

DELPHIN 6 TUTORIAL

FMI Co-SIMULATION MIT DELPHIN 6

5. November 2019

Zusammenfassung

DELPHIN Modelle können als *Functional Mock-up Units* (FMU) exportiert werden, welche den FMI Standard in der Version 2 unterstützen. In dieser Anleitung werden die wesentlichen Schritte für die Konfiguration und den Export von solchen Simulationsmodellen exemplarisch an einem Rohrkollektormodell gezeigt. Weiterhin wird die Verwendung einer DELPHIN FMU im Co-Simulationsmaster MASTERSIM gezeigt.

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick über FMI Co-Simulation und DELPHIN FMU Funktionalität	2
1.1	FMI Co-Simulation	2
1.2	Unterstützte FMI-Funktionalität in DELPHIN FMUs	2
2	Co-Simulations-Workflow	2
3	Exportprozedere	3
3.1	Eingangsvariablen	3
3.1.1	Standardwerte für Eingangsvariablen	3
3.2	Ausgabe-/Ergebnisvariablen	3
3.3	FMU Export	4
3.3.1	Einheiten der FMI-Variablen	4
4	Co-Simulations-Beispiele	5
4.1	Geteilte Wand	5
4.1.1	Export der kompletten Wand als FMU	6
4.1.2	Import der DELPHIN FMU mit dem kompletten Wandmodell in das Co-Simulationsmasterprogramm MASTERSIM	7
4.1.3	Import des linksseitigen Wandmodells und Testrechnung mit vorgegebenen externen Temperaturen	9
4.1.4	Import des rechtsseitigen Wandmodells und Verwendung einer Signalinverter-FMU	11

1 Überblick über FMI Co-Simulation und DELPHIN FMU Funktionalität

1.1 FMI Co-Simulation

Der *Functional Mock-up Interface (FMI)* Standard¹ definiert eine Laufzeitschnittstelle für den Datenaustausch von gekoppelten, dynamischen Simulationsprogrammen. Zusätzlich wird der Inhalt und das Format einer Beschreibungsdatei definiert, sowie einer Verzeichnisstruktur für die auszutauschenden Daten. Durch diese Standardisierung vormals proprietärer Schnittstellen, ist es nun möglich, Simulationsmodelle unterschiedlichster Simulationsumgebungen miteinander zu koppeln.

Es gibt zwei Operationsmodi:

FMI for ModelExchange Es werden Bilanzgleichungen implementiert und ein zentraler ModelExchange-Master führt eine gekoppelte Zeitintegration der Differentialgleichungen aller gekoppelter FMUs geschlossen aus. Da bei Simulationsprogrammen wie DELPHIN sehr viele gekoppelte Differentialgleichungen entstehen, ist für eine effiziente Zeitintegration die jeweilige modellspezifische Struktur in das Lösungsverfahren einzubeziehen (konkret die Unterstützung von schwach besetzten Jacobi-Matrizen). Ein generisches ModelExchange-Masterprogramm ohne diese Systemkenntnis hat fast zwingend eine (viel) schlechtere Performance. Daher ist für DELPHIN Anwendungen die Nutzung von ModelExchange nicht zielführend. Die von DELPHIN exportierten FMUs sind nichtsdestotrotz auch für diesen Operationsmodus verwendbar.

FMI for CoSimulation Jedes Simulationsmodell funktioniert ähnlich eines selbständig funktionierenden Simulationsmodells und verfügt über einen eigenen Zeitintegrator. Im Unterschied zur alleinstehenden Ausführung wird bei der CoSimulation die Simulation nach Ablauf eines Kommunikationsintervalls unterbrochen und der Co-Simulationsmaster kann Daten zwischen FMUs austauschen. Das Unterbrechen der Simulation und punktuelle aktualisieren der Eingangsvariablen führt je nach Zeitintegrationsalgorithmus zu einem gewissen Overhead, jedoch kann innerhalb einer jeden FMU das jeweilig optimale Zeitintegrationsverfahren implementiert werden. Für DELPHIN-Anwendungen ist diese Kopplungsschnittstelle empfehlenswert.

1.2 Unterstützte FMI-Funktionalität in DELPHIN FMUs

DELPHIN unterstützt eine Reihe von FMI-Funktionalitäten. Bei der Co-Simulation sind das:

- variable Kommunikationsschrittweiten
- konstante Inputvariablen
- konstante Ausgabevariablen
- Rücksetzfunktionalität
- Serialisierungsfunktionalität

2 Co-Simulations-Workflow

Um mit DELPHIN eine Co-Simulation durchzuführen, ist folgende Vorgehensweise vorgesehen:

1. Definieren/Anpassen des DELPHIN Modells, und ggfs. alleinstehende Berechnung mit konstanten/vorgegebenen Eingangsgrößen
2. Festlegen der Eingangsvariablen und Ausgangsvariablen
3. Exportieren der FMU (dabei ggfs. Aktualisieren einer vorhandenen FMU)
4. Öffnen eines Co-Simulations-Masters (bspw. MASTERSIM)
5. Konfigurieren des Simulationsszenarios/Verknüpfen der Variablen
6. Durchführen und Analysieren der Simulation

Bei Änderungen am DELPHIN Modell sind die Schritte 1-3 zu wiederholen.

¹<https://fmi-standard.org>

3 Exportprozedere

3.1 Eingangsvariablen

Alle Eingangsvariablen, welche später der FMU vom Masterprogramm übergeben werden, sind im DELPHIN Klimabedingungen. Klimabedingungen (*engl. ClimateCondition*) können als Zeitreihen in Randbedingungen und Quellen-/Senkenmodellen verwendet werden. Damit bei FMU Export eine Klimabedingung als Eingangsvariable definiert wird, muss die Art (Zeitverlauf) im Klimabedingungsdialog auf *Von einem anderen Modell generiert [External]* gestellt werden (Abb. 1).

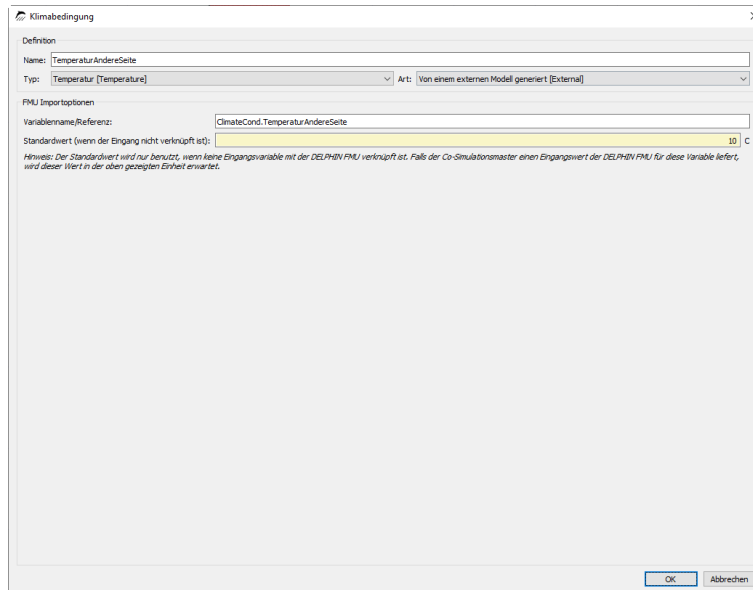


Abbildung 1: Klimabedingungsdialog, Definition einer FMI-Eingangsvariable. Der FMI-Variablenname ist stets die Form `ClimateCond.<Name>` und die Einheit ist je nach physikalischer Größe vorgegeben.

Jede Klimabedingung, die mit *Art=External* definiert wurde, erscheint später als Schnittstellenvariable in der FMU, allerdings nur, wenn die Klimabedingung auch irgendwo benutzt wird. Die physikalische Einheit ist für jede physikalische Größe fest vorgegeben und kann beim Export nicht geändert werden. Entsprechend muss bei der Verknüpfung unterschiedlicher FMUs auf korrekte Einheiten geachtet werden, und gegebenenfalls die Einheit in einer FMU umgerechnet werden.

Der FMI-Variablenname setzt sich stets aus dem Namen der Klimabedingung und dem Präfix „`ClimateCond.`“ zusammen.

3.1.1 Standardwerte für Eingangsvariablen

Jede FMI-Eingangsvariable muss einen Standardwert erhalten, welcher dann verwendet wird, wenn vom Co-Simulationsmaster kein Wert gegeben wird, d.h. wenn diese Variable nicht mit Ausgangsvariablen anderer FMUs verknüpft wurde. Die Einheit dieses Parameters ist im Klimabedingungsdialog je nach physikalischer Größe festgelegt und definiert damit auch die Einheit der Variable, welche an die FMU übergeben wird. Im Beispiel in Abb. 1 wird die Eingangsvariable in Grad Celcius erwartet.

3.2 Ausgabe-/Ergebnisvariablen

FMU Ergebnisvariablen werden automatisch generiert, und zwar nach folgenden Regeln:

- Für jede Ausgabedatei, welche einen skalaren Wert ergibt, wird automatisch eine gleichnamige Ausgabevariable erstellt. Skalare Ausgaben werden bspw. bei Sensorwerten erhalten, d.h. Ausgabegrößen, die an einer Koordinate oder in einer einzigen Zelle ausgewählt sind, oder von Raumintegralen/Mittelwerten.
- Zudem werden bei bestimmten Modellen zusätzliche skalare Ergebnisgrößen generiert, welche nicht direkt zugewiesen werden. Ein Beispiel dafür ist das Rohrkollektormodell: Randbedingung *Wärmeleitung*, Art *Wärmeaustausch zu einem durchströmten Rohr [PipeCollectorModel]*. Bei der Definition dieser Randbedingung

können diese zusätzlichen Ausgaben aktiviert werden (siehe Abb. 2). Diese Ausgaben erscheinen dann auch als Ausgabegrößen der FMU.

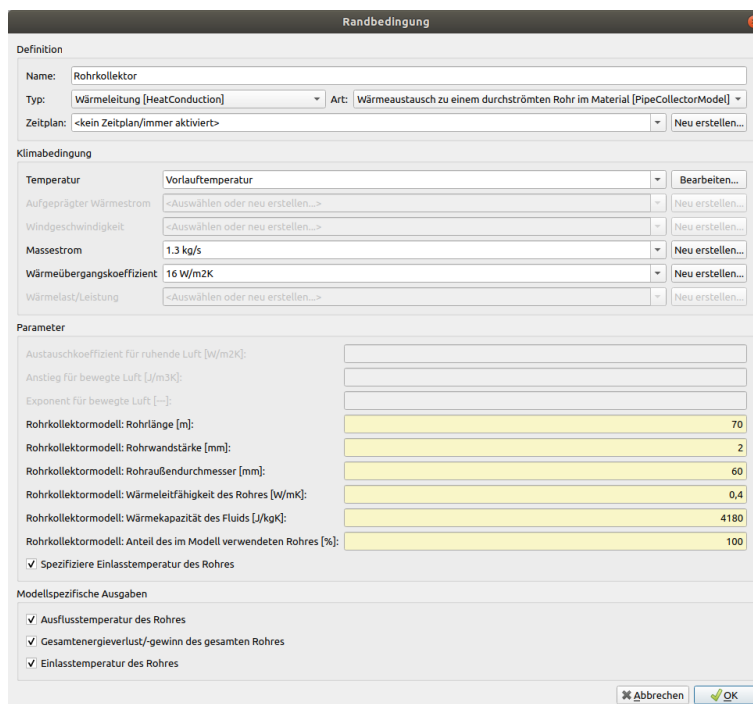


Abbildung 2: Randbedingungsdefinitionsdialog. zusätzliche Ausgaben dieser speziellen Randbedingung sind aktiviert (PipeCollectorQdot, PipeCollectorT0, PipeCollectorTr)

3.3 FMU Export

Eine FMU wird mit `Datei->Exportiere Functional Mock-up Unit...` erstellt. Es öffnet sich der Export-Dialog (Abb. 3). In diesem Dialog kann der Modellname und der Pfad zur Ausgabedatei eingestellt werden. Außerdem enthält der Dialog eine Übersicht über alle automatisch exportierten Ein- und Ausgabegrößen, d.h. FMU Variablen-

Die FMU Variablenamen dürfen keine Leerzeichen enthalten, daher werden alle Leerzeichen durch `_` ersetzt. Im gezeigten Beispiel sind die Ausgabedateidefinitionen `Temperatur 0.5 m` und `Temperatur 1.0 m` entsprechend in `Temperatur_0.5_m` und `Temperatur_1.0_m` umbenannt worden.

Nach Bestätigung des Dialogs mit „FMU Erstellen“ kann die FMU in einem Co-Simulationsmasterprogramm verwendet werden.

3.3.1 Einheiten der FMI-Variablen

Die Einheiten für die FMI Schnittstellenvariablen sind im Fall von Eingabevariablen je nach physikalischer Größe festgelegt (siehe Abschnitt 3.1.1). Bei automatisch generierten Ausgabevariablen (siehe Beispiel Rohrkollektor oben) sind die Einheiten ebenfalls je nach physikalischer Größe festgelegt.

Bei Ausgabevariablen wird die Einheit im Ausgabedefinitionsdialog festgelegt.

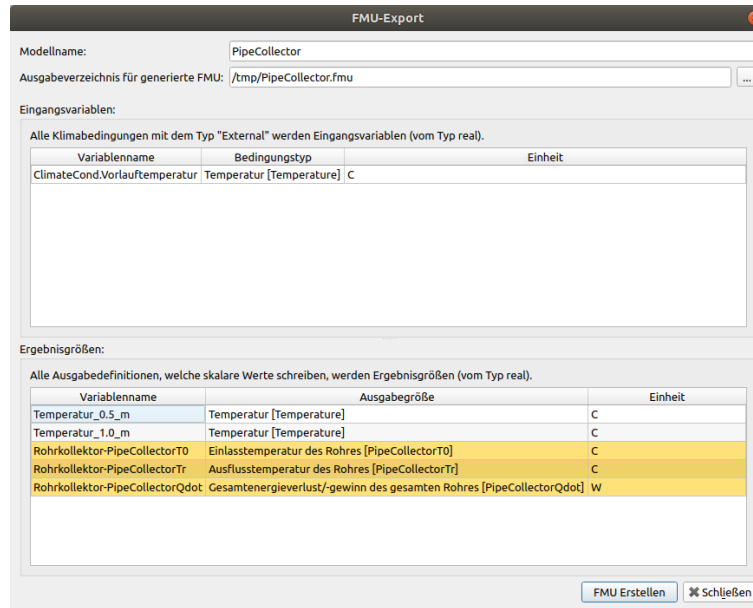


Abbildung 3: FMU-Exportdialog. In den Listen werden die Eingangsvariablen und Ergebnisvariablen gezeigt. Die gelb hinterlegten Ausgaben sind die aus speziellen Modellen generierten Ausgaben. Der Name dieser setzt sich aus dem Namen der Randbedingung/Feldbedingung zusammen (hier Rohrkollektor) und der physikalischen Größe. Die Einheiten der automatisch generierten Größen sind festgelegt. Die Einheiten der selbst definierten Ausgaben (hier Temperatur_0.5_m und Temperatur_1.0_m) entsprechen den im Ausgabedefinitionsdialog gewählten Einheiten.

4 Co-Simulations-Beispiele

Nachfolgend werden einige Co-Simulationsbeispiele gezeigt, um die Verwendung von DELPHIN FMUs zu demonstrieren.

4.1 Geteilte Wand

In diesem Beispiel wird eine einfache eindimensionale Wand mit Wärmeleitungsrandbedingungen und konstanten Temperaturen modelliert (siehe Abb. 4).

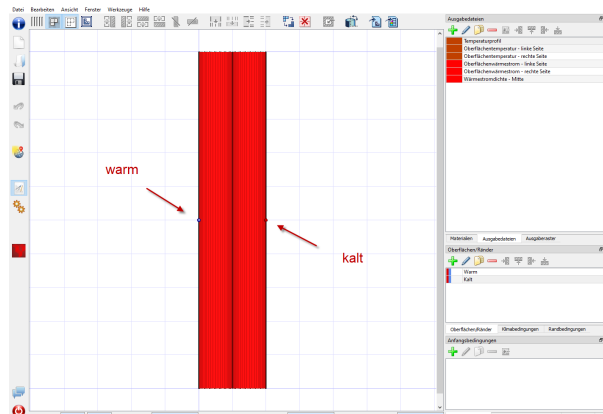


Abbildung 4: Modell der kompletten Wand

Diese wird dann in zwei einzelne Modelle geteilt (siehe Abb. 5).

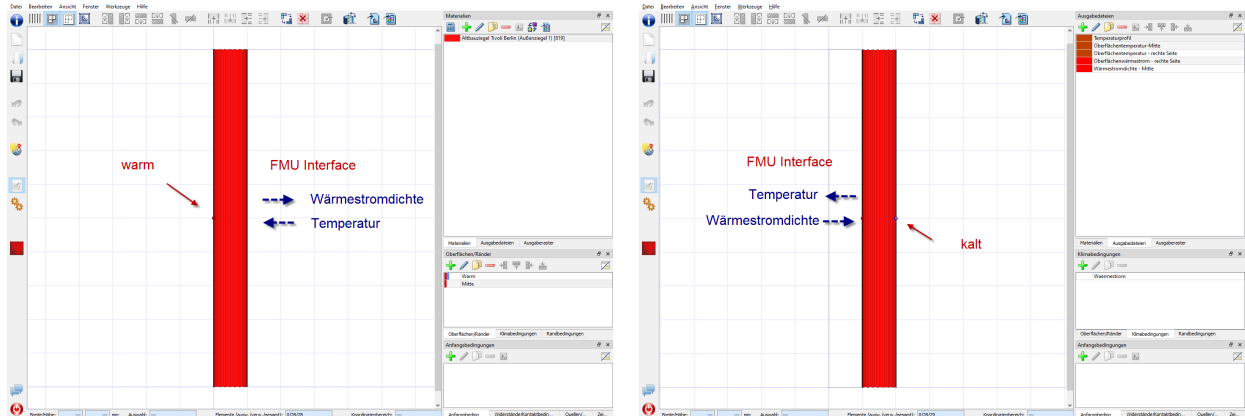


Abbildung 5: Modelle der linken und rechten Wandhälfte mit angezeigten FMU Schnittstellenvariablen

Die FMI-Schnittstelle der linken Wandhälfte (an der rechten Seite) erhält die Temperatur der anderen Wandseite als Eingangsgröße für die Wärmeleitungsrandbedingung, wobei 1000 W/mK als Wärmeübergangskoeffizient verwendet wird. Ausgabe ist die Wärmestromdichte über die rechte Wandseite. Wichtig ist hierbei zu berücksichtigen, dass der Wärmestrom *positiv in die Wand*, also entgegen der Koordinatenrichtung definiert ist.

Die FMI-Schnittstelle der rechten Wandhälfte (an der linken Seite) erhält einen aufgeprägten Wärmestrom und liefert die sich ergebende Oberflächentemperatur zurück. Auch hier ist ein positiver Wärmestrom in die Wand definiert, d.h. diesmal in Koordinatenrichtung. Bei der späteren Verknüpfung beider Wandhälften muss hier ein Vorzeichenwechsel berücksichtigt werden.

4.1.1 Export der kompletten Wand als FMU

Zunächst wird *testweise* das gesamte Wandmodell als FMU exportiert. Der FMU Exportdialog zeigt ausschließlich die automatisch generierten Ausgabegrößen. Bei Bestätigung des Dialogs wird die FMU am angegebenen Ort erstellt.

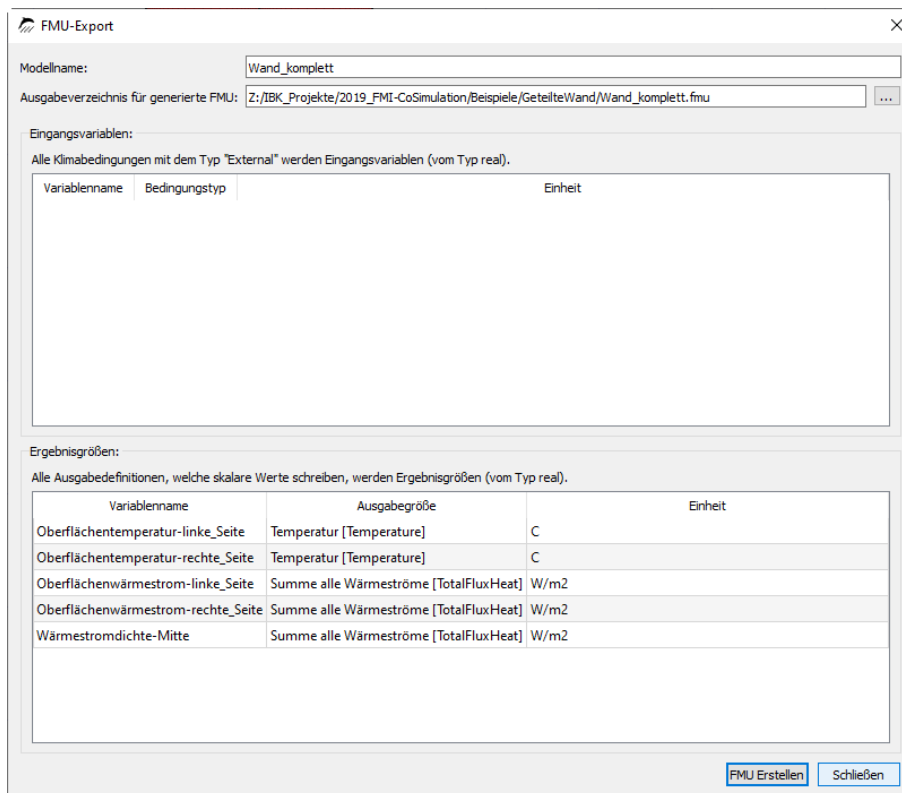


Abbildung 6: Export der kompletten Wand. Es gibt keine FMU Eingangsvariablen.

Hinweis: Die so exportierte FMU kann zunächst auf Fehler durch den ComplianceChecker getestet werden (siehe

<https://github.com/modelica-tools/FMUComplianceChecker>).

4.1.2 Import der DELPHIN FMU mit dem kompletten Wandmodell in das Co-Simulationsmasterprogramm MASTERSIM

MASTERSIM² ist ein kostenfreies Co-Simulationsmasterprogramm, welches zur gekoppelten Simulation verwendet werden kann. Allgemein ist der erste Schritt das Aufsetzen eines Simulationsszenarios und der Import einer FMU, z.B. der DELPHIN FMU, in das Co-Simulations-Masterprogramm. Nach Erstellen eines neuen Simulationsprojekts und speichern der Projektdatei wird zunächst die FMU des kompletten Wandmodells in MASTERSIM importiert³. Abbildung 7 zeigt die Programmoberfläche von MASTERSIM, in der Simulatoransicht mit importierter FMU, nach Import und Bearbeitung im Block-Editor-Dialog. Wird dieser Schritt übersprungen, so zeigt die Oberfläche nur eine rote Box mit Namen des Simulators.

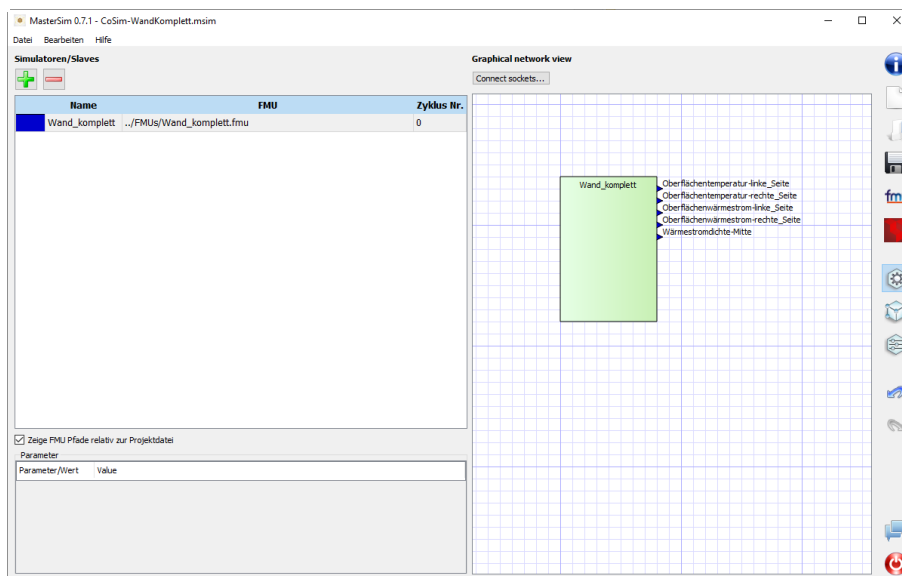


Abbildung 7: Co-Simulationsumgebung MASTERSIM mit der importierten FMU des kompletten Wandmodells.

Bei dieser ersten Co-Simulationsberechnung werden keine Variablen verknüpft und die Simulation kann sofort durchgeführt werden. Als Simulationseinstellungen werden die Standardeinstellungen verwendet: GAUSS-JACOBI, 1 Iteration (d.h. keine Iteration), keine Zeitschrittanpassung. Als Simulationszeit wird 5 Tage eingestellt und 10 Minuten als Kommunikationsschritt gewählt (Abb. 8).

²<https://bauklimatik-dresden.de/mastersim>

³Die Verwendung der graphischen Schematik und des Blockeditors ist optional. Ein Co-Simulationsszenario kann auch komplett ohne grafische Darstellung definiert werden.

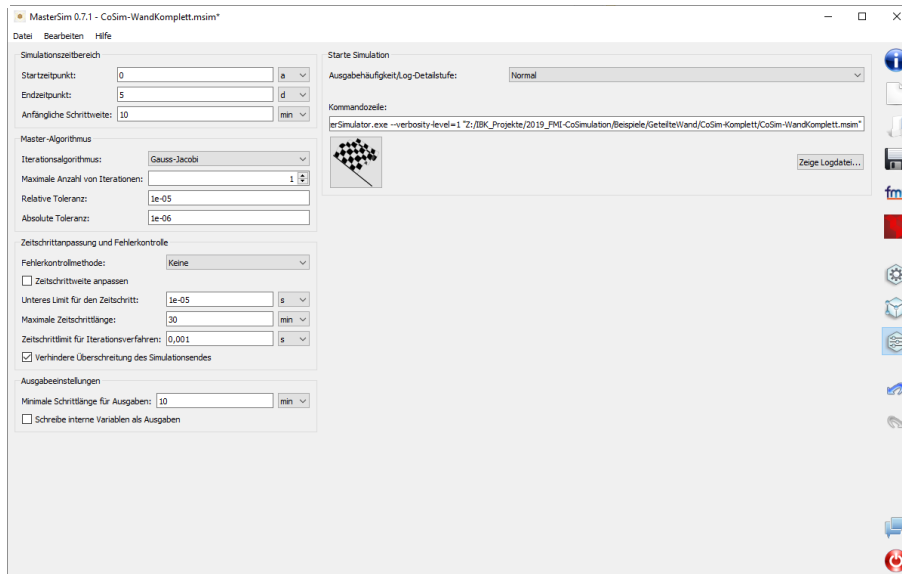


Abbildung 8: Co-Simulationsumgebung MASTERSIM mit Simulationseinstellungen für das komplette Wandmodell.

Die Simulation kann nun gestartet werden. Bei der Simulation wird bei diesem Beispiel folgende Verzeichnisstruktur angelegt (Abb. 9).

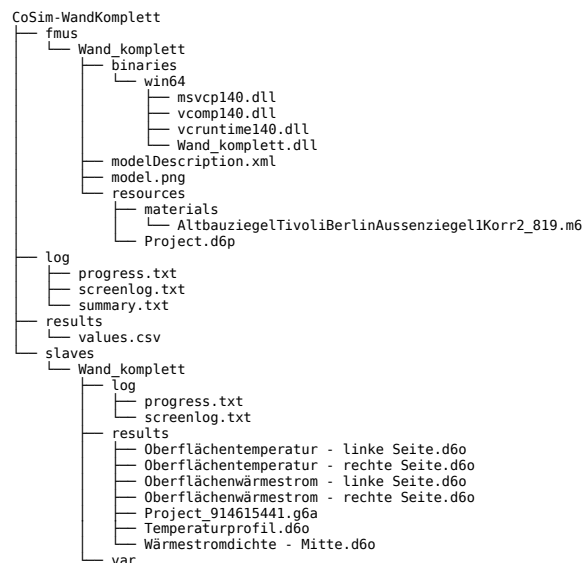


Abbildung 9: Verzeichnisstruktur, welche von MASTERSIM beim Simulieren des Projects CoSim-WandKomplett.msims angelegt wird.

Im Unterverzeichnis `fmus` findet sich die entpackte FMU `Wand_komplett.fmu`. In den Verzeichnissen `log` und `results` finden sich die nativen Ausgaben und Logdateien von MASTERSIM. Und unterhalb von `slaves` werden die Ausgaben jedes einzelnen Simulationsmodells abgelegt. Das Verzeichnis `Wand_komplett` entspricht dem Ausgabeverzeichnis einer alleinstehend rechnenden DELPHIN Simulation.

Als erster Test können die Simulationsergebnisse der FMU Simulation und der alleinstehenden DELPHIN Rechnung verglichen werden. Abbildung 10 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der linksseitigen Wärmestromdichten, einmal mit einer alleinstehenden DELPHIN Simulation berechnet und einmal mit der FMU. Wie zu erwarten, sind die Ergebnisse nahezu identisch.

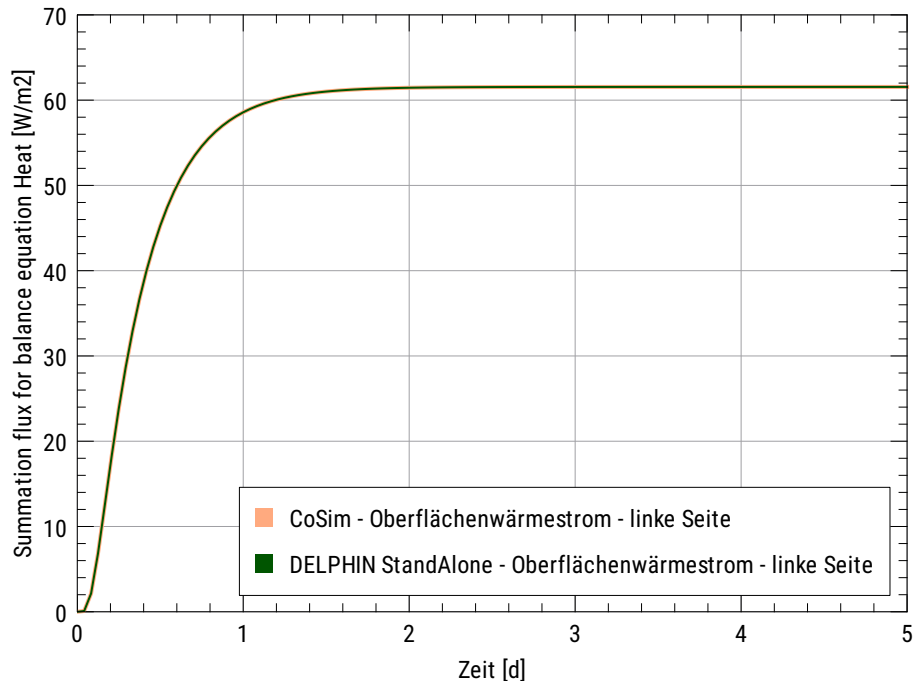


Abbildung 10: Vergleich der linksseitigen Wärmestromdichten zwischen alleinstehender DELPHIN Simulation und Ausführung von DELPHIN als FMU. Da bei diesem Beispiel noch keine Ein- und Ausgangsvariablen ausgetauscht werden, sollten die Ergebnisse bis auf minimale Rundungsabweichungen identisch sein.

4.1.3 Import des linksseitigen Wandmodells und Testrechnung mit vorgegebenen externen Temperaturen

Nun wird eine richtige Co-Simulation durchgeführt. Dazu wird ein neues MASTERSIM Projekt erstellt. Analog zum ersten Co-Simulationsprojekt wird nun die linksseitige Wand-FMU in ein neues MASTERSIM Projekt importiert. Abbildung 11 zeigt die importierte FMU mit der Eingangsvariable `ClimateCond.TemperaturAndereSeite` und der Ausgangsgröße `WärmestromdichteMitte`.

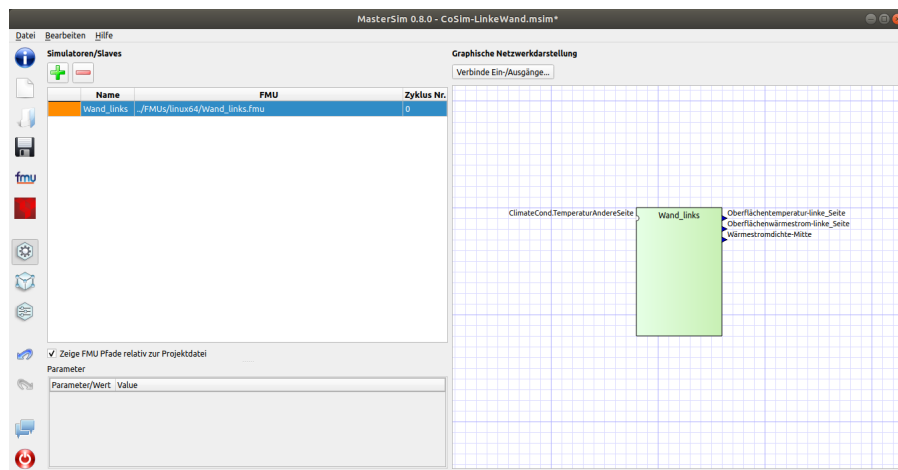


Abbildung 11: Co-Simulationsumgebung MASTERSIM mit der importierten linken Wand-FMU.

Zum Testen, ob die Wand FMU korrekt unter externer Vorgabe von Temperaturen korrekt rechnet (und Einheitenrechnungen korrekt durchgeführt werden), kann man eine Datei `TemperaturMitte.csv` anlegen, z.B. mit folgendem Inhalt:

Zeit [d]	Temperatur [C]
0	10
1	10
2	30
5	30

Die beiden Spalten in der Datei sind mit Tabulatorzeichen getrennt. Diese Datei kann nun wie eine FMU ins MASTERSIM importiert werden (Abb. 12). Bei der Auswertung der FMU wird die gegebene Größe linear zwischen den Stützstellen interpoliert.

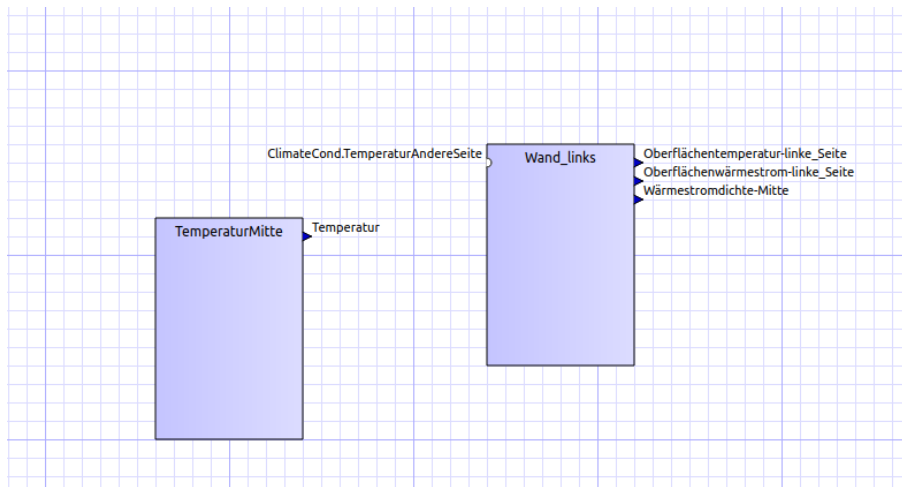


Abbildung 12: Co-Simulationsumgebung MASTERSIM Wand-FMU und Temperatur-FMU

Die FMUs können nun entweder in der Verknüpfungsansicht (Tabellensicht) oder graphisch verknüpft werden. Für die graphische Verknüpfung muss zunächst der Verknüpfungsmodus aktiviert werden (Schaltfläche „Verbinde Ein-/Ausgänge..“). Der Verknüpfungsmodus ist aktiviert, wenn in der Netzwerkdarstellung ein Kreuzcursor zu sehen ist. Nun kann man auf den Ausgang **Temperatur** klicken und bei gedrückter Maustaste eine Verbindung zu **ClimateCond.TemperaturAndereSeite** ziehen. Die Verbindung kann danach noch durch ziehen der Verbindungssegmente ausgerichtet werden (Abb. 13).

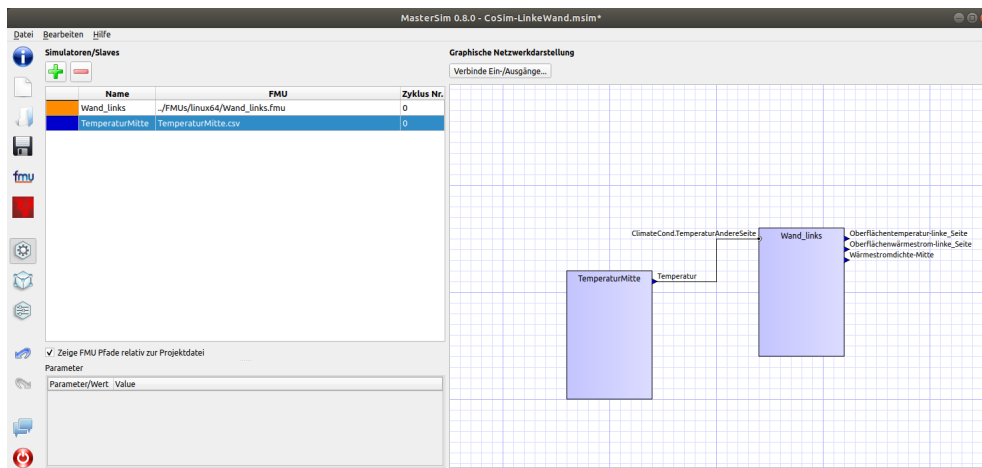


Abbildung 13: Verknüpfte Wand-FMU und Temperatur-FMU

Bei Simulation dieses Szenarios sollten folgende Temperaturen ausgegeben werden (Abb. 14). Damit ist zunächst sichergestellt, dass die FMU das Eingangssignal korrekt verarbeitet.

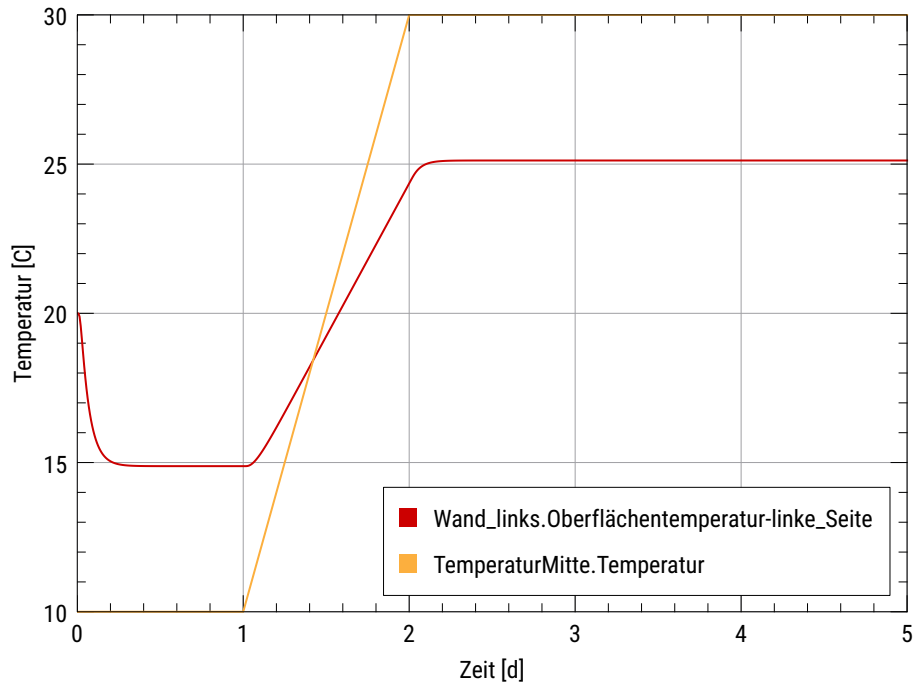


Abbildung 14: Links- und rechtsseitige Temperaturen bei der Wand FMU mit vorgegebenen externen Temperaturen

4.1.4 Import des rechtsseitigen Wandmodells und Verwendung einer Signalinverter-FMU

In der nächsten Ausbaustufe wird die Temperatur-FMU wieder entfernt, und stattdessen die FMU der rechten Wandhälfte importiert. Da die Wärmeströme (berechnet von der linken Wand-FMU und verwendet von der rechten Wand-FMU) ein unterschiedliches Vorzeichen aufweisen, müssen diese Signale invertiert werden. Dazu kann man z.B. die Vorzeicheninvertier-FMU `SignInverter.fmu` nutzen. Abbildung 15 zeigt alle 3 importierten FMUs im gleichen MASTERSIM Projekt.

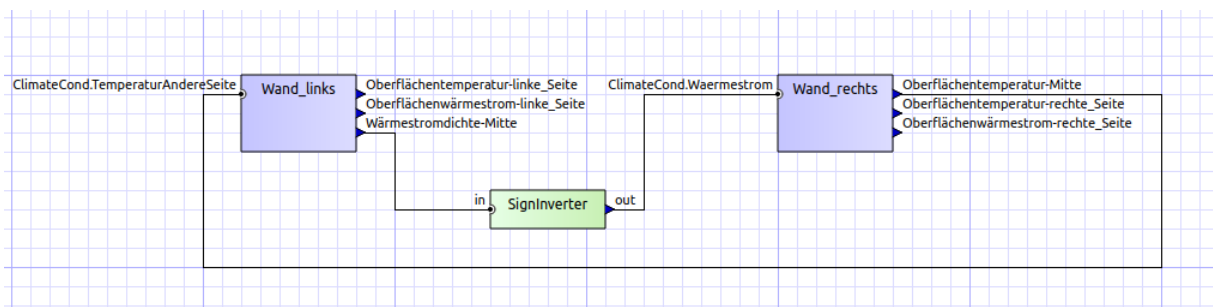


Abbildung 15: Die beiden Wand-FMUs und die SignInverter FMU in der Ansicht des verknüpften Netzwerks.