfälle mit Innendruck ansonsten durch Ventilregelung unterbunden werden, hat der Lastfall LF5 mit 0.1bar Innendruck nur orientierende Bedeutung, und die Konstruktion entspricht den Anforderungen.

TB 1.6.5 LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0.10bar Innendruck (EG + HWD + T95 + 0.1bar)

In diesem Lastfall wird der Innendruck noch einmal um 0.05bar auf 0.10bar erhöht. Alle anderen Eingabewerte bleiben dieselben wie im vorangegangenen Lastfall LF4.

Ergebnisse des Lastfalls LF5

Es werden alle Ergebnisse der Berechnung in der Tabelle TB 1.2.15 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---|-----------------|---------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 0.84 / -51.48 | | außen : $\max \Delta_x = 3.44$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.85 / -51.47 | | $\max \Delta_y = 3.45$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| zu [mm] | 33.23 / - 3.66 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 20.56 | -0.0911 | -3.107 | 3.445 | -18.82 | 73.67 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 17.31 | -0.0909 | -3.727 | 3.569 | -18.82 | 73.77 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.0467 | - | - | -3.08 | 38.01 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -4.26 | -0.0528 | 0.472 | 0.400 | -6.30 | -33.16 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.0539 | - | - | 5.27 | 21.74 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.0539 | - | - | 5.27 | 21.76 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00629 | -0.0968 | 0.00327 | 0.00204 | -0.00445 | 0.00818 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00501 | -0.0967 | 0.00353 | 0.00199 | -0.00445 | 0.00819 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0628 | - | - | 0.00228 | 0.00410 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.00891 | -0.156 | 0.00472 | 0.000873 | -0.0132 | -0.0123 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.158 | - | - | 0.0117 | 0.00810 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.158 | - | - | 0.00117 | 0.00808 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.69 | 2.94 | 0.676 | 0.246 | 0.570 | 0.491 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.58 | 2.93 | 0.810 | 0.255 | 0.570 | 0.492 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.14 | - | - | 0.257 | 0.253 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.53 | 3.77 | 0.787 | 0.05 | 0.787 | 0.230 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 3.85 | - | - | 1.055 | 0.151 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 3.85 | - | - | 1.055 | 0.151 |

Tab. TB 1.6.3.15 Ergebnisse des Lastfalls LF5

Durch den Innendruck von 0.1bar hat sich die Aufwölbung des Deckmoduls auf 33.23mm sowie die horizontale Aufweitung auf 51.48mm erhöht (Bild 20 des Bildteils).

Auch die Vertikalspalte an der Außenseite des Speichers haben sich erweitert (3.45mm). Die Horizontalspalte haben sich dagegen geschlossen.

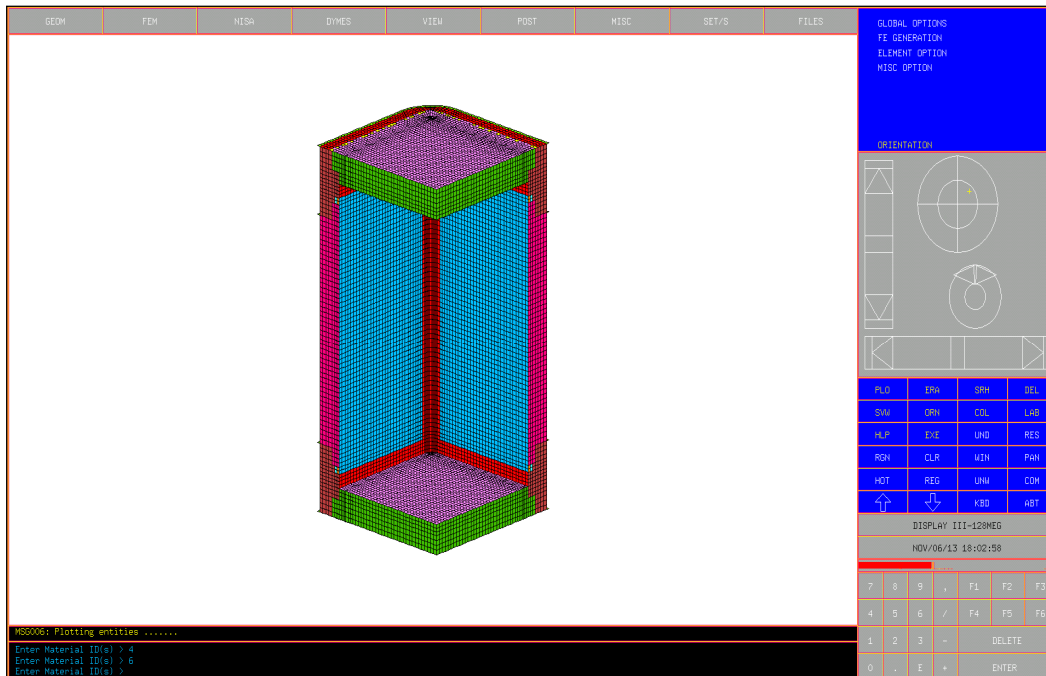
Die Bemessungskriterien für den PUR-Hartschaums werden jetzt noch deutlicher überschritten. Im GFK-Versteifungsprofil teilweise geringfügig.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass der Wärmespeicher in den Lastfällen 1 bis 3 statisch sicher ist, in den Lastfällen LF4 und LF5 jedoch nur grenzwertig.

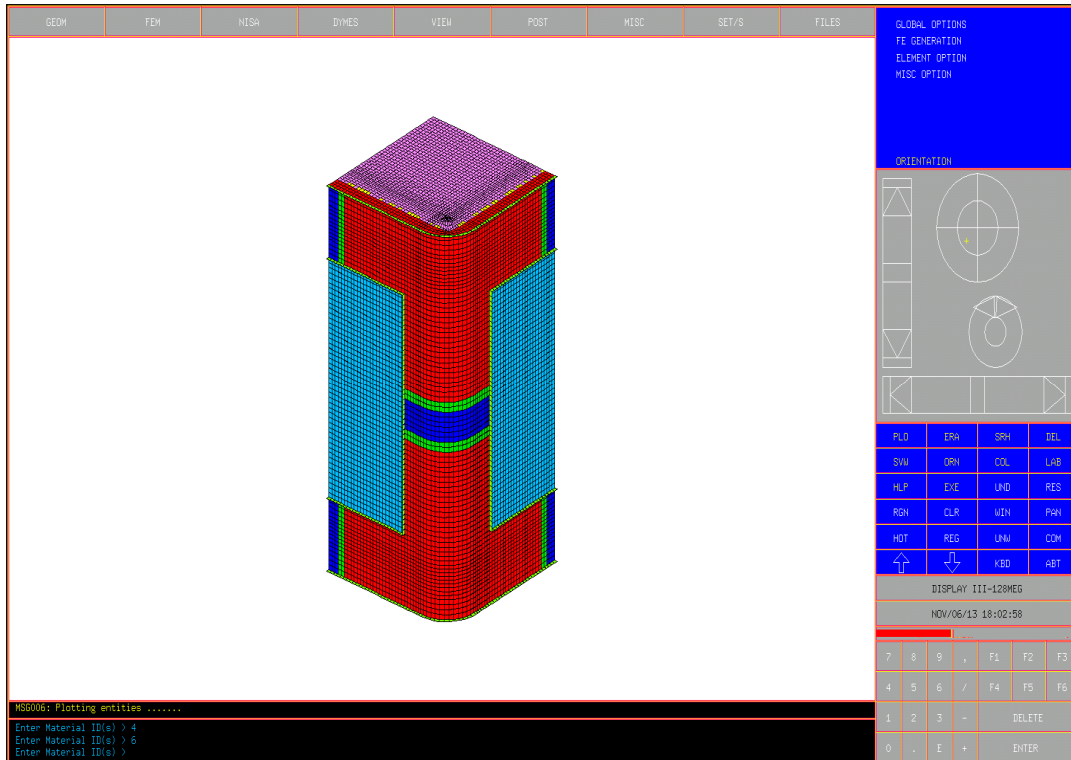
Hier sind neben den aufgezeigten Grenzen auch die Klebverbindungen zwischen Deck-/Bodenmodul und Eckmodulen hoch belastet. Die Bemessungskriterien werden zwar erfüllt, das Tsai-Wu-Kriterium zur ergänzenden Beurteilung von Laminatbeanspruchungen (hier

nicht dargestellt) erreicht für die Klebstoffschichten im Lastfall LF4 den Wert $1.36 > 1$!, im Lastfall LF5 den Wert $1.70 > 1$!.

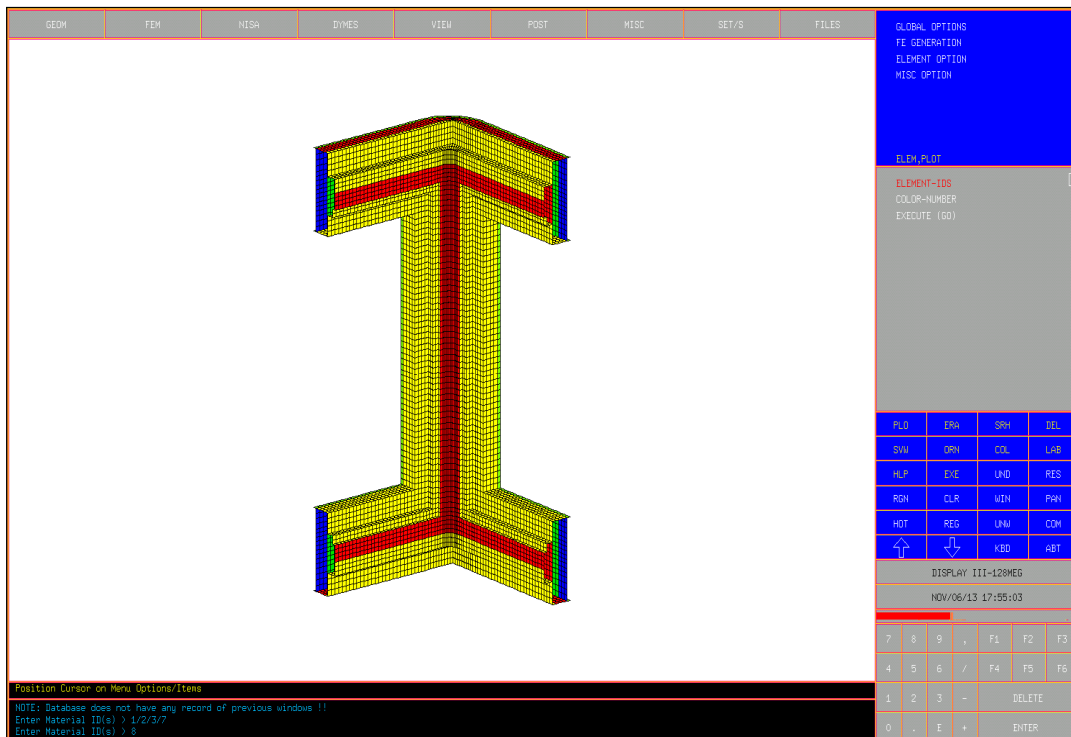
Auch die zulässigen Grenzen der Längsdehnungen ϵ_{xx} und ϵ_{yy} von 0.5% werden in den Mantellaminaten teilweise gering überschritten.



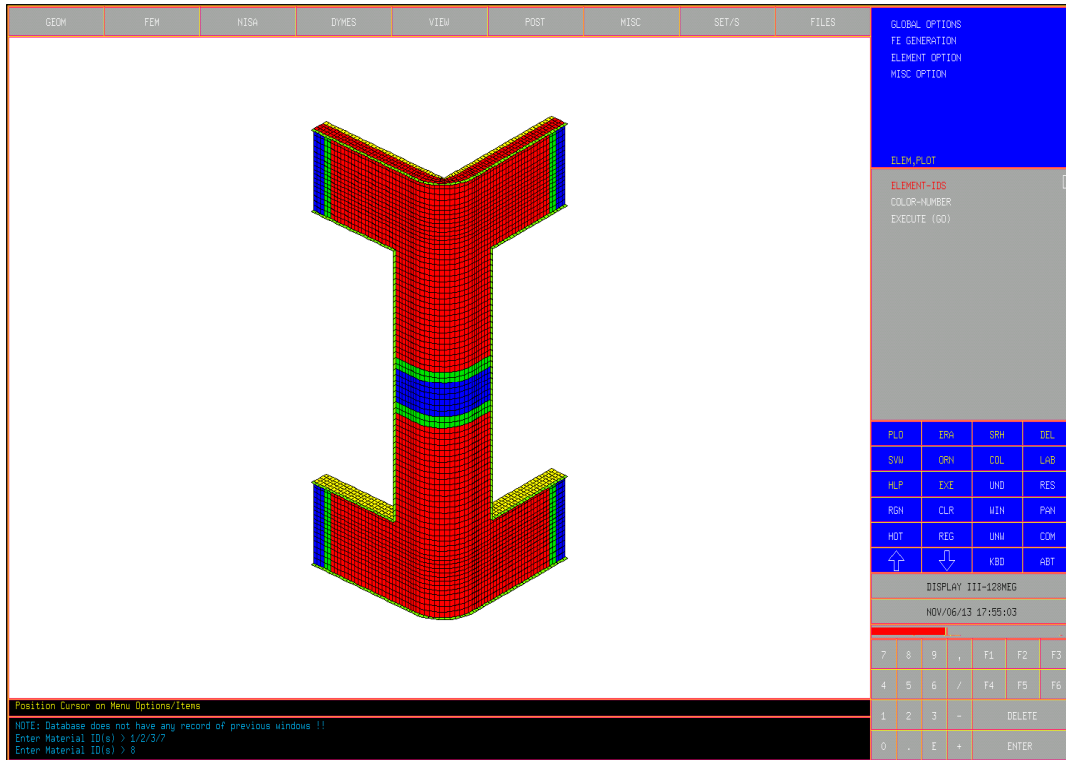
TB1.Bild 1: Viertelmodell / Sicht auf Innenseite



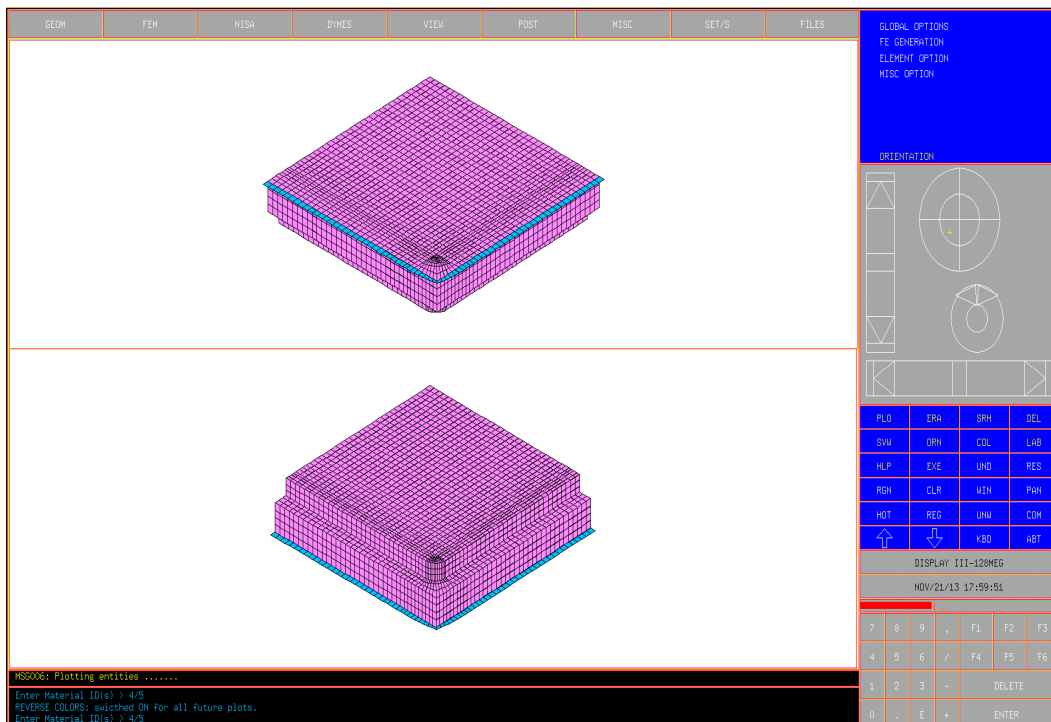
TB1.Bild 2: Viertelmodell. Sicht auf Außenseite



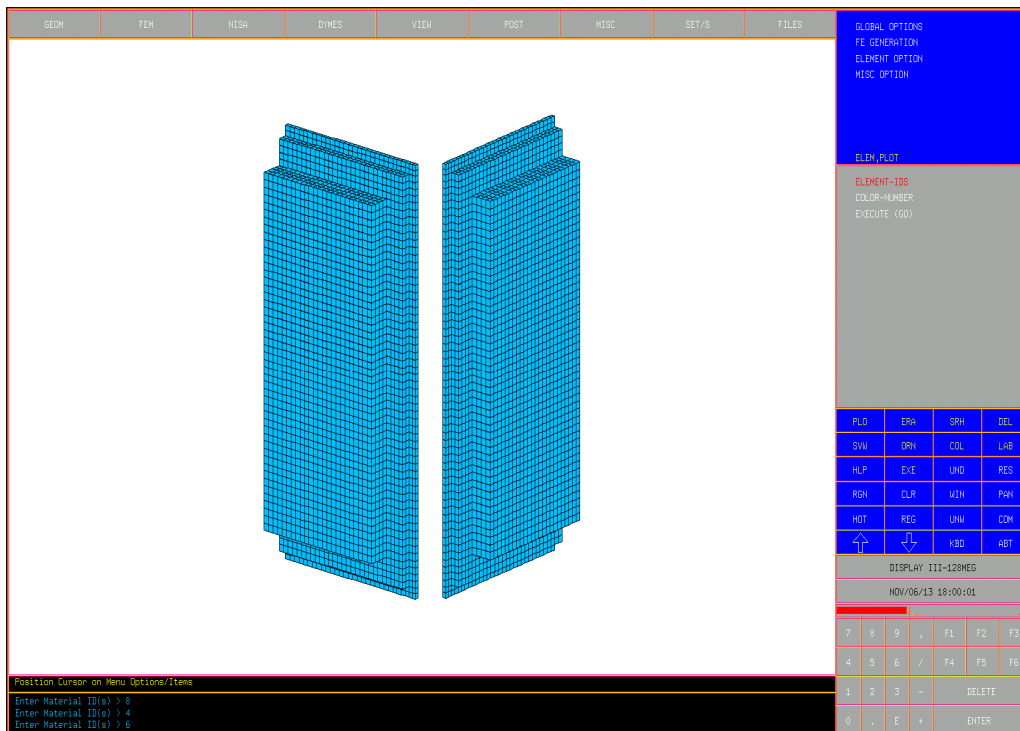
TB1.Bild 3: Eckmodule ohne PUR-Kern. Sicht auf Innenseite



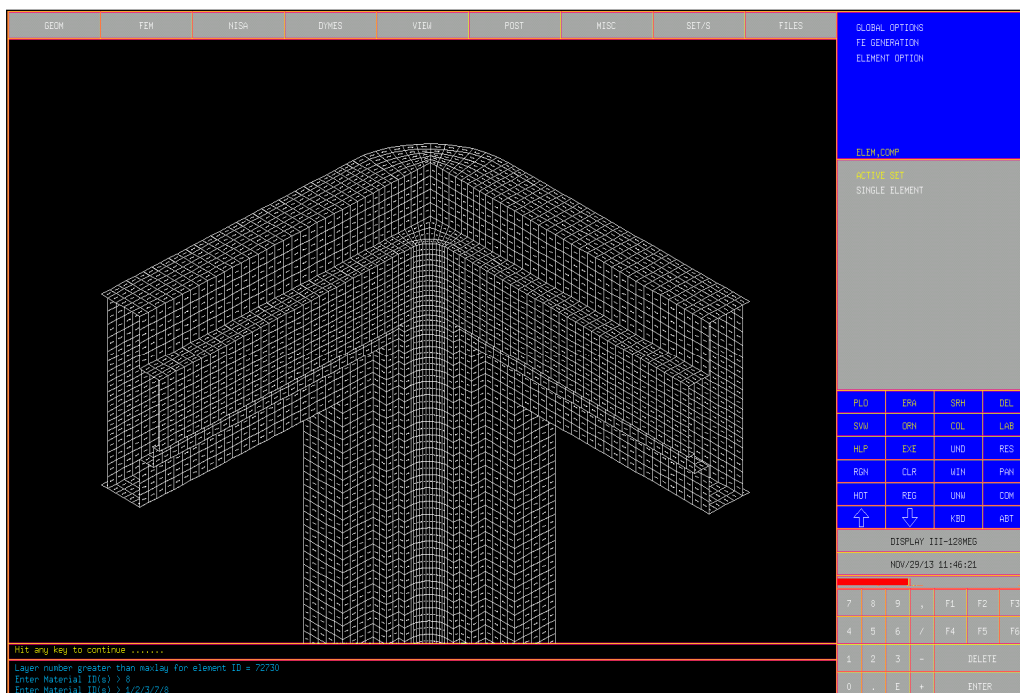
TB1.Bild 4: Eckmodule ohne PUR-Kern. Sicht auf Außenseite



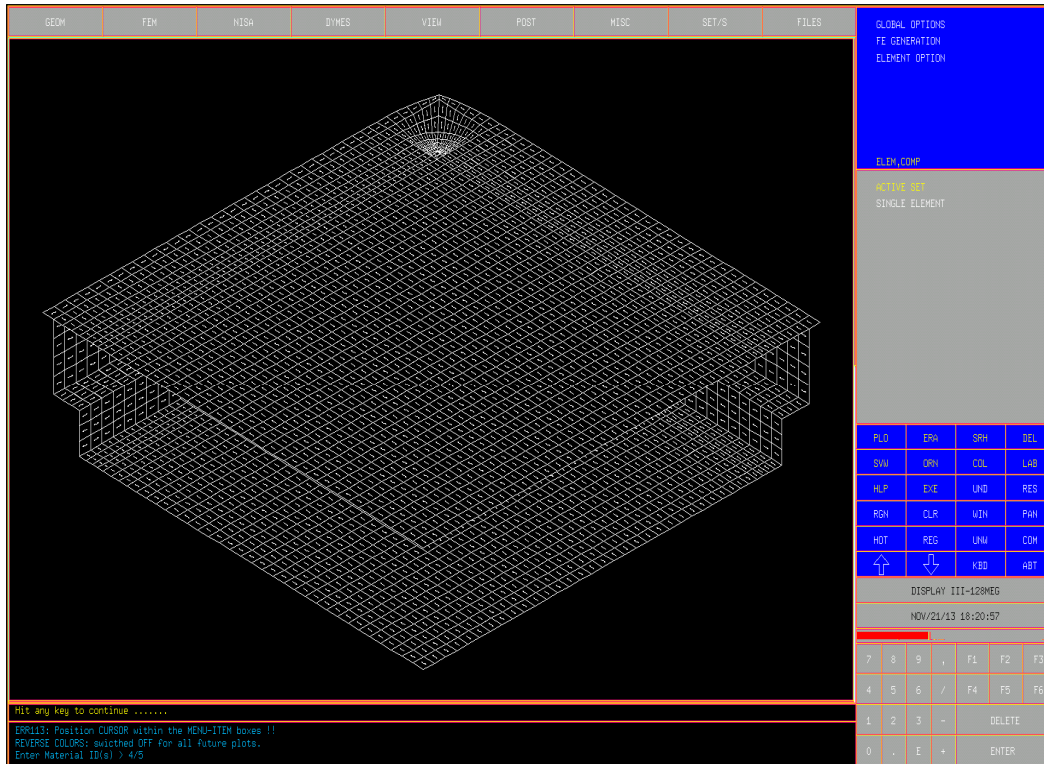
TB1.Bild 5: Boden- und Deckmodule



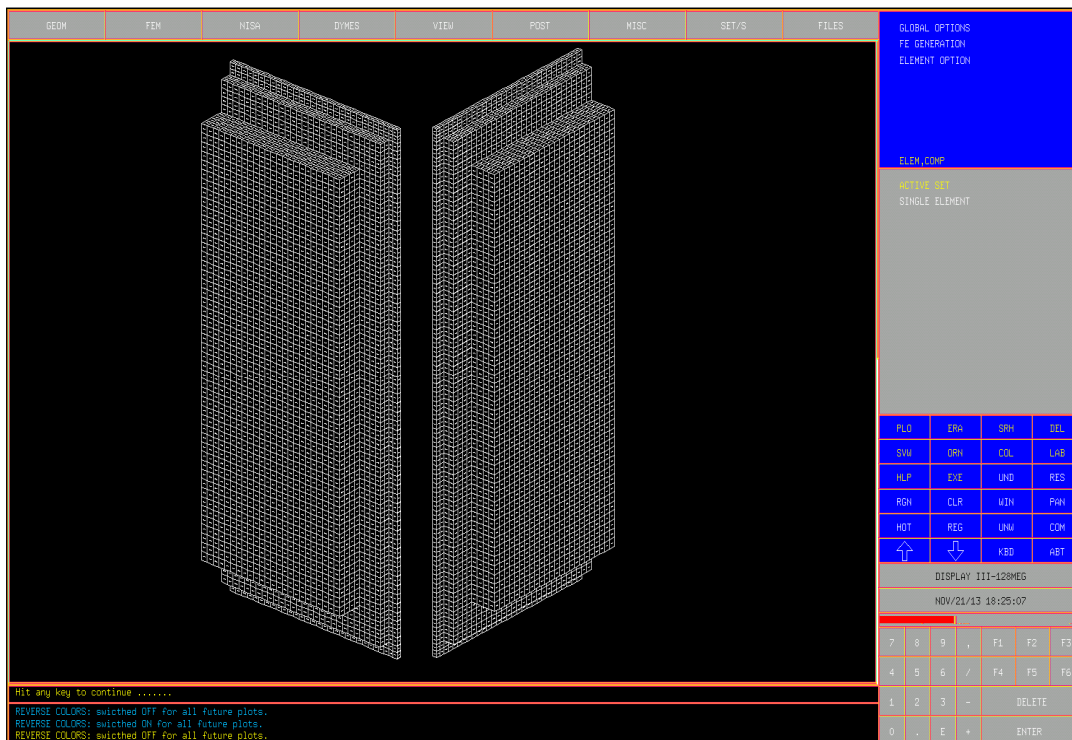
TB1.Bild 6: Seitenwand-Module



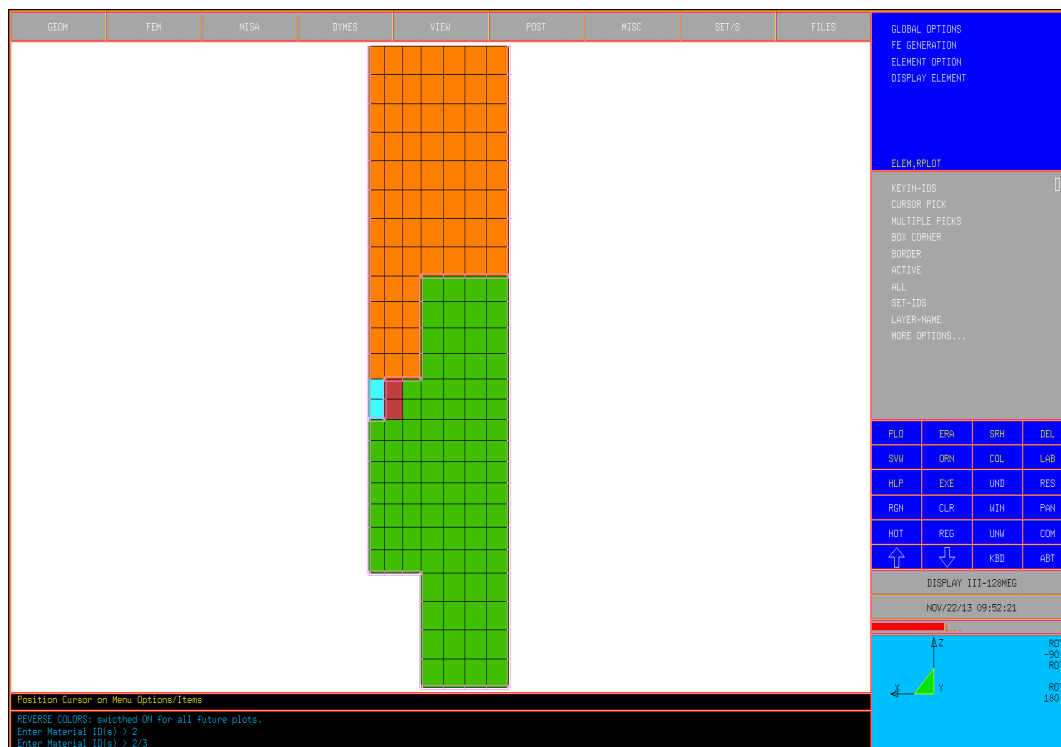
TB1.Bild 7: Materialhauptachsenrichtung x im Eckmodul-GFK-Mantel



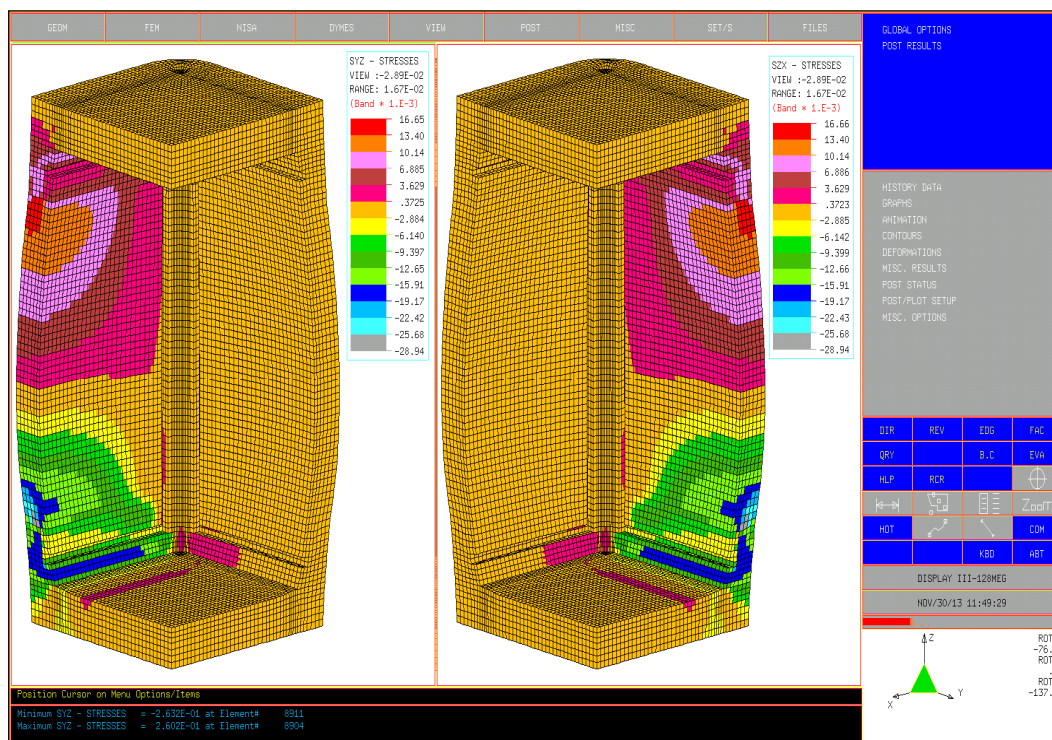
TB1.Bild 8: Materialhauptachsenrichtung x im Bodenmodul-GFK-Mantel



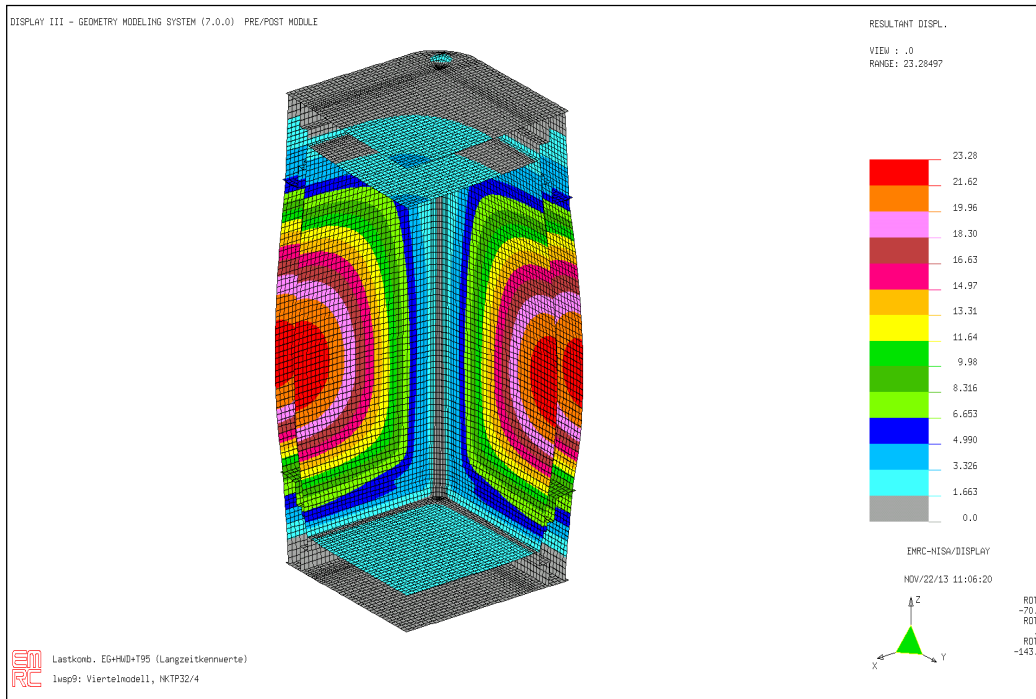
TB1.Bild 9: Materialhauptachsenrichtung x im Seitenwandmodul-GFK-Mantel



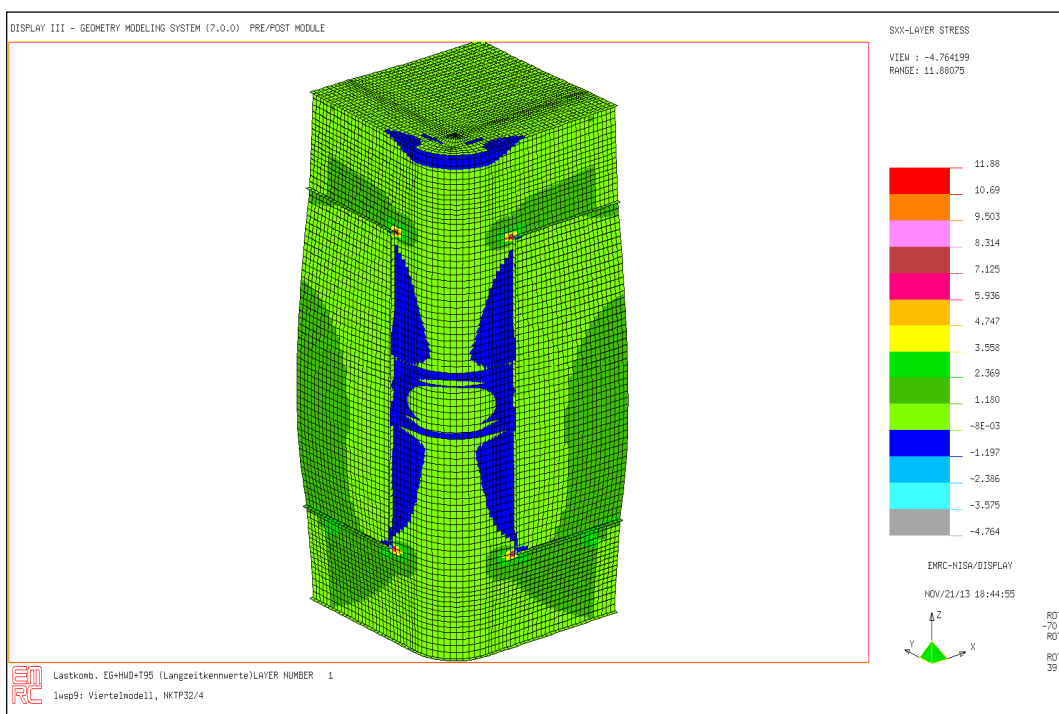
TB1.Bild 10: Einbindung der GFK-Versteifung (hellblau) in den Seitenwandmodul sowie die Alu-Schiene (braun) in den Eckmodul. Hellrosa: GFK- Mantel der Module



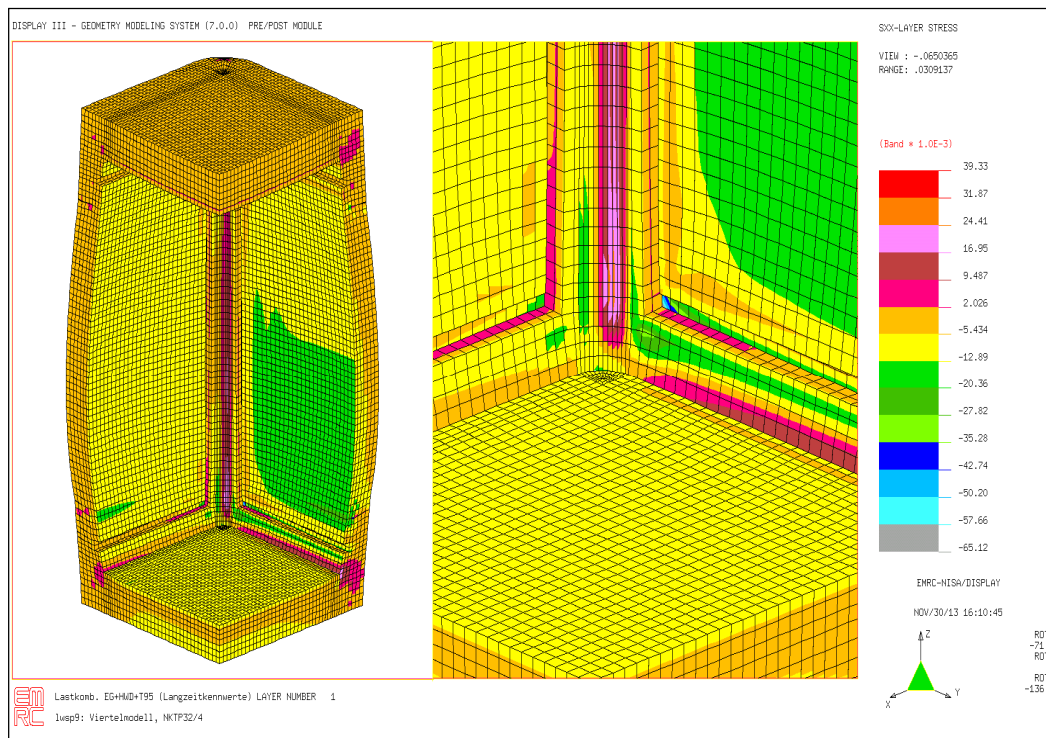
TB1.Bild 11: LF2: Spannungen σ_{yz} und σ_{xz} [N/mm²] im PUR-Hartschaum



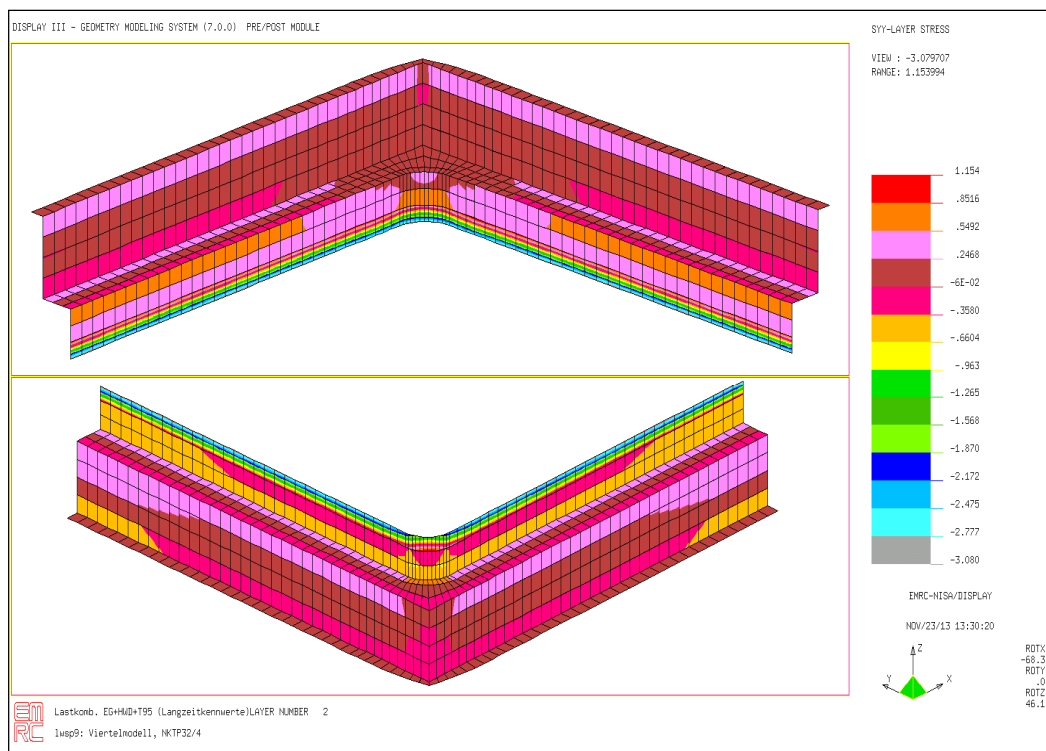
TB1.Bild 12: LF3: Resultante Verschiebung $v_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] der GFK-Modul-Mäntel (Darstellung ohne PUR- Kern)



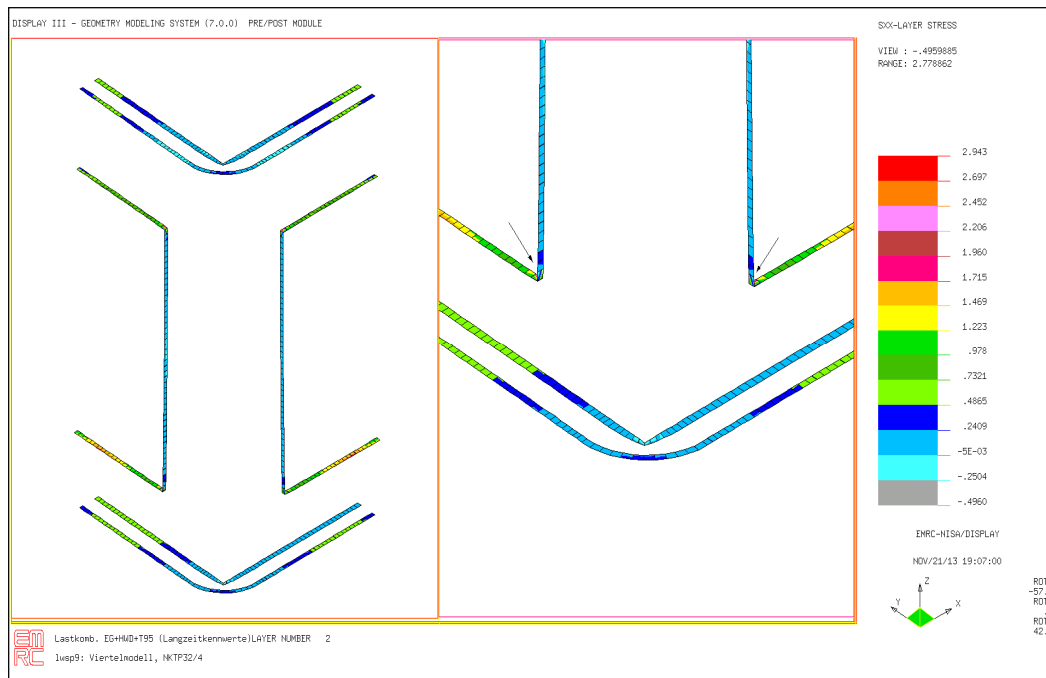
TB1.Bild 13: LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modul-Mänteln (Rückseite)



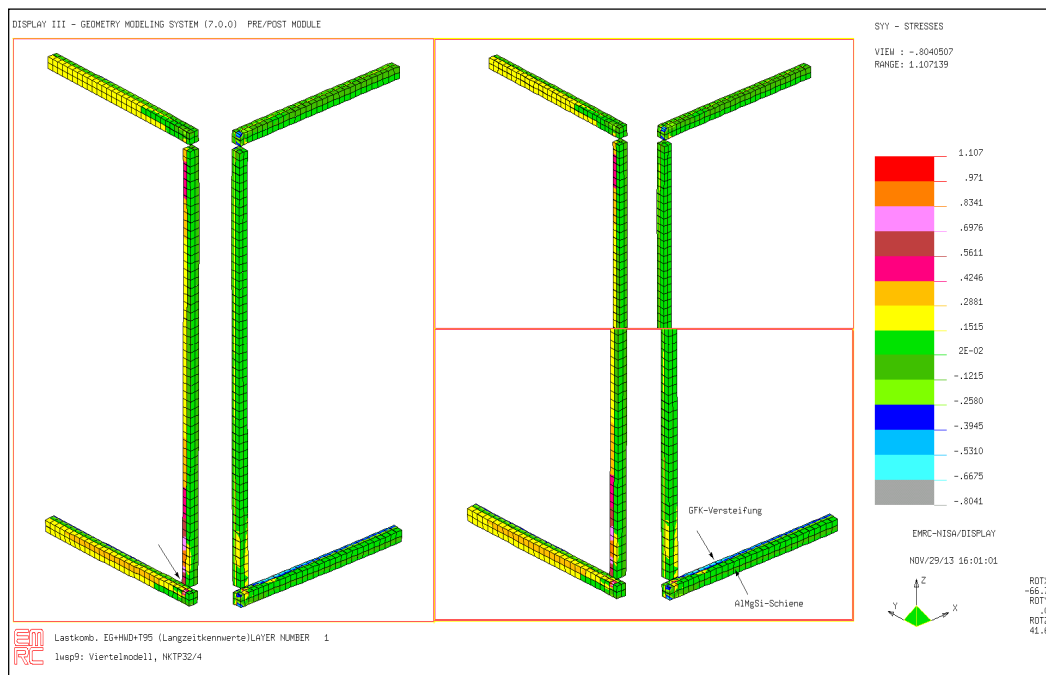
**TB1.Bild 14: LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Module.
 Rechts: Ausschnitt**



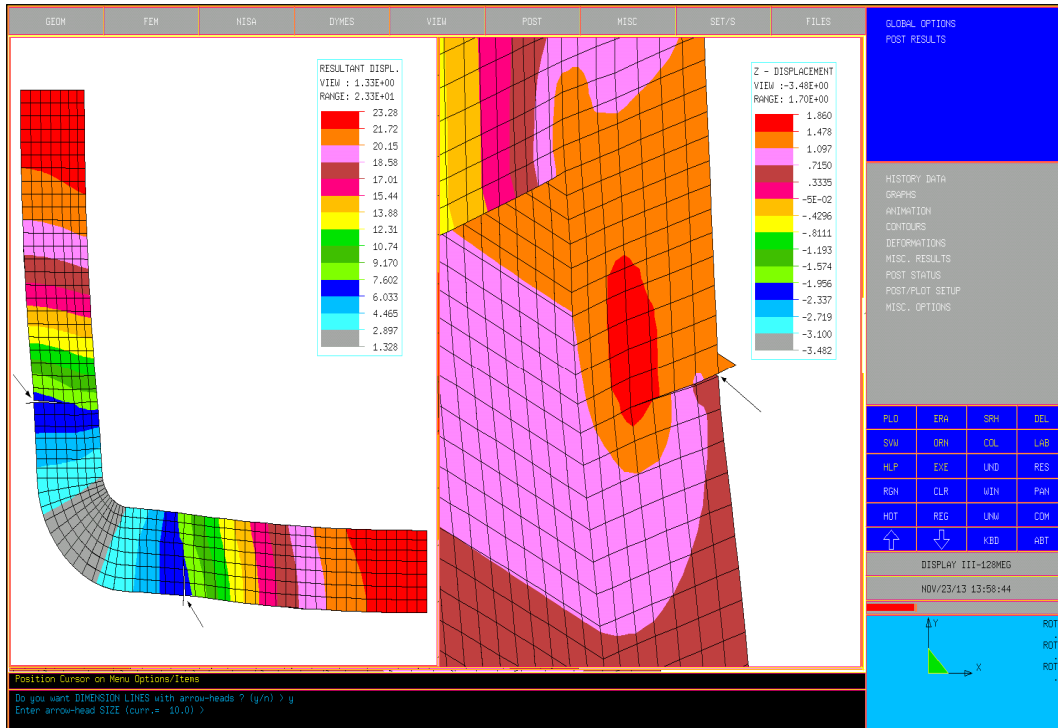
**TB1.Bild 15: LF3: Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den Klebschichten des Deck-
 und Bodenmoduls**



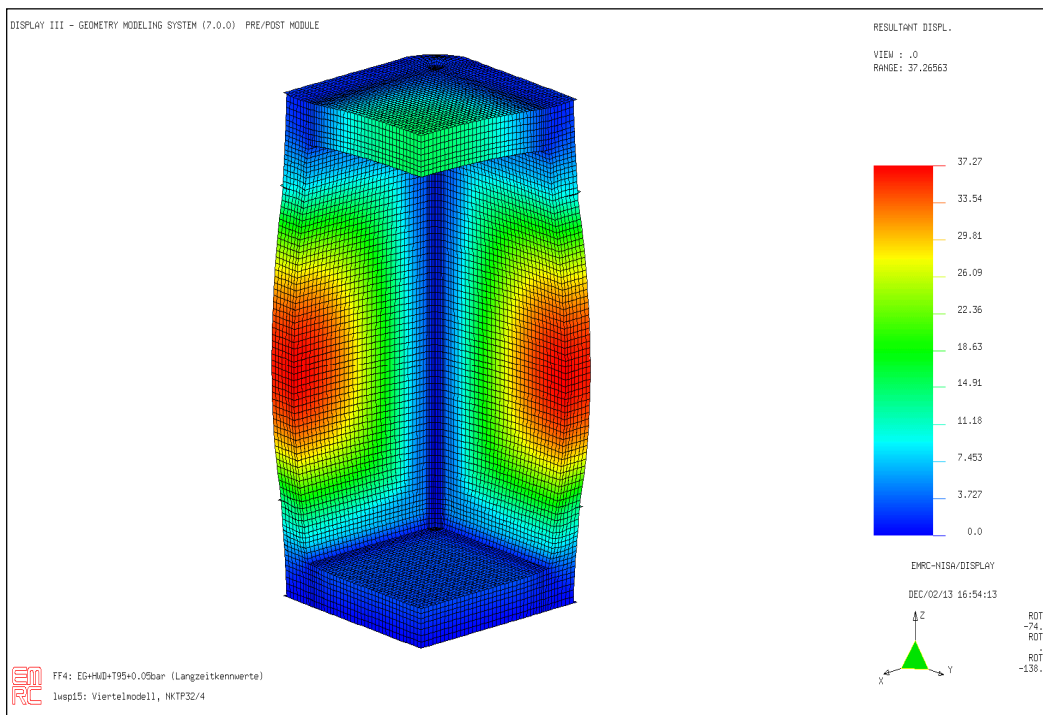
TB1.Bild 16: LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den 0.2mm starken Reinharz-Schichten in den Eckmodul- „Nasen“ und im Rand des Deck- und Bodenmoduls



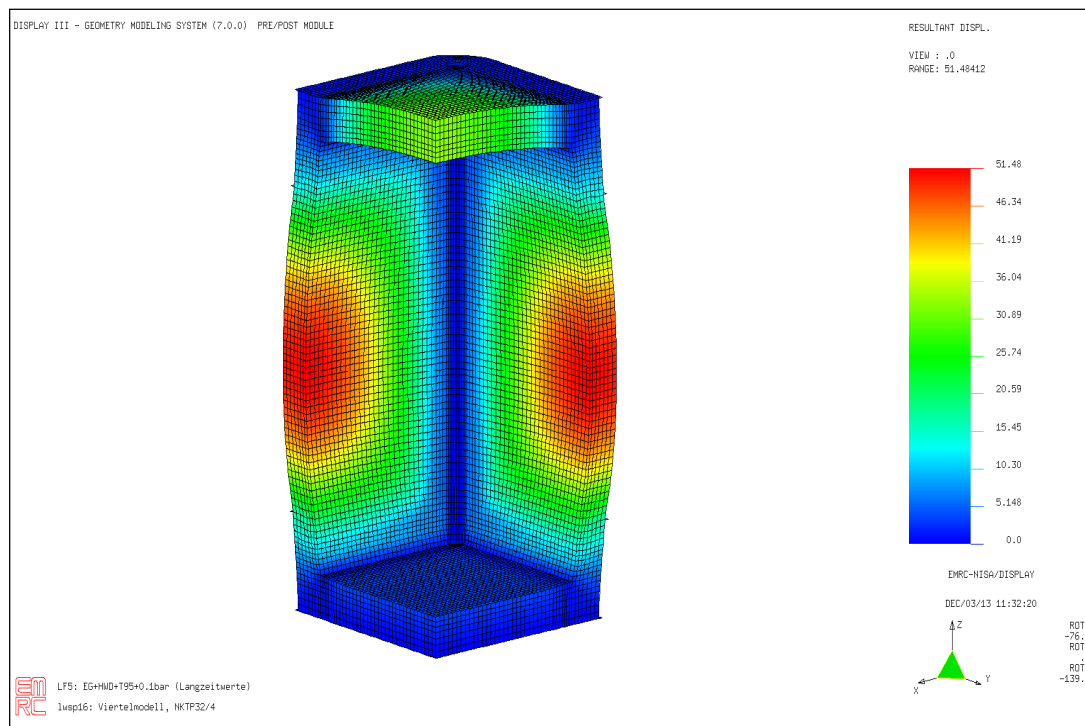
TB1.Bild 17: LF3: Spannungen σ_{yy} [N/mm²] im GFK-Versteifungsprofil und dem AIMgSi-Profil (von der Rückseite gesehen). Rechts: Ausschnitte



TB1.Bild 18: LF3: Vertikale und horizontale Spalte in der äußeren Behälterwand rundum zwischen Seitenwand- und Eckmodul



TB1.Bild 19: LF4: Resultante Verformung $v_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Wärmespeichers bei zusätzlichem Innendruck von 0.05bar



TB1.Bild 20: **LF5: Resultante Verformung $v_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Wärmespeichers bei zusätzlichem Innendruck von 0.10bar**

III.2.3.2 FEM-Teilbericht 2 als Einschub (FEM TB2)

TB2.1 Zum neuen FEM - Modell

In der vorliegenden Arbeitsstufe war es erforderlich, einen Einstiegschacht sowie Durchführungen [6] für die Zu- und Abführung der Medien im FEM-Modell des Wärmespeichers zu berücksichtigen. Durch diese Ergänzungen verlor der Speicherbehälter seine Mehrfach-Symmetrie und damit die Möglichkeit, ihn durch ein Viertelmodell in ein Modell abzubilden.

Ausgehend von dem Viertelmodell des Wärmespeichers in [4] wurde dieses auf ein Halbmodell (Bild 21 des Bildteils) erweitert, wobei alle Materialkennwerte und Lasten aus [4] in das Halbmodell unverändert übernommen wurden.

Das Halbmodell wurde zusätzlich durch die Durchführungen der Variante III (Bild 22) und den Einstiegschacht (Bild 23) entsprechend den Zeichnungsangaben [6] erweitert. Die Materialkennwerte der Lamine für den Einstiegschacht entsprechen denen der Modul-Mäntel, jedoch mit den vorgegebenen Laminatdicken. Die Material-Hauptachse x ist umlaufend horizontal orientiert, die y-Achse orthogonal dazu in der Laminebene.

Die in den Bildern 22 und 24 des Bildteils blau dargestellten Übergänge von der rechteckigen Vernetzung zur runden Medien-Rohr-Öffnung bestehen aus demselben Laminat wie der umgebende Modulk Mantel. An der Außenseite hat die Randverstärkung jedoch die Dicke von $t=8\text{mm}$

Das Medienrohr selbst mit der inneren Platte zur Abschottung wurde in unverstärktem, isotropen Polypropylen mit der Wandstärke ($t=6\text{mm}$) abgebildet. Es hat im Modell keine Lasten aufzunehmen, wurde jedoch im Modell beibehalten, da zunächst die Abdeckrosette bzw. Randverstärkung bis zum Rohr führend angenommen wurde und damit Zwängen ausgesetzt gewesen wäre.

Im Halbmodell wurden die GFK-Versteifungs-Profile im Seitenwandmodul durch geschichtete orthotrope Solid-Elemente mit eindeutiger Festlegung der Materialhauptachsen ersetzt. Die Materialhauptachse x verläuft in Längsrichtung der Profile, die y-Achse orthogonal dazu über die Breite, die z-Achse über die Dicke der Schienen. Die entsprechenden Spannungen in den Ergebnissen haben dieselbe Orientierung.

TB2.2 Berechnung der Beanspruchungen des Wärmespeichers mit dem Halbmodell

Es werden die folgenden Lastfälle für den Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet:

- LF1: Eigengewicht + Mannlast von 75kg auf einer Fläche von $A= 200 \times 75\text{mm}^2$
(EG+ML75), *NISA-File: lwsp28.dbs*
- LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+ Mannlast
(EG+HWD+ML75), *NISA-File: lwsp29.dbs*
- LF3: Eigengewicht + Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenwand von $\Delta T=75\text{K}$ + Mannlast (EG+HWD+T95+ML75), *NISA-File: lwsp30.dbs*
- LF4: EG + HWD + T95 + 0.05 bar Innendruck, *NISA-File: lwsp32.dbs*
- LF5: EG + HWD + T95 + 0.1 bar Innendruck, *NISA-File: lwsp31.dbs*

In die Lastfälle LF4 und LF5 wurde die Mannlast nicht einbezogen, um die ungünstigeren Lastfälle zu erfassen.

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen und das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

$$E_d / R_d$$

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes
(Index d kennzeichnet hier „design“)

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien [1, 5] ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Die Lastfälle LF2 bis LF5 sind Lastkombinationen. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet.

Da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind, (Die Temperatur darf 95°C nicht wesentlich überschreiten, um ein Kochen und erhöhten Dampfdruck zu vermeiden), werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt.

Für die GFK-Versteifungs-Profile und die Alu-Schienen werden in den jeweiligen Lastfällen die Biegeverformungen derselben realistisch erfasst, nicht jedoch die Spannungen in diesen [4]. Die berechneten Spannungen werden wie in [4] mit den Faktoren

GFK-Profile $F_G = E_{OG} / E_{MG} = 8300 / 607 = 13.67$
sowie

Alu-Schienen: $F_A = E_{OA} / E_{MA} = 7000 / 202 = 34.65$

multipliziert, um die realen Werte zu erhalten.

TB2.2.1 Lastfall LF1: Eigengewicht und Mannlast (EG+ML75)

Im Lastfall LF1 werden Langzeitwerte für die Materialkenngrößen verwendet, die aus den Kurzzeitwerten durch die entsprechenden Abminderungsfaktoren der Tabellen 5 und 6 [4] gewonnen werden, in denen aber der Temperatureinfluss ausgeschlossen wurde, sie sind der Tabelle 7 in [4] zu entnehmen.

Ergebnisse des Lastfalls LF1

Da die Auslastung der verwendeten Materialien wiederum sehr gering ist, werden nur die Verformungen des Speichers und die Verhältniswerte E_d / R_d in der nachfolgenden Tabelle 16 dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---------------------|-----------------|---------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 0.01 / - 0.105 | | keine | | keine | |
| U_y [mm] | 0.061 / - 0.048 | | | | | |
| u_z [mm] | 0.0 / - 3.172 | | | | | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.019 | 0.11 | 0.0092 | 0.0034 | 0.0013 | 0.0018 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.020 | 0.11 | 0.0017 | 0.0053 | 0.0018 | 0.0019 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.057 | - | - | 0.0022 | 0.0015 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.021 | 0.025 | 0.0042 | 0.0027 | 0.0034 | 0.00092 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 0.20 | - | - | 0.0070 | 0.0012 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 0.20 | - | - | 0.0123 | 0.0011 |

Tabelle TB2.1 Ergebnisse des Lastfalls LF1: EG+ML75

Für diesen Lastfall wird für alle Beanspruchungskomponenten der Materialien das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ erwartungsgemäß erfüllt. Die maximale Verformung $u_z = -3.172\text{mm}$ kennzeichnet die maximale Durchbiegung des Deckmoduls infolge des Eigengewichts und der Mannlast von 75kg. Zur Mannlast ist zu bemerken, dass sie real eine 150kg-Last für den Deckmodul darstellt, da sie infolge Symmetrie auch auf der „fehlenden“ Hälfte simuliert wird. Es wurden trotzdem 75kg angesetzt, um den Fall der durchaus realen „einbeinigen“ Lastaufbringung auf die Fläche A zu erfassen.

Im Bild 25 des Bildteils ist die nicht maßstäbliche vertikale Verformung u_z des Speichers dargestellt. Infolge der Mannlast sind die Beanspruchungen der Speicherwände höher als im Lastfall LF1 in [4], jedoch immer noch sehr gering.

TB2.2.2 Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Mannlast (EG+ HWD + ML75)

Für den Lastfall LF2 werden dieselben Langzeitwerte für die Materialkenngrößen nach Tabelle 7 in [4] verwendet wie für den Lastfall LF1.

Die nachfolgende Tabelle zeigt wieder die maximalen Verformungen des Wärmespeichers sowie die E_d / R_d –Verhältnisse:

Ergebnisse des Lastfalls LF2

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 12.85 / - 14.01 | | außen : $\max \Delta_x = 0.75$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| U_y [mm] | 4.41 / - 12.97 | | $\max \Delta_y = 0.70$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 0.36 / - 3.58 | | innen: - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.21 | 0.98 | 0.038 | 0.079 | 0.052 | 0.22 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.17 | 0.70 | 0.090 | 0.057 | 0.022 | 0.22 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.38 | - | - | 0.26 | 0.14 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.18 | 1.11 | 0.056 | 0.013 | 0.043 | 0.10 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 1.04 | - | - | 0.17 | 0.067 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.21 | - | - | 0.31 | 0.067 |

Tabelle TB2.2 Ergebnisse des Lastfalls LF2: EG + HWD+ML75

Wie der Tabelle 17 zu entnehmen ist, wird in diesem Lastfall die Grenztragfähigkeit des PUR-Hartschaumes erreicht, bzw. geringfügig überschritten, während alle anderen Materialien sehr gering ausgelastet sind.

Durch den HWD und die Mannlast werden Verformungen des Wärmespeichers von
 horizontal $u_x = - 14.01$ mm
 horizontal $u_y = - 12.97$ mm
 vertikal $u_z = - 3.58$ mm
 errechnet. Bild 26 zeigt die resultanten Verformungen u_R maßstäblich.

Bild 27 des Bildteils zeigt die Spannungen σ_{xz} mit dem größten E_d / R_d -Verhältnis PUR-Hartschaum. Die Bereiche maximaler Beanspruchung sind deutlich zu erkennen. Sie werden z.T in den Durchführungen erreicht, jedoch nicht in allen.

Auch für diesen Lastfall wird für die Beanspruchungskomponenten der Materialien das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ bis auf PUR deutlich erfüllt, für den PUR-Hartschaum nur geringfügig und unbedeutend überschritten.

TB2.2.3 LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + Mannlast (EG + HWD + T95 + ML75)

Im Gegensatz zu en vorangegangenen Lastfällen LF1 und LF2 ist zur Ermittlung der Langzeitkennwerte für die verwendeten Materialien hier der Temperatureinfluss mit zu berücksichtigen, so dass die Abminderungsfaktoren der Tabellen 10 und 11 in [4] zum Tragen kommen. Die daraus für diesen Lastfall folgenden Materialkennwerte sind der Tabelle 12 in [4] zu entnehmen.

Ergebnisse des Lastfalls LF3

In der nachfolgenden Tabelle 18 werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---|----------------|------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 22.83 / -25,12 | | außen : $\max \Delta_x = 1.44$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.62 / -23.12 | | $\max \Delta_y = 1.82$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| zu [mm] | 1,72 / - 8.18 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 11.87 | -0.064 | -2.85 | 2.25 | 5.49 | 39.50 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 9.97 | -0.066 | -3.11 | 2.03 | 3.14 | 38.81 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.033 | - | - | -7.38 | 20.79 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.27 | -0.036 | -0.42 | 0.32 | 1.26 | -20.44 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.032 | - | - | 2.73 | 10.05 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.033 | - | - | 4.24 | -10.05 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00364 | -0.0681 | 0.00348 | 0.00125 | 0.00217 | 0.00441 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00344 | -0.0699 | 0.00283 | 0.00114 | 0.00217 | 0.00434 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0375 | - | - | 0.00413 | 0.00244 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.00685 | -0.108 | 0.00421 | 0.000694 | -0.00262 | -0.00774 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.0951 | - | - | 0.00603 | 0.00377 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.0982 | - | - | 0.00932 | 0.00383 |

| | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|-------|------|-------|
| E_{dx} / R_{dx} | 0.40 | 2.06 | 0.62 | 0.16 | 0.18 | 0.26 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.33 | 2.13 | 0.68 | 0.14 | 0.11 | 0.26 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.80 | | - | 0.62 | 0.14 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.41 | 2.57 | 0.70 | 0.040 | 0.16 | 0.14 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 2.28 | - | - | 0.55 | 0.070 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.36 | - | - | 0.85 | 0.072 |

Tabelle TB2.3: Ergebnisse des Lastfalls LF3: EG+HWD+T95+ML75

Durch den HWD, die Innentemperatur und die Mannlast werden jetzt maximale Verformungen des Wärmespeichers von

horizontal $u_x = - 25.12$ mm
 horizontal $u_y = - 23.12$ mm
 vertikal $u_z = - 8.18$ mm

ausgewiesen. Bild 28 des Bildteils zeigt die daraus folgende resultante Verformung maßstäblich. Zu erkennen ist, dass die Medienrohre der Durchführung deutlich von der zentrischen Lage abweichen. Diese Abweichung wird allein von der Verformung der inneren Mantelwand des Seitenwandmoduls bestimmt.

Im Bild 29 sind die Orte der maximalen Laminat- Spannungen σ_{xx} des Wärmespeichers dargestellt. Sie liegen in den Innenecken der Eck-Module. Dasselbe gilt auch für die maximalen Spannungen σ_{yy} . Die Bereiche sind sehr, sehr klein, was die rechte Vergrößerung deutlich macht

Der Tabelle TB2.3 ist zu entnehmen, dass der PUR-Hartschaum das Bemessungs- Kriterium $E_d / R_d \leq 1$ bis auf eine Ausnahme nicht erfüllt. Diese Überschreitung der Tragfähigkeitsgrenze liegt jedoch nur in kleinen Bereichen vor allem in den Winkelecken vor. Bild 30 zeigt beispielhaft die σ_{xx} - und σ_{yy} - Spannungen im PUR-Hartschaum. Nur Bereiche mit den Farben grau bis dunkelblau verletzen das Bemessungskriterium ($R_{dx} = R_{dy} = 0.031 \text{ N/mm}^2$ für Druck). Im Zugbereich liegt keine Überschreitung des Bemessungskriteriums vor..

Bild 31 zeigt beispielhaft die Spannungen σ_{xy} und σ_{xz} . Im PUR-Hartschaum. Das Maximum der Spannungen σ_{xy} liegt in den Winkelecken des Speichers. Das Maximum der Spannungen σ_{xz} in Durchführungen und einem schmalen Bereich zwischen Seitenwandmodul und Eckmodul Außenwand).

Die Überschreitungsbereiche werden durch die Farbbereiche grau bis dunkelblau und braun bis rot gekennzeichnet ($R_{dxz} = R_{dxy} = 0.014 \text{ N/mm}^2$), sie sind relativ klein und werden als unbedeutend für die Tragfähigkeit der Speicherwände bewertet.

Die Auslastungen der anderen Materialien ist gering bis angemessen und erfüllen das Bemessungskriterium.

Bild 32 zeigt die σ_{xy} -Spannungen, die den größten E_d / R_d – Wert aufweisen, für die Kleberschicht zwischen Boden/Deck-Modul und den Eckmodulen. Die maximal mögliche σ_{zz} -Zugspannung quer zur Kleberfläche beträgt 0.04 N/mm^2 (Tabelle 18).

Hervorzuheben ist die Verformung der Speicherwand von $\max u_x = -25.12 \text{ mm}$. Sie liegt mit 0.0157 etwas über $1/70$ der Spannweite. Horizontalspalte werden nicht mehr ausgewiesen.

TB2.2.4 LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0.05bar Innendruck (EG + HWD + T95 + 0.05 bar)

Als Eingabewerte für die Materialien werden dieselben Werte wie für den Lastfall LF3 verwendet (Tabelle 12 in [4]). Der Innendruck von 0.05bar wurde auf alle Innenwände einschließlich der Innenwand des Deckmoduls und die des Einstiegschachtes mit Deckel zusätzlich aufgebracht.

Ergebnisse des Lastfalls LF4

Auch für diesen Lastfall werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 19 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---|-----------------|---------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 36.48 / -40.30 | | außen : $\max \Delta_x = 2.71$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.34 / -36.95 | | $\max \Delta_y = 2.43$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| z_u [mm] | 13.38 / - 2.94 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 16.43 | -0.0922 | -2.96 | 3.05 | 6.04 | 55.75 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 13.94 | -0.0772 | -3.37 | 2.95 | 3.36 | 55.50 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.0362 | - | - | -9.42 | 29.91 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -4.27 | -0.0469 | 0.430 | 0.46 | -1.38 | -28,31 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.0407 | - | - | 3.06 | 14.56 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.0503 | - | - | 5.02 | 14.60 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00502 | -0.0851 | 0.00357 | 0.00170 | 0.00226 | 0.00617 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00457 | -0.0819 | 0.00311 | 0.00165 | 0.00225 | 0.00615 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0484 | - | - | -0.00583 | 0.00362 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.00893 | -0.139 | 0.00430 | 0.00100 | 0.00289 | -0.0105 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.120 | - | - | 0.00679 | 0.00541 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.149 | - | - | 0.01113 | 0.00552 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.55 | 2.97 | 0.64 | 0.22 | 0.20 | 0.37 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.46 | 2.49 | 0.73 | 0.21 | 0.11 | 0.37 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.88 | - | - | 0.78 | 0.20 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.53 | 3.35 | 0.72 | 0.057 | 0.17 | 0.20 |
| E_{dvz} / R_{dvz} | - | 2.91 | - | - | 0.61 | 0.10 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 3.59 | - | - | 1.00 | 0.10 |

Tabelle TB2.4: Ergebnisse des Lastfalls LF4: EG+HWD+T95+0.05bar

Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, dass der Deckmodul jetzt durch den zusätzlichen Innendruck eine deutliche Aufwölbung auf 13.38mm erfährt und die horizontale Wandverformung auf 40.30mm angewachsen ist (Bild 33 des Bildteils).

Ferner sind auch die Bemessungskriterien für die Komponenten des PUR-Hartschaums stärker verletzt. Bild 34 zeigt die σ_{xz} und σ_{xy} -Spannungen mit den höchsten E_d / R_d – Werten in den PUR-Hartschaum-Kernen. Die Farbbereiche, innerhalb derer das Bemessungskriterium jeweils verletzt ist, liegen zwischen grau und hellgrün bzw. zwischen braun und rot.

Es wird eingeschätzt, dass für eine kurzzeitige Innendruckbelastung von 0.05bar die Integrität des Speichers dennoch gesichert bleibt.

TB2.2.5 LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz+ 0.10bar Innendruck (EG + HWD + T95 + 0.1 bar)

In diesem Lastfall wird ein zusätzlicher Innendruck von 0.1 bar einbezogen, der auf alle Innenwände, einschließlich die des Einstiegschachtes, wirkt. Alle anderen Eingabewerte bleiben dieselben wie im vorangegangenen Lastfall LF4.

Ergebnisse des Lastfalls LF5

Es werden alle Ergebnisse der Berechnung in der Tabelle 20 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---|----------------|------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|---------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 51.32 / -54.78 | | außen : $\max \Delta_x = 3.65$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.69 / -51.23 | | $\max \Delta_y = 3.4$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 25.80 / - 3.65 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 21.52 | -0.119 | -3.12 | 3.87 | 6.89 | 78.52 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 17.84 | -0.089 | -3.74 | 4.03 | 3.57 | 77.65 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.047 | - | - | -11.70 | 37.80 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -5.59 | -0.064 | 0.46 | 0.63 | 1.59 | -37.28 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.054 | - | - | 3.62 | 20.45 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.067 | - | - | 6.14 | 20.79 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00660 | -0.1121 | 0.00376 | 0.00217 | 0.00240 | 0.00873 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00515 | -0.0946 | 0.00425 | 0.00225 | 0.00242 | 0.00863 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0629 | - | - | -0.00800 | 0.00459 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.0117 | -0.1862 | 0.00456 | 0.00137 | 0.00333 | -0.0139 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.1580 | - | - | -0.00802 | 0.00760 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.1984 | - | - | 0.00136 | 0.00772 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.72 | 3.84 | 0.68 | 0.28 | 0.23 | 0.52 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.59 | 2.88 | 0.81 | 0.29 | 0.12 | 0.52 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.13 | - | - | 0.97 | 0.25 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.70 | 4.55 | 0.77 | 0.078 | 0.20 | 0.26 |
| E_{dvy} / R_{dvy} | - | 3.84 | - | - | 0.72 | 0.14 |
| E_{dzz} / R_{dzz} | - | 4.79 | - | - | 1.23 | 0.14 |

Tabelle TB2.2.5: Ergebnisse des Lastfalls LF5: EG+HWD+T95+0.1bar

Wie Tabelle TB2.2.5 deutlich macht, werden in den PUR-Hartschaum-Kernen für alle Beanspruchungskomponenten die Bemessungskriterien überschritten.

Das Bemessungskriterien für σ_{xz} wird auch in den GFK-Verstärkungs-Profilen gering-fügig überschritten.

Durch den Innendruck von 0.1bar ergibt sich eine Aufwölbung des Deckmoduls von 25.80.mm sowie eine maximale horizontale Seitenwand-Verformung u_x von 54.78mm.

Im Bild 35 des Bildteils ist die resultante Verformung u_R des Wärmespeichers maßstäblich dargestellt. Die Medien-Rohre weichen hier beträchtlich von der zentrischen Lage in den Durchführungen ab, sie liegen teilweise seitlich an.

Bild 36 zeigt die Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} mit den höchsten E_d / R_d – Werten in den PUR-Kernen der Speicherwände. Bereiche mit Farben von grau bis dunkelgrün und nunmehr violett bis rot überschreiten das Bemessungskriterium. Die Bereiche nehmen eine beträchtliche Fläche bzw. einen beträchtlichen Raum ein.

Die Öffnungsangaben zu den Vertikalspalten sind sehr theoretische Werte und in der Größe nicht zu erwarten. Die Horizontalspalte sind geschlossen, auch der Vertikalspalt in der Seitenwand mit Durchführungen.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass der Wärmespeicher in den Lastfällen 1 bis 3 statisch auch nach Berücksichtigung des Einstiegschachtes und der Durchführungen sicher ist und den Anforderungen entspricht.

Für den Lastfall LF4 kann das für eine geplante kurzzeitige Innendruckbelastung von 0.05 bar ebenfalls bestätigt werden, wenn man berücksichtigt, dass der Langzeitenfluss mit dem Faktor 2.0 für die Festigkeit des PUR-Hartschaums berücksichtigt wurde. Damit sind nur die Farbbereiche grau bis mittelblau und orange bis rot in Bild 34 Bereiche, in denen das Bemessungskriterium überschritten wird. Sie werden als unerheblich eingeschätzt.

Da Lastfälle mit Innendruck durch Ventilregelung unterbunden werden, hat der Lastfall LF5 mit 0,1bar Innendruck nur orientierende Bedeutung.

Im Lastfall LF5 sind die Bereiche, in denen das Bemessungskriterium in den PUR-Hartschaum - Kernen überschritten werden, erheblicher.

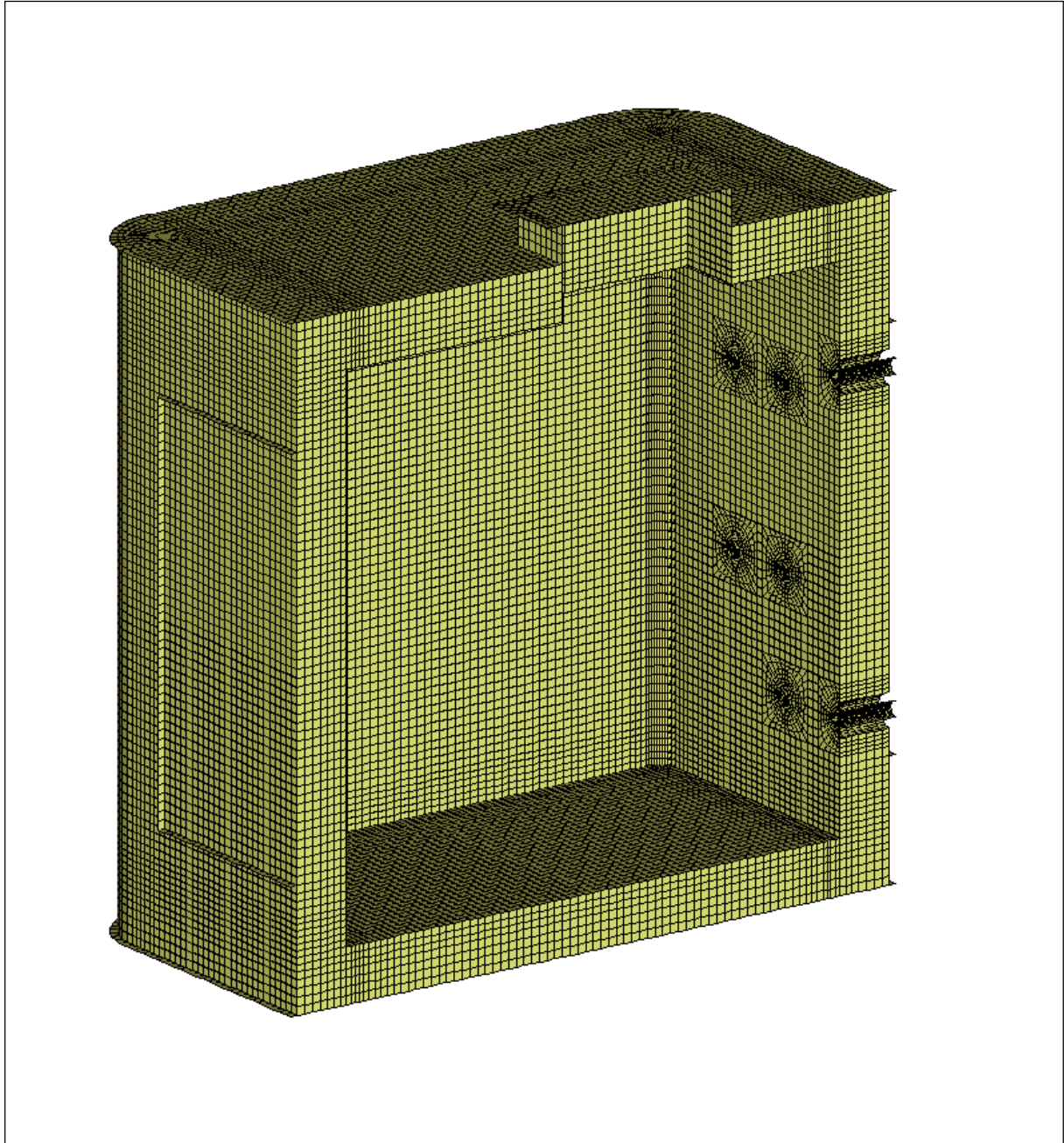
Hier sind neben den aufgezeigten Grenzen auch die Klebverbindungen zwischen Deck-/ Bodenmodul und Eckmodulen relativ hoch belastet. Die Bemessungskriterien werden zwar erfüllt, das Tsai-Wu-Kriterium zur ergänzenden Beurteilung von Laminatbeanspruchungen (hier nicht dargestellt) erreicht für die Klebstoffschicht im Lastfall LF5 den Wert $1.72 > 1$!.

Auch die zulässigen Grenzen der Längsdehnungen ϵ_{xx} und ϵ_{yy} von 0.5% werden in den Mantellaminaten teilweise erreicht bzw. gering überschritten.

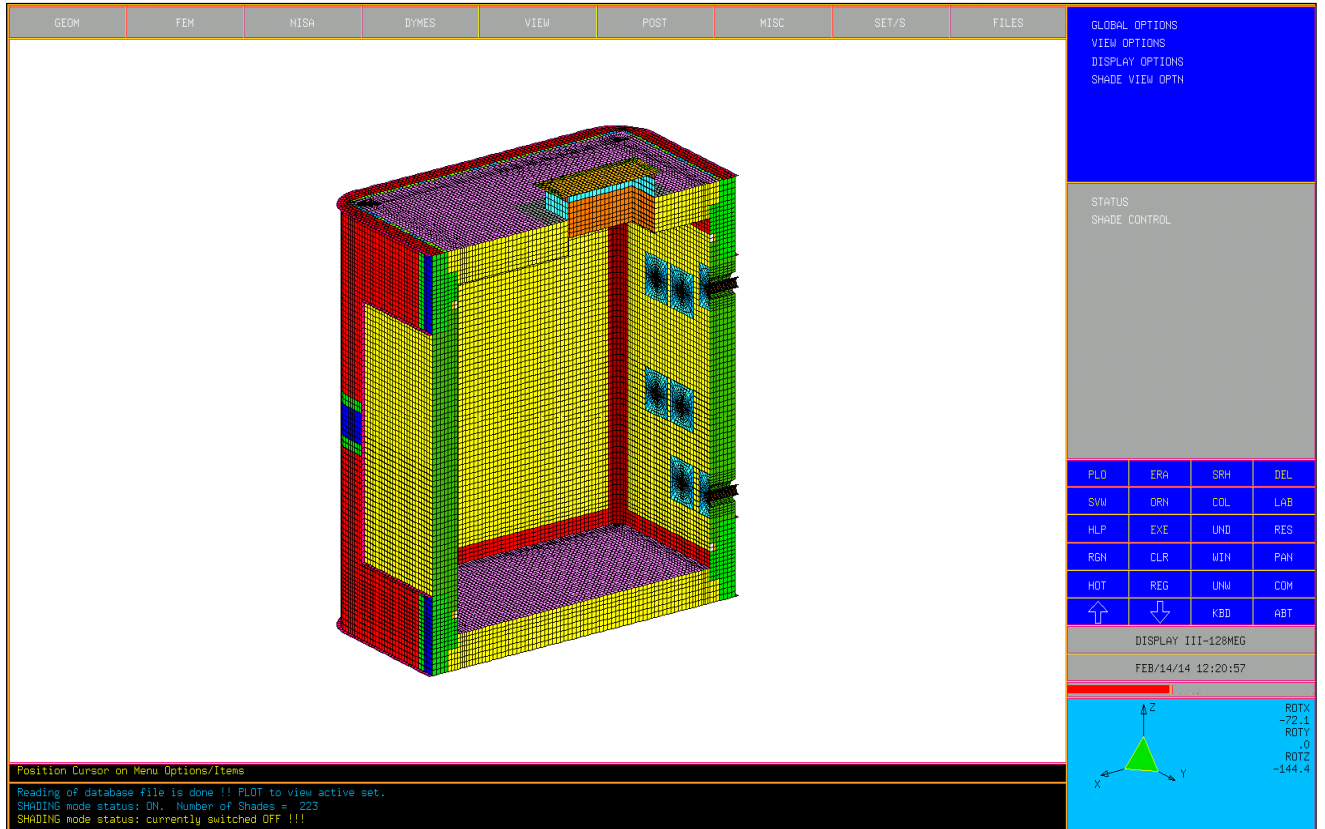
Es wird eingeschätzt, dass die Integrität des Wärmespeichers in der gegenwärtigen Ausführung für diesen Lastfall nicht gewährleistet ist.

Bemerkung:

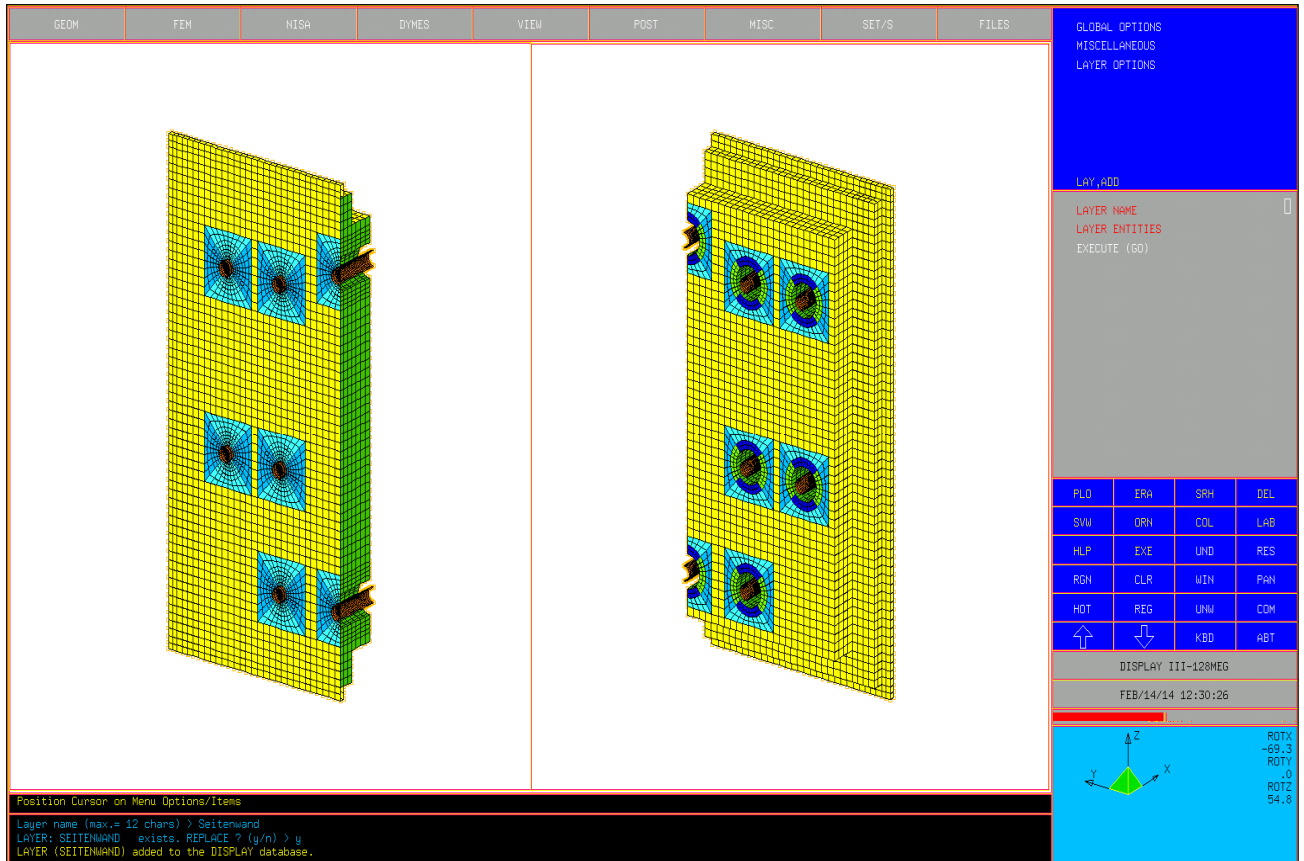
Durch die Konzeption der Durchführungen der Variante III werden die PUR-Hartschaum-Beanspruchungen in den Bereichen der Durchführungen deutlich erhöht. Ferner muss davon ausgegangen werden, dass jede Bewegung der Medienanschlüsse relativ zum Speicher zur Beanspruchung des inneren Laminatmantels führt. Eine Verbesserung wäre angezeigt.



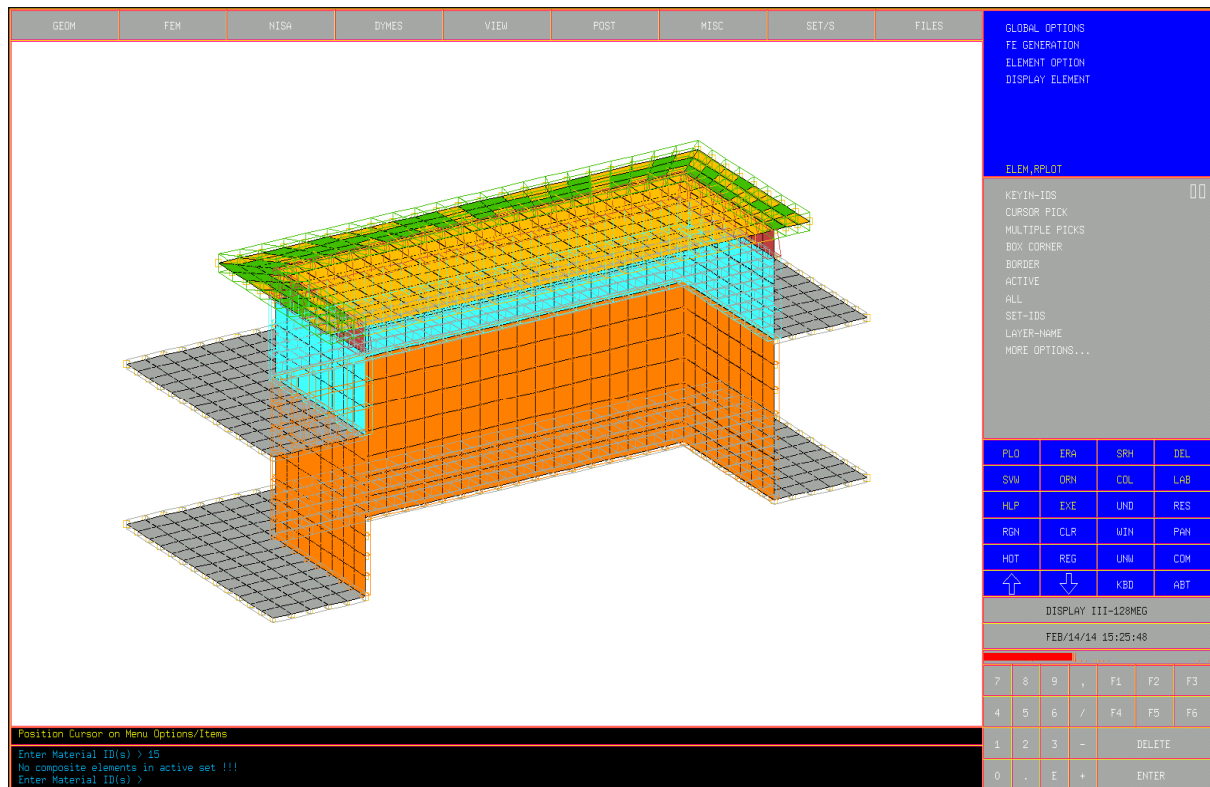
Darstellung1. Halbmodell des 4m³ Labor--Wärmespeicher



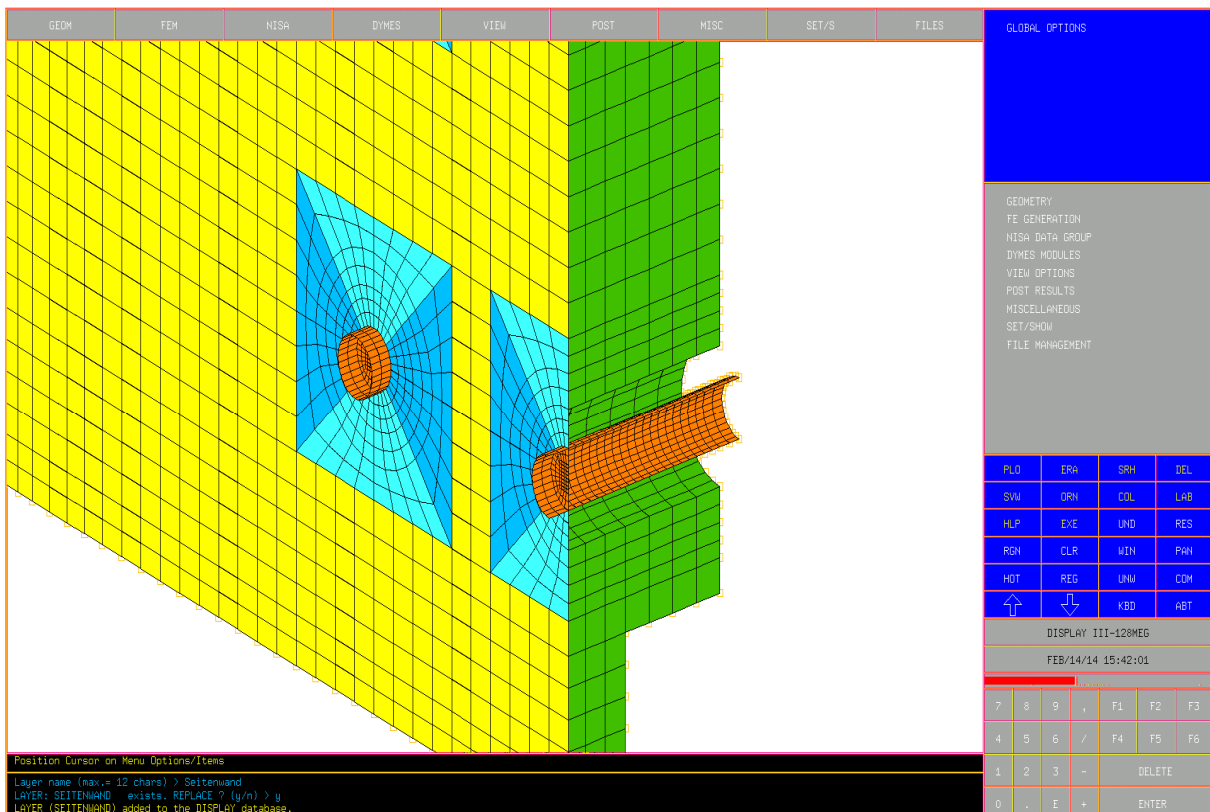
TB1.Bild 21: Halbmodell mit Einstiegschacht und Durchführungen



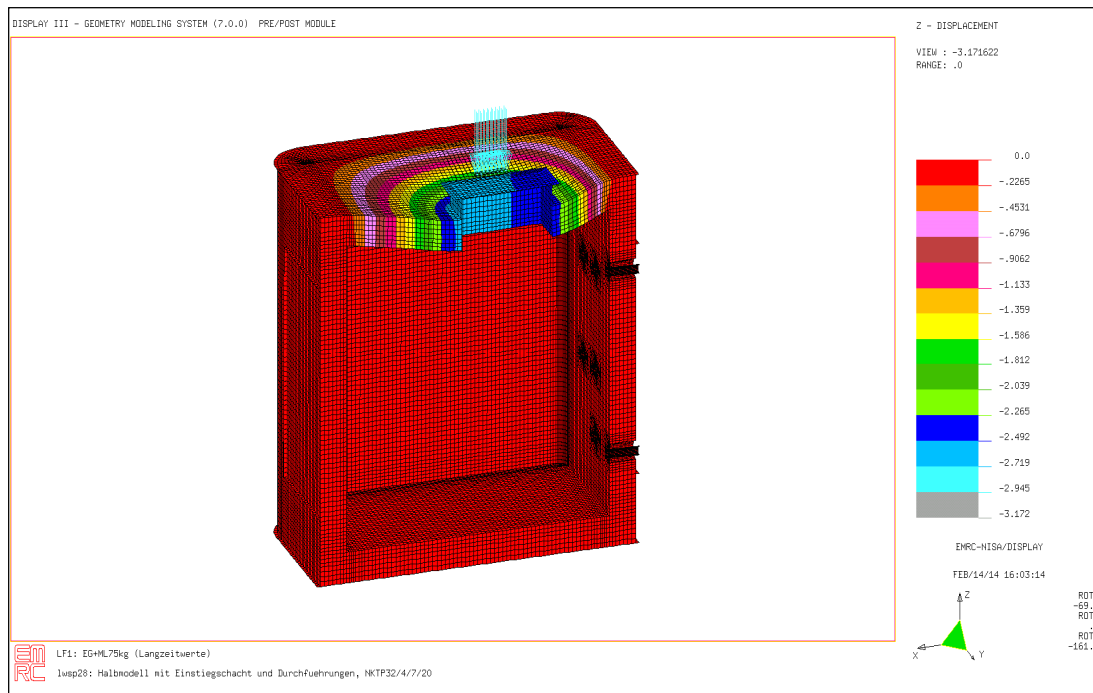
TB1.Bild 22: Seitenwand-Modul mit Durchführungen. Innen- und Außenansicht



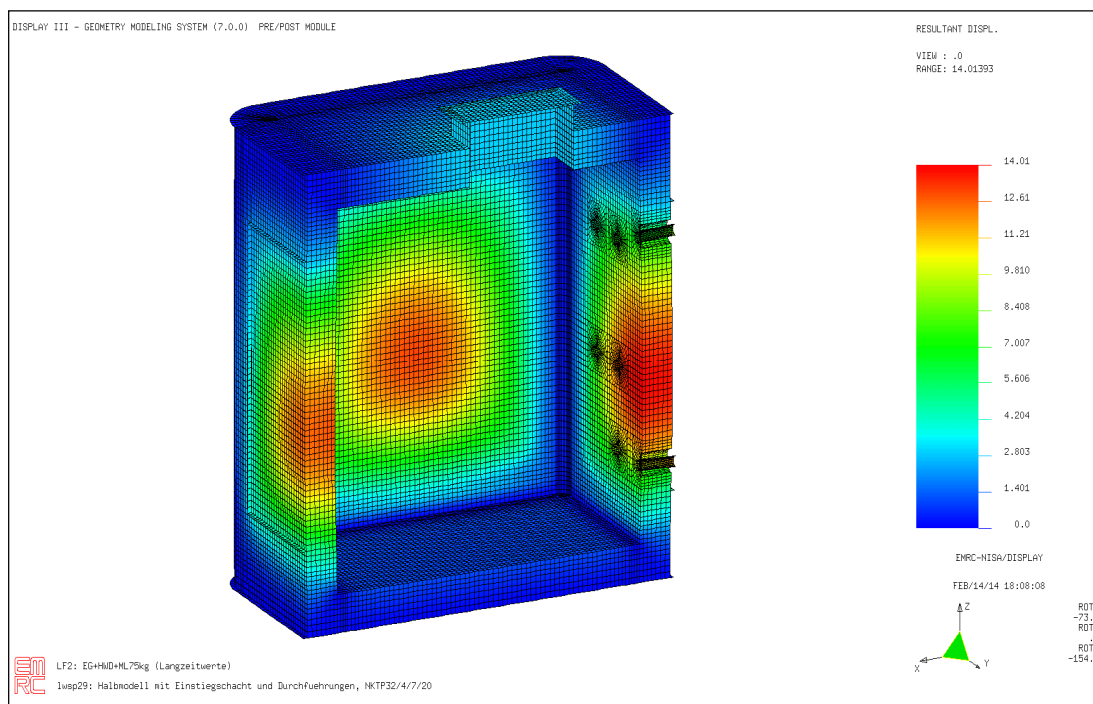
TB1.Bild 23: Einstiegsschicht mit Andeutung der realen Wanddicken



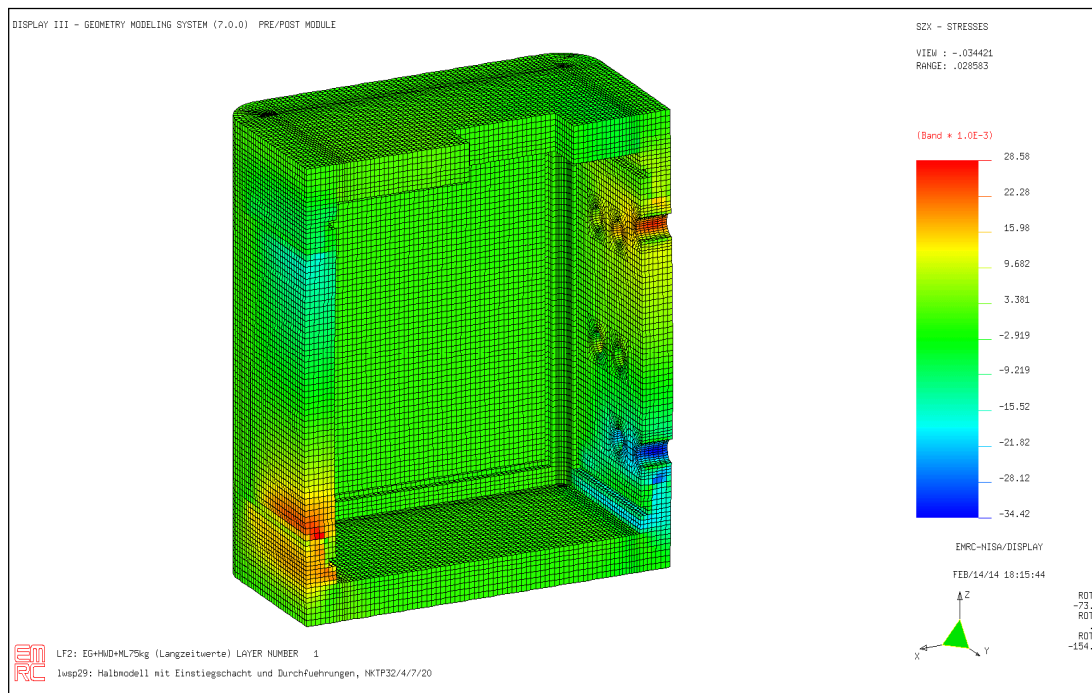
TB1.Bild 24: Durchführung, vergrößert dargestellt



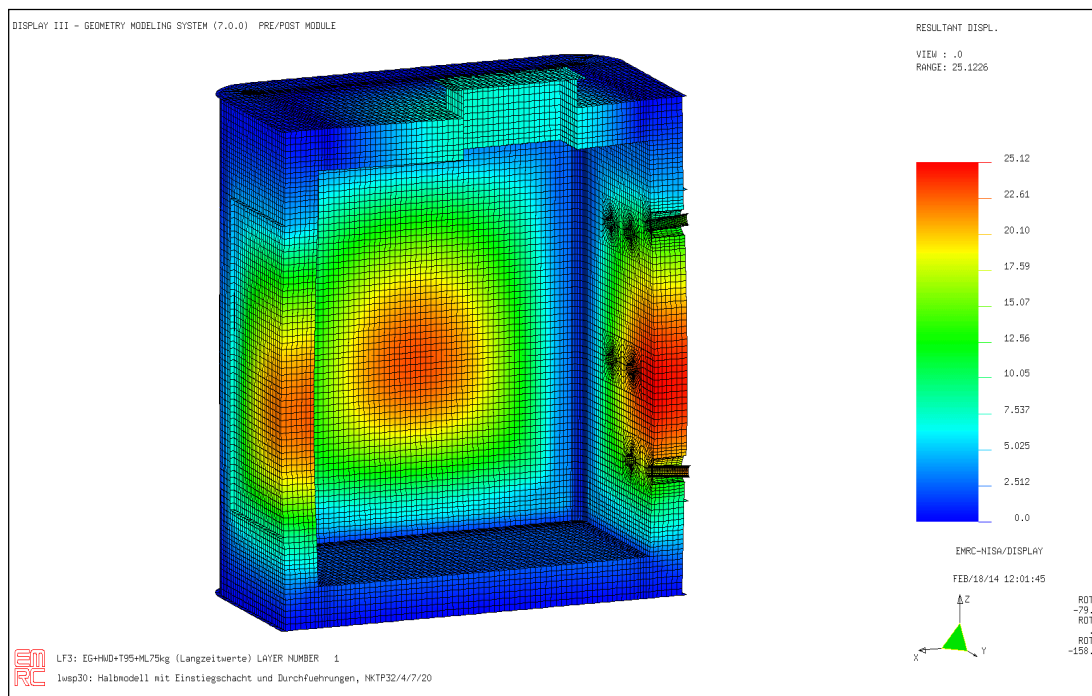
TB1.Bild 25: LF1, Vertikal-Verformung u_z [mm] des Speichers unter Eigengewicht und 75 kg Mannlast neben dem Einstiegschacht. (Verformung nicht maßstäblich!)



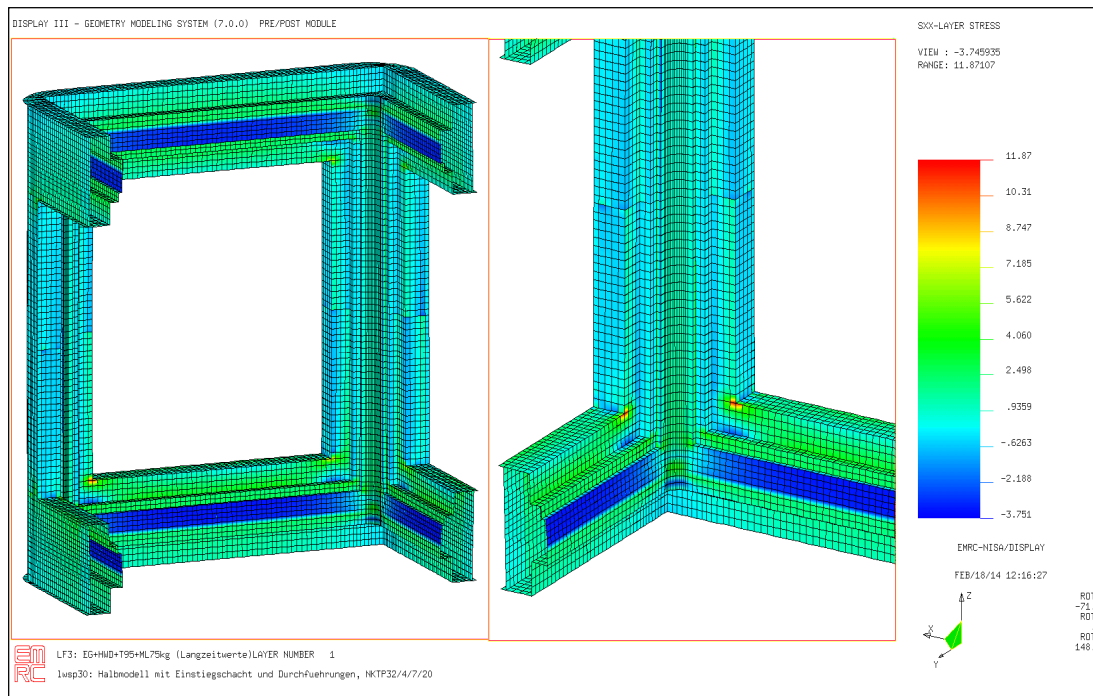
TB1.Bild 26: LF2, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck und 75kg-Mannlast. (Verformung maßstäblich!)



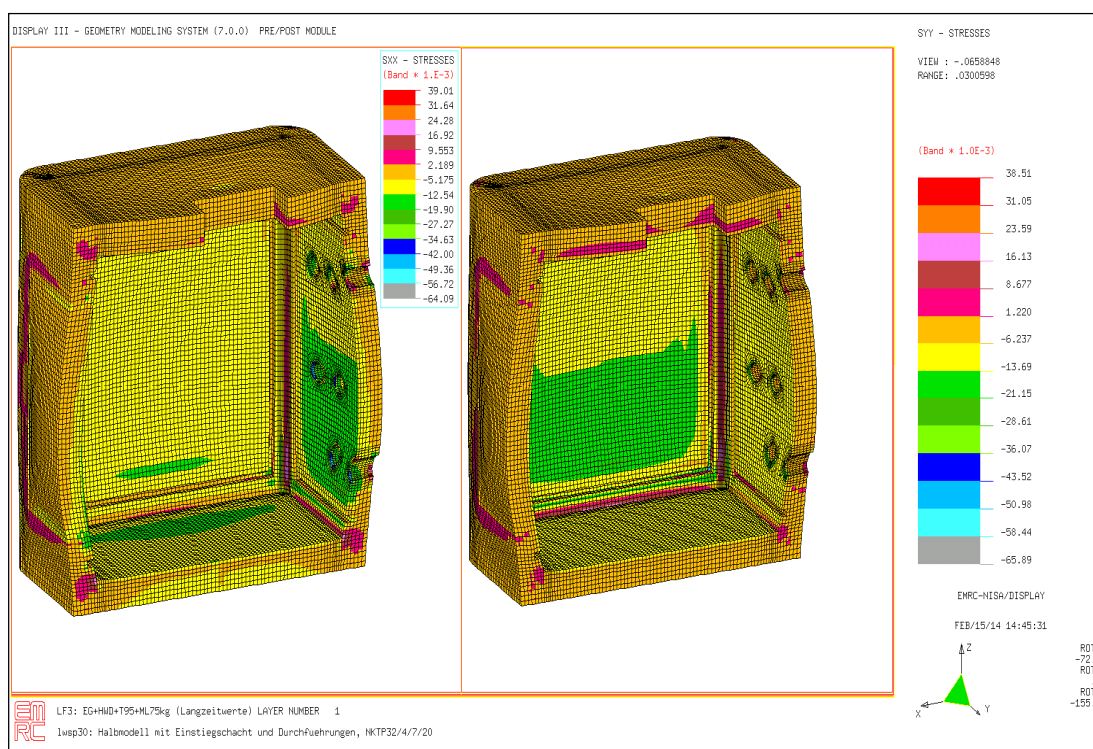
TB1.Bild 27: LF2, Spannungen σ_{xz} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung maßstäblich!)



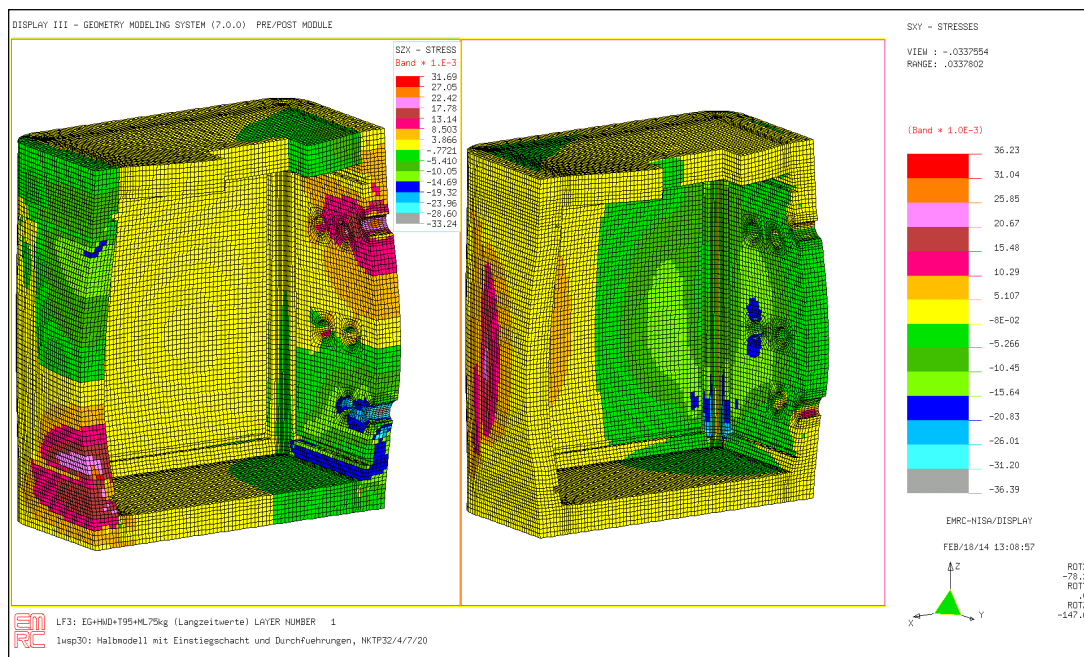
TB1.Bild 28: LF3, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigen- gewicht, Hydrosta- tischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 75kg-Mannlast. (Verformung maßstäblich!)



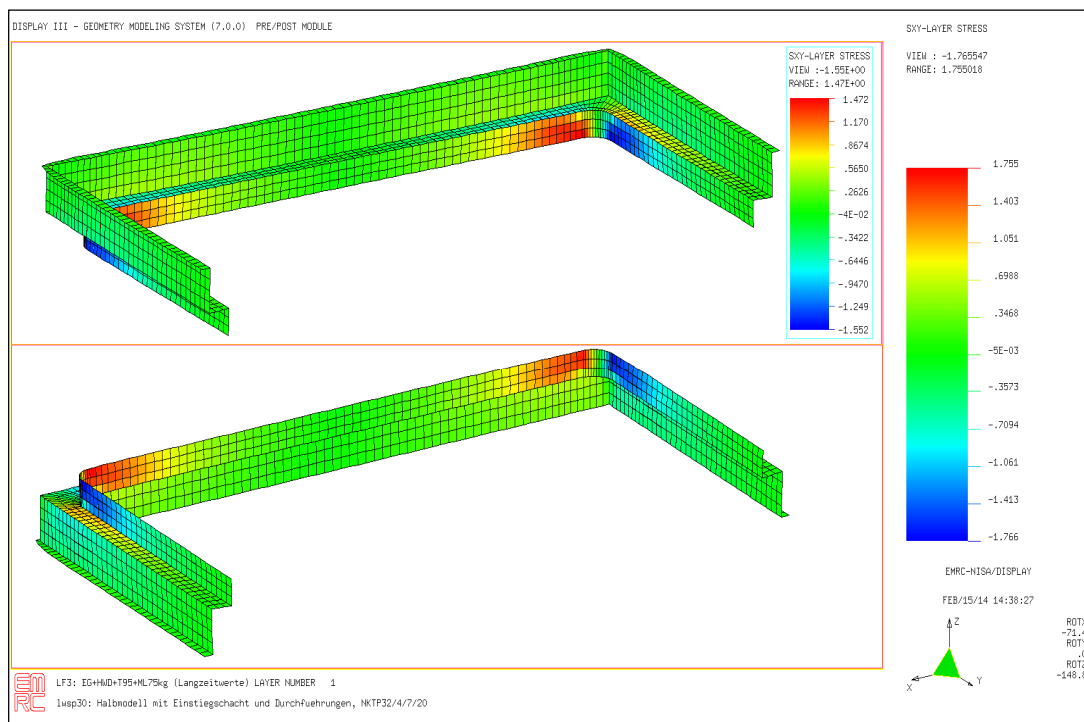
TB1.Bild 29: L3, Ort der maximalen Spannung σ_{xx} [N/mm²] aller Laminat



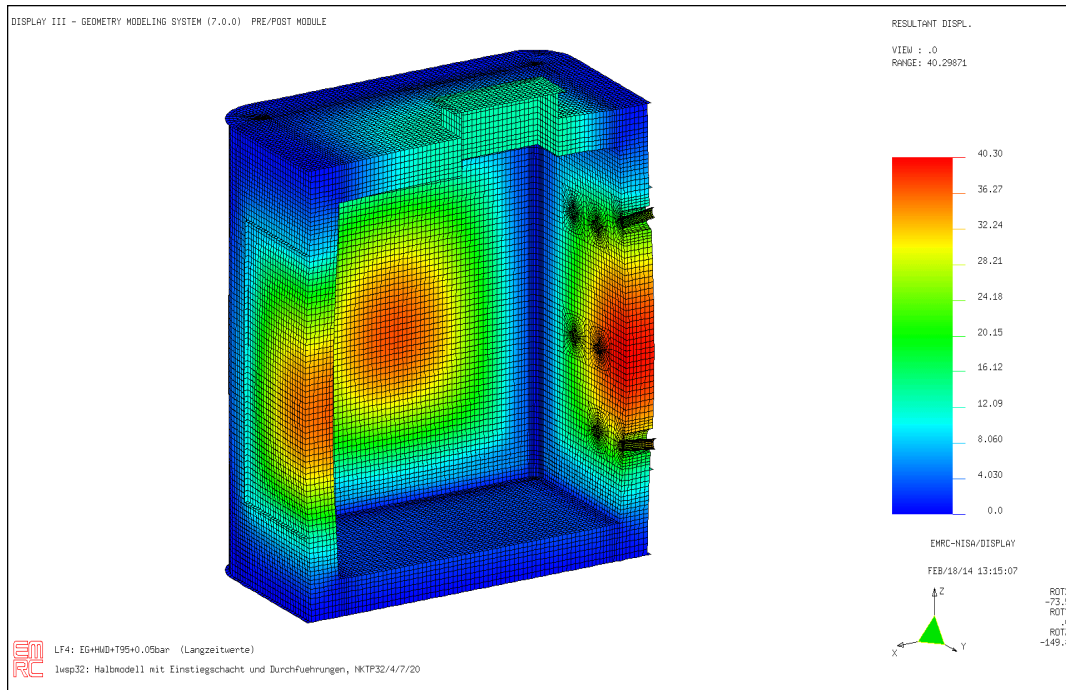
TB1.Bild 30: L3, Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)



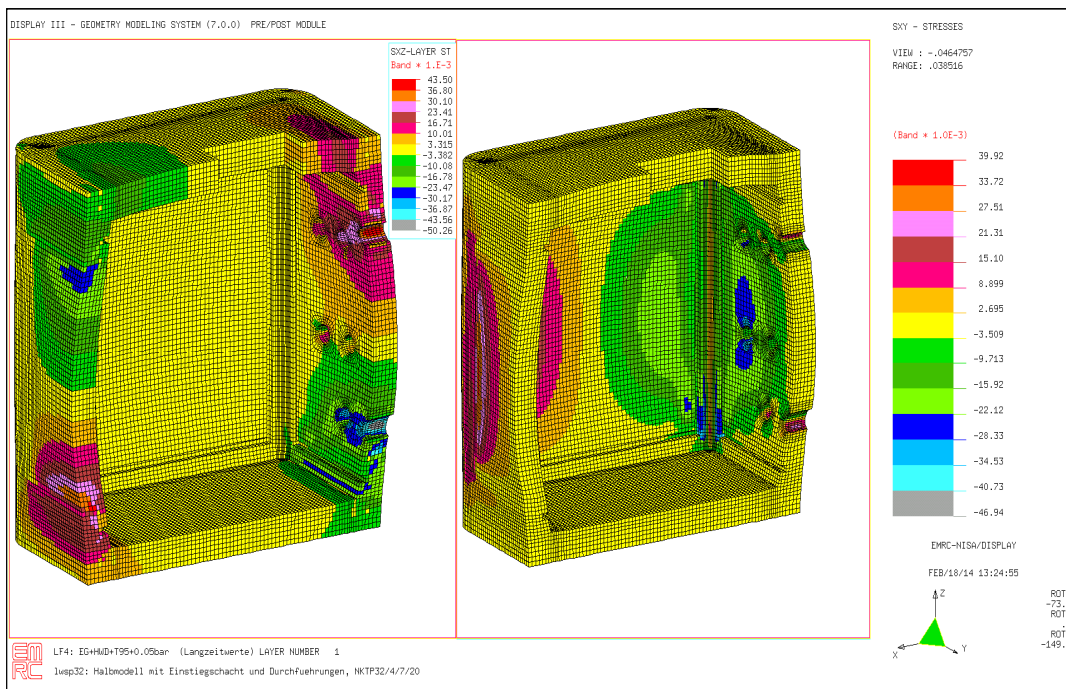
TB1.Bild 31: LF3, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)



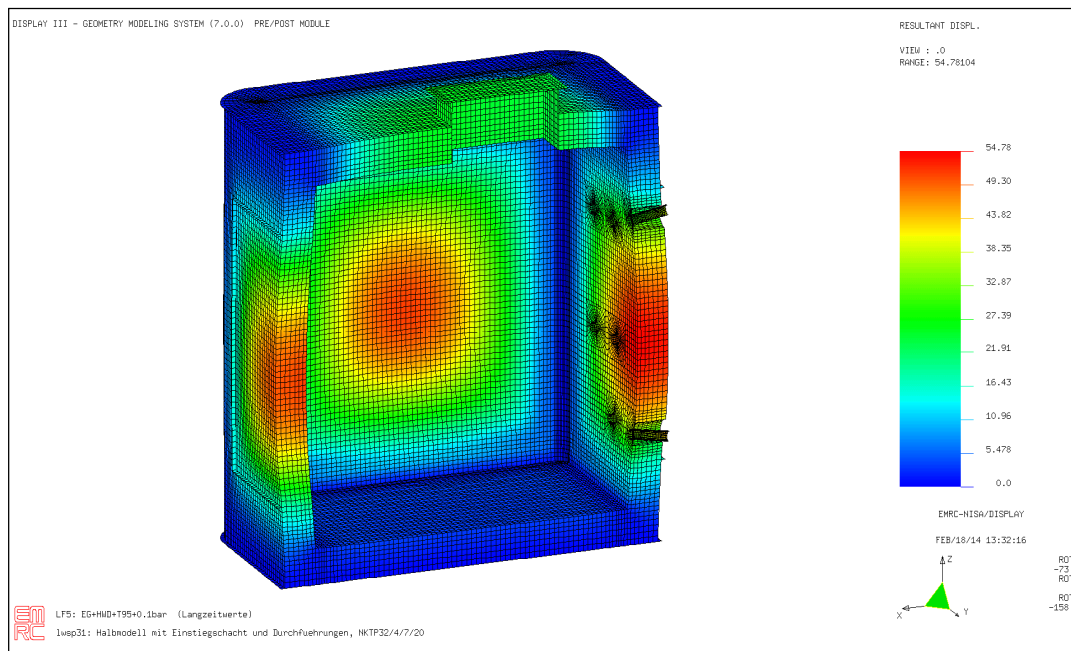
TB1.Bild 32: LF3, Spannungen σ_{xy} [N/mm²] in der Kleberschicht zwischen Boden-/ Deck-Modul und Eckmodulen



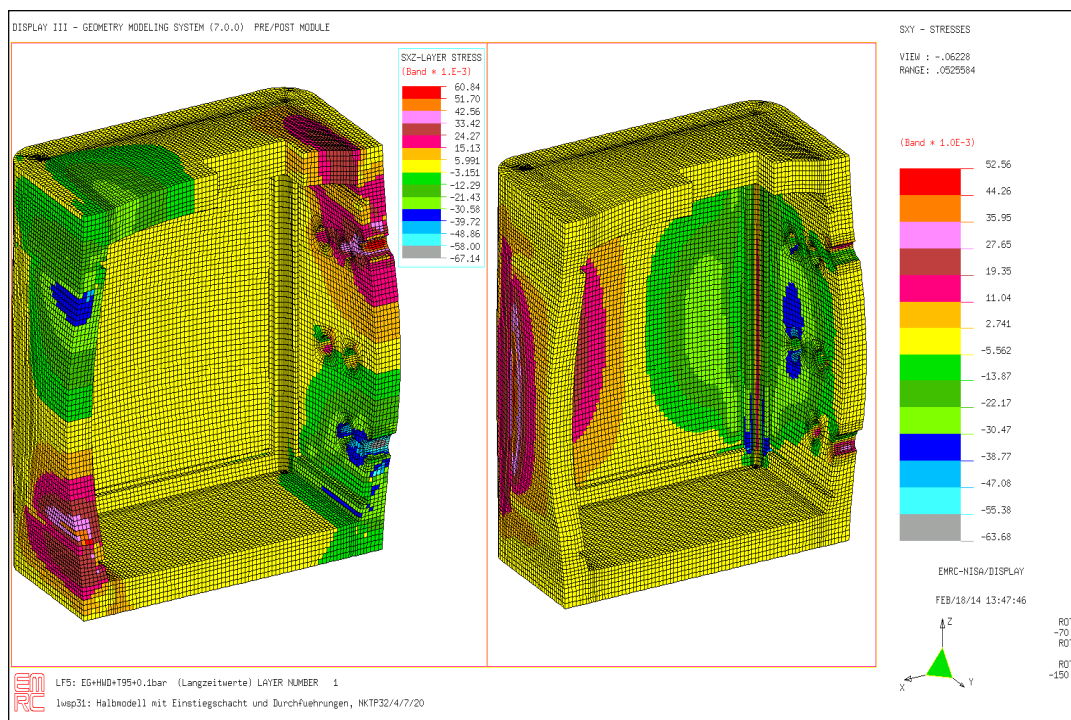
TB1.Bild 33: LF4, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydro statischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 0.05bar Innendruck (Verformung ma ßstäblich!)



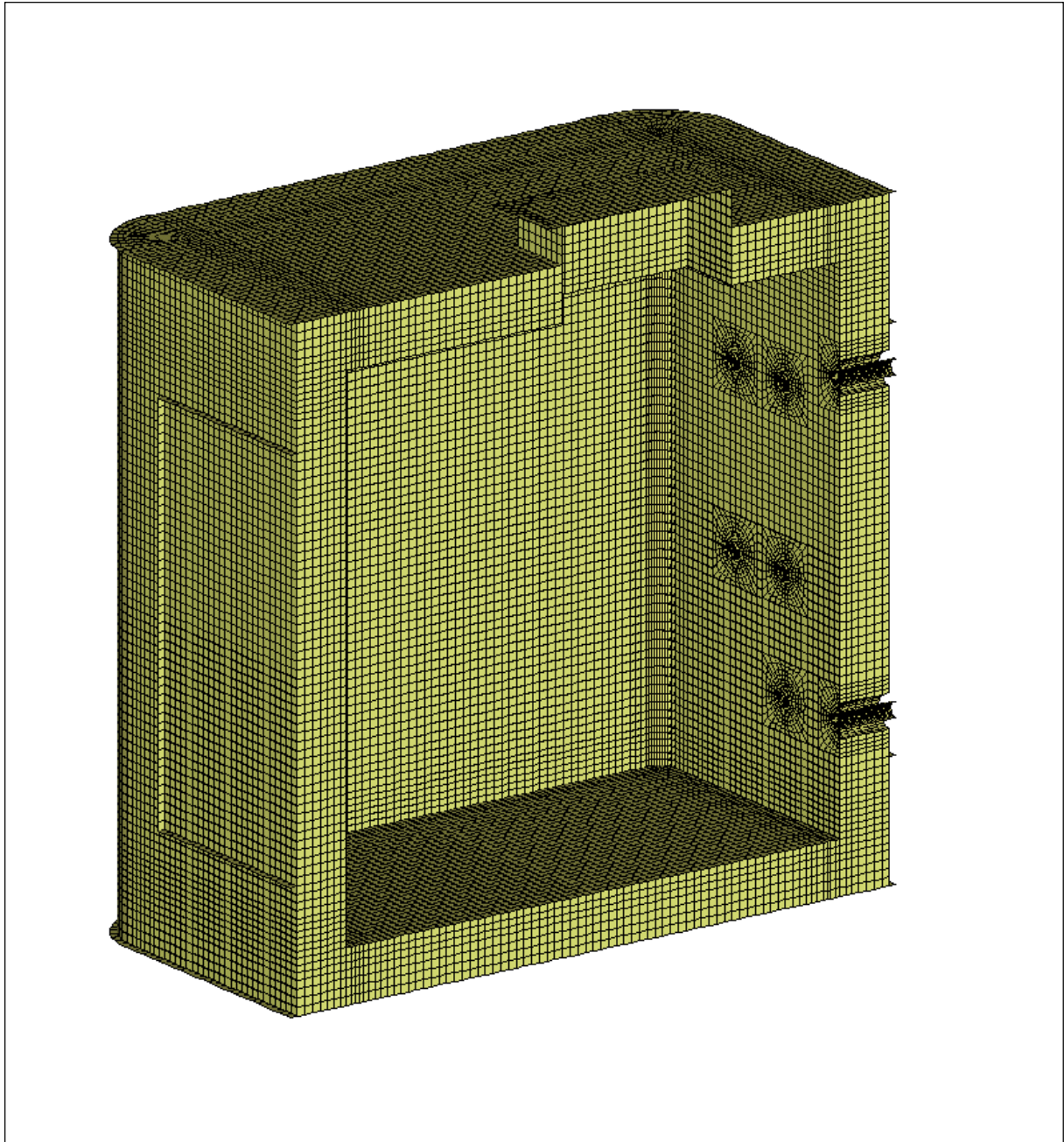
TB1.Bild 34: LF4, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)



TB1.Bild 35: LF5, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 0.1bar Innendruck (Verformung maßstäbli ch!)



TB1.Bild 36: LF5, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)



Halbmodell des 4m³ Labor--Wärmespeichers

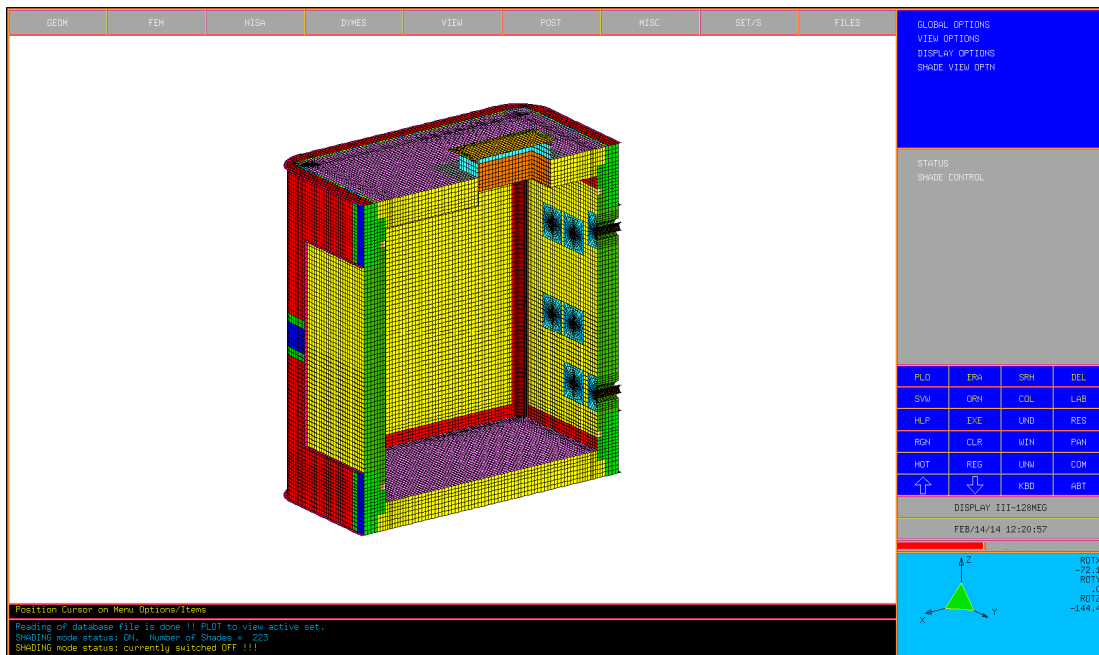


Bild 21: Halbmodell mit Einstiegschacht und Durchführungen

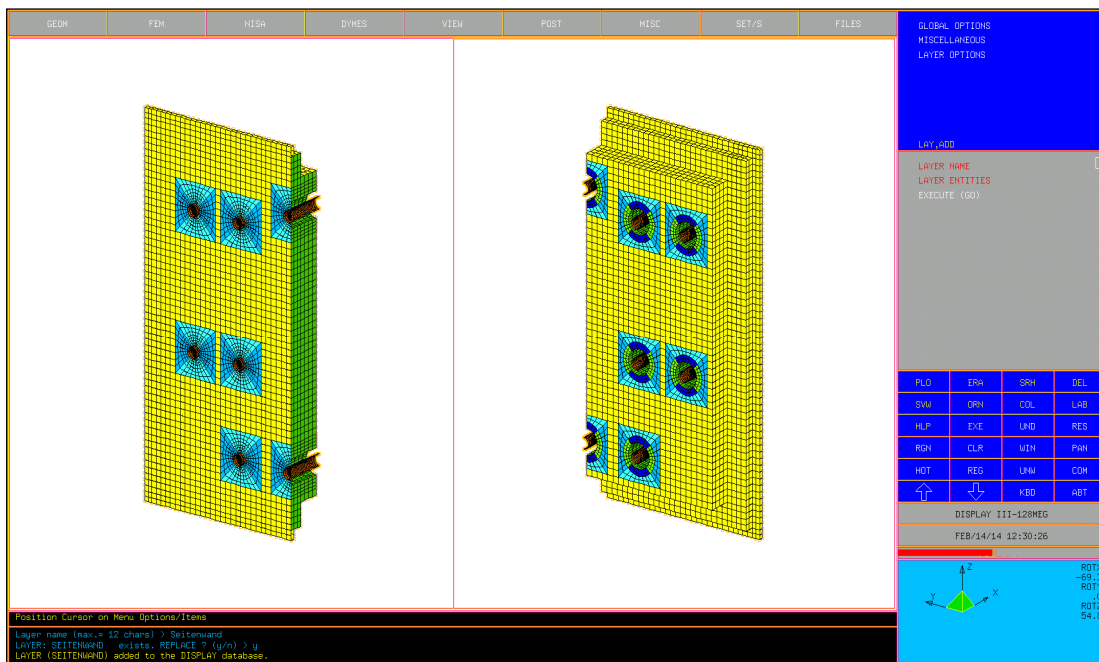


Bild 22: Seitenwand-Modul mit Durchführungen. Innen- und Außenansicht

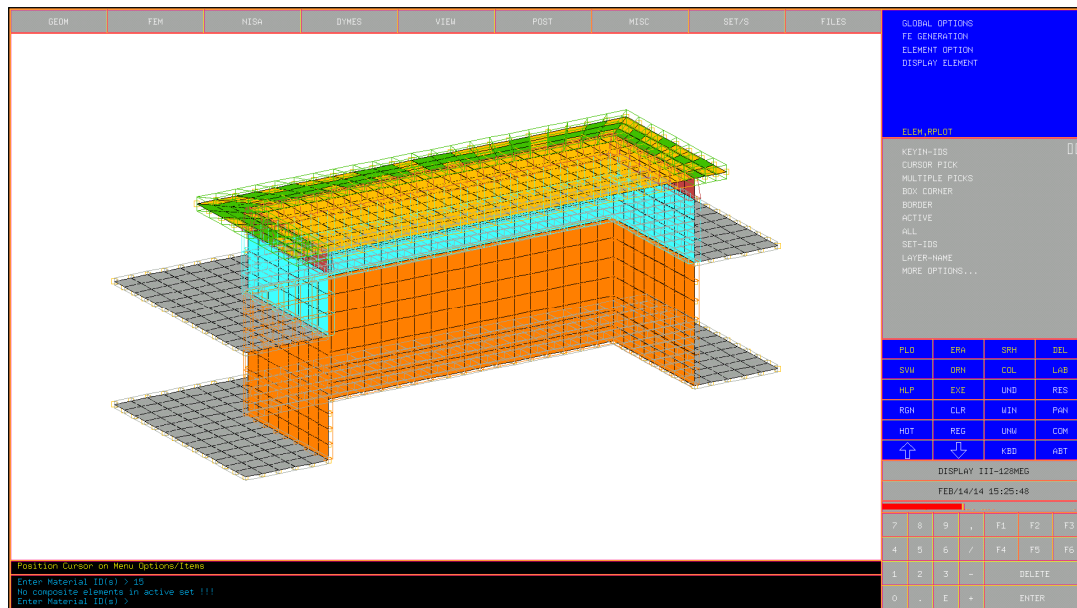


Bild 23: Einstiegsschacht mit Andeutung der realen Wanddicken

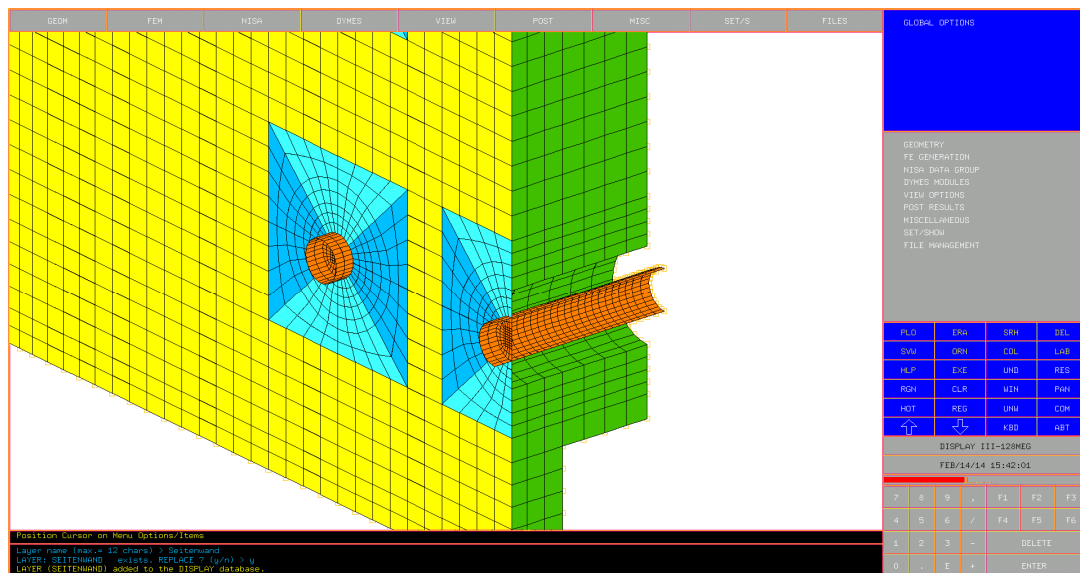


Bild 24: Durchführung, vergrößert dargestellt

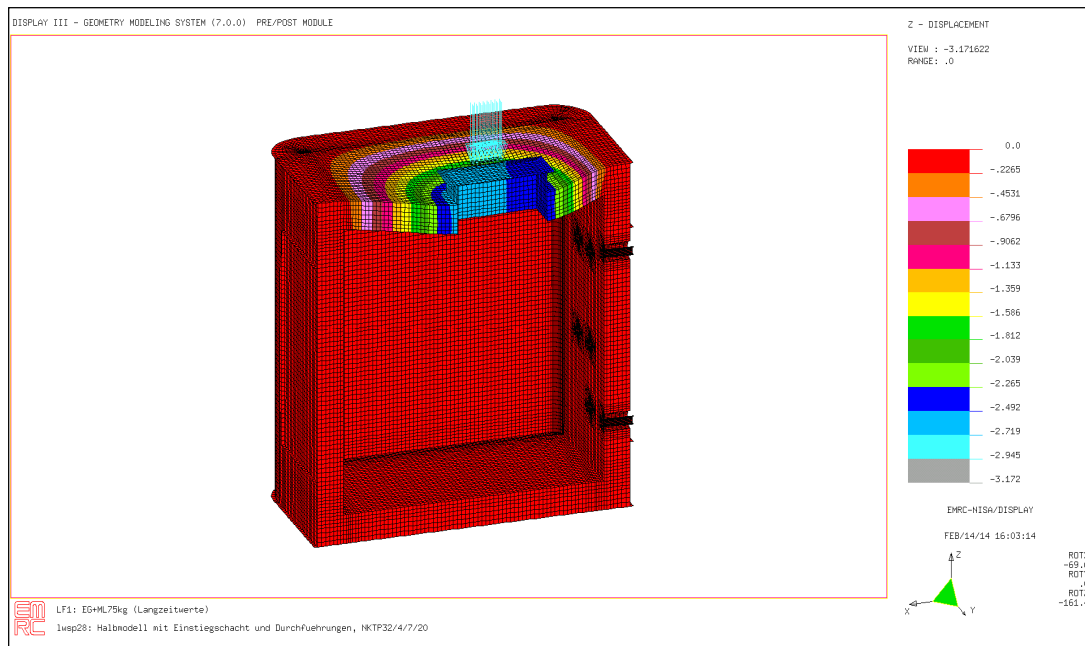


Bild 25: LF1, Vertikal-Verformung u_z [mm] des Speichers unter Eigengewicht und 75kg-Mannlast neben dem Einstiegschacht. (Verformung nicht maßstäblich!)

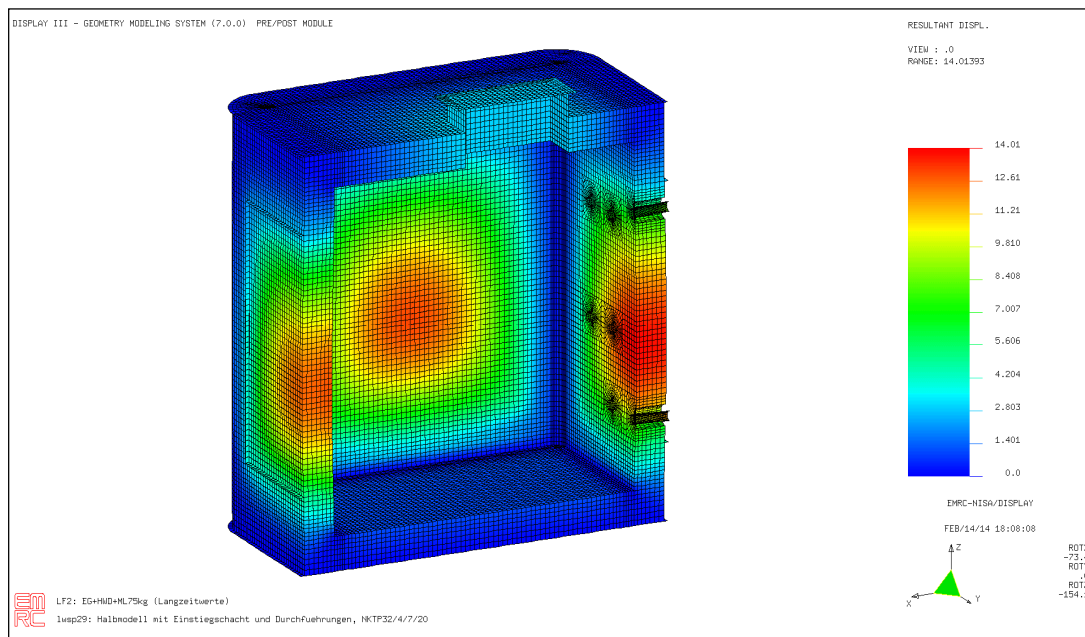


Bild 26: LF2, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck und 75kg-Mannlast. (Verformung maßstäblich!)

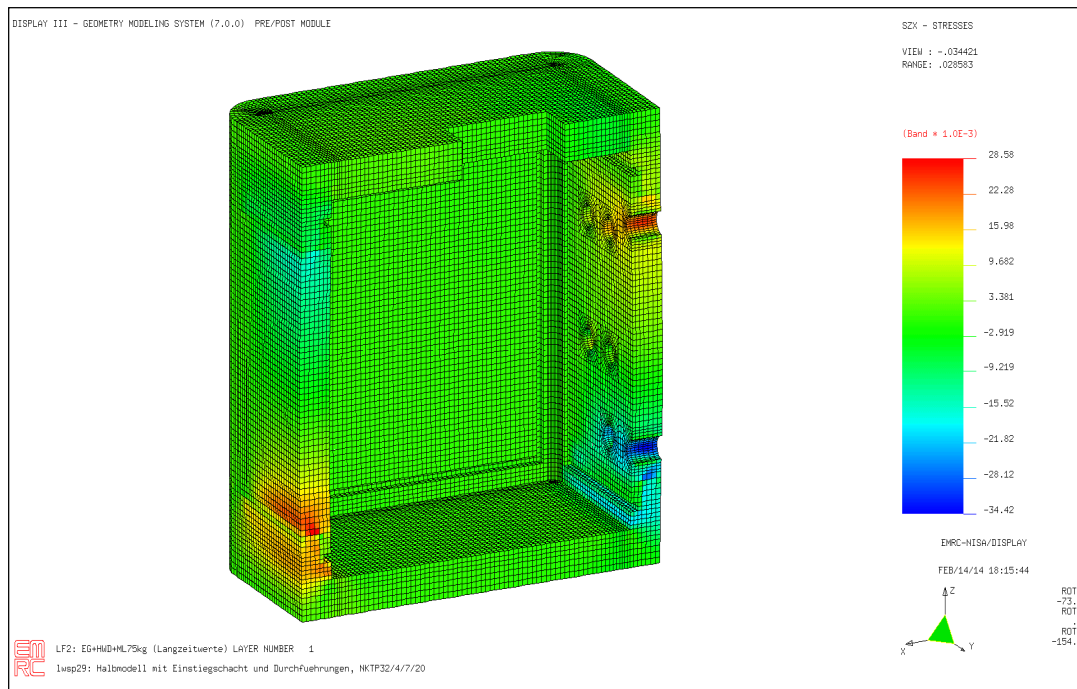


Bild 27: LF2, Spannungen σ_{xz} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung maßstäblich!)

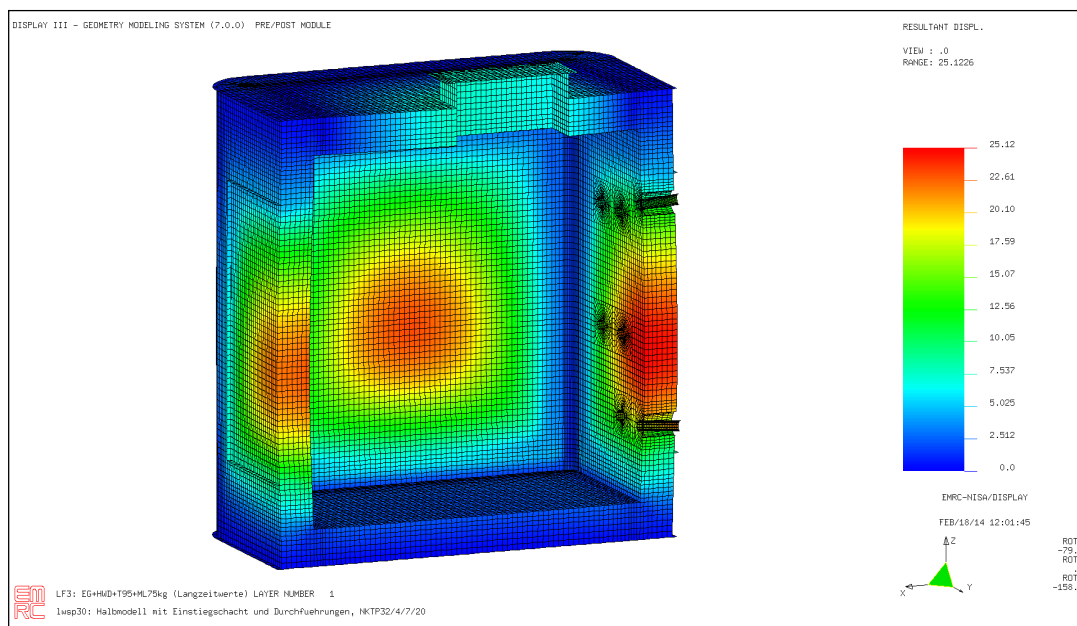


Bild 28: LF3, resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 75kg-Mannlast. (Verformung maßstäblich!)

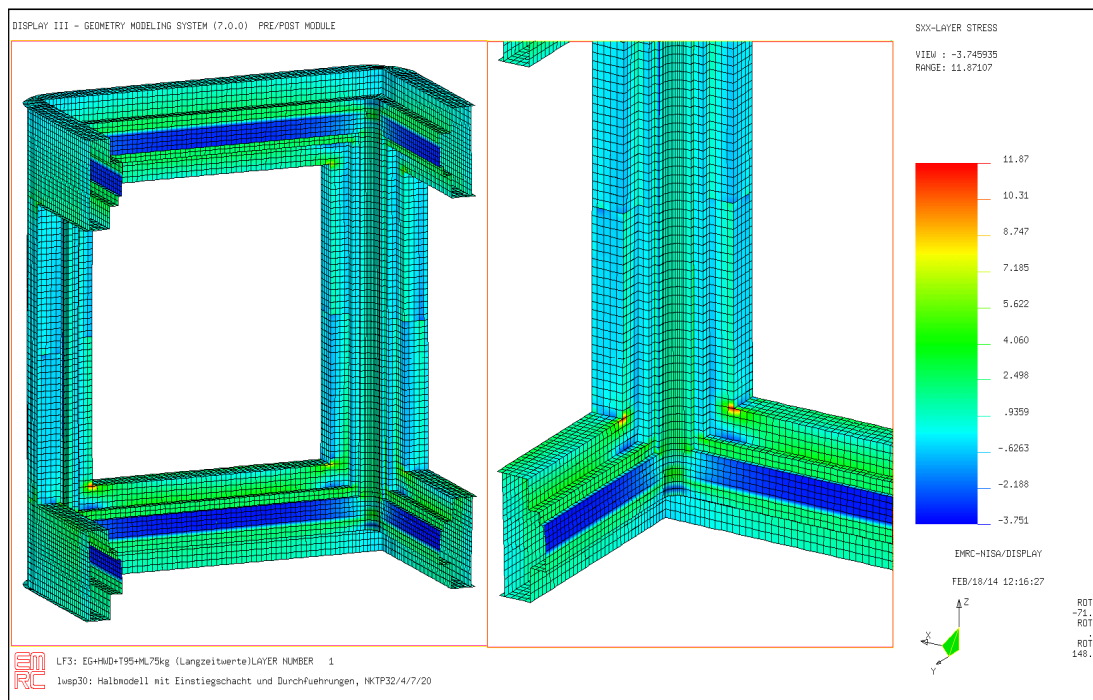


Bild 29: LF3, Ort der maximalen Spannung σ_{xx} [N/mm²] aller Laminate

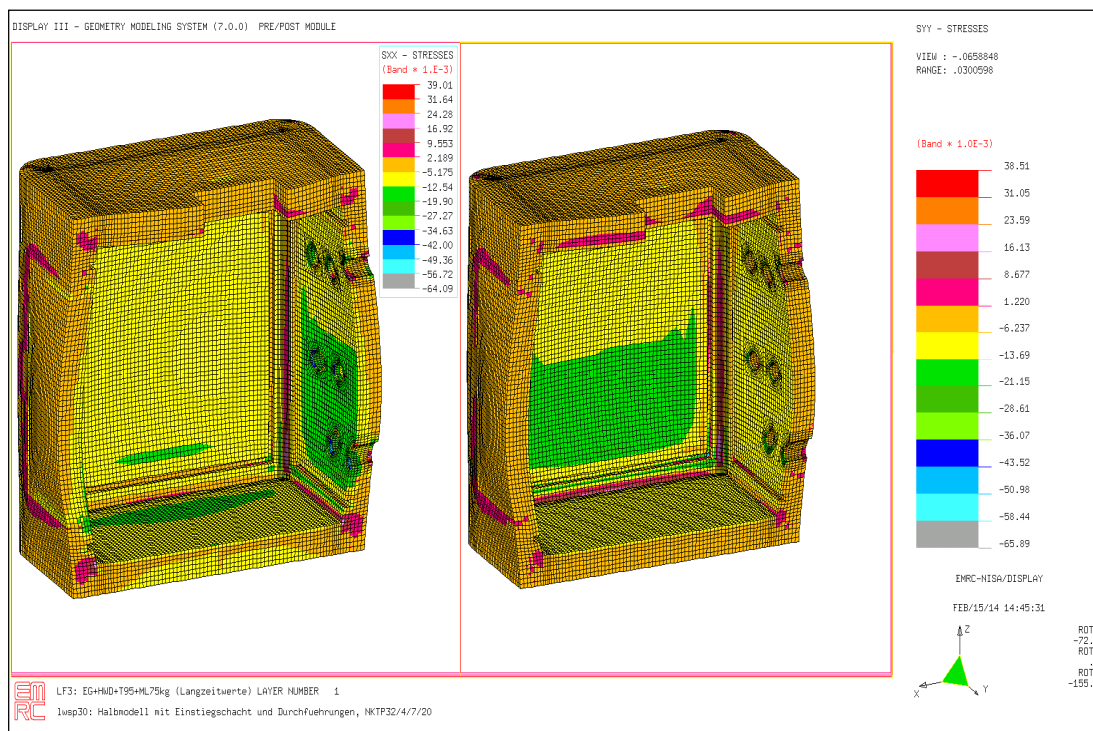


Bild 30: LF3, Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)

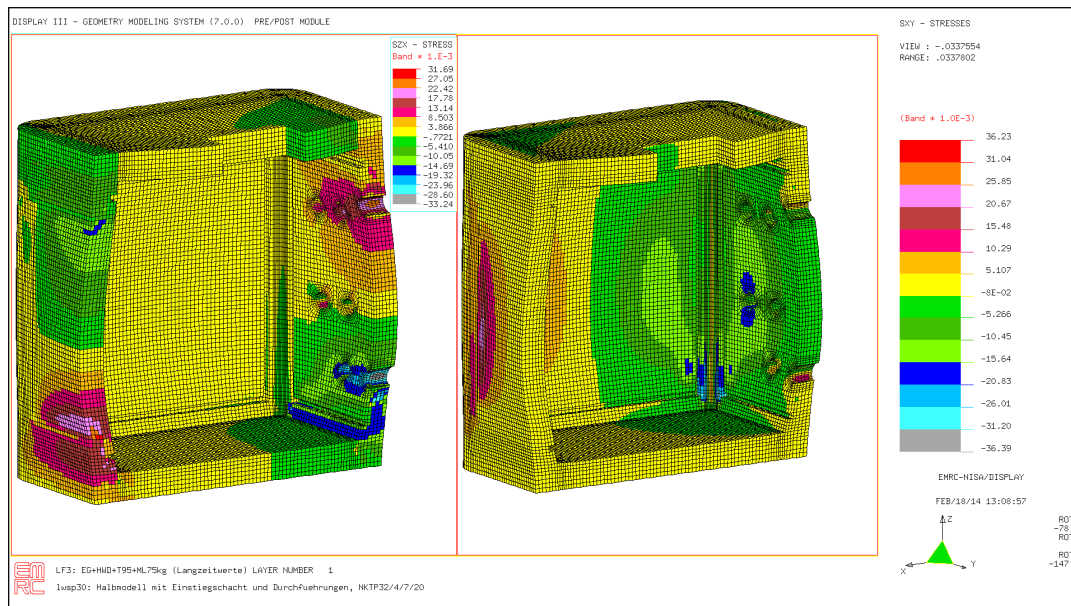


Bild 31: LF3, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)

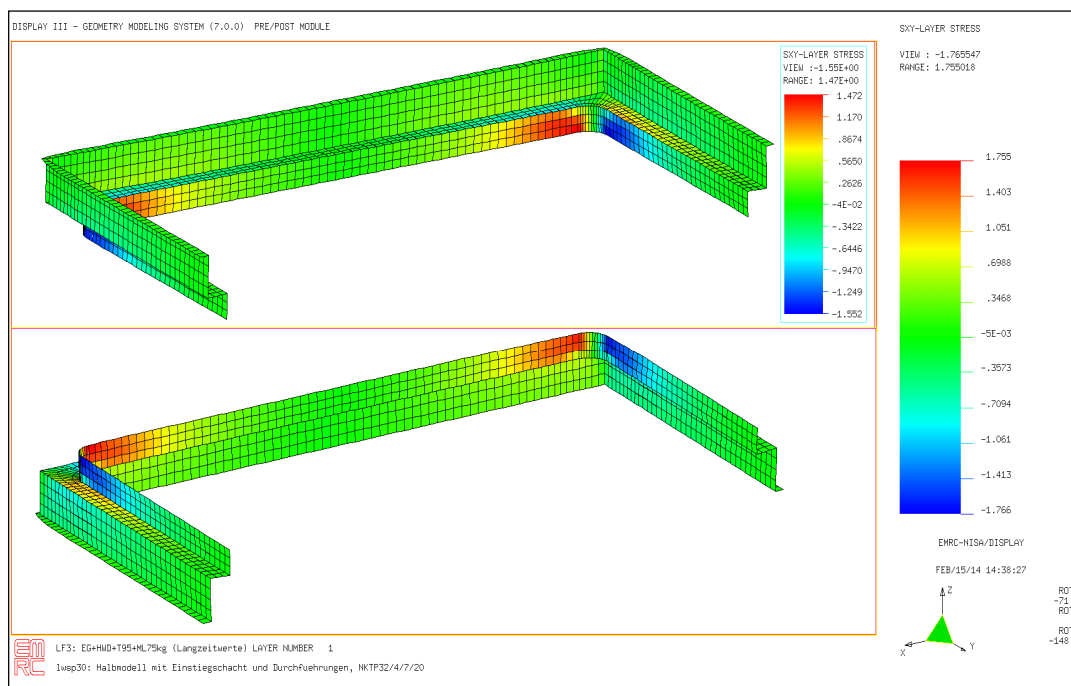


Bild 32: LF3, Spannungen σ_{xy} [N/mm²] in der Kleberschicht zwischen Boden-/Deck-Modul und Eckmodulen

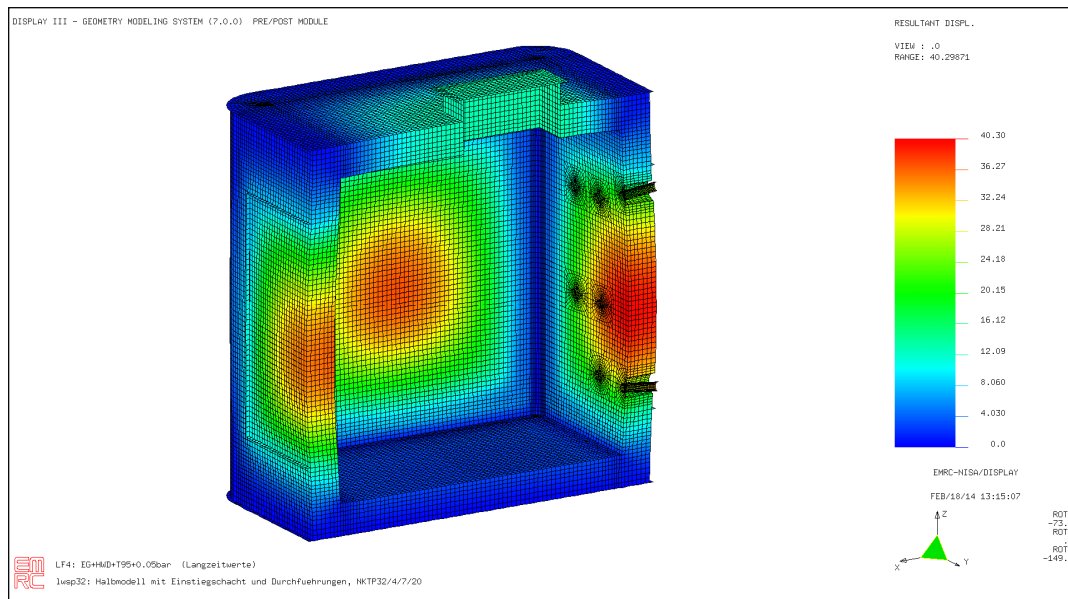


Bild 33: LF4, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 0.05bar Innendruck (Verformung maßstäblich!)

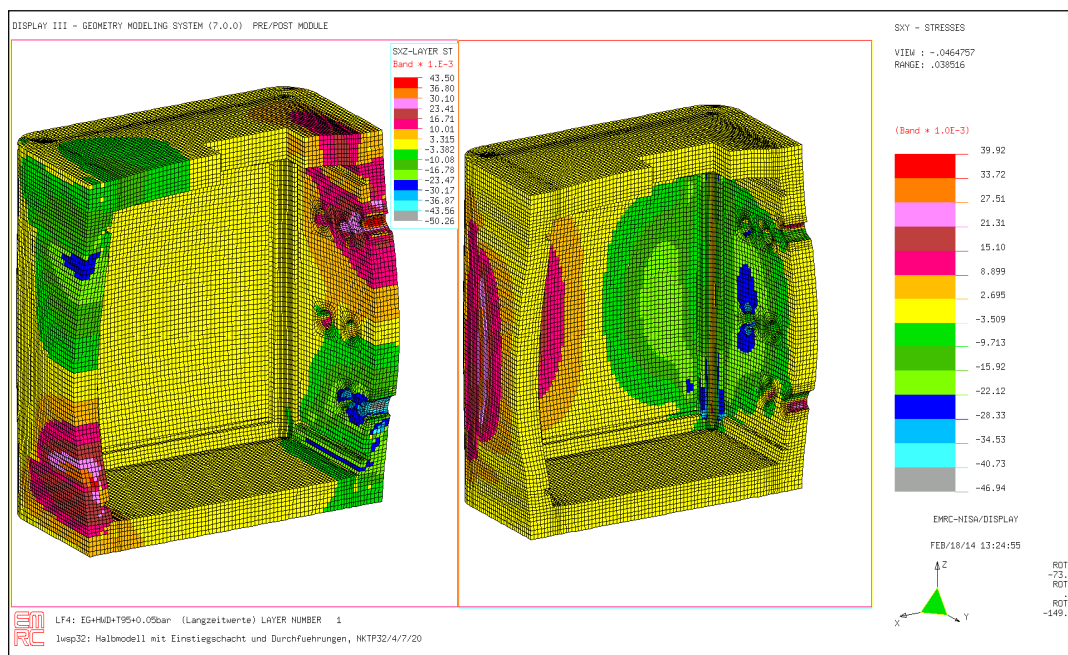


Bild 34: LF4, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)

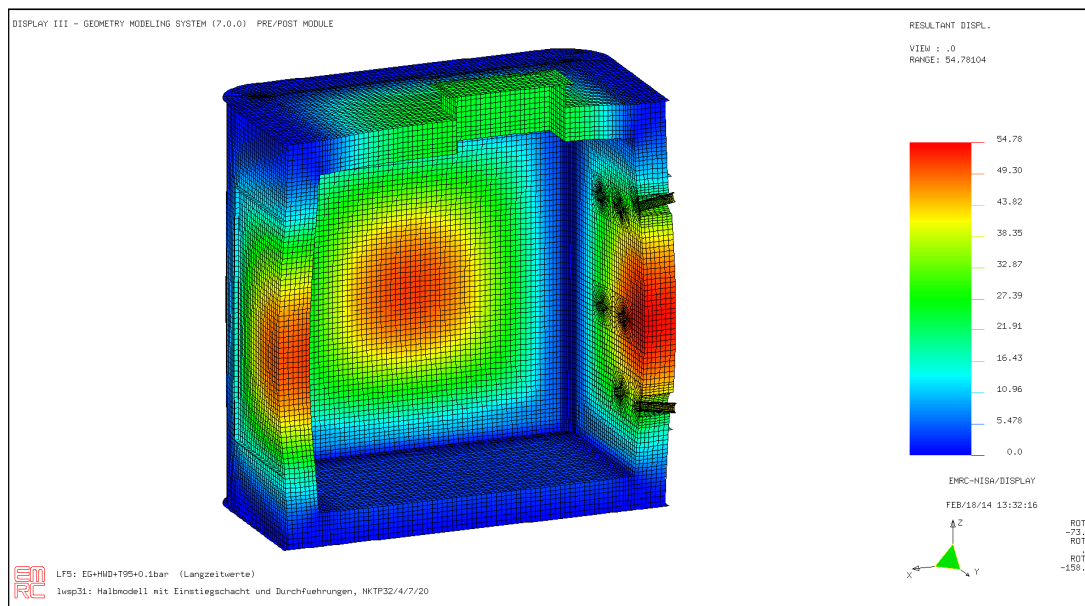


Bild 35: LF5, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 0.1bar Innendruck (Verformung maßstäblich!)

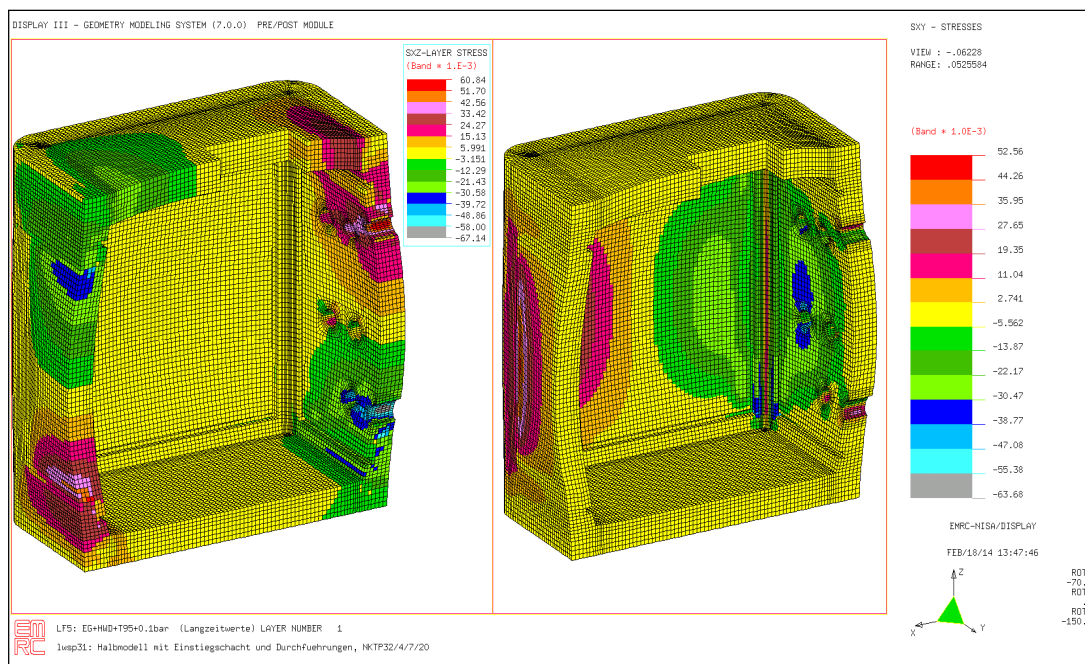


Bild 36: LF5, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)

III.2.4. Detaillieren

TB2.4.1 Deckelmodul / Mannloch

Als Deckelmodul wurde im M 1:1 der Bodenmodul benutzt und mit einem rechteckigen Einstieg 400 x 550 nach den Erfahrungen aus dem Behälterbau versehen.

Die Verbindung der Vollwand mit den Sandwichdeckschichten erfolgte mit Überlaminaten.

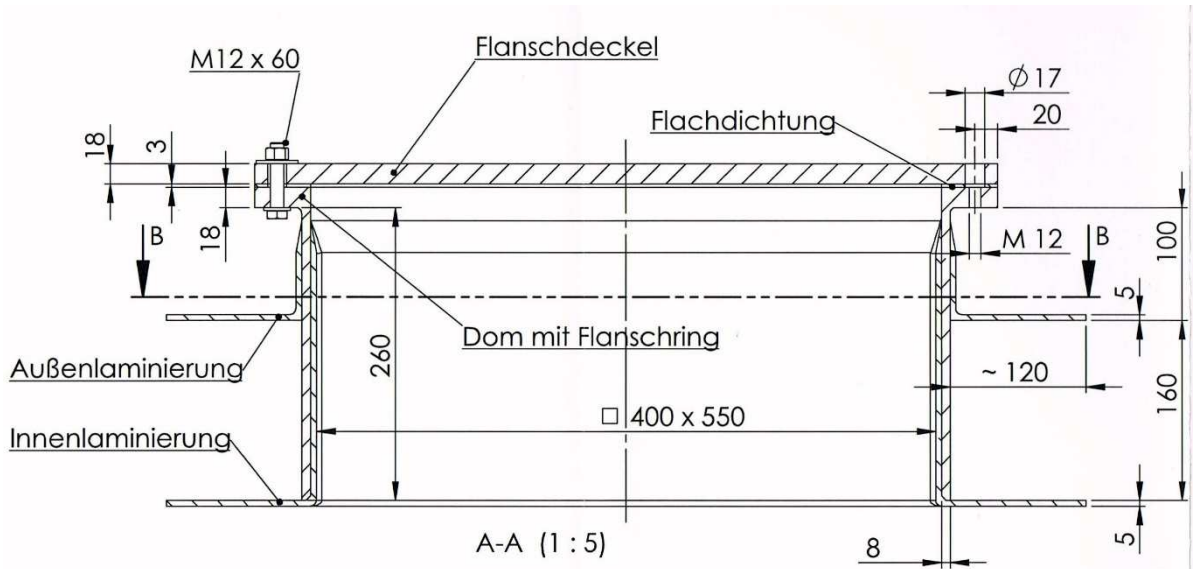


Abb. 2.8 Deckelmodul (Einstiegschacht)

Variierungen wurden beim Flanschdeckel und der Dichtung mit dem Material sowie den Dicken (vgl. hierzu a.a.O. beim FEM-Teilbericht 2) vorgenommen.

TB2.4.2 Eck- Modulverbindungen

Die 8 Dreibein –Module werden formschlüssig mit profilgetreu gefrästen Einsteckteilen (1 und 2) PUR- Hartschaumdübeln zusammengeschoben und mit einem Überlaminat über den ganzen Umfang dicht verklebt.

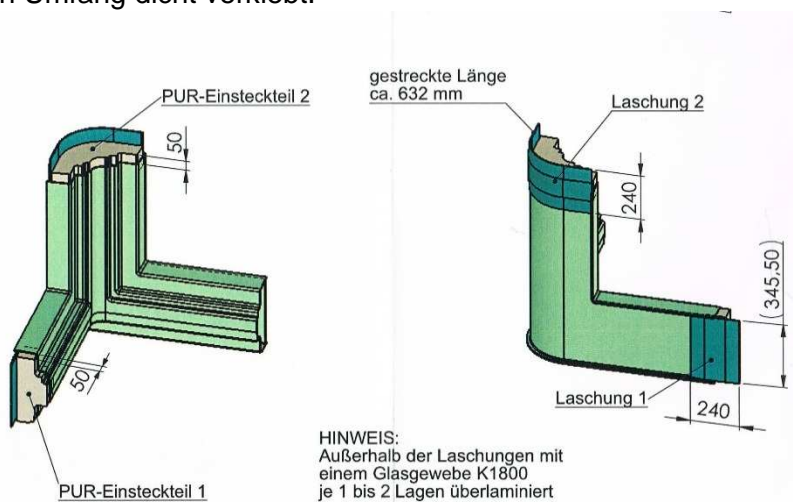


Abb. 2.9 Verbindung der Eckmodule mittels Einsteckteilen und Überlaschungen

Die praktische Ausführung der Überlappung erfolgte als Überlaminat mit der Laminatdicke entsprechend des Aufbaues der jeweiligen Traglaminat-Deckschichten.
 Die Nachrechnung aller Verbindungen wurde bereits bei den FEM-Teilberichten 1 und 2 vollzogen.

TB2.4.3 Funktionsmodulvarianten

Die Mediendurchführung erforderte eine langwierige Bearbeitungsphase, da die Zahl und Anordnung der Durchbrüche mehrfach verändert wurden. Letztlich entstanden Wandmodule mit neu entwickelten 3 Wanddurchführungen für die GFK-PUR – GFK Speicherhülle mit einer sehr guten Installationsfreundlichkeit und Funktionssicherheit der Be- sowie Entladeeinrichtungen.

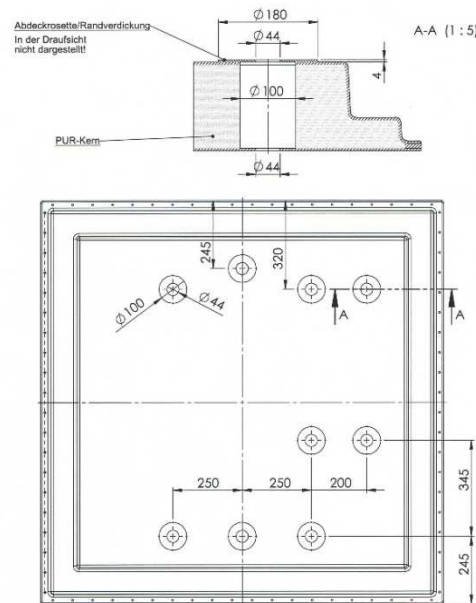


Abb. 2.10. 1. Lochbild für die Durchführungen beim Seitenwandmodul (Funktionsmodul)

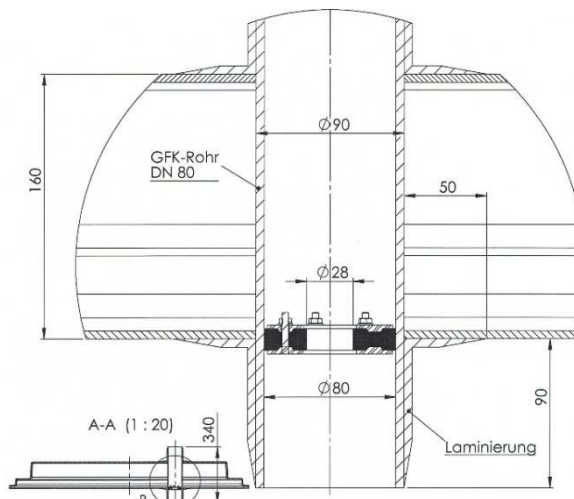


Abb. 2.11. Variante für die Medienanschlüsse und die Durchführung durch das Funktionsmodul

Die FEM – Berechnung der Mediendurchführungen wird mit Teilbericht TB3 belegt.

III.2.4.3 FEM-Teilbericht 3 Mediendurchführung als Einschub

TB3.1 Zum FEM – Modell mit Mediendurchführung Variante IV

Am FEM-Modell des Teilberichtes 2 [7] wurden die Durchführungen der Variante III durch die Durchführungen der Variante IV [8] ersetzt. Die sonstige Geometrie, die Materialkennwerte sowie die Lasten der 5 untersuchten Lastfälle wurden unverändert übernommen. In den Bildern 37, 38 und 39 des Bildteils sind die betroffenen Bereiche des Modells dargestellt. Die verwendeten Materialkennwerte und Einflussfaktoren zur Berücksichtigung von Zeit, Temperatur, Medien, Verarbeitung und Sicherheit beruhen auf den Angaben in [1, 2] und wurden in [4] für die einzelnen Lastfälle entsprechend aufbereitet.

Die in den Bildern 37 bis 39 des Bildteils dargestellten Übergänge von der rechteckigen Vernetzung zum runden GFK-Durchführungsrohr bestehen aus demselben Laminat wie der umgebende Modulmantel. Die das Durchführungsrohr umschließenden Bereiche sind durch Laminat entsprechend Zeichnungssatz [8] innen und außen verstärkt. Das Durchführungsrohr selbst ist ebenfalls durch Laminat innen und außen verstärkt und wurde im Rohrrinneren zur Abschottung im Modell zusätzlich mit einer Platte verschlossen. Die Materialhauptachse x des Durchführungsrohres verläuft in Längsrichtung der Rohrachse, die y-Achse in Umfangsrichtung.

Die GFK-Versteifungs-Profile im Seitenwandmodul wurden als geschichtete orthotrope Solid-Elemente mit eindeutiger Festlegung der Materialhauptachsen ebenfalls unverändert aus Teilbericht 2 [7] übernommen. Die Materialhauptachse x verläuft in Längsrichtung der Profile, die y-Achse orthogonal dazu über die Breite, die z-Achse über die Dicke der Profile. Die entsprechenden Spannungen in den Ergebnissen haben jeweils dieselbe Orientierung.

Da für die Beanspruchung der Klebschicht zwischen Deck-/Bodenmodul und den Eckmodulen in Dickenrichtung keine Aussage gemacht werden konnte, wurden für jeden Lastfall Modellausschnitte im stärksten Verformungsbereich des Halbmodells entnommen und in diese jeweils reale Klebfugen der Dicke $t=1\text{mm}$ eingearbeitet (Bild 40). Diese Ausschnitte wurden den Verformungen entsprechend dem jeweiligen Lastfall des Halbmodells unterworfen und berechnet.

TB3.2 Berechnung der Beanspruchungen des Wärmespeichers

Es werden die folgenden Lastfälle für den Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet:

LF1: Eigengewicht + Mannlast von 75kg auf einer Fläche von $A=200 \times 75\text{mm}^2$
(EG+ML75), *NISA-File: lwsp42/43.dbs*

LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck+ Mannlast
(EG+HWD+ML75), *NISA-File: lwsp40/41.dbs*

LF3: Eigengewicht + Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenwand von
 $\Delta T=75\text{K}$ + Mannlast (EG+HWD+T95+ML75), *NISA-File: lwsp38/39.dbs*

LF4: EG + HWD + T95 + 0.05 bar Innendruck, *NISA-File: lwsp36/37.dbs*

LF5: EG + HWD + T95 + 0.1 bar Innendruck, *NISA-File: lwsp44/45.dbs*

In die Lastfälle LF4 und LF5 wurde die Mannlast nicht einbezogen, um die ungünstigeren Beanspruchungen zu erfassen.

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen und das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

$$E_d / R_d$$

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes
(Index d kennzeichnet hier „design“)

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien [1, 5] ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Die Lastfälle LF1 bis LF5 sind Lastkombinationen. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet .

Da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind, (die Temperatur darf 95°C nicht wesentlich überschreiten, um ein Kochen und erhöhten Dampfdruck zu vermeiden), werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt.

Für die GFK-Versteifungs-Profile und die Alu-Schienen werden in den jeweiligen Lastfällen die Biegeverformungen derselben realistisch erfasst, nicht jedoch die Spannungen in diesen [4]. Die berechneten Spannungen werden wie in [4] mit den Faktoren

GFK-Profile $F_G = E_{OG} / E_{MG} = 8300 / 607 = 13.67$
sowie

Alu-Schienen: $F_A = E_{OA} / E_{MA} = 7000 / 202 = 34.65$

multipliziert, um die realen Werte zu erhalten.

TB3.3 Lastfall LF1: Eigengewicht und Mannlast (EG+ML75)

Im Lastfall LF1 werden Langzeitwerte für die Materialkenngrößen verwendet, die aus den Kurzzeitwerten durch die entsprechenden Abminderungsfaktoren bzw. Einflussfaktoren der Tabellen 5 und 6 [4] gewonnen werden, in denen aber der Temperatureinfluss ausgeschlossen wurde, sie sind der Tabelle 7 in [4] zu entnehmen.

Ergebnisse des Lastfalls LF1

Da die Auslastung der verwendeten Materialien nach wie vor sehr gering ist, werden nur die Verformungen des Speichers und die Verhältnswerte E_d / R_d in der nachfolgenden Tabelle 21 dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---------------------|-----------------|---------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 0.062 / - 0.079 | | keine | | keine | |
| u_y [mm] | 0.093 / - 0.073 | | | | | |
| u_z [mm] | 0.0 / - 3.175 | | | | | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.019 | 0.114 | 0.018 | 0.0038 | 0.0013 | 0.0018 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.021 | 0.11 | 0.010 | 0.0081 | 0.0028 | 0.0019 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.056 | 0.013 | - | 0.0022 | 0.0015 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.022 | 0.025 | 0.016 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0010 |
| E_{dvy} / R_{dvy} | - | 0.20 | 0.002 | - | 0.0060 | 0.0012 |
| E_{dvy} / R_{dvy} | - | 0.20 | 0.013 | - | 0.0113 | 0.0011 |

TB3.Tabelle 21: Ergebnisse des Lastfalls LF1: EG+ML75

Für diesen Lastfall wird für alle Beanspruchungskomponenten der Materialien das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ erwartungsgemäß erfüllt. Die maximale Verformung $u_z = -3.175\text{mm}$ kennzeichnet die maximale Durchbiegung des Deckmoduls infolge des Eigengewichts und der Mannlast von 75kg. Zur Mannlast ist zu bemerken, dass sie real eine 150kg-Last für den Deckmodul darstellt, da sie infolge Symmetrie auch auf der „fehlenden“ Hälfte simuliert wird. Es wurden trotzdem 75kg angesetzt, um den Fall der durchaus realen „einbeinigen“ Lastaufbringung auf die Fläche A zu erfassen.

Die Angaben für den Klebstoff wurden den Ergebnissen des Modellausschnittes entnommen.

Im Bild 41 des Bildteils ist links die nicht maßstäbliche resultierende Verformung u_R des Speichers dargestellt, rechts die Spannung σ_{xx} in den PUR-Kernen der Speicherwände. Sie liefern den höchsten E_d/R_d -Wert (Tabelle 21).

Für die Beanspruchungsrichtungen von PUR, Klebstoff und AlMgSi sowie die Verformungen gilt generell das Koordinatensystem in den Bildern rechts unten. Für die anderen Materialien sind die Beanspruchungsrichtungen an den Materialhauptachsenrichtungen ([4], Bilder 7 bis 9) orientiert.

TB3.4 Lastfall LF2: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Mannlast (EG+ HWD + ML75)

Für den Lastfall LF2 werden dieselben Langzeitwerte für die Materialkenngrößen nach Tabelle 7 in [4] verwendet wie für den Lastfall LF1. Die nachfolgende Tabelle zeigt wieder die maximalen Verformungen des Wärmespeichers sowie die E_d / R_d -Verhältnisse:

Ergebnisse des Lastfalls LF2

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 12.73 | / - 9.95 | außen : $\max \Delta_x = 0.70$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 4.41 | / - 12.95 | $\max \Delta_y = 0.68$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 0.36 | / - 3.57 | innen: - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.21 | 0.71 | 0.26 | 0.080 | 0.052 | 0.22 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.17 | 0.70 | 0.13 | 0.055 | 0.022 | 0.21 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.46 | 0.085 | - | 0.27 | 0.14 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.18 | 1.00 | 0.039 | 0.013 | 0.043 | 0.094 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 1.034 | 0.005 | - | 0.17 | 0.067 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.035 | 0.10 | - | 0.31 | 0.067 |

TB3.Tabelle 22: Ergebnisse des Lastfalls LF2: EG+HWD+ML75

Wie der Tabelle 22 zu entnehmen ist, wird in diesem Lastfall die Grenztragfähigkeit des PUR-Hartschaumes erreicht, während alle anderen Materialien sehr gering ausgelastet sind.

Durch EG, HWD und die Mannlast werden maximale Verformungen des Wärmespeichers von

$$\begin{aligned} \text{horizontal: } u_x &= 12.73 \text{ mm} \\ \text{horizontal: } u_y &= - 12.95 \text{ mm} \\ \text{vertikal: } u_z &= - 3.57 \text{ mm} \end{aligned}$$

errechnet. Zu bemerken ist die deutlich geringere Verformung der Speicherwand mit den Durchdringungen. Sie ist steifer geworden (vgl. Teilbericht 2, Tabelle 17). Bild 42 des Bildteils zeigt links nicht maßstäblich die resultanten Verformungen

$$u_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{-0.5}.$$

Im Bild 42 des Bildteils ist rechts die Spannungen σ_{xz} im PUR-Hartschaum mit dem größten E_d/R_d -Verhältnismodell dargestellt. Die Bereiche maximaler Beanspruchung sind deutlich zu erkennen.

Auch für diesen Lastfall wird für die Beanspruchungskomponenten der Materialien das Bemessungskriterium $E_d / R_d \leq 1$ erfüllt.

TB3.5 LF3: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + Mannlast (EG + HWD + T95 + ML75)

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Lastfällen LF1 und LF2 ist zur Ermittlung der Langzeitkennwerte für die verwendeten Materialien hier der Temperatureinfluss mit zu berücksichtigen, so dass die Abminderungsfaktoren der Tabellen 10 und 11 in [4] zum Tragen kommen. Die daraus für diesen Lastfall folgenden Materialkennwerte sind der Tabelle 12 in [4] zu entnehmen.

Ergebnisse des Lastfalls LF3

In der nachfolgenden Tabelle 23 werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|--|----------------|------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 22.65 / -16.78 | | außen : $\max\Delta_x = 1.9$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.17 / -23.08 | | $\max\Delta_y = 1.8$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 1,73 / - 8.18 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 11.58 | -0.061 | 2.35 | 2.26 | 5.33 | 37.40 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 10.02 | -0.066 | -2.90 | 1.95 | 3.14 | 36.38 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.034 | -2.95 | - | -7.25 | 21.48 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.28 | -0.036 | -0.19 | -0.31 | 1.21 | -20.44 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.032 | 0.069 | - | 2.60 | 9.36 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.031 | 0.067 | - | 4.10 | -10.04 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00355 | -0.0648 | 0.0115 | 0.00126 | 0.00217 | 0.00413 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00539 | -0.0697 | 0.00765 | 0.00110 | 0.00218 | 0.00402 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0384 | 0.00864 | - | 0.00409 | 0.00255 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.00665 | -0.107 | 0.00108 | 0.000676 | -0.00255 | -0.00757 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.0948 | 0.000627 | - | 0.00579 | 0.00348 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.0914 | 0.00474 | - | 0.00919 | 0.00378 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.39 | 1.96 | 1.07 | 0.16 | 0.18 | 0.25 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.33 | 2.13 | 0.63 | 0.14 | 0.11 | 0.24 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.82 | 0.64 | - | 0.60 | 0.15 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.41 | 2.36 | 0.32 | 0.039 | 0.15 | 0.14 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 2.28 | 0.057 | - | 0.52 | 0.065 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.21 | 0.56 | - | 0.82 | 0.070 |

TB3.Tabelle 23: Ergebnisse des Lastfalls LF3: EG+HWD+T95+ML75

Durch EG, HWD, die Innentemperatur und die Mannlast werden jetzt maximale Verformungen des Wärmespeichers von

horizontal $u_x = 22,65$ mm

horizontal $u_y = 23,08$ mm

vertikal $u_z = 8,18$ mm

ausgewiesen. Bild 43 des Bildteils zeigt links die daraus folgende resultante Verformung nicht maßstäblich. Auch hier ist zu erkennen, dass die Seitenwand mit den Durchführungen deutlich geringere Verformungen aufweist als die gegenüberliegende Seitenwand.

Im Bild 43 rechts sind die Orte der maximalen Laminat-Spannungen σ_{xx} des Wärmespeichers dargestellt. Sie liegen in den Innenecken der Eck-Module. Dasselbe gilt auch für die maximalen Spannungen σ_{yy} . Die Bereiche sind sehr, sehr klein.

Der Tabelle 23 ist zu entnehmen, dass der PUR-Hartschaum das Bemessungs- Kriterium $E_d / R_d \leq 1$ bis auf eine Ausnahme nicht erfüllt, jedoch fallen die Überschreitungen geringer aus

infolge der steiferen Seitenwand mit den Durchführungen der Variante IV. Diese Überschreitung der Tragfähigkeitsgrenze liegt nur in kleinen Bereichen vor allem in den Winkelecken vor. Unbedeutend wird das Bemessungskriterium E_{dx}/R_{dx} für die Klebschicht überschritten.

Bild 44 zeigt beispielhaft die σ_{xx} - und σ_{yy} - Spannungen im PUR-Hartschaum. Nur Bereiche mit den Farben grau bis dunkelblau verletzen das Bemessungskriterium ($R_{dx} = R_{dy} = 0.031 \text{ N/mm}^2$ für Druck). Im Zugbereich liegt keine Überschreitung des Bemessungskriteriums vor.

Bild 45 zeigt beispielhaft die Spannungen σ_{xy} und σ_{yz} im PUR-Hartschaum. Das Maximum der Spannungen σ_{xy} liegt in den vertikalen Winkelecken des Speichers. Das Maximum der Spannungen σ_{yz} in einem schmalen Bereich zwischen Seitenwandmodul und Eckmodul (oben und unten).

Die Überschreitungsbereiche werden durch die Farbbereiche grau bis dunkelblau und rosa bis rot gekennzeichnet ($R_{dyz} = R_{dxy} = 0.014 \text{ N/mm}^2$), sie sind relativ klein und werden für die Tragfähigkeit der Speicherwände als nicht einschränkend bewertet.

Die Auslastungen der anderen Materialien sind gering bis angemessen und erfüllen das Bemessungskriterium.

Bild 46 zeigt die σ_{xx} -Spannungen, die den größten E_d / R_d - Wert aufweisen, für die Kleberschicht zwischen Boden-/Deck-Modul und den Eckmodulen. Die maximale σ_{xx} - Zugspannung quer zur Kleberfläche in den vertikalen Schenkeln der Klebfugen beträgt 2.35 N/mm^2 (Tabelle 23).

Hervorzuheben ist die Verformung der Speicherwand von $\max u_y = -23.08 \text{ mm}$. Sie liegt mit 0.0144 geringfügig über $1/70$ der Spannweite. Horizontalspalte werden nicht mehr ausgewiesen.

TB3.6 LF4: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz+ 0.05bar Innendruck (EG + HWD + T95 + 0.05 bar)

Als Eingabewerte für die Materialien werden dieselben Werte wie für den Lastfall LF3 verwendet (Tabelle 12 in [4]). Der Innendruck von 0.05bar wurde auf alle Innenwände einschließlich der Innenwand des Deckmoduls und die des Einstiegschachtes mit Deckel zusätzlich aufgebracht.

Ergebnisse des Lastfalls LF4

Auch für diesen Lastfall werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 24 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|---|-----------------|---------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 36.60 / -27.21 | | außen : $\max \Delta_x = 2.70$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.35 / -37.07 | | $\max \Delta_y = 2.52$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 13.38 / - 2.94 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 16.43 | -0.071 | -2.16 | 3.05 | 6.15 | 55.82 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 13.94 | -0.077 | -3.07 | 2.95 | 3.42 | 54.96 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.043 | -2.72 | - | -9.57 | 29.90 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -4.27 | -0.043 | -0.2 | 0.46 | -1.37 | -28,34 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.041 | 0.068 | - | 3.01 | 14.55 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | 0.040 | -0.59 | - | 4.92 | 14.86 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00502 | -0.0747 | 0.0119 | 0.00170 | 0.00227 | 0.00617 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00456 | -0.0820 | 0.000619 | 0.00165 | 0.00225 | 0.00615 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0541 | 0.00839 | - | -0.00592 | 0.00362 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.00893 | -0.1278 | 0.00113 | 0.00100 | 0.00289 | -0.0105 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.1201 | 0.000623 | - | 0.00681 | 0.00541 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.1196 | 0.00425 | - | 0.0111 | 0.00552 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.55 | 2.29 | 0.96 | 0.22 | 0.21 | 0.37 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.46 | 2.48 | 0.67 | 0.21 | 0.11 | 0.37 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.05 | 0.59 | - | 0.79 | 0.20 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.53 | 3.07 | 0.33 | 0.058 | 0.17 | 0.20 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 2.92 | 0.057 | - | 0.60 | 0.10 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.85 | 0.49 | - | 0.98 | 0.10 |

TB3.Tabelle 24: Ergebnisse des Lastfalls LF4: EG+HWD+T95+0.05bar

Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, dass der Deckmodul jetzt durch den zusätzlichen Innendruck eine deutliche Aufwölbung auf 13.38mm erfährt und die horizontale Wandverformung auf - 37.07mm angewachsen ist (Bild 47 des Bildteils, links).

Ferner sind auch die Bemessungskriterien für die Komponenten des PUR-Hartschaums stärker verletzt. Bild 47 zeigt rechts die σ_{xy} -Spannungen mit den höchsten E_d / R_d – Werten in den PUR-Hartschaum-Kernen. Die Farbbereiche, innerhalb derer das Bemessungskriterium jeweils verletzt ist, liegen zwischen grau und hellgrün bzw. zwischen braun und rot.

Es wird eingeschätzt, dass für eine kurzzeitige Innendruckbelastung von 0.05bar die Integrität des Speichers dennoch gesichert bleibt.

TB3.7 LF5: Eigengewicht + Hydrostatischer Wasserdruck + Temperaturdifferenz + 0.10bar Innendruck (EG + HWD + T95 + 0.1 bar)

In diesem Lastfall wird der zusätzliche Innendruck auf 0.1 bar erhöht, der auf alle Innenwände, einschließlich die des Einstiegschachtes, wirkt. Alle anderen Eingabewerte bleiben dieselben wie im vorangegangenen Lastfall LF4.

Ergebnisse des Lastfalls LF5

Es werden alle Ergebnisse der Berechnung in der Tabelle 25 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | Vertikalspalte | | Horizontalspalte | |
|--|----------------|------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|---------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 50.95 / -36.55 | | außen : $\max\Delta_x = 3.6$ | | außen : $\Delta_z = 0$ (oben) | |
| u_y [mm] | 0.63 / -51.33 | | $\max\Delta_y = 3.3$ | | $\Delta_z = 0$ (unten) | |
| u_z [mm] | 26.30 / - 3.67 | | innen : - | | innen: - | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebstoff Crestabond | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | AlMgSi |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 21.19 | -0.083 | -2.25 | 3.86 | 6.73 | 75.54 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | 17.82 | -0.090 | -3.24 | 3.91 | 3.55 | 74.50 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.054 | -2.62 | - | -11.61 | 38.64 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -5.56 | -0.054 | 0.20 | 0.66 | 1.50 | -36.73 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.054 | -0.068 | - | 3.55 | 19.75 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | 0.053 | -0.68 | - | 5.88 | 20.44 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.00649 | -0.0688 | 0.0122 | 0.00216 | 0.00238 | 0.00836 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.00522 | -0.0950 | 0.000619 | 0.00226 | 0.00237 | 0.00826 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.0681 | 0.00833 | - | -0.00787 | 0.00469 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.0116 | -0.159 | 0.00119 | 0.00144 | 0.00322 | -0.0136 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.159 | 0.000623 | - | -0.00782 | 0.00739 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.158 | 0.0122 | - | 0.0132 | 0.00757 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.71 | 2.68 | 1.02 | 0.28 | 0.22 | 0.50 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.59 | 2.90 | 0.70 | 0.28 | 0.11 | 0.50 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.32 | 0.59 | - | 0.96 | 0.26 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.70 | 3.86 | 0.33 | 0.083 | 0.19 | 0.26 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 3.85 | 0.06 | - | 0.71 | 0.14 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 3.79 | 0.57 | - | 1.18 | 0.14 |

TB3.Tabelle 25: Ergebnisse des Lastfalls LF5: EG+HWD+T95+0.1bar

Wie Tabelle 25 deutlich macht, werden in den PUR-Hartschaum-Kernen für alle Beanspruchungskomponenten die Bemessungskriterien deutlich überschritten.

Das Bemessungskriterien für σ_{xz} wird auch in den GFK-Verstärkungs-Profilen überschritten.

Durch den Innendruck von 0.1bar ergibt sich eine Aufwölbung des Deckmoduls von 26.30mm sowie eine maximale horizontale Seitenwand-Verformung von $u_y = -51.33$ mm

Im Bild 48 des Bildteils ist links die resultante Verformung u_R des Wärmespeichers nicht maßstäblich dargestellt. Auch hier ist der Verformungsunterschied zwischen der Seitenwand mit Durchführungen und der gegenüberliegenden deutlich zu erkennen.

Bild 48 zeigt rechts die Spannungen σ_{xy} mit dem höchsten E_d/R_d – Wert in den PUR-Kernen der Speicherwände. Bereiche mit Farben von grau bis dunkelgrün und nunmehr violett bis rot

überschreiten das Bemessungskriterium. Die Bereiche nehmen eine beträchtliche Fläche bzw. einen beträchtlichen Raum ein.

Die Öffnungsangaben zu den Vertikalspalten sind sehr theoretische Werte und in der Größe nicht zu erwarten. Die Horizontalspalte sind geschlossen, auch der Vertikalspalt in der Seitenwand mit Durchführungen.

Generell ist festzustellen dass durch die Realisierung der Durchführungsvariante IV die entsprechende Seitenwand deutlich steifer wurde und die Verformung derselben deutlich geringer. Auch die mehrheitlich etwas geringeren Spannungen im PUR-Kern haben dieselbe Ursache.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass der Wärmespeicher in den Lastfällen 1 bis 3 statisch auch unter Berücksichtigung der Durchführungen Variante IV sicher ist und den Anforderungen entspricht.

Für den Lastfall LF4 kann das für eine geplante kurzzeitige Innendruckbelastung von 0.05 bar ebenfalls bestätigt werden, wenn man berücksichtigt, dass der Langzeitenfluss mit dem Faktor 2.0 für die Festigkeit des PUR-Hartschaums berücksichtigt wurde. Damit sind nur die Farbbereiche grau bis mittelblau und orange bis rot in Bild 47 Bereiche, in denen das Bemessungskriterium überschritten wird. Sie werden als unerheblich eingeschätzt.

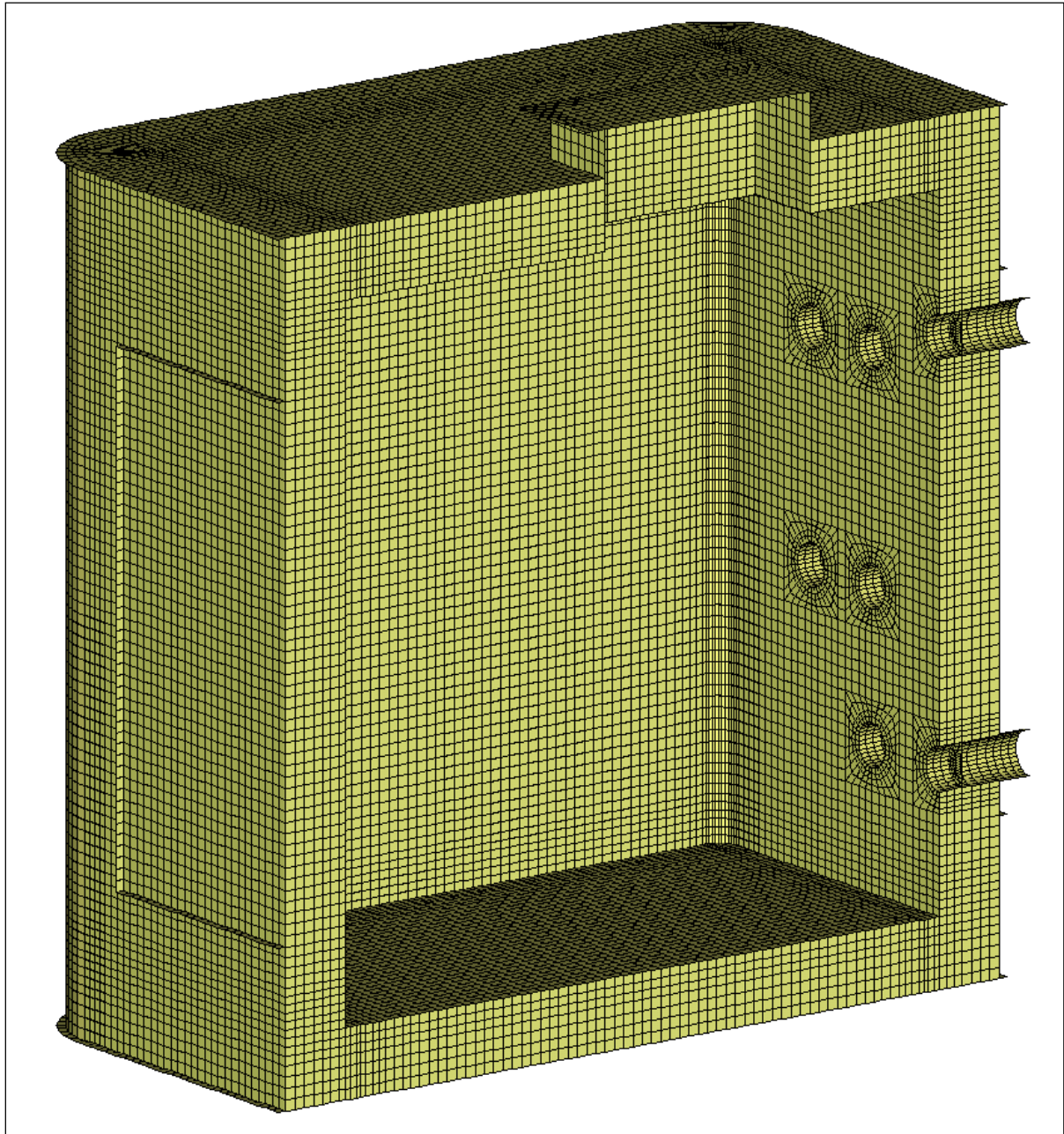
Da Lastfälle mit Innendruck durch Ventil geregelt werden, hat der Lastfall LF5 mit 0.1 bar Innendruck zunächst nur orientierende Bedeutung.

Im Lastfall LF5 sind die Bereiche, in denen das Bemessungskriterium in den PUR-Hartschaum - Kernen überschritten werden, erheblicher.

Hier sind neben den aufgezeigten Grenzen auch die Klebverbindungen zwischen Deck-/ Bodenmodul und Eckmodulen relativ hoch belastet. Auch die zulässigen Grenzen der Längsdehnungen ε_{xx} und ε_{yy} von 0.5% werden in den Mantellaminaten gering überschritten. Es wird eingeschätzt, dass die Integrität des Wärmespeichers in der gegenwärtigen Ausführung für diesen Lastfall nicht gewährleistet ist.

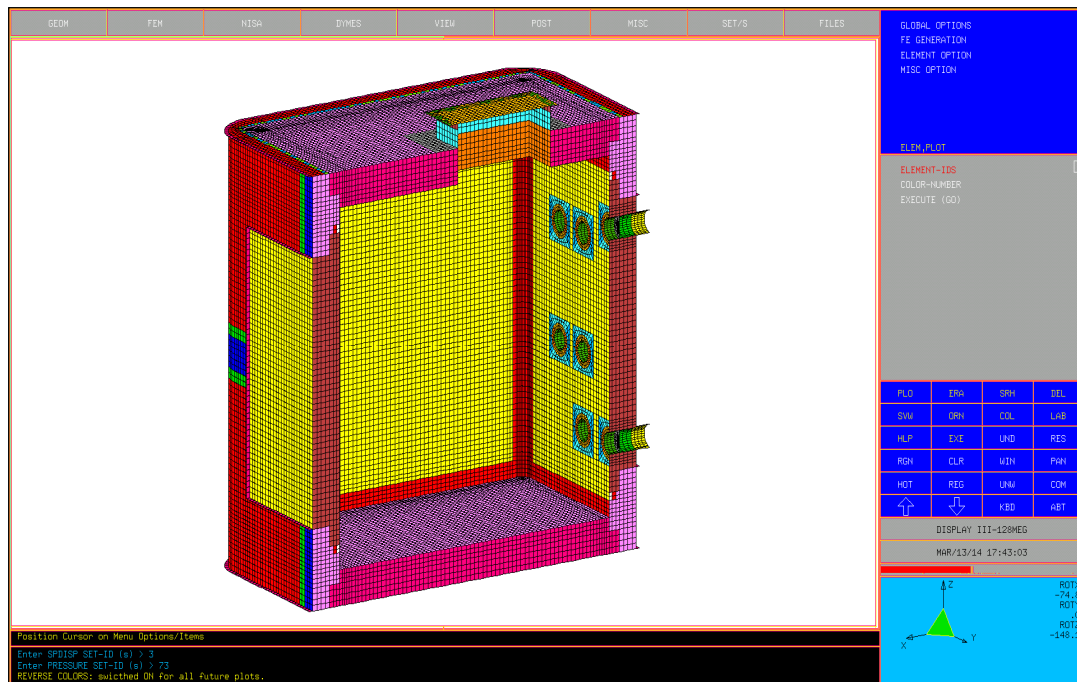
4m³ LABOR - WÄRMESPEICHER

Durchführungen: Variante IV

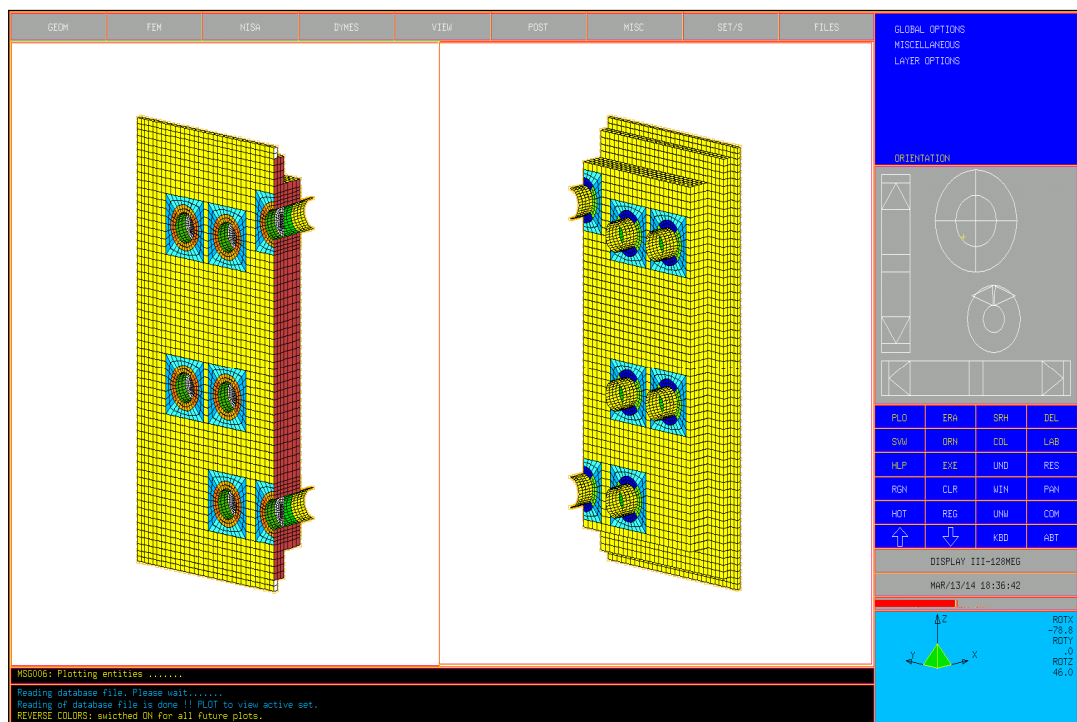


Darstellung 2

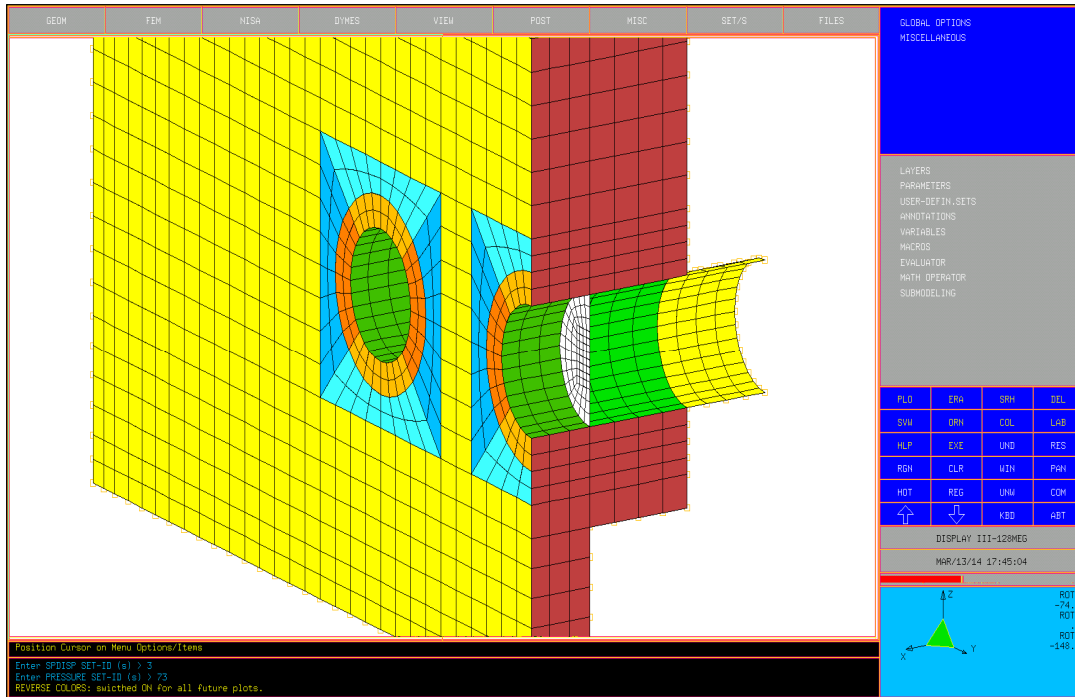
4m³ LABOR – WÄRMESPEICHER - Durchführungen: Variante IV



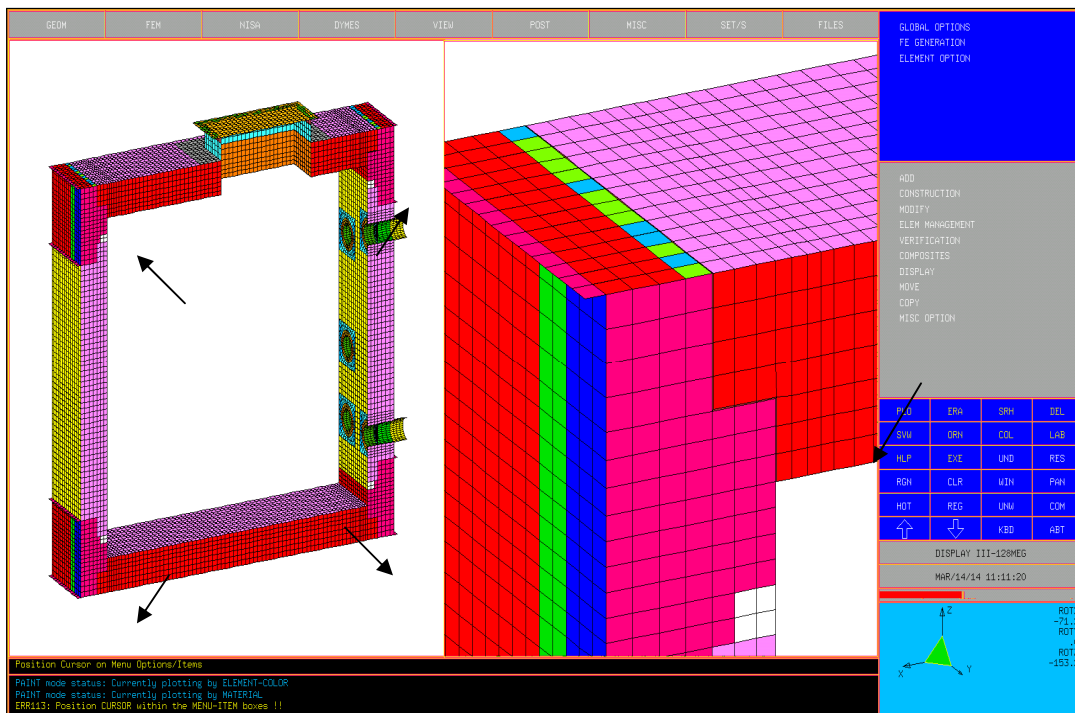
TB3.Bild 37: Halbmodell mit Einstiegschacht und Durchführungen Variante IV



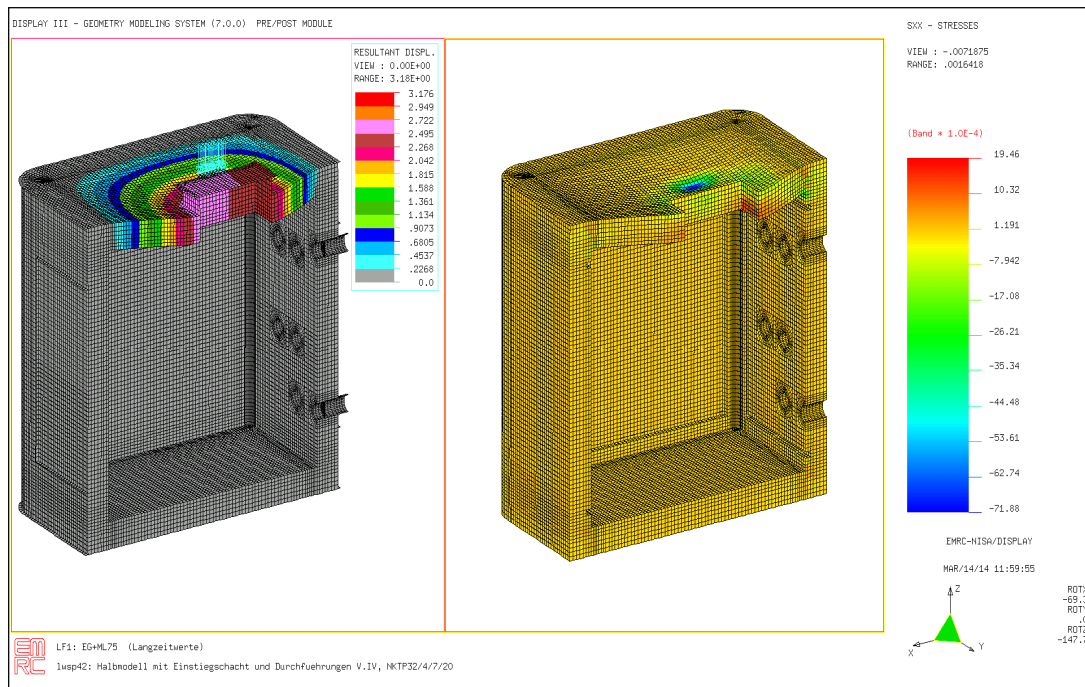
TB3.Bild 38: Seitenwand-Modul mit Durchführungen Variante IV. Innen- und Außenansicht



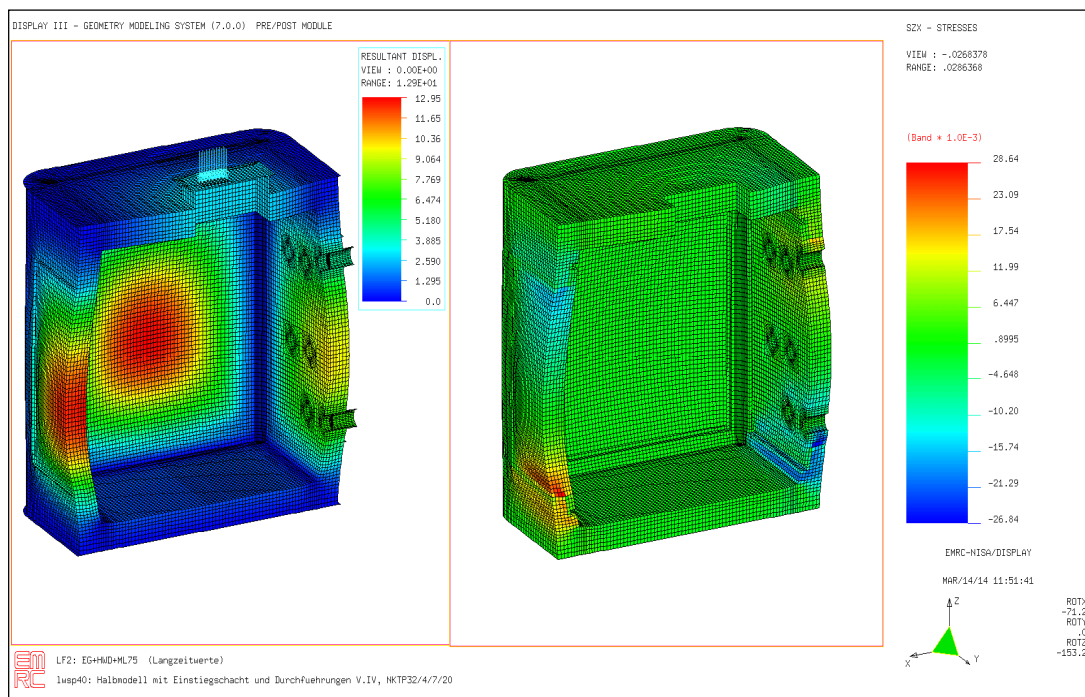
TB3.Bild 39: Durchführung Variante IV vergrößert dargestellt



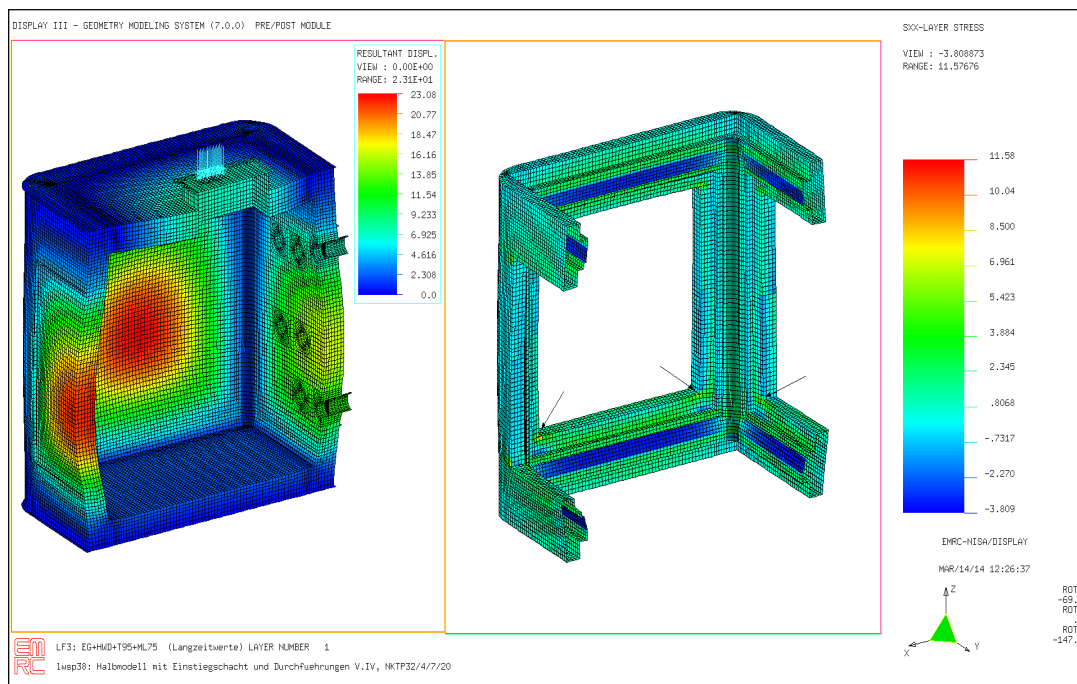
TB3.Bild 40: Links: Modell-Ausschnitt. Rechts: Vergrößerung mit Klebfuge. Dicke $t=1\text{mm}$.



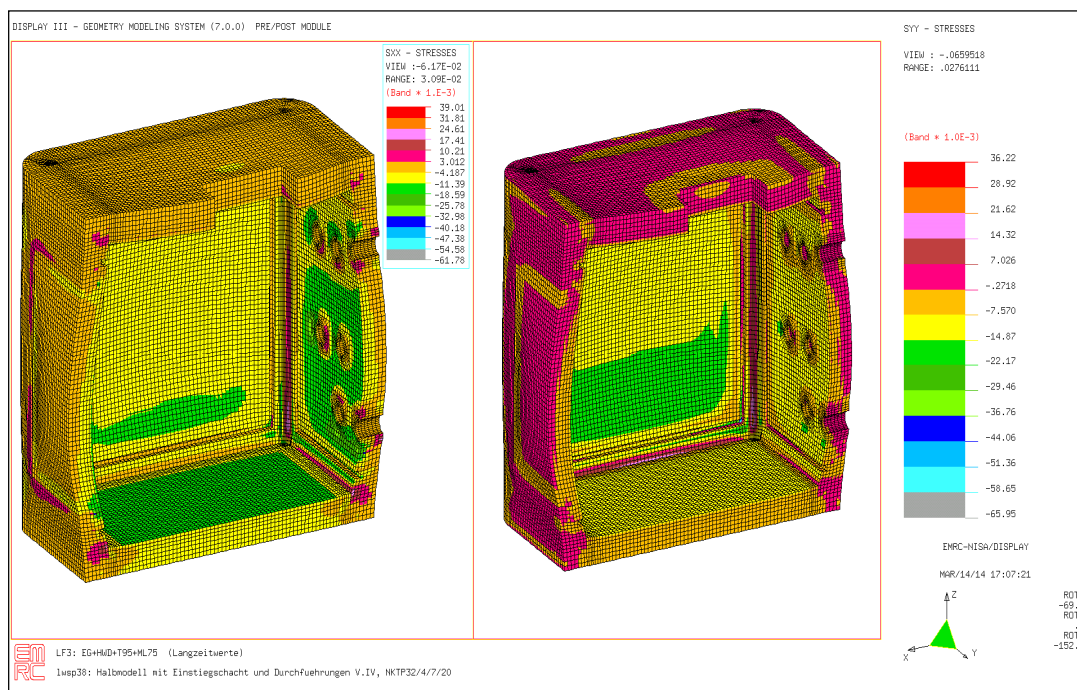
TB3.Bild 41: LF1: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich.



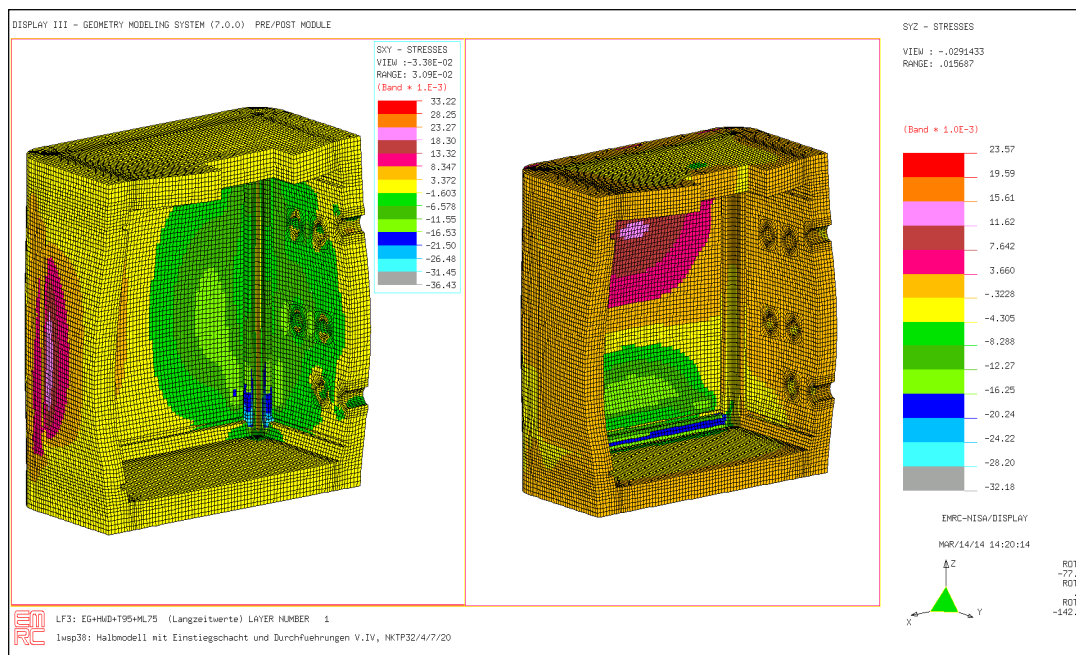
TB3.Bild 42: LF2: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{zx} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich



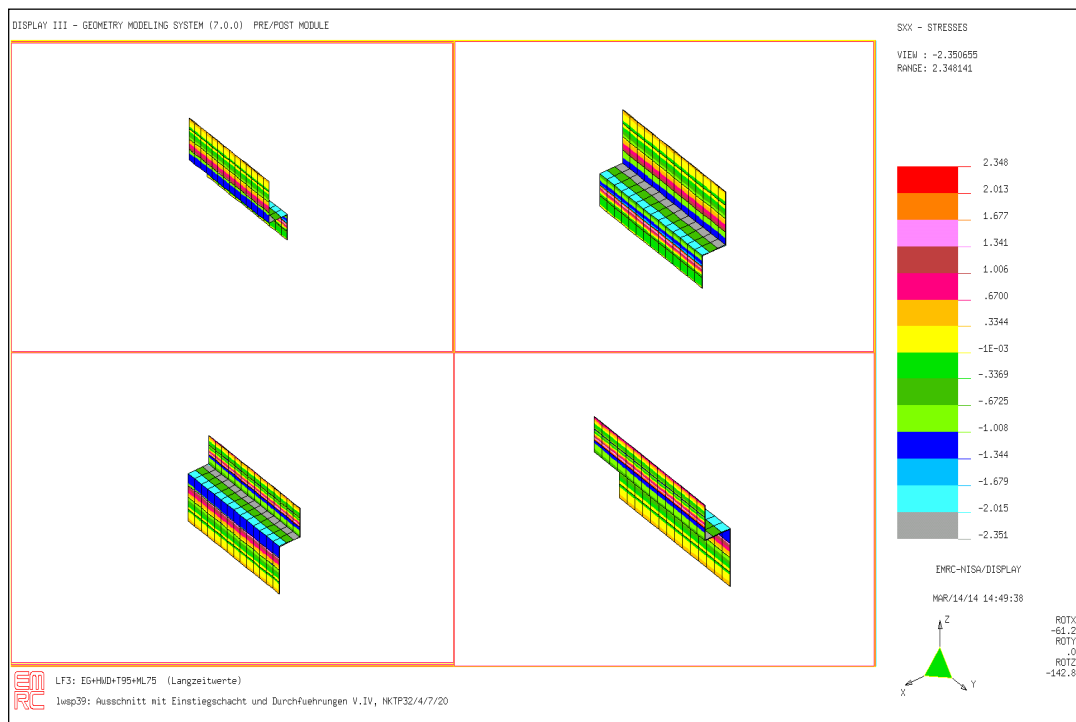
TB3.Bild 43: LF3: Resultierende Verformungen u_R [mm] und maximale Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den Mantel-Laminaten. Verformungen nicht maßstäblich



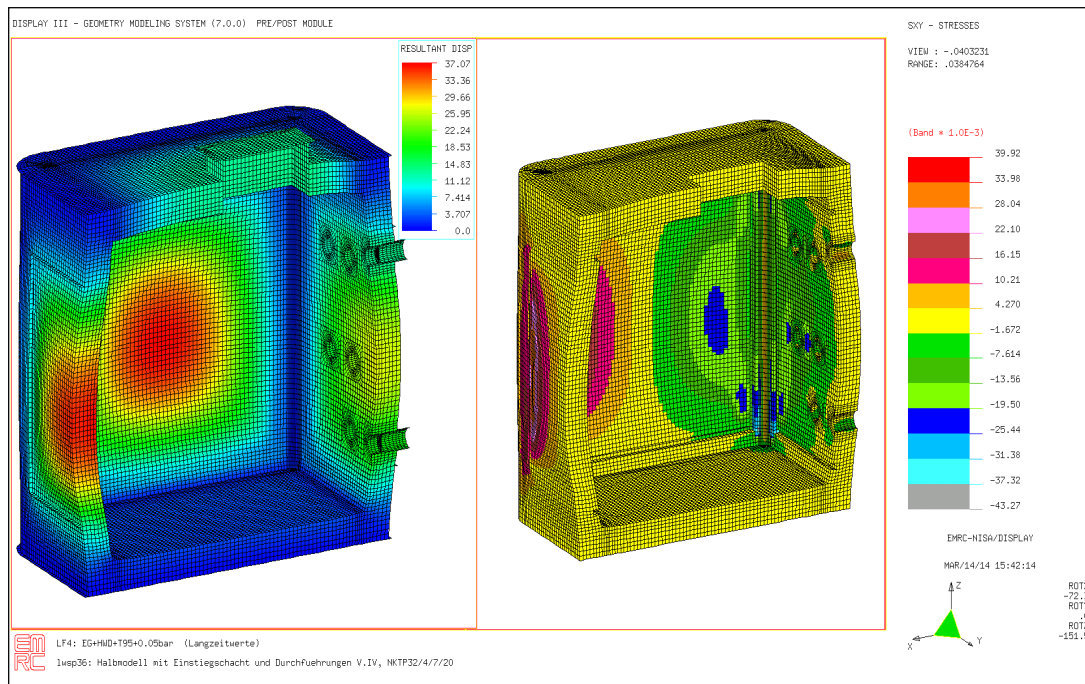
TB3.Bild 44: LF3: Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich



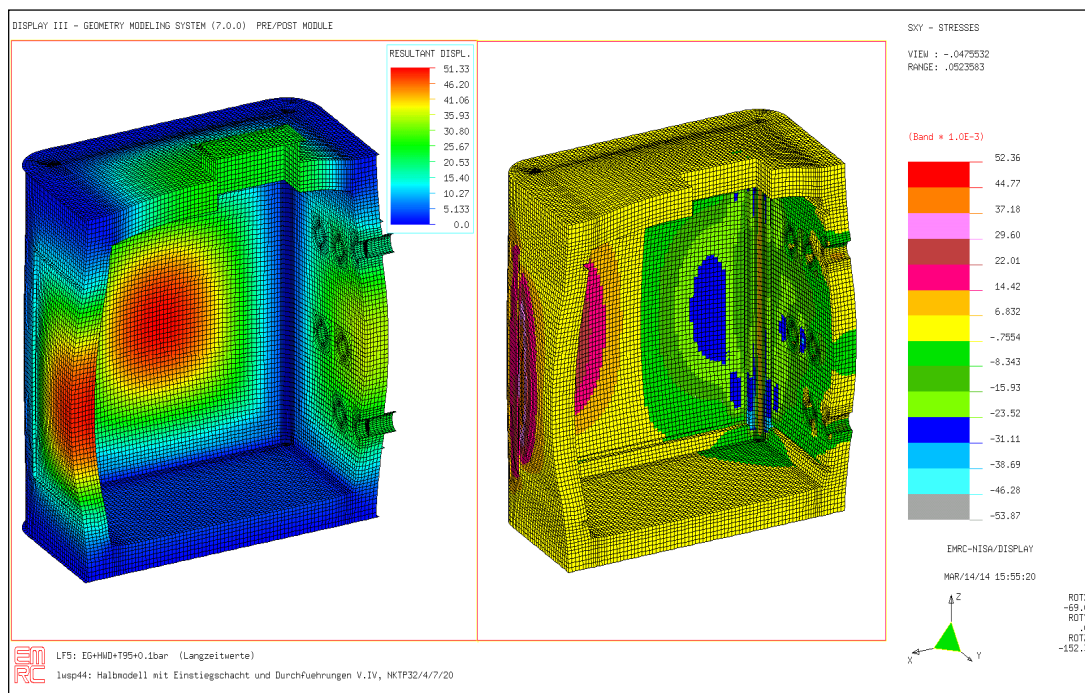
TB3.Bild 45: LF3: Spannungen σ_{xy} und σ_{yz} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich



TB3.Bild 46: LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den Klebschichten zwischen Boden-Deckmodul und Eckmodulen. (Vergleiche Ausschnitt Bild 40)



TB3.Bild 47: LF4: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich



TB3.Bild 48: LF5: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich

III.3 Fertigungsphase

III.3.1 Variantenentwicklung bei den auswechselbaren Seitenwandmodulen

Durch die auswechselbaren Seitenmodule war es möglich, eine endliche Zahl von unterschiedlichen Isolationsbeispielen theoretisch und experimentell zu überprüfen. Natürlich legte die begrenzte Laufzeit von 2 Jahren für das Gesamtthemas die Variantenausführung bei je 3 Monaten Prüfungszeit auf ~ 3 fest, d.h.:

PUR – Vollwand (V I)

Integralwand mit Vakuumpaneelen (V II)

Integralwand mit einer 2. kompakten VIP-Isolationsschicht (V III)

Rein zeichnerisch wurden zunächst von

V II 6 Entwürfe (vgl. ZN 240 – 11 – 0.1 ÷ 0.6 und von

V III 3 Entwürfe (vgl. ZN 240 - 12 – 0.1 ÷ 0.3) angefertigt.

Für die rechnerische Nachweisführung erfolgten umfangreiche Arbeiten als Zwischenberichte und FEM-Teilberichte.

Im Einzelnen zeigte sich durch das Fehler der querkraftsteifen Schichten im Bereich der weichen VIP – Paneele bei der V II unzulässig hohe Auswölbungen beim LF 4

III.3.2 FEM-Teilbericht 4 als Einschub - 4m³ Labor – Wärmespeicher in Modulbauweise

Variante 2 mit Vakuum-Isolationspaneelen (VIP)

Variante 3 mit zusätzlicher Glasschaum-Isolierung

TB4.1 Zum FEM – Modell

Zielstellung für die Varianten war die zwängungsfreie Unterbringung der VIP sowie eine hinreichend niedrige Beanspruchung des relativ sprödebrüchigen Glasschaums. In Voruntersuchungen wurden mit dieser Zielstellung die hier näher untersuchten Varianten ermittelt.

Im FEM - Modell mit der Mediendurchführung der Variante IV des Teilberichtes 3 wurden die Seitenwände ohne Mediendurchführung mit zusätzlichen GFK-Innenlaminaten versehen, die den PUR - Hartschaumraum in zwei Bereiche aufteilen:

Innerer Bereich: weiterhin für PU - Hartschaum

Äußerer Bereich: für Vakuum-Isolationspaneele (Variante 2)
für Glasschaum (Variante 3).

Variante 2: Der innere PUR - Hartschaumbereich erhielt zwischen dem neuen Innenlaminat und dem inneren GFK - Mantellaminat der Seitenwand 4 kreuzweise angeordnete GFK - Kassettenstege der Höhe von 85mm und der Wanddicke von 5mm zur erforderlichen Aussteifung .

Variante 3: Der innere PUR- Hartschaumbereich erhielt zwischen dem neuen Innenlaminat und dem inneren GFK - Mantellaminat der Seitenwand 2 kreuzweise angeordnete GFK - Kassettenstege der Höhe von 105mm und der Wanddicke von 5mm zur erforderlichen Aussteifung .

An den Längsseiten dieser Stege wurden 5 mm breite und 5 mm dicke Randstreifen zur Simulation des Klebspachtels für eine schubfeste Verbindung der Stege mit den Decklaminaten angeordnet. Die dadurch verringerte Höhe der GFK-Stege um 10mm wurde zur Gewährleistung des ursprünglichen Trägheitsmomentes der Stege durch eine entsprechend größere Wandstärke der Stege kompensiert.

Die sonstige Geometrie wurde unverändert übernommen, ebenso alle Materialkennwerte der GFK - Lamine, einschließlich der GFK-Kassettenstege und der zusätzlichen GFK - Innenlamine sowie des PUR -Hartschaums und des Derakane - Reinharzes.

Neu ist das Klebermaterial zur Verklebung der Module untereinander und der Kassettenstege mit den GFK - Laminaten sowie der Glasschaum in der Variante 3. Die Kennwerte der neuen Materialien wurden dem 3.Sachbericht entnommen. Als neues Klebermaterial wurde das Klebharz BÜFA 740-0119, für den Glasschaum der Typ W+F eingesetzt..

Die Alu - Verstärkungsprofile in den Eckmodulen wurden durch PUR - Hartschaum ersetzt, da die bisherige Verschraubung der Seitenwandmodule mit den Eckmodulen durch Verklebung erfolgt. Die GFK-Verstärkungsprofile wurde beibehalten.

Für den Einfluss von Zeit, Temperatur, Medien, Fertigung sowie für die Sicherheit wurden die Steifigkeitskennwerte des Klebharzes nach Vorgabe um den Gesamtfaktor 4.8 und die Festigkeiten um den Gesamtfaktor 12.1 abgemindert.

Die Kennwerte des Glasschaums wurden nicht abgemindert, da keine verlässlichen Angaben dazu zur Verfügung stehen und die Änderungen der Verformungen und Beanspruchungen des Speichers durch eine Kontrollrechnung ohne Glasschaum im Rahmen der Voruntersuchungen als nur geringfügig ausgewiesen wurden, sodass der Glasschaum hinsichtlich der Tragsicherheit des Speichers keine Bedeutung hat. Die relativ hohen Kassettenstege liefern ausreichend Steifigkeit.

Es wurde eine Anhebung der Kurzzeitwerte der Schubmodule G_{xy} , G_{xz} und G_{yz} des Klebharzes von 400Nmm^2 auf 1570N/mm^2 vorgenommen, weil eine derart große Differenz zwischen E-Modul und Schub-Modul anzuzweifeln ist und vom Programm für isotrope Materialien auch nicht akzeptiert wird. Die Kurzzeitwerte für die Schubmodule wurden deshalb nach der üblichen Beziehung

$$G = E / 2(1+\nu)$$

bestimmt (vergl. Tabelle 26):

| Kennwerte | Klebstoff BUFA 740-0119 | | | Glasschaum Typ W+F |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | Ausgangskur zeitkennwert e | verwendete Kurzzeitkenn werte | verwendete Langzeitkenn werte | verwendete Langzeitkennwerte |
| ρ [t/mm ³] | 1.4×10^{-9} | 1.4×10^{-9} | 1.4×10^{-9} | 0.1×10^{-9} |
| ψ [%] | - | - | - | - |
| E_x [N/mm ²] | 4400 | 4400 | 917 | 100 |
| E_y [N/mm ²] | 4400 | 4400 | 917 | 100 |
| E_z [N/mm ²] | 4400 | 4400 | 917 | 100 |
| ν_{xy} [-] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 400 | 1570 | 327 | 38 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 400 | 1570 | 327 | 38 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 400 | 1570 | 327 | 38 |
| α_x [K ⁻¹] | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 9×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 9×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 9×10^{-6} |
| Kennwerte für das Klebstoff BUFA 740-0119 und Glasschaum Typ W+F | | | | |
| F_{xc} [N/mm ²] | 40 | 40 | 3.31 | 0.1 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 40 | 40 | 3.31 | 0.1 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 40 | 40 | 3.31 | 0.4 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 40 | 40 | 3.31 | 0.1 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 40 | 40 | 3.31 | 0.4 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 40 | 40 | 3.31 | 0.1 |
| F_{sxv} [N/mm ²] | 11 | 11 | 0.91 | 0.045 |
| F_{svz} [N/mm ²] | 11 | 11 | 0.91 | 0.045 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 11 | 11 | 0.91 | 0.045 |

Die GFK-Versteifungsprofile im Seitenwandmodul wurden als geschichtete orthotrope Solid-Elemente mit eindeutiger Festlegung der Materialhauptachsen unverändert aus Teilbericht 2 übernommen. Die Materialhauptachse x verläuft in Längsrichtung der Profile, die y-Achse orthogonal dazu über die Breite, die z-Achse über die Dicke der Profile.

Die Materialhauptachse x der neuen GFK - Innenlaminare verläuft horizontal, die y-Achse vertikal. Die Materialhauptachse x der Stege verläuft jeweils orthogonal zur Ebene der Innenlaminare, die y-Achse parallel zu dieser.

Die entsprechenden Spannungen in den Ergebnissen haben jeweils dieselbe Orientierung. Für alle Spannungen der isotropen Materialien (PUR - Hartschaum, Glasschaum, Klebstoff, Reinharz) ist das jeweilige in den Bildern angegebene Koordinatensystem maßgebend.

Da für die Beanspruchung der Klebschicht zwischen Deck-/Bodenmodul und den Eckmodulen in Dickenrichtung im kompletten Halbmodell keine Aussage gemacht werden kann, wurde für die Variante 2 ein Modellausschnitt im stärksten Verformungsbereich des Halbmodells entnommen und in diesen reale Klebfugen der Dicke $t=1\text{mm}$ eingearbeitet. Dieser Ausschnitt wurde den Verformungen aus dem Lastfall LF4 des Halbmodells unterworfen und berechnet.

TB4.2 Berechnung der Beanspruchungen der Varianten 2 und 3 des Speichers

Es wird für die Varianten 2 und 3 jeweils der Lastfall 4 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet:

LF4: EG + HWD + T95 + 0.05 bar Innendruck

Variante 2: NISA - File: lwsp55/58.dbs

Variante 3: NISA - File: lwsp56/59.dbs

Nach bisherigen Ergebnissen zu den Lastfällen LF1, LF2, und LF3 kann gesagt werden, dass diese durch den Lastfall LF 4 im Fall des Nachweises einer hinreichenden Tragfähigkeit mit abgedeckt werden. Zum Lastfall LF5 kann erst nach Abschluss der vorliegenden Untersuchung eine Aussage getroffen werden.

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen und das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes

(Index d kennzeichnet hier „design“)

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Der Lastfall LF4 ist eine Lastkombination. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet .

Da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind, (die Temperatur darf 95°C nicht wesentlich überschreiten, um ein Kochen und erhöhten Dampfdruck zu vermeiden), werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt.

Für die GFK-Versteifungsprofile werden die Biegeverformungen derselben im Halbmodell realistisch erfasst, nicht jedoch die Spannungen [4]. Die berechneten Spannungen werden wie in [4] mit dem Faktor

$$F_G = E_{OG} / E_{MG} = 8300 / 607 = 13.67$$

multipliziert, um die realen Werte zu erhalten.

TB4.2.1 Variante 2 - Variante mit Vakuum-Isolationspaneelen Lastfall LF4: EG + HWD + T95 + 0.05 bar Innendruck

Als Eingabewerte für die Materialien werden die Werte der Tabelle 1.2.12 verwendet. Lediglich die dort aufgeführten Werte für den Kleber werden durch die der Tabelle 26, vierte Spalte, ersetzt. Die Werte für die Alu-Profile entfallen. Der Innendruck von 0.05bar wurde auf alle Innenwände einschließlich der Innenwand des Deckmoduls und die des Einstiegschachtes mit Deckel zusätzlich aufgebracht.

Ergebnisse der Variante 2, Lastfall LF4

Es werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 27 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | | | | |
|--|----------------|------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 16.86 / -27.94 | | | | | |
| u_y [mm] | 0.52 / -17.32 | | | | | |
| u_z [mm] | 13.11 / - 2.93 | | | | | |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebharz in den Fugen BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | Klebspachtel BÜFA 740-0119 |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | -13.17 | -0.073 | -4.56 | 2.79 | 11.34 | -5.85 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | -14.62 | -0.077 | -5.24 | 1.87 | 8.20 | -5.86 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.040 | -5.54 | - | 13.12 | -5.75 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.63 | -0.044 | -0.19 | 0.23 | 1.91 | -5.59 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.034 | -0.45 | - | 7.66 | 4.66 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | 0.036 | 1.66 | - | 9.71 | -4.65 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | -0.004457 | -0.07757 | 0.006788 | 0.001653 | 0.003533 | -0.004318 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | -0.004949 | -0.08246 | 0.001533 | 0.001105 | 0.002429 | -0.004452 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.05150 | 0.005553 | - | 0.01169 | 0.003021 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.007601 | -0.1294 | 0.001612 | 0.0005129 | 0.003949 | -0.011653 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.1013 | 0.001311 | - | 0.01702 | 0.01375 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.1068 | 0.002567 | - | 0.02151 | -0.01369 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.40 | 2.35 | 1.38 | 0.20 | 0.38 | 1.77 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.44 | 2.48 | 1.58 | 0.13 | 0.27 | 1.77 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.98 | 1.67 | - | 1.09 | 1.74 |
| E_{dxv} / R_{dxv} | 0.45 | 3.14 | 0.21 | 0.029 | 0.24 | 6.14 |
| E_{dvz} / R_{dvz} | - | 2.43 | 0.49 | - | 1.53 | 5.12 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.57 | 1.82 | - | 1.94 | 5.11 |

TB4.Tabelle 27: Ergebnisse der Variante 2, Lastfall LF4: EG+HWD+T95+0.05bar

Die nunmehr geringen Verformungen des Wärmespeichers sind in den Vertikal- bzw. Horizontalschnitten der Bilder 3 bis 5 maßstäblich dargestellt und machen die zwangungsfreie Unterbringung der Vakuum-Isolationspaneele deutlich.

In allen GFK- Laminaten bleiben die maximalen Beanspruchungen deutlich unter den zulässigen Werten. Der etwas höhere σ_{yy} - Wert als der, der im Teilbericht 3 für diesen Lastfall ausgewiesen wurde, wird in den neuen Kassettenstegen an deren Enden erreicht .

Die maximalen Beanspruchungen im PUR -Hartschaum und im Reinharz sind kaum gegenüber den Ergebnissen des Lastfalls LF4 im Teilbericht 3 verändert.

Für den PUR -Hartschaum sind beispielhaft die σ_{xy} - Spannungen, die den höchsten E_d/R_d - Wert aufweisen, im Bild 6 dargestellt. Spannungen, die die zulässigen Werte von 0.014 N/mm² überschreiten, treten wieder nur in kleinen Bereichen auf. Das gilt auch für die anderen Spannungen im PUR - Hartschaum.

Die GFK-Verstärkungsprofile weisen etwas höhere Werte auf, was sehr wahrscheinlich auf die nicht mehr vorhandenen Alu-Profile zurück zu führen ist, die eine deutliche Versteifung im Nahbereich der GFK-Verstärkungsprofile bewirkten.

An den in der Tabelle dargestellten Ergebnissen fallen jedoch die höheren Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , des Klebharzes, die in den 1mm starken Fugen zwischen Deck-/Bodenmodul und Eckmodul ermittelt wurden, auf. Diese Spannungen sind vor allem auf die Temperaturbelastung mit dem gegenüber dem bisherigen Kleber deutlich höheren E-Modul sowie auf die Differenz zwischen den α_{th} - Werten der Mantellamine und dem Kleber in der Fuge zwischen den Mantellaminen zurück zu führen.

Die Orientierung der Spannungskomponenten im Kleber entspricht dem dargestellten Koordinatensystem im Bild 10, in dem die Spannungen σ_{xx} (in Dickenrichtung) dargestellt sind.

Eine Berechnung ohne Temperatureinfluss bzw. mit dem bisher verwendeten Crestabond unter Temperatureinfluss ergab für das Klebharz in den Fugen folgende Spannungen:

| Spannungen | ohne Temperaturlast BÜFA 740-0119 | mit vorherigem Kleber Crestabond unter Temperaturlast |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| σ_{xx} [N/mm ²] | 3.17 / -2.94 | 2.15 / -2.20 |
| σ_{yy} [N/mm ²] | 1.72 / -1.92 | 0.66 / -2.73 |
| σ_{zz} [N/mm ²] | 2.51 / -3.07 | 1.48 / -2.62 |
| σ_{xy} [N/mm ²] | 0.06 / -0.18 | 0.03 / -0.15 |
| σ_{yz} [N/mm ²] | 0.37 / -0.38 | 0.14 / -0.15 |
| σ_{xz} [N/mm ²] | 1.32 / -0.77 | 0.59 / -0.57 |

TB4.Tabelle 28: Spannungen im Kleber der Fugen unter den angegebenen Bedingungen

Die Tabelle 28 zeigt sehr niedrige Spannungen im Klebharz BÜFA 740-0119, wenn die Temperaturbelastung in der Berechnung nicht berücksichtigt wird. Diese Werte erscheinen nach überschlägiger Handrechnung richtig. Die ermittelte maximale Temperaturspannung des BAFÜ-Klebers bei Ausdehnungsbehinderung zwischen den Mantellaminen liegt bei etwa -2 N/mm^2 , so dass die unter Temperaturlast berechneten Werte ebenfalls die richtige Größenordnung aufweisen (Tabelle 27, 4. Spalte).

Mit Crestabond unter Temperatureinfluss erreichen die Kleberspannungen etwa die halben Werte der mit BÜFA 740-0119, ebenfalls unter Temperatureinfluss, berechneten (Tabelle 27, 4. Spalte), was in erster Linie trotz höheren α_{th} -Wertes auf den niedrigeren E-Modul zurück zu führen ist.

Die Schubspannungen werden von Temperaturlasten nur indirekt durch entstehende Verformungen betroffen.

Die Schubspannungen des Klebspachtels zur Übertragung der Schubkräfte der Kassettenstege auf die Deckschicht - Lamine erreichen deutlich höhere E_d/R_d - Werte. Im Bild 7 sind beispielhaft die Schubspannungen σ_{xy} dargestellt, deren Maximalwerte in den Klebspachtel-Rändern der horizontalen Kassettenstege auftreten. Entsprechende Schubspannungswerte treten auch im Klebspachtel der vertikalen Kassettenstege auf (σ_{xz} , bzw. σ_{yz}). Signifikante Schubspannungen reichen über die gesamte Steglänge, was die Bedeutung dieser Spannungen für die Tragsicherheit und Verformungsbeständigkeit bestimmt.

TB4.2.2 Variante 3 - Variante mit zusätzlichem Glasschaum Lastfall LF4: EG + HWD + T95 + 0.05 bar Innendruck

Für die Eingabewerte gilt das unter TB 4.2. Gesagte. Die Materialkennwerte des Glasschaums werden der Tabelle 26, 5. Spalte, entnommen, Es wurden auf Grund der Voruntersuchungen keine großen Änderungen in der Beanspruchung der Variante 3 gegenüber der Variante 2 erwartet, was sich auch bestätigt.

Ergebnisse der Variante 3, Lastfall LF4

Es werden alle Ergebnisse der Berechnung in der Tabelle 29 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | | | | |
|---|----------------|------------|-------------------|----------------------|----------------------------|------------|
| | | | | | | |
| u_x [mm] | 11.81 / -27.53 | | außen : | - | außen: | - |
| u_y [mm] | 0.41/ -12.40 | | | | | |
| u_z [mm] | 13.29 / - 2.93 | | innen : | - | innen: | - |
| | GFK Derakane | PUR Bauder | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | Klebspachtel BÜFA 740-0119 | Glasschaum |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 12.18 | -0.073 | 2.69 | 11.48 | -5.18 | -0.36 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | -9.79 | -0.078 | 1.66 | 8.48 | -5.15 | -0.36 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.040 | - | 13.12 | -5.33 | -0.33 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.59 | -0.044 | -0.17 | 1.91 | -4.46 | -0.22 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.034 | - | 7.79 | 3.95 | -0.2 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.036 | - | 9.71 | -3.15 | 0.21 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.003775 | -0.07795 | 0.001594 | 0-003539 | 0.002797 | -0.003979 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.004900 | -0.08307 | 0.000979 | 0.002337 | 0.002706 | -0.003771 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.05142 | - | 0.01195 | 0.002787 | -0.003560 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.007514 | 0.1300 | -0.000367 | 0.003945 | -0.009820 | -0.005697 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.1017 | - | 0.01730 | 0.008673 | -0.005220 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.1067 | - | 0.02159 | -0.006880 | 0.005370 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.41 | 2.35 | 0.19 | 0.35 | 1.56 | 0.9 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.32 | 2.52 | 0.12 | 0.28 | 1.56 | 0.9 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 0.98 | - | 1.09 | 1.61 | 0.83 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.5 | 3.14 | 0.02 | 0.24 | 4.90 | 4.89 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 2.43 | - | 1.56 | 4.34 | 4.44 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 2.57 | - | 1.94 | 3.46 | 3.56 |

TB4.Tabelle 29: Ergebnisse der Variante 3, Lastfall LF4: EG+HWD+T95+0.05bar

Die Verformungen des Wärmespeichers sind in den Vertikal- bzw. Horizontalschnitten der Bilder 13 bis 15 maßstäblich, aber ohne den Glasschaum dargestellt. Letzteres, um die geringe Raumänderung dieses Bereiches für den Glasschaum deutlich zu machen.

In allen GFK- Laminaten bleiben auch hier die maximalen Beanspruchungen deutlich unter den zulässigen Werten. Sie bleiben auch unterhalb der Werte für den Lastfall 4 im Teilbericht 3

Die maximalen Beanspruchungen im PUR - Hartschaum und im Reinharz sind auch in der Variante 3 kaum gegenüber den Ergebnissen des Lastfalls LF4 im Teilbericht 3 verändert. Für den PUR -Hartschaum sind wieder beispielhaft die σ_{xy} - Spannungen, die den höchsten E_d/R_d -Wert aufweisen, im Bild 17 dargestellt. σ_{xy} - Spannungen, die die zulässigen Werte

von 0.014 N/mm²] überschreiten, treten wieder nur in kleinen Bereichen auf. Das gilt auch für die anderen Spannungen im PUR - Hartschaum.

Die GFK-Verstärkungsprofile weisen auch hier wegen der fehlenden Alu-Profile etwas höhere Werte auf, nahezu gleiche wie in der Variante 2.

Die Beanspruchungen des Klebers BÜFA 740-0119 in den Fugen zwischen Deck-/Boden-Modul wurden an einem Ausschnitt ebenfalls berechnet. Sie fallen geringfügig geringer als in der Variante 2 aus. Hinsichtlich der Bewertung gilt das dort Gesagte.

Die Schubspannungen des Klebspachtels zur Übertragung der Schubkräfte der Kassettenstege auf die Deckschicht - Lamine weisen gegenüber der Variante 2 etwas geringere Werte auf. Alle Spannungen überschreiten aber auch hier die zulässigen Werte.

Im Bild 28 sind beispielhaft wieder die Schubspannungen σ_{xy} mit dem höchsten E_d/R_d - Wert dargestellt, deren Maximalwerte in den Klebspachtel-Rändern der horizontalen Kassettenstege auftreten. Entsprechende Schubspannungswerte treten auch im Klebspachtel der vertikalen Kassettenstege auf (σ_{xz} , bzw. σ_{zx}). Signifikante Schubspannungen reichen auch hier jeweils über die gesamte Steglänge.

Bild 26 zeigt die σ_{xx} -, σ_{yy} - und σ_{zz} - Spannungen im Glasschaum. Keine überschreitet die zulässigen Werte. Das gilt nicht für die Schubspannungen (vgl. Tabelle 29). Für die Sicherheit des Speichers ist das - wie im Punkt 10 erwähnt - ohne Bedeutung.

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Einführung der 4 Kassettenstege zielführend für die zwängungsfreie Unterbringung der Vakuum – Isolationspaneele ist, und die 2 Kassettenstege in der Variante 3 eine sehr deutliche Aussteifung der entsprechenden Seitenwände bewirken, wodurch der Glasschaum minimal beansprucht wird.

Hinsichtlich des Klebharzes 740-0119 weisen die Ergebnisse keine befriedigende Lösung aus. Insbesondere zur Kraftübertragung zwischen den Kassettenstegen und den Deckschichten ist eine sichere Verbindung zur langzeitigen Gewährleistung der Zwängungsfreiheit der VIP und der Tragsicherheit der Speichervarianten erforderlich.

Für eine kurzzeitige Innendruckbelastung von 0.05bar erscheint die Integrität der Speicher-Varianten unter Berücksichtigung der eingeführten Abminderungsfaktoren jedoch noch gesichert.

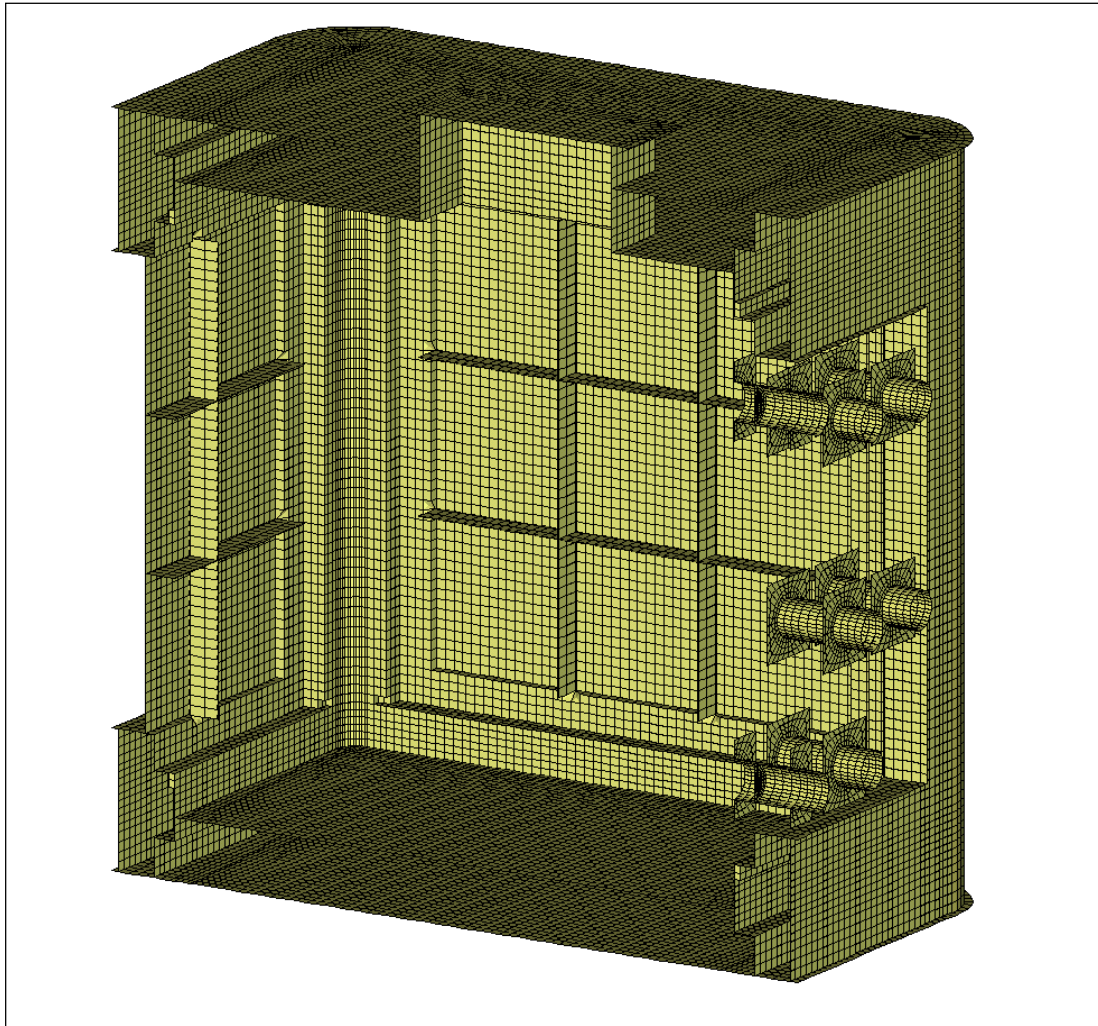
Da der Nachweis der Tragsicherheit für den Lastfall LF4 nur für eine kurzzeitige Belastung bestätigt werden kann, ist der Nachweis der langfristigen Sicherheit unter Einsatz eines geeigneteren Klebers für den Lastfall 3 für beide Varianten noch zu erbringen. Wird dieser erbracht, ist er auch für die Lastfälle LF1 und LF2 gegeben.

Für den Lastfall LF5 mit erhöhtem Innendruck von 0.1bar wird unter Hinzuziehung der bisherigen Ergebnisse und bei Verwendung des Klebharzes BÜFA 740-0119 eingeschätzt, dass die Integrität des Wärmespeichers in den Varianten 2 und 3 nicht gewährleistet ist.

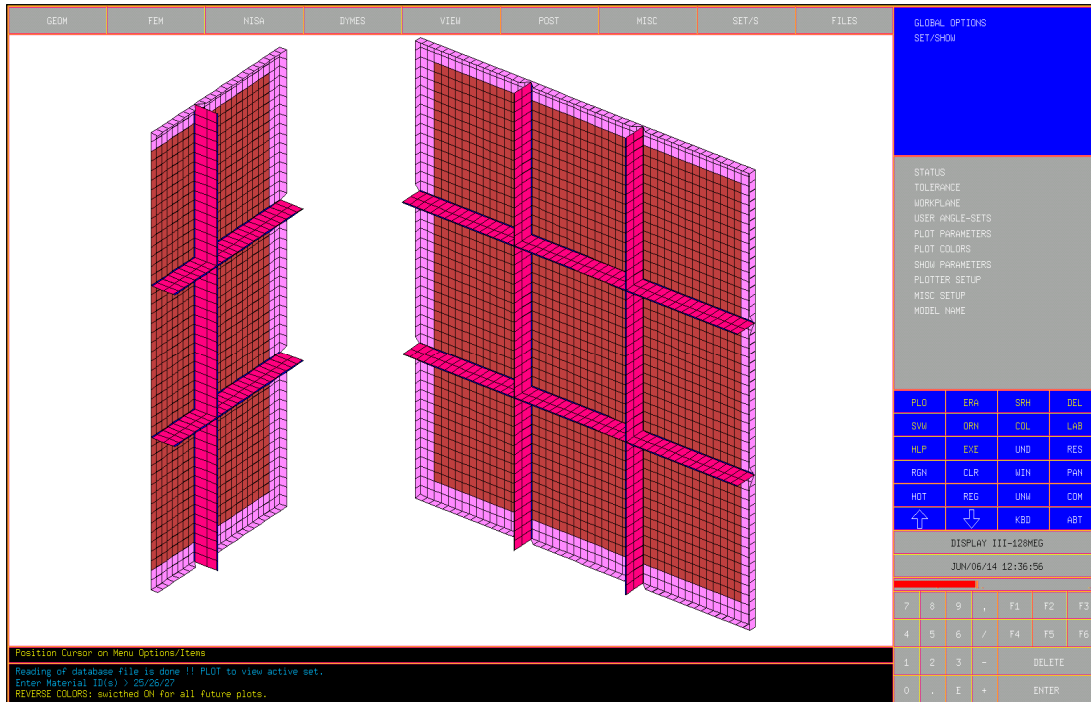
4m³ LABOR – WÄRMESPEICHER

Variante 2: Vakuum-Isolationspaneele, Seitenwand II, Entwurf 6

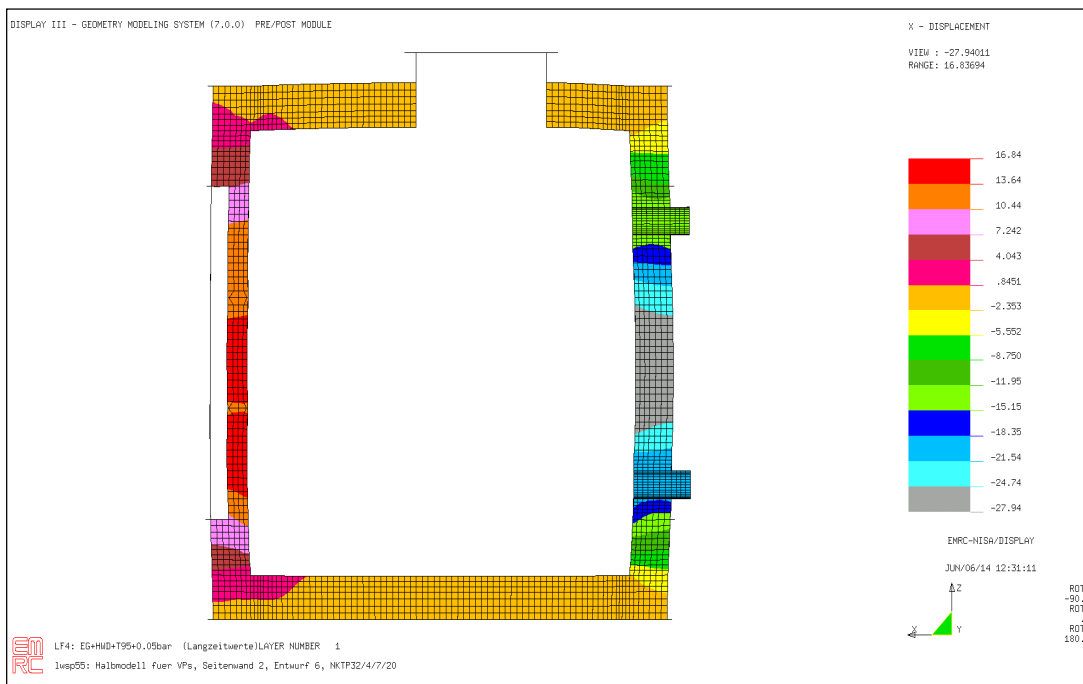
Lastfall 4: EG+HWD+T95+0.05bar Innendruck



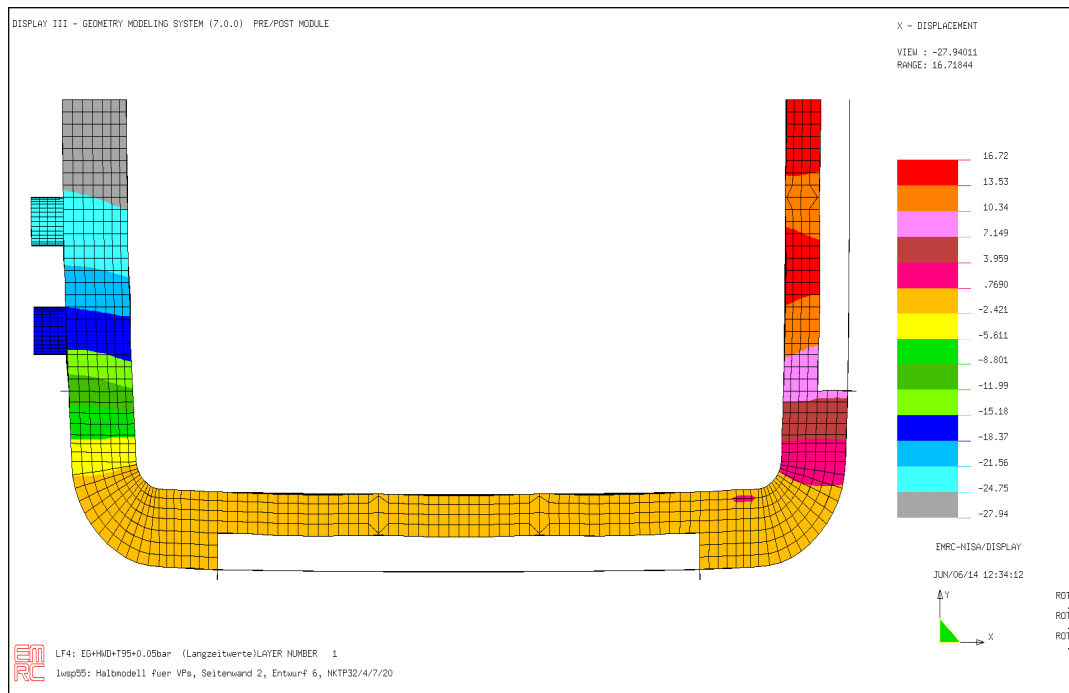
TB4.Bild 21: Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum und ohne Seitenwand-Mantel-Laminiate



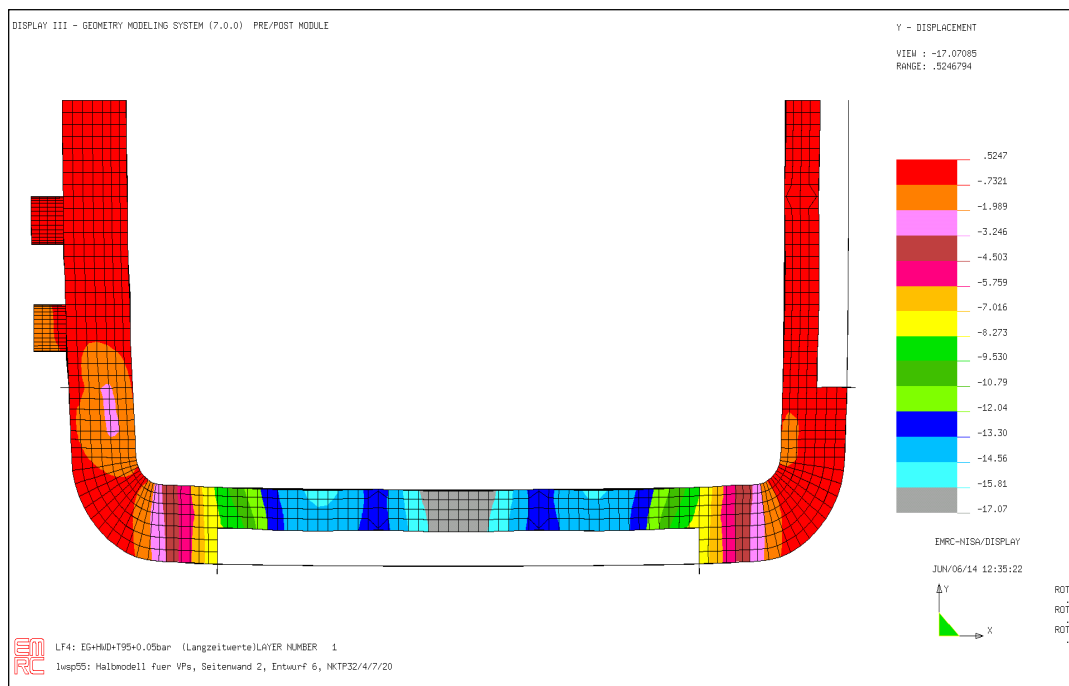
TB4.Bild 22: Seitenwände mit Kassetten-Stegen und Klebspachtel-Rändern (dunkelblau) im PUR-Raum. Darstellung mit ergänztem Innenlaminat



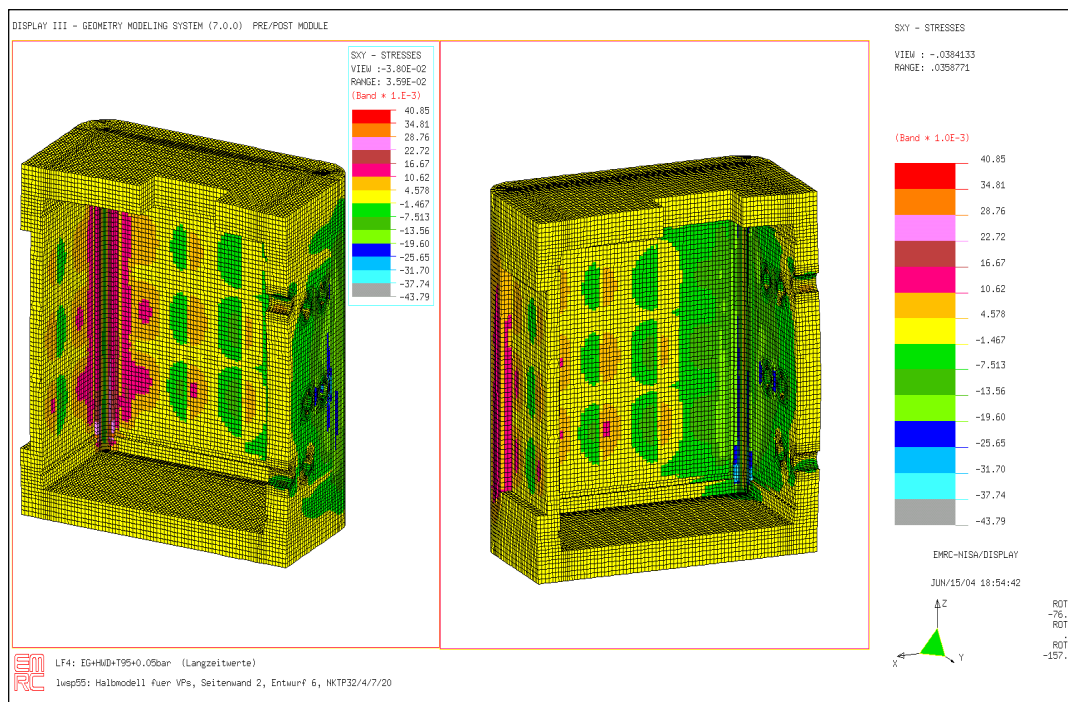
TB4.Bild 23: Verformung u_x [mm] maßstäblich (Vertikalschnitt)



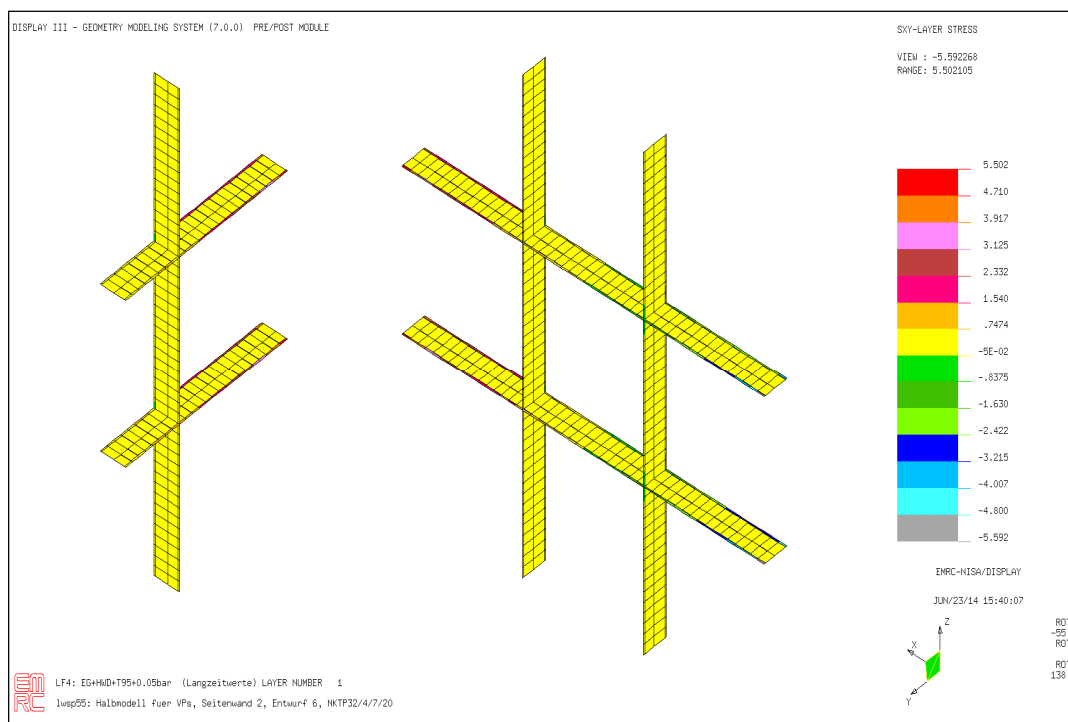
TB4.Bild 24: Verformung u_x [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt)



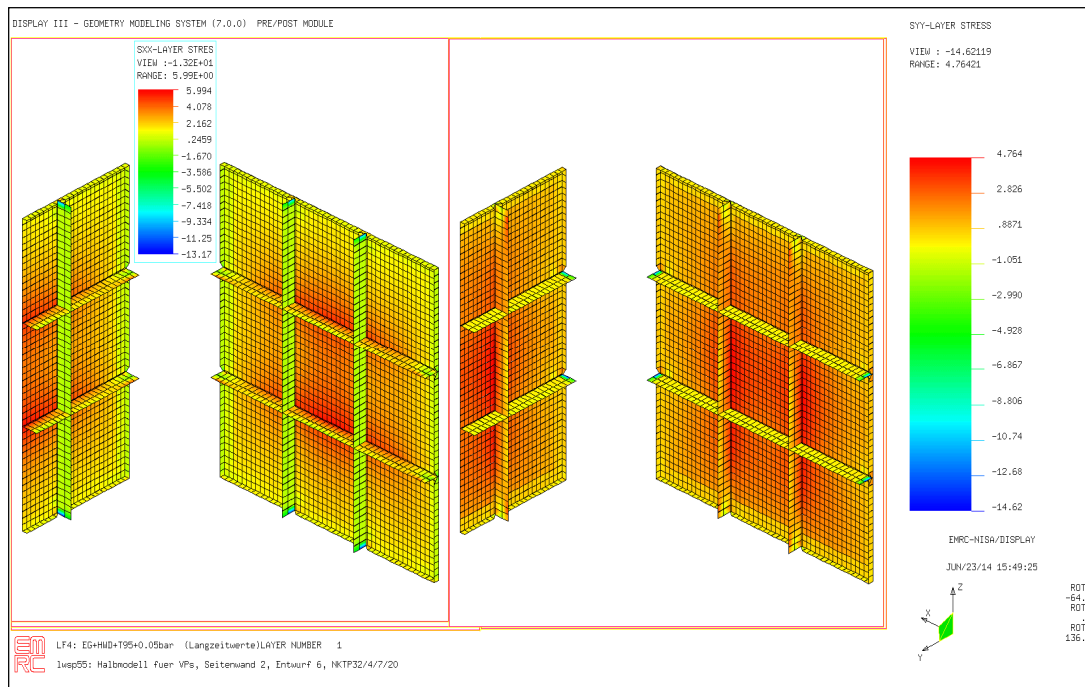
TB4.Bild 25: Verformung u_y [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt)



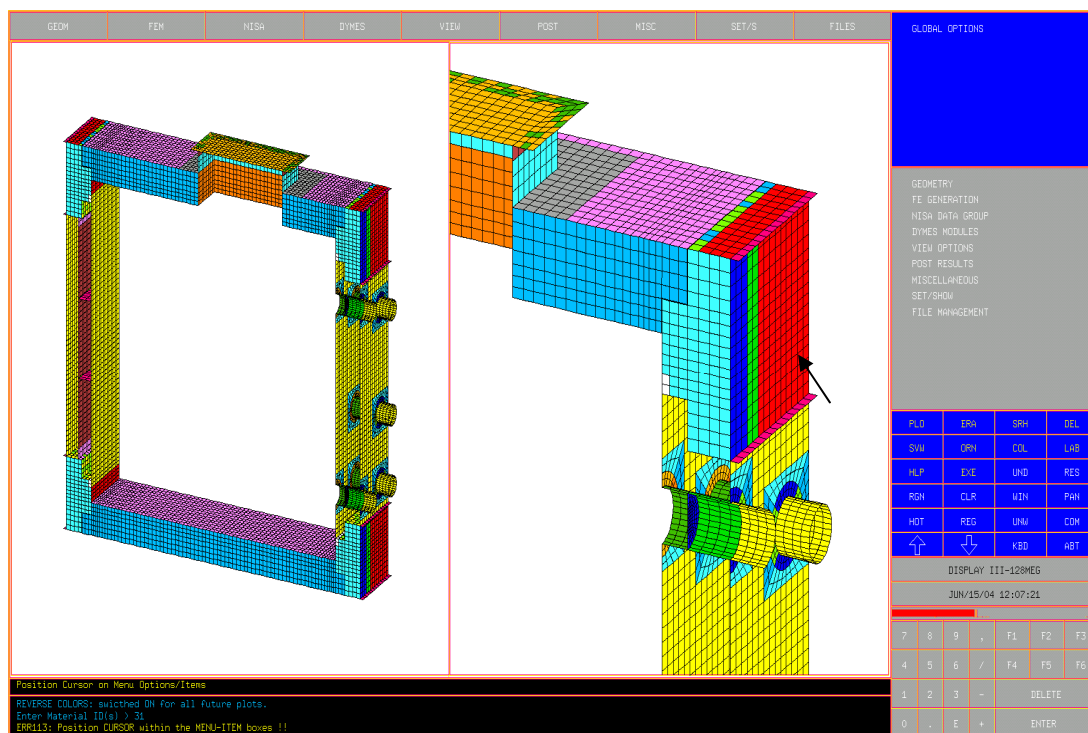
TB4.Bild 26: Spannungen σ_{xy} [N/mm²] im PUR-Hartschaum des Speichers aus zwei Perspektiven



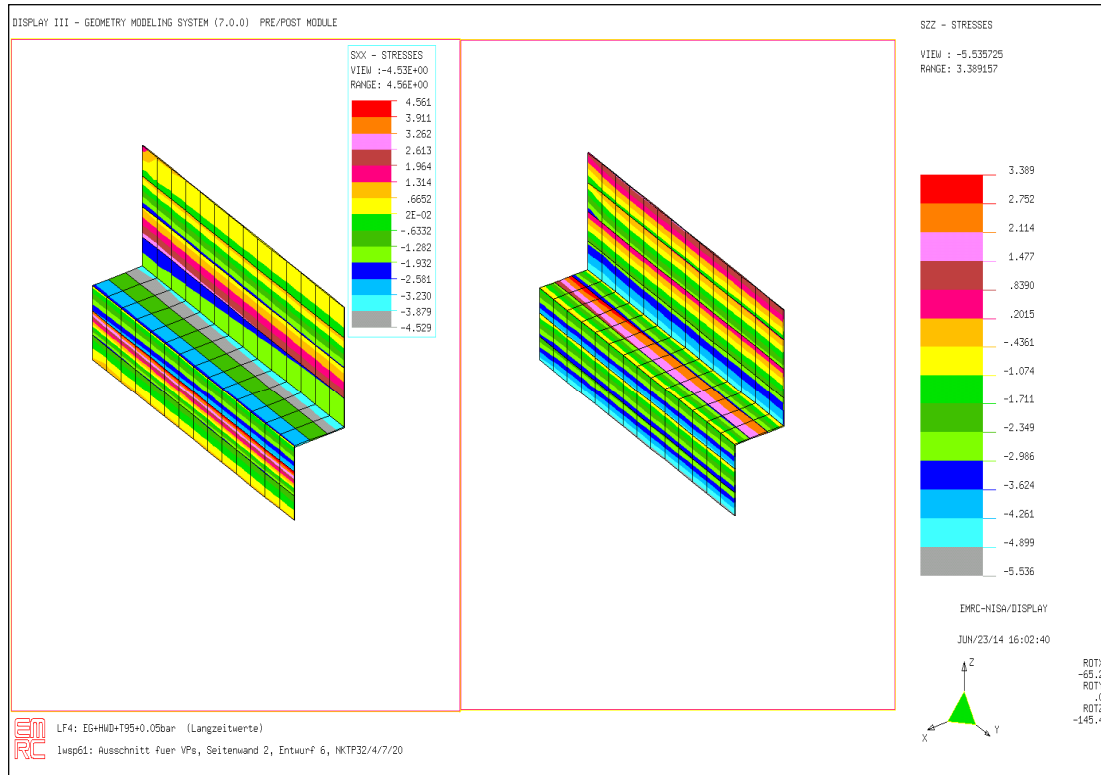
TB4.Bild 27: Spannungen σ_{xy} [N/mm²] im Klebspachtel an den Rändern der Stege



TB4.Bild 28: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] und σ_{yy} [N/mm²] in den Stegen und den ergänzten Innenlaminaten



TB4.Bild 29: Links: Ausschnitt des Modells, ohne PUR-Hartschaum in den Seitenwänden dargestellt. Rechts: Vergrößerung mit Verklebungsfuge

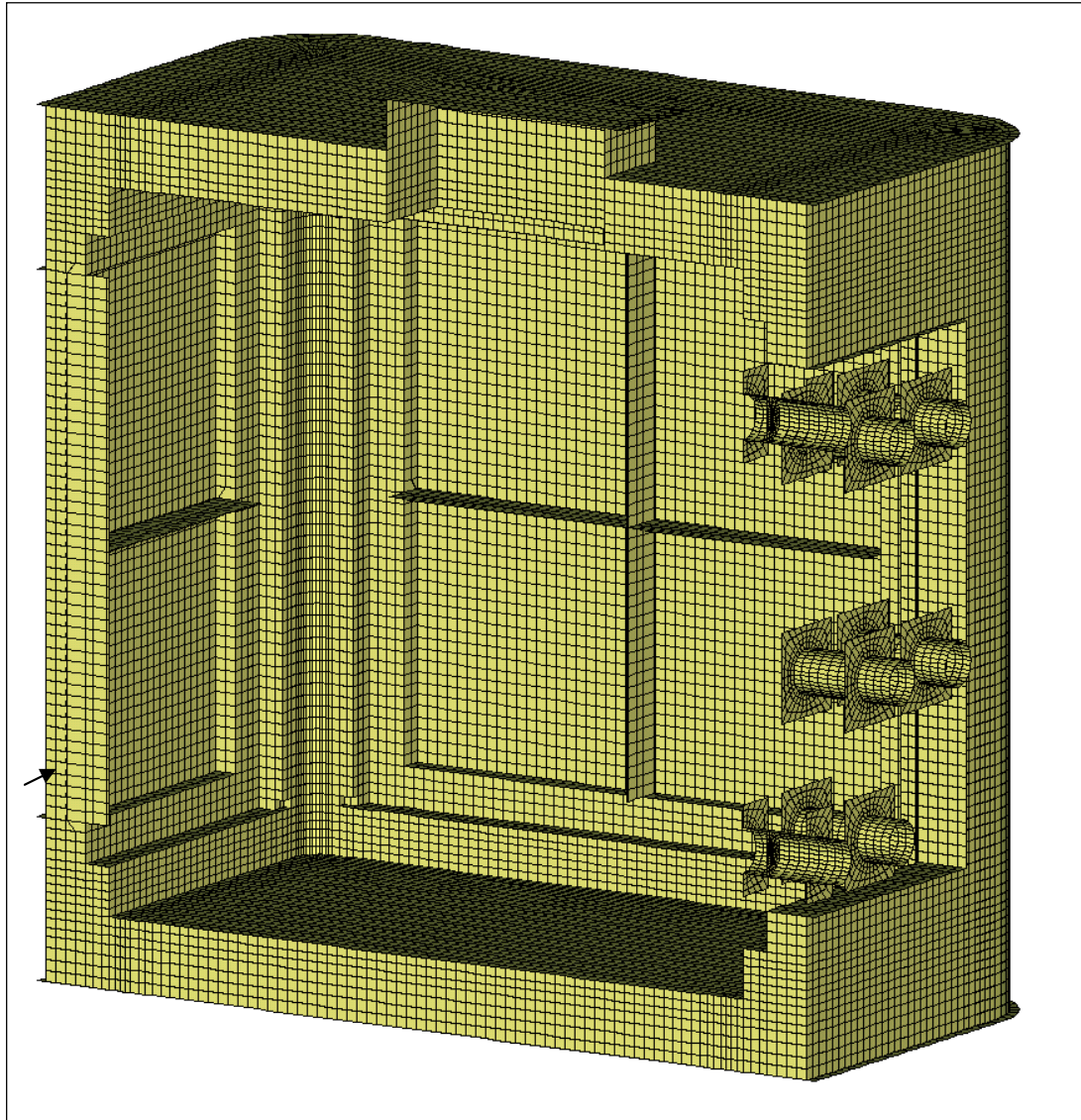


TB4.Bild 30: Spannungen σ_{xx} und σ_{zz} [N/mm²] des Klebers in den Klebfugen

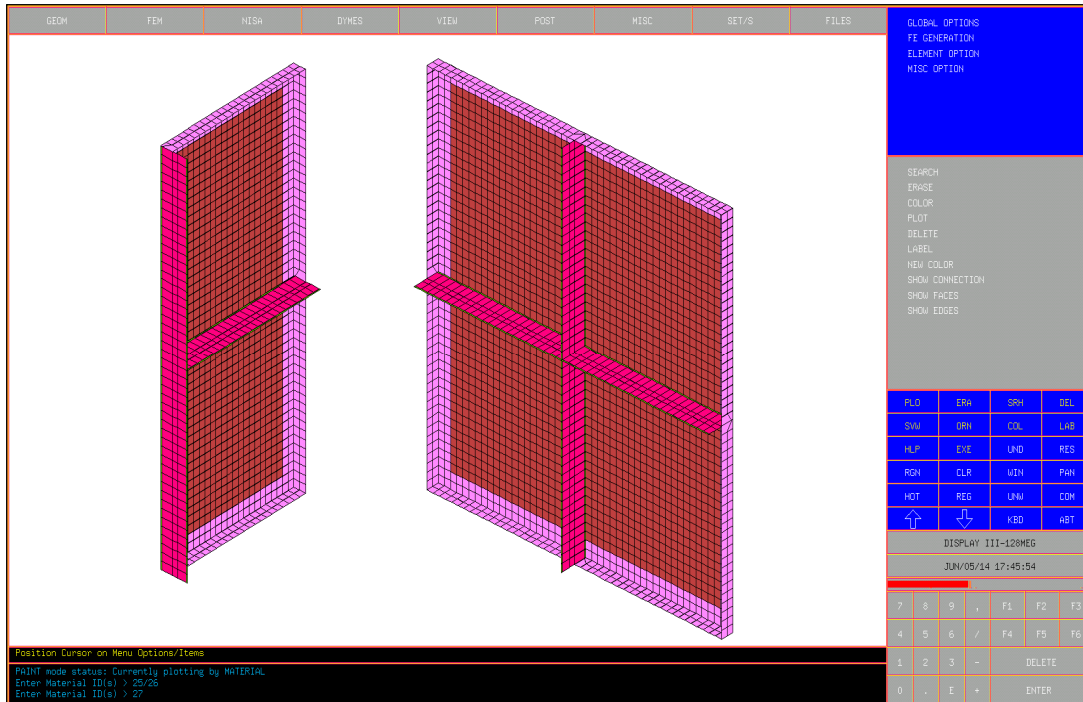
4m³ LABOR - WÄRMESPEICHER

Variante 3: Zusätzliche Glasschaum-Isolierung, Seitenwand III, Entwurf 3

Lastfall 4: EG+HWD+T95+0.05bar Innendruck



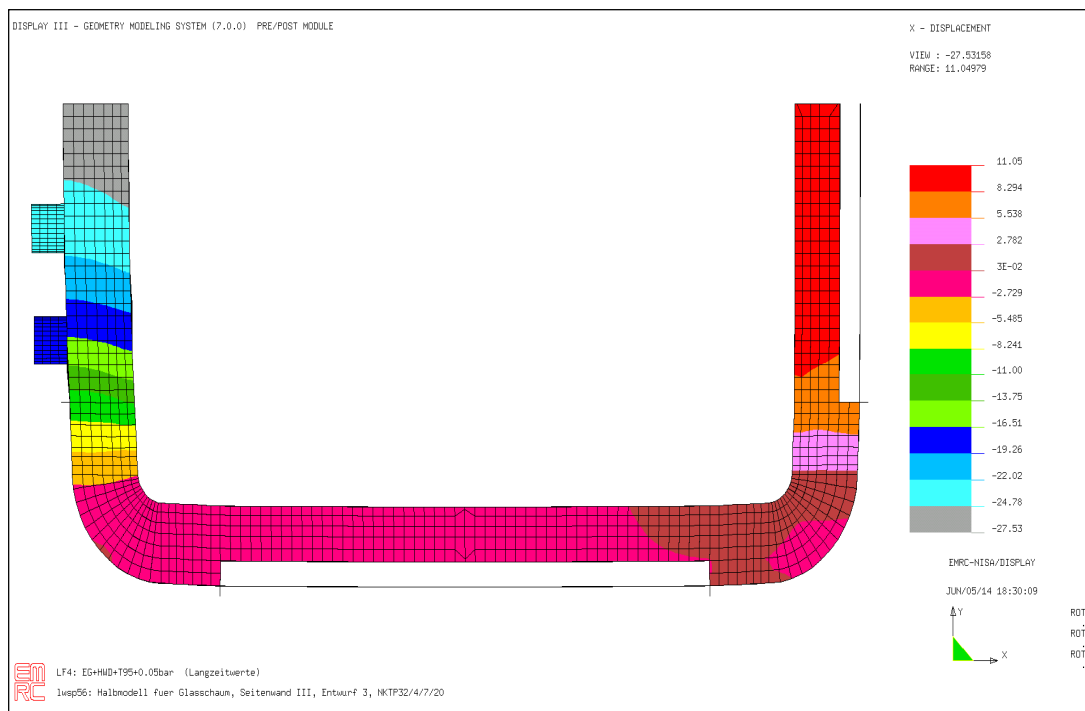
TB4.Bild 31: Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum in den Seitenwänden und ohne Seitenwand-Mantel-Lamine, jedoch mit der zusätzlichen Glasschaum-Isolation (links außen)



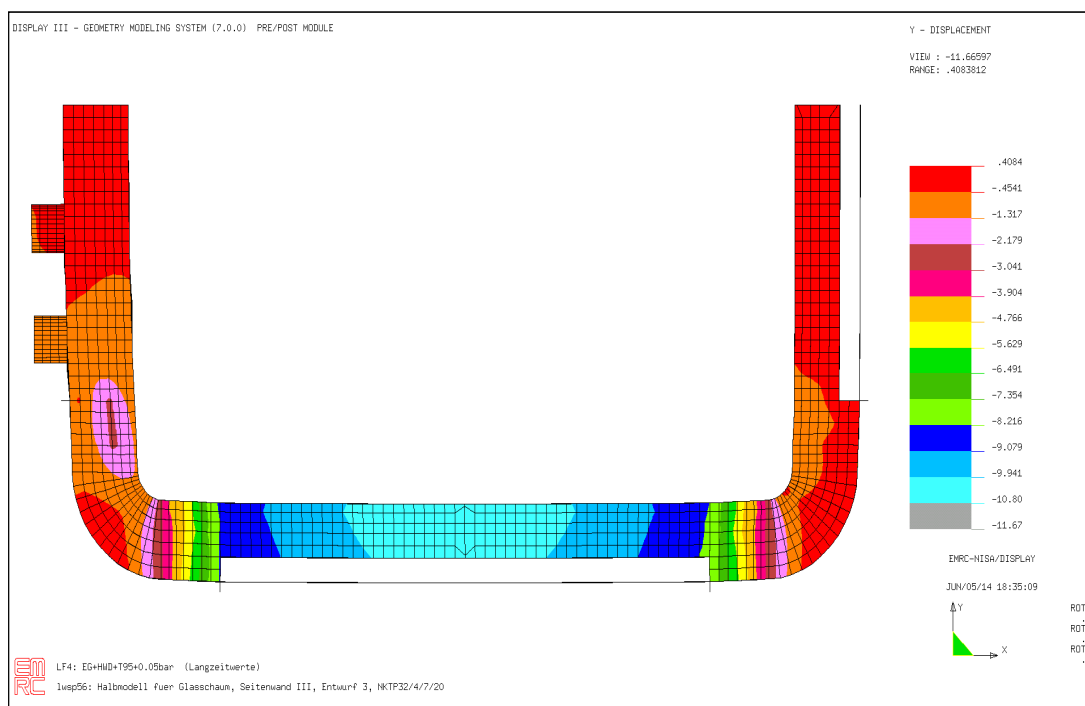
TB4.Bild 32: Seitenwände mit Kassetten-Stegkreuz und Klebspachtel-Rändern (grün) im PUR-Raum. Darstellung mit ergänztem Innenlaminat



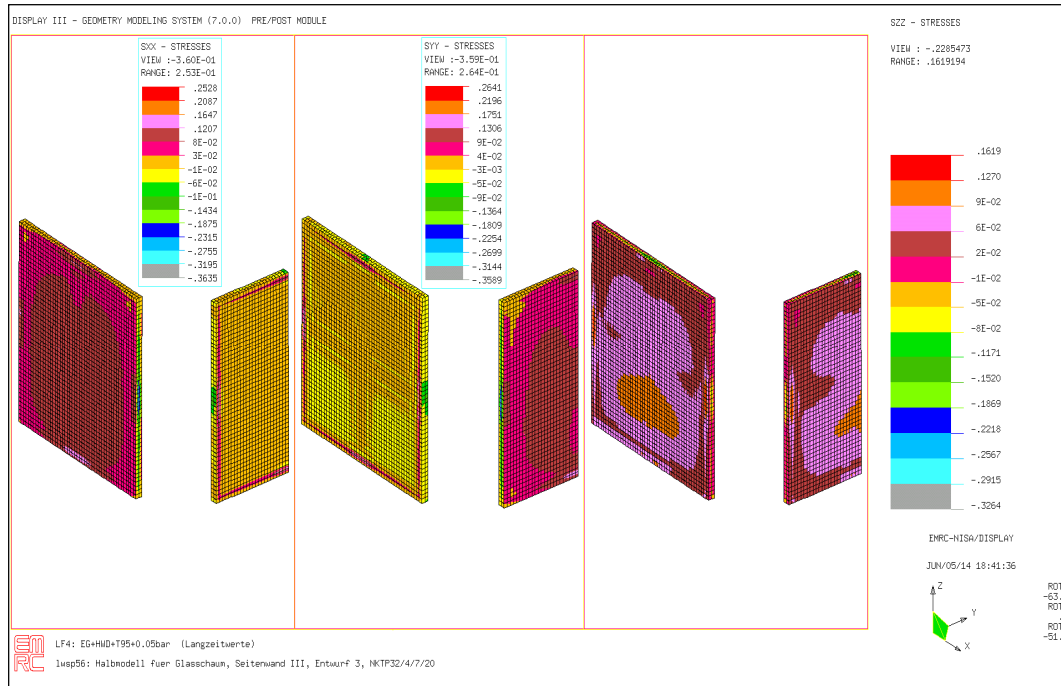
TB4.Bild 33: Verformung u_x [mm] maßstäblich (Vertikalschnitt). Darstellung ohne Glasschaum



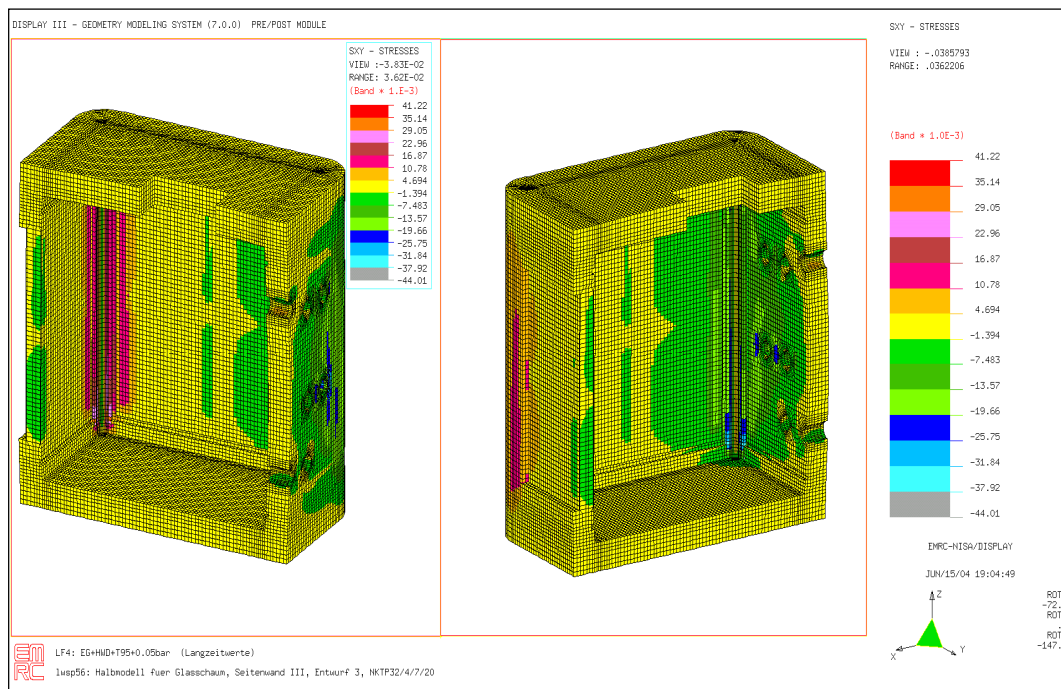
TB4.Bild 34: Verformung u_x [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt). Darstellung ohne Glasschaum



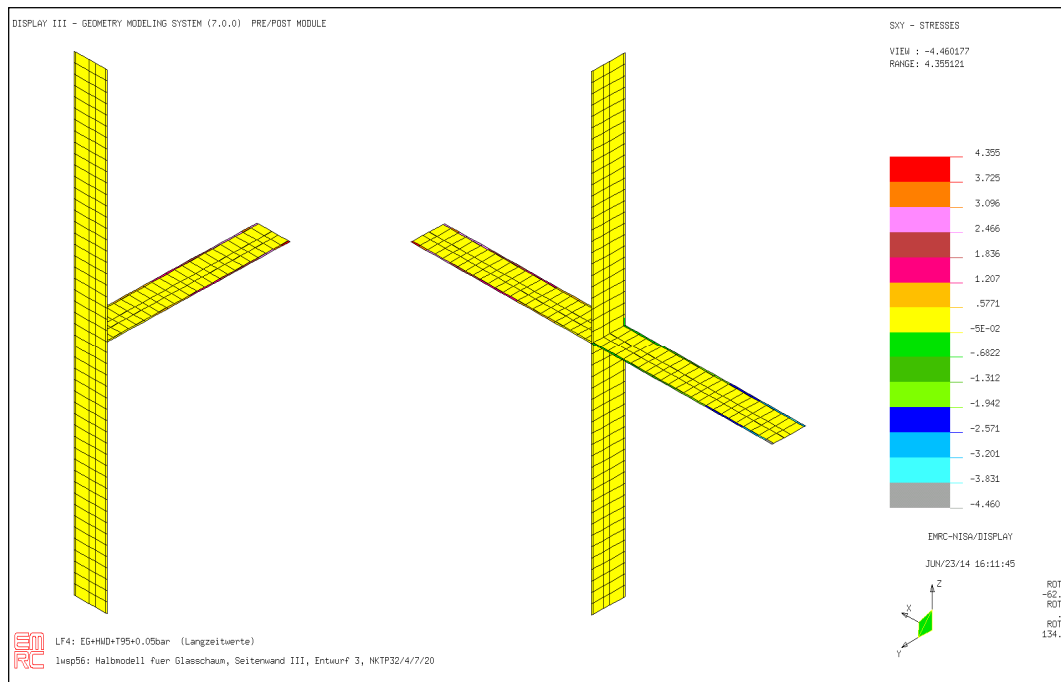
TB4.Bild 35: Verformung u_y [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt). Darstellung ohne Glasschaum



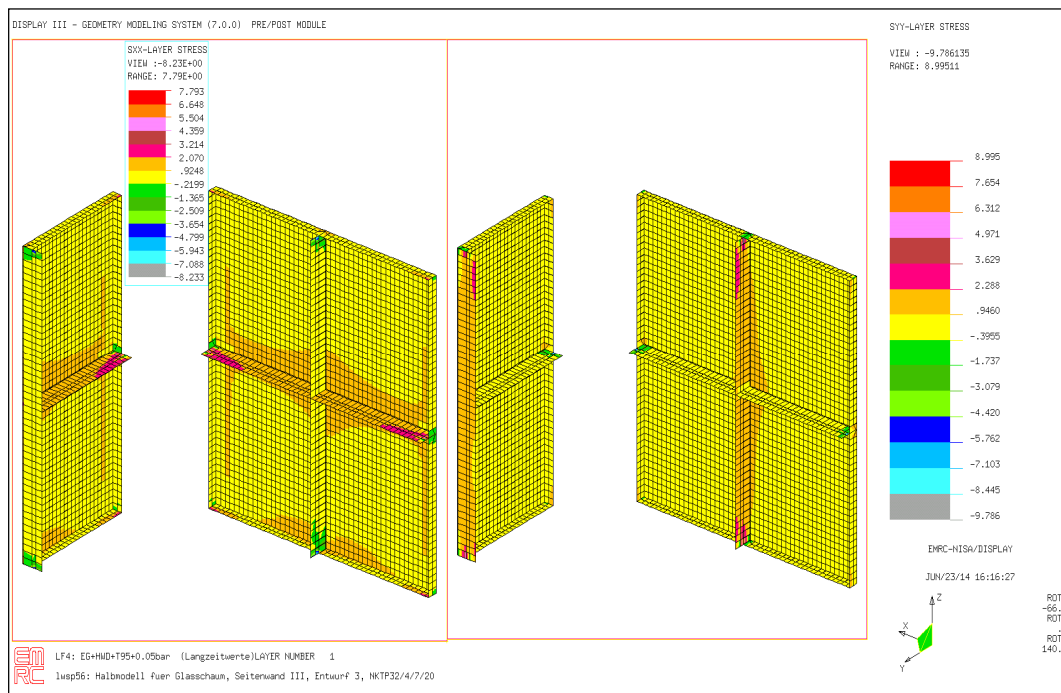
TB4.Bild 36: Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} [N/mm²] im Glasschaum der Seitenwände



TB4.Bild 37: Spannungen σ_{xy} [N/mm²] im PUR-Hartschaum des Speichers aus zwei Perspektiven

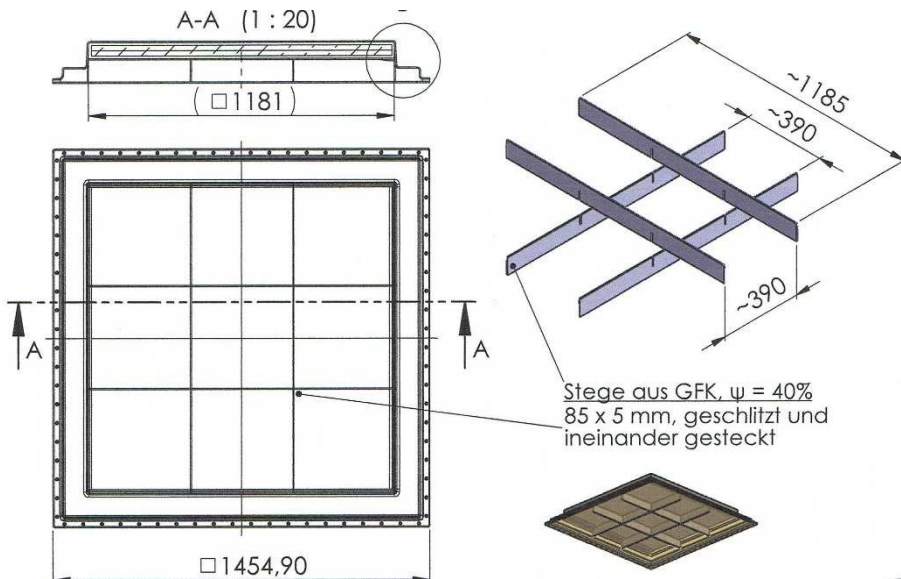


TB4.Bild 38: Spannungen σ_{xy} [N/mm²] im Klebspachtel an den Rändern der Stege



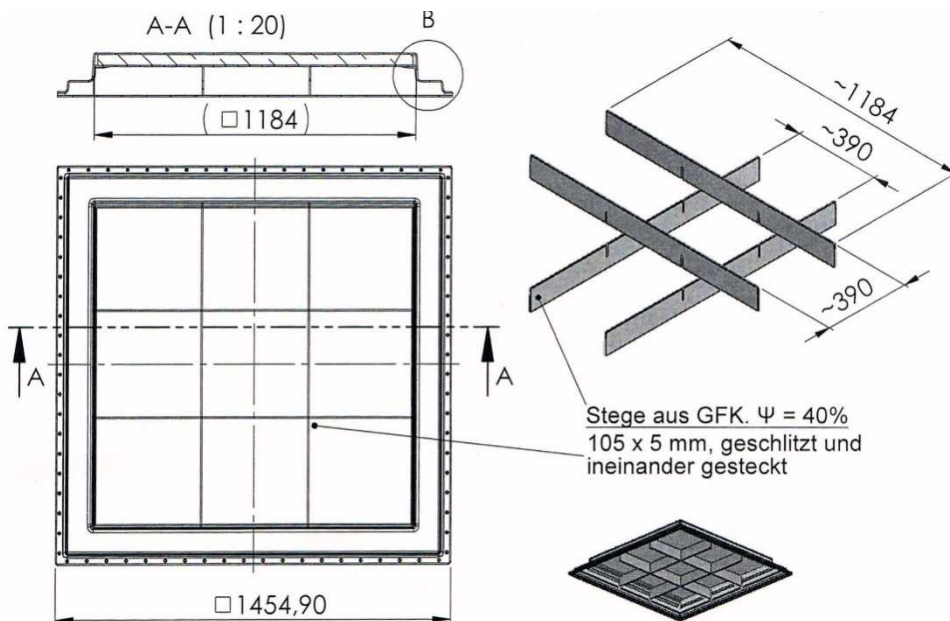
TB4.Bild 39: Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] in den Stegen und den ergänzten Innenlaminaten

Erst mit dem Einbringen von kreuzweise angeordneten GFK – Kassettenstege 85 x 5 bzw. 105 x 5 gelang es, die Auswölbungen in Grenzen zu halten (Abb. 3.1. und 3.2)



TB4.Abb. 3.1 Seitenwandmodul V II (Entwurf 6)

(Weitere Berechnungen erfolgten für die Einbringung von Glasschaum in die V III sowie Langzeitkennwerte. Auf diesen Bericht „FEM-Teilbericht 5“ wird hier nur verwiesen, da diese Variante aus thermodynamischen und Fertigungsgründen verworfen wurde, obwohl sie den mechanischen Anforderungen entsprach)



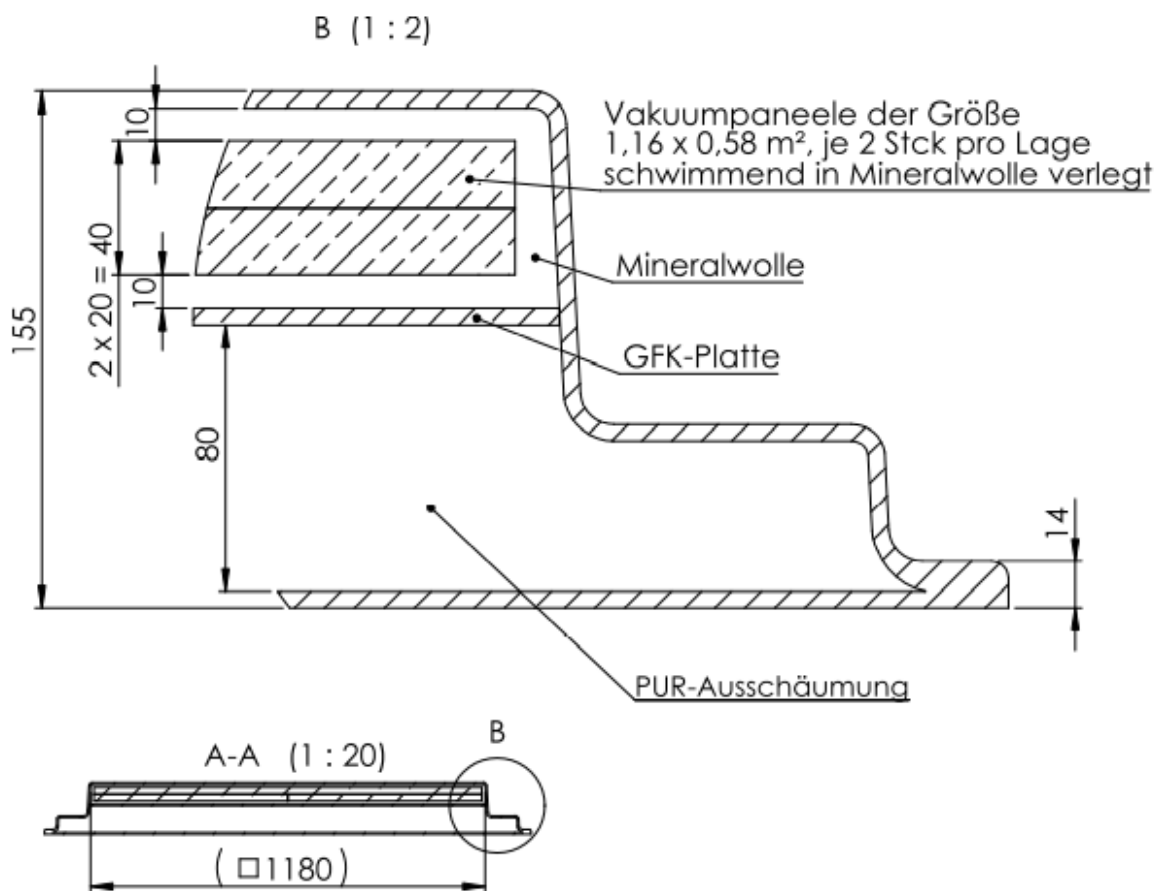
TB4.Abb. 3.2 Seitenwandmodul V III (Entwurf 2)

Mit dem Teilbericht 4 wurden für den Lastfall 4 nur bei einer kurzzeitigen Belastung die Integrität des Speichers nachgewiesen und der Einsatz eines verbesserten Spachtels gefordert. Mit dem Teilbericht 5 wurde der Lastfall 6 mit Zeitkennwerten für die Tragfähigkeit bestätigt.

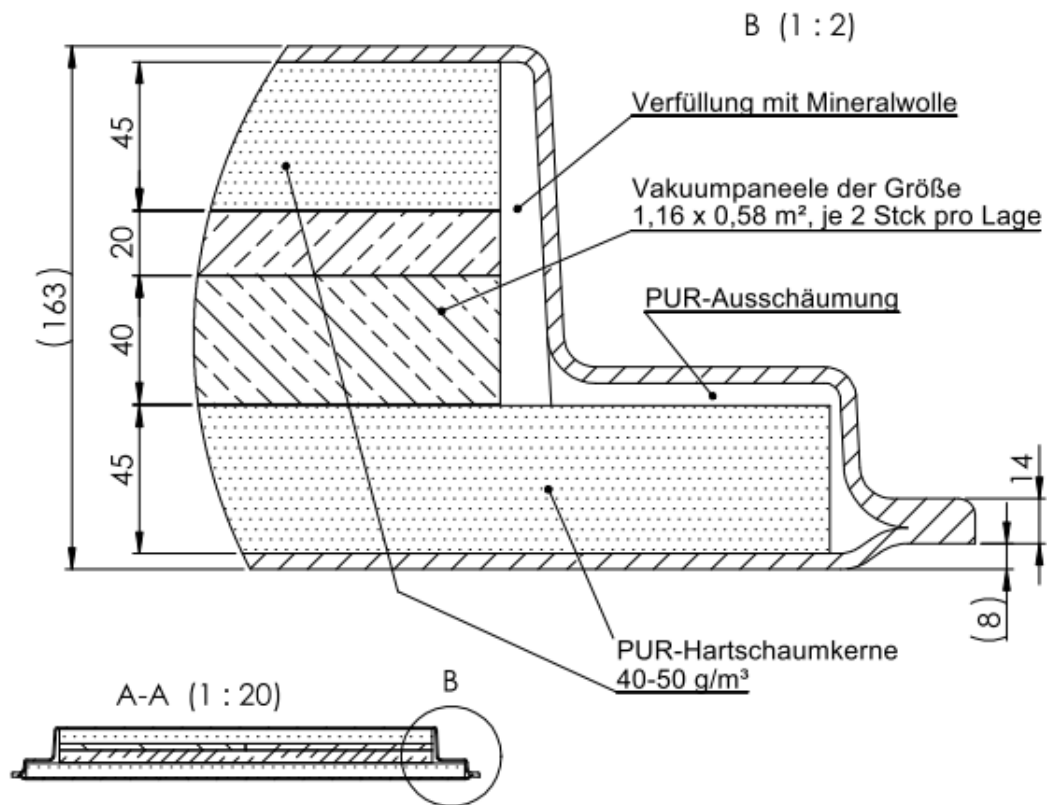
Da aber die Fertigung eine Abkehr von der Kassettenbauweise wegen der Schwierigkeiten beim Ausschäumen der Felder forderte, wurde für VII und VIII eine Neukonstruktion durchgeführt.

Es wurden dickere GFK – Modulmänteln (statt 4mm mit 5,5mm) und einer höherer Schaumdichte von 50 kg/m^3 realisiert (Abb. 3.3)

Darüberhinaus wurde bei V III auch die zusätzliche Glasschaum –Isolierung durch eine dickere Lage VIP's und PUR – Hartschaum ersetzt (Abb. 3.4)



TB4.Abb.3.3 Zur Ausführung gekommene V II (Entwurf 7)



TB4.Abb.3.4 Zur Ausführung gekommene V III (Entwurf 4)

In Verbindung mit der Weiterentwicklung beim Mannloch als stählerner Deckel, dem Wegfall der Kassettenstege, einer höheren Schaumdichte, einer stärkeren Laminatdicke und dem Einsatz des neuentwickelten Klebharzes BÜFA 748 – 0119 wurden eine zusätzliche Berechnung (**FEM-Teilbericht 7**) durchgeführt und damit der Zuverlässigkeitsnachweis für V II Entwurf 7 erbracht.

III.3.3 FEM-Teilbericht 7 als Einschub

TB7.1 Zum FEM – Modell

Zur Bewertung des Beanspruchungszustandes des Wärmespeichers der Varianten 2 und 3 ohne Kassettenstege, mit höherer PUR-Hartschaumdichte und stärkeren Dicken der Modulmantel-Lamine, wurden die FEM-Modelle der Behältervarianten 2 und 3 entsprechend überarbeitet.

Die Kassettenstege wurden aus den Modellen herausgenommen, die Materialkennwerte des dichteren PUR-Hartschaums aktualisiert und die Mantel-Laminatdicken von $t = 4.0\text{mm}$ auf nunmehr $t = 5.5\text{mm}$ erhöht. Alle anderen Daten wurden mit einer Ausnahme unverändert übernommen. Die Ausnahme betrifft die umlaufenden GFK-Versteifungsprofile. Ihre Dicke wurde von 8mm auf 7mm reduziert. [16]

Die verwendeten charakteristischen Material-Kurzzeit-Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 35 dargestellt.

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR-Hartschaum Lamoltan NG57 | Klebstharz BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52×10^{-9} | 0.05×10^{-9} | 1.4×10^{-9} | 1.1×10^{-9} | 0.49×10^{-9} |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 |
| E_x [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 | 4300 | 407 |
| E_y [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 | 4300 | 407 |
| E_z [N/mm ²] | 3000 | 13.75 | 4400 | 4300 | 147 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 1378 | 5.29 | 1570 | 1320 | 68 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1570 | 1320 | 63.7 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1570 | 1320 | 63.7 |
| α_x [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 40×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} |
| F_{xc} [N/mm ²] | 160 | 0.35 | 40 | 70 | 160 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 145 | 0.45 | 40 | 70 | 145 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 160 | 0.35 | 40 | 70 | 160 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 145 | 0.45 | 40 | 70 | 145 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 60 | 0.35 | 40 | 70 | 60 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 60 | 0.45 | 40 | 70 | 60 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 38 | 0.25 | 11 | 38 | 38 |
| F_{svz} [N/mm ²] | 26 | 0.25 | 11 | 26 | 26 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 26 | 0.25 | 11 | 26 | 26 |

TB7.Tabelle 35: Kurzzeit-Kennwerte für die Materialhauptachsen

Da die Dicke der GFK-Versteifungsprofile von 8mm auf 7 mm reduziert wurden, wurde eine Aktualisierung der Ersatzsteifigkeit für die Versteifungsprofile erforderlich:

Die Querschnittsabmessungen der GFK-Versteifungsprofile im Modell entsprechen aus modellierungstechnischen Gründen nicht dem Original, daher sind die E-Moduln und die Dichte entsprechend anzupassen.

Kriterien: Gleiches Gewicht wie das Original
 Gleiche Biegesteifigkeit wie das Original

| | GFK-Versteifungsprofil | |
|-----------------|--------------------------------------|------------|
| | b [mm] | t [mm] |
| Original O | $b_O = 30$ | $t_O = 7$ |
| Modell M | $b_M = 36$ | $t_M = 18$ |
| Dichte ρ_o | $1.52 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ | |

Querschnittsabmessungen und Dichte

Umrechnung Dichte : $\rho_M = \rho_O \times (b_O \times t_O) / (b_M \times t_M)$

Umrechnung E-Modul: $E_M = E_O \times (b_O \times t_O^3) / (b_M \times t_M^3)$

Aus dieser Umrechnung ergeben sich die Kurzzeit-Kennwerte für die Versteifungsprofile in der Tabelle 35.

Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen

Als Abminderungsfaktoren für die Steifigkeitskennwerte werden verwendet:

| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebharz BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| Zeiteinfluss 10^4 h | 1.6 | 3.4 | 1.6 | 1.6 |
| Temperatureinfluss 95°C | 1.8 | 2.0 | 3.0 | 1.8 |
| $\Pi_{t,E}$ | 2.88 | 6.8 | 4.8 | 2.88 |

TB7.Tabelle 36: Abminderungsfaktoren für die Materialsteifigkeiten

Als Abminderungsfaktoren für die Festigkeiten werden verwendet:

| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebharz BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane |
|---------------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| Zeiteinfluss 10^4 h | 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.6 |
| Temperatureinfluss 95°C | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 1.5 |
| Medieneinfluss | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1.2 |
| Sicherheit | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| $\Pi_{t,F}$ | 4.86 | 8.64 | 12.1 | 4.86 |

TB7.Tabelle 37: Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten

Die Kennwerte des Glasschaums werden nicht abgemindert, da keine verlässlichen Angaben dazu zur Verfügung stehen und die Änderungen der Verformungen und Beanspruchungen des Speichers durch eine Kontrollrechnung ohne Glasschaum im Rahmen der Voruntersuchungen als nur geringfügig ausgewiesen wurden, so dass der Glasschaum hinsichtlich der Tragsicherheit des Speichers keine Bedeutung hat.

Die nachfolgende Tabelle 38 gibt die verwendeten Langzeitkennwerte der im Wärmespeicher eingesetzten Materialien für den Lastfall LF4 wieder:

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstharz BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | Glasschaum |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52x10 ⁻⁹ | 0.05x10 ⁻⁹ | 1.4x10 ⁻⁹ | 1.1x10 ⁻⁹ | 0.49x10 ⁻⁹ | 0.1x10 ⁻⁹ |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E_x [N/mm ²] | 2882 | 2.0 | 917 | 1493 | 141 | 100 |
| E_y [N/mm ²] | 2882 | 2.0 | 917 | 1493 | 141 | 100 |
| E_z [N/mm ²] | 1041 | 2.0 | 917 | 1493 | 51 | 100 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 478 | 0.78 | 327.5 | 458 | 23.6 | 38.5 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 451 | 0.78 | 327.5 | 458 | 22.1 | 38.5 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 451 | 0.78 | 327.5 | 458 | 22.1 | 38.5 |
| α_x [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 9x10 ⁻⁶ |
| α_y [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 25x10 ⁻⁶ | 9x10 ⁻⁶ |
| α_z [K ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 40x10 ⁻⁶ | 9x10 ⁻⁶ |
| F_{xc} [N/mm ²] | 33 | 0.041 | 3.31 | 14 | 33 | 0.4 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 30 | 0.052 | 3.31 | 14 | 30 | 0.1 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 33 | 0.041 | 3.31 | 14 | 33 | 0.4 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 30 | 0.052 | 3.31 | 14 | 30 | 0.1 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 12 | 0.041 | 3.31 | 14 | 12 | 0.4 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 12 | 0.052 | 3.31 | 14 | 12 | 0.1 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 8 | 0.029 | 0.91 | 8 | 8 | 0.045 |
| F_{syx} [N/mm ²] | 5 | 0.029 | 0.91 | 5 | 5 | 0.045 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 5 | 0.029 | 0.91 | 5 | 5 | 0.045 |

TB7.Tabelle 38: Für den Lastfall LF4 verwendete Langzeitkennwerte

Die GFK-Versteifungsprofile im Seitenwandmodul wurden als geschichtete orthotrope Solid-Elemente mit eindeutiger Festlegung der Materialhauptachsen unverändert aus Teilbericht 2 übernommen: Die Materialhauptachse x verläuft in Längsrichtung der Profile, die y-Achse orthogonal dazu über die Breite, die z-Achse über die Dicke der Profile.

Die Materialhauptachse x der GFK - Innenlamine verläuft horizontal, die y-Achse vertikal. Die Materialhauptachsen der GFK-Mantellamine aller Module sind im Bildteil (Bilder 7, 8, 9) des Teilberichts 1 dargestellt

Die entsprechenden Spannungen in den Ergebnissen haben jeweils dieselbe Orientierung. Für alle Spannungen der isotropen Materialien (PUR - Hartschaum, Glasschaum, Klebstharz, Reinharz) ist das jeweilige in den Bildern angegebene Koordinatensystem maßgebend.

Da für die Beanspruchung der Klebschicht zwischen Deck-/Bodenmodul und den Eckmodulen in Dickenrichtung im kompletten Halbmodell keine Aussage gemacht werden kann, wurde für die beiden Varianten 2 und 3 je ein Modellausschnitt im stärksten Verformungsbereich des jeweiligen Halbmodells entnommen und in diesen reale Klebfugen der Dicke $t = 1\text{mm}$ eingearbeitet. Diese Ausschnitte wurden Verformungen aus dem Lastfall LF4 des jeweiligen Halbmodells sowie den anteiligen Lasten unterworfen und berechnet.

TB7.2 Berechnung der Beanspruchungen der Varianten 2 und 3 des Speichers

Es wird für die Varianten 2 und 3 jeweils der Lastfall 4 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit betrachtet:

LF4: EG+HWD+T95+0.05 bar Innendruck

Variante 2: NISA - File: lwsp66/67.dbs

Variante 3: NISA - File: lwsp68/69.dbs

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen und das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

$$E_d / R_d$$

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes
(Index d kennzeichnet hier „design“)

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Der Lastfall LF4 ist eine Lastkombination. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet.

Da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind, werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt.

Für die GFK-Versteifungsprofile werden die Biegeverformungen derselben im Halbmodell realistisch erfasst, nicht jedoch die Spannungen. Die berechneten Spannungen werden mit dem Faktor

$$F_G = E_{OG} / E_{MG} = 8300 / 407 = 20.39$$

multipliziert, um die realen Werte zu erhalten.

TB7.2.1 Variante 2 mit Vakuum-Isolationspaneelen-Seitenwand II, Entwurf 7

Lastfall LF4: EG+HWD+T95+0.05 bar Innendruck

Als Eingabewerte für die Materialien werden die Werte der Tabelle 38 verwendet.

Der Innendruck von 0.05bar wurde auf alle Innenwände einschließlich der Innenwand des Deckmoduls und die des Einstiegschachtes mit Deckel zusätzlich aufgebracht.

Die Mannlast von 75kg wurde für diesen Lastfall nicht berücksichtigt, da sie entlastend wirkt.

Ergebnisse der Variante 2

Es werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 39 dargestellt:

| Komponenten | Verformungen | | | | |
|--|-----------------|----------------------|--|----------------------|------------------------------|
| u_x [mm] | 22.64 / -12.67 | | | | |
| u_y [mm] | 0.07 / -22.94 | | | | |
| u_z [mm] | 5.68 / -1.26 | | | | |
| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff in den Fugen BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK-Verst.Prof. Derakane. |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 7.36 | -0.085 | 4.64 | 1.81 | 7.95 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | -7.27 | -0.088 | -5.37 | 1.18 | 5.71 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.062 | -5.79 | - | -9.18 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.09 | -0.05 | -0.69 | -0.13 | 1.73 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.047 | 0.48 | - | 5.50 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | 0.047 | -1.64 | - | 7.14 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.003108 | -0.04017 | 0.007389 | 0.001076 | 0.002335 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.003965 | -0.04150 | 0.001866 | 0.000697 | 0.002163 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.03032 | 0.005621 | - | 0.007695 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.006462 | -0.06484 | -0.001325 | -0.000287 | 0.003612 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.06118 | 0.001378 | - | 0.01244 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | 0.06096 | -0.003067 | - | 0.01570 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.25 | 2.07 | 1.40 | 0.13 | 0.27 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.22 | 2.15 | 1.62 | 0.08 | 0.19 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.19 | 1.75 | - | 0.77 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.39 | 1.72 | 0.76 | 0.02 | 0.22 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 1.62 | 0.53 | - | 1.10 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.62 | 1.80 | - | 1.43 |

TB7.Tabelle 39: Ergebnisse der Variante 2, Seitenwand II, Entwurf 7, LF4

Wie der Tabelle 39 zu entnehmen ist, liegen die maximalen Verformungen der Seitenwände II zwischen 22.64mm und 22.94mm. Die maximale Verformung der Funktionsseitenwand mit den Mediendurchführungen wurde mit 12.67mm berechnet.

Die entsprechenden Verformungen aus dem Teilbericht 4, Tabelle 27 für die Variante 2, Seitenwand II, Entwurf 6, sind in der nachfolgenden Tabelle 40 zum Vergleich gegenübergestellt:

| | Tabelle 39 | Teilbericht 4, Tabelle 27 |
|------------------------------|------------|------------------------------|
| Seitenwand II, $ u_x $ | 22.64mm | 16.86 |
| Seitenwand II, $ u_y $ | 22.94mm | 17.32 |
| Funktionsseitenwand, $ u_x $ | 12.67mm | 27.94 |

TB7.Tabelle 40: Maximale Verformungen der Seitenwände

Die Seitenwände II ohne Kassettenstege, aber mit erhöhter PUR-Hartschaum-steifigkeit und Mantel-Laminatdicke, weisen eine um ca. 6mm geringere maximale Verformung gegenüber der Verformung im Teilbericht 4 auf.

Die minimale lichte Weite des Raumes für die Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) reduziert sich auf rechnerisch 40.4mm (Verringerung um 18.1mm). Für die Unterbringung der VIP in der geplanten Weise erscheint diese verbleibende lichte Weite als sehr knapp, zumal es ein theoretischer Wert ist.

Die Funktionsseitenwände sind nur von der Erhöhung der PUR-Hartschaumsteifigkeit und der Mantel-Laminatdicke betroffen, da für sie keine Kassettenstege vorgesehen waren..

Ihre maximale Verformung reduziert sich deutlich um 15.27mm auf 12.67mm gegenüber der maximalen Verformung im Teilbericht 4.

Die maßstäblichen resultanten Verformungen der Variante 2 sind im Bild 41 des Bildteils dargestellt.

Die Bilder 42 bis 44 zeigen die maßstäblichen Verformungen u_x und u_y in Modell-schnitten.

Im Bild 46 des Bildteils sind die Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} und σ_{zx} im Klebharz der maximal beanspruchten Klebfuge zwischen Boden-/Deckmodul und Eckmodulen dargestellt.

TB7.2.2 Variante 3 mit zusätzlichem Glasschaum, Seitenwand III - Entwurf 4

Lastfall LF4: EG + HWD + T95 + 0.05 bar Innendruck

Für die Eingabewerte gilt das unter Punkt TB 4.1 Gesagte. Es werden auf Grund der bisherigen Untersuchungen keine größeren Änderungen in der Beanspruchung der Variante 3 gegenüber der Variante 2 erwartet.

Ergebnisse der Variante 3

Es werden die Ergebnisse der Berechnung in der Tabelle 41 dargestellt.

| Komponenten | Verformungen | | | | | |
|--|-----------------|-------------------------|---|----------------------|----------------------------------|------------|
| u_x [mm] | 7.29 / -12.28 | | | | | |
| u_y [mm] | 0.03 / - 7.57 | | | | | |
| u_z [mm] | 5.92 / - 1.26 | | | | | |
| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff in den Fugen BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK- Verst.Prof. Derakane. | Glasschaum |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 7.54 | -0.086 | 4.53 | 1.81 | 8.16 | 0.21 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | -7.23 | -0.091 | -5.39 | 1.20 | 5.91 | 0.21 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.062 | -5.76 | - | -9.18 | -0.17 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.06 | -0.051 | -0.73 | 0.12 | 1.81 | -0.095 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.041 | 0.52 | - | 5.91 | -0.098 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | 0.039 | -1.53 | - | 7.14 | 0.098 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.003107 | -0.04059 | 0.007582 | 0.001073 | 0.002371 | -0.002168 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.003947 | -0.04299 | 0.001775 | 0.000709 | 0.002189 | -0.002157 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.03040 | 0.005732 | - | 0.007937 | -0.002179 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.006403 | -0.06661 | -0.001419 | -0.000270 | 0.003721 | 0.002466 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.05312 | 0.001376 | - | 0.01291 | -0.002561 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.05068 | -0.002781 | - | 0.01591 | 0.002554 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.25 | 2.1 | 1.37 | 0.13 | 0.27 | 2.1 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.22 | 2.2 | 1.63 | 0.09 | 0.2 | 2.1 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.19 | 1.74 | - | 0.77 | 1.1 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.38 | 1.76 | 0.80 | 0.02 | 0.23 | 2.1 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 1.41 | 0.57 | - | 1.18 | 2.2 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.35 | 1.68 | - | 1.43 | 2.2 |

TB7.Tabelle 41: Ergebnisse der Variante 3, Seitenwand III, Entwurf 4, LF4

Wie der Tabelle 41 zu entnehmen ist, sind die Verformungen der Seitenwände III der Variante 3 noch deutlich geringer als die Seitenwände II der Variante 2, was auf den Einfluss der größeren PUR-Hartschaum-Dichte in den Seitenwänden III der Variante 3 zurückzuführen ist.

Die maximalen Verformungen des Seitenwandmoduls mit den Medien-durchführungen von $u_x = -12.67\text{mm}$ (Variante 2) bzw. $u_x = -12.28\text{mm}$ (Variante 3) sind erwartungsgemäß nahezu identisch. Sie spiegeln im Vergleich zu den entsprechenden Verformungen des Teilberichtes 4, Tabellen 27 und 29, mit $u_x = -27.94\text{mm}$ bzw. $u_x = -27.53\text{mm}$ allein den Einfluss der Erhöhung der PUR-Steifigkeit und der Mantel-Laminatdicke wider, der zu einer Reduzierung der maximalen Verformung der Funktionsseitenwand um den Faktor 0.45 führt.

Die resultanten maßstäblichen Verformungen u_R der Variante 3 sind im Bild 48 dargestellt. Deutlich wird die geringe Verformung der Seitenwände III sichtbar.

Die Bilder 49 bis 51 zeigen wieder die maßstäblichen Verformungen u_x und u_y in Modellschnitten, wobei der Glasschaum nicht dargestellt ist, um die Geometrie des Glasschaumraumes deutlicher zu zeigen. Die lichte Weite desselben ist nicht reduziert.

Die Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} und σ_{zx} im Klebharz der maximal beanspruchten Klebfuge zwischen Boden-/Deckmodul und Eckmodulen der Variante 3 sind im Bild 52 des Bildteils dargestellt.

Für die maximalen Beanspruchungen des Klebers BÜFA 740-0119 in den Fugen zwischen Deck-/Boden-Modul und den Eckmodulen werden nahezu identische Werte für die Varianten 2 und 3 ausgewiesen.

Generell ist für die beiden Varianten 2 und 3 festzustellen, dass die Auslastung in allen Materialien – mit Ausnahme des Glasschaums - geringer ist als in den Tabellen 27 und 29 des Teilberichtes 4. Aber auch hier werden die zulässigen Werte teilweise überschritten, wenn auch gegenüber den Ergebnissen des Teilberichtes 4 abgeschwächt.

Die Überschreitung der zulässigen Werte im PUR-Hartschaum ist wie im Teilbericht 4 nur auf relativ kleine Flächen beschränkt, in den GFK-Versteifungsprofilen sogar nur auf extrem kleine Bereiche. Auf eine erneute bildliche Darstellung wurde verzichtet.

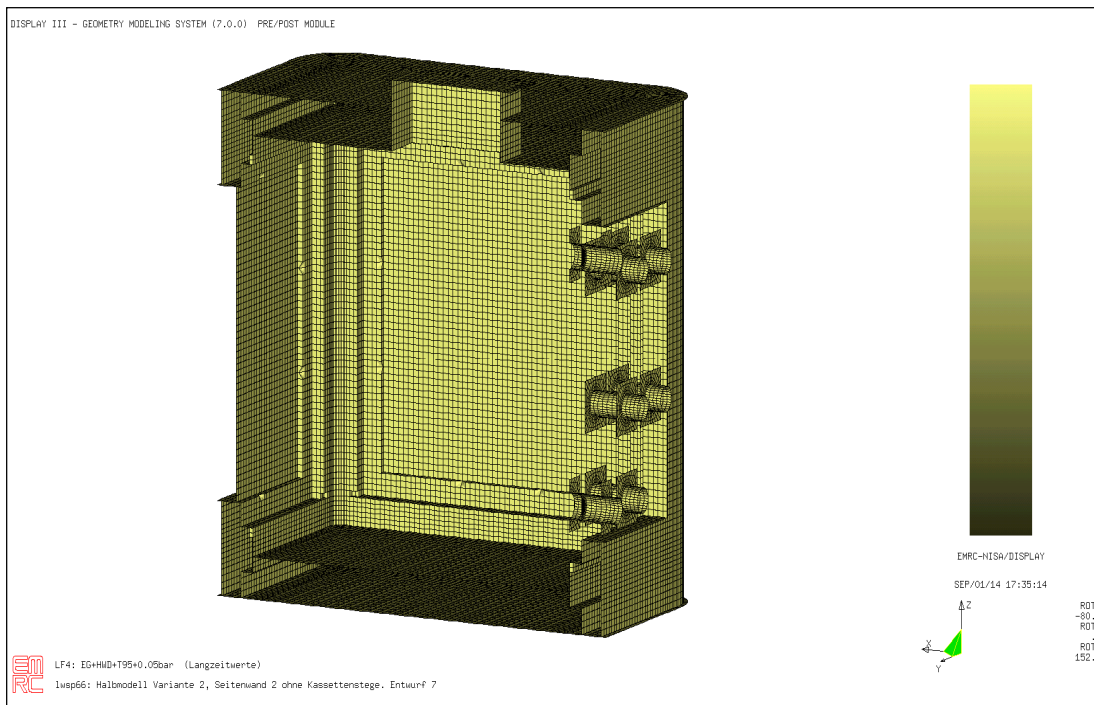
Die Überschreitung der zulässigen Werte des Glasschaums ist nach Voruntersuchungen ohne Bedeutung für die Sicherheit des Speichers.

Durch den Wegfall der Kassettenstege und damit auch des Klebspachtels zur Verklebung der Stege mit den angrenzenden Laminaten konnte die damit verbundene hohe Beanspruchung des Klebers deutlich reduziert werden. Die dennoch verbliebene Überschreitung der zulässigen Werte im Klebharz ist jedoch für eine langzeitige Belastung des Speichers von sicherheitsrelevanter Bedeutung.

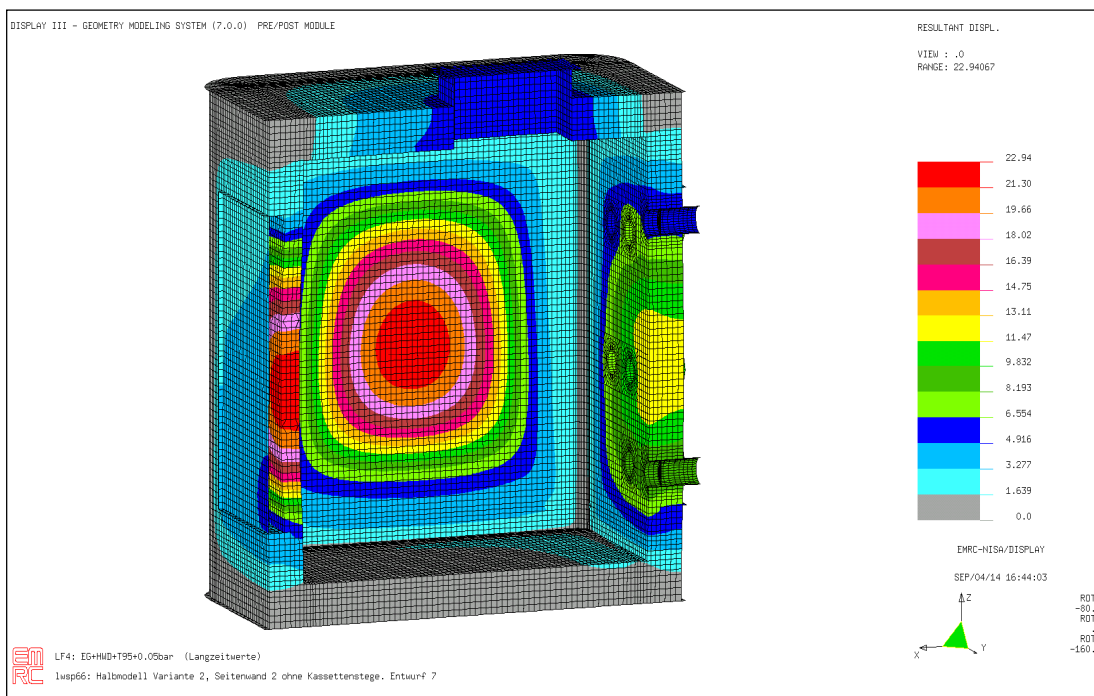
Für eine kurzzeitige Innendruckbelastung von 0.05bar unter den sonstigen Bedingungen des Lastfalls LF4 erscheint die Integrität der hier betrachteten Speichervarianten jedoch gesichert.

Da der Nachweis der Tagsicherheit für den Lastfall LF4 auch für die modifizierten Varianten 2 und 3 nur für eine relativ kurzzeitige Belastung bestätigt werden kann, steht der Nachweis der langzeitigen Sicherheit unter Einsatz eines geeigneteren Klebers für den Lastfall LF3 für beide Varianten noch aus. Wird dieser erbracht, ist er auch für die Lastfälle LF1 und LF2 gegeben.

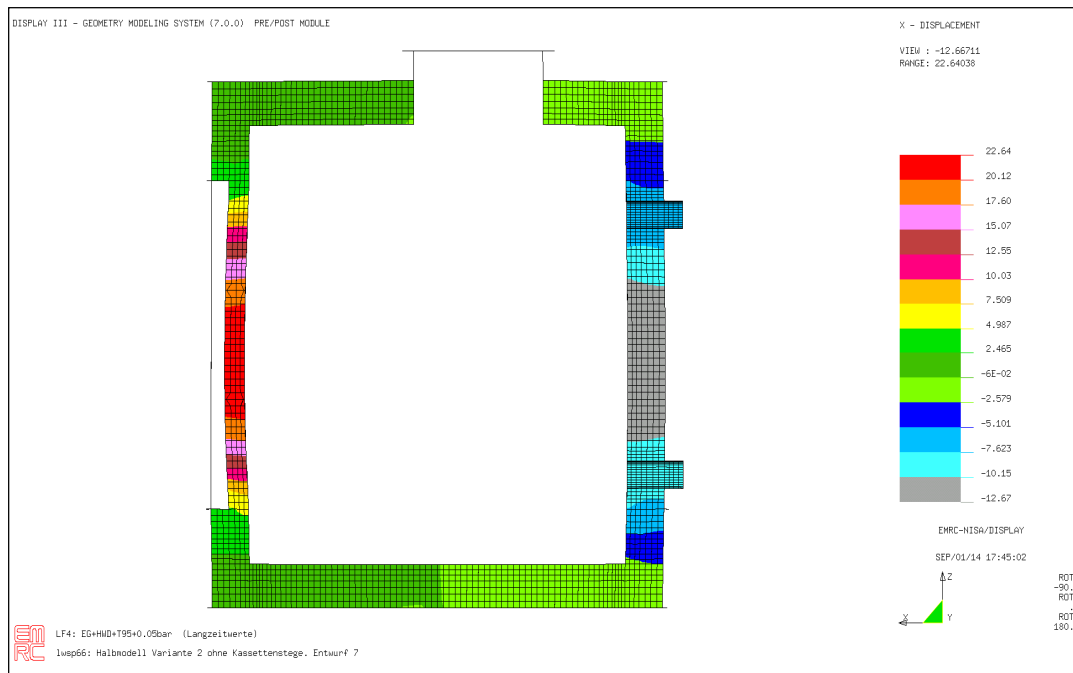
Für den Lastfall LF5 mit erhöhtem Innendruck von 0.1bar wird unter Hinzuziehung der bisherigen Ergebnisse und bei Verwendung des Klebharzes BÜFA 740-0119 eingeschätzt, dass die Integrität des Wärmespeichers auch in den hier betrachteten modifizierten Varianten 2 und 3 nicht gewährleistet ist.



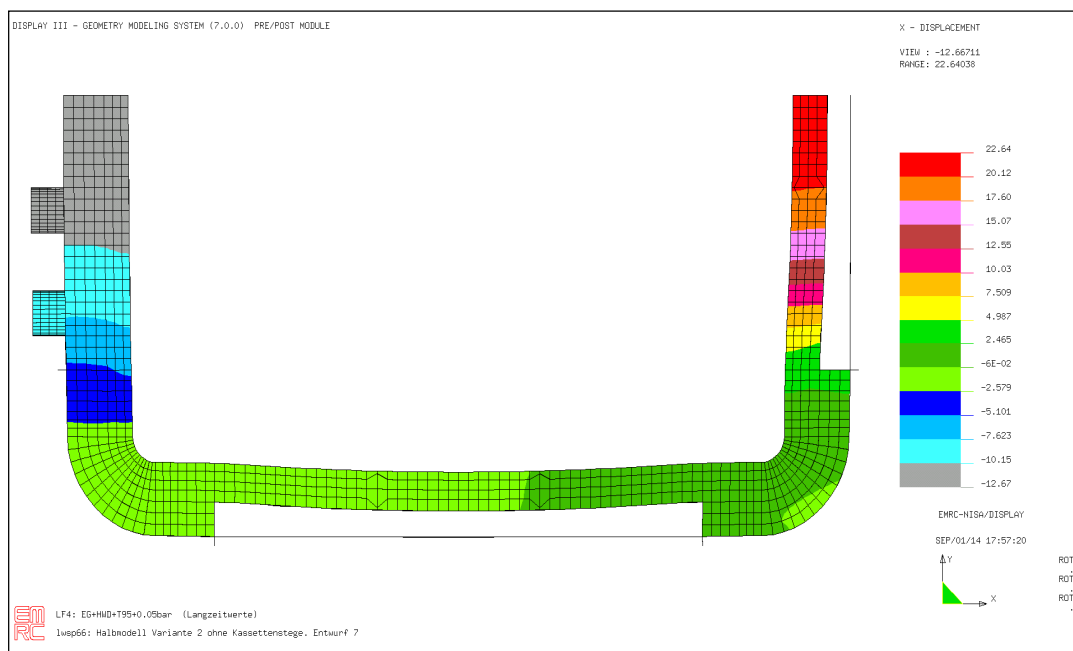
TB7.Bild 40: Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum und ohne Seitenwand-Mantel-Laminat



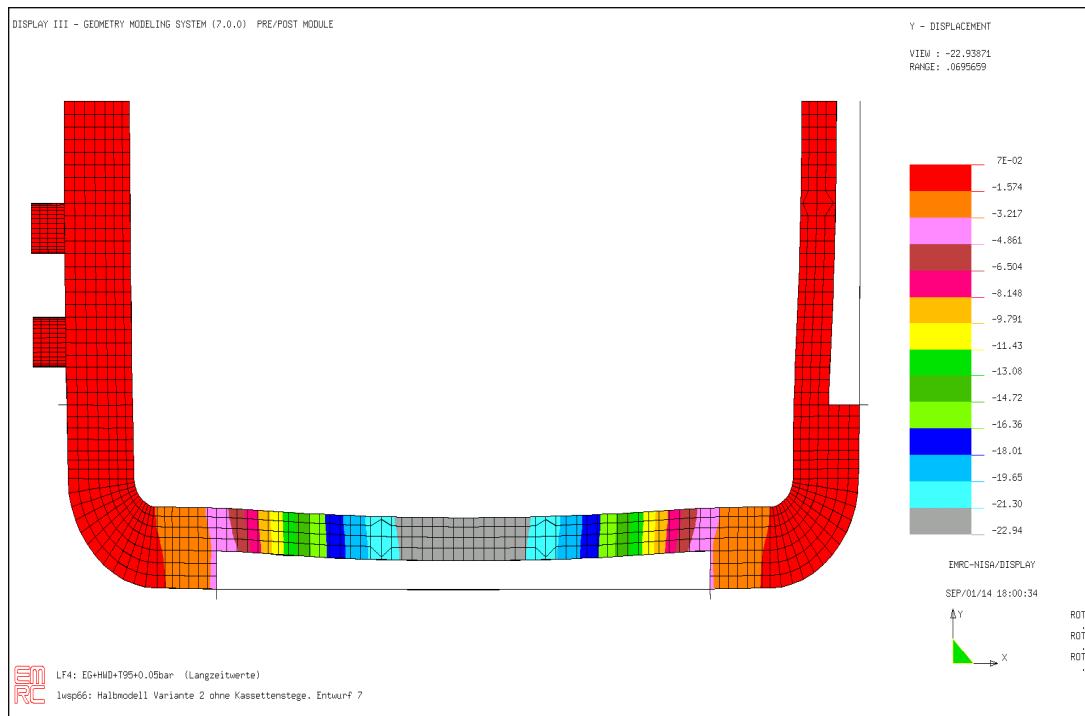
TB7.Bild 41: Resultante maßstäbliche Verformungen $u_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Halbmodells



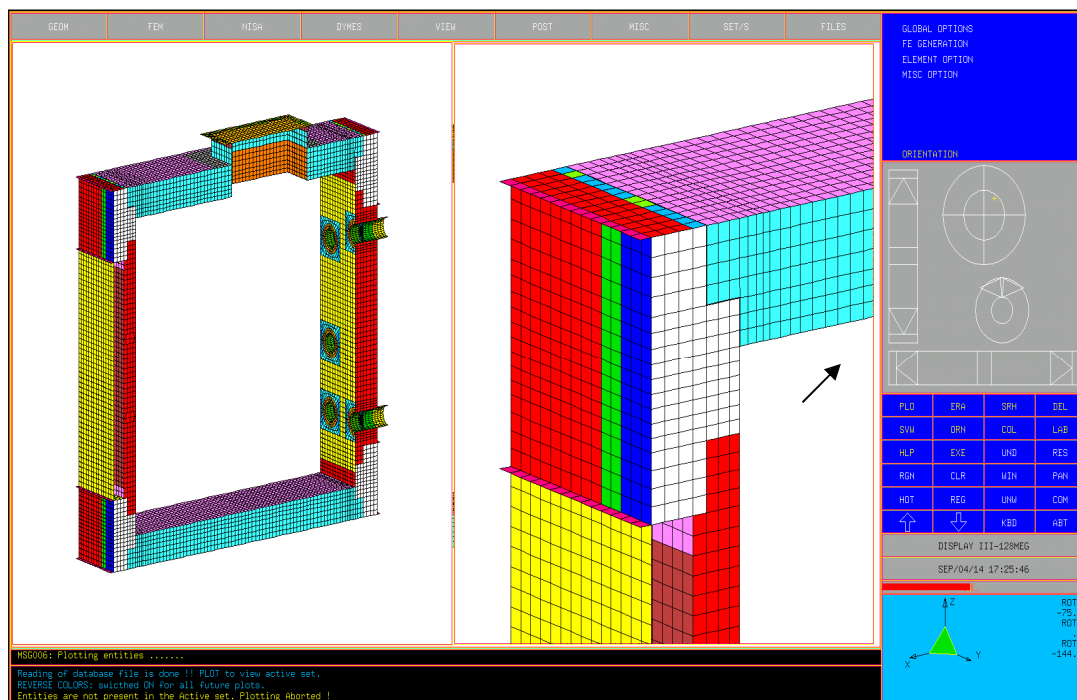
TB7.Bild 42: Vertikalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm]



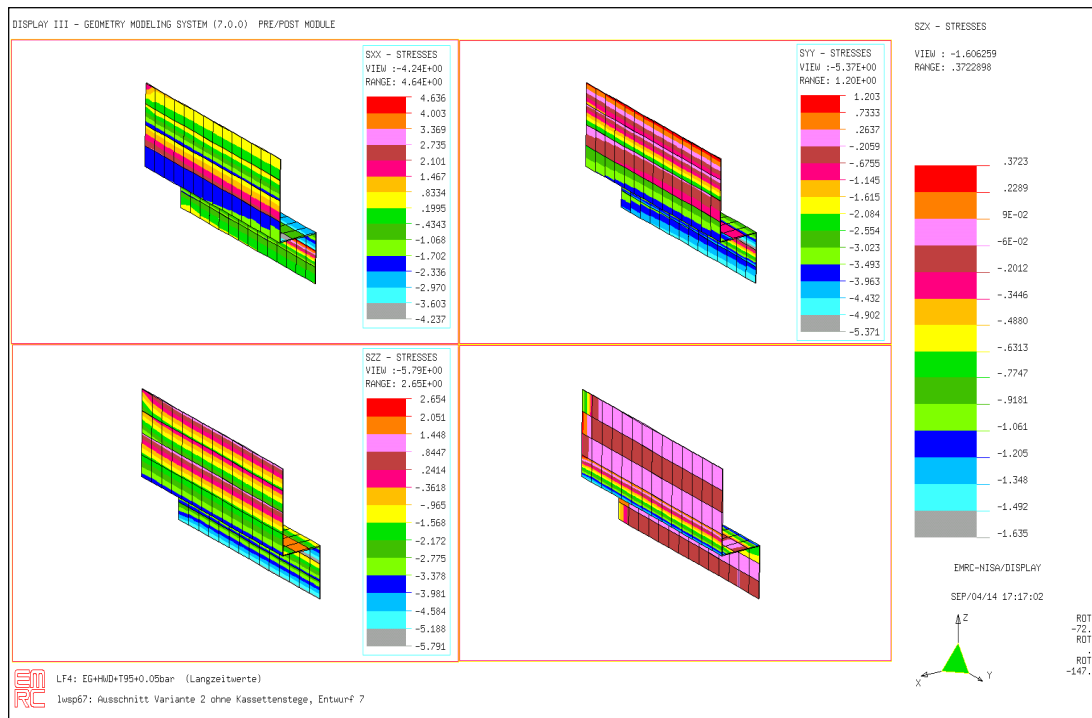
TB7.Bild 43: Horizontalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm]



TB7.Bild 44: Horizontalschnitt, maßstäbliche Verformung u_y [mm]



TB7.Bild 45: Links: Ausschnitt des Modells. Rechts: Vergrößerung mit Verklebungsfuge



TB7.Bild 46: Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} und σ_{zx} [N/mm²] im Klebharz der maximal beanspruchten Klebfuge zwischen Boden-/Deckmodul und Eckmodulen

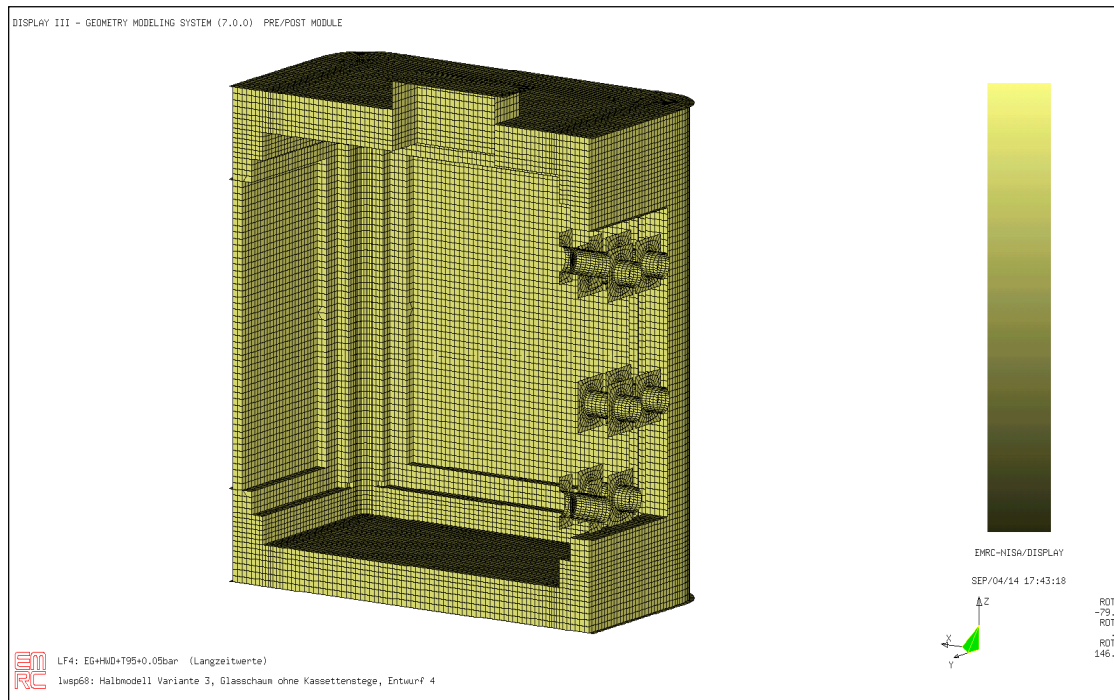
4m³ LABOR – WÄRMESPEICHER

Variante 3: Zusätzliche Glasschaum-Isolierung, Seitenwand III, Entwurf 4

Lastfall 4:

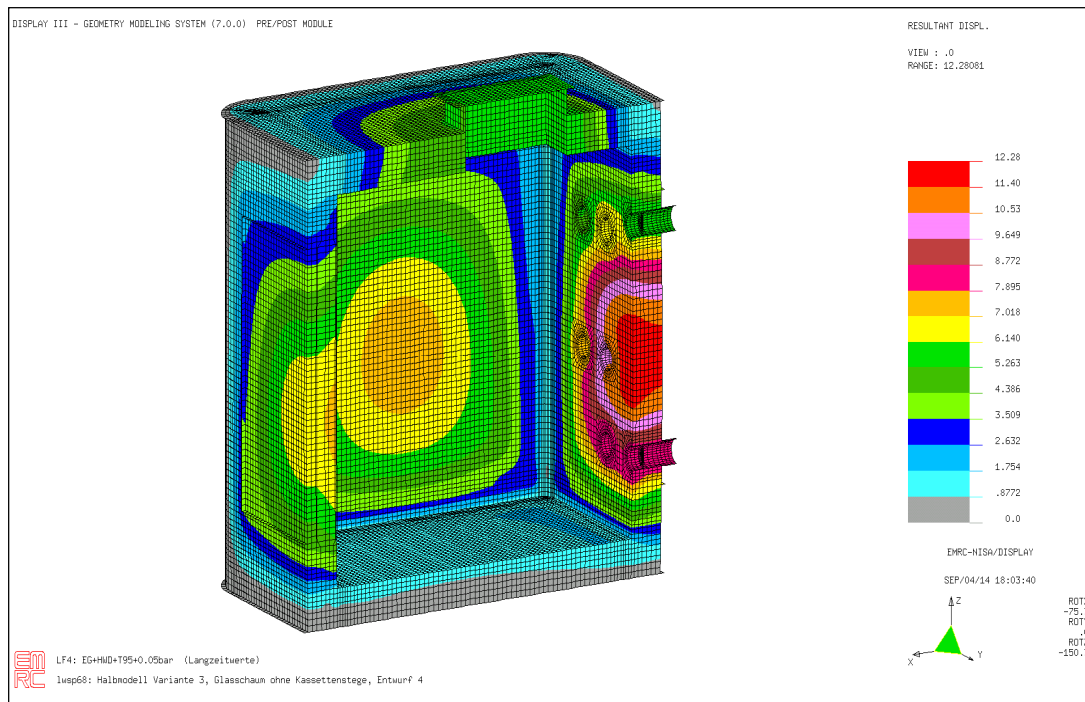
EG+HWD+T95+0.05bar Innendruck

- Keine Kassettenstege
- PUR-Hartschaum: $\rho = 0.05\text{g/cm}^3$
- GFK-Modulmanteldicken: $t = 5.5\text{mm}$

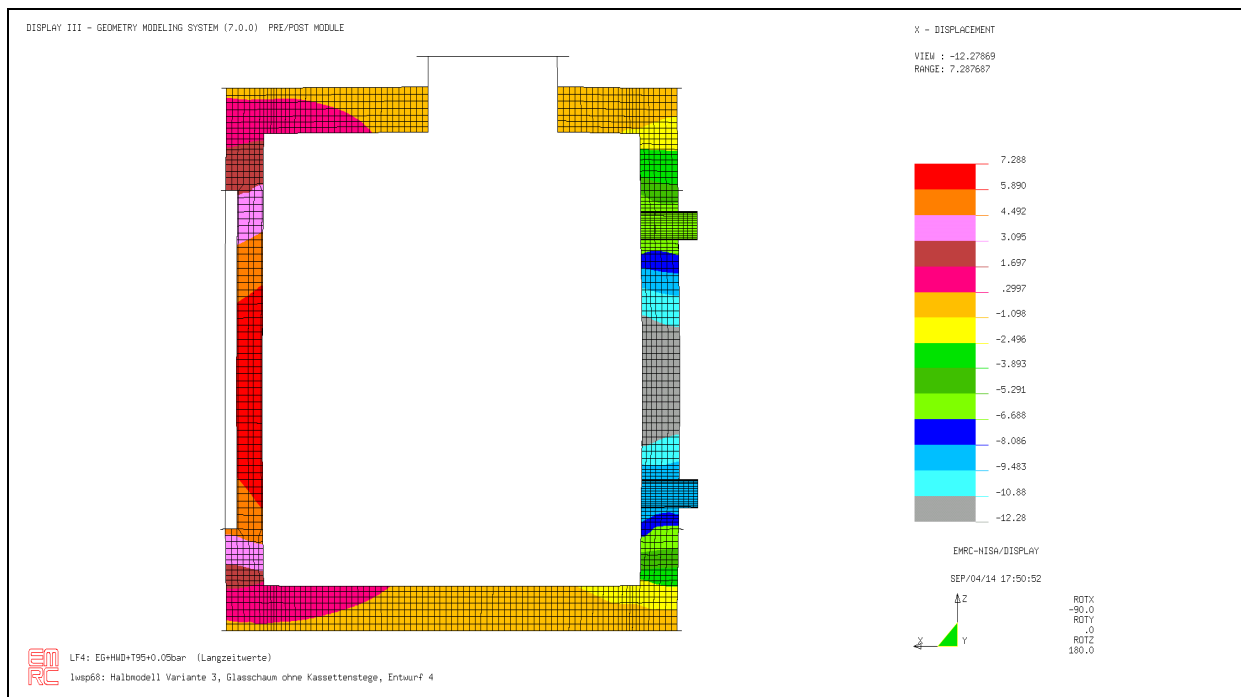


TB7.Bild 47:

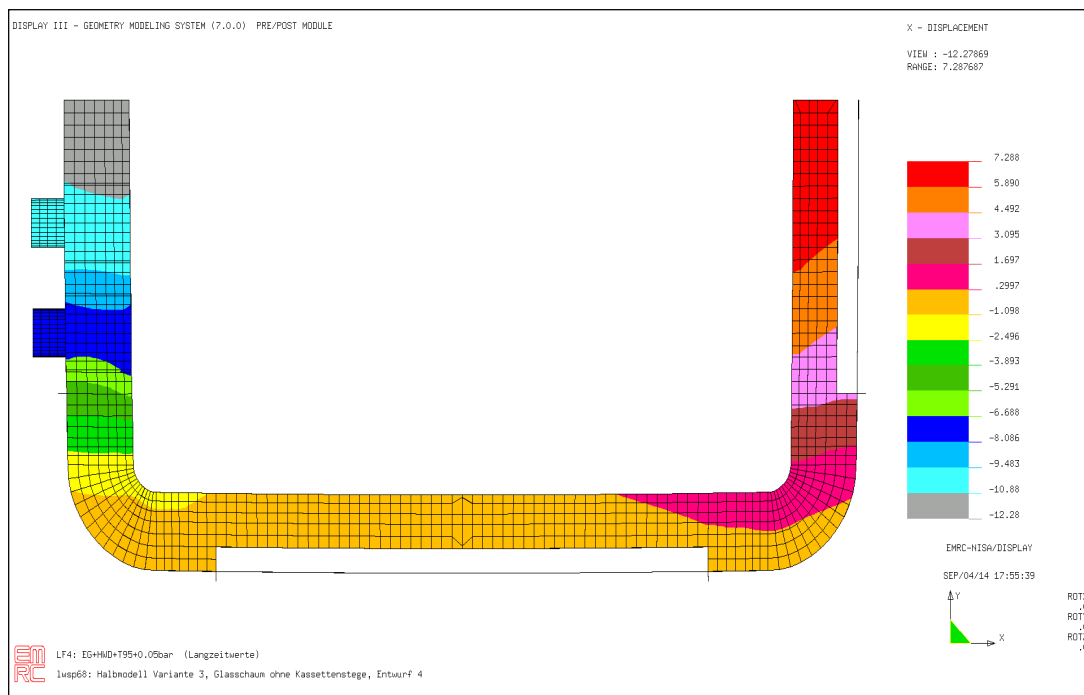
Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum in den Seitenwänden und ohne Seitenwand-Mantel-Laminat, jedoch mit der zusätzlichen Glasschaum-Isolation (links außen).



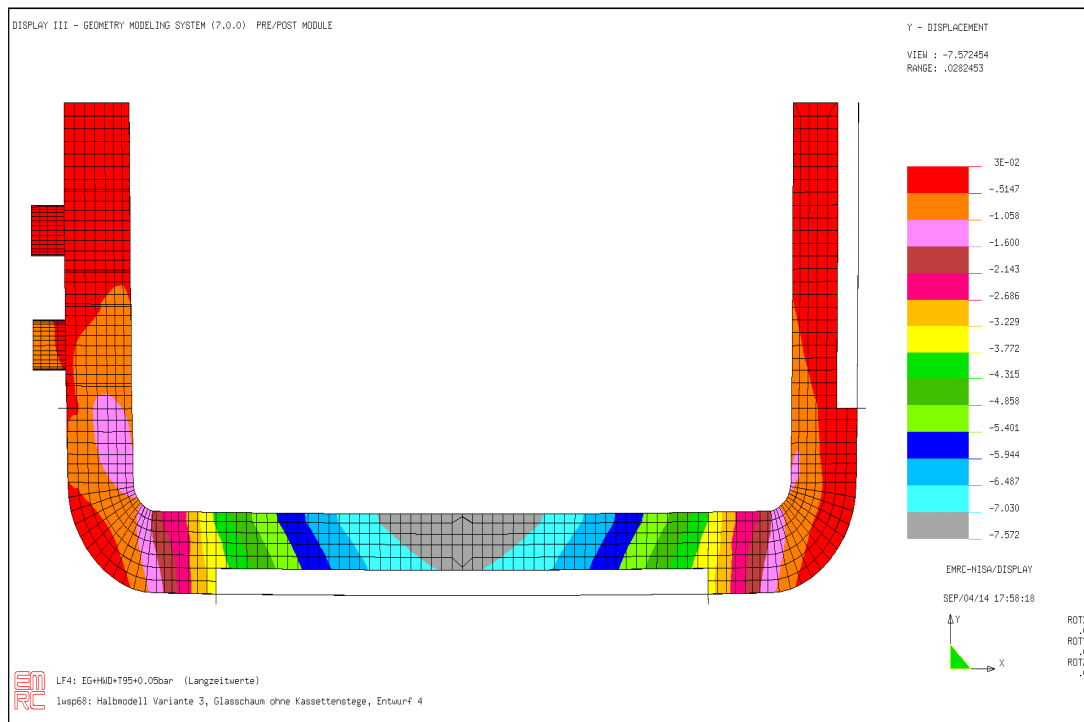
TB7.Bild 48: Resultante maßstäbliche Verformungen $u_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Halbmodells



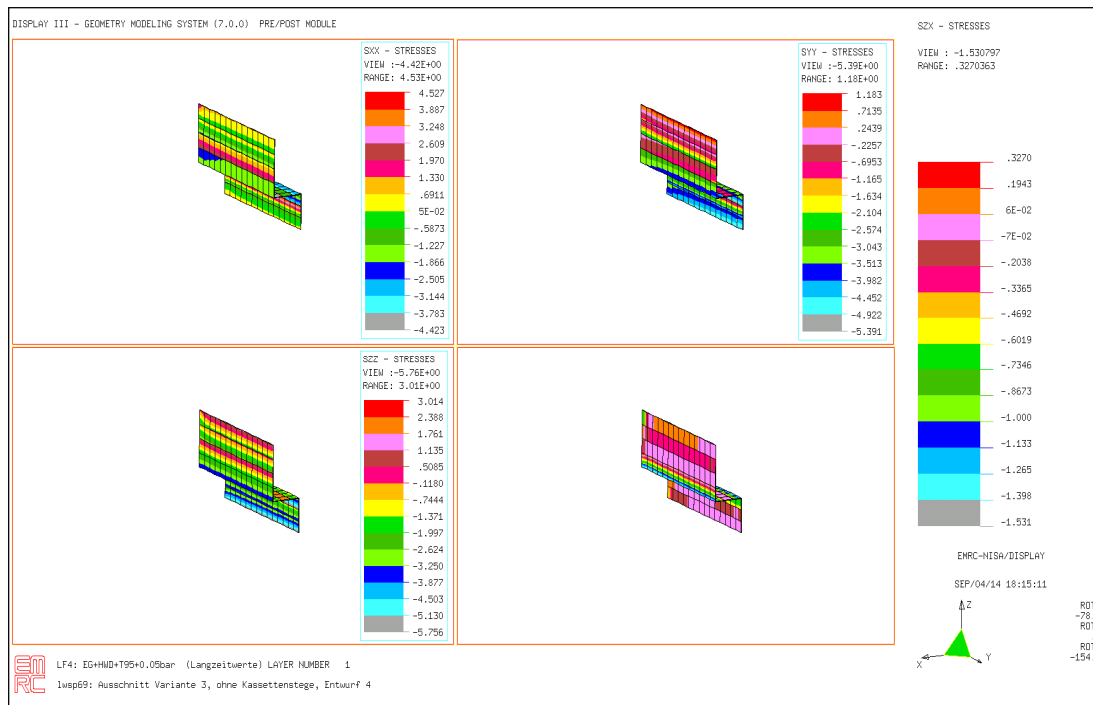
TB7.Bild 49: Vertikalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm]. Darstellung ohne Glasschaum



TB7.Bild 50: Horizontalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm]. Darstellung ohne Glasschaum



TB7.Bild 51: Horizontalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_y [mm] - Darstellung ohne Glasschaum



TB7.Bild 52: Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} und σ_{zx} [N/mm²] im Klebeharz der maximal beanspruchten Klebefuge zwischen Boden-/ Deckmodul und Eckmodulen

III.3.4 Werkzeugbau und Abmusterung

Für die tolerierten und profilierten Teile war es erforderlich, spezielle Laminierwerkzeuge zu schaffen für:

- Eckmodul – Innen – und Außenschale
- Seitenwandmodul – Außenschale
- Boden – und Deckel – Außenschale
-

Die Werkzeuge stellten selbst GFK Formen dar. Damit wurde es möglich, nach dem HAV die entsprechenden GFK- Schalen zu realisieren.

Aus konstruktiver Sicht galt es, bei allen Formteilen in Entformungsrichtung eine Schräge von $\geq 3^\circ$ (Seitenneigung 1:25) und an allen Fließkanten R adien von $\geq 5\text{mm}$ vorzusehen.

Der Werkzeugbau und die Abmusterung erfolgen planmäßig bei der Fa. Rinn in Wümbach / Ilmenau.

Die geplanten Spaltmaße für die Klebfugen von nur $1 \div 2\text{ mm}$ wurden erfolgreich umgesetzt, was bei der Größe der Bauteile und des hohen Schrumpfmaßes von UP- bzw. VE- Harz (bis 7%) eine beachtliche Leistung darstellt.

Die Abmusterung geschah im Rahmen von Projektberatungen.

III.3.5 Modulfertigung

Die Herstellung der GFK- Formteile und der ebenen Lamine sowie das Ausschäumen und Fügen erfolgten bei der Fa. VKA (Verbundwerkstoff- und Kunststoffanwendungstechnik) in Schönbrunn / Thr.

Es handelt sich um:

- 8 Eckmodule (Abb. 3.5; 3.6; 3.7)
- 6 Seitenwandmodule (Abb. 3.7; 3.8; 3.9; 3.10)
- 2 Bodenmodule / Deckelmodul noch ohne Dom (Abb. 3.11; 3.12)

Als Einzelgewichte werden benannt:

| | | |
|-------------------------|------|---|
| Eckmodul Innenschale | | 16 kg |
| Außenschale | | 10 kg |
| nach Ausschäumen + 9 kg | | $35 \times 8 = 280\text{ kg}$ |
| Seitenmodul | VI | $46\text{ kg} \times 4 = 184\text{ kg}$ |
| | VII | 66 kg |
| | VIII | 62 kg |
| Bodenmodul | | 36 kg |
| Deckelmodul/Dom | | 66 kg |

Damit ergeben sich für die VI ges. = 566 kg



Abb. 3.5 Entformte Innenschalen der „Dreibein- Eck-Elemente



Abb. 3.6 Nach dem Verbinden der Innen- mit der Außenschale durch Überlappung und Ausschäumen mit PUR entstandene Ecke



Abb. 3.7 Fertiger Eckmodul vor dem Beschneiden sowie vorgefertigte Außenschale (I) für Seitenwandmodul



Abb. 3.8 Demonstration des Innenaufbaues bei der V III Seitenwand



Abb. 3.9 Demonstration der VIP – Elemente – Einbringung in V II



Abb. 3.10 Verschuß der VIP – Elemente zum Rand und zur inneren Deckschicht



Abb. 3.11 Entformte Außenschale für Boden- bzw. Deckelmodul



Abb. 3.12 Verschuß der ausgeschäumten Außenschalen mit dem Traglaminat im Naßverfahren

III.3.6 Modulmontage

Die Montage der Eck- und Plattenmodule zum Speicher erfolgte durch die Fa. energie depot, Radeberg in Schönbrunn und in Ilmenau. Von ed wurden auch der Funktionsmodul komplettiert sowie der Wechsel der Seitenwandmodule I, II, III zu den im Abschnitt 4.1 benannten Terminen vorgenommen.

Vom Verfasser dieses Teil-Berichtes erfolgte die Fertigungs- und Montageüberwachung sowie die Planung der Prüfungen entsprechend der Vorschriften für mechanisch beanspruchte Kunststoffbauteile beim DIBt Berlin während des gesamten Berichtszeitraumes.

Die nachfolgenden Abbildungen demonstrieren den Gesamttablauf:



Abb. 3.13 Vorbereitung: Bereitstellung aller GFK – Einzel-Module



Abb. 3.14 Verbindungsaufbau der Eckmodule mit PUR - Dübeln



Abb. 3.15 **Zusammengesteckte Dreibeinmodule als Speicherunterteil**



Abb. 3.16 **Alle 8 zusammengesteckten und verklebten (überlamierten) Eckmodule im Stadium des Einbaues eines Seitenwandmoduls**



Abb. 3.17 Zum Einbau vorbereiteter Seitenwandmodul V II



Abb. 3.18 Einbau (und verspachteln) des Bodenmoduls nach dem Einfügen (beachte Distanzkeile) in den Rahmen aus Schenkeln der Eckmodule



Abb. 3.19 **Deckelmodul mit Mannloch - Fertig zum Einbau in Speicher**



Abb. 3.20 **Fugenvorbereitung zum Einbringen des Deckelmoduls**

Die Montage erfolgte Mitte August 2014 bei warmem/trockenem Wetter auf dem Freigelände der VKA Schönbrunn. Bis auf die eine Modulseitenwandplatte VI wurden alle Elemente unlösbar miteinander verbunden. 4 Stunden nach Abschluss der letzten Verklebung wurde der Speicher verladen und mit einem LKW zum Betriebserprobungsplatz an die TUI transportiert.

III.4. Musterzulassung

Unter der Musterzulassung wird für nicht zulassungspflichtige tragende Kunststoffbauteile der experimentelle und rechnerische Nachweise des Einhaltens der Grenzzustände:

- kein Bruch beliebiger Art
- kein Stabilitätsverlust
- keine unzulässige Verformung
- keine unzulässige Dehnung

verstanden.

Von dem Bearbeiter als Sachverständiger wurden neben dem eigenen Standardwerk: „Konstruktionstechnik und Leichtbau“ die jüngsten Veröffentlichungen der drei Institutionen:

- Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Berlin zur Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung von Bauprodukten, den Bau- und Prüfgrundsätzen
- Bau- und Überwachungsverein (BÜV e.V.)
zu „Tragende Kunststoffbauteile“
- Normenausschuß Chemischer Apparatebau (FNCA) im DIN
Normenausschuß mit dem Titel „Oberirdische GFK- Tanks und -Behälter EN 13121 1÷ 4
zur Beurteilung herangezogen.

III.4.1 Versuchsanordnung

Der fertiggestellte und mit der Ausrüstung komplettierte 4m³ Laborwärmespeicher soll im Freien aufgestellt und getestet werden. Der Aufstellort ist neben Institutsgebäuden und einem parallel dazu verlaufenden Hang im Thüringer Mittelgebirge vorgesehen. (Abb.: 4.1) Den maßgebenden Fall für die Standsicherheitsuntersuchung stellt die Betrachtung des leeren Behälters unter Windlast dar. Der Behälter ist geschlossen.

Gewicht des leeren Behälters: $G_{wsp} \approx 4450\text{kN}$ (a.a.O. 5660kN)
Höhe des Behälters: $h_{wsp} = 1.930\text{ m}$
Breite des Behälters: $b_{wsp} = 1.920\text{ m}$
Tiefe des Behälters: $d_{wsp} = 1.920\text{ m}$

Der 100 mm überragende Einstiegsdom mit einer Lasteinzugsfläche $A_{Dom} = 0.06\text{ m}^2$ wird vernachlässigt.

Im FEM-Teilbericht 6: Standsicherheit unter Windlast wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

Windlasten nach DIN 1055-4

Windzone: 2

Geländekategorie: III

Böengeschwindigkeitsdruck: $q = 1.5 \times q_{\text{ref}}$ mit $q_{\text{ref}} = 0.39 \text{ kN/m}^2$

$$\Rightarrow q = 0.585 \text{ kN/m}^2 = \text{const. über } h_{\text{wsp}}$$

Winddruck für nicht schwingungsanfällige Bauteile:

$$W_e = C_{pe} \times q$$

Außendruck: Aerodynamische Beiwerte

$$C_{pe} = C_{pe,1}$$

$$C_{pe} = C_{pe,1} + (C_{pe,10} - C_{pe,1}) \times \lg A$$

$$C_{pe} = C_{pe,10}$$

für Lasteinzugsfläche $A \leq 1 \text{ m}^2$

für Lasteinzugsfläche $1 \text{ m}^2 \leq A \leq 10 \text{ m}^2$

für Lasteinzugsfläche $A > 10 \text{ m}^2$

Vertikale Wände mit rechteckigem Grundriss:

$$h/d = 1, \quad e = b_{\text{wsp}} = d_{\text{wsp}} = 1.92 \text{ m}$$

Im Weiteren wird errechnet:

Der maximale Winddruck w_{eF} auf eine Wandfläche des Speichers beträgt damit 30% des Innendrucks $p_i = 0.005 \text{ N/mm}^2$ des Wärmespeichers und 19% des mittleren hydrostatischen Druckes $p_i = 0.008 \text{ N/mm}^2$ im Wärmespeicher. Für diese Drücke wurden die Behälterwände bereits nachgewiesen.

Zu betrachten ist daher im Weiteren nur die Standsicherheit und dazu ergibt sich:

Horizontal ist der Wärmespeicher mit einer Kraft von aufgerundet 5 kN gegen Verschieben zu sichern, vertikal am Rand A und B durch je eine Kraft von aufgerundet 1 kN, was bei der Versuchsfreigabe durch mechanische Befestigungen gewährleistet war.



Abb. 4.1 Freigabe des Musterspeichers für die Vermessung am 02.09.2014

Für den LF 6: EG + HWD + 0,05 bar Innendruck wurden ohne besondere Temperaturbeaufschlagung mit einer Erhöhung des Überlaufes die Druckerhöhung erreicht und über 1h aufrechterhalten.

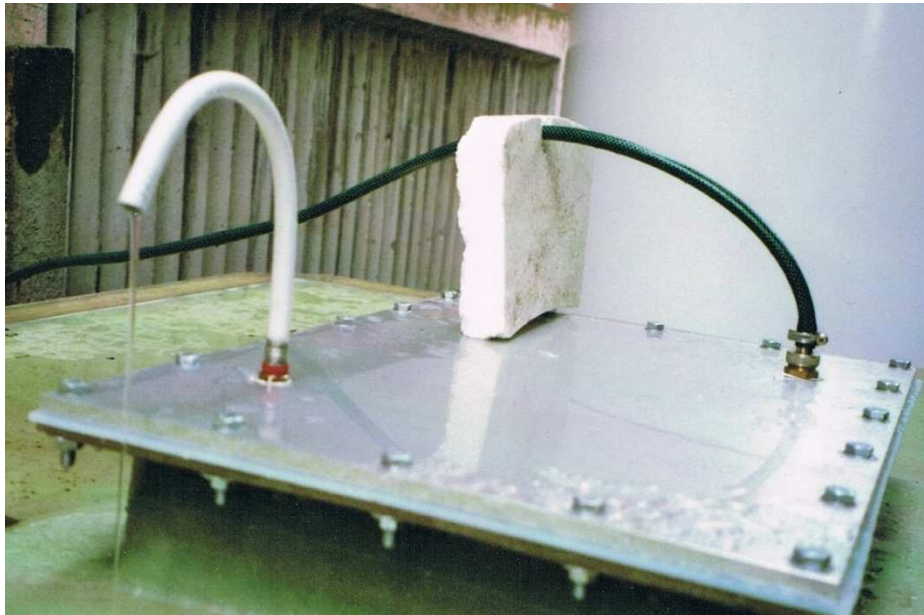


Abb. 4.2 Abnahmeversuch mit Laborspeicher für LF6

Das Verformungs- und Auswölbungsverhalten bei diesem und weiteren LF, insbesondere LF 4 mit T 95°C wurden 2 Meßrahmen nach Vorgabe auß erhalb der TUI durch den Bearbeiter beschafft und am Speicher montiert.



Abb. 4.3 Vermessung der Auswölbung im rechtwinkligen Koordinatensystem (im Blickfeld die auswechselbare Wand)

Zuvor waren am Speicher an der Wand 3 die Be- und Entladesystemdurchbrüche geschaffen und die auswechselbare Wand 1 (VI) eingebracht worden.

Ab diesem Zeitpunkt 02.09.2014 übernahm die TUI den Speicher und damit auch die Dokumentationspflicht.

Vom Bearbeiter (des TB) erfolgen mehrere Kontrollbesuche wegen aufgetretener Undichtheiten und zum Wechsel der Module V II und V III.

III.4.2 Betriebserprobung

Für den Zeitraum vom 2. September 2014 bis 22. April 2015 wurde von den Bearbeitern das Belastungsregime und der Verformungszustand in Abhängigkeit von der Zeit, dem Temperatur und Medieneinfluss sowie den verschiedenen Seitenwänden erfaßt.

Daraus ergeben sich für der Wandaufbau:

| | |
|---------------------|------------|
| VI – Meßreihen über | 8 Monate |
| VII – | 2,5 Monate |
| VIII - | 2 Monate |

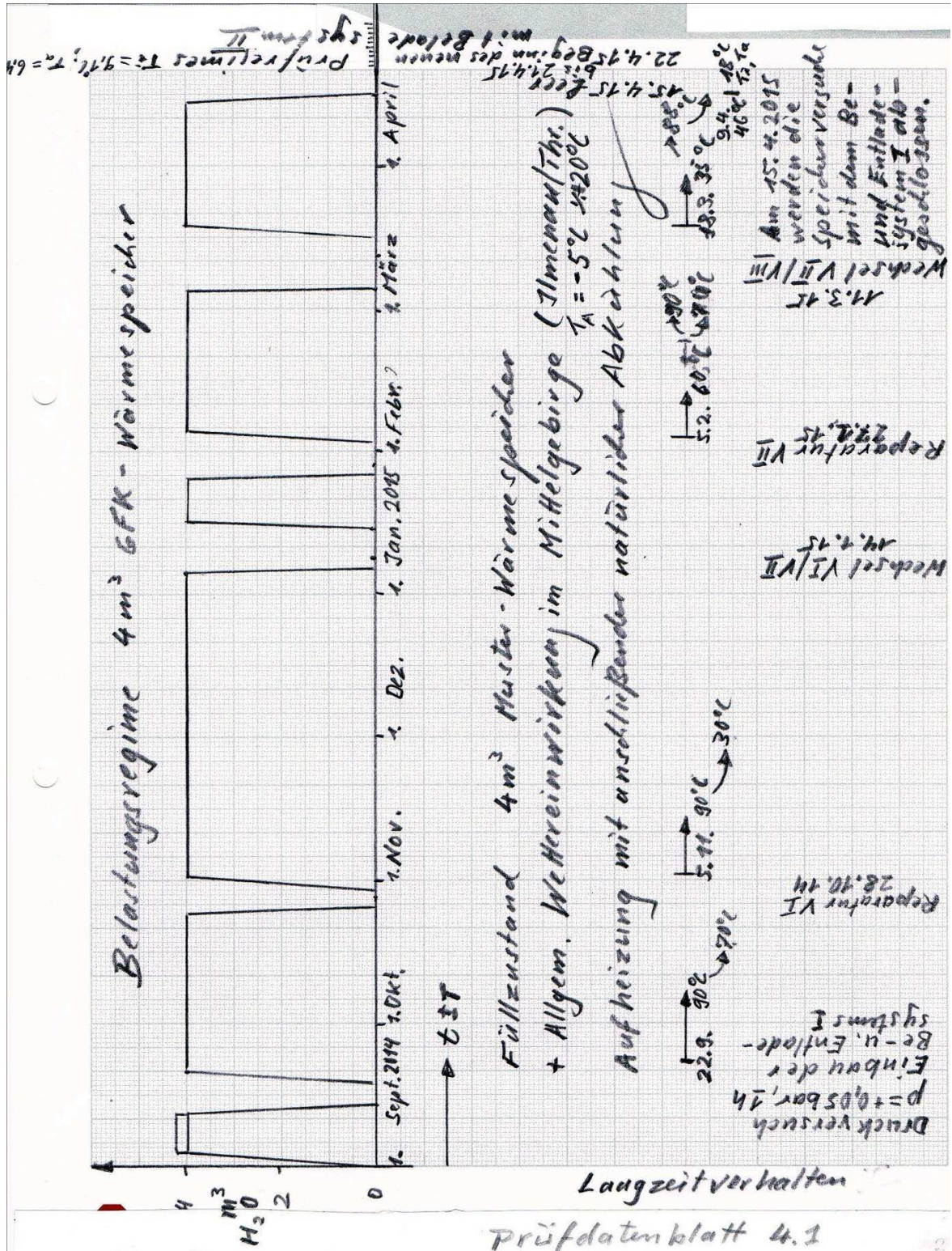
Auf Datenblättern 4.1 ÷ 4.4 werden sowohl Be- als auch Entlastungsphasen mit Kriech- und Rückkriecheffekten dargestellt.

Datenblatt 4.1 Belastungsregime über gesamten Prüfzeitraum I

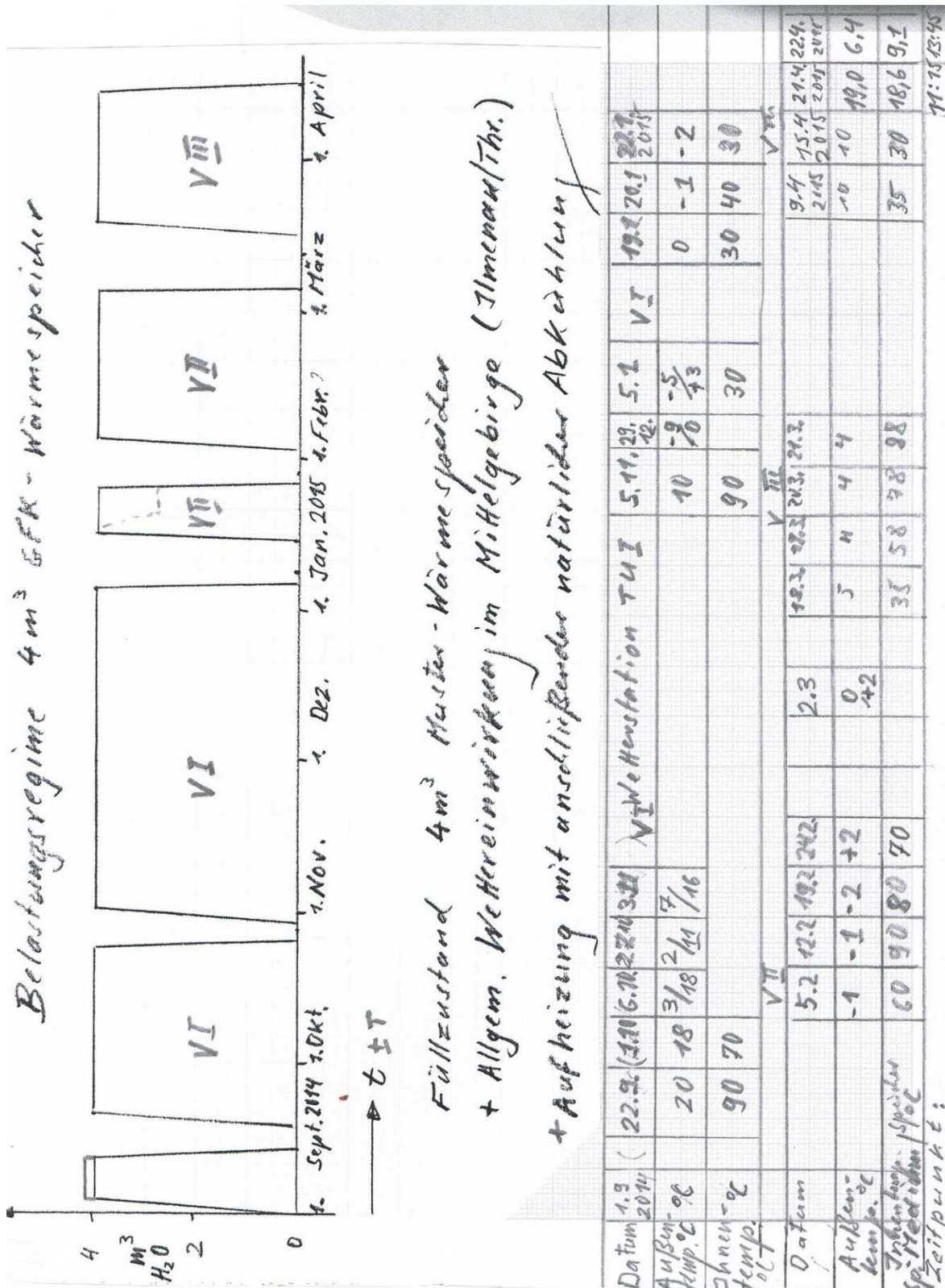
Datenblatt 4.2 Lastgeschichte samt Temperatureinfluss

Datenblatt 4.3 Maximale Auswölbung der festen Seitenwände

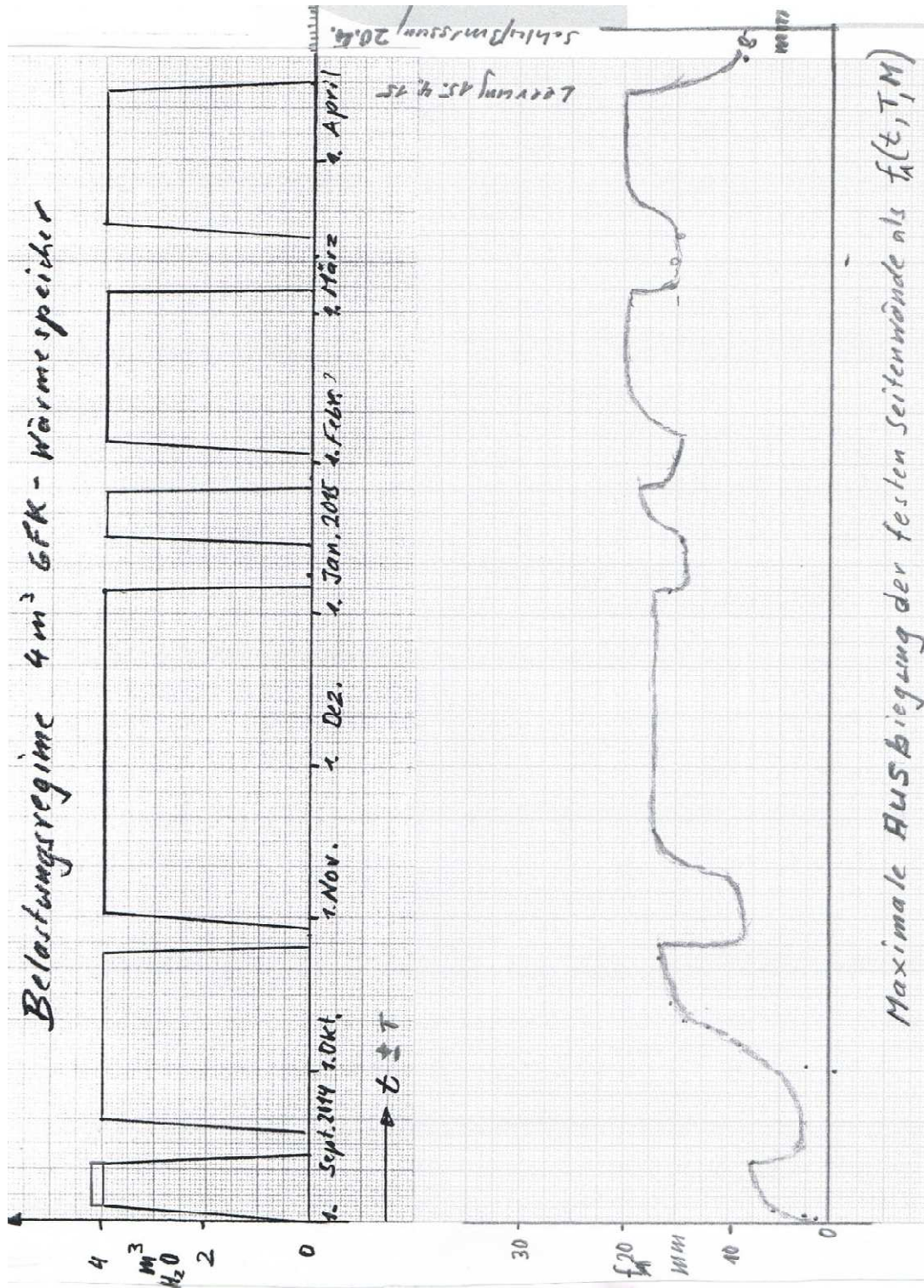
Datenblatt 4.4 Maximale Auswölbung der lösbaren (verschraubten) Seiten wände



Prüfdatenblatt 4.1

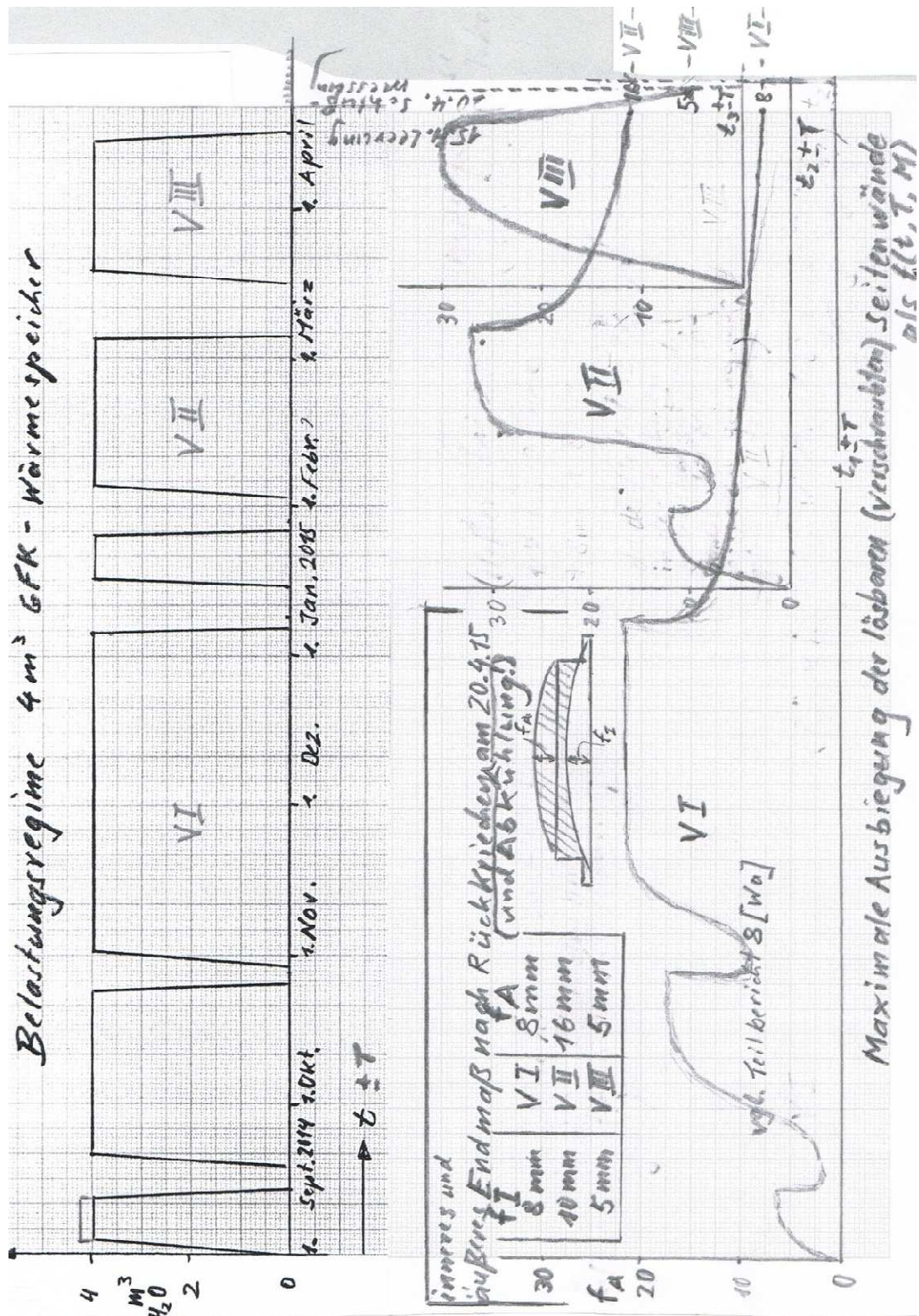


Prüfdatenblatt 4.2.



Prüfdatenblatt 4.3

Seitenwandmodule I, II, III



Prüfdatenblatt 4.4

Nicht vorgesehene Unterbrechungen der Belastungsphasen ergaben sich durch Undichtheiten im Bereich der auswechselbaren Module VI und VII.

Als Ursache muss jeweils die fehlende exakte Anlage der Wechselmodule in den Dichtungsfalzen und damit Nachrutschen sowie der dann fehlende Anpreßdruck durch die Schrauben benannt werden.

Leider waren derartige Unterbrechungen und damit zusätzliche Einpass-, Einschraub- und Abdichtversuche unter teilweise winterlichen Klimabedingungen mehrfach erforderlich:

18.09.2014 (Abb.: 4.4)

28.10.2014 (Abb.: 4.5)

14.01.2015 (Abb.: 4.6)

27.01.2015

11.03.2015 (Abb.: 4.7)



Abb. 4.4 Undichtheiten nach Ersteinbau von V I (2. Septemberhälfte 2014)



Abb. 4.5 **Rißbildung beim Überlaminat durch Nachrutschen von VI in Richtung Falz**



Abb. 4.6 **Ausbau von Wechselmodul V I und nachfolgend Einbau von V II (14.01.2015)**

III.4.3 Deformationsverhalten als Vergleich von Rechnung und Versuch

Während mit dem im November 2014 angefertigten FEM Teilbericht 8 ein nur auf VI bezogener Vergleich des Deformationsverhaltens zwischen Berechnung und Versuch hergestellt wurde, gelang es mit FEM-Bericht 11 alle Varianten zu erfassen.

Für einen näherungsweisen Vergleich mit Berechnungsergebnissen stand zunächst die Untersuchung des Lastfalls LF3: EG+HWD+T95+ML75 mit Langzeitkennwerten im Teilbericht 3 zur Verfügung. Als die vom 18.09.2014 bis 02.10.2014, 10:45 Uhr; gemessenen maximalen Verformungen für die Messpunkte MP9 und MP7 ergaben sich:

lösbare Seitenwand: $v_{\max} = 5.2\text{mm} + 4.3\text{mm} = 9.5\text{ mm}$ (Messpunkt vor dem in den Falz gleiten), danach 25,5mm)

feste Seitenwand: $v_{\max} = 4.8\text{mm} + 16.1\text{mm} = 20.9\text{ mm}$ (Messpunkt MP 7)

Im Bildteil werden die Verformungen des Wärmespeichers bei Langzeitbelastung für den Lastfall LF 3 mit $v_{\max} = 23.08\text{mm}$ ausgewiesen. Die gemessenen maximalen Verformungen Seitenwände liegen damit in der gleichen Größenordnung.

III.4.4 FEM-Teilbericht 11 / 4m³ Labor - Wärmespeicher in Modulbauweise

Zum Versuchsstand

Wie bereits dargelegt, befindet sich der Versuchsstand entgegen der ursprünglichen Planung unter freiem Himmel und unterliegt der entsprechenden jahreszeitlichen Umgebungstemperatur (Bild 53 des Bildteils). Die Messpunkte für die Verformungsmessungen am Labor-Wärmespeicher sind im Bild 54 dargestellt.

Die statische Belastung erfolgte durch Füllung des Speichers mit Wasser zur Erzeugung des einsatzgerechten hydrostatischen Drucks sowie auch des zusätzlichen Innendruckes von 0.05bar zur Abnahmeprüfung.

Die Temperaturbelastung wurde über die Ausrüstung des Wärmespeichers, mit der die Wasserfüllung analog den Einsatzbedingungen entsprechend aufgeheizt wird, aufgebracht.

Die Messung der Verformungen erfolgte über Hilfsrahmen an den zwei Außenseiten 1 und 2 des Speichers in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Außenseite 1 konnte mit lösbaren Seitenwandmodulen durch Verschraubung ausgerüstet werden. Hier wurden die unterschiedlichen Seitenwandmodul-Varianten I, II und III eingefügt. In die Außenseite 2 und 4 waren Seitenwandmodule der Variante I fest eingeklebt. Die Außenseite 3 war mit dem Funktionsmodul für die Mediendurchführungen bestückt und ebenfalls durch Verklebung fest eingebunden.

Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich vom 1. September 2014 bis zum 20. April 2015.

Zu den Seitenwandmodul-Varianten

Die in die Untersuchung des Labor-Wärmespeichers eingesetzten Varianten der Seitenwandmodule sind im Bild 4 des Bildteils im prinzipiellen Querschnitt dargestellt.

Zur besseren Anschaulichkeit werden noch einmal die Details zu den aktuellen Versuchskomponenten zusammengefasst:

Im Unterschied zu dem im Teilbericht 3 untersuchten Wärmespeicher wurde bei der Fertigung des Wärmespeichers auf dem Versuchstand generell ein PUR-Hartschaum mit der Dichte $\rho=0.05\text{g/cm}^3$ anstelle von $\rho=0.033\text{g/cm}^3$ und eine Dicke aller GFK-Mantellamine von $t = 5.5\text{mm}$ anstelle von $t = 4\text{mm}$ für alle Module realisiert. Der Deckel des Mannlochs wurde in Stahl ausgeführt. Der Stahldeckel anstelle des GFK-Deckels hat nur geringe Auswirkungen auf die Verformungen unmittelbar im Mannlochbereich.

Im Seitenwandmodul der Variante I ist der GFK-Modulmantel vollständig mit PUR-Hartschaum gefüllt, der eine Klebverbindung an der ganzen Volumenoberfläche mit dem Mantellaminat eingeht und die Schubsteifigkeit gewährleistet.

In der Seitenwandmodul-Variante II wurde ein zusätzliches GFK- Innenlaminat in 85mm Abstand zum inneren Modulmantel angebracht und mit dem Modulmantel am ganzen Umfang über Verstärkungslagen verbunden. Der dadurch entstehende innere Raum ist mit PUR-Hartschaum gefüllt, der äußere mit zwei Lagen kreuzweise angeordneter Vakuum-Isolationspaneelen mit einer Dicke von je 20mm. Die verbleibenden Hohlräume wurden mit

relativ lockerem Material (Steinwolle) ausgefüllt, da für die Paneele keine Angaben zur Steifigkeit und Festigkeit zur Verfügung standen und die Paneele daher möglichst keiner Beanspruchung während der Verformung des Seitenwandmoduls ausgesetzt werden sollten. In den Berechnungen wurde dieser äußere Raum daher nur als Hohlraum berücksichtigt.

In der Variante III wurden zwei Lagen der Vakuum-Isolationspaneele unterschiedlicher Dicke (20mm und 40mm) kreuzweise etwa mittig in den Mantelraum des Seitenwandmoduls eingelegt. Die verbleibenden Hohlräume sind mit PUR-Hartschaum gefüllt. Eine Klebverbindung zwischen den Paneelen untereinander sowie mit dem Hartschaum besteht nicht. Da keine Angaben für Steifigkeit und Festigkeit der Paneele vorlagen, war diese Variante III einer aussagekräftigen Berechnung nicht zugänglich, sie diente vor allem der wärmetechnischen Beurteilung.

Für die nachfolgenden Darlegungen machten sich die folgenden ergänzenden Berechnungen erforderlich:

- Variante I : LF3, PUR-Hartschaumdichte $\rho=0.05\text{g/cm}^3$ (NISA-File lwsp46.dbs)
- Variante II: LF3, PUR-Hartschaumdichte $\rho=0.05\text{g/cm}^3$ (NISA-File lwsp70.dbs)
- Variante II: LF3, PUR-Hartschaumdichte $\rho=0.033\text{g/cm}^3$ (NISA-File lwsp73.dbs)
- Variante I : LF6, Mantellaminatdicke $t_M = 5.5\text{mm}$ (NISA-File lwsp47.dbs)
- Variante I : LF6, Mantellaminatdicke $t_M = 4.0\text{mm}$ (NISA-File lwsp49.dbs)
- Variante II: LF3, Außentemperatur $T_A = 0^\circ\text{C}$ (NISA-File lwsp74.dbs)

Belastungen und Verformungen

Das Bild 56 des Bildteils zeigt mit den schwarzen Kurven die Füllungszustände des Wärmespeichers für die unterschiedlichen lösbaren Seitenwandmodul-Varianten während des Untersuchungszeitraums vom 1. September 2014 bis zum 20. April 2015. Die Sollfüllung betrug 4m^3 . Bei der Erstfüllung wurde sie jedoch für eine erforderliche Abnahmeprüfung bis zur Erreichung eines Überdrucks von 0.05bar, zusätzlich zum hydro-statischen Wasserdruck, erhöht – ohne Temperaturlast. Die Belastung der lösbaren Variante I erstreckte sich bis zum 05.Januar 2015.

Bis zum 12.Januar 2015 wurde die Ausrüstungsvariante II vorbereitet und danach erprobt sowie überarbeitet. Die Untersuchung erstreckte sich vom 02. Februar bis zum 05. März.

Ab 15. März wurde die Ausrüstungsvariante III einbezogen. Abgeschlossen wurden die Untersuchungen am 20.April 2015.

In das Bild 56 wurden auch die während der Untersuchungen aufgezeichneten Außentemperaturen auf dem Campus der TU Ilmenau, dem Standort des Wärmespeichers, eingetragen. Es ist zu erkennen, dass zumindest ab Dezember bis Ende Februar deutlich niedrigere Temperaturen zu verzeichnen waren, als in den Berechnungen wegen des ursprünglich geplanten Standortes berücksichtigt wurden (20°C). Die maximalen Innentemperaturen des Wärmespeichers erreichten bei allen Varianten ca. 90°C .

Das Bild 57 des Bildteils zeigt den Verlauf der gemessenen maximalen Auslenkungen der festen Seitenwandmodule der Variante I zusammen mit den Füllzuständen. Da während des gesamten Untersuchungszeitraums stets 2 fest eingeklebte Seitenwandmodule der Variante I für die Messung zur Verfügung standen, konnte deren Verformung auch während der gesamten Zeit verfolgt werden. Wesentlich ist, dass die maximale Auslenkung sich offensichtlich asymptotisch einem Langzeitmaximum nähert, welches wahrscheinlich nicht deutlich höher liegt als das hier gemessene.

Die horizontale gestrichelte grüne Linie zeigt das berechnete Langzeitmaximum der Auslenkung der festen Seitenwand von $u_{\max} = 23,08\text{mm}$ für den Lastfall LF3: EG+HWD+T95+ML75 mit der Hartschaumdichte von $\rho=0,033\text{g/cm}^3$ (Teilbericht 3).

Da der hier untersuchte Laborwärmespeicher jedoch mit einer Hartschaumdichte von $\rho = 0,05\text{g/cm}^3$ hergestellt wurde, wurde ergänzend eine Berechnung der Seitenwand-Variante I mit dieser Schaumdichte für den Lastfall LF3 durchgeführt. Das berechnete Langzeitmaximum der Auslenkung beträgt $u_{\max} = 11,22\text{mm}$. Diese Auslenkung wurde mit einer gestrichelten roten Linie eingetragen.

Wie zu erkennen ist, entspricht die gestrichelte grüne Linie für die verwendete PUR-Hartschaumdichte von $\rho=0,033\text{g/cm}^3$ weitgehend den Erwartungen. Die rote Linie für $\rho = 0,05\text{g/cm}^3$ kennzeichnet eine zu hohe Steifigkeit, was ein erster Hinweis darauf ist, dass die geplante Hartschaumdichte von $\rho=0,05\text{g/cm}^3$ bei der Herstellung des untersuchten Laborwärmespeichers möglicherweise nicht erreicht wurde.

Im Bild 58 des Bildteils ist der Verlauf der gemessenen maximalen Auslenkungen der lösbaren Seitenwandmodul-Varianten I, II und III zusammen mit den Füllzuständen des Wärmespeichers dargestellt. Auch hier wurden die Langzeitmaxima für die Auslenkung der Seitenwand-Varianten eingetragen.

Für die Seitenwand-Variante II betragen die für den Lastfall LF3 ergänzend berechneten maximalen Langzeitauslenkungen

- mit der geplanten PUR-Hartschaumdichte $\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$: $u_{\max} = 13,43\text{mm}$
- mit der PUR-Hartschaumdichte $\rho = 0,033\text{g/cm}^3$: $u_{\max} = 27,84\text{mm}$

Die erstere wurde für die Variante II wieder mit einer gestrichelten roten Linie eingetragen, die zweite mit einer grünen.

Auch hier kennzeichnet die rote Linie eine zu hohe Steifigkeit, während die grüne Linie deutlich näher zur gemessenen Kurve liegt. Berücksichtigt man, dass das äußere Mantellaminat des Seitenwandmoduls der Variante II, an der gemessen wurde, nicht wirksam durch die lockere Steinwolle gestützt wird und daher unkontrolliert auslenken kann, erscheint die mit der PUR-Hartschaumdichte $\rho = 0,033\text{g/cm}^3$ berechnete Langzeitauslenkung der Variante II realitätsnäher.

Der Verformungsverlauf der Seitenwand-Variante III kann nicht durch Vergleich mit Berechnungsergebnissen beurteilt werden. Jedoch können vergleichbare Auswirkungen der PUR-Hartschaumdichte angenommen werden.

Nach Abschluss der Messungen wurden bleibende maximale Auslenkungen auf der Innen- und Außenseite der 3 Seitenmodul-Varianten gemessen:

| | Variante I | Variante II | Variante III |
|----------------------------|------------|-------------|--------------|
| Bleibende Auslenkung außen | 8 mm | 16 mm | 5 mm |
| Bleibende Auslenkung innen | 8 mm | 10 mm | 5 mm |

Tabelle 52: Bleibende maximale Auslenkungen

Verformungsmessung der Variante I für den LF: EG+HWD+0.05bar

Die Belastung in dieser Messung entspricht der Abnahmeprüfung. Die Einwirkungszeit ist kurzzeitig und stellt für einen Vergleich mit Berechnungsergebnissen dieses Lastfalls wegen des entfallenden Zeit- und Temperatureinflusses die sicherste Vergleichsvariante dar. Die Verformungsmessungen sind im Bild 59 des Bildteils durch farbige Kurven dargestellt. Für diesen Lastfall wurden 2 konkrete Vergleichsrechnungen mit Kurzzeitkennwerten für alle Materialien durchgeführt. Beide Berechnungen unterscheiden sich nur durch die verwendeten unterschiedlichen Dichten für den PUR-Hartschaum:

$$\rho = 0.033\text{g/cm}^3$$
$$\rho = 0.05\text{ g/cm}^3$$

Die rechnerischen Ergebnisse sind für die festen Seitenwände im Bild 59 durch gestrichelte schwarze Kurven dargestellt.

Wie zu erkennen ist, stimmen die Berechnungsergebnisse für $\rho = 0.033\text{g/cm}^3$ unerwartet gut mit den gemessenen Ergebnissen überein, während die mit $\rho = 0.05\text{ g/cm}^3$ berechneten Ergebnisse deutlich unterhalb der Messergebnisse liegen und eine zu hohe Steifigkeit repräsentieren.

Dieser Vergleich bestätigt die bisherigen Feststellungen, dass die für den untersuchten Laborwärmespeicher geplante Hartschaumdichte von $\rho = 0.05\text{ g/cm}^3$ nicht erreicht wurde.

Bewertung

Alle tragenden Komponenten des Wärmespeichers wurden handwerklich gefertigt, einschließlich der Herstellung des PUR-Hartschaums nach vorgegebener Rezeptur für die vorgesehene Schaumdichte. Dasselbe gilt für die Montage der einzelnen Komponenten zum geschlossenen Speicher. Damit sind Abweichungen von geforderten Sollwerten nicht auszuschließen.

Hinzu kommt, dass deutlich niedrigere Außentemperaturen während des Messzeitraumes zu verzeichnen waren als in der Berechnung berücksichtigt wurden. Das gilt insbesondere für die Messungen ab Dezember 2014.

Aus den Untersuchungen können folgende Feststellungen getroffen werden:

1. Die für den untersuchten Wärmespeicher geplante PUR-Hartschaumdichte von $\rho = 0.05\text{g/cm}^3$ wurde offensichtlich nicht erreicht.
2. Die realisierte PUR-Hartschaumdichte liegt etwa bei $\rho = 0.033\text{g/cm}^3$.
3. Die Auswirkungen unterschiedlicher Hartschaumdichten sind nicht nur vom realisierten Dichtewert abhängig, sondern auch von der jeweiligen Geometrie des vom Hartschaum gefüllten Raumes. Für die Variante II sind sie deutlich größer als für die Variante I.
4. Ergänzende Berechnungen am Beispiel der Variante I mit unterschiedlichen Mantellaminatdicken

$$t_M = 4.0\text{mm}$$

$$t_M = 5.5\text{mm}$$

bei sonst vollständig gleichen Parametern zeigten nur geringe Auswirkungen auf die maximalen Seitenwandverformungen.

5. Eine ergänzende Berechnung am Beispiel der Variante II mit einer Außentemperatur von nur 0°C bei sonst vollständig gleichen Parametern zeigte ebenfalls nur geringe Auswirkungen auf die maximalen Seitenwandverformungen gegen über den Ergebnissen mit einer Außentemperatur von 20°C
6. Wie der Tabelle 52 zu entnehmen ist, sind infolge der Belastungen plastische Verformungen zu verzeichnen. Die bisherigen Entlastungsphasen führten nicht

zur vollständigen Rückverformung – eine natürliche Erscheinung bei viskoelastischen Materialien.

Schlussfolgerungen:

Die PUR-Hartschaumdichte hat erwartungsgemäß den größten Einfluss auf die Verformungen des Wärmespeichers und indirekt damit auch auf die Beanspruchung anderer beteiligter Komponenten. Der Gewährleistung der geplanten Dichte bei der Herstellung ist von vorrangiger Bedeutung.

Bei einer Einbeziehung von Vakuum-Isolationspaneelen in den Wandaufbau eines Wärmespeichers ist das nur mit bekannten Steifigkeits- und Festigkeitskennwerten für diese Paneele statisch kontrollierbar.

Die festgestellten plastischen Verformungen der Seitenwandmodul-Varianten machen deutlich, dass bei Langzeitbelastungen - auch bei zwischenzeitlichen Entlastungen - bleibende Verformungen zu erwarten sind.

Die durchgeführten Messungen des Verformungsverhaltens des 4m³ Labor-Wärmespeichers ergeben, dass dieses durch Berechnungen zutreffend beschrieben werden kann, wenn realistische Materialparameter für alle beteiligten Komponenten zur Verfügung stehen und die realisierten geometrischen Parameter des Objektes hinreichend durch die Berechnung erfasst werden. Letzteres scheint gegeben.

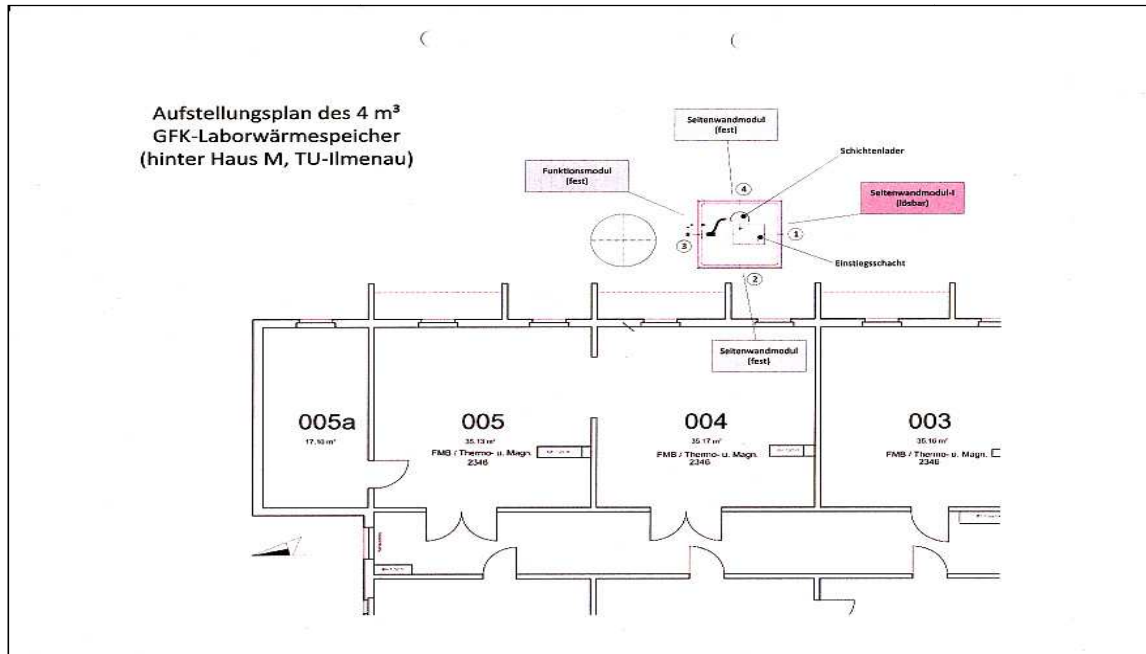


Bild 53 Aufstellort und Ausrichtung des Wärmespeichers (Quelle: TU I)

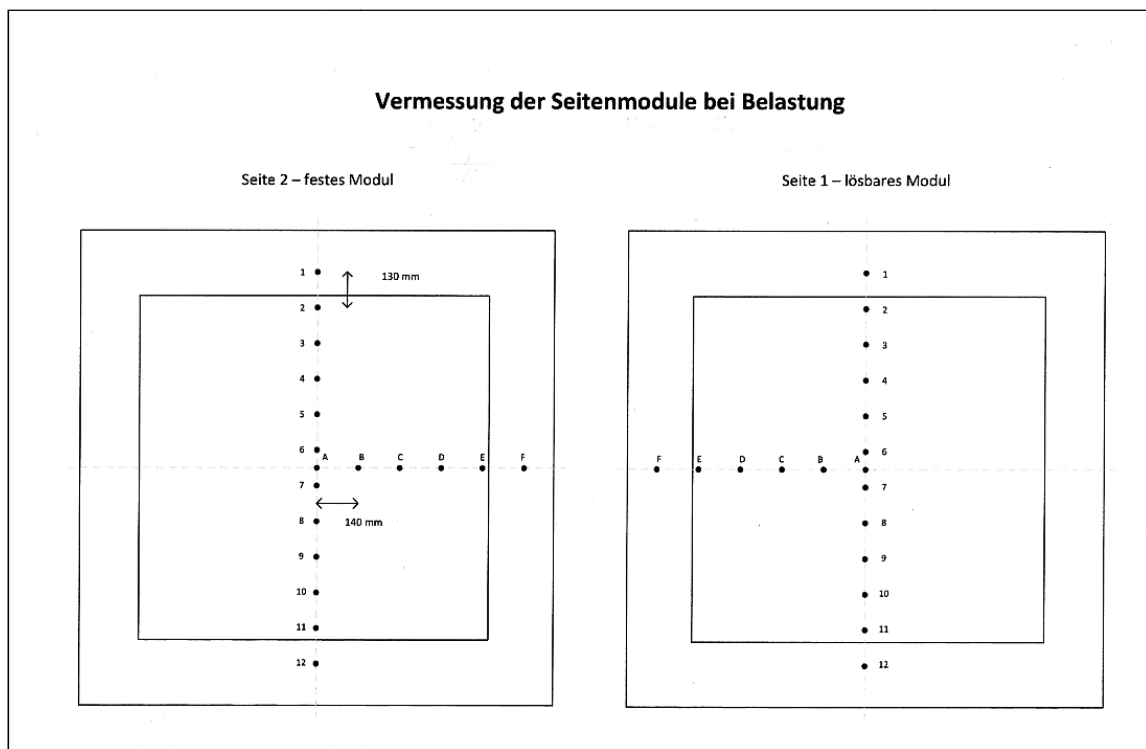


Bild 54 Messpunkte auf zwei Seitenwänden des Wärmespeichers

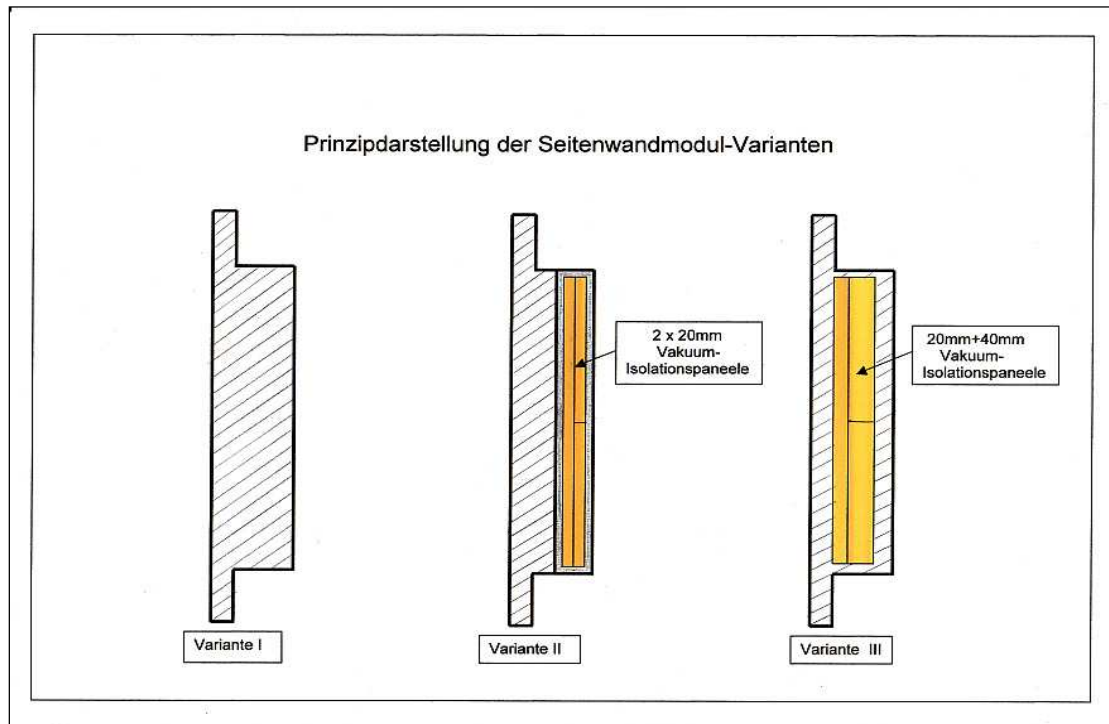


Bild 55 Seitenwandmodul-Varianten I, II und III

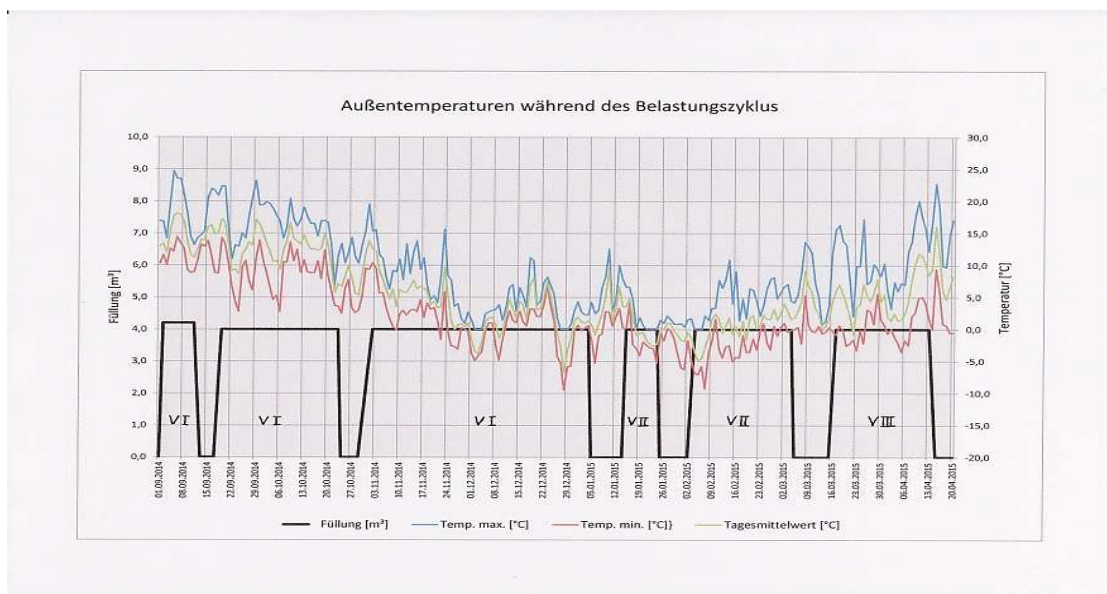


Bild 56 Außentemperaturen während der Wärmespeicher-Belastung und Messung (Quelle: TU I)

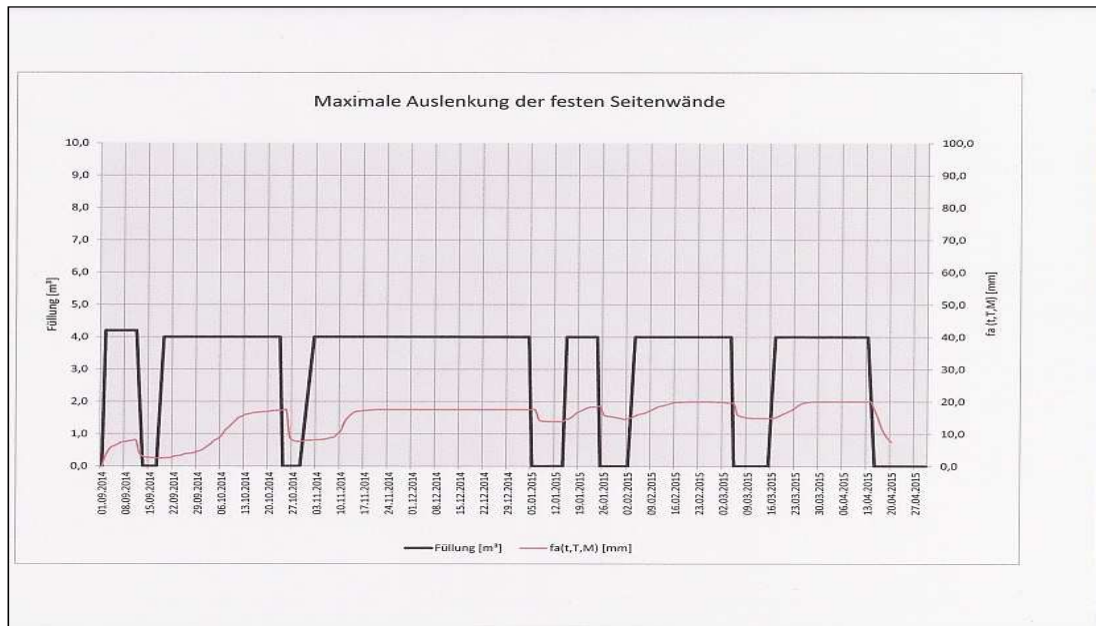


Bild 57 Maximale Auslenkung der festen Seitenwände der Variante I

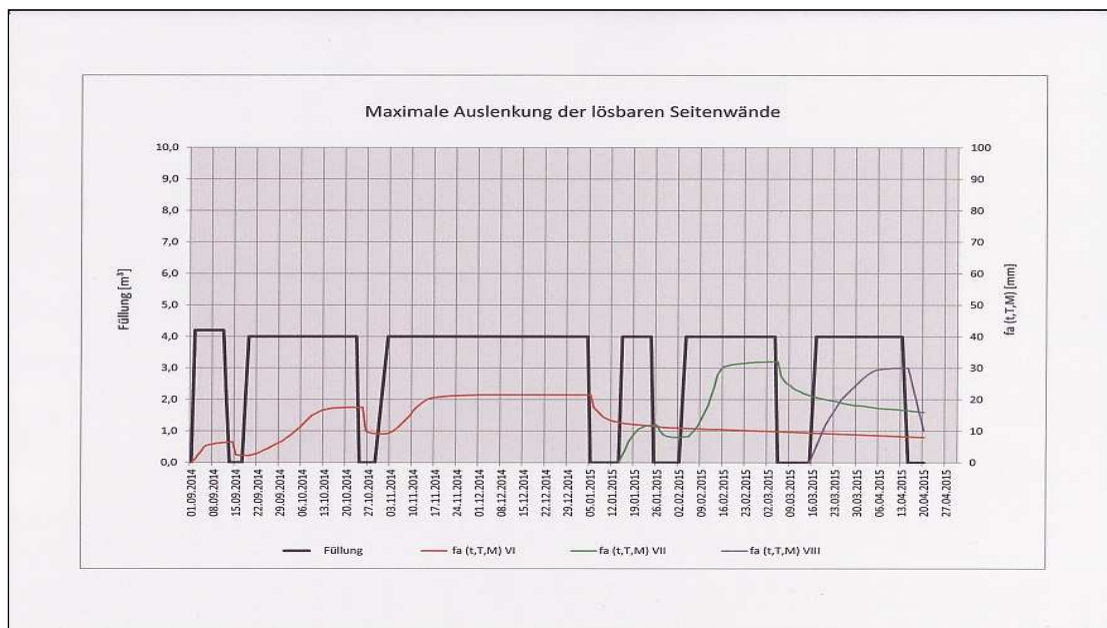


Bild 58 Maximale Auslenkung der lösbaren Seitenwände der Varianten I, II und III

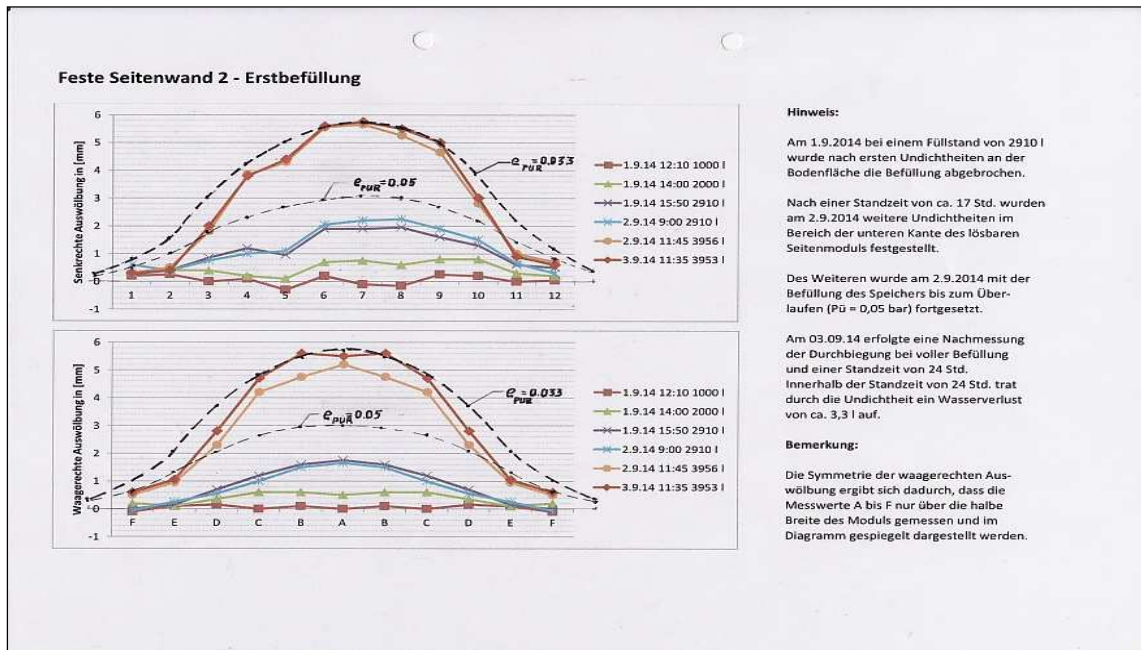


Bild 59 Wärmespeicher Variante I, feste Seitenwand, Belastung: EG+HWD+0.05bar Innendruck, Gestrichelte Linien folgen aus Rechnung.

Verformungen : Vergleich Messung – Rechnung
 Wärmespeicher - Variante 1

Lastfall LF6: EG+HWD+0.05bar Innendruck

Mantel-Laminatdicken: $t = 5.5\text{mm}$

Mannlochdeckel: Stahl

a) PUR-Hartschaum: $\rho = 0.033\text{g/cm}^3$

b) PUR-Hartschaum: $\rho = 0.05\text{g/cm}^3$

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Bauder | Klebharz BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | Stahl |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52×10^{-9} | 0.033×10^{-9} | 1.4×10^{-9} | 1.1×10^{-9} | 0.56×10^{-9} | 7.9×10^{-9} |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E_x [N/mm ²] | 8300 | 6.0 | 4400 | 4300 | 607 | 2.1×10^5 |
| E_y [N/mm ²] | 8300 | 6.0 | 4400 | 4300 | 607 | 2.1×10^5 |
| E_z [N/mm ²] | 3000 | 6.0 | 4400 | 4300 | 219 | 2.1×10^5 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 1378 | 2.3 | 1571 | 1320 | 101 | 0.81×10^5 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 1300 | 2.3 | 1571 | 1320 | 95.1 | 0.81×10^5 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 1300 | 2.3 | 1571 | 1320 | 95.1 | 0.81×10^5 |
| α_x [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 40×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} | 12×10^{-6} |

a) Kurzzeit-Steifigkeitskennwerte für Variante 1 mit $\rho_{\text{PUR}} = 0.033\text{g/cm}^3$

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebharz BÜFA 740-0119 | Reinharz Derakane | GFK-Verst. Derakane. | Stahl |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52×10^{-9} | 0.05×10^{-9} | 1.4×10^{-9} | 1.1×10^{-9} | 0.56×10^{-9} | 7.9×10^{-9} |
| ψ [%] | 40 | - | - | - | 40 | - |
| E_x [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 | 4300 | 607 | 2.1×10^5 |
| E_y [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 | 4300 | 607 | 2.1×10^5 |
| E_z [N/mm ²] | 3000 | 13.75 | 4400 | 4300 | 219 | 2.1×10^5 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.14 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 1378 | 5.29 | 1571 | 1320 | 101 | 0.81×10^5 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1571 | 1320 | 95.1 | 0.81×10^5 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1571 | 1320 | 95.1 | 0.81×10^5 |
| α_x [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 25×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 40×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 40×10^{-6} | 40×10^{-6} | 12×10^{-6} |

b) Kurzzeit-Steifigkeitskennwerte für Variante 1 mit $\rho_{\text{PUR}} = 0.05\text{g/cm}^3$

III. 5. Vorschläge zur Weiterentwicklung

III. 5.1. Projektstudie für einen 3m³ Wärmespeicher

Nach der konstruktiv, rechnerisch und experimentell erfolgreich Ausführung eines 4m³ Laborspeichers stand es an, für einen anwenderfreundlichen kleineren Speicher, Vorschläge zu entwickeln.

Von der Fa. eenergie.depot wurde vorgeschlagen:

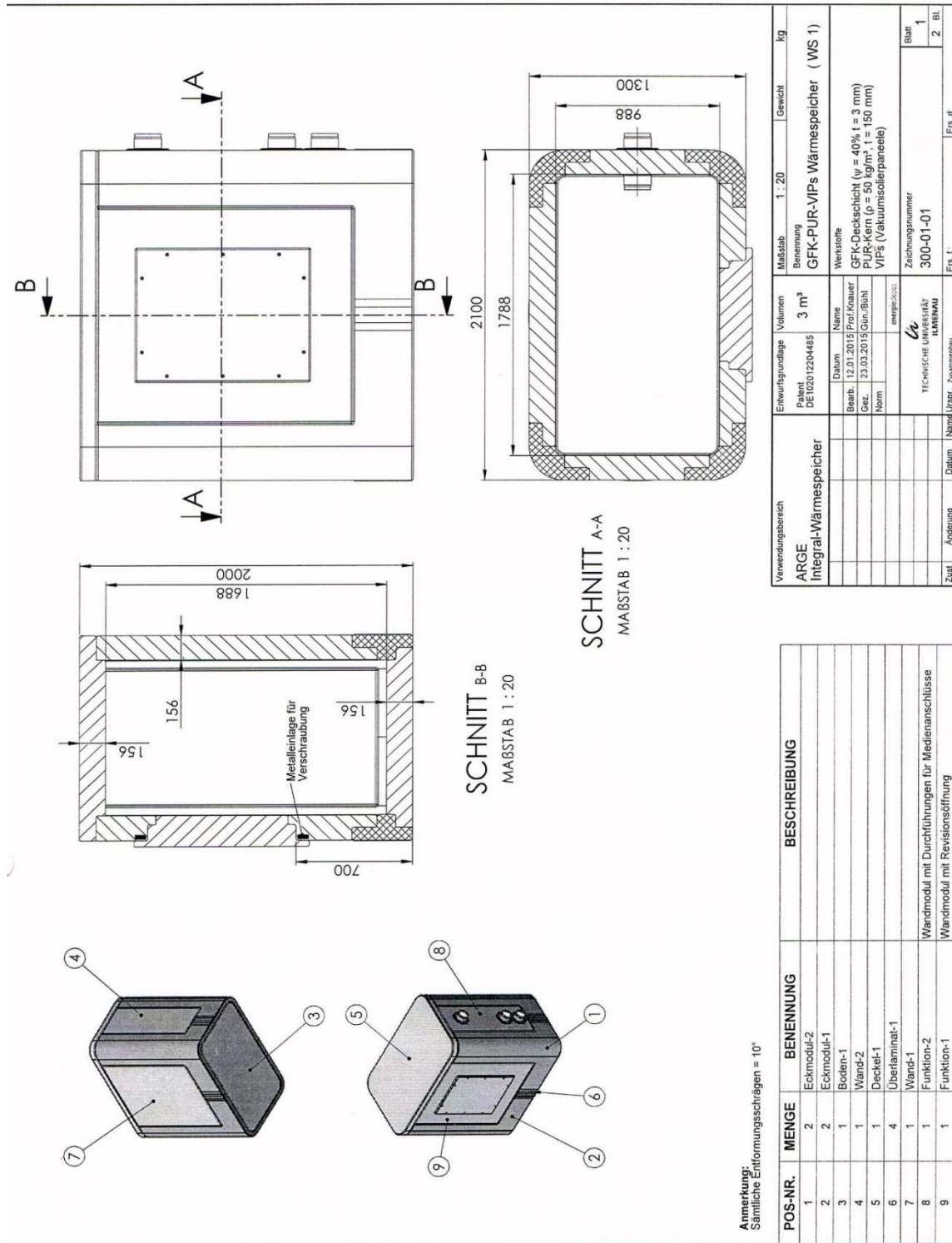
| | |
|------------------|------------------|
| Speichervolumen: | 3 m ³ |
| Gesamtbreite: | 1300 mm |
| Höhe: | 2000 mm |
| Tiefe: | 2100 mm |

Bei den Modulen würden als Neuerung die 8 Eckmodule auf 4 reduziert und dafür das senkrechte Bein entsprechend der Höhenangabe verlängert. Durch die Abkehr von der Würfelform müssten weiterhin geometrisch unterschiedliche Seitenwandmodule A und B eingeführt werden.

Der Domeinstieg sollte (als dritte wesentliche Änderung) auf Grund der normalerweise am Aufstellort nicht vorhandenen freien Höhe auf eine der Seitenwände verlagert werden.

Für die Abdeckung werde zwei Varianten vorgeschlagen.

Auf dieser Basis wurde eine Nachrechnung durchgeführt (Teilbericht 10) und eine Übersichtszeichnung angefertigt (ZN 300 – 01 – 11).



Übersichtszeichnung angefertigt (ZN 300 – 01 – 11).

FEM Teilbericht 9 zum Vorschlag eines 3 m³ Wärmespeichers

Allgemeines/Annahmen

Der Wärmespeicher besteht aus 4 unterschiedlichen Sandwichmodulen aus GFK-Deckschichten mit PUR- Hartschaum- Kernen, die durch Verklebung zu einem kubischen Behälter gefügt werden (Bild 1 des Bildteils).

Die unterschiedlichen Sandwichmodule sind:

- Eckmodule
- Bodenmodul
- Seitenwandmodule
- Abdeckmodule

Die Deckschichten der Sandwichmodule umhüllen die PUR-Hartschaum-Kerne am ganzen Umfang. Sie werden im Folgenden als GFK-Mäntel bezeichnet.

In der Modellbildung des Sandwichbehälters werden geschichtete NKTP32-Schalenelemente für die GFK-Mäntel der Module verwendet. Der PUR-Kern der Sandwichmodule wurde durch NKTP4-Solid-Elemente abgebildet. Die Elemente erlauben beliebige orthotrope Kennwerte für die Materialhauptachsen.

Die Material-Hauptachsenrichtung x in den orthogonalen GFK-Mänteln der Module sind gegenüber den Darstellungen im Teilbericht 1 unverändert: In allen Mantelbereichen verläuft sie horizontal in der Mantelfläche. Die y -Richtung orthogonal dazu ebenfalls in der Mantelfläche. Die z -Richtung steht senkrecht auf der Mantelfläche.

Alle späteren Spannungsangaben zu den GFK-Mänteln beziehen sich auf diese Material-Hauptachsen..

Die Spannungsangaben für alle Solid-Elemente (PUR-Kerne der Module, Klebharzschichten) beziehen sich auf das globale Koordinatensystem des Modells, das jeweils in den Bildern unten rechts dargestellt ist.

Geometrie des 3m³ Wärmespeichers

Außenabmessungen des Behälters: Länge 2100mm, Breite 1300mm, Höhe 2000mm

Füllhöhe: 1700mm

Breite des Flüssigkeitsspiegels: 1000mm

Länge des Flüssigkeitsspiegels: 1800mm

Manteldicke der Sandwichmodule: $t_M = 3\text{mm}$

Maximale Dicke der PUR-Kerne: $t_K = 150\text{mm}$

Dicke der Klebstoffschichten: $t_{KL} = 1.0\text{mm}$

Rundungsradien der Eckmodule: $R_i = 55\text{mm}; R_a = 215\text{mm}$

Eine erste Rechnung mit einer PUR-Hartschaum-Dichte von $\rho=0,033\text{g/cm}^3$ ergab maximale Aufweitungen der Speicherwände von 29.7mm für Langzeitbedingungen, so dass im Folgenden mit einer PUR-Hartschaum-Dichte von $\rho=0,05\text{g/cm}^3$ gerechnet wurde.

Materialkennwerte des 3m³ Wärmespeichers

Für jedes Material sind 13 Materialkennwerte und 9 Festigkeitswerte erforderlich. Für die Ermittlung der Kennwerte, welche die Langzeiteinwirkungen berücksichtigen, werden die in der Tabelle 42 angegebenen Ausgangsdaten verwendet:

Ausgangsdaten (Kurzzeitkennwerte)

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR- Hartschaum Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-0119 |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52x10 ⁻⁹ | 0.05x10 ⁻⁹ | 1.02x10 ⁻⁹ |
| ψ [%] | 40 | - | - |
| E_x [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 |
| E_y [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 |
| E_z [N/mm ²] | 3000 | 13.75 | 4400 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 1378 | 5.29 | 1570 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1570 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1570 |
| α_x [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ |
| α_y [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ |
| α_z [K ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ |
| F_{xc} [N/mm ²] | 160 | 0.35 | 40 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 145 | 0.45 | 40 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 160 | 0.35 | 40 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 145 | 0.45 | 40 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 60 | 0.35 | 40 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 60 | 0.45 | 40 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 38 | 0.25 | 11 |
| F_{syz} [N/mm ²] | 26 | 0.25 | 11 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 26 | 0.25 | 11 |

Tabelle 42 Kurzzeit-Kennwerte für die Materialhauptachsen

Die Kennwerte unterhalb der leeren Zeile der Tabelle 42 sind die Materialfestigkeiten:
 F_{xc} , F_{xt} , F_{yc} , F_{yt} , F_{zc} , F_{zt} : Druck-/ Zugfestigkeiten in Richtung der Materialhauptachsen
 F_{sxy} , F_{syz} , F_{sxz} : Scherfestigkeiten bezüglich der Materialhauptachsen

Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen

Als Abminderungsfaktoren für die Steifigkeitskennwerte werden verwendet:

| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-0119 |
|---|-----------------|----------------------|----------------------------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.6 | 3.4 | 1.6 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.8 | 2.0 | 3.0 |
| $\Pi_{t,E}$ | 2.88 | 6.8 | 4.8 |

Tabelle 43: Abminderungsfaktoren für die Materialsteifigkeiten

Als Abminderungsfaktoren für die Festigkeiten werden verwendet:

| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-0119 |
|---|-----------------|----------------------|----------------------------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.8 | 2.0 | 1.6 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| Medieneinfluss | 1.0 | 1.2 | 1.2 |
| Verarbeitungseinfluss | 1.2 | 1.2 | 1.4 |
| Sicherheit | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| $\Pi_{t,F}$ | 4.86 | 8.64 | 12.1 |

Tabelle 44: Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten

Die Abminderungsfaktoren wurden entsprechend TB 4 festgelegt. Eine Ausnahme bildet der Abminderungsfaktor für den Zeiteinfluss auf den PUR Hartschaum. Dieser Abminderungsfaktor wurde in Anlehnung an die Angabe in DIN EN 14509, Anhang E, Abschnitt E.7.6 festgelegt.

Die nachfolgende Tabelle 45 gibt die verwendeten Langzeitkennwerte der im Wärmespeicher eingesetzten Materialien für den Lastfall LF3 wieder:

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-0119 |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52×10^{-9} | 0.05×10^{-9} | 1.4×10^{-9} |
| ψ [%] | 40 | - | - |
| E_x [N/mm ²] | 2882 | 2.0 | 917 |
| E_y [N/mm ²] | 2882 | 2.0 | 917 |
| E_z [N/mm ²] | 1041 | 2.0 | 917 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 478 | 0.78 | 327.5 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 451 | 0.78 | 327.5 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 451 | 0.78 | 327.5 |
| α_x [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 40×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} |
| F_{xc} [N/mm ²] | 33 | 0.041 | 3.31 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 30 | 0.052 | 3.31 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 33 | 0.041 | 3.31 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 30 | 0.052 | 3.31 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 12 | 0.41 | 3.31 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 12 | 0.052 | 3.31 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 8 | 0.029 | 0.91 |
| F_{syx} [N/mm ²] | 5 | 0.029 | 0.91 |
| F_{syz} [N/mm ²] | 5 | 0.029 | 0.91 |

Tabelle 45: Für den Lastfall LF3 verwendete Langzeitkennwerte

LF3 des jeweiligen Halbmodells sowie den anteiligen Lasten unterworfen und Da für die Beanspruchung der Klebschicht zwischen Boden-/Seitenwandmodul und dem Eckmodul in Dickenrichtung im kompletten Halbmodell keine Aussage gemacht werden kann, wurde ein Modellausschnitt im stärksten Verformungsbereich des Halbmodells entnommen und in diesen reale Klebfugen der Dicke $t = 1\text{mm}$ eingearbeitet (Bild 60 des Bildteils). Dieser Ausschnitt wurde Verformungen aus dem Lastfall berechnet.

Belastung des 3m³ Wärmespeichers

Der Behälter ist innen bis zu einer Füllhöhe von maximal 1.7m mit Wasser gefüllt, was einem hydrostatischen maximalen Wasserdruck von $p=0.017\text{ N/mm}^2$ am Boden des Behälters entspricht, der bis zur Höhe von 1.7m auf Null absinkt. Diese Belastung wurde auf die Innenwände des Behälters aufgebracht.

Das Eigengewicht des Behälters wurde in der Berechnung durch Eingabe der Dichten und einer vertikalen Erdbeschleunigung von $a_z = -9810\text{mm/s}^2$ automatisch berücksichtigt.

Als Temperaturbelastung wurde eine Temperaturdifferenz zwischen Behälterinnenwand und der Außenwand von $\Delta T = 75\text{K}$, folgend aus $T_i=95^\circ\text{C}$ und $T_a=20^\circ\text{C}$, angesetzt.

Berechnung der Beanspruchung des 3m³ Wärmespeichers unter LF3

Es wird der Lastfall LF3 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Verwendung der Langzeitkennwerte der Tabelle 45 betrachtet:

LF3: EG+HWD+T95 NISA-Files : wsp3/31/31a/31b.dps

Die Lastfälle LF1: EG sowie LF2: EG+HWD werden vom Lastfall LF3 mit abgedeckt.

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen und das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

$$E_d / R_d$$

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Der Lastfall LF3 ist eine Lastkombination. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet .

Da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind, (Die Temperatur darf 95°C nicht wesentlich überschreiten, um ein Kochen und erhöhten Dampfdruck zu vermeiden), werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt.

Die Berechnung erfolgt mit dem FEM-Programm NISA von EMRC, Troy, USA.

Ergebnisse des Lastfalls LF3:

In der nachfolgenden Tabelle 46 werden alle aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse dargestellt:

| Komponenten | maximale Verformungen | | |
|--|-----------------------|----------------------|-----------------------------|
| $\max u_x $ [mm] | 5.97 / -5.65 | | |
| $\max u_y $ [mm] | 0.05 / -13.31 | | |
| $\max u_z $ [mm] | 1.45 / -2.31 | | |
| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-01190 |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 7.99 | -0.056 | -5.27 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | -8.52 | -0.071 | -5.15 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | -0.078 | -5.42 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | 2.67 | -0.047 | 0.06 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.041 | -0.30 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.031 | -1.41 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.003652 | -0.04478 | 0.007274 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | 0.002919 | -0.05602 | 0.001892 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.02218 | 0.007108 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.005581 | -0.08907 | -0.000176 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.08439 | -0.000969 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.06533 | -0.002008 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.27 | 1.37 | 1.59 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.26 | 1.73 | 1.56 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.90 | 1.64 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.33 | 1.62 | 0.07 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 1.41 | 0.33 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.07 | 1.55 |

Tabelle 46: Ergebnisse des Lastfalls LF3

Hervorzuheben ist die geringe Aufweitung des Speichers von $\max u_x = 5.97\text{mm}$ bzw. $\max u_y = -13.31\text{mm}$. Sie liegt damit bei maximal $0.0063 \approx 1/150$ der Spannweite.

Bild 61 des Bildteils zeigt die resultante Verformung des Speichers ohne Abdeckungen. Die Aufweitungen am oberen Rand betragen beim voll gefüllten Speicher in diesem Fall :

$$\begin{aligned} \max u_x &= 0.22\text{mm} / -0.23\text{mm} \\ \max u_y &= 0.00\text{mm} / -6.60\text{mm} \end{aligned}$$

Die resultanten Verformungen des geschlossenen Speichers sind im Bild 62 und 63 dargestellt. Jetzt betragen die maximalen Randverformungen des Speichers:

$$\begin{aligned} \max u_x &= 0.8\text{mm} / -0.8\text{mm} \\ \max u_y &= 0.00\text{mm} / -0.75\text{mm} \end{aligned}$$

Die beiden Abdeckmodule wurden an den aufliegenden Rändern jeweils an 3 Punkten der Längsseite und jeweils einem Punkt an der Querseite mit dem oberen Rand des Speichers verbunden (Verschraubungen). Die gewählte Spaltbreite zwischen den beiden Abdeckmodulen ist ohne Belang für die Statik.

Die Durchbiegungen der Abdeckmodule betragen $\max u_z = -2.31\text{ mm}$.

Die Auslastung der GFK-Modulmäntel ist gering bis angemessen, sie erfüllt das Bemessungskriterium deutlich. Die Bilder 5 und 6 des Bildteils zeigen beispielhaft die Spannungsverteilungen σ_{xx} und σ_{yy} in den Mänteln.

Die Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} in den GFK-Mänteln der Abdeckmodule sind in den Bildern 64 und 65 des Bildteils dargestellt. Im Bild 65 sind die Verbindungspunkte zum oberen Speicherend an den Spannungsspitzen an der Unterseite des aufliegenden Flansches der Abdeckmodule erkennbar.

Der Tabelle 46 ist zu entnehmen, dass im PUR-Hartschaum und im Klebharz das Bemessungs- Kriterium $E_d / R_d \leq 1$ überschritten wird. Diese Überschreitung der Tragfähigkeitsgrenze liegt jedoch nur in sehr kleinen Bereichen vor. Bild 65 zeigt beispielhaft die σ_{xx} - und σ_{zz} - Spannungen im PUR-Hartschaum. Nur die Bereiche mit Spannungen $>0.052 \text{ N/mm}^2$ bzw. $<0.041 \text{ N/mm}^2$ erfüllen das Kriterium nicht. Diese Überschreitung ist für die Tragfähigkeit der Wärmespeicherkonstruktion als unbedeutend einzuschätzen.

Ähnliches gilt für das Klebharz in den Fugen zwischen den Seitenwand-/Bodenmodulen und den Eckmodulen. Bild 66 zeigt den Modellausschnitt mit der vergrößerten Darstellung der rechten unteren Ecke des Ausschnitts. Der gewählte Grauton dient lediglich zur deutlicheren Hervorhebung der eingefügten Klebfugen.

In den Bildern 70 und 71 des Bildteils sind beispielhaft die Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} im Klebharz der Fugen dargestellt. Bild 70 zeigt eine 90mm lange Überlappung des Seitenwandmoduls mit dem Eckmodul, die einen zur Horizontalen symmetrischen Querschnitt des Eckmoduls ergibt. Im Bild 71 ist diese Überlappungslänge auf 125mm vergrößert. Wie den Darstellungen zu entnehmen ist, wirkt sich die größere Überlappungslänge nur unwesentlich auf die maximalen Spannungen im Klebharz aus, da keine bedeutenden Vertikallasten in den Fugen zu übertragen sind (nur Eigengewicht) und die horizontalen Fugenabschnitte unverändert bleiben.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass der 3m^3 Wärmespeicher in den Lastfällen 1 bis 3 statisch sicher ist. Empfehlenswert ist jedoch eine höhere Festigkeit des Klebharzes. Eine geringere Steifigkeit desselben würde bei gleicher Festigkeit ebenfalls günstigere Ergebnisse liefern.

Berechnung einer 3m³ Variante eines Wärmespeichers

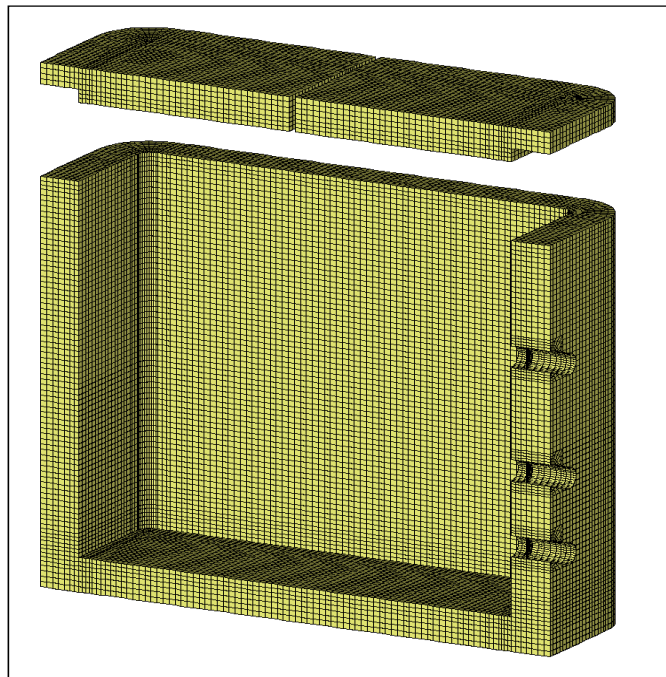


Bild 60 Halbmodell des 3 m³ Wärmespeichers

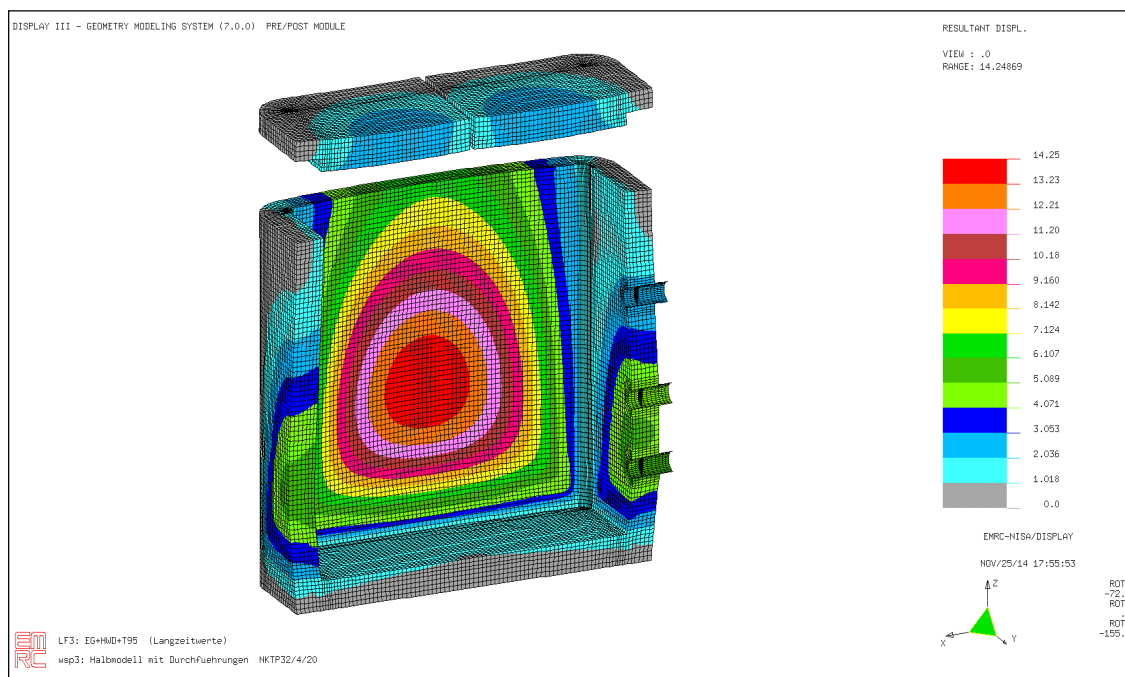


Bild 61 Resultante Verformungen des offenen Speichers. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Darstellung nicht maßstäblich

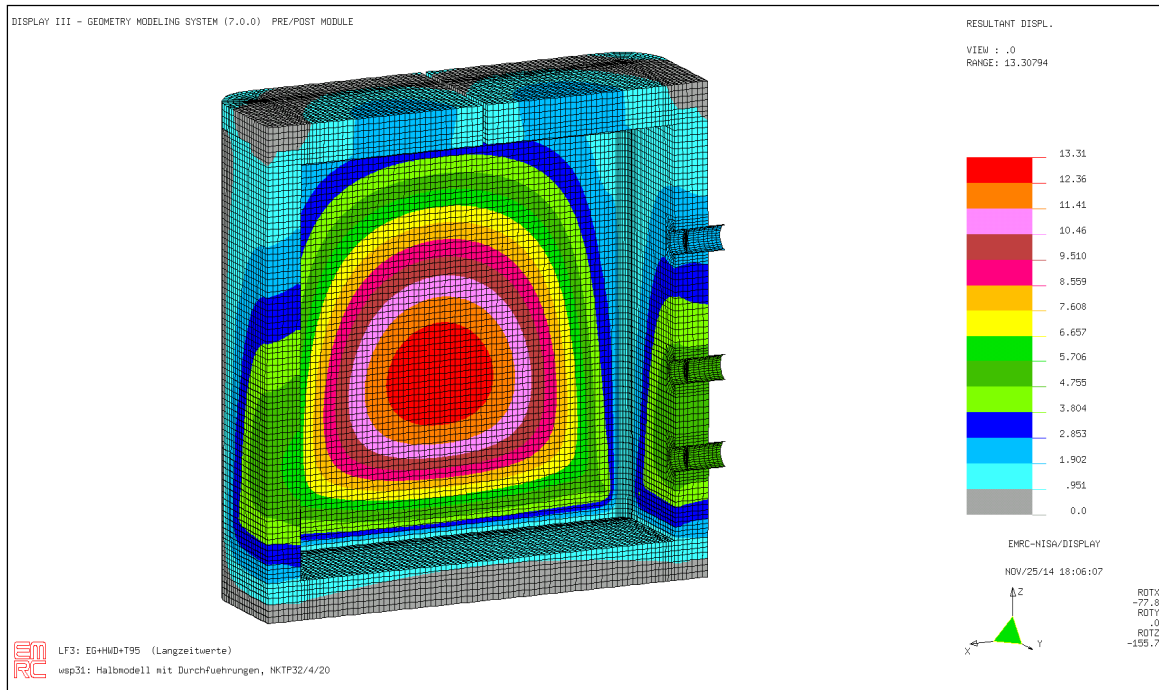


Bild 62 Resultante Verformungen des geschlossenen Speichers. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Darstellung maßstäblich.

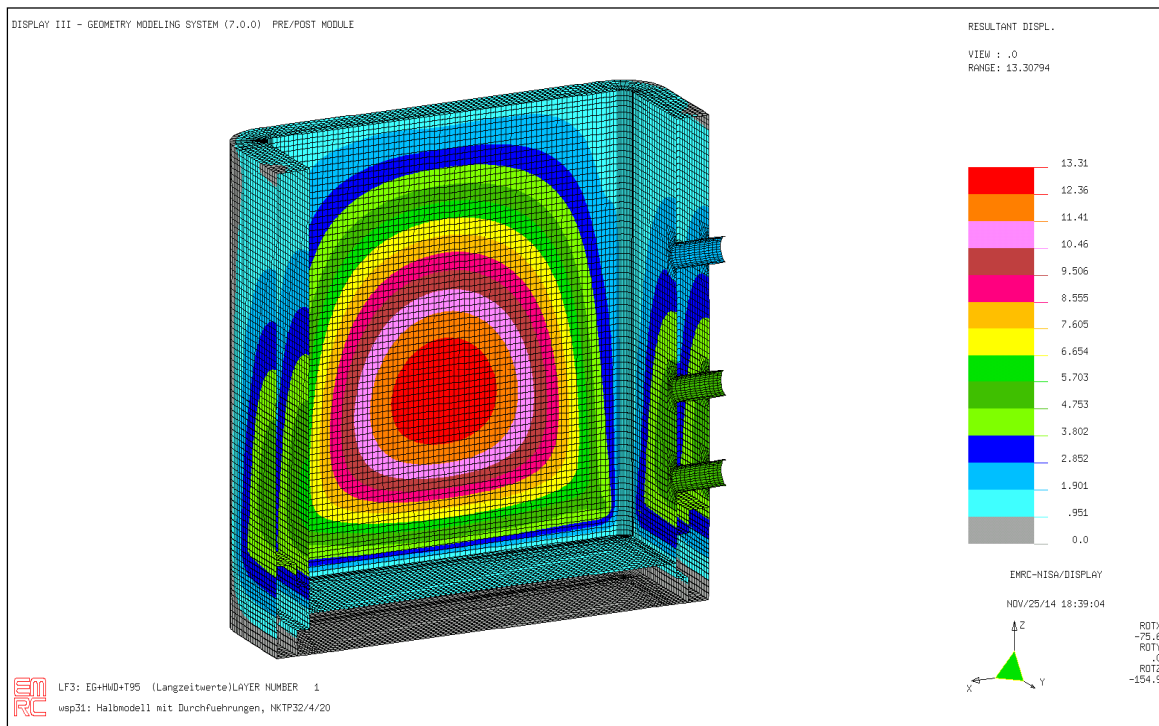


Bild 63 Resultante Verformungen des geschlossenen Speichers ohne die geteilten Abdeckmodule und ohne PUR-Kerne. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Darstellung maßstäblich

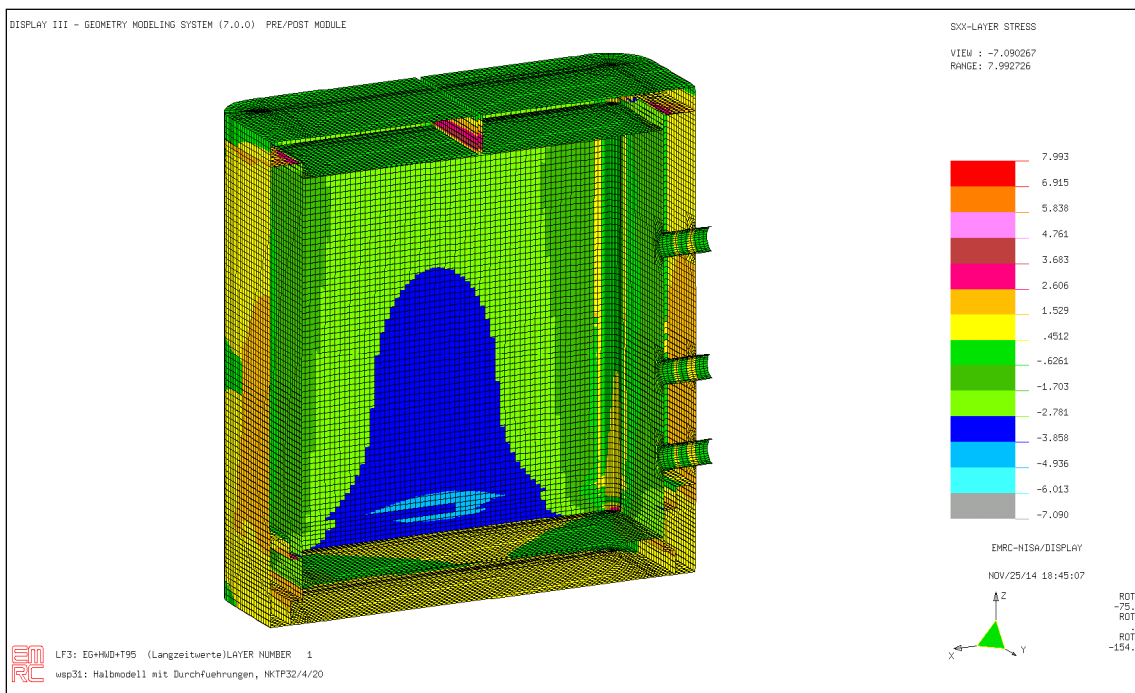


Bild 64 Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall LF3: EG+HWD+T95.

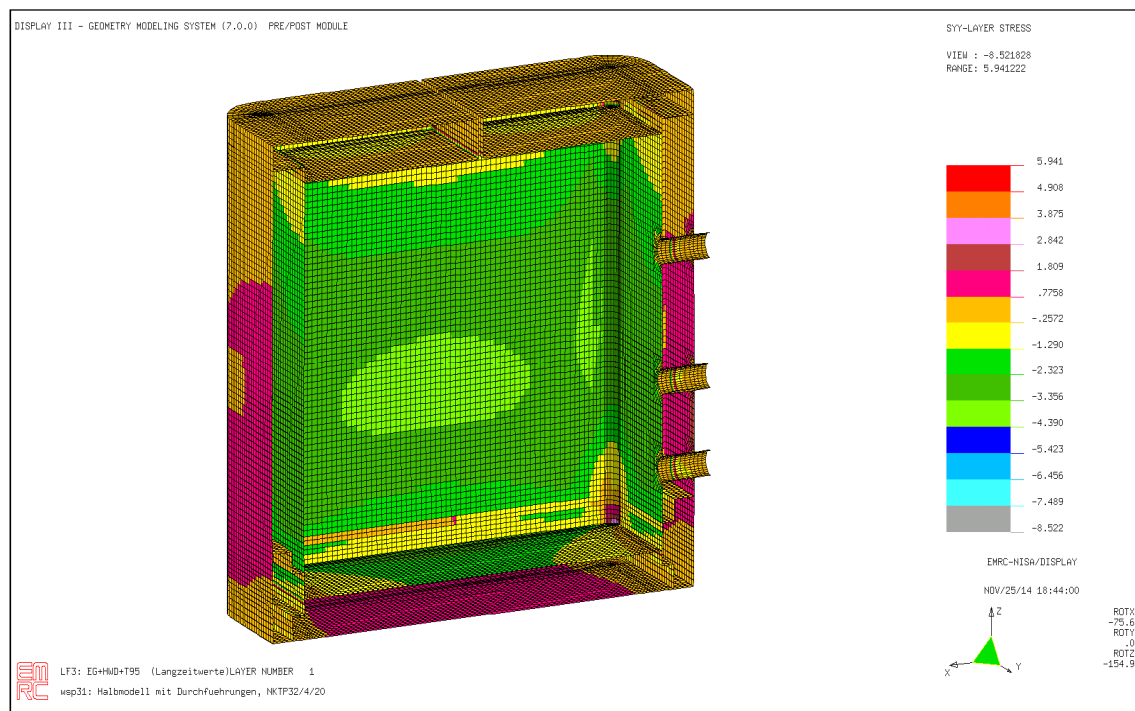


Bild 65 Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall LF3: EG+HWD+T95.

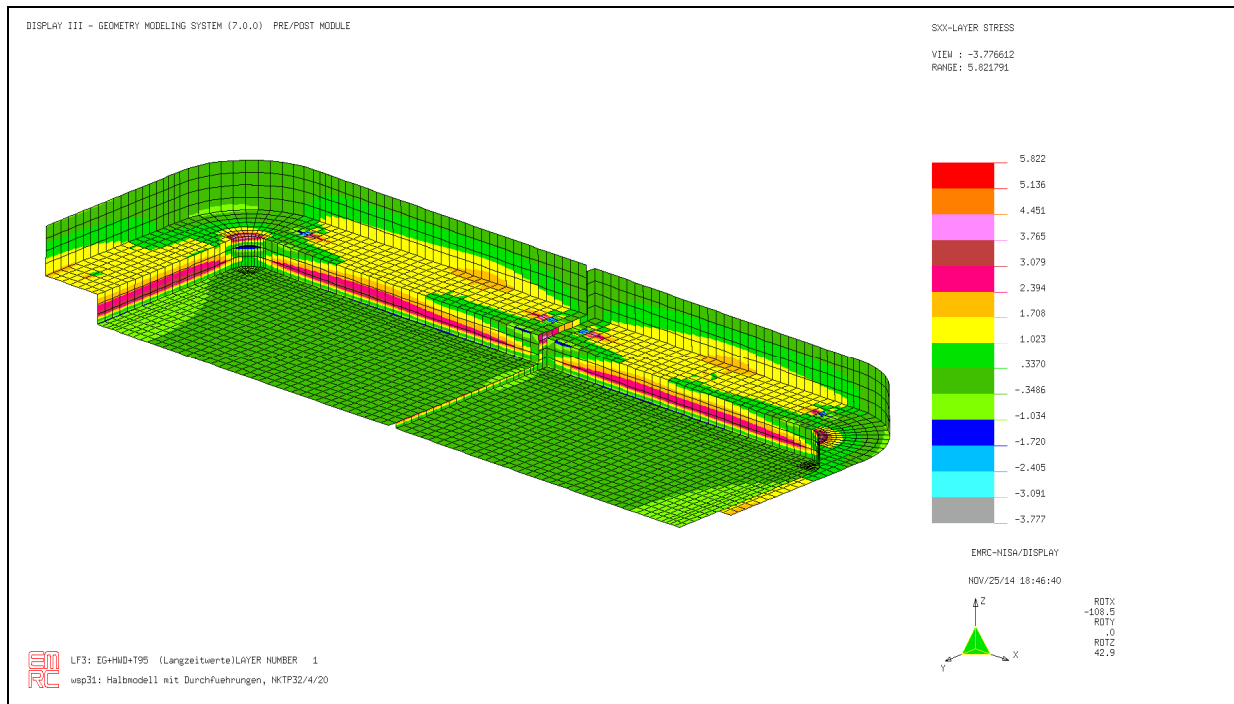


Bild 66 Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Mänteln der Abdeckmodule. Lastfall LF3: EG+HWD+T95.

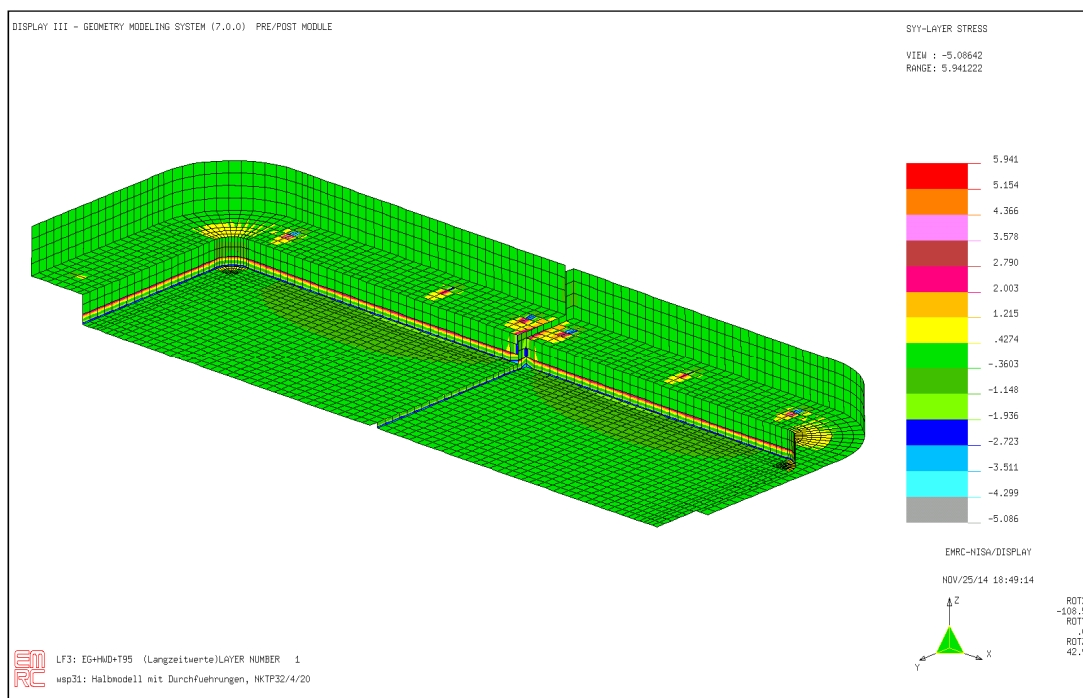


Bild 67 Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den GFK-Mänteln der Abdeckmodule. Lastfall LF3: EG+HWD+T95.

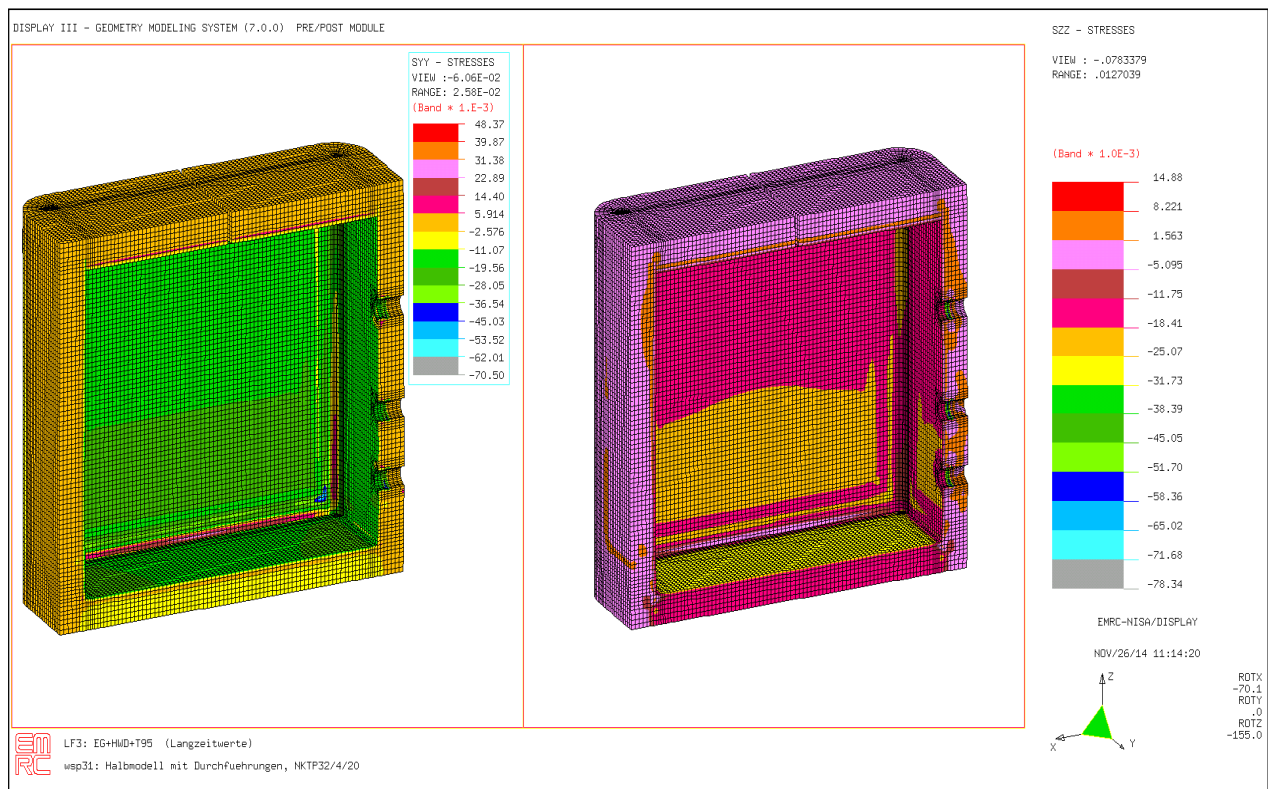


Bild 68 Spannungen σ_{yy} und σ_{zz} [N/mm²] in den PUR-Kernen. Lastfall LF3: EG+HWD+T95.

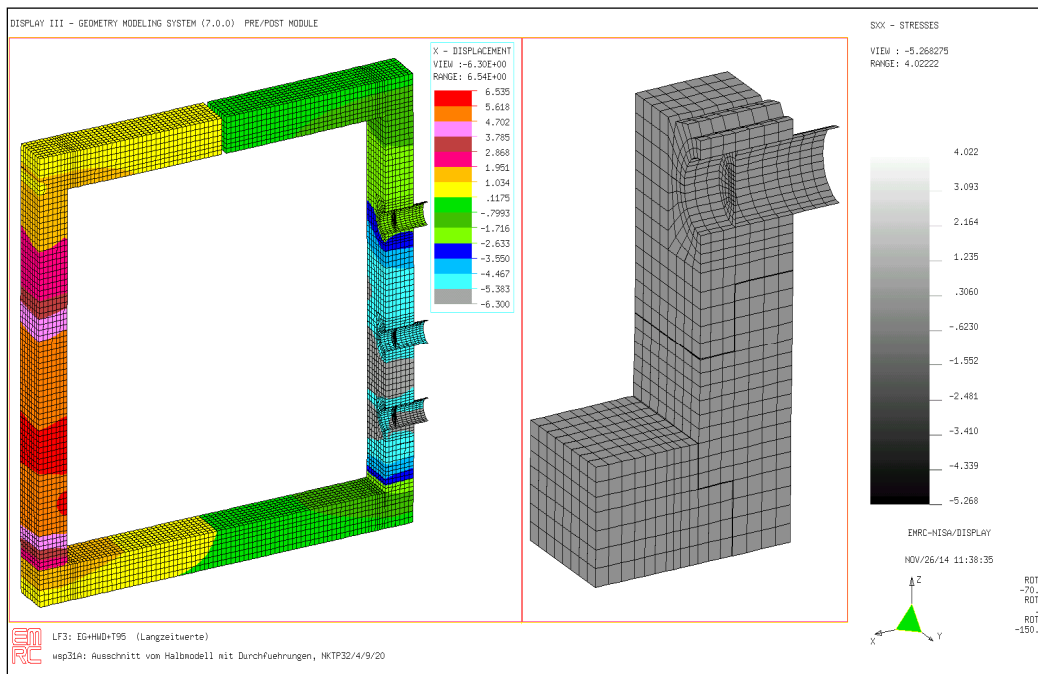


Bild 69 Ausschnitt des Wärmespeichers. Rechts Vergrößerung mit Klebfugen zwischen Seitenwand und Bodenmodul. Lastfall LF3: EG+HWD+T95.

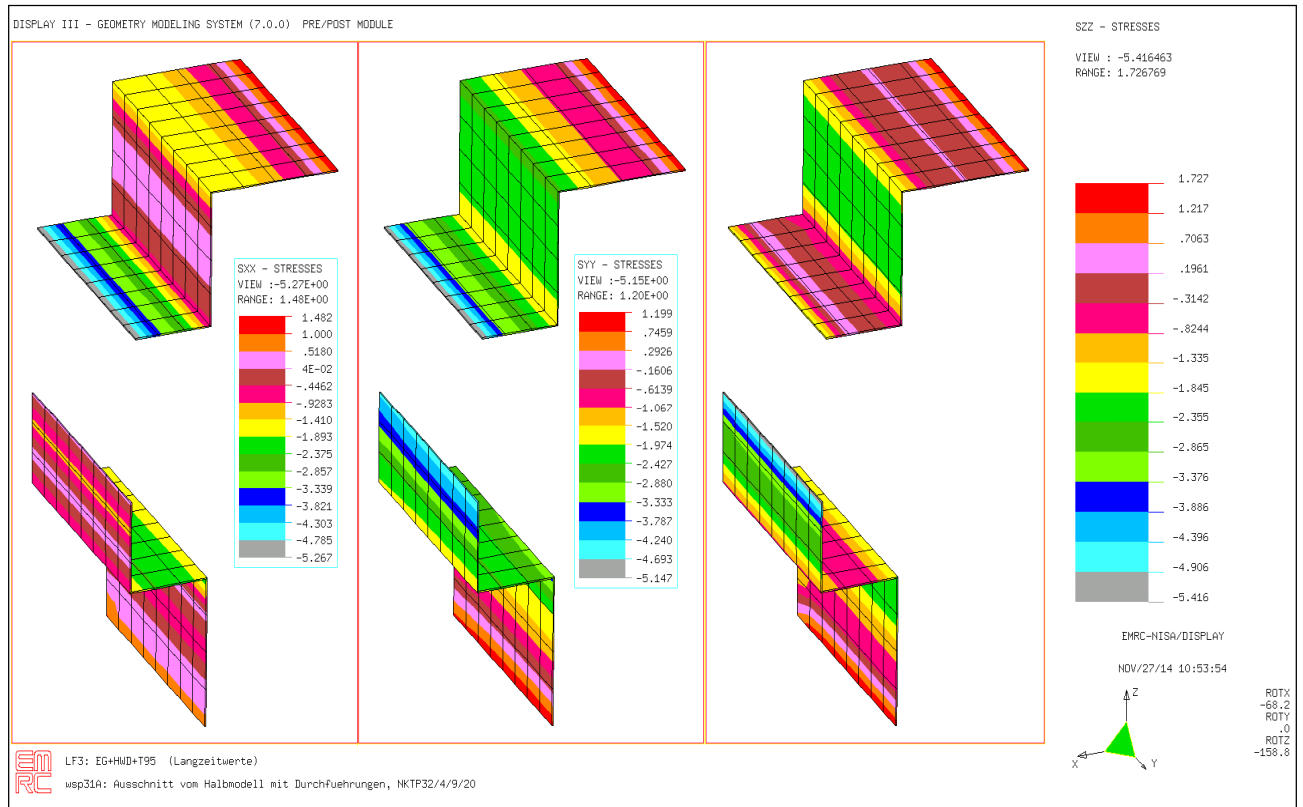


Bild 70 Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} [N/mm²] in den Klebfugen zwischen Seitenwand- und Bodenmodul. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Seitenwandmodul: $l_{ü} = 90\text{mm}$

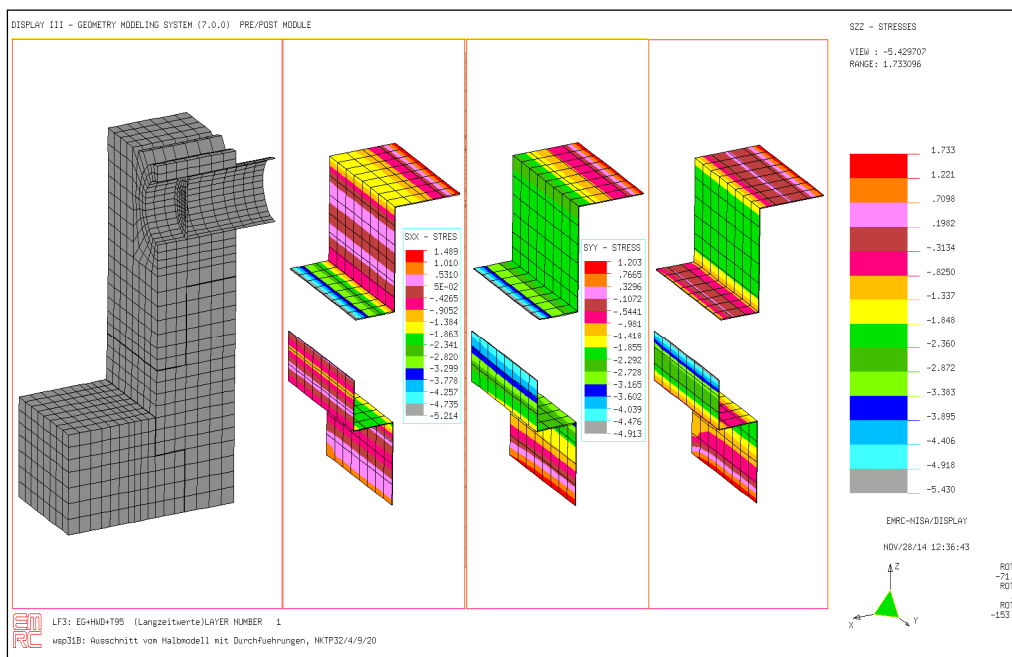


Bild 71 Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz} [N/mm²] in den Klebfugen zwischen Seitenwand- und Bodenmodul. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Seitenwandmodul: $l_{ü} = 125\text{mm}$

III.5.2 Projektstudie zum Vergrößerungspotential bis 20m³ Wärmespeicher

Als sinnvolles Vergrößerungspotential wird der Faktor 5 bis 10 gesehen.

Für die prinzipielle Nutzung von Einzelmodulen der 3m³ Variante z.B. der Eckmodule bei Bedarf an größeren Speichern war es notwendig, die Maßreihe zu verbessern und ein neues Zwischenglied zu entwickeln: den Vierbein – Modul (Abb. 5.3)

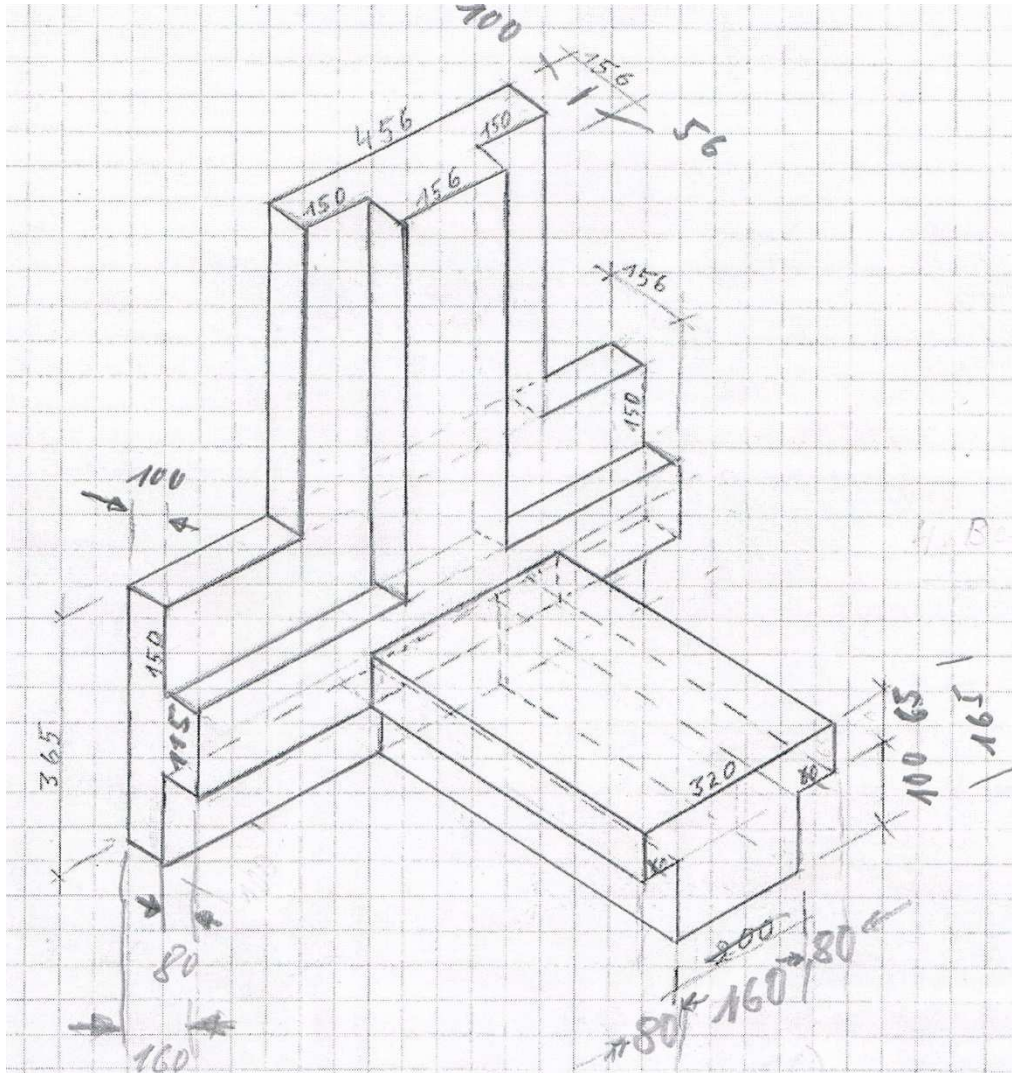


Abb.5.3. Vierbein – Modul als Bindeglied für die Boden- und Seitenwandmoduln

Bei konsequenter Beibehaltung der geometrischen Randbedingungen für Falze, Klebfugen und Modulgrundmaße wurde eine Wärmespeicherserie WS1 ÷ 6 gestaltet, für die sich folgende Abstufungen ergeben:

| Typ | Abmessungen L×B×H Außen Innen | V _{i3} m ³ |
|------|--|-----------------------------------|
| WS 1 | 2100 × 1300 × 2000 1788 × 988 × 1688 | 2,982 |
| WS 2 | 2444 × 2100 × 2000 2132 × 1788 × 1688 | 6,433 |
| WS 3 | 3588 × 2100 × 2000 3276 × 1788 × 1688 | 9,886 |
| WS 4 | 4732 × 2100 × 2000 4420 × 1788 × 1688 | 13,339 |
| WS 5 | 5876 × 2100 × 2000 5564 × 1788 × 1688 | 16,792 |
| WS 6 | 7020 × 2100 × 2000 6708 × 1788 × 1688 | 20,246 |

| | |
|------------|-----------------------|
| | GFK-PIR-Sandwich-VIPs |
| gez. U. W. | Füllvolumen |
| 12.1.2015 | Modulwärmesp. |
| 05 | |

Während bei WS1 zunächst eine übliche runde Revisionsöffnung vorgesehen wurde, kam bei den weiteren Projektierungsarbeiten zur besseren Montagedurchführung ein rechteckiger Einstieg zum Tragen.

Für den Funktionsmodul wurde die prinzipielle Ausführung vom 4m³-Speicher weiter verwandt.

Mit Teilbericht 10 wird die Nachrechnung für WS 6 geliefert. Die Ergebnisse gelten als statisch sicher und zeigen gute Reserven beim Vergrößerungspotential gegenüber WS1.

Mit Zeichnung 300 -01 – 02 ÷ wird die Gesamtübersicht mit WS3 abgeschlossen.

FEM-Teilbericht 10 als 20m³-Wärmespeicher

Allgemeines

Der Wärmespeicher besteht aus 6 unterschiedlichen Sandwichmodulen aus GFK-Deckschichten mit PUR- Hartschaum-Kernen, die durch Verklebung zu einem Behälter gefügt werden. Die stirnseitigen Seitenwandmodule enthalten auf der einen Seite Durchführungsrohre zur Be- und Entladung und auf der gegenüberliegenden Seite eine Revisionsöffnung.

Die unterschiedlichen Sandwichmodule sind:

- Dreibeinmodule (Eckmodule)
- Vierbeinmodule
- Bodenmodule
- Seitenwandmodule
- Abdeckmodule
- Verschlussmodul für die Revisionsöffnung

Die Abdeckmodule und die Verschlussplatte des Verschlussmoduls werden verschraubt.

Die Deckschichten der Sandwichmodule umhüllen die PUR-Hartschaum-Kerne am ganzen Umfang. Sie werden im Folgenden als GFK-Mäntel bezeichnet.

Um die Revisionsöffnung herum wurde das GFK-Mantellaminat des Seitenwandmoduls auf der Außenseite durch eine Laminatmanschette von 2mm Dicke und eine umlaufenden Breite von 125mm verstärkt. Auf der Innenseite wurde ein Stahlrahmen der Dicke $t = 4\text{mm}$ und Breite von 80mm angeordnet.

Da die Seitenwand- und Bodenmodule mit den Dreibein- und Vierbeinmodulen verklebt werden, wurden im Modell die an den Dreibein- und Vierbeinmodulen vorgesehenen Klebflächen mit einer 1mm dicken Klebharzschicht versehen.

In der Modellbildung des Sandwichbehälters werden geschichtete NKTP32-Schalenelemente für die GFK-Mäntel der Module verwendet. Der PUR-Kern der Sandwichmodule sowie der Stahlrahmen um die Revisionsöffnung wurden durch NKTP4-Solid-Elemente abgebildet, die äußere Verschlussplatte des Verschlussmoduls mit NKTP7-Elementen. Die Elemente erlauben beliebige orthotrope Kennwerte für die Materialhauptachsen.

Die Material-Hauptachsenrichtung x in den orthotropen GFK-Mänteln der Module sind gegenüber den Darstellungen im Teilbericht 1 unverändert: In allen Mantelbereichen verläuft sie horizontal in der Mantelfläche. Die y -Richtung orthogonal dazu ebenfalls in der Mantelfläche. Die z -Richtung steht senkrecht auf der Mantelfläche.

Alle späteren Spannungsangaben zu den GFK-Mänteln beziehen sich auf diese Material-Hauptachsen. Die Spannungsangaben für alle Solid-Elemente (PUR-Kerne der Module, Stahlrahmen) beziehen sich auf das globale Koordinatensystem des Modells, das jeweils in den Bildern unten rechts dargestellt ist.

Geometrie des 20 m³ Wärmespeichers

Außenabmessungen des Behälters: Länge 7020mm, Breite 2100mm, Höhe 2000mm

Füllhöhe: 1680mm

Breite des Flüssigkeitsspiegels: 1780mm

Länge des Flüssigkeitsspiegels: 6700mm

Manteldicke der Sandwichmodule: $t_M = 3\text{mm}$

Maximale Dicke der PUR-Kerne: $t_K = 150\text{mm}$

Dicke der Klebharzschichten: $t_{KL} = 1.0\text{mm}$

Dicke des Stahlrahmens: $t_{St} = 4.0\text{mm}$

Dicke der Verschlussplatte: $t_{VP} = 30\text{mm}$

Rundungsradien der Eckmodule: $R_i = 55\text{mm}; R_a = 215\text{mm}$

Materialkennwerte des 20m³ Wärmespeichers

Eine erste Rechnung mit einer PUR-Hartschaum-Dichte von $\rho=0,033\text{g/cm}^3$ ergab maximale Verformungen der Speicherwände von $u_y = -33.35\text{mm}$ für Langzeitbedingungen, so dass im Folgenden mit einer PUR-Hartschaum-Dichte von $\rho=0,05\text{g/cm}^3$ gerechnet wurde.

Für jedes Material sind 13 Materialkennwerte und 9 Festigkeitswerte erforderlich. Für die Ermittlung der Kennwerte, welche die Langzeiteinwirkungen berücksichtigen, werden die in der Tabelle 47 angegebenen Ausgangsdaten verwendet:

Ausgangsdaten (Kurzzeitkennwerte)

| Kennwerte | GFK Derakane | PUR- Hartschaum Lamoltan NG57 | Klebharz BÜFA 740-0119 | Stahl |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| ρ [t/mm ³] | 1.52×10^{-9} | 0.05×10^{-9} | 1.02×10^{-9} | 7.9×10^{-9} |
| ψ [%] | 40 | - | - | - |
| E_x [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 | 210000 |
| E_y [N/mm ²] | 8300 | 13.75 | 4400 | 210000 |
| E_z [N/mm ²] | 3000 | 13.75 | 4400 | 210000 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 1378 | 5.29 | 1570 | 81000 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1570 | 81000 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 1300 | 5.29 | 1570 | 81000 |
| α_x [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| α_y [K ⁻¹] | 25×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| α_z [K ⁻¹] | 40×10^{-6} | 60×10^{-6} | 60×10^{-6} | 12×10^{-6} |
| F_{xc} [N/mm ²] | 160 | 0.35 | 40 | 240 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 145 | 0.45 | 40 | 240 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 160 | 0.35 | 40 | 240 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 145 | 0.45 | 40 | 240 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 60 | 0.35 | 40 | 240 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 60 | 0.45 | 40 | 240 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 38 | 0.25 | 11 | 138 |
| F_{syz} [N/mm ²] | 26 | 0.25 | 11 | 138 |
| F_{syz} [N/mm ²] | 26 | 0.25 | 11 | 138 |

Tabelle 47 Kurzzeit-Kennwerte für die Materialhauptachsen

Die Kennwerte unterhalb der leeren Zeile der Tabelle 42 sind die Materialfestigkeiten:
 F_{xc} , F_{xt} , F_{yc} , F_{yt} , F_{zc} , F_{zt} : Druck-/ Zugfestigkeiten in Richtung der Materialhauptachsen
 F_{sxy} , F_{syz} , F_{sxz} : Scherfestigkeiten bezüglich der Materialhauptachsen

Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen

Als Abminderungsfaktoren für die Steifigkeitskennwerte werden verwendet:

| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebharz BÜFA 740-0119 | Stahl |
|---|-----------------|----------------------|---------------------------|-------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.6 | 3.4 | 1.6 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.8 | 2.0 | 3.0 | 1.0 |
| $\Pi_{t,E}$ | 2.88 | 6.8 | 4.8 | 1.0 |

Tabelle 48: Abminderungsfaktoren für die Materialsteifigkeiten

Als Abminderungsfaktoren für die Festigkeiten werden verwendet:

| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-0119 | Stahl |
|---|-----------------|----------------------|----------------------------|-------|
| Zeiteinfluss 10000 h | 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.0 |
| Temperatureinfluss $T_i \approx 95^\circ\text{C}$ | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 1.0 |
| Medieneinfluss | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.0 |
| Verarbeitungseinfluss | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1.0 |
| Sicherheit | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| $\Pi_{t,F}$ | 4.86 | 8.64 | 12.1 | 1.5 |

Tabelle 49: Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten

Die Abminderungsfaktoren wurden entsprechend TB 1 festgelegt. Eine Ausnahme bildet der Abminderungsfaktor für den Zeiteinfluss auf den PUR Hartschaum. Dieser Abminderungsfaktor wurde in Anlehnung an die Angabe in DIN EN 14509, Anhang E, Abschnitt E.7.6 festgelegt.

Die nachfolgende Tabelle 50 gibt die verwendeten Langzeitkennwerte der im Wärmespeicher eingesetzten Materialien für den Lastfall LF3 wieder:

| Kennwerte | GFK | PUR | Klebharz | Stahl |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | Derakane | Lamoltan NG57 | BÜFA 740-0119 | |
| ρ [t/mm ³] | 1.52x10 ⁻⁹ | 0.05x10 ⁻⁹ | 1.4x10 ⁻⁹ | 7.9x10 ⁻⁹ |
| ψ [%] | 40 | - | - | - |
| E_x [N/mm ²] | 2882 | 2.0 | 917 | 210000 |
| E_y [N/mm ²] | 2882 | 2.0 | 917 | 210000 |
| E_z [N/mm ²] | 1041 | 2.0 | 917 | 210000 |
| ν_{xy} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| ν_{yz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| ν_{xz} [-] | 0.14 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| G_{xy} [N/mm ²] | 478 | 0.78 | 327.5 | 81000 |
| G_{xz} [N/mm ²] | 451 | 0.78 | 327.5 | 81000 |
| G_{yz} [N/mm ²] | 451 | 0.78 | 327.5 | 81000 |
| α_x [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 12x10 ⁻⁶ |
| α_y [K ⁻¹] | 25x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 12x10 ⁻⁶ |
| α_z [K ⁻¹] | 40x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 60x10 ⁻⁶ | 12x10 ⁻⁶ |
| F_{xc} [N/mm ²] | 33 | 0.041 | 3.31 | 160 |
| F_{xt} [N/mm ²] | 30 | 0.052 | 3.31 | 160 |
| F_{yc} [N/mm ²] | 33 | 0.041 | 3.31 | 160 |
| F_{yt} [N/mm ²] | 30 | 0.052 | 3.31 | 160 |
| F_{zc} [N/mm ²] | 12 | 0.041 | 3.31 | 160 |
| F_{zt} [N/mm ²] | 12 | 0.052 | 3.31 | 160 |
| F_{sxy} [N/mm ²] | 8 | 0.029 | 0.91 | 92 |
| F_{syx} [N/mm ²] | 5 | 0.029 | 0.91 | 92 |
| F_{sxz} [N/mm ²] | 5 | 0.029 | 0.91 | 92 |

Tabelle 50: Für den Lastfall LF3 verwendete Langzeitkennwerte

Belastung des 20m³ Wärmespeichers

Der Behälter ist innen bis zu einer Füllhöhe von maximal ca. 1.7m mit Wasser gefüllt, was einem hydrostatischen maximalen Wasserdruck von $p=0.017$ N/mm² am Boden des Behälters entspricht, der bis zur Höhe von 1.7m auf Null absinkt. Diese Belastung wurde auf die Innenwände des Behälters aufgebracht.

Das Eigengewicht des Behälters wurde in der Berechnung durch Eingabe der Dichten und einer vertikalen Erdbeschleunigung von $a_z=-9810$ mm/s² automatisch berücksichtigt.

Als Temperaturbelastung wurde eine Temperaturdifferenz zwischen Behälterinnenwand und der Außenwand von $\Delta T = 75$ K, folgend aus $T_i=95$ °C und $T_a=20$ °C - wie in Prüfhallen üblich - angesetzt.

Berechnung der Beanspruchung des 20m³ Wärmespeichers unter LF3

Berechnet wird je ein Viertelmodell des Wärmespeichers mit entsprechenden Symmetrie-Randbedingungen.

- Viertelmodell mit Revisionsöffnung NISA-File iwsp6.dbs
- Viertelmodell mit Durchführungsrohren NISA-File iwsp8.dbs

Es wird der Lastfall LF3 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Verwendung der Langzeitkennwerte der Tabelle 50 betrachtet:

LF3: EG+HWD+T95 NISA-File: iwsp6.dps

Die Lastfälle LF1: EG sowie LF2: EG+HWD werden vom Lastfall LF3 mit abgedeckt. Die Untersuchung des Lastfalls LF4 mit zusätzlichem innerem Überdruck ist wegen der vorgesehenen Abdeckungsvariante des Wärmespeichers nicht erforderlich.

Berechnet werden Verschiebungen, Dehnungen und Spannungen sowie das für die Beurteilung erforderliche Verhältnis

$$E_d / R_d$$

E_d : Bemessungswert der Beanspruchung

R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes

Für alle Beanspruchungskomponenten der im Wärmespeicher verwendeten Materialien ist $E_d / R_d \leq 1$ zu erreichen.

Der Lastfall LF3 ist eine Lastkombination. Generell werden in den Berechnungen die Kombinationsbeiwerte $\psi = 1.0$ verwendet.

Da die Belastungen des Wärmespeichers sehr eindeutig in ihrer maximalen Höhe sind, (Die Temperatur darf 95°C nicht wesentlich überschreiten, um ein Kochen und erhöhten Dampfdruck zu vermeiden), werden die Lastfaktoren für die Einwirkungen ebenfalls zu $\gamma_F = 1.0$ angesetzt.

Die Berechnung erfolgt mit dem FEM-Programm NISA von EMRC, Troy, USA.

Ergebnisse des Lastfalls LF3:

In der nachfolgenden Tabelle 51 werden alle aus den Berechnungen erhaltenen maximalen Ergebnisse dargestellt:

| Komponenten | Verformungen (Variante mit Revisionsöffng.) | | | Variante mit Durchführungsrohren | |
|--|---|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------|
| $\max u_x $ [mm] | 0.48 / -16.90 | | | 0.39 / -17.30 | |
| $\max u_y $ [mm] | 0.67 / -21.09 | | | 0.11 / -20.80 | |
| $\max u_z $ [mm] | 3.32 / -8.27 | | | 3.69 / -8.27 | |
| | GFK Derakane | PUR Lamoltan NG57 | Klebstoff BÜFA 740-01190 | Verschlussplatt e | Stahl |
| $\max \sigma_{xx} $ [N/mm ²] | 17.94 | 0.052 | -7.06 | 0.59 | -4.51 |
| $\max \sigma_{yy} $ [N/mm ²] | -14.53 | 0.128 | -8.87 | 0.55 | 27.22 |
| $\max \sigma_{zz} $ [N/mm ²] | - | 0.085 | - | 0.92 | 24.87 |
| $\max \sigma_{xy} $ [N/mm ²] | -3.99 | -0.060 | -1.95 | 0.17 | 5.01 |
| $\max \sigma_{yz} $ [N/mm ²] | - | -0.087 | - | -0.27 | 11.68 |
| $\max \sigma_{xz} $ [N/mm ²] | - | -0.036 | - | 0.32 | 3.59 |
| $\max \epsilon_{xx} $ [-] | 0.007329 | 0.03210 | 0.004339 | 0.0001952 | -0.0000672 |
| $\max \epsilon_{yy} $ [-] | -0.005350 | 0.05654 | 0.004895 | 0.0001850 | 0.000107 |
| $\max \epsilon_{zz} $ [-] | - | 0.03371 | - | 0.0008494 | 0.000118 |
| $\max \epsilon_{xy} $ [-] | -0.008353 | -0.07788 | 0.005843 | 0.0003478 | 0.0000621 |
| $\max \epsilon_{yz} $ [-] | - | -0.11027 | - | -0.0006062 | 0.0001445 |
| $\max \epsilon_{xz} $ [-] | - | -0.04722 | - | 0.0007035 | 0.0000444 |
| E_{dx} / R_{dx} | 0.60 | 1.17 | 2.13 | 0.02 | 0.028 |
| E_{dy} / R_{dy} | 0.47 | 2.50 | 2.68 | 0.019 | 0.17 |
| E_{dz} / R_{dz} | - | 1.63 | - | 0.077 | 0.16 |
| E_{dxy} / R_{dxy} | 0.50 | 2.06 | 2.14 | 0.021 | 0.055 |
| E_{dyz} / R_{dyz} | - | 3.00 | - | 0.055 | 0.13 |
| E_{dxz} / R_{dxz} | - | 1.24 | - | 0.064 | 0.039 |

Tabelle 51: Ergebnisse des Lastfalls LF3 für Langzeitkennwerte der Materialien

Die Beanspruchungen im Material der beiden Speicherbereiche unterscheiden sich nur sehr geringfügig, so dass die Ergebnisse des Bereiches mit der Revisionsöffnung als repräsentative Werte in die Tabelle aufgenommen und nachfolgend vorwiegend beispielhaft grafisch dargestellt wurden. Nur die Verformungen (oberen 3 Zeilen) wurden differenziert wiedergegeben, aber auch diese unterscheiden sich nur geringfügig.

Die Bilder 76 und 77 zeigen die resultanten Verformungen $u_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ des Wärmespeichers nicht maßstäblich. In allen folgenden Bildern sind die Verformungen maßstäblich enthalten.

Die Abdeckmodule wurden an den aufliegenden Rändern jeweils an 6 Punkten mit dem oberen Rand des Speichers verbunden (Verschraubungen). Die gewählte Spaltbreite zwischen den beiden Abdeckmodulen ist ohne Belang für die Statik. 6 Punkte wurden wegen der Aufwölbung der Abdeckungen infolge der Temperatur gewählt.

Die maximalen Durchbiegungen der Abdeckmodule betragen $\max u_z = -8.27$ mm.

Die Auslastung der GFK-Modulmängel ist angemessen, sie erfüllt das Bemessungskriterium deutlich. Die Bilder 78 und 79 des Bildteils zeigen beispielhaft die Spannungsverteilungen σ_{xx} und σ_{yy} in den Modulmängeln.

Der Tabelle 51 ist zu entnehmen, dass im PUR-Hartschaum und im Klebharz das Bemessungs-Kriterium $E_d / R_d \leq 1$ überschritten wird. Diese Überschreitung der Tragfähigkeitsgrenze liegt jedoch nur in sehr kleinen Bereichen vor. Die Bilder 80 und 81 zeigen beispielhaft die σ_{yy} - und σ_{yz} - Spannungen im PUR-Hartschaum. Nur die Bereiche mit Spannungen >0.052 N/mm² bzw. <0.041 N/mm² erfüllen das Kriterium nicht. Diese Überschreitungsbereiche sind für die Tragfähigkeit der Wärmespeicherkonstruktion als unbedeutend einzuschätzen. Sie liegen konzentriert im unteren Winkel zwischen den Boden- und Seitenwandmodulen.

Ähnliches gilt für das Klebharz in den Fugen zwischen den Seitenwand-/Bodenmodulen und den Dreibein-/Vierbeinmodulen. Die Bilder 82 und 83 zeigen die Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} in den Klebharzschichten. Die maximalen Spannungen sind jeweils Druckspannungen und treten jeweils in ganz schmalen Bereichen an den Kanten zum Speicherinnenraum auf. Wegen der Abwinkelung der Klebschichten ist kein durchgehender Kraftfluss gegeben, so dass nur eine lokal begrenzter Spannungsabbau und kein Versagen der Klebschicht zu erwarten ist.

Im Bild 84 des Bildteils sind beispielhaft die Spannungen σ_{xx} in den Mantelflächen des Verschlusses der Revisionsöffnung dargestellt. Im linken Teilbild von der Innenseite gesehen, im rechten von der Außenseite betrachtet. Um die Verschlussplatte herum ist die etwas breitere Verstärkungsmanschette mit abgebildet. Die Verschlussplatte selbst ist sehr gering beansprucht (rechtes Teilbild).

Bild 85 zeigt die Spannungen σ_{yy} (horizontal) und σ_{zz} (vertikal) im Stahlrahmen um die Revisionsöffnung im Seitenwandmodul. Die Beanspruchung ist vor allem im unteren Bereich wegen der dort vorliegenden größeren Krümmungen deutlicher, aber gemessen an der Festigkeit des Stahls sehr gering.

Die Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} in den GFK-Mängeln der Abdeckmodule sind in den Bildern 86 und 87 des Bildteils dargestellt. Die Spannungen σ_{xx} sind jeweils horizontal in den Mantelflächen gerichtet, die Spannungen σ_{yy} dazu orthogonal in den Mantelflächen.

Das Bild 88 zeigt die lokalen Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} in den Rohrdurchführungen und im umgebenden PUR-Hartschaum. Sie liegen jeweils unterhalb der Maximalwerte und sind deshalb in der Tabelle 51 nicht enthalten.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass der 20m³ Wärmespeicher mit der hier betrachteten Revisionsöffnung und den Durchführungsrohren für die Lastfälle 1 bis 3 als statisch sicher bewertet werden kann.

Berechnung einer 20m³ Variante des Wärmespeichers

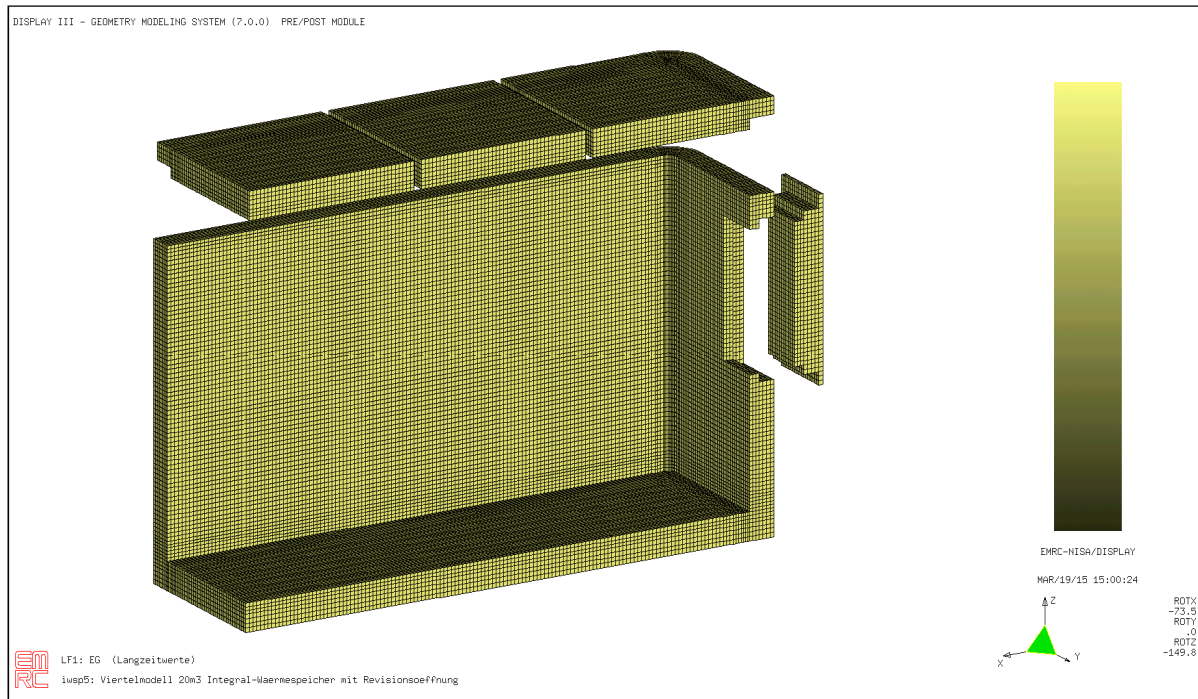


Bild 72 Viertelmodell des 20 m³ Wärmespeichers mit offenen Abdeckungen und offener Revisionsöffnung.

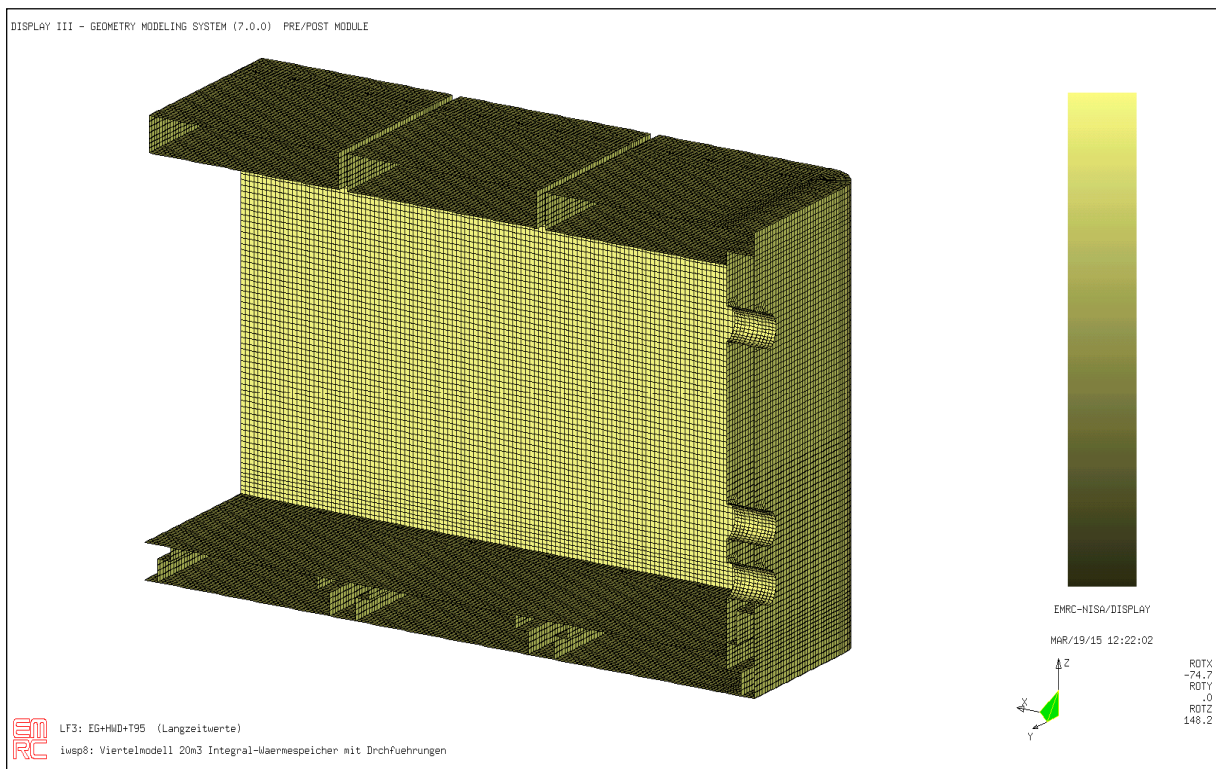


Bild 73 Viertelmodell des 20m³ Wärmespeichers mit geschlossenen Abdeckungen sowie Durchführungen für Be- und Entladung. Darstellung ohne PUR-Hartschaum.

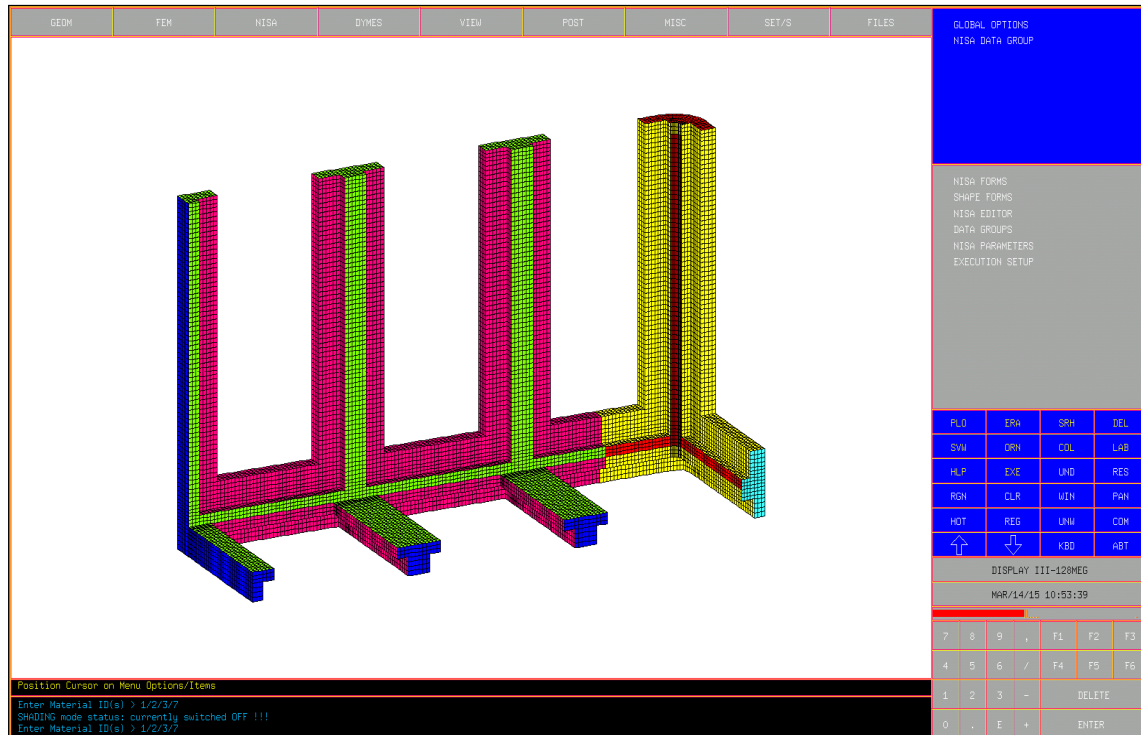


Bild 74 Dreibein- und Vierbein-Module mit PUR-Hartschaum-Füllung

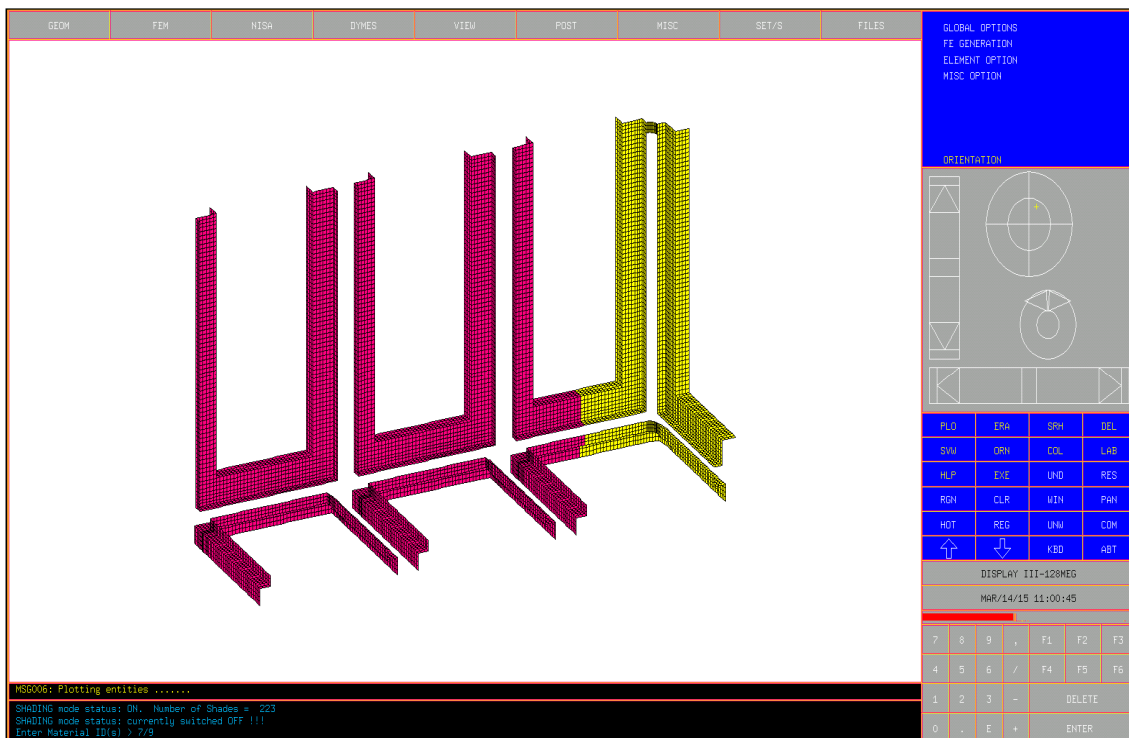


Bild 75 Klebharz-Schichten der Dreibein- und Vierbein-Module zur Verklebung mit den Seitenwand- und Bodenmodulen. Dicke: 1mm

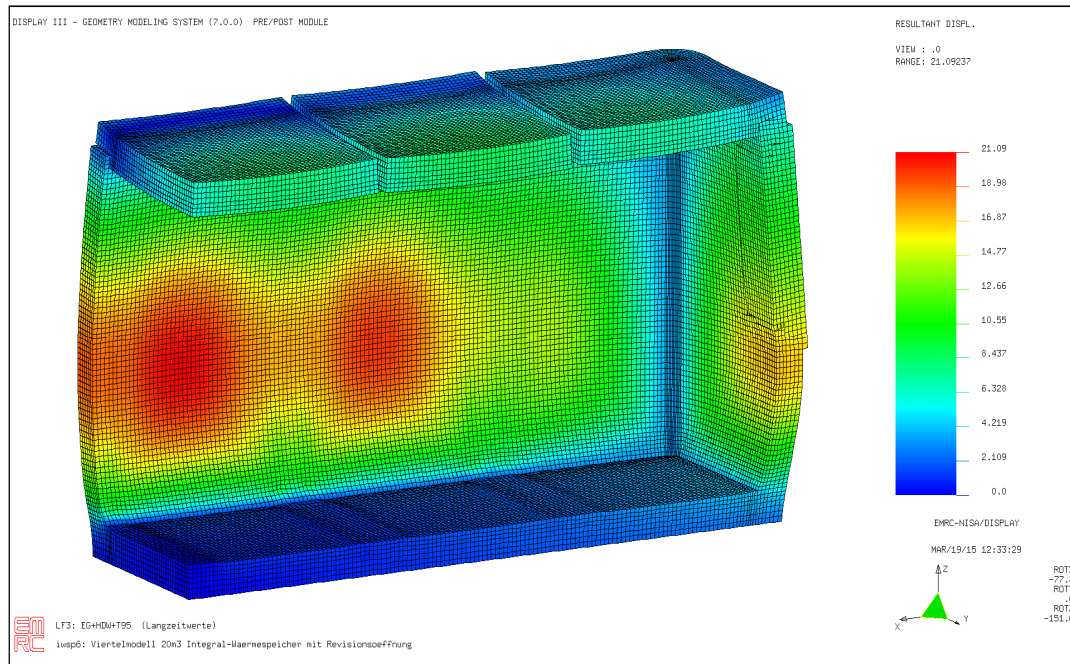


Bild 76 Resultante Verformungen u_R [mm] des Wärmespeichers unter dem Lastfall 3: EG+HWD+T95. Darstellung nicht maßstäblich.

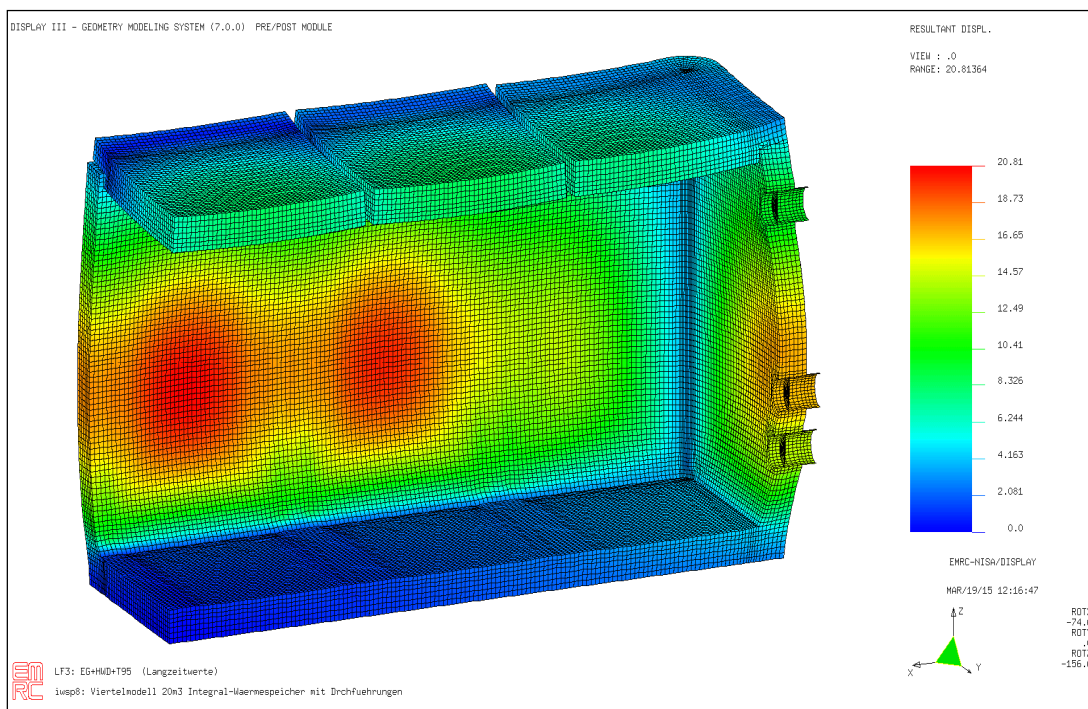


Bild 77 Resultante Verformungen u_R [mm] des Wärmespeichers unter dem Lastfall 3: EG+HWD+T95. Darstellung nicht maßstäblich.

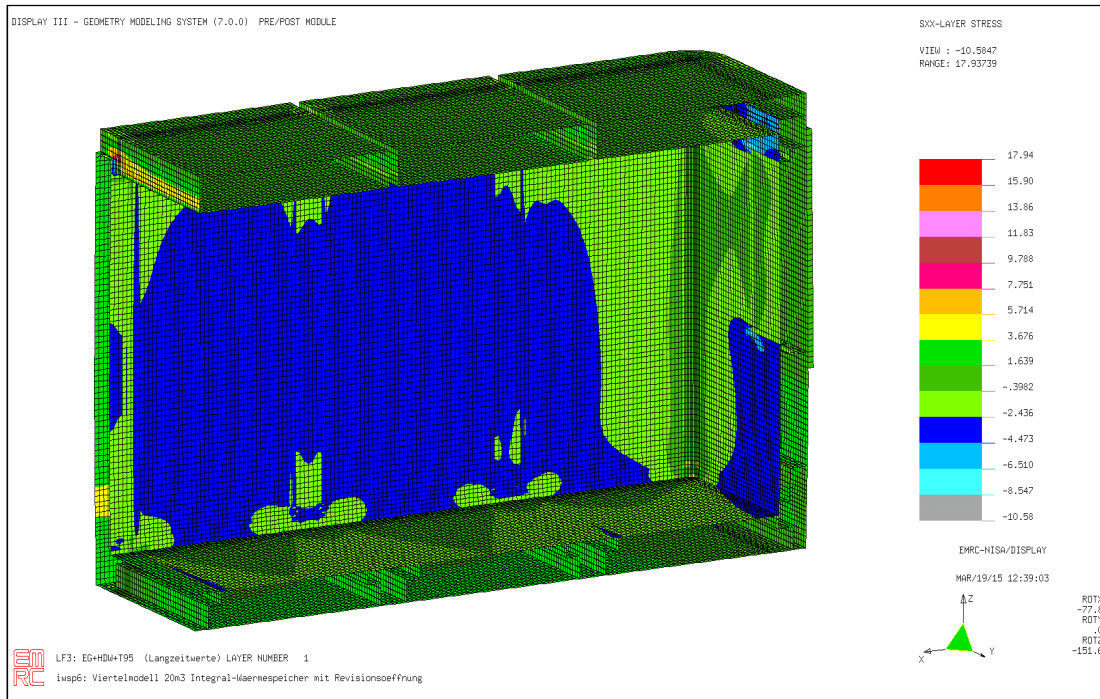


Bild 78 Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

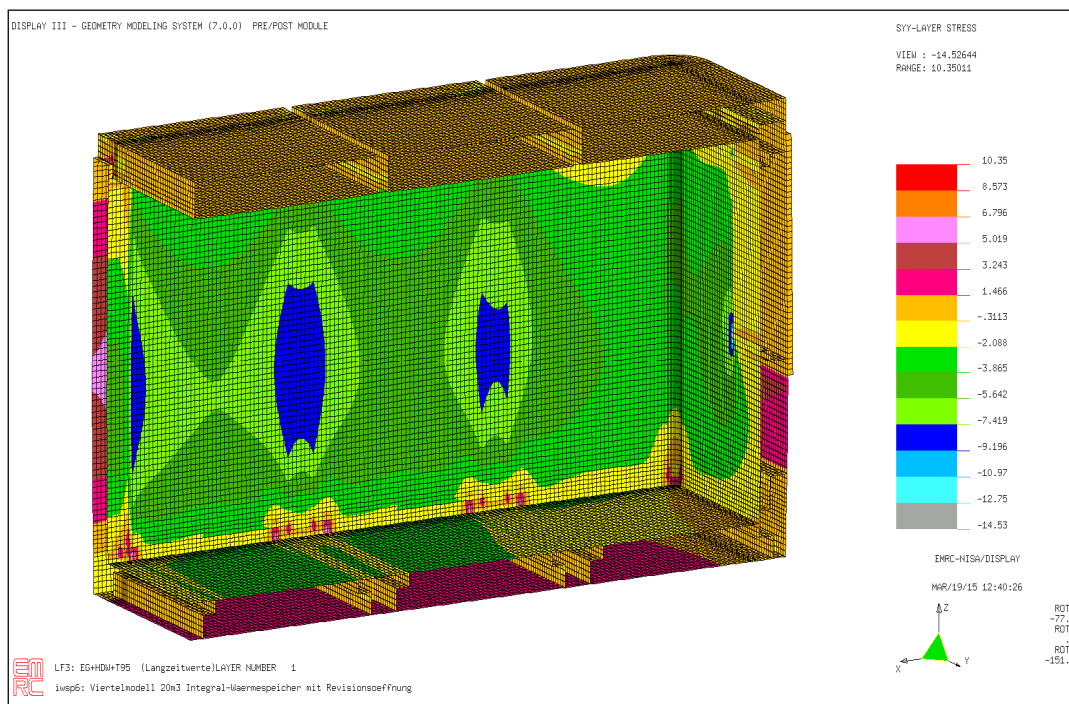


Bild 79 Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

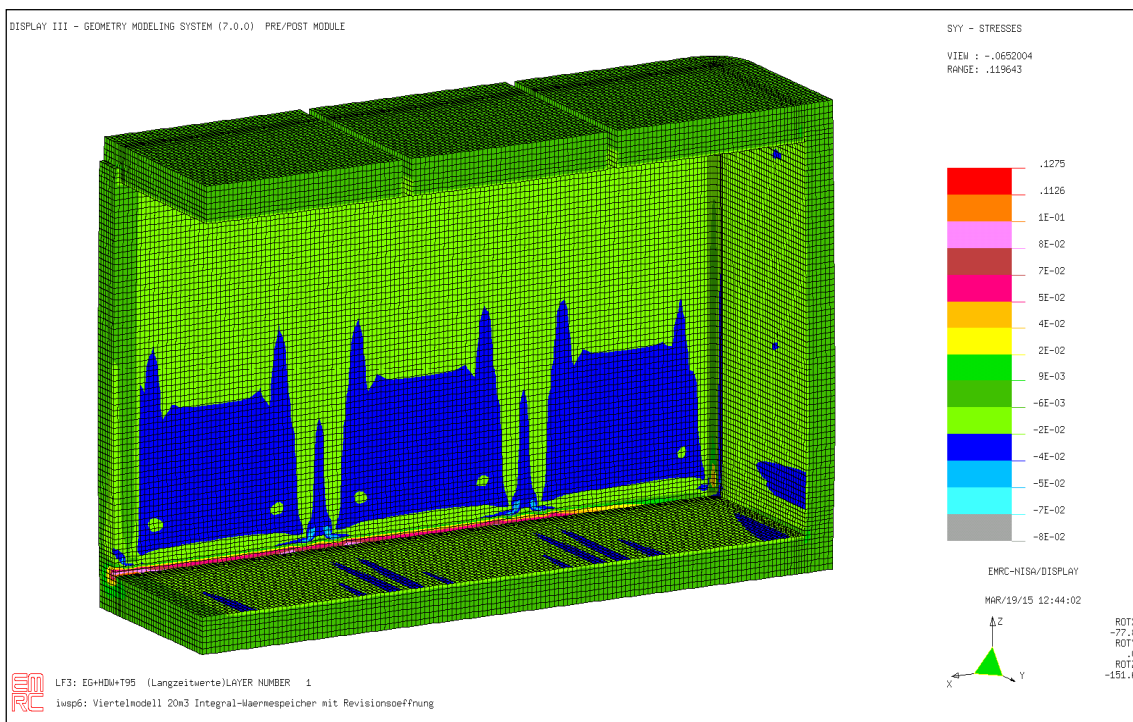


Bild 80 Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Hartschaum-Kernen. Lastfall 3: EG+HWD+T95.



Bild 81 Spannungen σ_{yz} [N/mm²] in den PUR-Hartschaum-Kernen. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

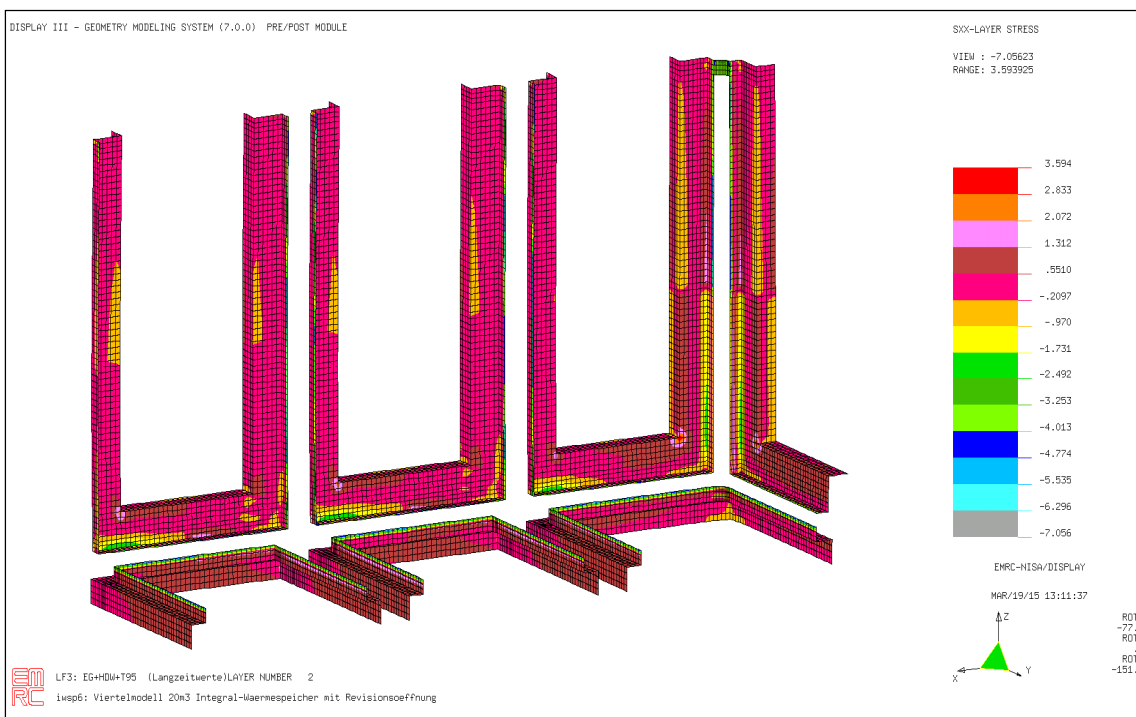


Bild 82 Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den Klebharzschichten. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

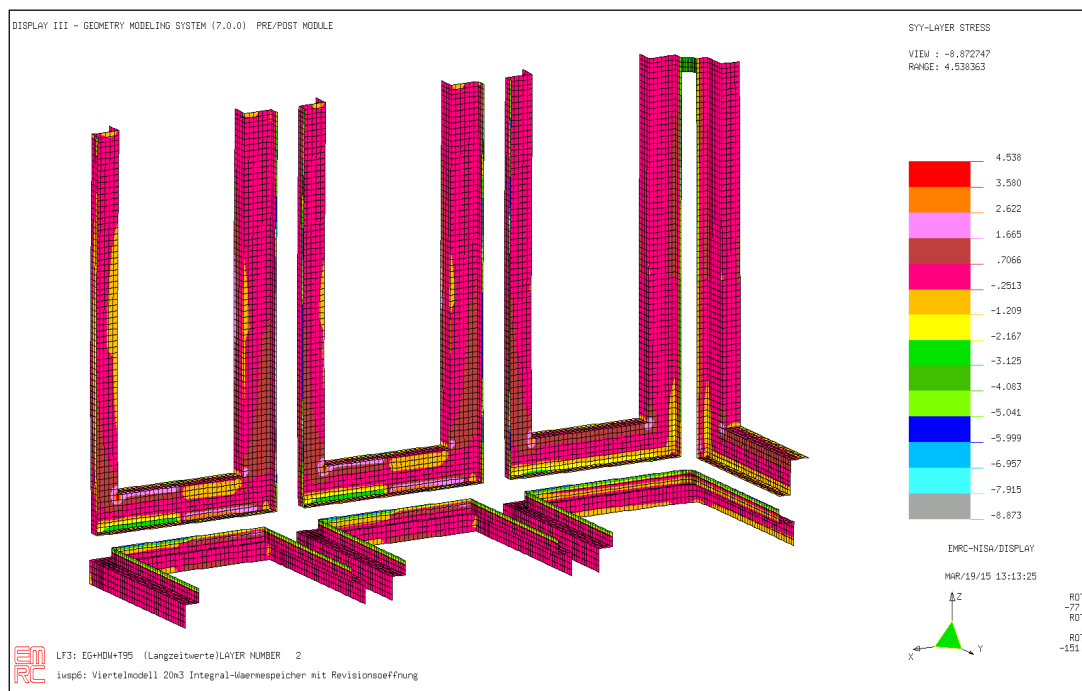


Bild 83 Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den Klebharzschichten. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

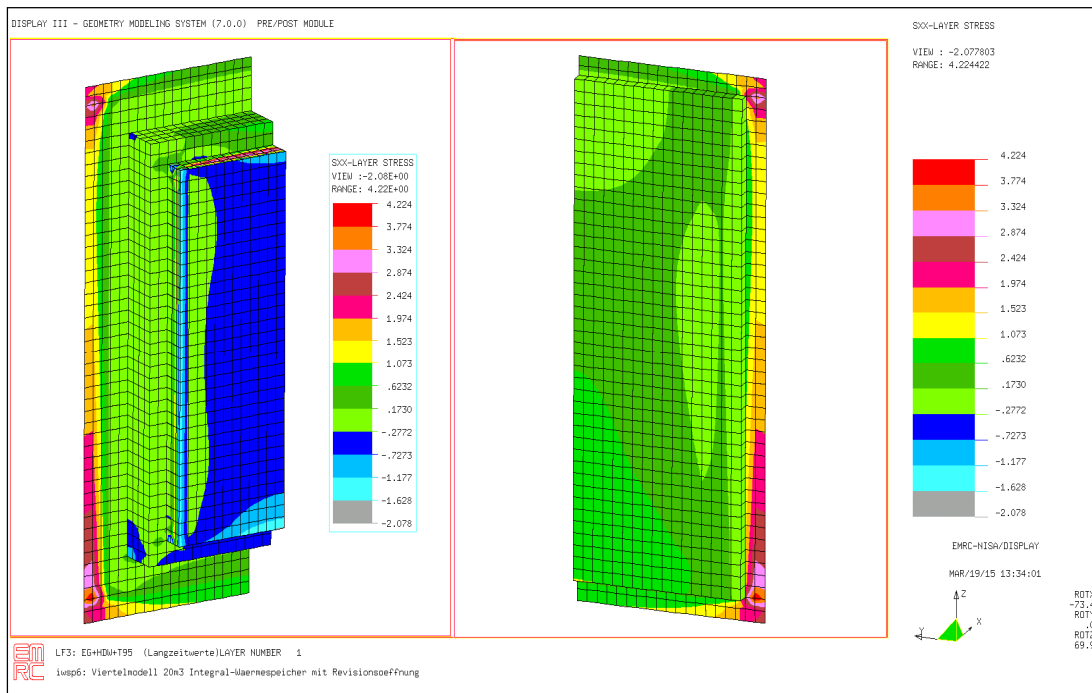


Bild 84 Spannungen σ_{xx} [N/mm²] im GFK-Mantel des Verschlussmoduls. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

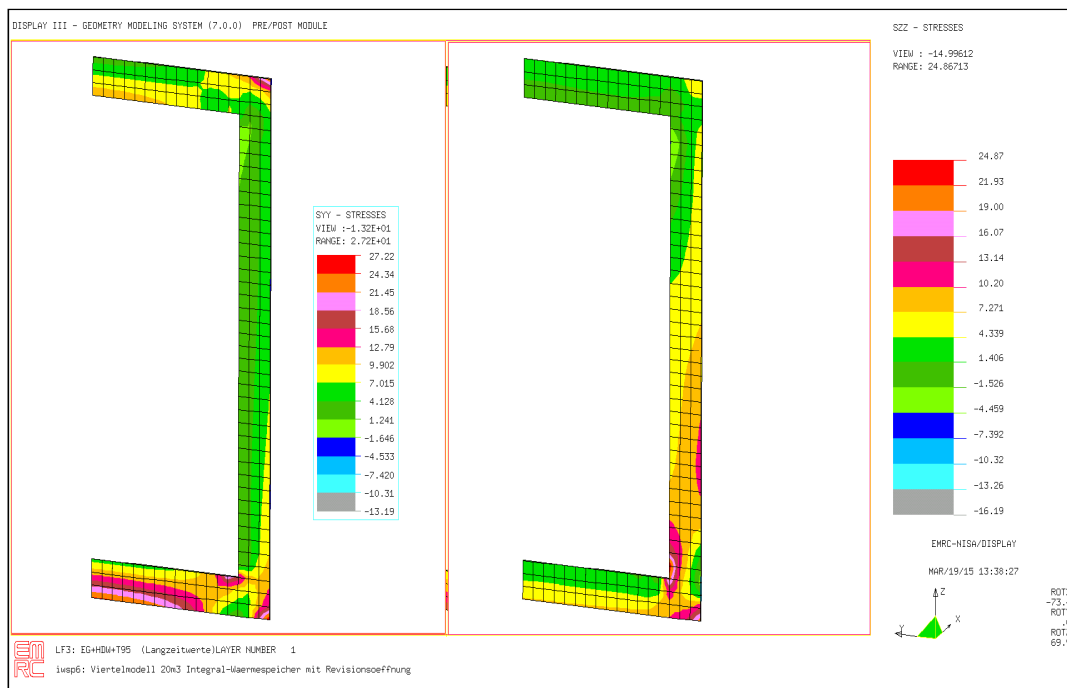


Bild 85 Spannungen σ_{yy} und σ_{zz} [N/mm²] im Stahlrahmen der Revisionsöffnung. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

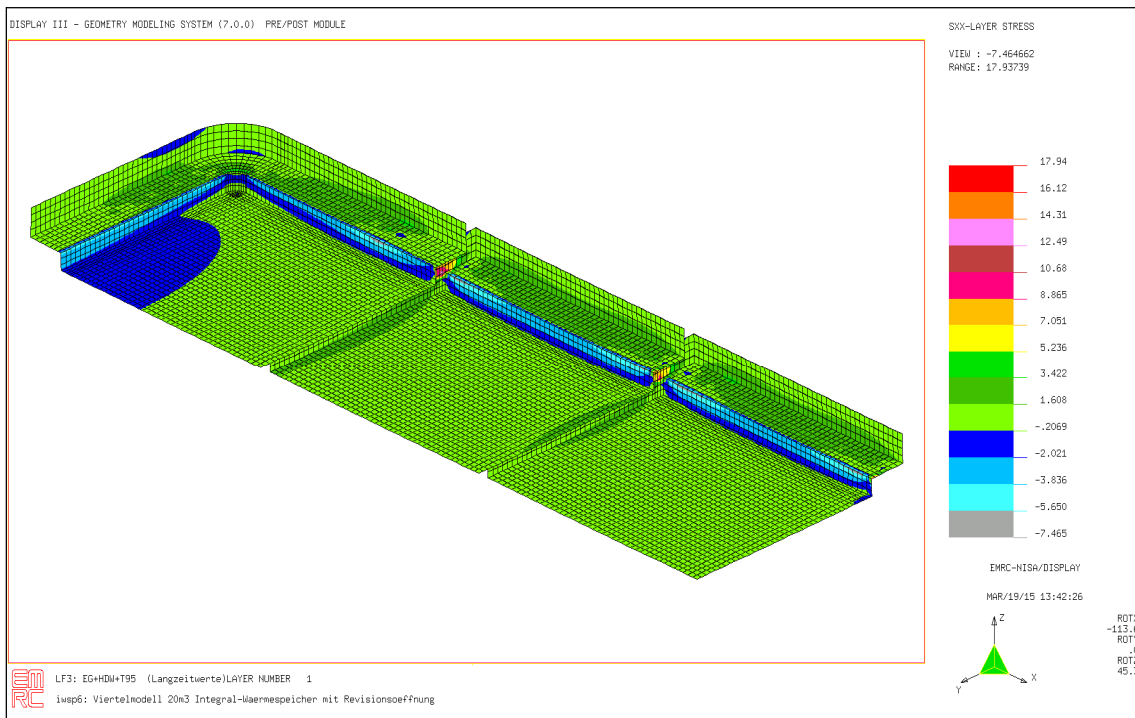


Bild 86 Spannungen σ_{xx} [N/mm²] im GFK-Mantel der Abdeckmodule. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

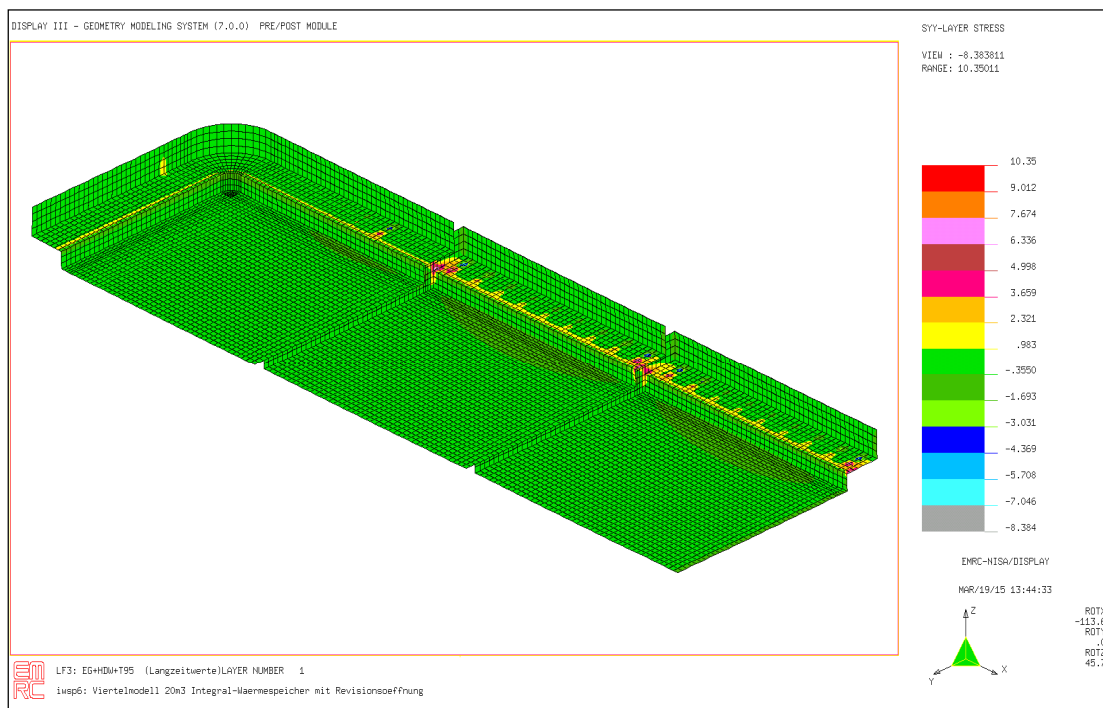


Bild 87 Spannungen σ_{yy} [N/mm²] im GFK-Mantel der Abdeckmodule. Lastfall 3: EG+HWD+T95.

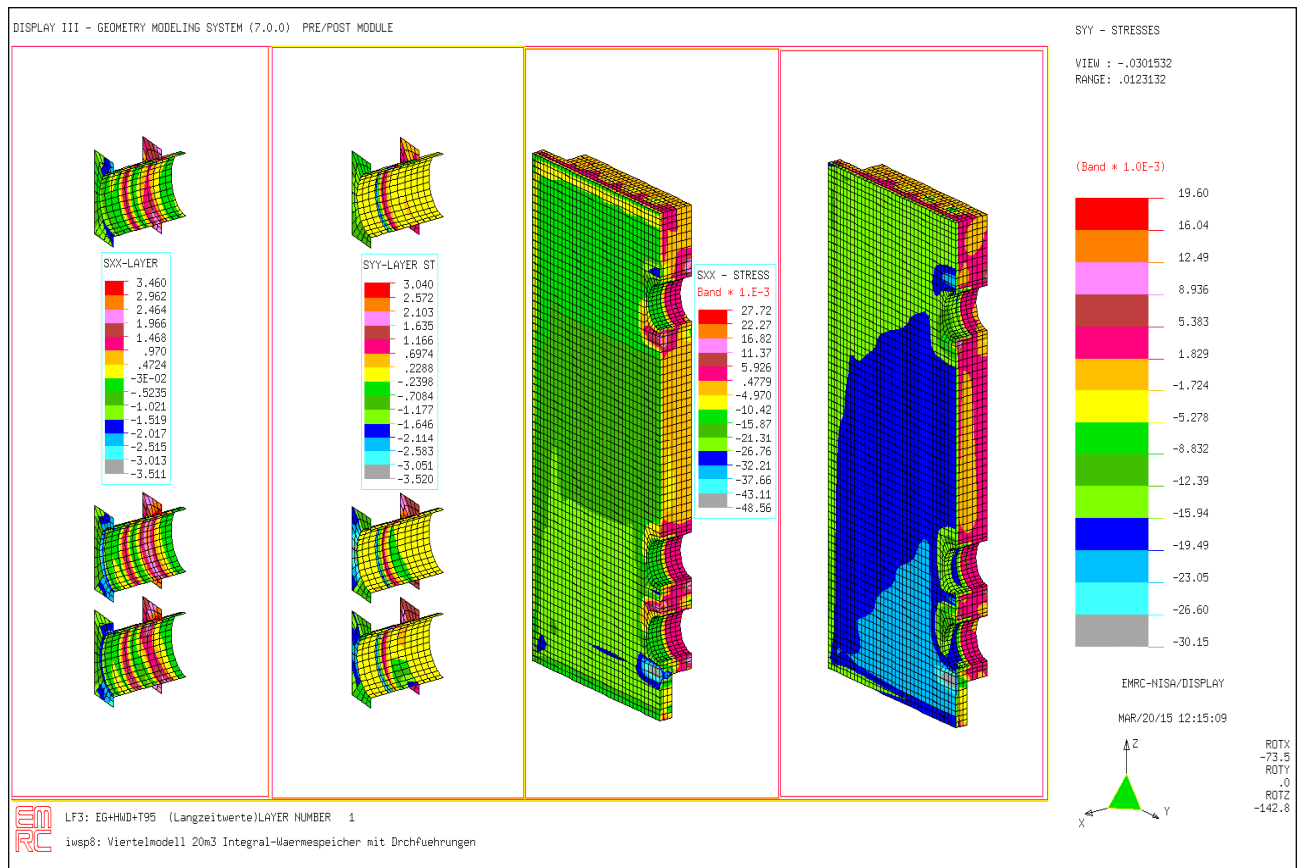


Bild 88 Lokale Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] der Rohrdurchführungen und im PUR-Hartschaum

Quellen für alle Sach- und FEM-Einzelberichte

- [1] Knauer, B.:1. Sachbericht zum 4 m³ Labor-Wärmespeicher ARGE, (1. Projekttreffen 13.11.13)
- [2] DIN EN 14509:Selbsttragende Sandwichelemente mit beidseitigen Metalldeckschichten. Deutsche Fassung EN 14509: 2006
- [3] Knauer, B./ARGE: Zeichnungssatz zum 4m³ Labor-Wärmespeicher, Oktober 2013
- [4] Wagenknecht, E.: 4 m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 05.12.2013. Teilbericht 1
- [5] Knauer, B: 2. Sachbericht zum 4m³ Labor-Wärmespeicher ARGE, (2. Projekttreffen 26.02.2014)
- [6] Knauer, B./ARGE: Zeichnungssatz zum 4m³ Labor-Wärmespeicher, Januar 2014
- [7] Wagenknecht. E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 28.02.2014.Teilbericht 2
- [8] Knauer, B./ARGE: Zeichnungssatz zum 4m³ Labor-Wärmespeicher. März 2014
- [9] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 17.03.2014.Teilbericht 3
- [10] Wagenknecht, E.: Laborwärmespeicher mit Vakuum-Isolationspaneelen bzw. zusätzlicher Glasschaum-Isolierung. Voruntersuchungen 06.05.2014
- [11] Knauer, B.: 3. Sachbericht zum 4m³ Labor-Wärmespeicher ARGE, (3. Projekttreffen 19.06.2014)
- [12] Knauer, B./ARGE: Zeichnungssatz zum 4m³ Labor-Wärmespeicher. Seitenwandmodul II, Seitenwandmodul III. 05.06.2014
- [13] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 23.06.2014.Teilbericht 4
- [14] Knauer, B.: Zeichnungssatz zum 4m³ Laborwärmespeicher. Mannloch b. 01.07.2014
- [15] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 04.07.2014.Teilbericht 5
- [16] DIN 1055-4: Windlasten nach DIN 1055-4
- [17] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 4.07.2014 Teilbericht 6
- [18] Knauer, B.: E-Mail vom 26. August 2014. Modifizierte Eingangsdaten
- [19] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 11.09.2014.Teilbericht 7
- [20] Knauer, B./TUI: Versuchsergebnisse zum 4m³ Labor-Wärmespeicher. Oktober 2014

- [21] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 10.11.2014. Teilbericht 8
- [22] Knauer, B. Zeichnungssatz zum 3m³ Wärmespeicher vom 04.11.2014
- [23] Wagenknecht, E.: 4m³ Labor-Wärmespeicher in Modulbauweise. FEM- Berechnung. 28.11.2014. Teilbericht 9
- [24] Knauer, B. Zeichnungssatz zum 20m³ Wärmespeicher vom 12.01.2015
- [25] Knauer, B. Revisionsöffnung des 20m³ Wärmespeichers. Zeichnung vom 06.03.2015

III.6 Zusammenfassung (Arbeitspaket 3)

Der Abschlussbericht für das AP3 enthält alle werkstoffwissenschaftlichen, konstruktiven und festkörpermechanischen Ergebnisse, die zur Realisierung und erfolgreichen Nachweisführung eines Modular aufgebauten Rechteck – Wärmespeicher (4m³) notwendig waren, sowie eine Weiterentwicklung ermöglichen.

Im Einzelnen dargestellt wird die angewandte:

Konstruktionstechnik der Speicherentwicklung

Verbundwerkstoffentwicklung samt der Laminatplanung für die Speicherhülle und variierte Wandmodule sowie Einstiegsmodule

Hinweise zur Fertigungsüberwachung, Montage und Nutzung

FEM-Berechnung der Baugruppen (5 Teilberichte)

III.7 Anlage Zeichnungssatz (nur in der gedruckten (Papier-)Ausführung)

IV. Zusammenfassung Gesamtberericht TP1&2)

| | | |
|------|---|-----|
| IV. | Zusammenfassung | 337 |
| IV.1 | Gesamtergebnisbewertung | 337 |
| IV.2 | Ausblick und weiterführende Untersuchungen | 339 |
| IV.3 | Vergleich des Arbeitsstandes mit dem bestätigten Arbeitsplan | 340 |
| IV.4 | Probleme bzw. Schwierigkeiten bei Erlangung der / des Projektziele(s) | 340 |
| IV.5 | Im Projektverlauf bekannt gewordene F- und E-Ergebnisse Dritter | 340 |
| IV.6 | Quellennachweis | 341 |
| IV.7 | Abbildungsverzeichnis | 343 |

IV.1 Gesamtergebnisbewertung

Das Vorhaben / Projekt wurde als Verbundprojekt zwischen der TU Ilmenau (TP 1) und energiedepot Radeberg (TP 2) durchgeführt. Die Projektkoordination lag bei der TU Ilmenau. Der inhaltliche Ablauf wurde durch die Formulierung von 15 Arbeitspaketen festgelegt und zeitlich entsprechend einem Balken-Zeitdiagramm organisiert.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung / Konstruktion / Realisierung / Vermessung und Laborprüfung eines modular aufgebauten Laborspeichers mit einem Speichervolumen von 4 m³.

Angewendet wird ein neuartiges Konstruktionsprinzip:

Der modular aufgebaute Recht-Eck-Speicher wird aus wenigen aber unterschiedlichen Segmenten (Modulen) zur Realisierung verschiedener Kubaturen vor Ort gefügt, wobei in jedem Modul alle erforderlichen Eigenschaften für Statik, Medien- und Temperaturbeständigkeit, Diffusionsdichtheit sowie Speicherfunktionalität und Dämmung integriert sind.

Die Herstellung und Erprobung des „Modularen Rechteck-Wärmespeichers“ (MRW) in Form eines Laborspeichers mit 4 m³ - Speicherinhalt erfolgt nach diesem neuartigen Konstruktionsprinzip. Der MRW zur „Vor-Ort-Montage“ in bestehenden Gebäuden wird aus 4 unterschiedlichen - um verschiedene Grundrisse/Höhen zu realisieren, sich wiederholenden-Segmenten gefügt, wobei in jedem Element alle erforderlichen Eigenschaften für Statik, Medien- und Temperaturbeständigkeit, Diffusionsdichtheit sowie Speicherfunktionalität und Dämmung integriert sind.

Mit der FE- Aufgabe wurden 8 Zielstellungen formuliert, die 9. wurde im Rahmen der Projektbearbeitung ergänzt:

1. Vor-Ort-Montage des Vollkunststoffspeichers ausschließlich vom Speicherinnern,
2. Temperaturbeständigkeit bis 95°C,
3. max. Diffusionsdichtheit,
4. stabile Schichtung auch in niedrigen, großflächigen Speichergeometrien,
5. Bauform aus 4 verschied. Einzelteilen zu Speichern bis mind. 50m³,
6. Begehbarkeit,
7. U-Wert 0,11 W/m²,
8. 20% Effizienzzuwachs bei mind. Preisgleichheit zu bisherigen Hochleistungskonzepten
9. einfache und reproduzierbar sichere Montage auch durch Installateure ohne GFK-Ausbildung.

Der Nachweis nachfolgender Eigenschaften ist zu erbringen:

1. Machbarkeit der vor Ort – Montage des Voll-Kunststoff-Integral-Wärmespeichers ausschließlich vom Speicherinneren aus
2. Dauertemperaturbeständigkeit 95 °C
3. Erzielung einer maximalen Dichtheit gegen Wasserdampfdiffusion und Aufbau einer stabilen thermischen Schichtung bei niedrigen großflächigen geometrischen Bedingungen.
4. Die entwickelten Module lassen später die Realisierung von Speichervolumina bis zu 35 m³ Speichervolumen zu.
5. Begehbarkeit im Inneren- zum Zweck von Versuchsumbauten etc. ist der Labor-speicher durch einen Einstieg begehbar.
6. Verbesserung der Wärmedämmfähigkeit um ca. 20 %.

Zusammenfassung:

Die Erwartungen und im Pflichtenheft vorausgerechneten Werte für Konstruktion, Realisierung und messtechnische Überprüfung und Bewertung des Laborspeichers wurden erreicht.

So konnte auf Basis der Messwerte, eine Verringerung der Wärmeleitung durch die Speicherwand, bei teilweisem Ersatz der reinen PUR-Dämmung durch Vakuumpaneele, um 60 % von 0,183 W/m²K auf 0,072 W/m²K nachgewiesen werden.

Die gemessene Verformung der Speicherwände durch die Temperaturbelastung bis 90 C, bei unterschiedlichem innerem Aufbau der Dämmung, entsprach in allen Fällen den vorausgerechneten Werten. Somit wurden die zulässigen Festigkeitswerte durch die aufgetretenen Spannungen nicht überschritten.

Der berechnete Wert der Speicherzeitkonstante von 38 Tagen (Anzahl Tage bis zum Abfall der anfänglichen Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur um ca. 63 %) konnten durch die Messungen nicht bestätigt werden. Gründe dafür lagen zum einen in den vorhandenen Wärmebrücken der Verbindungen und Anschlüsse des Laborwärmespeichers und zum anderen an die witterungsabhängige Aufstellung im Freien.

Die Ergebnisse sind Grundlage zur weiteren Umsetzung der Entwicklung in die Machbarkeit und Vorbereitung einer Serienproduktion. Ziel muss es sein, die Warmhalteverluste so zu minimieren, dass die Anforderungen an eine Energieeffizienzklasse A bzw. A+ erfüllt werden.

Gemäß Verordnung (EG) Nr. 814/2013 der Kommission vom 02. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/RG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Warmwasserbereitern und Warmwasserspeichern, sind ab dem 26. September 2015 Speicher bis zu einer Größe von 2000 l in eine Energieeffizienzklasse einzuordnen und zudem müssen Speicher bis zur maximalen Größe von 500 l mit einem Energieeffizienzlabel gekennzeichnet sein. Größere Speicher als 2000 l, wie der hier untersuchte 4 m³ Laborwärmespeicher, sind zur Zeit nicht inbegriffen. Es kann jedoch auf eine mögliche, erreichbare Energieeffizienzklasse entsprechend der Verordnung hingewiesen werden.

Die Eingruppierung in eine der Klassen setzt die Bestimmung der Warmhalteverluste voraus. Für jede Energieeffizienzklasse gelten auf Basis des Speichervolumens bestimmte minimale und maximale Warmhalteverluste. Die Eingruppierung erfolgt durch Vergleich des

Warmhalteverlustes S mit diesen Minimal- und Maximalwerten der einzelnen Energieeffizienzklassen.

Grundlage der Berechnungen bilden die spezifischen Wärmeleitungs- bzw. Widerstandsbeiwerte der einzelnen Schichten der Speicherwände. Daraus können unter Zugrundelegung einer Temperatur-Differenz, lt. EU-Verordnung 814/2013 von $\Delta T = 45 \text{ K}$ (innen $65 \text{ }^\circ\text{C}$, außen $20 \text{ }^\circ\text{C}$), der Warmhalteverlust S berechnet werden.

Nachfolgend sind zwei Gegenüberstellungen aufgeführt. Ein Speicher mit einer Isolierung aus reinem PUR-Schaum und ein Speicher bei dem die PUR-Isolierung in allen Seitenwänden, dem Deckel und dem Boden teilweise durch Vakuumpaneele ersetzt wurde.

Besonders hoch zu bewerten ist der erreichte Standard hinsichtlich der Dämmung des MRW. Die mittlerweile veröffentlichte Berechnungsweise für das Energielabel von Wärmespeichern ließe ein Label A⁺ für den MRW zu.

Die Herstellung der einzelnen Module hat eine Vielzahl von Ergebnissen gebracht, die bei einer künftigen Serienproduktion von Speichern dieser neuen Bauart zu berücksichtigen sind. Das betrifft sowohl die Fertigungsverfahren für die Module der Speicherhülle als auch die Konstruktionen und Technologien zur Herstellung und Montage des BES.

Der Teilbericht 2 (TP2) enthält alle werkstoffwissenschaftlichen, konstruktiven und festkörpermechanischen Ergebnisse, die zur Realisierung und erfolgreichen Nachweisführung eines Modular aufgebauten Rechteck – Wärmespeicher (4m^3) notwendig waren sowie eine Weiterentwicklung ermöglichen.

Im Einzelnen sind beinhaltet:

Konstruktionstechnik der Speicherentwicklung
Verbundwerkstoffentwicklung samt der Laminatplanung für die Speicherhülle und variierte Wandmodule sowie Einstiegsmodule
Hinweise zur Fertigungsüberwachung, Montage und Nutzung
FEM-Berechnung der Baugruppen (5 Teilberichte)

IV.2 Ausblick und / auf weiterführende Untersuchungen

Die Ergebnisse sind Grundlage zur weiteren Umsetzung der Entwicklung in die Machbarkeit und Vorbereitung einer Serienproduktion. Ziel muss es sein, die Warmhalteverluste so zu minimieren, dass die Anforderungen an eine Energieeffizienzklasse A bzw. A⁺ erfüllt werden.

Nach der Projektbearbeitung ist nunmehr der Schwerpunkt auf die Verwertung zu legen, denn das Interesse in Fachkreisen ist vorhanden. GFK-Speicher werden allerdings heute von Fachleuten und Nutzern i. d. R. als Problemlöser angesehen und häufig erst dann eingesetzt, wenn alle Möglichkeiten, einen Stahlspeicher zu verwenden, erschöpft sind: Das betrifft i. d. R. sehr beengte Zugänge und niedrige Höhen in Aufstellräumen vorhandener Gebäude. Die Erhöhung der Akzeptanz des GFK-Speichers und damit das Erreichen wirtschaftlicher Stückzahlen gelingen nur durch überdurchschnittliche Vorteile und deren breite Bekanntmachung.

Diese Vorteile sind:

- einfachste/sichere Montage
- beste Energieeffizienz
- höchste Lebensdauer
- deutlich besseres Preis-/Leistungsverhältnis zu Stahl.

Die Akteure im Wärmemarkt wie Hersteller von Heizungen, Planer/Architekten und vor allem das Heizungsbauhandwerk arbeiten sehr konservativ und müssen von diesen Vorteilen der neuen Speichergeneration überzeugt werden.

Dazu sind Aktivitäten in 3 Haupt-Richtungen erforderlich:

1. Hersteller-Akquise zur Serienfertigung der Segmente der Speicherhülle in einem hoch wirtschaftlichen Industrie-Verfahren mit einem Minimum an Fertigungstoleranzen (Interessenten sind vorhanden)
2. Optimierung der Montage, um künftig Unternehmen zu erreichen, die sich bisher vor Laminierarbeiten und der damit verbundenen Verantwortung zur Dichtheit des errichteten Wärmespeichers gescheut haben. Das schafft neue Multiplikatoren, die die Stückzahlforderung maßgeblich beeinflussen.
3. Erarbeitung eines umfassenden Vertriebs- und Marketingkonzeptes, weil der Erfolg der Serienfertigung zwangsläufig mit den Kosten des Wärmespeichers und diese wiederum von der Stückzahl abhängen. Hierzu müssen frühzeitig strategische Partnerschaften zwischen Akteuren des Wärmebereiches hergestellt und langfristig abgesichert werden.

Die Firma SINOI aus Nordhausen, bekannt als einer der bedeutendsten Hersteller von Rotorblättern für Windkraftanlagen, ist dabei besonders interessiert, um im Rahmen einer Arbeitsgemeinschaft mit den Forschern deren Ergebnisse künftig zu einem serienreifen Produkt und einer ebensolchen Fertigung weiter zu entwickeln.

IV.3 Vergleich des Arbeitsstandes mit dem bestätigten Arbeits-Zeitplanplan

Der Zeitplan wurde exakt eingehalten. Bei den Kosten (TP2) gab es einen erhöhten Aufwand an Personalkosten, bedingt durch Konkretisierungen im Verlauf der Themenbearbeitung und Gehaltserhöhungen. Die Mehrkosten werden vollständig aus Eigenmitteln des Zuwendungsempfängers (ed energie.depot GmbH) beglichen. Aufgrund der Entscheidungen während der Bearbeitung zu speziellen zu untersuchenden Schwerpunkten gab es Verschiebungen zwischen den einzelnen Kostenarten.

IV.4 Probleme bzw. Schwierigkeiten bei Erlangung der / des Projektziele(s)

- keine -

IV.5 Im Projektverlauf bekannt gewordene F- und E-Ergebnisse Dritter

Entwicklungen im direkten Vergleich zum vorliegendem und als 4 m³ Labor-Wärmespeicher realisiertem Konzept sind nicht festgestellt wurden.

IV.6 Quellennachweis und Literaturverzeichnis (Auszüge)

- [01] Bühl, J. „Wärme (Energie-) Speicher: Stand-Weiterentwicklung der Warm-Wasser-Wärme-Speicher (WWWS)-Optimierungspotenziale“, Ilmenau im Februar 2013
- [02] Henning, H.-M., Palzer, A. Studie „100% Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg im November 2012
- [03] „Studie Energiesystem Deutschland 2050“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg im November 2013
- [04] „Speichertechnologien in Deutschland bis 2020 - Auszug Wärmespeicher – Speicherbedarf, technologische und wirtschaftliche Potenziale“, trend:research - Institut für Marktforschung 2010
- [05] M. Sterner, I. Stadler; „Energiespeicher: Bedarf-Technologien-Integration“, Springer Verlag Heidelberg 2014
- [06] „Solardorf in der Stadt – Claudius Höfe in Bochum decken einen Teil Ihres Energieverbrauchs mit Solarenergie“ – Projekt des Monats, K. Wolf, ERNEUERBARE ENERGIEN Ausgabe 3/2015, Seiten 16-17
- [07] „Wärmemarkt im Visier – erneuerbare und effiziente Wärme spielen zunehmend eine wichtige Rolle in der Energiewirtschaft“, N. Weinhold, ERNEUERBARE ENERGIEN Ausgabe 3/2015, Seite 47
- [08] „Doppelpack – Hybridkollektoren erzeugen gleichzeitig Strom und Wärme“, S. Ullrich, ERNEUERBARE ENERGIEN Ausgabe 3 / 2015, Seiten 48-51 [] „Duschzwang kuriert – Drain-Back-Systeme in der Solarthermie“, S. Ullrich, ERNEUERBARE ENERGIEN Ausgabe 3 / 2015, Seiten 52-53
- [09] „Erneuerbare Energien als Wärmequelle in Deutschland 2014– Solarthermie hat Anteile gewonnen“, J. Gesthuizen, Sonne Wind & Wärme 23.03.2015
- [10] „Erneuerbare Energien für die Wärmewende – Novelle des Marktanzreizprogramms vom 11.03.2015 setzt neue Impulse: mehr Förderung für Solarthermie ...“ Energiewende direkt 17.03.2015, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- [11] H. Müller-Steinhagen, „Grundlagen thermischer Energiespeicher“, Vortrag im Bürgerzentrum Waiblingen, 25.09.2008
- [12] Forschungsstrategie-Niedertemperatur-Solarthermie 2030 für eine nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung Deutschlands, erstellt durch Deutsche Solarthermie-Technologie-Plattform (DSTTP), Berlin im Februar 2011
- [13] Energielabel für Warm-Wasserspeicher gem. ErP 2010/30/EU, AEROLINE, Beitrag aus Sonne Wind & Wärme vom 07.11.2014, BVA Bielefelder Verlag
- [14] Energieeffizienzklassen für Wärmespeicher – C als Standard, solardirekt24, Beitrag aus Sonne Wind & Wärme vom 07.11.2014, BVA Bielefelder Verlag
- [15] Übersicht und Informationen zu den im Projekt HeizSol eingesetzten Wärmespeichern (aktuelle Berichte)
- [16] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Bekanntmachung zum Themenfeld „Materialforschung für die „Energiewende“, 29.April 2013
- [17] Bühl, J. „Einschätzung der Möglichkeiten und Aussichten der Vorbereitung, Einführung und Aufnahme einer Serienfertigung basierend auf dem Konzept und der Realisierung eines modular aufgebauten 4 m³ Labor-Wärme-Speichers“, Studie TU Ilmenau im August 2014
- [18] I. Dincer and M.A. Rosen, „Thermal energy storage:Systems and Applications. John Wiley and Sons, LTD West Sussex, 2003
- [19] B. Hilbrecht, „Ansätze und Optimierungsvorschläge/-Möglichkeiten der Wärmeenergiespeicherung in Energieeffizienzhäusern am Beispiel der Sonnen- und Passiv-Energiehäuser

- [20] „Die Bedeutung des Speichers ist gestiegen“ – Interview mit Heizungsfachmann D. Kemper über die Bevorratung von Wärme in modernen Systemen, Buderus-das magazin Winter 2014
- [21] Vitocell Heizwasser-Pufferspeicher: umfassendes Programm von 50 bis 2.000 Liter, Viessmann Fachnews Nr. 37 vom Dezember 2014 für Haustechnikplaner und Heizungsfachbetriebe
- [22] „Energiesparhäuser von der Stange“, Beitrag aus Sonne Wind & Wärme, Heft 4 vom 01.04.2014, BVA Bielefelder Verlag
- [23] Heizen mit Erneuerbaren Energien - Aktuelles: Novelle des Marktanzreizprogramms / BMWi „Novelle der Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanzreizprogramm)“ vom 11.03.2015
- [24] J. P. Meyer, „Neuer Klasse-A-Speicher von Viessmann“, Beitrag aus Sonne Wind & Wärme vom 01.04.2014, BVA Bielefelder Verlag
- [25] Solar Heating with seasonal Storage - Some Aspekts of the Design and Evaluation of Systems with Water Storage Jan - Olof Datenbäck, Göteborg 1993
- [26] Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2011, Herausgeber BMU Referat KI III 5-11055 Berlin im Juli 2012
- [27] Bundesbericht Energieforschung 2014 – Forschung für die Energiewende“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juli 2014
- [28] Bundesbericht Energieforschung 2015 – Forschung für die Energiewende“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), April 2015
- [29] BDH-Informationsblatt Nr. 60: „Warmwasserspeicher-Energielabel und Ökodesign-Anforderungen“ März 2015
- [30] „Effiziente Systeme und erneuerbare Energien – Technologie- und Energie-Forum“ ISH Energy Frankfurt am Main, 12. Bis 16.03.2013
- [31] Fachartikel „Schlechte Noten für Wärmespeicher“ in Sonne Wind & Wärme im Dezember 2014
- [32] Kedzierski, U., Technologie-Studie im Rahmen des Projektes ENA1 „Nutzung erneuerbarer Energien in der Gebäudeintegration für kleine Anwendungen“, ZTS Zentrum für Technologie-Struktur-Entwicklung Region Riesa-Großenhain GmbH Glaubitz
- [33] Abschlussbericht zum Vorhaben „Grundlegende Weiterentwicklung zum Werkstoff- und Bauteilverhalten von GFK-Wärmespeichern“ Förderkennzeichen 0325970A
- [34] Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Herausgeber BMWi, Berlin Juli 2011

IV.7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--------------------|---|
| Abb. II.1.1 | Wandaufbauten, Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wand |
| Abb. II.1.2 | Berechnung der Wärmedurchgangszahl U der Wand vom Typ III |
| Abb. II.1.4 | Berechnung und Vergleich der Wärmeverluste |
| Abb. II.1.5 | Speicherzeitkonstante (τ) |
| Abb. II.1.6 | Berechnung der Speicherzeitkonstanten |
| Abb. II.1.7 | Gegenüberstellung der Speicherzeitkonstanten |
| Abb. II.2.1 | Bestandteile des modular aufgebauten Rechteck-Wärmespeichers |
| Abb. II.2.2 | Zusammengesetztes Eckmodul |
| Abb. II.2.3 | Schnittdarstellung des Bodenmoduls (auch Grundform für das Deckelmodul) |
| Abb. II.2.4 | Schnittdarstellung des Deckelmoduls mit Einstiegsschacht |
| Abb. II.2.5 | Schnittdarstellung des Seitenwandmoduls vom Typs I |
| Abb. II.2.6 | Schnittdarstellung des Seitenwandmoduls vom Typs II |
| Abb. II.2.7 | Schnittdarstellung des Seitenwandmoduls vom Typs III |
| Abb. II.3.1 | Rohrdurchführung mittels Doyma-Dichtungssatz CM |
| Abb. II.3.2 | Anordnung der Rohrdurchführung im Funktionsmodul |
| Abb. II.3.3 | Einbauten und Medienanschlüsse in der 1.Testphase |
| Abb. II.3.4 | Voll ausgerüsteter GFK-Wärmespeicher |
| Abb. II.3.5 | Einbauten in der 2.Testphase |
| Abb. II.3.6 | Medienanschlüsse in der 2.Testphase |
| Abb. II.4.1 | Versuchsstand der TU Ilmenau |
| Abb. II.4.2 | KaltwasserPufferspeicher mit Hydraulikeinheit des Entladungs kreislaufs |
| Abb. II.4.3 | Beispiel einer kontinuierlich Darstellung der Messdatenerfassung am PC |
| Abb. II.4.4 | Anschluss des GFK-Laborwärmespeichers in der 2. Testphase |

- Abb. II.4.5** Temperaturmessfeld der 1. Testphase
- Abb. II.4.6** Temperaturmessfeld der 2. Testphase
- Abb. II.5.1** Anordnung der Messpunkte zur Messung der Verformungen
- Abb. II.5.2** Restverformung am 02. Juni 2015
- Abb. II.5.3** Gelb dargestellt sind die mittels Messschieber ermittelten Werte.
In der darunter befindlichen Tabelle sind die Differenzen zum
Ausgangszustand aufgeführt
- Abb. II.5.4** Verformung von Wand 2 während der ersten thermische Beladung
- Abb. II.5.5** Verformung von Wand 2 während der Abkühlphase
- Abb. II.5.6** Verformung von Wand 2 während der vierten thermischen Aufladung
- Abb. II.5.7** Fest verklebtes Seitenwandmodul, Typ-I
- Abb. II.5.8** Auswechselbares Seitenwandmodul, Typ-I
- Abb. II.5.9** Auswechselbares Seitenwandmodul, Typ-II
- Abb. II.5.10** Auswechselbares Seitenwandmodul, Typ-III
- Abb. II.5.11** Gegenüberstellung der drei Wandtypen
- Abb. II.5.12** Abkühlkurve Wandtyp I, „umhaust“
- Abb. II.5.13** Abkühlkurve Wandtyp I, im „Freien“
- Abb. II.5.14** Abkühlkurve Wandtyp II, im „Freien“
- Abb. II.5.15** Abkühlkurve Wandtyp III, im „Freien“
- Abb. II.5.16** Oberflächentemperaturverlauf linke Seite
- Abb. II.5.17** Oberflächentemperaturverlauf rechte Seite
- Abb. II.5.18** Feuchtigkeitsmessungen
- Abb. II.5.19** Wasserdampf-Permeabilität
- Abb. II.5.20** Thermische Beladung mittels Schichtenlader
- Abb. II.5.21** Temperaturfeld vor Beginn der Beladung

- Abb. II.5.22** Temperaturfeld nach 40 min
- Abb. II.5.23** Temperaturfeld nach 2 h 15 min
- Abb. II.5.24** Temperaturfeld nach 2 h 50 min
- Abb. II.5.25** Temperaturfeld nach einer Abkühlhase von 20 h
- Abb. II.5.26** Gesamter Temperaturverlauf Beladung und Abkühlung Mitte des Wärmespeichers
- Abb. II.5.27** Gesamter Temperaturverlauf Beladung und Abkühlung oberes Temperaturfeld in 1,26 m Höhe über OK Boden
- Abb. II.5.28** Gesamter Temperaturverlauf Beladung und Abkühlung oberes Temperaturfeld in 0,61 m Höhe über OK Boden
- Abb. II.5.29** Schrittweiser Temperaturanhebung mit vollständiger Beladung
- Abb. II.5.30** Temperaturprofil nach vollständiger Beladung
- Abb. II.5.31** Thermische Beladung mit niedriger Vorlauftemperatur
- Abb. II.5.32** Thermische Beladung mit Wellrohr-Wärmeübertrager
- Abb. II.5.33** Thermische Entladung mit Wellrohr-Wärmeübertrager
- Abb. II.5.34** Thermische Entladung mit Wellrohr-Wärmeübertrager
-
- Abb. II.6.1** Erreichbare Energieeffizienzklasse A, bei 20 mm Vakuumisolierung
- Abb. II.6.2** Erreichbare Energieeffizienzklasse A, bei 30 mm Vakuumisolierung
- Abb.III.1.1** Integral - Wärmespeicher- ARGE Modulbauweise (Bodenwanne + Abdeckung)
- Abb.III.1.2** Nach Vorlagen von Prof. B. Knauer auf Basis der ARGE Patentmeldung DE 10 2012 020 448.5 gezeichnet mit 8 x „Dreibein“ als Hauptgestaltungselement für den 4 m³ Labor-Wärmespeicher
- Abb.III.1.3** Varianten von Modulverbindungsmöglichkeiten mit Bewertungen nach dem K.O.- Kriterium sowie einer Punktskala

- Abb.III.4.4** Gestaltungsbeispiel für Halbschalen Verbindungen am Eck- und Bodenmodul
- Abb.III.1.5** Einlamierte Alu-Profileschienen und Metallschrauben als Verbindungsmittel für die auswechselbaren Seitenwandmodule
- Abb.III.5.1** Innen- und Außenschale eines Eckmoduls nach der Verklebung und vor dem Ausschäumen
- Abb.III.6.1** Innen- und Außenschale eines Eckmoduls nach der Verklebung und vor dem Ausschäumen
- Nomenklatur des Zeichnungssatzes** Blätter 1, 2, 3, 4 (Belegung der Endfassung der Nomenklatur des Zeichnungssatzes belegt)

Werkstoffdatenblätter:

- Blatt I:** Trag- und Deckschichten (bestehend aus MM, VM, Verbunde) für alle Einzelflächen, Einzelmodule, Baugruppen und den gesamten Kubus
- Blatt II:** Kernschichten – PUR (für alle Schichtenmodule, nur teilweise bei Seitenwandmodul V II/III)
- Blatt III:** Montageklebstoffe auf Basis von Methacrylaten, PU, EP, Silicon und VE
- Blatt IV:** GFK-UD-Träger-, GFK-Wickel- sowie Pultrusionsprofile für hochtragende statische Verbände
- Blatt V:** Liner als Auskleidungen mittels GFK, duroplastischen Reinharzschichten o.a.
- Blatt VI:** Örtliche Einlagen (Hilfsprofile, metallische Verbindungsmittel als Schrauben, Dichtungen u.a.)
- Blatt VII:** Neuartige Kernschichten (für Seitenmodule V II und III)
- Tab. III.1.1** Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung
- Tab III.1.2** Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung
- Tab. III.1.3** Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern
- Tab III.2.1** Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung
- Tab III.2.2** Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung
- Tab. III.2.3** Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern

| | |
|----------------------|---|
| Tab. III.3.1 | Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab.III.3.2 | Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab. III.3.3 | Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern |
| Tab.III.3.4 | Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Klebstoffe/Spachtel) |
| Tab. III.3.5 | Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Klebungen von GFK/Spachtel) |
| Tab. III.3.6 | Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern (Klebungen/Spachtel) |
| Tab. III.4.1 | Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärme speichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab. III.4.2 | Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab. III.4.3 | Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern |
| Normbeispiele | DIN 18820 |
| Tab. III.5.1 | Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab.III.5.2 | Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile |
| Tab. III.5.3 | Abminderungen für spezielle Betriebszustände bei Wärmespeichern |
| Tab. III.6.1 | Kennwerte für örtliche Einlagen |
| Tab. III.7.1 | VIP-Sortiment / Die Dämmkerne bestehen aus mikroporösem Kiesel säurepulver mit einem Kugeldurchmesser < 0,005 mm |
| Tab. III.7.2 | Physikalische Angaben zu VIP – Dämmplatten |
| Tab III.7.3 | Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab III.7.4: | Festigkeitskennwerte und Schub-Aussagen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung |
| Tab III.7.5 | Stoffkennwerte und elastische Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung für Kernschicht III |

| | |
|------------------------|---|
| Tab. III 7.6: | Festigkeitskennwerte und Schub-Kenngrößen für Bauteile von Wärmespeichern bei Kurzzeit- und Raumtemperaturbeanspruchung (Kernschicht III) |
| Tab.TB 1.1 | Kurzzeit-Kennwerte für die Materialhauptachsen |
| Tab. TB 1.2 | Querschnittsabmessungen und Dichten |
| Tab. TB1.2.3 | Für die nachfolgenden Berechnungen zu Grunde gelegte Kurzzeitwerte |
| Tab.1.5 | Abminderung der Steifigkeitskenngrößen E, G |
| Tab. 6: | Abminderung der Festigkeitskenngrößen |
| Tab. TB 1.2.7 | Für den Lastfall LF1 (und LF2) verwendete Langzeitwerte |
| Tab. TB 1.2.8 | Ergebnisse des Lastfalls LF1: EG |
| Tab. TB 1.2.9 | Ergebnisse des Lastfalls LF2: EG + HWD |
| Tab. TB 1.2.11 | Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten |
| Tab. DB 1.2.12 | Für den Lastfall LF 3 verwendete Langzeitwerte |
| Tab. TB1.2.13 | Ergebnisse des Lastfalls LF3 |
| Tab. TB1.2.14 | Ergebnisse des Lastfalls LF4 |
| Tab.TB 1.6.3.15 | Ergebnisse des Lastfalls LF5 |
| Tab.TB2.1 | Ergebnisse des Lastfalls LF1: EG+ML75 |
| Tab.TB2.2 | Ergebnisse des Lastfalls LF2: EG + HWD+ML75 |
| Tab.TB2.3 | Ergebnisse des Lastfalls LF3: EG+HWD+T95+ML75 |
| Tab.TB2.4 | Ergebnisse des Lastfalls LF4: EG+HWD+T95+0.05bar |
| Tab.TB2.2.5 | Ergebnisse des Lastfalls LF5: EG+HWD+T95+0.1bar |
| Tab.TB3. 21 | Ergebnisse des Lastfalls LF1: EG+ML75 |
| Tab.TB3. 22 | Ergebnisse des Lastfalls LF2: EG+HWD+ML75 |
| TB3.Tab.23 | Ergebnisse des Lastfalls LF3: EG+HWD+T95+ML75 |
| TB3.Tab. 24 | Ergebnisse des Lastfalls LF4: EG+HWD+T95+0.05bar |
| TB3.Tab.25 | Ergebnisse des Lastfalls LF5: EG+HWD+T95+0.1bar |

| | |
|-----------------------|--|
| TB4.Tab. 27 | Ergebnisse der Variante 2, Lastfall LF4: EG+HWD+T95+0.05bar |
| TB4.Tab.28 | Spannungen im Kleber der Fugen unter den angegebenen Bedingungen |
| TB4.Tabelle 29 | Ergebnisse der Variante 3, Lastfall LF4: EG+HWD+T95+0.05bar |

Bildverzeichnis

| | |
|-------------------|---|
| Bild II.1 | Alle vorgefertigten Segmente/Module für Speicherhülle |
| Bild II. 2 | Rahmen-/Eckmodul |
| Bild II.3 | Rahmen-/Eckmodul mit Verbindungsdübel |
| Bild II.4 | Transport nach Ilmenau |
| Bild II. 5 | Teilmontage: Module verklebt |
| Bild II.6 | Teilmontage Modulverbindungen überlaminiert |
| Bild II.7 | Seitenwand für Austauschmodul |
| Bild II.8 | Austauschbares Seitenwandmodul abgedichtet |
| Bild II. 9 | Prinzipdarstellung der Temperaturebenen im Wärmespeicher |
| Bild 10 | Anordnung interne Wellrohr-Wärmetauscher in unterschiedlichen Höhen/Temperaturschichten |
| Bild II.11 | Wärmetauscher auf flachem Gestell gewickelt/im Dichtheitsversuch |
| Bild II.12 | Schichtlader ilm.ed |
| Bild II.13 | Schichtlader ilm.ed mit GFK-Rohrhülle |
| Bild II.14 | Schichtlader int. Gedämmt |
| Bild II.15 | Schichtlader o. Dämmung |
| Bild II.16 | Funktionsmodul Variante 1 (links) und 2 (rechts) |
| Bild II.17 | GFK-Stutzen in der GFK-Wandung |
| Bild II.18 | Wellrohrtauscher mit angeschweißter Glatrohrwanddurchführung / EPDM-Tülle |

| | |
|--------------------|---|
| Bild II.19 | Wellrohr direkt durch EPDM-Tülle geführt (Anschluss mittels Überwurfmutter) |
| Bild II.20 | Doyma-Wanddurchführung, unmontiert |
| Bild II.21 | Wanddurchführung neu |
| Bild II.22 | Durchführung durch stark gekrümmte Wandung ($\varnothing=700$ mm), undicht |
| Bild II.23 | Wellrohranschluss an Wanddurchführung |
| Bild II.24 | Durchführung durch fast ebene (leicht gekrümmte) Fläche |
| Bild II.25 | Spezialsteckschlüssel für Wandverschraubung |
| Bild II.26 | Hüllrohr für Doyma-Wandführung, laminiert |
| Bild II.27 | Doyma-Wanddurchführung mit Rohrleitungen |
| Bild II.28 | modifizierter Wellrohranschluss für Doyma-Wanddurchführung |
| Bild II.29 | Funktionsmodul mit Anschlüssen |
| Bild II.30 | Vormontage Wanddurchführungen |
| Bild II.31 | Anschluss an Energiesysteme des Labors |
| Bild II.32 | Füllstandanzeige, konventionell |
| Bild II.33 | elektronische Füllstandmessung |
| Bild II.34 | elektronische Füllstandmessung/Prinzip |
| Bild II.35 | Einstiegsmodul |
| Bild II.36 | Einstiegsmodul |
| Bild II.37 | Einstiegsmodul im Dach |
| TB1.Bild 89 | Viertelmodell / Sicht auf Innenseite |
| TB1.Bild 90 | Viertelmodell / Sicht auf Außenseite |
| TB1.Bild 91 | Eckmodule ohne PUR-Kern. Sicht auf Innenseite |
| TB1.Bild 92 | Eckmodule ohne PUR-Kern. Sicht auf Innenseite |
| TB1.Bild 93 | Eckmodule ohne PUR-Kern. Sicht auf Außenseite |
| TB1.Bild 94 | Boden- und Deckmodule |
| TB1.Bild 95 | Seitenwand-Module |
| TB1.Bild 96 | Materialhauptachsenrichtung x im Eckmodul-GFK-Mantel |

- TB1.Bild 97** Materialhauptachsenrichtung x im Bodenmodul-GFK-Mantel
- TB1.Bild 98** Materialhauptachsenrichtung x im Seitenwandmodul-GFK-Mantel
- TB1.Bild 99** Einbindung der GFK-Versteifung (hellblau) in den Seitenwandmodul sowie die Alu-Schiene (braun) in den Eckmodul. Hellrosa: GFK- Mantel der Module
- TB1.Bild 100** LF2: Spannungen σ_{yz} und σ_{xz} [N/mm²] im PUR-Hartschaum
- TB1.Bild 101** LF3: Resultante Verschiebung $v_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] der GFK Modul-Mäntel (Darstellung ohne PUR- Kern)
- TB1.Bild 102** LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modul-Mänteln (Rückseite)
- TB1.Bild 103** LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Module. Rechts: Ausschnitt
- TB1.Bild 104** LF3: Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den Klebschichten des Deck- und Bodenmoduls
- TB1.Bild 105** LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den 0.2mm starken Reinharz-Schichten in den Eckmodul- „Nasen“ und im Rand des Deck- und Bodenmoduls
- TB1.Bild 106** LF3: Spannungen σ_{yy} [N/mm²] im GFK-Versteifungsprofil und dem AlMgSi-Profil (von der Rückseite gesehen). Rechts: Ausschnitte
- TB1.Bild 107** LF3: Vertikale und horizontale Spalte in der äußeren Behälterwand rundum zwischen Seitenwand- und Eckmodul
- TB1.Bild 108** LF4: Resultante Verformung $v_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Wärmespeichers bei zusätzlichem Innendruck von 0.05bar
- TB1.Bild 109** LF5: Resultante Verformung $v_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Wärmespeichers bei zusätzlichem Innendruck von 0.10bar
- TB1.Bild 21** Halbmodell mit Einstiegschacht und Durchführungen
- TB1.Bild 22** Seitenwand-Modul mit Durchführungen. Innen- und Außenansicht
- TB1.Bild 23** Einstiegschacht mit Andeutung der realen Wanddicken
- TB1.Bild 24** Durchführung, vergrößert dargestellt
- TB1.Bild 25** LF1, Vertikal-Verformung u_z [mm] des Speichers unter Eigengewicht und 75 kg Mannlast neben dem Einstiegschacht.(Verformung nicht maßstäblich!)
- TB1.Bild 26** LF2, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck und 75kg-Mannlast. (Verformung maßstäblich!)
- TB1.Bild 27** LF2, Spannungen σ_{xz} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung maßstäblich!)
- TB1.Bild 28** LF3, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 75kg-Mannlast. (Verformung maßstäblich!)
- TB2.Bild 29** LF3, Ort der maximalen Spannung σ_{xx} [N/mm²] aller Lamine

- TB2.Bild 30** LF3, Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)
- TB2.Bild 31** LF3, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)
- TB2.Bild 32** LF3, Spannungen σ_{xy} [N/mm²] in der Kleberschicht zwischen Boden- / Deck-Modul und Eckmodulen
- TB2.Bild 33** LF4, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydro statischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 0.05bar Innendruck (Verformung maßstäblich!)
- TB2.Bild 34** LF4, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)
- TB2.Bild 35** LF5, Resultierende Verformung u_R [mm] des Speichers unter Eigengewicht, Hydrostatischem Wasserdruck, Innentemperatur 95°C und 0.1bar Innendruck (Verformung maßstäblich!)
- TB2.Bild 36** LF5, Spannungen σ_{xz} und σ_{xy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände (Verformung nicht maßstäblich!)
- TB3.Bild 37** Halbmodell mit Einstiegschacht und Durchführungen Variante IV
- TB3.Bild 38** Seitenwand-Modul mit Durchführungen Variante IV. Innen- und Außenansicht
- TB3.Bild 39** Durchführung Variante IV vergrößert dargestellt
- TB3.Bild 40:** Links: Modell-Ausschnitt. Rechts: Vergrößerung mit Klebfuge. Dicke $t=1\text{mm}$
- TB3.Bild 41** LF1: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich
- TB3.Bild 42** LF2: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{zx} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich
- TB3.Bild 43** LF3: Resultierende Verformungen u_R [mm] und maximale Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den Mantel-Laminaten. Verformungen nicht maßstäblich
- TB3.Bild 44** LF3: Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich
- TB3.Bild 45** LF3: Spannungen σ_{xy} und σ_{yz} [N/mm²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich
- TB3.Bild 46** LF3: Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den Klebschichten zwischen Boden- / Deckmodul und Eckmodulen. (Vergleiche Ausschnitt Bild 40)

| | |
|---------------------|---|
| TB3.Bild 47 | LF4: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{xy} [N/mm ²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich |
| TB3.Bild 48 | LF5: Resultierende Verformungen u_R [mm] und Spannungen σ_{xy} [N/mm ²] in den PUR-Kernen der Speicherwände. Verformungen nicht maßstäblich |
| TB4.Bild 110 | Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum und ohne Seitenwand-Mantel-Lamine |
| TB4.Bild 111 | Seitenwände mit Kassetten-Stegen und Klebspachtel-Rändern (dunkelblau) im PUR-Raum. Darstellung mit ergänztem Innenlaminat |
| TB4.Bild 112 | Verformung u_x [mm] maßstäblich (Vertikalschnitt) |
| TB4.Bild 113 | Verformung u_x [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt) |
| TB4.Bild 114 | Verformung u_y [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt) |
| TB4.Bild 115 | Spannungen σ_{xy} [N/mm ²] im PUR-Hartschaum des Speichers aus zwei Perspektiven |
| TB4.Bild 116 | Spannungen σ_{xy} [N/mm ²] im Klebspachtel an den Rändern der Stege |
| TB4.Bild 117 | Spannungen σ_{xx} [N/mm ²] und σ_{yy} [N/mm ²] in den Stegen und den ergänzten Innenlaminaten |
| TB4.Bild 118 | Links: Ausschnitt des Modells, ohne PUR-Hartschaum in den Seitenwänden dargestellt. Rechts: Vergrößerung mit Verklebungsfuge |
| TB4.Bild 119 | Spannungen σ_{xx} und σ_{zz} [N/mm ²] des Klebers in den Klebfugen |
| TB4.Bild 120 | Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum in den Seitenwänden und ohne Seitenwand-Mantel-Lamine, jedoch mit der zusätzlichen Glasschaum-Isolation (links außen) |
| TB4.Bild 121 | Seitenwände mit Kassetten-Stegkreuz und Klebspachtel-Rändern (grün) im PUR-Raum. Darstellung mit ergänztem Innenlaminat |
| TB4.Bild 122 | Verformung u_x [mm] maßstäblich (Vertikalschnitt). Darstellung ohne Glasschaum |
| TB4.Bild 123 | Verformung u_x [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt). Darstellung ohne Glasschaum |
| TB4.Bild 124 | Verformung u_y [mm] maßstäblich (Horizontalschnitt). Darstellung ohne Glasschaum |
| TB4.Bild 125 | Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} [N/mm ²] im Glasschaum der Seitenwände |
| TB4.Bild 126 | Spannungen σ_{xy} [N/mm ²] im PUR-Hartschaum des Speichers aus zwei Perspektiven |
| TB4.Bild 127 | Spannungen σ_{xy} [N/mm ²] im Klebspachtel an den Rändern der Stege |

| | |
|---------------------|--|
| TB4.Bild 128 | Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm ²] in den Stegen und den ergänzten Innenlaminaten |
| TB7.Bild 129 | Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum und ohne Seitenwand-Mantel-Laminare |
| TB7.Bild 130 | Resultante maßstäbliche Verformungen $u_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Halbmodells |
| TB7.Bild 131 | Vertikalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm] |
| TB7.Bild 132 | Horizontalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm] |
| TB7.Bild 133 | Horizontalschnitt, maßstäbliche Verformung u_y [mm] |
| TB7.Bild 134 | Links: Ausschnitt des Modells. Rechts: Vergrößerung mit Verklebungsfuge |
| TB7.Bild 135 | Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} und σ_{zx} [N/mm ²] im Klebharz der maximal beanspruchten Klebfuge zwischen Boden-/Deckmodul und Eckmodulen |
| TB7.Bild 136 | Darstellung des Speichers ohne PUR-Hartschaum in den Seitenwänden und ohne Seitenwand-Mantel-Laminare, jedoch mit der zusätzlichen Glasschaum-Isolation (links außen) |
| TB7.Bild 137 | Resultante maßstäbliche Verformungen $u_R = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$ [mm] des Halbmodells |
| TB7.Bild 138 | Vertikalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm]. Darstellung ohne Glasschaum |
| TB7.Bild 139 | Horizontalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_x [mm]. Darstellung ohne Glasschaum |
| TB7.Bild 140 | Horizontalschnitt. Maßstäbliche Verformung u_y [mm] - Darstellung ohne Glasschaum |
| TB7.Bild 141 | Spannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} und σ_{zx} [N/mm ²] im Klebharz der maximal beanspruchten Klebfuge zwischen Boden-/ Deckmodul und Eckmodulen |
| TB7.Tab. 35 | Kurzzeit-Kennwerte für die Materialhauptachsen |
| TB7.Tab. 36 | Abminderungsfaktoren für die Materialsteifigkeiten |
| TB7.Tab.37 | Abminderungsfaktoren für die Materialfestigkeiten |
| TB7.Tab.38 | Für den Lastfall LF4 verwendete Langzeitkennwerte |
| TB7.Tab.39 | Ergebnisse der Variante 2, Seitenwand II, Entwurf 7, LF4 |
| TB7.Tab.40 | Maximale Verformungen der Seitenwände |
| TB7.Tab.41 | Ergebnisse der Variante 3, Seitenwand III, Entwurf 4, LF4 |
| Abb. III.1.1 | Integral - Wärmespeicher- ARGE Modulbauweise (Bodenwanne + Abdeckung) |

- Abb. III.1.2** Nach Vorlagen von Prof. B. Knauer auf Basis der ARGE - Patentanmeldung DE 10 2012 020 448.5 gezeichnet mit 8 x „Dreibein“ als Hauptgestaltungselement für den 4 m³ Labor-Wärmespeicher
- Abb.III.1.3** Varianten von Modulverbindungsmöglichkeiten mit Bewertungen nach dem K.O.- Kriterium sowie einer Punktskala
- Abb.III.7.4** Gestaltungsbeispiel für Halbschalen Verbindungen am Eck- und Bodenmodul
- Abb.III.1.5** Einlamierte Alu-Profilschienen und Metallschrauben als Verbindungsmittel für die auswechselbaren Seitenwandmodule
- Abb.III.8.1** Innen- und Außenschale eines Eckmoduls nach der Verklebung und vor dem Ausschäumen
- Abb.III.9.1** Innen- und Außenschale eines Eckmoduls nach der Verklebung und vor dem Ausschäumen
- Abb. 2.8** Deckelmodul (Einstiegschacht)
- Abb. 2.9** Verbindung der Eckmodule mittels Einsteckteilen und Überlaschungen
- Abb. 2.10.** 1. Lochbild für die Durchführungen beim Seitenwandmodul (Funktionsmodul)
- Abb. 2.11.** Variante für die Medienanschlüsse und die Durchführung durch das Funktionsmodul
- TB4.Abb. 3.1** Seitenwandmodul V II (Entwurf 6)
- TB4.Abb. 3.2** Seitenwandmodul V III (Entwurf 2)
- TB4.Abb.3.3** Zur Ausführung gekommene V II (Entwurf 7)
- TB4.Abb.3.4** Zur Ausführung gekommene V III (Entwurf 4)

Darstellungen

- Darstellung1** Halbmodell des 4m³ Labor-Wärmespeicher
- Darstellung2** 4m³ LABOR-- WÄRMESPEICHER - Durchführungen: Variante IV

Abbildungen auf Seite 279 bis Seite 329

- Abb. 3.5** Entformte Innenschalen der „Dreibein- Eck-Elemente
- Abb. 3.6** Nach dem Verbinden der Innen- mit der Außenschale durch Überlappung und Ausschäumen mit PUR entstandene Ecke
- Abb. 3.7** Fertiger Eckmodul vor dem Beschneiden sowie vorgefertigte Außenschale (I) für Seitenwandmodul
- Abb. 3.8** Demonstration des Innenaufbaues bei der V III Seitenwand
- Abb. 3.9** Demonstration der VIP – Elemente – Einbringung in V II
- Abb. 3.10** Verschuß der VIP – Elemente zum Rand und zur inneren Deckschicht
- Abb. 3.11** Entformte Außenschale für Boden- bzw. Deckelmodul
- Abb. 3.12** Verschuß der ausgeschäumten Außenschalen mit dem Traglaminat im Naßverfahren
- Abb. 3.13** Vorbereitung: Bereitstellung aller GFK – Einzel-Module
- Abb. 3.14** Verbindungsaufbau der Eckmodule mit PUR – Dübeln
- Abb. 3.15** Zusammengesteckte Dreibeinmodule als Speicherunterteil
- Abb. 3.15** Zusammengesteckte Dreibeinmodule als Speicherunterteil
- Abb. 3.17** Zum Einbau vorbereiteter Seitenwandmodul V II
- Abb. 3.18** Einbau (und verspachteln) des Bodenmoduls nach dem Einfügen (beachte Distanzkeile) in den Rahmen aus Schenkeln der Eckmodule
- Abb. 3.19** Deckelmodul mit Mannloch - Fertig zum Einbau in Speicher
- Abb. 3.20** Fugenvorbereitung zum Einbringen des Deckelmoduls
- Abb. 4.1** Freigabe des Musterspeichers für die Vermessung am 02.09.2014
- Abb. 4.2** Abnahmeversuch mit Laborspeicher für LF6
- Abb. 4.3** Vermessung der Auswölbung im rechtwinkligen Koordinaten- system (im Blickfeld die auswechselbare Wand)
- Abb. 4.4** Undichtheiten nach Ersteinbau von V I (2. Septemberhälfte 2014
- Abb. 4.5** Rißbildung beim Überlaminat durch Nachrutschen von VI in Richtung Falz
- Abb. 4.6** Ausbau von Wechselmodul V I und nachfolgend Einbau von V II (14.01.2015

| | |
|----------------------|--|
| Abb. 4.7 | Rückkriechen von Seitenwandmodul V II nach dem Entleeren (11.03.2015) |
| Bild 142 | Aufstellort und Ausrichtung des Wärmespeichers (Quelle: TU I) |
| Bild 143 | Messpunkte auf zwei Seitenwänden des Wärmespeichers |
| Bild 144 | Seitenwandmodul-Varianten I, II und III |
| Bild 145 | Außentemperaturen während der Wärmespeicher- |
| Belastung und | Messung (Quelle: TU I) |
| Bild 146 | Maximale Auslenkung der festen Seitenwände der Variante |
| I | |
| Bild 147 | Maximale Auslenkung der lösbaren Seitenwände der Varianten I, II und III |
| Bild 148 | Wärmespeicher Variante I, feste Seitenwand, Belastung: EG+HWD+0.05bar Innendruck, Gestrichelte Linien folgen |
| aus | Rechnung. |
| Bild 149 | Halbmodell des 3 m³ Wärmespeichers |
| Bild 150 | Resultante Verformungen des offenen Speichers. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Darstellung nicht maßstäblich |
| Bild 151 | Resultante Verformungen des geschlossenen Speichers. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Darstellung maßstäblich. |
| Bild 152 | Resultante Verformungen des geschlossenen Speichers ohne die geteilten Abdeckmodule und ohne PUR-Kerne. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Darstellung maßstäblich |
| Bild 153 | Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. |
| Bild 154 | Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. |
| Bild 155 | Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Mänteln der Abdeckmodule. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. |
| Bild 156 | Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den GFK-Mänteln der Abdeckmodule. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. |
| Bild 157 | Spannungen σ_{yy} und σ_{zz} [N/mm²] in den PUR-Kernen. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. |
| Bild 158 | Ausschnitt des Wärmespeichers. Rechts Vergrößerung mit Klebfugen zwischen Seitenwand und Bodenmodul. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. |
| Bild 159 | Spannungen $\sigma_{xx}\sigma_{yy}$ und σ_{zz} [N/mm²] in den Klebfugen zwischen Seitenwand- und Bodenmodul. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Seitenwandmodul: $l_{\ddot{u}}=90\text{mm}$ |

- Bild 160** Spannungen $\sigma_{xx}\sigma_{yy}$ und σ_{zz} [N/mm²] in den Klebfugen zwischen Seitenwand- und Bodenmodul. Lastfall LF3: EG+HWD+T95. Seitenwandmodul: $l_{\ddot{u}}=125\text{mm}$
- Abb.5.3.** Vierbein – Modul als Bindeglied für die Boden- und Seitenwandmoduln
- Bild 161** Viertelmodell des 20 m³ Wärmespeichers mit offenen Abdeckungen und offener Revisionsöffnung
- Bild 162** Viertelmodell des 20 m³ Wärmespeichers mit geschlossenen Abdeckungen sowie Durchführungen für Be- und Entladung. Darstellung ohne PUR-Hartschaum.
- Bild 163** Dreibein- und Vierbein-Module mit PUR-Hartschaum-Füllung
- Bild 164** Klebharz-Schichten der Dreibein- und Vierbein-Module zur Verklebung mit den Seitenwand- und Bodenmodulen. Dicke: 1mm
- Bild 165** Resultante Verformungen u_R [mm] des Wärmespeichers unter dem Lastfall 3: EG+HWD+T95. Darstellung nicht maßstäblich.
- Bild 166** Resultante Verformungen u_R [mm] des Wärmespeichers unter dem Lastfall 3: EG+HWD+T95. Darstellung nicht maßstäblich.
- Bild 167** Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 168** Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den GFK-Modulmänteln. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 169** Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den PUR-Hartschaum-Kernen. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 170** Spannungen σ_{yz} [N/mm²] in den PUR-Hartschaum-Kernen. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 171** Spannungen σ_{xx} [N/mm²] in den Klebharzschichten. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 172** Spannungen σ_{yy} [N/mm²] in den Klebharzschichten. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 173** Spannungen σ_{xx} [N/mm²] im GFK-Mantel des Verschlussmoduls. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 174** Spannungen σ_{yy} und σ_{zz} [N/mm²] im Stahlrahmen der Revisionsöffnung. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 175** Spannungen σ_{xx} [N/mm²] im GFK-Mantel der Abdeckmodule. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 176** Spannungen σ_{yy} [N/mm²] im GFK-Mantel der Abdeckmodule. Lastfall 3: EG+HWD+T95.
- Bild 177** Lokale Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} [N/mm²] der Rohrdurchführungen und im PUR- Hartschaum

