

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	Üb	erblick	über FMI Co-Simulation und DELPHIN FMU Funktionalität 2
	1.1	FMI C	Co-Simulation
	1.2	Unters	tt ützte FMI-Funktionalität in DELPHIN FMUs
2	Co-	Simula	tions-Workflow 2
3	Exp	oortpro	zedere 3
	3.1	Eingar	ngsvariablen
		3.1.1	Standardwerte für Eingangsvariablen
	3.2	Ausga	be-/Ergebnisvariablen
	3.3	FMU I	Export
		3.3.1	Einheiten der FMI-Variablen 4
4	Co-	Simula	tions-Beispiele 5
	4.1	Geteilt	te Wand
		4.1.1	Export der kompletten Wand als FMU
		4.1.2	Import der DELPHIN FMU mit dem kompletten Wandmodell in das Co-Simulationsmasterprogramm
			MASTERSIM
		4.1.3	Import des linksseitigen Wandmodells und Testrechnung mit vorgegebenen externen Tempera-
			turen
		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 Kommunikationsintervals 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.

¹https://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).

efiniti	n				
ame:	TemperaturAndereSeite				
yp:	Temperatur [Temperature]	~	Art: Von einem externen Modell gene	riert [External]	
4U Im	portoptionen				
ariable	enname/Referenz:	ClimateCond, TemperaturAndereSeite			
tanda	rdwert (wenn der Eingang nicht verknünft ist):				10
inwei ird di	:: Der Standardwert wird nur benutzt, wenn ke ser Wert in der oben gezeigten Einheit erwarte	ine Eingangsvarlable mit der DELPHIN FMU verknüpf et.	t ist. Falls der Co-Simulationsmaster eine	en Eingangswert der DELPHIN FMU für diese	e Variable liefert,

Abbildung 1: Klimabedingungsdialog, Definition einer FMI-Eingangsvariable. Der FMI-Variablenname ist hat 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.

		Randbedingung			
efinition					
Name: Rohrkollektor					
Тур:	Wärmeleitung (Hea	tConduction] Art: Wärmeaustausch zu einem durchs	trömten Rohr im Material (PipeCo	llectorModel] 👻	
Zeitplan:	<kein imm<="" th="" zeitplan=""><th>er aktiviert></th><th>-</th><th>Neu erstellen.</th></kein>	er aktiviert>	-	Neu erstellen.	
limabedin	gung				
Temperat	ur	Vorlauftemperatur	-	Bearbeiten	
Aufgeprägter Wärmestrom Windgeschwindigkeit					
				Neu erstellen	
Massestre	m	1.3 kg/s	¥	Neu erstellen	
Wärmeüb	ergangskoeffizient	16 W/m2K	-	Neu erstellen.	
				Neu erstellen.	
Rohrkolle	ktormodell: Rohrlän	ge [m]:		70	
Rohrkolle	ktormodell: Rohrwa	ndstärke [mm]:			
Rohrkolle	ktormodell: Rohrauf	Sendurchmesser [mm]:		6	
Rohrkolle	ktormodell: Wärmel	eitfähigkeit des Rohres [W/mK]:		0,	
Rohrkolle	ktormodell: Wärmek	apazitāt des Fluids [J/kgK]:		418	
Rohrkolle	ktormodell: Anteil d	es im Modell verwendeten Rohres [%]:		10	
✓ Spezir	iziere Einlasstemper	atur des Konres			
Iodellspez	ifische Ausgaben				
✓ Ausflu	sstemperatur des Ro	ohres			
V Cosam	ntenergieverlust/-ge	winn des gesamten Rohres			
- desan					

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 Variablennamen 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.



igabeverzeichnis für generierte FMU: gangsvariablen:	: /tmp/PipeCollector.fm	N	
gangsvariablen: 			
lle Klimabedingungen mit dem Typ "			
ale Kanabeungungen mit dem Typ-1	'External" werden Eingar	ngsvariablen (vom Typ real).	
Variablenname	Bedingungstyp	Einheit	
ClimateCond.Vorlauftemperatur Tem	nperatur [Temperature]	c	
ebnisgrößen: ille Ausgabedefinitionen, welche skal	lare Werte schreiben, we	rrden Ergebnisgrößen (vom Typ real).	rite
ebnisgrößen: ille Ausgabedefinitionen, welche skal Variablenname Termeratur 0.5 m Ter	lare Werte schreiben, we	rden Ergebnisgrößen (vom Typ real). Ausgabegröße	Einheit
ebnisgrößen: Ille Ausgabedefinitionen, welche skal Variablenname Temperatur_0.5_m Ter Femperatur 10 m Ter	lare Werte schreiben, we mperatur [Temperature] mperatur [Temperature]	irden Ergebnisgrößen (vom Typ real). Ausgabegröße	Einheit C
ebnisgrößen: lle Ausgabedefinitionen, welche skal Variablenname Temperatur_0.5_m Tern Peratur_1.0_m Tern Peratur_1.0_m	lare Werte schreiben, we mperatur [Temperature] mperatur [Temperature] lasstemperatur des Roh	rden Ergebnisgrößen (vom Typ real). Ausgabegröße res [PipeCollectorT0]	Einheit C C
ebnisgrößen: Ile Ausgabedefinitionen, welche skal Variablenname Temperatur_0.5_m Ter Temperatur_1.0_m Ter Rohrkollektor-PipeCollectorTO Ein Schrkollektor-PipeCollectorT Aus	lare Werte schreiben, wo mperatur (Temperature) mperatur (Temperature) lasstemperatur des Rob	rden Ergebnisgrößen (vom Typ real). Ausgabegröße ree [PipeCollectorT0] bries [PipeCollectorT7]	Einheit C C C

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 rechte Seite) erhält die Temperatur der anderen Wandseite als Eingangsgröße für die Wärmeleitungsrandbedingung, wobei 1000 W/mK als Wärmeüberangskoeffizient 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-Schnittsstelle der rechten Wandhälfte (an der linke 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.

deliname:	Wand_komplett				
sgabeverzeichnis für generierte FMU:	Z:/IBK_Projekte/2019_FMI-CoSimulation/Beispiele/	GeteilteWand/Wand_komplett.fmu			
Eingangsvariablen:					
Alle Klimabedingungen mit dem Typ "Ex	ernal" werden Eingangsvariablen (vom Typ real).				
Variablenname Bedingungstyp		Einheit			
Traebnisarößen:					
Ergebnisgrößen: Alle Ausgabedefinitionen, welche skalar	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T	yp real).			
Ergebnisgrößen: Alle Ausgabedefinitionen, welche skalau Variablenname	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T Ausgabegröße	yp real). Einheit			
Ergebnisgrößen: Alle Ausgabedefinitionen, welche skalar Variablenname Oberflächentemperatur-linke_Seite	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T Ausgabegröße Temperatur [Temperature]	yp real). Einheit C			
Ergebnisgrößen: Alle Ausgabedefinitionen, welche skalar Variablenname Oberflächentemperatur-linke_Seite Oberflächentemperatur-rechte_Sei	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T Ausgabegröße Temperatur (Temperature) :e Temperatur (Temperature)	yp real). Einheit C			
Ergebnisgrößen: Alle Ausgabedefinitionen, welche skalau Variablenname Oberflächentemperatur-linke_Seite Oberflächentemperatur-rechte_Sei Oberflächenwärmestrom-linke_Sei	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T Ausgabegröße Temperatur (Temperature) :e Temperatur (Temperature) :e Summe alle Wärmeströme (TotalFluxHeat)	yp real). Einheit C C W/m2			
Ergebnisgrößen: Alle Ausgabedefinitionen, welche skalar Variablenname Oberflächentemperatur-linke_Seite Oberflächentemperatur-rechte_Sei Oberflächenwärmestrom-linke_Sei Oberflächenwärmestrom-rechte_S	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T Ausgabegröße Temperatur (Temperature) e Temperatur (Temperature) e Summe alle Wärmeströme [TotalFluxHeat] itte Summe alle Wärmeströme [TotalFluxHeat]	yp real). C C W/m2 W/m2			
Ergebnisgrößen: Variablenname Oberflächentemperatur-linke_Seite Oberflächentemperatur-rechte_Sei Oberflächentemperatur-rechte_Sei Oberflächenwärmestrom-linke_Sei Wärmestromdichte-Mitte	e Werte schreiben, werden Ergebnisgrößen (vom T Ausgabegröße Temperatur (Temperature) e Temperatur (Temperature) e Summe alle Wärmeströme [TotalFluxHeat] ite Summe alle Wärmeströme [TotalFluxHeat] Summe alle Wärmeströme [TotalFluxHeat]	yp real). Einheit C C W/m2 W/m2 W/m2			

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-Simulationsmasterprogram 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 importenten 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).

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

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



Sind atom zerbered Start exporting Indiation zerbered Andragike Startwitterite Indiation zerbered Andragike Startwitterite Inter exponse	itei Bearbeiten H	ilfe					
Sartzelpunki: 0	Simulationszeitbereich				Starte Simulation		(
Endergunkt: 9 9 Androghen Schuttmele: 10 Maake Acapit muz 100 Reaken Kolmanne: 100 Reaken Kolmanne: 100 Reaken Kolmanne: 100 Calcontationsen ver reakoutity level 127.///// Krigklat/2019_PML Calconukton/Reispiele/Entethetikand/Calom Komplett/Calom	Startzeitpunkt:	0		a v	Ausgabehäufigkeit/Log-Detailstufe: Normal	~	
Andragidre Schrittweite 10 monosofie Sinuktorsendes Ausgebeenstellungen Ausgebeenstellungen Schrittweite vandelen als Ausgebeen	Endzeitpunkt:	5		d 🗸			
Nexter Algorithmu: Texe torradge for thrue: Texe torradge for thrue: Texe torradge for thrue: Texe torradge for thrue torradge for the formation of the performance of of the perform	Anfängliche Schrittwe	site: 10		min 🗸	Kommandozele:		
ters and sportfmus: Genzes-Jacobi Wasmale Avoid Vio Iteratorer: 1 Bebbre Toleranz: Le 05 Rebbre Toleranz: Le 05 Zetschrittangeurg und Felrickontrolle Felrickontrollmetbrode: Keine Cabebret Toleranz: 0 Maximale Zetborhttange: 0 Cabebret Tolerand: 0 Cabebret Tolerand: 0 Maximale Zetborhttange: 0 Cabebret Tolerand: 0 Maximale Zetborhttange: 0 Cabebret Tolerand: 0 Maximale Zetborhttange: 0 Cabebret Tolerand: 0 Maximale Schrittinge Fir Ausgabern: 0	Master-Algorithmus				ersimulator.exeverbosity-ieve=1 2:/IBK_Projekte/2019_Hill-cosimulator/bespiee/seteistewand/cosim-komplett/cosim-viandkomplett	msim	
Maximale Antali von Iterationen: 19 Relehen Toferenz: 1905 Absolute Toferenz: 1905 Absolute Toferenz: 1905 Absolute Toferenz: 1905 Catchortheme kargassen Dinteres Limit für den Zeitzchvitt: 1905 1907 Catchortheme kargassen Unteres Limit für Iterationen offeren: 0.001 1907 Stechortheme Kargaben: 10 1907 Schortheme Kargaben: 10 1907	- Iterationsalgorithmus:	. 1	Sauss-Jacobi	~	Zeine Lond	atai	
Rebive Toleranz: 12 e 5 Absolute Toleranz: 12 e 6 Zetschrittmapssurg und Fehrinantole Fehlerkontrollmethode: 12 Zetschrittmater apassen Unteres Limit für den Zeitschritt: 12 e 05 0 0 0 Maximale Zeitschrittinge: 30 0 1 0 0 Verhinder Uberschrittinge für Ausgaber: 5001 0 0 Verhinder Schrittlänge für Ausgaber: 10 1 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 1	- Maximale Anzahl von :	Iterationen:		1 🗘	xuge room		1
Abadukt Teleranz: 12-06	Relative Toleranz:		le-05				1
Zetschrittanpassung und Peherkontrole Peherkontrolmethode: Kane Cetschrittenes angassen Maximale Zetschrittise de 25 kane Zetschrittisinge: 30 min v Zetschrittisinge: 30 min v Verhindere Überschreitig des Stanlationsendes Augebeentstellung Maximale Schrittisinge für Augeben: 10 min v	Absolute Toleranz:	Ī	1e-06				
Felderant:0methode: Keine Detact/Tituetes argassen Unterse Linkt för den Zeitschriftinger: 90 Wannlae Zeischriftinger: 90 Verhindere Überschriftinger: 90 Schriftinger: 90 Verhindere Überschriftinger: 90 Schriftinger: 90	Zeitschrittanpassung i	und Fehlerkont	role				
Catchorithmic Backcorithmic Backson Charlese Lands for den Zeitschritt Paramele Zeitschrittingee Contrained Co	Fehlerkontrolmethode	a-	Keine	~			
Unteres Limit für den Zeitschrittit: 12:405 2 V Maximale Zeitschrittitinge: 30 1 III 2 Zeitschrittiting für Linestonsverfahren: 0,001 2 V Verhindre Oberschrifting des SanJahnsendes Ausgabeenstellungen Meimale Schrittitinge für Ausgabem: 10 IIII IIII IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII	Zeitschrittweite ar	npassen					
Maalmale Zelbuhritlänge: 30 mn v Zelbuhritlänge Kur Bestonsverfahren: 10.001 s Verhindre Überschreitung des Simulationsendes Augubeenstellung Maimale Schritlänge für Auguben: 10 mn v	Unteres Limit für den i	Zeitschritt:	1e-05	s v			
Zetischrittmit für Iterationsverfahren: 0.001 p vollage vollage bestehenden und des Seindetstonsendes Ausgebeenstellungen Hannels Schrittigheng für Ausgebeen: 10 min v Schreibe interne Variablen als Ausgebeen	Maximale Zeitschrittlä	inge:	30	min 🗸			4
☑ Verhindere Überichtreitung des Simulationsendes Ausgabeenstellungen Mernahe Schrittlänge für Ausgabeen: Schreibe niterne Variablen als Ausgabeen	Zeitschrittlimit für Iter	rationsverfahre	en: 0,001	s ~			
Auspädeehstellungen Merandes Schrittlinge für Auspäden Schrebe interne Variablen als Auspäden	Verhindere Überso	chreitung des S	imulationsendes				
Merinde Schrittlange für Ausgaben: 10 min v Schrebe interne Variablen als Ausgaben	Ausgabeeinstellungen	n					
Schrebe interne Variablen als Auspaben	Minimale Schrittlänge	für Ausgaben:	10	min 🗸			1
	Schreibe interne V	/ariablen als Au	sgaben				

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.msim 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 Wärmestromdichte-Mitte.



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 Einheitenumrechnungen korrekt durchgeführt werden), kann man eine Datei TemperaturMitte.csv anlegen, z.B. mit folgendem Inhalt:

Zei	t [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 MAS-TERSIM 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 Maustauste 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 Scenarios 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.