



Pascal Paul Pöll, BSc

Untersuchung von Haushaltskühlgeräten für den transienten Betriebsfall in IPSEpro

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau
eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund Almbauer
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Mario Rohrhofer, MSc
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, August 2016



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder

Vorwort

Die vorliegende Arbeit bildete den Abschluss meines Studiums Maschinenbau-Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Graz. Im Laufe des Studiums entwickelte ich spezielles Interesse am Thema der Kältemaschinen und der Wärmepumpen. Dieses Interesse war dann auch bei der Wahl des Masterarbeitsthemas entscheidend. Die Problemstellung der Arbeit ermöglichte mir einen tieferen Einblick in das Fachgebiet und ich konnte mein Wissen diesbezüglich vertiefen.

Mein Dank gilt meinem betreuenden Professor Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund Almbauer, für die Möglichkeit, meine Masterarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik zu verwirklichen. Auch möchte ich mich ausdrücklich bei meinen Kollegen am Institut und besonders bei meinem Betreuer Mario Rohrhofer, MSc und Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Heimes, die mich fachlich in jeder Hinsicht hervorragend unterstützten, bedanken.

Den herzlichsten Dank richte ich an meine Familie für die bedingungslose Unterstützung in meinem Werdegang.

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources and that I have explicitly indicated all material, which has been quoted either literally or by content from the sources used.

Graz, am 16.08.2016

Pascal Pöll

Kurzfassung

Die Unterzeichnung des Klimavertrages von Paris, von nahezu allen Staaten der Erde, unterstreicht die Wichtigkeit im Umgang mit den Rohstoffen unserer Welt und die Unumgänglichkeit einer Steigerung der Energieeffizienz in allen Lebensbereichen. Somit auch in Bezug einer verbesserten Energieeffizienz am Sektor der Haushaltskühlgeräte. Dieser Weg führt bei der Auslegung und Optimierung von Kühlgeräten über eine rechnerunterstützte Vorgehensweise und bedeutet die Entwicklung von Kreislaufmodellen mit Hilfe von Softwaretechnologie. Dadurch wird eine detaillierte, gesamtheitliche Betrachtung aller Bauteile eines Haushaltskühlgerätes, speziell im transienten Betrieb, möglich und schafft eine umfassendere Offenlegung des Potentials bei der Reduzierung des Energieverbrauchs. Die vorliegende Masterarbeit hat die numerische Untersuchung von Haushaltskühlgeräten für den transienten Betriebsfall zum Ziel.

In Kapitel 2 wird das, zur rechnerunterstützten Vorgehensweise, benötigte Simulationsprogramm in Aufbau und Funktionsweise dargelegt. Dieses Kapitel soll Verständnis für die erforderliche Methodik bei der Entwicklung von Kreislaufmodellen schaffen.

Das Kapitel 3 gibt Aufschluss über die verwendeten Einzelmodelle zum Aufbau eines Kreislaufmodells und zeigt u.a. die Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie für ebendiese.

Das Kapitel 4 zeigt die Dokumentation beim Aufbau der Kreislaufmodelle anhand von zwei realen Haushaltskühlgeräten. Dabei wird Schritt für Schritt der notwendige Ablauf zu einem Gesamtmodell beschrieben. Die untersuchten Kühlgeräte waren ein Gefriergerät und eine Kühlgefrierkombination des Haushaltssektors.

Die Modellvalidierung durch Annähern von Funktionsparametern eines Kreislaufmodells, mit erzielten Messparametern aus Dauerlauf- und Zyklusmessung, wird in Kapitel 5 gezeigt. Für das Gefriergerät werden die validierten Parameter gezeigt.

Die Ergebnisse aus den Simulationen sind in Kapitel 6 für das Gefriergerät und für die Kühlgefrierkombination im Anhang der Arbeit gezeigt.

Ein Ausblick in Kapitel 7 zeigt die Notwendigkeit einer rechnerunterstützten Kreislaufsimulation und weist auf die Möglichkeit zur Nutzung der aufgebauten Kreislaufmodelle durch eine Parameterstudie hin.

Abstract

The Paris Climate Agreement, signed by nearly every country in the world, shows the importance in the handling of worldwide resources. It proves the necessity of improving energy efficiency in every sphere of life. That implies improvements in the field of energy efficiency for household refrigeration appliances as well. To achieve this goal, there is a need of computer-based engineering right from the beginning to fulfill the requirements in development and optimization. As a result of a transient cycle simulation a better and detailed understanding of the working principle of the refrigeration cycle is received and it allows to detect the energy saving potential of refrigeration appliances. The main focus of this master thesis is on the numerical investigation of household refrigeration appliances at transient operating conditions.

The application and the function of the used simulation environment is explained in Chapter 2. This chapter gives an insight to establish understanding of the required method to develop a cycle model.

Chapter 3 explains the use of the single models for modelling an entire cycle of refrigeration appliances and provides the mathematical formulation of the conservation of energy and mass for these models.

The Chapter 4 regards the documentation to set up a cycle model for a freezer and a fridge-freezer. The necessary procedure to build up the whole cycle model is described step by step.

Chapter 5 explains the validation of the cycle model for the freezer on the basis of a continuous measurement and a cyclic measurement.

The simulation results of the developed cycle model for the freezer are shown in Chapter 6 and for the fridge-freezer in the appendix.

The concluding chapter provides the necessity of a computer-based cycle simulation and shows the possibility of the cycle models for a parameter study.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xvii
Formelzeichen und Abkürzungen	xix
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zieldefinition	2
2 IPSEpro	3
2.0.1 IPSEpro Module	3
2.1 Model Development Kit (MDK)	4
2.1.1 Modellstruktur	5
2.1.1.1 Unit	5
2.1.1.2 Connection	6
2.1.1.3 Global	6
2.1.2 Icon, Model Class, Model	6
2.1.2.1 Icon	6
2.1.2.2 Model Class	6
2.1.2.3 Model	7
2.1.3 Model Description Language (MDL)	7
2.2 Process Simulation Environment (PSE)	8
2.2.1 Lösungsmethode	8
2.2.1.1 Newton-Raphson Verfahren	9
2.3 PSXlink	10
3 Modellierung	13
3.1 ECO-COOL Library	13
3.2 Connections	13
3.2.1 Stream Connection	14
3.2.2 Stream_h Connection	15
3.2.3 HeatFlux Connection	15
3.2.4 Temperature Connection	16

3.2.5	Control Connection	16
3.3	Terminals	16
3.4	Globals	16
3.4.1	Ambient	17
3.4.2	Area	17
3.4.3	Geometry	17
3.4.4	Metal	17
3.4.5	O_Composition	18
3.4.6	Switch	18
3.4.7	Wall	18
3.5	Units	18
3.5.1	Compressor	18
3.5.2	Shell	20
3.5.3	Oil_Sump	21
3.5.4	Ambient	21
3.5.5	Wall	22
3.5.6	Condenser	22
3.5.7	Evaporator	23
3.5.8	Accumulator	23
3.5.9	Capillary	23
3.5.10	Compartment	24
3.5.11	Compartment_Shaft	25
3.5.12	Fan	25
3.5.13	I_Control	25
3.5.14	I_Control_2	26
3.5.15	Temperature_Sensor	26
3.5.16	Area_Link	26
3.5.17	Geometry_Link	27
3.5.18	Stream_Conversion	27
4	Protokollierung	29
4.1	Stationäre Entwicklung	29
4.1.1	Iteration	29
4.1.2	Protokoll	30
4.1.3	Settings Analysis	30
4.1.4	Stationärer Aufbau	31
4.1.4.1	Kondensator	31
4.1.4.2	Kapillare	36
4.1.4.3	Kompressor	37
4.1.4.4	Compartment	38
4.1.4.5	Evaporator	40
4.1.4.6	Geschlossener Kreislauf	42

4.2	Transiente Entwicklung	43
4.2.1	Integration	44
4.2.2	Transienter Aufbau	44
4.3	Varianten der Entwicklung	47
4.3.1	Stationärer Aufbau	47
4.3.2	Transienter Aufbau	50
5	Validierung	55
5.1	Stationäre Validierung	55
5.2	Transiente Validierung	55
6	Ergebnisse	59
7	Ausblick	73
	Literatur	75
	Anhang	77
A	Variablenerklärung MDL Code	77
B	Ergebnisse Kühlgefrierkombination	80

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundaufbau von IPSEpro	4
2.2	Hierarchie der Komponenten	5
2.3	Klassenstruktur	7
2.4	Ungedämpftes Verfahren	10
2.5	Gedämpftes Verfahren	10
3.1	Connections in PSE	14
4.1	Stat. Aufbau 1 Kondensatorelement	32
4.2	Stat. Aufbau 2 Kondensatorelemente	34
4.3	Stat. Aufbau 4 Kondensatorelemente	34
4.4	Stat. Aufbau 5 Kondensatorelemente	34
4.5	Stat. Aufbau 20 Kondensatorelemente	35
4.6	Stat. Aufbau Kondensator	35
4.7	Stat. Aufbau Kapillare	36
4.8	Stat. Aufbau Kompressor	37
4.9	Stat. Aufbau Shell	37
4.10	Stat. Aufbau Compartment	39
4.11	Stat. Aufbau 1 Verdampferelement	40
4.12	Stat. Aufbau 5 Verdampferelemente	40
4.13	Stat. Aufbau offen	41
4.14	Stat. Aufbau Connector	42
4.15	Stat. Aufbau Reservoir	42
4.16	Trans. Aufbau Gefriergerät	45
4.17	Stat. Aufbau Kühl-, Gemüse- u. Gefrierfach	48
4.18	Stat. Aufbau Gemüsefach	48
4.19	Stat. Aufbau Kühlfach	49
4.20	Stat. Aufbau Luftkreislauf	49
4.21	Stat. Aufbau offen	51
4.22	Trans. Aufbau Kühlgefrierkombination	53
6.1	Kompressordrehzahl, Lufttemperatur des Kühlfachs, Sensortemperatur über die Zeit	62
6.2	Kompressordrehzahl, Lufttemperatur des Gefrierfachs, Sensortemperatur aus Simulation (S) und Messung (M) über die Zeit	62

6.3	Kompressordrehzahl, Kompressorleistung über die Zeit	63
6.4	Kompressordrehzahl, Kompressorleistung aus Simulation (S) und Messung (M) über die Zeit	63
6.5	Druck am Kompressorein- und austritt über die Zeit	64
6.6	Druck am Kompressorein- und austritt für Simulation (S) und Mes- sung (M) über die Zeit	64
6.7	Druck am Kompressorausstritt für Simulation (S) und Messung (M) über die Zeit	65
6.8	Druck am Kompressoreintritt für Simulation (S) und Messung (M) über die Zeit	65
6.9	Lufttemperatur, Sensortemperatur über die Zeit	66
6.10	Kältemitteltemperatur Kapillareintritt, Wärmeübertrageraustritt über die Zeit	66
6.11	Kompressordrehzahl, Kältemittelmasse im Kompressoröl über die Zeit	67
6.12	Druckverlust letztes Kondensator- und Verdampferelement über die Zeit	67
6.13	Massenstromdichten einzelner Verdampferelemente, Kompressordreh- zahl über die Zeit	68
6.14	Massenstromdichten einzelner Kondensatorelemente, Kompressor- drehzahl über die Zeit	68
6.15	Kältemittelmassen einzelner Verdampferelemente, Kompressordreh- zahl über die Zeit	69
6.16	Kältemittelmassen einzelner Kondensatorelemente, Kompressordreh- zahl über die Zeit	69
6.17	Wärmeübergangszahlen einzelner Verdampferelemente, Kompress- ordrehzahl über die Zeit	70
6.18	Wärmeübergangszahlen einzelner Kondensatorelemente, Kompress- ordrehzahl über die Zeit	70
A.1	Kompressordrehzahl, Lufttemperatur des Kühl-, Gemüse- und Ge- frierfachs über die Zeit	81
A.2	Kompressordrehzahl, Kompressorleistung über die Zeit	82
A.3	Druck am Kompressorein- und austritt über die Zeit	82
A.4	Massenstromdichten einzelner Kondensatorelemente, Kompressor- drehzahl über die Zeit	83
A.5	Kältemittelmassen einzelner Kondensatorelemente, Kompressordreh- zahl über die Zeit	83
A.6	Massenstromdichten einzelner Verdampferelemente des Kühlfachs, Kompressordrehzahl über die Zeit	84
A.7	Kältemittelmassen einzelner Verdampferelemente des Kühlfachs, Kom- pressordrehzahl über die Zeit	84

A.8	Massenstromdichten einzelner Verdampferelemente des Gefrierfachs, Kompressordrehzahl über die Zeit	85
A.9	Kältemittelmassen einzelner Verdampferelemente des Gefrierfachs, Kompressordrehzahl über die Zeit	85

Tabellenverzeichnis

5.1	Transient angepasste Koeffizienten der Units Ambient und Compartment	56
5.2	Transient angepasste Koeffizienten der Unit Shell	56
5.3	Transient angepasste Koeffizienten der Unit Capillary u. des Globals Composition	56
A.1	Variablensuffix/Variablenpräfix der Connections/Units	77
A.2	Variablennamen der Connections	78
A.3	Variablennamen der Units	78
A.3	Griechische Buchstaben	79

Formelzeichen und Abkürzungen

KM	Kältemittel	Nu	Nußelt-Zahl
MDK	Model Development Kit	Pr	Prandtl-Zahl
MDL	Model Description Language	PSE	Process Simulation Environment

1 Einleitung

Das Bewusstsein der Menschen in puncto Nachhaltigkeit und Ressourcennutzung der Erde, insbesondere in den Industrieländern, wird immer stärker und spiegelt sich in Forderungen gegenüber der Politik, Wirtschaft und Gesellschaft wider. Diese Entwicklung zwingt Politik und Hersteller zum Handeln. Im Bereich des Haushaltssektors für Kühlen und Gefrieren von Lebensmitteln zeigt sich das in der regelmäßigen Ratifizierung neuer Gesetzgebungen. Mit Beginn des Jahres 2017 soll eine Neuklassifizierung der EU-Energiekennzeichen für Haushaltskühlgeräte in Kraft treten. Bei ca. 90 Millionen, weltweit und pro Jahr, verkauften Haushaltskühlgeräten besteht großes Potential zur Energieeinsparung. Ausgehend von einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 1 kWh/Tag eines Haushaltskühlgeräts laut Hermes und Melo [6] ergibt das einen zusätzlichen Energieverbrauch der neuen Geräte von ca. 33 TWh/Jahr.

Die Auslegung oder Optimierung von Haushaltskühlgeräten erfolgt in der Praxis fast ausschließlich empirisch. Anhand von Energieverbrauchsmessungen werden Bewertungen der Kühlgerätekomponten durchgeführt und anschließend Änderungen am Gerät realisiert.

Um eine detaillierte Betrachtung der thermodynamischen Größen, vor allem bei Ein- und Ausschaltvorgängen, zu ermöglichen, werden immer stärker Kreislaufsimulationen zur Analyse und Bewertung angewendet. Solche Gesamtkreislaufsimulationen sollen das Verhalten und das Zusammenspiel der Einzelkomponenten besser darlegen und deren Einflüsse durch Änderung der Randbedingungen, wie Umgebungstemperatur oder Drehzahländerung des Kompressors, simulieren können. Als Ergebnis sind Prognosen für den Energieverbrauch bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen oder bei der Verwendung anderer Komponenten für das reale Kühlgerät zu erwarten.

1.1 Problemstellung

Der herkömmliche Kühlgerätebetrieb wird von Ein- und Ausschaltvorgängen des Kühlkreislaufs bestimmt. Um die dabei auftretenden transienten Vorgänge zu beschreiben wurde ein Kreislaufsimulationsprogramm entwickelt, das eine rechner-

unterstützte Simulation, eben dieser transienten Vorgänge, ermöglicht. Die übliche, empirische Vorgehensweise bei der Auslegung und Optimierung von Haushaltskühlgeräten ist zeit- und kostenintensiv. Eine Simulation hingegen ist in der Lage eine Analyse der transienten Vorgänge zu liefern ohne Änderung an einem realen Gerät vornehmen zu müssen.

1.2 Zieldefinition

Das Ziel dieser Masterarbeit war es zu zeigen, dass Gesamtkreislaufsimulationen, unter Anwendung des kommerziellen Simulationsprogramms IPSEpro der Firma Simtech, für im Handel erwerbliche Kühlgeräte möglich sind, um die auftretenden transienten Vorgänge in den Kühlgeräten analysieren zu können. Anhand eines Gefriergeräts und einer Kühlgerätkombination sollte unter der Nutzung der ECO-COOL Library, einer Modellbibliothek mit Einzelmodellen der Kühlgerätekomponten, die Realisierung des Aufbaus von Gesamtkreislaufmodellen dokumentiert werden. Die aufgebauten Modelle der Kühlgeräte sollten detaillierte Einblicke in das transiente Betriebsverhalten geben und als Grundlage für eine Parameterstudie dienen.

2 IPSEpro

Die vorliegende Arbeit wurde mit der Simulationsumgebung IPSEpro erstellt. Durch die Software IPSEpro kann der Nutzer Prozesse, die sich mit mathematischen Gleichungen beschreiben lassen, modellieren, analysieren und lösen. Eine solche Prozesssimulation kann somit in vielen verschiedenen Bereichen Anwendung finden, da die Möglichkeit besteht, völlig eigenständig Modelle zu entwerfen. IPSEpro folgt damit einem „Open Environment“-Prinzip, da zusätzlich zu den bereits mitgelieferten Modellbibliotheken auch eigene entwickelt werden können. Der Anwender hat grundsätzlich Flexibilität auf zwei Gestaltungsebenen, nämlich in dem Model Development Kit (MDK) und in der Process Simulation Environment (PSE). Das Folgende in diesem Kapitel bezieht sich auf die Handbücher aus MDK [1] und PSE [2].

2.0.1 IPSEpro Module

Vollumfänglich beinhaltet IPSEpro zwei Basismodule und mehrere Erweiterungsmodule. Die beiden Basismodule

- PSE-Simulationsumgebung zur Prozessgestaltung
- MDK-Oberfläche zur Modellentwicklung

sind bereits ausreichend zur Modellierung. Unterstützend dazu gibt es aber noch folgende Erweiterungspakete:

- PSXlink-Schnittstelle des PSE zu Microsoft Excel
- PSOptimize-Modul zur Prozessoptimierung
- PSValidate-Modul zur Datenvalidierung
- PSScripting-Möglichkeit der Automatisierung durch Skriptanweisungen
- PSDynamics-Modul, um transiente Prozesse zu simulieren
- PSEasy-Laufzeitmodul
- PSWeb-Berechnungen via Internet.

Die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Module werden nachfolgend kurz erläutert. In Abbildung 2.1 ist der Grundaufbau von IPSEpro zu sehen.

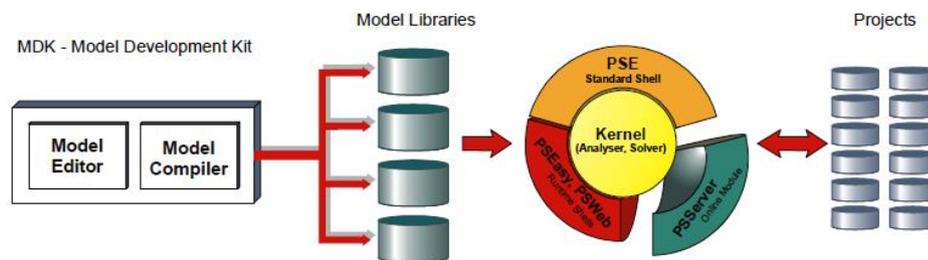


Abbildung 2.1: Grundaufbau von IPSEpro [1]

2.1 Model Development Kit (MDK)

Das MDK stellt die Komponentenebene von IPSEpro dar, welche es dem Nutzer erlaubt, selbstständig physikalische, mathematische Modelle zu entwerfen oder bereits erstellte Modelle zu modifizieren. Jedes Modell ist durch eine Komponente in einem Prozess repräsentiert, der folgende Struktur aufweisen muss, um für IPSEpro lösbar zu sein:

- Der Prozess muss eine oder mehrere Komponenten beinhalten.
- Das Verhalten der Komponente lässt sich mathematisch beschreiben.
- Das Gesamtverhalten des Prozesses ist eine Folge der Einzelverhalten der Komponenten.
- Die Komponente muss verschaltet sein.

Die Struktur einer Komponente wird zuerst mit einem Grafikeditor als Fließbildsymbol gezeichnet und dann mittels Gleichungeditor durch ihre mathematischen und physikalischen Eigenschaften beschrieben. Benutzt wird hierzu die nicht sequenzielle Programmiersprache, Model Description Language (MDL), welche im Abschnitt 2.1.3 noch behandelt wird.

Um die Komponenten schlussendlich zu überprüfen und zusammenzufügen, wird durch einen Kompilationsvorgang ein Binärformat erstellt. Die Sammlung solcher verschiedener Einzelmodelle wird dann als Modellverzeichnis oder Library generiert (dargestellt in Abbildung 2.1). Die Libraries dienen beim Aufbau des Prozesses in PSE als Quelle.

2.1.1 Modellstruktur

Um später in PSE ein Prozessschema aufbauen zu können, wird eine Modellstruktur bestehend aus den Modellkomponenten:

- Unit
- Connection
- Global

benötigt. Somit muss jedem Einzelmodell bereits beim Erstellen eine der drei Arten zugewiesen werden. Für IPSEpro liegt dadurch eine hierarchische Beschränkung vor, die beginnend mit dem Typ Unit nur auf Variablen in tieferen Ebenen des Typs Connection oder Global (gezeigt in Abbildung 2.2) referenzieren kann.

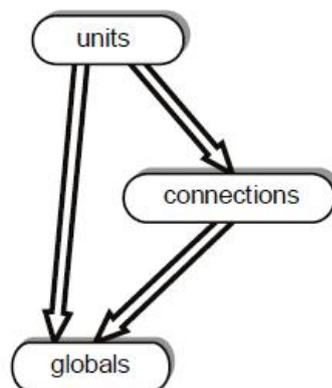


Abbildung 2.2: Hierarchie der Komponenten [2]

2.1.1.1 Unit

In einem Prozessschema kann die Unit als Knotenpunkt betrachtet werden. Sie verarbeitet einen oder mehrere mögliche Informationszuflüsse und kann auch wieder Information weitertransportieren. In einem Kältekreislauf kann eine solche Unit zum Beispiel einen Verdichter darstellen, der ein Kältemittel mit einem spezifischen Zustand am Eintritt auf einen bestimmten Zustand am Austritt komprimiert. Eine Unit kann sich auf die Komponententypen Connection und Global referenzieren, gleichzusetzen mit dem Zugriff auf Variablen der beiden Typen, jedoch nicht auf eine andere Unit.

2.1.1.2 Connection

Die Modellkomponente Connection stellt die Verbindung dar, die benötigt wird, um Information von einer Unit zur nächsten zu transportieren. Somit repräsentiert die Connection z.B. eine Rohrverbindung im Kältekreislauf, in der derselbe Zustand am Ein- und Austritt vorherrscht. Die Connection kann nur auf ein Global referenzieren.

2.1.1.3 Global

In der Netzwerkstruktur ist die Modellkomponente Global ein Provider, der dem Prozess unveränderliche Information bereitstellt. Diese Informationen können von einer beliebigen Anzahl von Komponenten (Units oder Connections) genutzt werden. Im Beispiel des Kältekreislaufes sind das die Stoffwerte des Kältemittels, das durch die Komponenten des Kreislaufs fließt. Ein Global kann zwar von Units oder Connections referenziert werden, aber sich selbst auf keine der drei Typen beziehen.

2.1.2 Icon, Model Class, Model

Die Modellkomponenten aus Abschnitt 2.1.1 bilden nicht den einzigen strukturellen Aufbau in IPSEpro, vielmehr sind sie ein Teil davon (gezeigt in Abbildung 2.3). Weiters gibt es noch:

2.1.2.1 Icon

Die Modellkomponente Icon ist der grafische Baustein zum Erstellen eines Prozessschemas. Jede Unit wird durch ein Icon symbolisiert. Für das Platzieren eines Icons in PSE wird es in der Icon Bar ausgewählt und dann beliebig im Schaltschema (in IPSEpro: *Flowsheet*) angeordnet. Die Auswahl des Icons liefert gleichzeitig die im MDK definierte Model Class.

2.1.2.2 Model Class

Die Modellkomponente *Model Class* ist als übergeordnetes Element der Modelle zu sehen. Sie wird durch die beinhaltete Modellkomponente unterschieden, jede Model Class des Typs Unit kann mehrere Modelle in sich vereinen. Model Classes des Typs Global und Connection können jeweils nur ein Modell besitzen. Bei mehreren

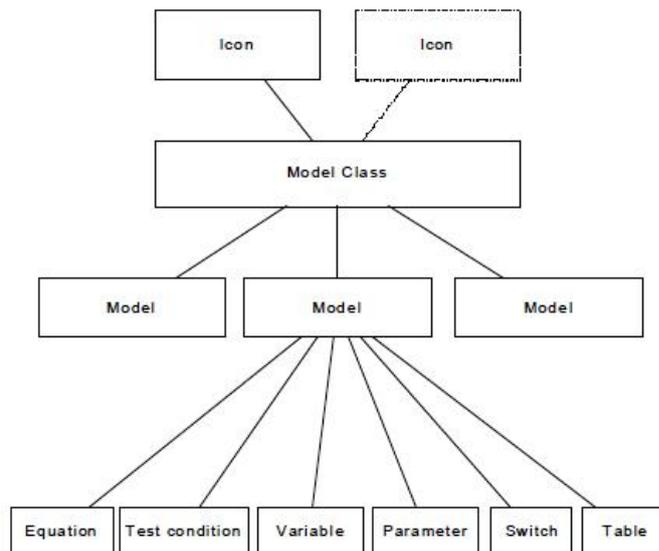


Abbildung 2.3: Klassenstruktur [1]

Modellen in einer Model Class, muss ein Default Model angegeben werden. Falls es nur ein Modell besitzt, ergibt sich automatisch das Default Model.

2.1.2.3 Model

Die unterste Ebene bildet das Model, indem die tatsächlichen mathematischen und physikalischen Vorgänge, mit Gleichungen, beschrieben werden. Die dort verwendeten Größen sind u.a. Variable und Parameter.

2.1.3 Model Description Language (MDL)

Das Definieren der Models mittels Modellgleichungen erfolgt durch die programm-eigene Sprache MDL. Diese ist eine nicht sequenzielle Programmiersprache, das bedeutet, dass die Anordnung der Gleichungen im Editor nicht von Bedeutung ist. Die nachfolgenden Gleichungen sollen hier als Beispiel dienen, hierbei ist auch bereits die verlangte Form gezeigt:

$$eq1 : A = 2.0; \quad (2.1a)$$

$$eq2 : B = 2.0 + A; \quad (2.1b)$$

$$eq3 : C = A + B; \quad (2.1c)$$

Es wird die erste Gleichung im Gleichungsblock (2.1) betrachtet, um näher auf die Form einzugehen. „*eq1*“ dient als Label der Gleichung um z.B. im Ausgabeprotokoll darauf referenzieren zu können. „ : “ leitet den Beginn und „ ; “ das Ende der Gleichung ein.

$$eq1 : C = A + B; \quad (2.2a)$$

$$eq2 : B = 2.0 + A; \quad (2.2b)$$

$$eq3 : 2.0 = A; \quad (2.2c)$$

Wie nun im Gleichungsblock (2.2) ersichtlich, verglichen zu (2.1), ist die Reihenfolge der Gleichungen, als auch die der Variablen für das Lösen der Gleichungen in IPSEpro irrelevant, nur die Schreibform ist zwingend.

2.2 Process Simulation Environment (PSE)

Das Programm PSE repräsentiert die Prozessebene. In dieser kann der Nutzer seine gewählten Icons aus der Library völlig frei im Flowsheet anordnen und Schaltpläne nach eigenem Muster erstellen. Nach Eingabe der erforderlichen Daten und dem Setzen von Rand- oder Anfangswerten lässt sich das Gleichungssystem mit einem eingebauten Gleichungslöser (*Solver*) lösen. Die Simulation kann sowohl stationär als auch transient erfolgen, weiter wird nach jedem Lösungsversuch auch ein Ausgabeprotokoll generiert. Die Ergebnisse der Berechnung werden nach der Berechnung direkt im Projektfenster von PSE angezeigt.

2.2.1 Lösungsmethode

Bei einem System von nichtlinearen Gleichungen erfolgt die Lösungsfindung durch Iteration der Startwerte. Ob ein Gleichungssystem konvergiert hängt sehr stark von der Wahl der Startwerte ab. Umso größer das System, umso wahrscheinlicher ist es, dass der Abstand zwischen den Startwerten und der Lösung nicht klein genug ist. PSE folgt deshalb dem Algorithmus, die Variablen des Systems in Gruppen einzuteilen, um diese sequentiell zu lösen. Die Einteilung der Variablen erfolgt in solcher Art und Weise, dass die Gruppengröße minimal gehalten wird. Das hat zur Folge, dass auch die Anzahl der Gleichungen, die gleichzeitig gelöst werden, kleiner ist. Es hat sich gezeigt, dass dadurch leichter Konvergenz erreicht wird, da kleine Gruppen von Gleichungen, in der Ausführung häufig nur eine Gleichung

und eine Variable, überschaubarer bleiben. Das Lösungsverfahren läuft immer in zwei Phasen ab:

1. **Systemanalyse:** Die erste Phase besteht rein darin, eine Einteilung des Gleichungssystems in einzelne Gruppen minimaler Größe vorzunehmen. Das bedeutet, dass PSE eine Einteilung der Variablen und Gleichungen in Gruppen vornimmt und eine Reihenfolge für das anschließende Lösen dieser Gruppen festlegt.
2. **Numerische Lösung:** Mit der in der Systemanalyse aufgestellten Reihenfolge der eingeteilten Gruppen folgt die sequentielle numerische Lösung der Gleichungen. Als Lösungsverfahren wird das Newton-Raphson Verfahren verwendet.

2.2.1.1 Newton-Raphson Verfahren

Die von PSE verwendete Newton-Raphson Methode setzt Startwerte in die Systemfunktionen ein und approximiert die Funktionen dann weiter durch Linearisierung. Der neu gewonnene Wert wird wiederum in die Funktionen eingesetzt, solange bis die Nullstelle oder eine hinreichend genaue Lösung in der Nähe der Nullstelle gefunden wird. Verwendet werden das

- ungedämpfte (Abbildung 2.4)
- und gedämpfte Verfahren (Abbildung 2.5).

Bei der ungedämpften Methode wird die Gleichung (2.3) so oft iteriert bis die Lösung gefunden wird, im Falle der gedämpften Methode wird die Gleichung (2.4) gelöst.

$$x_{n+1} = x_n - J(x_n)^{-1}f(x_n) \quad (2.3)$$

$$x_{n+1} = x_n - \alpha_n * J(x_n)^{-1}f(x_n) \quad (2.4)$$

Bei beiden Methoden wird ein Wert $\Delta x = x_{n+1} - x_n$ iterativ neu berechnet, welcher der Differenz zwischen Startwert und berechnetem Wert entspricht. Diese sich Differenz wird zum alten Startwert addiert und es ergibt sich ein neuer Startwert für den folgenden Iterationsschritt. Der Unterschied in der gedämpften Methode liegt im Dämpfungsfaktor α (siehe Gleichung (2.4)).

Anschaulich wird nun ein Iterationsschritt des eindimensionalen Newton-Raphson Verfahren durchgeführt (siehe Gleichungsblock (2.5)). Als Funktion wählen wir eine Parabelgleichung und einen Startwert und erhalten durch Einsetzen den Funktionswert.

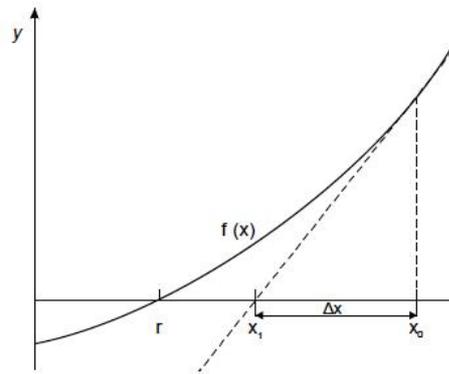


Abbildung 2.4: Ungedämpftes Verfahren [1]

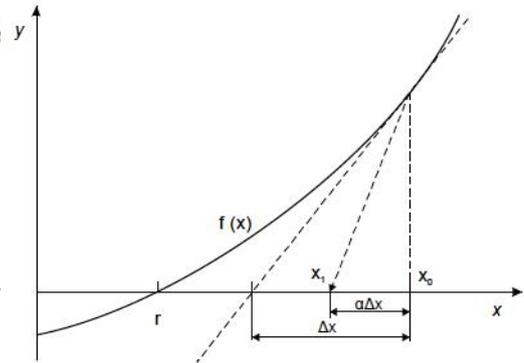


Abbildung 2.5: Gedämpftes Verfahren [1]

$$y = 2 * x^2 - 3 \quad (2.5a)$$

$$y' = 4x \quad (2.5b)$$

$$x_0 = 4 \quad (2.5c)$$

$$y = 2 * 4^2 - 3 = 29 \quad (2.5d)$$

$$y' = 4 * 4 = 16 \quad (2.5e)$$

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.5f)$$

$$x_1 = 4 - \frac{29}{16} = 2.19 \quad (2.5g)$$

Geometrisch entspricht der Term $f'(x_n)$ der Steigung der Tangente im Startwert x_0 der Funktion. Die Tangente erzeugt einen Schnittpunkt mit der x-Achse, der Abstand zwischen Schnittpunkt und x_0 wird vom Startwert x_0 subtrahiert und wir erhalten den neuen Wert x_1 für den nächsten Iterationsschritt. Dieser Vorgang wird nun so oft wiederholt, bis die Nullstelle oder eine hinreichend genaue Lösung der Nullstelle gefunden wird.

2.3 PSXlink

PSXLink schafft die Verbindung zwischen PSE und Microsoft Excel. Der Datenaustausch kann hier in beide Richtungen erfolgen. Es können mittels einer Excel Arbeitsmappe Daten aus PSE in die Arbeitsmappe importiert werden, als auch nach PSE exportiert werden. Auch die Steuerung einer Rechnung durch Setzen von

Variablen in der Mappe ist möglich. Dadurch muss PSE durch den Nutzer nicht direkt geöffnet werden. Der Vorteil dieses Moduls liegt daher in der Handhabung zum Input von Daten aus Excel (z.B. Messergebnisse), wie in der Aufbereitung von simulierten Ergebnissen aus PSE.

3 Modellierung

3.1 ECO-COOL Library

Die im Zuge des ECO-COOL Projektes entwickelte ECO-COOL Library ist eine mit Hilfe von IPSEpro geschaffene Modellbibliothek, um handelsübliche Haushaltskühlgeräte modellieren, simulieren und validieren zu können. Die Library beinhaltet grundsätzlich alle Elemente, um jedes Kühlgerät vollständig abzubilden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die bereits in Abschnitt 2.1.1 erklärten Modelltypen der ECO-COOL Library eingegangen. Inhaltlich wird eine allgemeine Erklärung und die jeweilige Aufgabe der Modelle beschrieben. Es werden auch einzelne Codefragmente der Modelle präsentiert, welche vorrangig Massen- und Energieerhaltungssätze betreffen. Die darin verwendeten Variablen und Begrifflichkeiten werden im Anhang A tabelliert und erläutert. Die erwähnten Codefragmente zeigen bei weitem nicht die vollständige Modellierung. Nicht Präsentiertes betrifft Variablenübergaben zwischen den Units oder auch sogenannte Extern Functions. Der Vorteil der Extern Functions ist, dass komplexere Datenstrukturen und Algorithmen in einer gängigen Programmiersprache entwickelt und dann über ein Interface in MDK eingebunden werden können. In den meisten Fällen betreffen Extern Functions mathematische Methoden aber auch Datentabellen. Die Implementierung erfolgt in einer Dynamic Link Library (DLL), auf die während der Simulation in PSE zugegriffen wird. Viele Modelle sind stationär als auch transient entwickelt. Falls keine Energie- oder auch Massenspeicherung innerhalb der Komponenten auftritt bzw. vernachlässigbar ist, sind diese Modelle quasistationär abgebildet.

Für einen tieferen und detaillierten Einblick der Modelle, sei an dieser Stelle auf die Dissertation Rohrhofer [13] verwiesen.

3.2 Connections

In der ECO-COOL Library finden fünf Modelle des Typs Connection Anwendung:

- Stream
- Stream_h
- HeatFlux
- Temperature
- Control.

In Abbildung 3.1 ist die grafische Darstellung der Connections in PSE gezeigt:

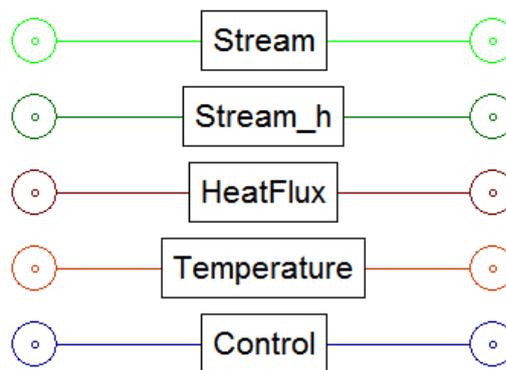


Abbildung 3.1: Connections in PSE

Grundsätzlich gilt für alle Connections, dass sie als Interface zwischen den Units agieren. Man kann sie sich als Trennfläche von zwei Units vorstellen, an welcher alle zufließenden Größen auch wieder als abfließende Größen für die anschließende Unit zur Verfügung stehen. Kurz gesagt, Connections sind also für den Transport der Größen zwischen den Units zuständig. Es gibt aber auch Connections, die zusätzlich zum Informationstransport Berechnungen ausführen.

3.2.1 Stream Connection

In der ECO-COOL Library wird bei der Berechnung der physikalischen Eigenschaften des Kältemittels, die REFPROP [8] Datenbank Version 9.1 verwendet. Durch eine Extern Function wird eine dem Kältemittel entsprechende Stoffdatenbank aufgerufen. Nach Angabe eines eindeutig definierten physikalischen Zustandes durch z.B. spezifische Enthalpie (h) und Druck (p), kann die Temperatur (t) bestimmt (siehe Quellcode 3.1). Es ist daher möglich, alle in REFPROP zur Verfügung stehenden Kältemittel für den Kältekreislauf auszuwählen. Die Übergabe eines Zustands des Kältemittels, von einer Unit auf die nächste, erfolgt dabei nur in Strömungsrichtung.

Quellcode 3.1: MDL Code HeatFlux Connection

```
f_t:    t = Composition.o_t_ph(p,h);
f_rho:  rho = Composition.o_rho_ph(p,h);
f_s:    s = Composition.o_s_ph(p,h);
```

3.2.2 Stream_h Connection

Die Stream_h Connection erfüllt alle Funktionen, welche auch die Stream Connection inne hat, sollte die Übergabe in Strömungsrichtung geschehen. Ändert sich aber die Strömungsrichtung, das bedeutet der Massenstrom (\dot{m}) wird negativ und es tritt Rückwärtsströmen auf, dann ändert sich auch der Wert der Zustandsgröße h sprunghaft. Um diesen Sprung der Enthalpie bei der Diskretisierung für das Newton-Raphson Verfahren lösbar zu machen, wird der Massenstrom um einen Bereich von 0 linear interpoliert. Ein solches Modell wurde notwendig, um das Rückwärtsströmen des Kältemittels im Verdampfer als auch im Verflüssiger zu ermöglichen.

3.2.3 HeatFlux Connection

Die HeatFlux Connection dient zur Modellierung des Wärmestromes (\dot{Q}) zwischen zwei Units. Durch Definition der Eingangs- oder Ausgangsvariablen, wie Schichtdicke (d), Wärmeleitfähigkeit (λ) und Wärmeübergangskoeffizient (α), lässt sich der Wärmedurchgangskoeffizient (k) bestimmen (siehe Quellcode 3.2). In weiterer Folge wird dann der Wärmestrom berechnet.

Quellcode 3.2: MDL Code Stream Connection

```
## heat transfer coefficient
f_htc:  k = 1/(d_feed/par_feed + d_drain/par_drain);

## transferred heat
f_qdot: q_dot = k*Area*(t_feed - t_drain);
```

3.2.4 Temperature Connection

Die Temperature Connection wurde speziell zur Übergabe der Temperatur zwischen Verdampfer- und Verflüssigerunits modelliert. Dadurch besteht die Möglichkeit die Wärmeleitung des Materials zu berücksichtigen.

3.2.5 Control Connection

Die Control Connection ist für die Übertragung einer Stellgröße verantwortlich. Sie bekommt eine beliebige Größe x der Unit I_Control und übergibt diese dann der Empfängerunit. Beispielhaft ist die Übertragung der Drehzahl an den Kompressor im Modell.

3.3 Terminals

 Wie bereits erwähnt dient die Connection zum Informationstransport, daher muss es auch Elemente der Übernahme und Aufgabe zum Anschluss an die Units geben. Diese Elemente werden in IPSEpro durch die Terminals repräsentiert. In der Form von Terminals kann eine Unit Größen versenden oder empfangen. Die Schreibform der von den Terminals übergebenen Größen setzt sich aus der Kennzeichnung zu- oder abfließend (*drain*, *feed*), aus dem Typ der Connection (Stream *ohne Kürzel*, Steam_h *S*, HeatFlux *H*, Temperature *T*, Control *C* und aus der übermittelten Größe *Variable* zusammen. Eine zufließende Größe, in diesem Fall die Variable *Area*, für eine Connection HeatFlux hat also die Form *feedH.Area*, die einer abfließenden *drainH.Area*. Grafisch liegt der Unterschied in einem farblich voll ausgefüllten Terminal für zufließende Größen und einem nur farblich umrandeten Terminal für abfließende Größen.

3.4 Globals

Da sehr viele Units und auch Connections von den selben Variablen und Parametern abhängen, empfiehlt es sich durch Erstellen eines Globals eine Referenz zu schaffen, um sich mehrmalig darauf beziehen zu können. Das Global hat für den Prozessaufbau keine physikalische Notwendigkeit, es dient rein zur Effizienzsteigerung und Nutzerfreundlichkeit in PSE. Im Falle des Fehlens eines Globals, für z.B die Raumluft, würde das bedeuten, dass jedes im Austausch stehende Element im Kältekreislauf, die Definition der Stoffdaten von neuem benötigt.

Folgende sieben Globals sind verfügbar:

- Ambient
- Area
- Geometry
- Metal
- O_Composition
- Switch
- Wall

3.4.1 Ambient

Das Global Ambient modelliert ein Umgebungsmedium. Die Temperatur als auch der Wärmeübergangskoeffizient sind Variablen und Parameter wie Prandtl-Zahl (Pr), Nußelt-Zahl (Nu) und Wärmeleitfähigkeit sind darin eingebunden. Im Falle des Kältekreislaufes lässt sich somit die Raumluft hinreichend genau abbilden.

3.4.2 Area

Ermöglicht die Übergabe einer Fläche an mehrere Units. Bei der Modellierung des Haushaltskühlgerätes ist bei geometrisch gleichen Flächen nur eine einmalige Eingabe der Abmessungen erforderlich.

3.4.3 Geometry

Das Geometry Global folgt dem selben Prinzip wie dem des zuvor erwähnten Area Global, doch ist es speziell für die Verdampfer- und Verflüssigerunits modelliert. Es beinhaltet Variablen für Oberflächen, Durchmesser und Längen der Units.

3.4.4 Metal

Erfordert die Eingabe der Stoffdaten für alle in Verdampfer- und Verflüssigerunits verwendeten Metalle.

3.4.5 O_Composition

Das Global O_Composition dient als Referenz für das verwendete Kältemittel im Kältekreislauf. Durch mehrere Extern Functions, die die Stoffdatenbanken im REF-PROP aufrufen, ist ein einmaliges Erstellen der Stoffdaten des gewünschten Kältemittels notwendig, um es dann in den vorhandenen Units und Streams verwenden zu können.

3.4.6 Switch

Um die Wärmeübertragung von Verdampferelementen adiabatisch zu schalten, wird das Global Switch benötigt.

3.4.7 Wall

Ein Kühlgerät besteht innerhalb seines Gehäuses aus hintereinanderfolgenden Isolierschichten, die geometrisch und in ihren Stoffeigenschaften gleich sind. Deshalb wurde um den Modellaufbau zu vereinfachen, das Global Wall abgebildet.

3.5 Units

Die physikalischen Vorgänge in einer Komponente werden in Units, kurz erwähnt im Abschnitt 2.1.1.1, modelliert. Für die ECO-COOL Library wurde dabei der Kältekreislauf eines Kühlgerätes und der dazugehörige Aufbau in seine wesentlichen Komponenten zerlegt.

In den meisten Fällen besitzen die Units mehr als ein Modell, nämlich ein stationäres als auch ein instationäres. Auch existieren grafisch ähnliche Units, die sich aber nur in Anzahl und Anordnung der Terminals unterscheiden. Eingegangen wird daher in der folgenden Ausführung immer nur auf eine Unit einer sich ähnelnden Gruppe.

3.5.1 Compressor



Zur Abbildung eines semi-hermetischen Kühlschrankkompressors stehen die drei Modelle,

1. Compressor_polytropic
2. Compressor_semiempirical
3. Compressor_Posch

, in der Unit Compressor (Kompressorunit) zur Auswahl. Alle drei Modelle unterliegen einer nulldimensionalen Betrachtung, es gibt keinen Wärmeaustausch mit der Umgebung und Energie- und Massenspeicher bleiben unberücksichtigt. Die zu berechnenden Größen sind die elektrische Leistung (P) und der Massenstrom (\dot{m}), die thermische Betrachtung erfolgt in einer eigenen Unit (siehe Abschnitt 3.5.2).

Das polytrope Modell folgt der klassischen thermodynamischen Betrachtung eines Kolbenkompressors. Die tatsächliche Zustandsänderung wird durch eine Polytrope angenähert.

Das semi-empirische Kompressormodell nach Jähnig u. a. [7] berechnet Massenstrom und elektrische Leistung mit Hilfe von Fitparametern. Der Massenfluss an der Saugseite wird durch einen volumetrischen Wirkungsgrad (η_v), einem geometrischen Volumenstrom (\dot{V}) und dem spezifischem Volumen (v) bestimmt. Zur Berechnung der elektrischen Leistung wird die isentrope Kompressionsarbeit mit einem kombinierten Wirkungsgrad (η_{comb}) und dem zuvor berechneten Massenfluss bestimmt.

Das Modell Compressor_Posch (Quellcode 3.3) folgt auch einem semi-empirischen Ansatz nach Li [9]. Über den volumetrischen Wirkungsgrad (η_v) wird der Massenfluss berechnet und über den kombinierten Wirkungsgrad kann in weiterer Folge die elektrische Kompressorleistung bestimmt werden. Die darin verwendeten Fitparameter wurden experimentell für den verwendeten Kompressor bestimmt [11]. Des Weiteren wird in diesem Modell der Austrittszustand des Gases über eine Isentrope bestimmt.

Quellcode 3.3: MDL Code Compressor_Posch

```
#Mass balance
f_mass: o = (feed.massflow - drain.massflow);

#Volume flow
f_Vflow: o = (n/60*V_h-V_flow);

#Mass flow
f_mflow: o = (eta_v * V_flow*Composition.o_rho_ph(feed.p, feed.h) -
  ↪          1e-3*drain.massflow)*1e5;

#Isentropic relation
f_is: drain.s = feed.s;
```

3 Modellierung

```
#Isentropic power
f_P_is: P_is + feed.massflow*(feed.h-drain.h) = 0;

#Volumetric efficiency
f_eta_v: eta_v = b1+b2*(pressure_ratio)^(1/k);

#Power input
f_P: P * eta_comb = P_is;

#Combined efficiency
f_eta_comb: eta_comb = 1/(a1+a2/(1e5*feed.p)+a3/(1e5*drain.p));
```

3.5.2 Shell



Das zuvor erwähnte Kompressormodell reicht noch nicht vollständig zur Abbildung eines Kompressors im Kältekreislauf aus, da in diesem die gesamte thermische Masse des Kompressorgehäuses und der Bauteile im Inneren (Motor, Verdichter u. Druckleitung) nicht berücksichtigt ist. Aus diesem Grund wurde die Unit Shell hinzugefügt, die wiederum eine Massen- und Energiebilanz für eine sogenannte „Shell side“ und eine „Hot side“ besitzt. Die Shell side nimmt Einfluss auf die Größen des Saugzustandes, u.a. durch den Wärmetransfer zwischen der Kompressorwand und dem Kältemittel. In der Hot side werden die Größen des Austrittszustandes erfasst, um den Einfluss des austretenden verdichteten Kältemittels zu modellieren. Die Unit Shell wurde für den stationären als auch den transienten Fall entwickelt. Im Quellcode 3.4 sind Codezeilen des transienten Falls gezeigt.

Quellcode 3.4: MDL Code Shell

```
## Shell side
# Mass balance
f_mass_balance: 1e3*mass' = 1e3*(feed.massflow - drain.massflow +
    ↪ feed_oil.massflow);

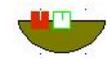
# Energy balance
f_energy_balance: mass*u' + mass'*u = feed.massflow*feed.h -
    ↪ drain.massflow*drain.h + feed_oil.massflow*feed_oil.h
    ↪ + alpha_Hx*Area_Hx*(drain_h.t - t);

# Wall temperature
f_temp_wall: rho_w*1e3*c_w*Vol_w* t_w' = feedH.q_dot - alpha_gp*Area_gp*
    ↪ (drain_h.t - t_w);

## Hot side
#Mass balance
f_hot_mass: 0 = (feed_h.massflow - drain_h.massflow)*1e3;
```

```
# Energy balance
f_hot_energy: feed_h.massflow*(feed_h.h - drain_h.h) = q_Hx' + q_gp';
```

3.5.3 Oil_Sump



Zur Vervollständigung des Kompressormodells ist die Berücksichtigung des Schmierölsumpfes im Kompressor notwendig. Durch Ab- und Desorption des Kältemittels durch das Schmieröl ist je nach Betriebszustand, abhängig von Druck und Temperatur, eine bestimmte Menge an Kältemittel im Öl gelöst. Das von Zustandsänderungen bedingte Massenverhältnis kann über eine Zeitfunktion modelliert werden [10]. Die bereits in der Unit Shell aufgelöste Wandtemperatur ist maßgebend für die Öltemperatur, heißt ohne zeitliche Verzögerung immer dieselbe. Es wird weiter angenommen, dass das absorbierte Kältemittel sofort die Öltemperatur annimmt und das desorbierte, die des Kältemitteldampfes. Der Wärmeaustausch zwischen dem Kältemitteldampf und dem Öl-Kältemittel Gemisch wurde vernachlässigt.

Quellcode 3.5: MDL Code Oil_Sump

```
## Differential Equations
# Absorption/desorption
f_ab_de: mu' = 1/tau * (mu_sat - mu);

# Mass balance
f_mass_balance: 1e3*mass' = -1e3*drain.massflow;

## Algebraic Equations
# Mass ratio
f_mu: mu = mass/mass_oil;
f_mu_sat: mu_sat = mass_sat/mass_oil;
```

3.5.4 Ambient



Die Zustände innerhalb eines jeden Kreislaufes, ganz egal ob Kältemaschine oder Wärmepumpe, werden von außen aufgeprägt.

Im Fall des Haushaltskühlgerätes ist das Umgebungsmedium die Raumluft, simulierbar über die Unit Ambient (Ambientunit). Ihr direkter oder indirekter Einfluss auf jede Unit im Kreislauf ist durch den Wärmetransfer, modelliert durch die Connections HeatFlux, zwischen den beteiligten Units berücksichtigt.

3.5.5 Wall

Der Aufbau eines jeden Kühlgerätegehäuses besteht aus mehreren Schichten. Stärke und Material des Isolierstoffes spielen dabei eine entscheidende Rolle, dies muss auch Berücksichtigung in der Modellierung finden. In der Unit Wall sind bereits die Geometrien und Eigenschaften der Schichten über das Global Wall eingebunden. Die Temperaturänderung der Wall, infolge von Wärmeeinträgen, wird durch die Energiebilanz (transienter Fall gezeigt in Quellcode 3.6) bestimmt.

Quellcode 3.6: MDL Wall

```
# Temperature evolution
f_t: wall.rho*wall.c*1e3*wall.Vol* t' = drainH.q_dot
    ↪                               - feedH.q_dot;
```

3.5.6 Condenser



Die Modellierung der Wärmeübertrager, in diesem Fall der Kondensatoren, beschränkt sich auf ein einzelnes Kontrollvolumen in eindimensionaler Betrachtung. In diesem Volumen kann der Zustand gasförmig, flüssig oder zweiphasig sein. Gravitation, potentielle und kinetische Energie sind vernachlässigt und es wird von einem horizontalem Rohr ausgegangen. Des Weiteren ist ein Wärmetransport mittels Wärmeleitung als auch durch Wärmeübergang zwischen mehreren Units möglich. Unterschiede gibt es in der Berechnung der Zustände im Kontrollvolumen. Im zweiphasigen Gebiet erfolgt die Berechnung des Strömungsdampfgehalts nach Hajal u. a. [4], die Strömungsformkarten und der Wärmeübergang wird nach Thome u. a. [16] berechnet. Der Druckverlust errechnet sich nach Quibén und Thome [12]. Der Wärmeübergang im einphasigen Gebiet erfolgt nach Gnielinski [3] und der Druckverlust nach der Darcy-Weisbach Gleichung.

Die Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie im transienten Fall sind im Quellcode 3.7 gezeigt.

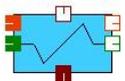
Quellcode 3.7: MDL Condenser

```
## Differential Equations
# Energy balance
f_energy_balance: mass*u' + mass'*u = q' + feed.massflow*feed.h
    ↪                               - drain.massflow*drain.h;

# Mass balance
f_mass_balance: 1e3*mass' = 1e3*(feed.massflow - drain.massflow);
```

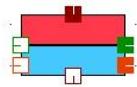
```
# Integrate heat transfer
f_qtrans: q' = alpha*geometry.Area_ip*(t_p - t);
f_qdot:   q_dot = q';
```

3.5.7 Evaporator



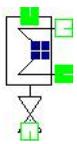
Alle getroffenen Annahmen und Modelle für die Unit Condenser (Kondensatorunit) treffen in dieser Form auch auf die Modellierung der Unit Evaporator (Verdampferunit) zu. Davon auszuschließen ist aber die Berechnung des Strömungsdampfgehalts im zweiphasigen Gebiet, da darin der Ansatz für die Berechnung nach Steiner [15] Anwendung findet. Auch die Berechnung des Wärmeübergangs im Zweiphasengebiet nach Wojtan u. a. [17], Wojtan u. a. [18] unterscheidet sich zu der im Kondensator.

3.5.8 Accumulator



Des Weiteren ist in der ECO-COOL Library auch ein Niederdrucksammler realisiert. Die physikalische und mathematische Modellierung ist ident zu jener der Unit Evaporator, der Unterschied liegt jedoch in der Weitergabe der Austrittsenthalpie. Bis zu einer festgelegten Grenze, unter welcher die Austrittsenthalpie des Kältemittels einem Zustand im Nassdampfgebiet entspricht, erfolgt die Weitergabe der Enthalpie für die jeweilige gasförmige Phase.

3.5.9 Capillary



Die Modellierung der Unit Capillary wurde mittels neuronalen Netzwerken (ANN) realisiert, dem ein 1d-Modell zugrunde liegt. Aus einem bereits erstellten Kennfeld ist das ANN in der Lage Beziehungen zwischen mehreren Parametern herzustellen, somit lassen sich bei gegebenen Eintrittsgrößen die geforderten Austrittsgrößen bestimmen [5]. Diese Beziehungen sind aber nur für einen vordefinierten Gültigkeitsbereich (alle gängigen Geometrien für Haushaltskühlgeräte) anwendbar. Um weiter physikalisch richtige Resultate zu produzieren, gibt es z.B. bei Ein- und Ausschaltvorgängen des Kompressors einen minimal möglichen Massenfluss als Grenze. Der Vorteil der Verwendung von ANN liegt vor allem in einer hohen Rechenstabilität als auch in einer niedrigen Rechenzeit.

Zugehörig der Unit Capillary ist auch ein interner Wärmeübertrager, modelliert als 0d-Modell, welcher den Temperaturhub von Verdampferaustritt auf Verdichtereintritt abbildet.

Wie im Quellcode 3.8 ersichtlich finden sich keine Speicherterme, dies bedeutet eine quasistationäre Modellierung.

Quellcode 3.8: MDL Code Capillary

```
#Cap side
f_mass1: feed.massflow = drain.massflow;
f_energy1: feed.massflow*(feed.h - drain.h) = Qdot;

#Htx side
f_mass2: suc_in.massflow = suc_out.massflow;
f_energy2: suc_in.massflow*(suc_in.h - suc_out.h) = -Qdot;

#Pressure drop
f_dp: suc_in.p - dp_suc = suc_out.p;
```

3.5.10 Compartment

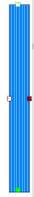


Die Temperaturentwicklung der Innenluft eines Kühlgeräts wird über die Unit Compartment erfasst. Der Kühlraum wird als ein einzelnes Kontrollvolumen betrachtet und die Einflüsse der Wärmeströme auf die Lufttemperatur gemittelt. Das 0d-Modell lässt dadurch eine Simulation der Schichtung der Temperatur innerhalb des Compartments nicht zu und Auswirkungen der Schwerkraft bleiben somit unberücksichtigt. Die Angabe der Innengeometrie des Kühlraumes und der Stoffeigenschaften der Luft sind ausreichend, um die Temperatur zu bestimmen. In Quellcode 3.9 ist die Energiebilanz im transienten Fall zu sehen.

Quellcode 3.9: MDL Code Compartment

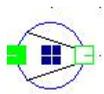
```
# Temperature evolution
f_t1: rho*c_v*1e3*Vol* t' = - feedH_1.q_dot - feedH_2.q_dot
  ↪ - feedH_3.q_dot - feedH_4.q_dot
  ↪ - feedH_5.q_dot - feedH_6.q_dot
  ↪ - feedH_7.q_dot;
```

3.5.11 Compartment_Shaft



Bei einer Umwälzung der Luft über den Verdampfer wird diese in Strömungsschächten kanalisiert. Das Modell der Unit Compartment_shaft bildet die Luftströmung ab, wobei der entstehende Druckverlust (Δp) nach der Darcy-Weisbach Gleichung berechnet wird. Die Wärmeübergangszahl errechnet sich im turbulenten wie im laminaren Bereich nach Gnielinski [3]. Im Übergangsbereich aus der Interpolation der beiden Fälle wurde lineare Interpolation gewählt, um einen stetigen Verlauf zu gewährleisten.

3.5.12 Fan



Die Modellierung eines Gebläses wurde notwendig, da moderne Haushaltskühlgeräte die Umwälzung der Luft in den Kühlfächern mittels Ventilatoren bewerkstelligen. Das mathematische, physikalische Modell folgt dem Ansatz der gängigen Strömungsmechanik. Eine Druckerhöhung (Δp) ist erforderlich, um einen bestimmten Volumenstrom zu fördern, dabei gibt das Gebläse eine Leistung an die Luft ab (Quellcode 3.10).

Quellcode 3.10: MDL Code Fan

```
# Mass balance
f_mass: feed.massflow = drain.massflow;

# Pressure increase
f_p: drain.p = feed.p + delta_p;

# Volume flow
f_volume_flow: V_dot = v*A;

# Power
f_P: P = delta_p*V_dot;
```

3.5.13 I_Control



Als Regelung wird in Kühlgeräten zumeist das Prinzip eines Zweipunktreglers verwendet. Die Sensortemperatur, gemessen durch die Unit Temperature_Sensor im Kühlfach oder direkt am Verdampfer, dient dabei als Referenzgröße und Eingangsgröße für die Unit. Durch Festlegen einer Einschalt- und Ausschalttemperatur, für z.B. den Verdichter, werden Grenzen bestimmt, an denen die Schaltvorgänge ausgelöst werden. Der Regler schaltet also

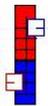
den Verdichter auf eine bestimmte Drehzahl, wenn die Einschalttemperatur und umgekehrt, wenn die Ausschalttemperatur erreicht ist.

3.5.14 I_Control_2



Die Unit I_Control_2 unterliegt dem selben Funktionsprinzip wie die Unit I_Control, sie ist aber in der Lage zwei verschiedene Eingangsgrößen zu verarbeiten. Damit ist es möglich die Sensortemperaturen zweier verschiedener Units zu nutzen.

3.5.15 Temperature_Sensor



Um der I_Control die aktuelle Temperaturentwicklung im Kühlfach oder am Verdampfer mitteilen zu können, ist die eigene Unit Temperature_Sensor notwendig. Wie in Quellcode 3.11 gezeigt, kann die Sensortemperatur aus der Energiebilanz errechnet werden. Entscheidend sind dabei die Wärmeströme die ein Aufwärmen oder Abkühlen, in Abhängigkeit der Stoffeigenschaften des Sensors, bewirken. Durch Übertragung der Sensortemperatur an die Unit I_Control kann anhand dieser Referenzgröße die Regelung erfolgen.

Quellcode 3.11: MDL Code Temperature_Sensor

```
# Temperature evolution
f_t: rho*c*Vol*t' = drainH.q_dot;

# Control
f_c: drainC.x = t;
```

3.5.16 Area_Link



In Abschnitt 3.4 wurde bereits erwähnt, dass Globals mehrere Variablen und Parameter zur Verfügung stellen. Die Unit Area_Link greift u.a. Variablen der Globals Area (Flächenglobal) und Wall (Geometrieglobal) auf. Sie übergibt z.B. die errechnete Fläche aus der Geometrie der Unit Wall für das Flächenglobal.

3.5.17 Geometry_Link



In der Unit Geometry_Link (Geometryunit) werden Berechnungen für die Rohrgeometrie, der Kondensator- und Verdampferelemente ausgeführt. Sie bindet das Global Geometry ein und errechnet dann verschiedene Durchmesser, Längen und Flächen für die Units Evaporator und Condenser. Bei Verwendung muss die Fläche für den Wärmeübergang auf der Connection HeatFlux nicht mehr eingebunden werden, da sie bereits mitdefiniert ist.

3.5.18 Stream_Conversion



Die Units (Stream_Conversion_a, Stream_Conversion_b) des Typs Stream_Conversion stellen den Übergang zwischen den beiden Connections Stream und Stream_h her.

4 Protokollierung

Die Vorstellung der Simulationsumgebung IPSEpro aus Kapitel 2 und die Entwicklung der ECO-COOL Library in Kapitel 3 diente zur Einführung und zum besseren Verständnis für die nachfolgenden Abschnitte dieses Kapitels. Ein Ziel dieser Arbeit ist die realistische Abbildung von Kältekreisläufen in modernen Haushaltskühlgeräten. Die Grundlage dafür war die Herausarbeitung vieler Einzelmodelle, um dann Schritt für Schritt die Zusammensetzung hin zum vollständigen Kreislauf zu gewährleisten.

Die Erfahrung in PSE hat gezeigt, dass ein Aufbau beginnend mit einer instationären Betrachtung nur sehr schwer umsetzbar ist. Selbst mit guten Anfangswerten hat sich die Lösungsfindung zu instabil und anfällig präsentiert. Deshalb wurden alle Einzelmodelle stationär modelliert, um dann transient fortfahren zu können. Durch den Prozessaufbau für den stationären Fall und anschließendem Lösen des Gleichungssystems werden die erforderlichen Resultate der Variablen erzielt. Diese Resultate können dann als Startwert für die dynamische Simulation genutzt werden. Die Idee ist also, zuallererst einen stationären Punkt des vollständigen und geschlossenen Kältekreislaufs zu finden und erst danach die Umstellung auf den transienten Fall vorzunehmen.

4.1 Stationäre Entwicklung

Bevor mit dem Aufbau begonnen wird, folgen noch kurze Details zu den Solvereinstellungen und dem Protokoll in PSE.

4.1.1 Iteration

Während des Lösungsprozesses werden alle als Variablen deklarierten Größen (Parameter sind Konstanten und bleiben somit unverändert) solange iteriert bis eines der beiden Abbruchkriterien erfüllt ist:

- Die Norm der relativen Änderung Δx jeder Variable im Iterationsschritt muss geringer sein als eine bestimmte Toleranz δ , $\|\frac{\Delta x}{x}\| < \delta$.

- Die Norm der Differenz, das Residuum $f(x)$, zwischen linker und rechter Seite jeder Gleichung, muss geringer sein als eine bestimmte Toleranz ε , $\|f(x)\|_2 < \varepsilon$.

Zusammenfassend sind folgende Kriterien im Fenster *Solver Parameters* zu setzen, um einen stationären Lösungsprozess zu starten:

- *Max. steps* Die maximal erlaubte Anzahl an Iterationsschritten zur Konvergenz.
- *y-tolerance* Eine Konvergenz der Lösung kann es nur geben solange das Kriterium $\|f(x)\| < \varepsilon$ erfüllt ist.
- *x-tolerance* Eine Konvergenz der Lösung kann es nur geben solange das Kriterium $\|\Delta x\| < \delta$ erfüllt ist.

Optional und bei der Verwendung der gedämpften Lösungsmethode:

- *Decrease Factor* Zur Verkleinerung der relativen Änderung Δx genutzter Dämpfungsfaktor α
- *Minimum Damping Factor* Wenn $\alpha^n < \alpha_{min}$ gibt es keine Konvergenz der Lösung.

4.1.2 Protokoll

Bei jedem Lösungsvorgang in PSE wird auch automatisch ein Rechnungsprotokoll der Operationen erstellt. Grundsätzlich werden dabei strukturelle Informationen ausgegeben, wie z.B. die Gruppeneinteilung der Gleichungen und der zugehörigen Variablen vorgenommen wird, aber auch Informationen über Warnungen und Fehler, die während der Lösung auftreten. Es gibt auch die Möglichkeit durch Setzen der Checkbox *Extended Protocol* sich ein erweitertes Protokoll erstellen zu lassen. Es zeigt detaillierte Informationen der Gruppeneinteilung und gibt den Korrekturschritt Δx und das Residuum $f(x)$ für jede Iteration der Gruppe an.

4.1.3 Settings Analysis

Ab Version 7 ist die hilfreiche Settings Analysis in PSE implementiert. Ihre Aktivierung erfolgt unter dem Reiter *Project*, dann *Analysis Options* und dem Setzen der Checkbox *Run a Settings Analysis when the model is solved*. Durch diese Auswahl wird die Settings Analysis immer ausgeführt, wenn der Solver gestartet wird.

Die Settings Analysis erkennt eine Unter- oder Überbestimmtheit des gesamten Gleichungssystems. Bei unterbestimmten Systemen gibt sie an, welche Variablen gesetzt werden können, sodass das System nicht singular wird. Bei einer Überbestimmtheit liefert sie Vorschläge, welche gesetzten Variablen freigegeben werden können. Farblich werden bei Unterbestimmtheit alle in Frage kommenden Variablen grün, bei Überbestimmtheit orange hinterlegt. Die Analysis liefert also Vorschläge zur mathematischen Sinnhaftigkeit des Gleichungssystems, die Deselektion und Selektion der gekennzeichneten Variablen sind dem Nutzer überlassen.

4.1.4 Stationärer Aufbau

Das erste abzubildende Kühlgerät ist ein Gefriergerät aus dem Haushaltssektor. Die Zusammensetzung des Geräts von außen nach innen betrachtet kann auf drei Schichten reduziert werden, das Blechgehäuse an der Außenseite, eine geschäumte Schicht, die den Verdampfer umhüllt und das aus Kunststoff bestehende Innengehäuse. Die Steuerung erfolgt mit einem Zweipunktregler, welcher über die Lufttemperatur im Inneren des Gehäuse ein Ein- oder Abschalten des Kompressors regelt. Der Kompressor selbst wird nur auf der Drehzahlstufe für Volllast betrieben. Die Verdichtung des Kältemittels erfolgt über einen hermetischen Kolbenkompressor, die Druckreduzierung über ein Kapillarrohr. Der Kondensator auf der Rückseite des Geräts ist ein Drahtrohrverflüssiger und der Verdampfer ist durch mehrmaliges Umwickeln des Innengehäuses ausgeführt. Das Kapillarrohr ist so ausgeführt, dass es Wärme an das Sauggas überträgt.

Wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, wird die Strategie verfolgt über einen stationären Aufbau des Kältekreislaufes, die benötigten Anfangswerte für die dynamische Rechnung zu finden. Somit beginnt wird mit der Definition der Solver Parameter für den stationären Fall begonnen. Die *y-tolerance* und die *x-tolerance* können bei der Voreinstellung von 10^{-4} belassen, die Limitierung der Iterationsschritte *Max. steps* sollte auf 20 verdoppelt werden. Falls es keine Konvergenz der Lösung gibt kann zusätzlich die gedämpfte Lösungsmethode mit den Parametern der Voreinstellung verwendet werden.

4.1.4.1 Kondensator

Grundsätzlich kann an jeder beliebigen Stelle im Kältekreislauf mit der Abstraktion begonnen werden, es wurde aber die Erfahrung gemacht, dass ausgehend vom Kondensatoreintritt problemlose Konvergenz der Lösung erreicht wird. Für den Aufbau des Kondensators, umgeben von der Raumluft, sind nur zwei Unittypen notwendig, nämlich die Unit Condenser und die Unit Ambient. Der Start erfolgt

mit der einfachen Platzierung der Unit Condenser, die nun insgesamt sechs Terminals aufweist. Jeweils für Zu- und Abfluss die Terminals der Connection Stream, Heat Flux und Temperature.

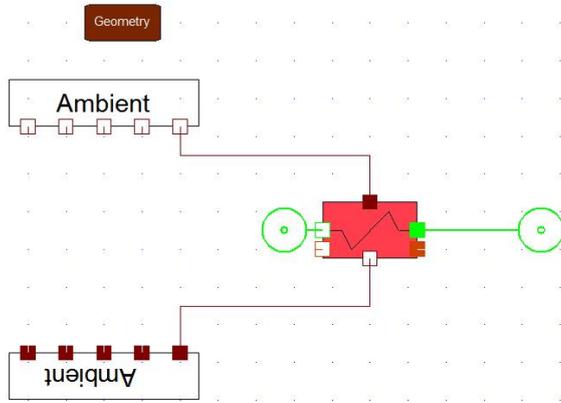


Abbildung 4.1: Stat. Aufbau 1 Kondensatorelement

und Abfluss der Stream Terminals. Nach Anschluss der Stream Terminals können die Stream Connections an den anderen Enden vorläufig ins Leere führen (siehe Abbildung 4.1).

Soweit der Aufbau der physikalischen Abstraktion, es fehlt noch ergänzend die Anwendung der Unit Geometry. Sie besitzt keine Terminals, somit ist das Anschließen von Connections nicht möglich. Es sind alle benötigten Units und die notwendigen Anschlüsse im Flowsheet vorhanden und es wird mit dem Setzen der Variablen begonnen. Damit das erstellte Gleichungssystem bestimmt ist, werden ab nun und im weiteren Verlauf des Aufbaus alle Variablen, welche als Randwerte gesetzt (Optionsfeld auf *set*) werden müssen, namentlich genannt. Natürlich können auch andere Variablenkonstellationen möglich sein, jedoch dient die vorgeschlagene Setzung als Anhaltspunkt.

Es wird mit der Definition des verwendeten Kältemittels durch Angabe der Stoffeigenschaften, im Fall des abgebildeten Gefriergerätes ist das R600a, begonnen. Die Variablen Co_eta_dp und Ev_eta_dp müssen auf den Wert 1 gesetzt werden. Diese beiden Werte faktorisieren den Druckverlust in allen Kondensator- und Verdampferunits und wurden eingeführt um Modellvernachlässigungen ausgleichen zu können. Nach vollständiger Definition des Kältemittels wird ein Global mit dem zugewiesenen Namen erhalten, das dann beliebig oft in anderen Units oder Streams genutzt werden kann.

An den beiden Streams und in der Unit Condenser muss durch die Umschaltfläche *Composition*, das zuvor erstellte Kältemittelglobal ausgewählt werden. Zusätzlich zu den anderen Units, ist in der Unit Condenser über die Umschaltfläche *Model* das

Bis auf die Terminals des Typs Temperature, welche optional anschließbar sind, müssen jetzt die verbleibenden Terminals mit Connections verbunden werden. Durch zweifache Anordnung der Unit Ambient, idealerweise mit fünf Terminals, ober- und unterhalb der Unit Condenser, erfolgt die Verbindung der Units Condenser und Ambient. Durch das vorläufige Nichtbelegen der Terminals Temperature, verbleiben nur noch Zu-

stationäre Modell *Condenser_stat* zu selektieren. Auf dieselbe Weise muss die Festlegung des Globals der Raumluft geschehen, die Einbindung des neu angelegten Globals passiert über die Umschaltfläche *Ambiance* in den beiden Ambientunits. Die Variablen für Temperatur t und Wärmeübergangszahl $alpha$ sind Setzwerte. Zudem muss noch das Global für die Geometrie in der Unit *Geometry* erstellt werden. Das Global selbst benötigt keine Festsetzung der Variablen, aber in der Unit müssen die vier Werte *total_length*, *inner_radius*, *outer_radius* und N gesetzt werden. Mit N wird die Anzahl der im Kreislauf aufgebauten Kondensatorunits angegeben. Zur genauen Auflösung eines Kühltanksverflüssigers mit bis zu 40 m Länge sind mehrere finite Volumina in Form der Units *Condenser* notwendig. In jedem Fall sollte die Länge einer einzelnen Unit nicht eine Länge von 0.6 m überschreiten, da sonst die Auflösung der Größen zu grob ist. Die Genauigkeit der Diskretisierung ist aber nicht nur abhängig von der Länge, auch die Größe des Massenstromes und der Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur sind Einfluss nehmend. Das bedeutet für den Aufbau des Kondensators in PSE, dass die Anzahl N immer weiter gesteigert wird, passend zum Fortschritt im Flowsheet. Auch die Länge der Kondensatorunits sollte zur realen Länge hinentwickelt werden, da später bei einer großen Variablenänderung das Newton-Raphson Verfahren viel schwieriger zur Konvergenz zu bringen ist. Für diesen Aufbau wird N nun daher der Wert 1 zugewiesen.

Die Festlegung des Zustandes des Systems bedingt die Angabe zweier intensiver Zustandsgrößen, aufgrund eines Durchschreiten des Zustandes im Nassdampfgebiet, empfiehlt es sich die Größen Druck und spezifische Enthalpie zu verwenden, um immer einen eindeutig definierten Zustand zu haben. Die Systemgröße wird durch die extensive Zustandsgröße Massenstrom bestimmt. Die Initialisation des Kondensatorelementes erfolgt gasförmig, eine vollständige Bestimmung des Gleichungssystems wird durch das Setzen der Variablen Druck p , spezifische Enthalpie h und Massenstrom *massflow* auf der Connection Stream, direkt vor dem Eintritt in die Kondensatorunit, abgeschlossen. Die Rechnung kann jetzt über den Befehl *F5* oder dem entsprechendem Symbol ausgeführt werden.

Für alle Schätzwerte, in PSE *Estimates* genannt, gilt, dass umso mehr Schätzwerte angegeben sind und umso treffender der Gültigkeitsbereich ist, es wahrscheinlicher wird eine Konvergenz der Lösung zu erzielen. Nach jeder erfolgreichen stationären Rechnung sollte der Befehl *Import Estimates* ausgeführt werden, es werden dann die Lösungen der letzten Rechnung als *Estimates* in den Prozessaufbau geladen. Somit sind gute Startwerte für die nächste Rechnung integriert.

Nachdem die Rechnung erfolgreich war und alle Schätzwerte geladen wurden, dupliziert man durch Auswahl der Unit *Condenser* über das Tastenkürzel *STRG+D* die Unit.

Die Unit *Condenser* wurde samt ihren Variablenwerten kopiert. Die abfließende

Stream des ersten Kondensatorelementes wird an die duplizierte Unit angeschlossen.

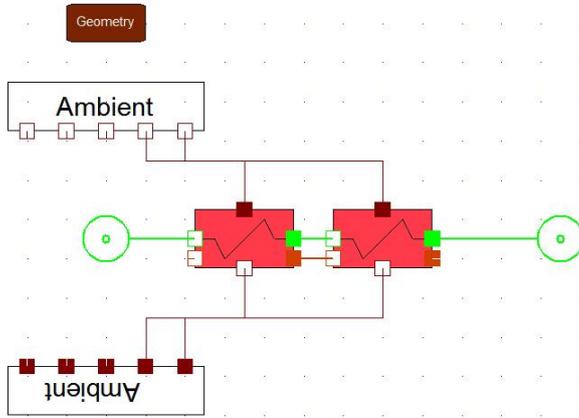


Abbildung 4.2: Stat. Aufbau 2 Kondensatorelemente

Zur hinreichenden genauen Auflösung des Kondensators für das untersuchte Kühlgerät waren 20 Kondensatorelemente notwendig. Die weitere Vorgehensweise für eine zielführende Abbildung des Kondensators in PSE ist die Duplikation der zuvor erstellten Kondensatorunits samt ihrer Streams.

Es wird wieder die abfließende Stream der bestehenden Unit an die neu duplizierten angeschlossen, dann kann wieder gerechnet werden. Überhaupt sollte nach jeder wesentlichen Änderung neu gerechnet und die Estimates geladen werden, um sich nicht zu weit von der aktuellen Lösung zu entfernen und um Schwierigkeiten für die Konvergenz zu vermeiden.

Mittlerweile sind bereits vier Kondensatorunits vorhanden (siehe Abbildung 4.3).

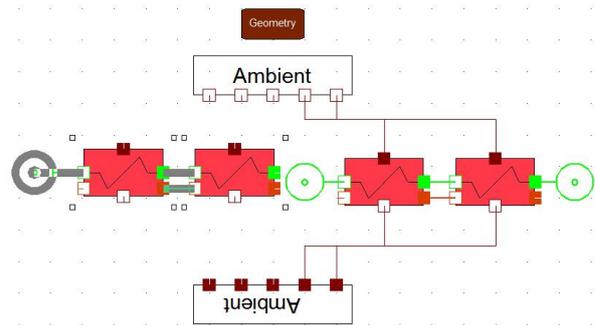


Abbildung 4.3: Stat. Aufbau 4 Kondensatorelemente

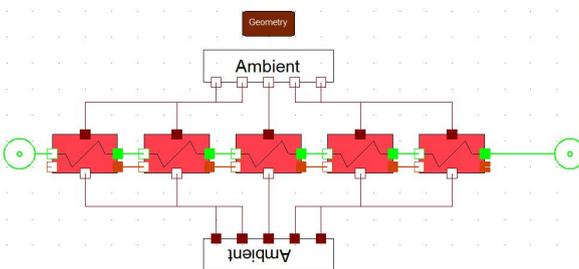


Abbildung 4.4: Stat. Aufbau 5 Kondensatorelemente

des Prozederes wird die gewünschte Anzahl erreicht.

Die Wärmeleitung in den Rohrwänden wird durch Verbinden der Temperature Terminals zwischen den beiden Kondensatorelementen abgebildet. Nach dem Anschluss der Heat Flux an die Units Ambient und Erstellen eines abfließenden Streams für die duplizierte Unit Condenser kann eine neue Rechnung gestartet werden (siehe Abbildung 4.2).

Zur hinreichenden genauen Auflösung des Kondensators für das untersuchte Kühlgerät waren 20 Kondensatorelemente notwendig.

Um alle notwendigen 20 Kondensatorelemente für das untersuchte Kühlgerät im Flowsheet einzubauen, wird eine komplette Anordnung von fünf Kondensatorelementen samt den angeschlossenen Ambientunits dupliziert (siehe Abbildung 4.4). Durch Starten einer neuen Rechnung und Wiederholung

In einem herkömmlichen Kühlgerät ist nach dem Kondensator und vor Eintritt in die Kapillare ein Filter verbaut. Sein Zweck ist es ein Verstopfen der Kapillare durch Ausfrieren oder durch Verunreinigungen zu verhindern. Aufgrund seiner Geometrie und seiner Massen- und Energiespeicherung für den transienten Fall wird er in diesem Modell berücksichtigt.

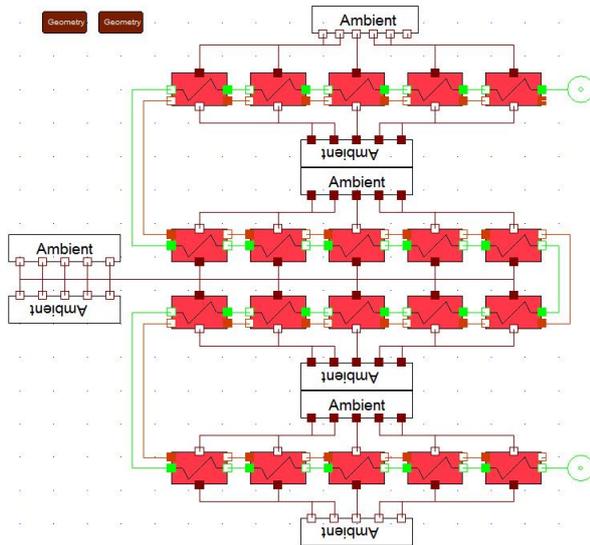


Abbildung 4.5: Stat. Aufbau 20 Kondensatorelemente

Um das Modell in Bezug auf den Kondensator abzuschließen ist noch die Abstraktion der Luftschicht zwischen Kondensatoroberfläche und Rückwand des Kühlgerätegehäuses erforderlich. Dazu wählt man aus der Icon Bar die Unit `Wall_5air` aus und ordnet es so an, dass alle abfließenden Heat Flux Terminals, der kürzlich erstellten Kondensatorunits bedient werden können. Das bedeutet, dass die zuvor erstellten Ambientunits einseitig entfernt werden.

Des Weiteren muss eine Unit `Area_Link` in den Flowsheet eingefügt werden (siehe Abbildung 4.6). Diese wird dazu benötigt um jeweils ein Global für Geometrie (Geometrieglobal `Wall`) und Fläche (Flächenglobal `Area`) der Luftschicht zu erstellen. Das Global für die Geometrie wird über die Umschaltfläche `Wall`, jenes der Fläche über die Umschaltfläche `Area_Wall` in der Unit erstellt und eingebunden. Das Global der Wandgeometrie erfordert die Setzwerte c , ρ , λ , $length$, $width$ und $thickness$. Alle anderen Variablen können dann daraus errechnet werden. Für das Flächenglobal muss kein Wert gesetzt werden, denn es bekommt

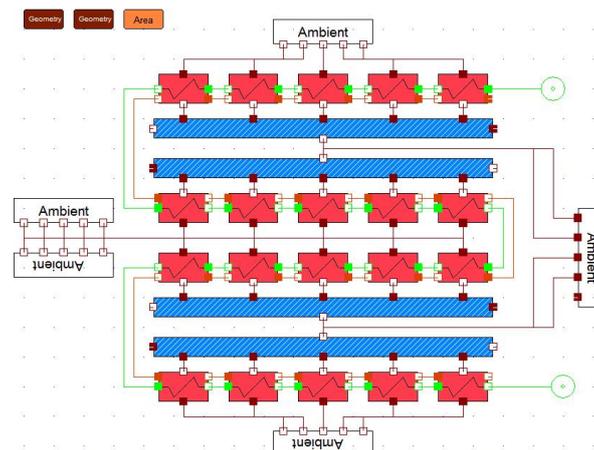


Abbildung 4.6: Stat. Aufbau Kondensator

den Wert für die Fläche vom Geometrieglobal zugewiesen. Die Definition der Unit Wall_5air geschieht wie folgt, über die Umschaltfläche *Composition* wird ein neues Global mit den Stoffeigenschaften der Luft erstellt, die Variablen *Co_eta_dp* und *Ev_eta_dp* müssen wieder auf den Wert 1 gesetzt werden. Die Einbindung des bereits erstellten Globals für die Wandgeometrie wird über die Umschaltfläche *wall* gemacht. Es wird immer noch die Lösung in einem stationären Punkt gesucht, die Einstellung des Modells *Wall_5air_stat* ist erforderlich. (Für den weiteren Verlauf des Abschnittes 4.1.4 wird die selbstständige Einstellung von jedem Modell, gekennzeichnet mit der Endung *_stat*, vorausgesetzt.) Der einzige Setzwert p in der Unit Wall_5air sollte dem Wert des atmosphärischen Drucks entsprechen. Alle Connections des Typs Heat Flux von der Unit Wall_5air zu den Kondensatorelementen brauchen keine Definition der Fläche, weil sie bereits über die Geometryunit mitdefiniert wurden. Für alle abfließenden Connections bindet man das über den Area_Link erstellte Flächenglobal ein. Als Platzhalter wird noch eine Ambient Unit installiert, sie soll später durch die Unit Wall_4f ersetzt werden, um die Koppelung der Luftschicht mit der Rückwand des Gefrierschranks zu simulieren. Hier kann das bereits definierte Global für die Raumluft verwendet werden.

4.1.4.2 Kapillare

Im Anschluss an die letzte Kondensatorunit für den Filter wird die Unit Capillary platziert (siehe Abbildung 4.7).

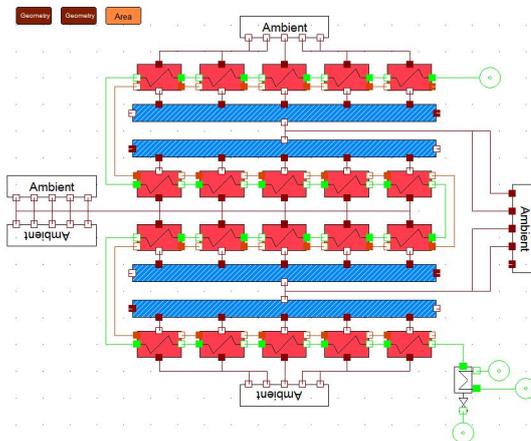


Abbildung 4.7: Stat. Aufbau Kapillare

In der Unit ist auch das Modell eines internen Wärmeübertragers modelliert, deshalb finden sich auch zwei weitere Stream Terminals für die Rückführung des Kältemittels nach dem Verdampferaustritt. Nach dem Anschluss aller Connections ist nur am Eintritt also auf der zufließenden Connection Stream in den internen Wärmeübertrager das Setzen der Variablen *massflow*, p und h erforderlich.

Der Eintrittszustand sollte wie für das Kondensatorelement gasförmig erfolgen. In Anbetracht des späteren Zusammenschließens zu einem Kreislauf mit stationärem Betriebsverhalten muss die Variable *massflow* zahlenmäßig gleich sein, wie jene am Kondensatoreintritt. In der Unit selbst sind alle Variablen zu setzen, bis auf $Qdot$. Es wird wieder für *Composition* das Kältemittelglobal eingebunden (wie für alle folgenden Units, sofern nicht

menschließens zu einem Kreislauf mit stationärem Betriebsverhalten muss die Variable *massflow* zahlenmäßig gleich sein, wie jene am Kondensatoreintritt. In der Unit selbst sind alle Variablen zu setzen, bis auf $Qdot$. Es wird wieder für *Composition* das Kältemittelglobal eingebunden (wie für alle folgenden Units, sofern nicht

explizit auf ein anderes Global für die *Composition* verwiesen wird). Die beiden Variablen η_m und η_h dienen zum Ausgleich etwaiger Modellvernachlässigungen und sollten vorerst auf den Wert 1 gesetzt werden. Für *Model* wird *Cap_ANN* gewählt.

4.1.4.3 Kompressor

Bevor mit dem Aufbau des Verdampfers begonnen wird, muss noch die Implementierung des Kompressors abgeschlossen werden. Zuerst folgt die Platzierung der Unit Compressor im Flowsheet (siehe Abbildung 4.8). Das *Model Compressor_Posch* benötigt als Setzwerte die Fitparameter a_1 , a_2 , a_3 , b_1 und b_2 . Diese Parameter wurden für den im untersuchten Kühlgerät verbauten Kompressor experimentell bestimmt. Sollten keine Fitparameter vorliegen kann auch das *Model Compressor_polytropic* gewählt werden.

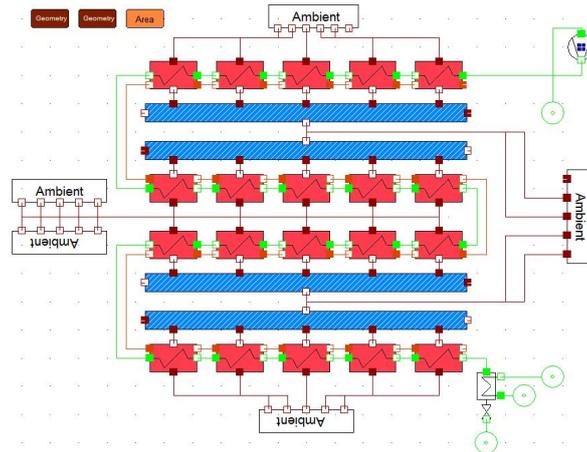


Abbildung 4.8: Stat. Aufbau Kompressor

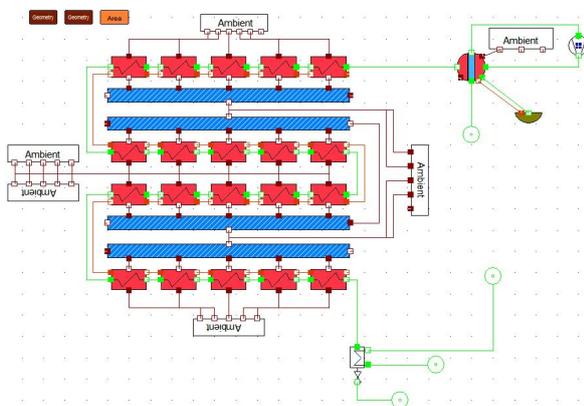


Abbildung 4.9: Stat. Aufbau Shell

meübertrager, durch die blau eingefärbte Zone führt. Die Zone entspricht dem Bereich in der Kapsel (Shell), bevor der Kältemitteldampf angesaugt und erwärmt wird. Der erstmalige Austritt aus der Unit Shell am Ende der blauen Zone ist sogleich der Eintritt in die Compressorunit. Nach dem Austritt aus der Compressorunit fließt das Kältemittel wieder über die Shell an die erste Condenserunit. Das

Als letzten Setzwert wird der Druck p auf der Connection vor dem Eintritt in die Unit Compressor bestimmt. Nach einer erfolgreichen Rechnung sollte p wieder gelöst und stattdessen die Drehzahl n im Kompressor gesetzt werden.

Als nächstes wird die Unit Shell eingebaut (siehe Abbildung 4.9). Die Unit Shell muss so angeschlossen werden, dass das eintretende Kältemittel im geschlossenen Kreislauf kommend vom internen Wär-

verdichtete Kältemittel gibt also noch vor dem Verlassen Wärme an die Shell ab. Der Terminal für alle zufließenden Größen der Stream Connection liegt in der rot eingefärbten Zone der Shell, für alle abfließenden Größen direkt gegenüber. Die Setzwerte der Unit Shell sind dp , $alpha_Hx$, $alpha_gp$, $alpha_Amb$, $Area_Hx$, $Area_gp$, $Area_wa$ und Vol . Für den Wärmetransfer mit der Raumluft benötigt die Unit Shell eine eigene Ambientunit. Ein Area_Link für die Connection Heat Flux ist nicht erforderlich, da die beteiligte Fläche bereits über den $alpha_Amb$ angegeben wurde.

Zur vollständigen Abbildung des Kompressors im Flowsheet wird die Unit Oil_Sump hinzugefügt. Die Unit simuliert die Ab- und Desorption des Kältemittels durch das Schmierölreservoir im Kompressor. Über eine Zeitfunktion wird die Menge der Zu- oder Abnahme des Kältemittels bestimmt. Zum Austausch des Kältemittels zwischen den Units ist die Connection Stream verantwortlich. Der dafür vorgesehene Terminal ist im Viertelkreis der Unit Shell mittig angeordnet. Es muss noch die Connection Temperature erstellt werden. Für die Bestimmtheit des Gleichungssystems müssen M_oil , V_oil und $mass_oil$ als Setzwerte genommen werden.

4.1.4.4 Compartment

Es wird der Aufbau des Verdampfers am Austritt der Kapillare fortgesetzt (siehe Abbildung 4.10). Um eventuell auftretende Rückströmungen im Verdampfer zu zulassen, muss in dem Bereich, wo sie auftreten können, die Connection des Typs Stream_h verbaut werden. Um von der Connection Stream auf die Connection Stream_h zu wechseln ist die Unit Stream_Conversion_a zwischen zu schalten. Vorerst ist die Connection Stream_h einseitig unbelegt, aber die Setzung für den Wert h_feed erforderlich.

Es wird die Unit Compartment dem Flowsheet hinzugefügt und bis auf den Heat Flux Terminal in der rechten oberen Ecke werden alle Terminals mit Connections angeschlossen. Der angesprochene Terminal in der rechten oberen Ecke wird später für den Anschluss des Temperatursensors freigelassen. Alle anderen Terminals sind verpflichtend anzuschließen, um eine Rechnung starten zu können.

Das untersuchte Kühlgerät wird von einem Blechgehäuse mit sechs Seiten umgeben, die Modellierung beginnt mit der äußerste Schicht des Kühlgerätes. Dazu werden drei Area_Links erstellt und drei Geometrie- und Flächenglobals für Ober- und Unterseite, linke und rechte Seite, als auch Vorder- und Rückseite angelegt. Die weitere Modellierung der äußersten Schicht erfolgt durch die Verwendung der Unit Wall_1, sie wird nun fünf Mal um das Compartment herum angeordnet. Die sechste Seite, also die Rückwand, wird mit der Unit Wall_4f abgebildet. Sie ersetzt die Ambientunit, welche seitens der Luftschicht als Platzhalter diente. Dann werden

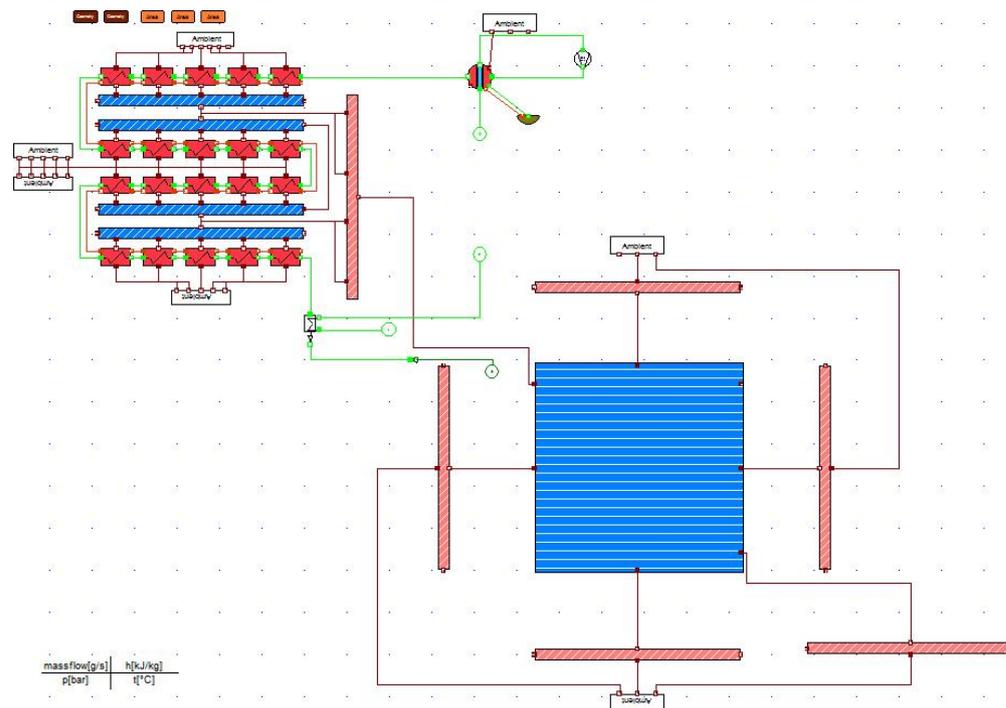


Abbildung 4.10: Stat. Aufbau Compartment

alle Units des Typs Wall einseitig an das Compartment angeschlossen. Die nicht angeschlossenen verbliebenen Seiten, das Blechgehäuse steht in direktem Wärmeaustausch mit der umgebenden Raumluft, müssen über HeatFlux Connections mit neu eingefügten Ambientunits verbunden werden. Allen Connections und Walls können die zuvor erstellten Globals jetzt zugewiesen werden. Setzwerte sind nur für die Units Ambient notwendig.

Als nächstes muss in der Unit Compartment über die Umschaltfläche *Composition* das schon vorhandene Global für die Luft eingebunden werden. Es sind die Setzwerte für *alpha*, *width*, *depth*, *height* und *p* zu beachten. Zerlegt man weiter das Kühlgerät hin zum Innenraum bilden sich noch eine geschäumte Schicht, in der die Rohrleitungen des Verdampfers verlaufen, und schlussendlich das Kunststoffgehäuse des Innenraums ab. Es werden wieder Geometrie- und Flächenglobals für die geschäumte Schicht und für das Kunststoffgehäuse durch den Area_Link angelegt. Zur Abbildung der beiden Schichten sind die Unit Wall_5f und die Unit Wall_5d vorgesehen. Die Anordnung wird vorläufig für eine Seite gemacht, die Platzierung der beiden Units Unit Wall_5f und Wall_5d erfolgt zwischen äußerer Schicht und Innenraum. Die beiden Innenseiten der Units mit jeweils fünf Terminals sind einander zugewandt und werden miteinander durch Heat Flux Connections verbunden. Zur Hilfe richtet man ein Flächenglobal ein, dass etwa der Oberfläche eines Ver-

dampferelementes entspricht und bindet es für die fünf Connections zwischen den Units Wall_5 ein. Nach vollständigem Anschließen und Zuteilung der Globals sollte wieder eine Rechnung gestartet werden (siehe Abbildung 4.11).

4.1.4.5 Evaporator

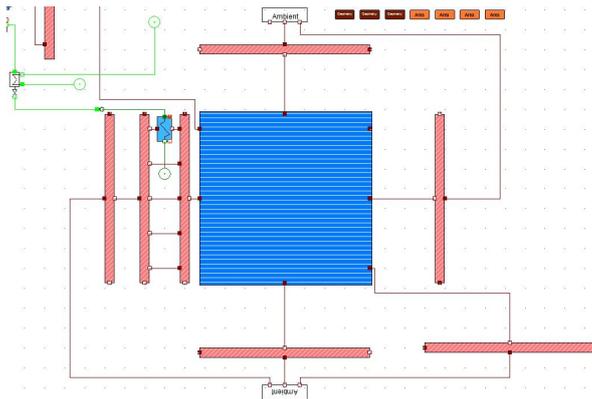


Abbildung 4.11: Stat. Aufbau 1 Verdampferelement

Die Werte in der Unit Geometry_Link sind zunächst nur für ein Verdampferelement zu wählen. Gesetzt wird *total_length*, *inner_radius*, *outer_radius* und *N*, über die Umschaltfläche *Model* wird *Tube* ausgewählt. Es folgt die Anordnung der Unit Evaporator zwischen den beiden Units Wall_5 und der einseitige Anschluss mit der schon vorhandenen Heat Flux.

Über das Tastenkürzel *STRG+D* dupliziert man die Heat Flux und schließt auch die zweite Seite des Verdampferelementes an. Die *Stream_h* Connection kommend von der Kapillare wird als zufließende Connection für die Unit Evaporator angeschlossen. Mit dem Anschluss der abfließenden Connection *Stream_h* ist das Verdampferelement vollständig integriert, es muss noch in der Unit Evaporator über die Umschaltfläche *Metal* ein Global für die Stoffeigenschaften des Rohrs erstellt und eingebunden werden. Zur vollständigen Bestimmtheit des Gleichungssystems ist das Flächenglobal in beiden Heat Flux Connections über die Umschaltfläche *Surface_Area* und der Auswahl *-No Selection-* zu deselektieren. Die

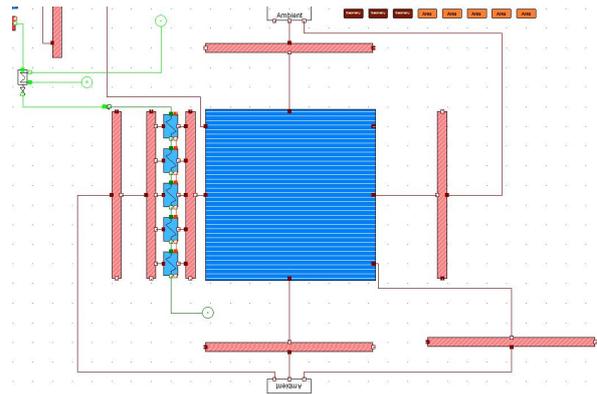


Abbildung 4.12: Stat. Aufbau 5 Verdampferelemente

Oberfläche wird schon über das Geometrieglobal des Verdampferelementes definiert.

Nach dem Ausführen der Rechnung wird die Unit Evaporator dupliziert und direkt nach der ersten vollständig angeschlossen. Das Geometrieglobal sollte durch das Setzen der Variable N auf 2 und der entsprechenden Länge angepasst werden. Die Vorgehensweise wird wiederholt bis alle fünf Verdampferelemente dieser Seite im Flowsheet integriert sind (siehe Abbildung 4.12). Dann werden alle fünf Verdampferelemente samt den beiden inneren Schichten dupliziert und wieder für eine Seite angeordnet. Nach zweimaligem Wiederholen ist der Verdampfer, bis auf die fehlenden inneren Schichten der nicht umwickelten Seiten, abgeschlossen. Ihr Einbau ist identisch mit den Wallelementen zuvor, durch neue Area_Links werden die entsprechenden Globals erstellt und dann in den Units Wall verwendet. Um einen gasförmigen Zustand des Kältemittels für den Eintritt in den internen Wärmeübertrager der Kapillare zu erhalten, wird statt des letzten Verdampferelementes noch die Unit Accumulator platziert. Mit einer neu angelegten Geometryunit werden dann noch die Geometriedaten des Accumulators erfasst.

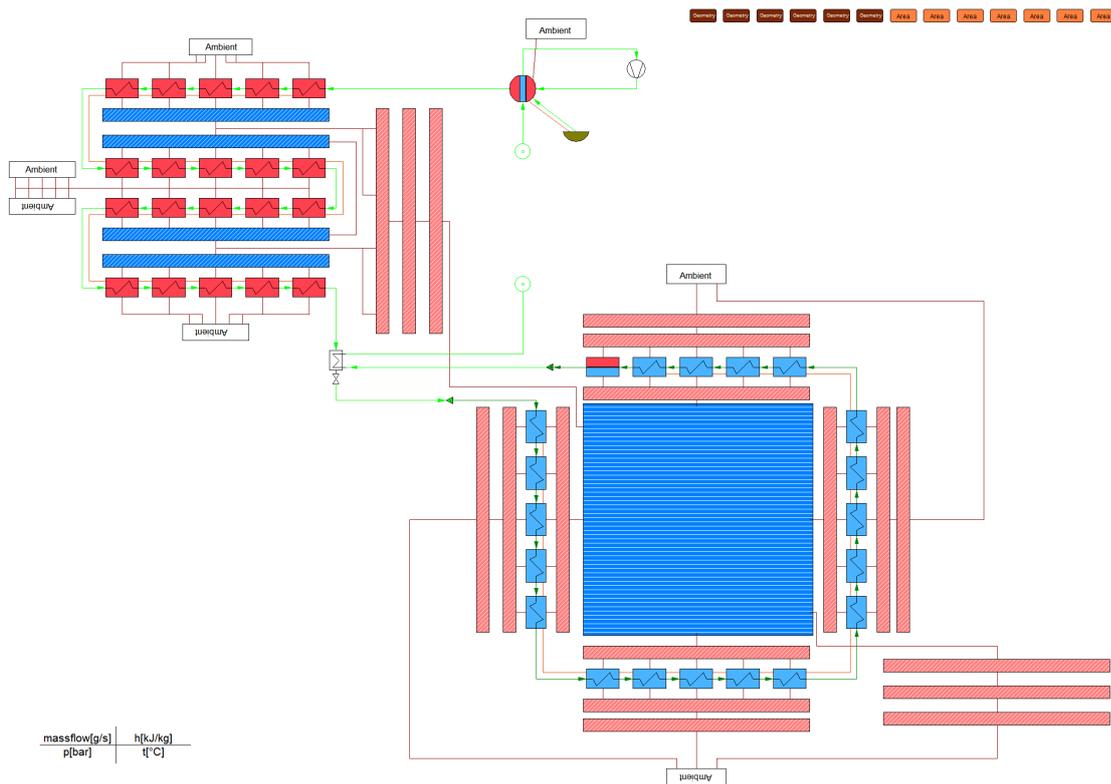


Abbildung 4.13: Stat. Aufbau offen

Am Austritt des Verdampfers fehlt noch die Unit Stream_Conversion_b, um mit der

Connection Stream fortfahren zu können. Jetzt kann der Anschluss der Connection am Austritt des Verdampfers mit dem Eintritt in den internen Wärmeübertrager versucht werden. Dazu werden die gesetzten Werte auf der Connection am Eintritt in den Kondensator für p und h aufgehoben und die beiden Variablen auf der Stream Connection am Austritt des Verdampfers gesetzt. Anschließend sind die Setzwerte p und h auf der Connection für den Eintritt in den Wärmeübertrager solange zu verändern bis sich die Werte mit den errechneten Variablenwerten am Austritt des Verdampfers gleichen oder sehr ähnlich sind. Sollte das der Fall sein, kann durch das Aufheben der Setzwerte p , h und $massflow$ am Eintritt in den Wärmeübertrager, eine Verbindung mit dem Verdampfer hergestellt werden (siehe Abbildung 4.13).

4.1.4.6 Geschlossener Kreislauf

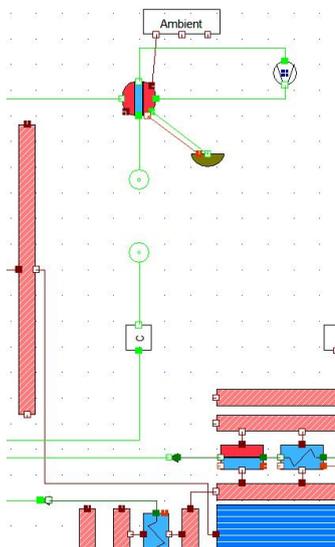


Abbildung 4.14: Stat. Aufbau Connector

Zum Schließen des aufgebauten Kreislaufs fehlt noch die Unit Connector. Da in jeder Unit innerhalb des Kreislaufs die Massenbilanz gelöst wird, würde beim Schließen des Kreislaufs eine Singularität des Gleichungssystems vorliegen. Wenn also in der Unit die Einstellung *Connector* über die Umschaltfläche *Model* erfolgt, wird die Massenbilanz für diese Unit nicht bestimmt (siehe Abbildung 4.14).

Vor dem Zusammenschließen sollte die Variablensetzung für p und h am Austritt der Kapillare gelöst und für die Connection am Eintritt der Shell gesetzt werden. Es werden wieder die Werte der gesetzten Variablen so angepasst, dass sie sich auf den Connections, an denen der Zusammenschluss erfolgt, nahe aneinander liegen. Nach dem Zusammenschließen des Kreislaufs, muss die Variable für p gelöst und das Modell *Connector* gewählt werden.

Es ist davon auszugehen, dass nach dem Aufbau nicht die gewünschte Kältemittelmenge im Kreislauf enthalten ist. Mit den Units Mixer und Reservoir kann dann Kältemittel in das System eingebracht werden. Man trennt den Kreislauf zwischen dem ersten Verdampferelement und der Shell auf, um die Unit Mixer zwischen zu schalten. In der Unit wird das Modell *Mixer* ausgewählt. Ein Terminal für zufließende Größen bleibt dabei für den Anschluss der

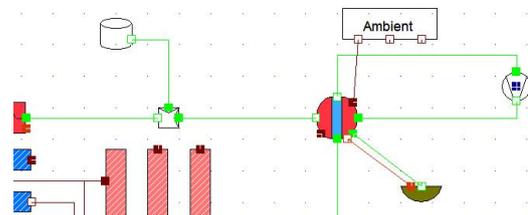


Abbildung 4.15: Stat. Aufbau Reservoir

Unit Reservoir unbelegt. Nach erfolgtem Anschluss wird ein neuer Datensatz über den Dataset Manager angelegt (siehe Abbildung 4.15).

Das Ziel ist es über eine quasistationäre Rechnung die Kältemittelmenge einzuspeisen. Im neuen Datensatz wird über den Reiter *Calculation* und der Auswahl *Use Dynamics* auf den dynamischen Solver geschaltet. Nun kann in der Unit Reservoir der Variable *mass'*, durch Anwahl des Optionsfeldes *init* der Wert 0 zugewiesen werden. Das Entleeren des Reservoir erreicht man, indem eine Time Series Table für die Variable *alg_mass* eingebunden wird. Das Einbinden geschieht über das Optionsfeld *forced*.

Nachdem der Kreislauf die gewünschte Kältemittelmenge beinhaltet wird ebenfalls ein neuer Datensatz abgeleitet. Der Updatezeitpunkt für den neuen Datensatz ist dabei so auszuwählen, dass das Reservoir vollständig geleert ist und kein Kältemittel mehr in das System eingespeist wird. Im neu angelegten Datensatz wird die Unit Reservoir und die Unit Mixer entfernt und der Kreislauf an dieser Stelle wieder geschlossen, es muss nach dem Entfernen neu gerechnet werden. Da die Unit Connector über keine Massenbilanz verfügt, besteht während einer Rechnung die Möglichkeit, dass sich die Gesamtmasse an Kältemittel im Kreislauf verändert.

Um diesen Fall auszuschließen, wird die Gesamtmasse des Kältemittels über das Einfügen einer freien Gleichung festgehalten. Die Definition in PSE erfolgt über den Reiter *View* und der Auswahl *Free Equations*. Es müssen alle Units, die von dem Kältemittel direkt durchfließen werden und die Modellierung der Massenspeicherung beinhalten, in der Gleichung vorkommen. Die Form der Gleichung muss gleich zu der Schreibweise im MDK sein (siehe Abschnitt 2.1.3. Im Quellcode 4.1 ist die Gleichungsform der Gesamtmasse für den stationären Kreislauf zu sehen. Der Aufbau für die stationären Betrachtung ist damit abgeschlossen.

Quellcode 4.1: Free Equation Gesamtmasse

```
f_TM: Condensero01.mass + Condensero02.mass + ... + Condensero19.mass +
    ↪ Filtero01.mass + Evaporatoro01.mass + Evaporatoro02.mass + ... +
    ↪ Evaporatoro19.mass + Accumulatoro01.mass + Shelloo2.mass +
    ↪ Oil_Sumpo01.mass = 86.6;
```

4.2 Transiente Entwicklung

Der Aufwand, um den transienten Aufbau des Haushaltskühlgerätes zu realisieren, ist aufgrund der Vorarbeit bei der stationären Entwicklung vergleichsweise gering.

4.2.1 Integration

Auch bei der transienten Rechnung wird zuerst über das Newton-Raphson Verfahren ein Initialisierungssystem gelöst. Erst im zweiten Schritt erfolgt die zeitliche Integration des Gleichungssystems, dazu wird in jedem Zeitschritt das Gleichungssystem über das Newton-Raphson Verfahren gelöst. Auch bei der Integration gibt es ein Abbruchkriterium, das in jedem Zeitschritt erfüllt sein muss:

- Der Integrationsfehler $E(x)$ muss demnach kleiner oder gleich, als die Norm der Differenz von x^0 zu x^k sein. Wobei x^0 der Startwert und x^k die Lösung im Newton-Raphson Verfahren ist, $E(x) \leq \|x^0 - x^k\|$.

Im Solver wird die Integration von den folgenden Parametern gesteuert:

- *Tolerance Correction Factor* Der Faktor γ , mit dem *x-tolerance* multipliziert wird, um die Toleranz für den Integrationsfehler $E(x)$ zu erhöhen.
- *Initial step size* Die Größe des ersten Integrationsschrittes.
- *Maximum step size* Die maximale Größe des Integrationsschrittes.
- *Step size threshold* Die Größe eines Integrationsschrittes in dem die Toleranz für den Integrationsfehler nicht eingehalten werden muss.
- *Maximum number of steps* Die maximale Anzahl der Integrationsschritte.

4.2.2 Transienter Aufbau

Anfänglich müssen alle Units des Typs Condenser, Evaporator, Wall, Compartment, Oil_Sump, Shell und später noch Temperature_Sensor auf das instationäre Modell umgestellt werden. Dazu wird, z.B. im Fall eines Kondensatorelementes, über die Umschaltfläche *Model* die Auswahl für das Modell *Condenser* getroffen. Das bedeutet, dass alle Modelle ohne der Endung *_stat* für eine transiente Betrachtung geeignet sind. In allen anderen verbauten Units kann das voreingestellte Modell aus der stationären Entwicklung 4.1 belassen werden.

Da aufgrund der transienten Betrachtung eine Massenspeicherung in den Units vorkommen kann, (die Massenbilanz wird jetzt über eine Differentialgleichung bestimmt), muss die Gesamtmasse im System nicht mehr über eine Free Equation festgehalten werden. Daher löscht man die Gleichung aus Quellcode 4.1 vollständig aus dem Fenster *Free Equations*. Im Zuge dessen muss auch in der Unit Connector auf das Modell *No_Connector* umgestellt werden.

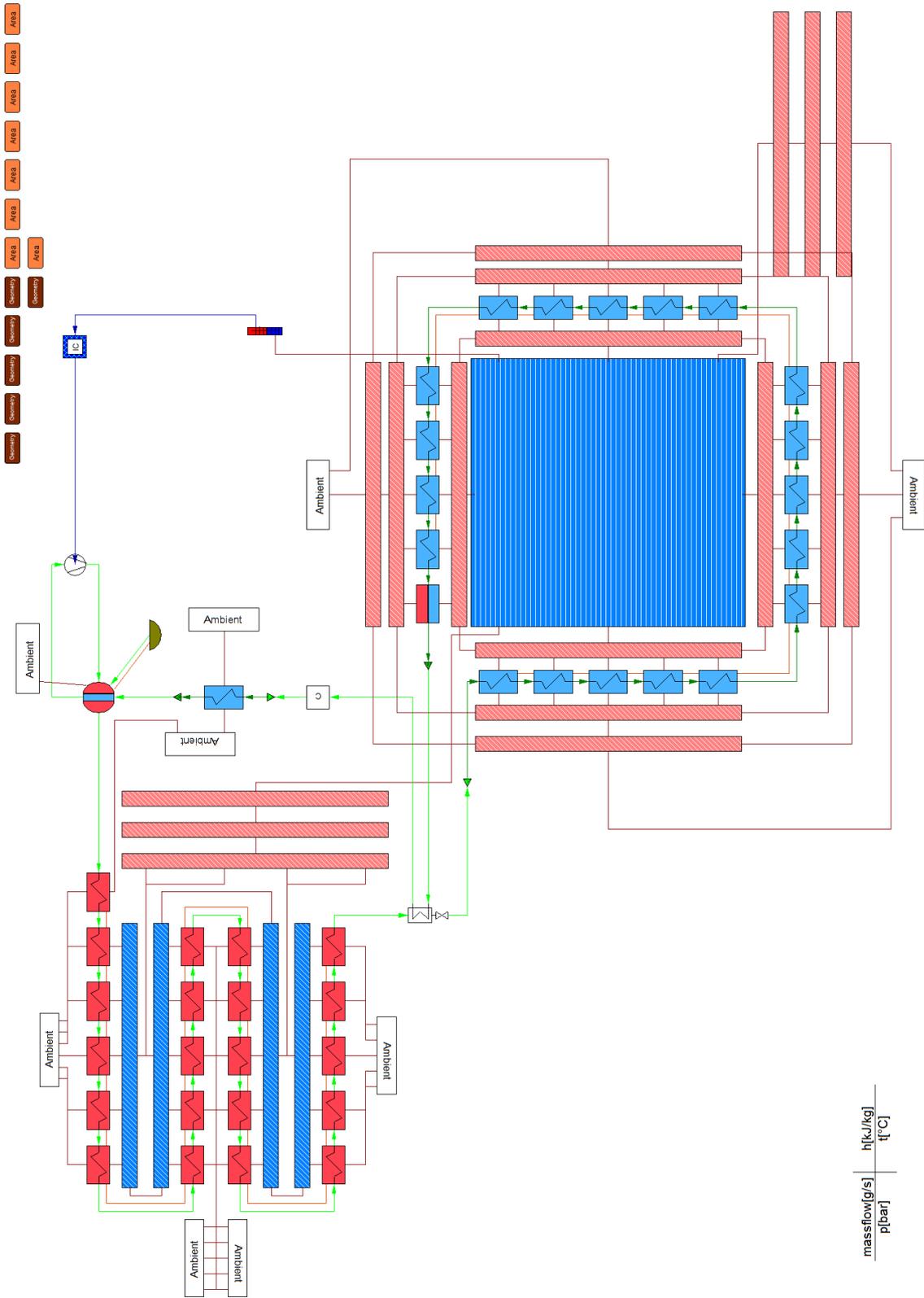


Abbildung 4-16: Trans. Aufbau Gefriergerät

Als nächstes sind in allen Units, welche zuvor auf das transiente Modell umgestellt wurden, verschiedene Anfangswerte (Optionsfeld auf *init*) zu setzen. Für die Units Condenser und Evaporator gilt gleichermaßen, dass es keine Änderung der Variablen t_p , u und $mass$ zum Initialisierungszeitpunkt gibt. Somit sind die Ableitungen t_p' , u' und $mass'$ über das Optionsfeld *init* auf den Wert 0 zu setzen. Für die übertragene Wärme zwischen Kältemittel und Rohrwand ist die Variable q mit 0 festzulegen.

An allen Units des Typs Wall ist die Änderung der Temperatur zu Beginn ebenfalls 0, die Ableitung t' daher auch über *init* zu setzen. Ebenso für die Unit Compartment ist t' gleich 0 zu definieren.

In der Unit Shell werden t_w' , u' und $mass'$ als auch q_{Hx} , q_{gp} und q_{Amb} auf den Wert 0 gesetzt. Die Setzung der Variablen muss zusätzlich für die Stoffeigenschaften geschehen, also c_w , ρ_w und Vol_w . Um das Gleichungssystem vollständig zu bestimmen, fehlen noch die Setzwerte in der Unit Oil_Sump. Hier sind zusätzlich die Ableitungen $mass'$ und mu' auf 0 zu setzen.

Bevor die transiente Rechnung gestartet werden kann, muss noch die Einstellung der Solverparameter erfolgen. Als Solverparameter sollten bei der Iteration die *y-tolerance* und die *x-tolerance* auf 10^{-4} gewählt werden. Bei der Integration genügt die Einstellung bei *y-tolerance* und *x-tolerance* auf 10^{-3} . Die Anzahl der Schritte *Max.steps* wird vorerst für Iteration und Integration mit 50 bestimmt und der *Tolerance correction factor* auf 1000 gestellt. Diese Einstellung des *Tolerance correction factor* wird wegen des Integrationsfehlers $E(x)$ empfohlen. Bei sehr steilen Gradienten der Variablen wird sonst die Zeitschrittweite so sehr reduziert, dass Instabilitäten im Newton-Raphson Verfahren eine Konvergenz der Lösung behindern können. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass die genannten Einstellungen eingeschränkt gelten. Speziell bei den transienten Rechnungen ist ein häufiges Anpassen der Parameter nötig, um eine Konvergenz der Lösung zu erwirken.

Über das Einbinden einer Time Series Table, z.B. das Abfahren einer Drehzahlkurve oder einer Änderung der Raumtemperatur, kann somit eine transiente Rechnung des aufgebauten Kältekreislaufs erfolgen. Sollte aber eine Steuerung des Kreislaufs mittels Zweipunktregler angedacht sein, müssen noch die Unit Temperature_Sensor und die Unit I_Control verbaut werden. Damit kann im Compartment bei Erreichen von zwei beliebigen Temperaturniveaus jeweils eine beliebige Drehzahl des Kompressors vorgegeben werden.

Man schließt die Unit Temperature_Sensor auf dem verbliebenen, nicht belegten Terminal der Unit Compartment an. In der Unit Temperature_Sensor werden die Geometrie und die Stoffeigenschaften c , ρ , λ , d , $Area$ und Vol als Setzwerte bestimmt, die Ableitung der Temperatur t' ebenso. Die beiden Units müssen dann mit der Connection Control verbunden werden. Für die Unit I_Control werden die

Temperaturniveaus $InMin$, $InMax$ und die dazugehörigen Drehzahlen $OutMin$, $Outmax$ gesetzt. Über die Setzung $Delay$ definiert man die Dauer eines Schaltvorgangs. Anschließend wird noch die Unit Kompressor mit der Unit $I_Control$ verbunden. Nach der Deselektion der Setzung n im Kompressor, die Drehzahl wird nach dem Zusammenschluss von der Unit $I_Control$ vorgegeben, kann eine Rechnung ausgeführt werden. Um auch den Einfluss des Wärmeübergangs an den Wallelementen untereinander abzubilden, werden sie jeweils an den Ecken miteinander über die Heat Flux Connections verbunden. Somit ist ein vollständiges Kreislaufmodell des untersuchten Gefriergeräts entwickelt (siehe Abbildung 4.16).

4.3 Varianten der Entwicklung

Natürlich beschränken sich die Möglichkeiten der ECO-COOL Library nicht auf ein einzelnes Gerät. Die Absicht ist vielmehr umfassende Möglichkeiten der Modellierung zu erhalten. Deshalb wurde zur Demonstration der Library noch ein weiteres Kühlgerätemodell des Haushaltssektors in PSE abgebildet. Es handelt sich dabei um eine Kühlgefrierkombination mit einer komplexen Steuerung.

Das Kühlgerät zeichnet sich vor allem durch drei räumlich getrennte Kammern aus. In jeder dieser Kammern herrschen unterschiedliche Temperaturniveaus, welche mittels der Schaltlogik überwacht und beeinflusst werden können. Die oberste Kammer, das Kühlfach, wird über einen an der Rückwand eingeschäumten Plattenverdampfer gekühlt. Das mittlere Gemüsefach hat keine direkte Kühlung über den Verdampfer, es wird anhand eines Ventilators mit kalter Luft versorgt. Hinter den beiden Kammern gibt es eine Luftschachtführung, über die der Ventilator für eine Umwälzung der Luft sorgt. Das Gefrierfach ist an vier Seiten von Verdampferrohren umwickelt. Des Weiteren gibt es zwei Kältemittelkreisläufe mit unterschiedlichen Kapillaren. Es kann nur das Gefrierfach alleine oder Gefrier- und Kühlfach gleichzeitig gekühlt werden.

4.3.1 Stationärer Aufbau

Für die Abstraktion in PSE wird die stationäre Entwicklung des Gefriergeräts weiterverwendet. Zunächst werden die Units $Temperature_Sensor$ und $I_Control$ aus dem Kreislauf entfernt. In der Unit $Compressor$ muss dann die Drehzahl n wieder gesetzt werden. Im nächsten Schritt wird der Kreislauf zwischen $Connector$ und Eintritt der $Shell$ aufgetrennt. Auf der aufgetrennten $Connection$ müssen $massflow$, p und h gesetzt werden. Die $Free\ Equation$ für die Gesamtmasse wird gelöscht und das Modell $No_Connector$ in der Unit $Connector$ ausgewählt. Dann werden

alle Units des Typs Compartment, Evaporator und Wall, beginnend vom Austritt der Kapillare hin zum Eintritt in den internen Wärmetauscher, selektiert und dupliziert.

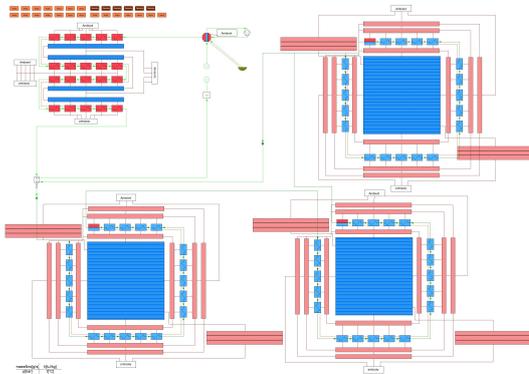


Abbildung 4.17: Stat. Aufbau Kühl-, Gemüse- u. Gefrierfach

on des neu hinzugefügten Teils und geht sonst völlig identisch zum Vorigen vor. (siehe Abbildung 4.17)

Im Kreislauf der Kühlgeräts ist jeweils ein Verdampfer für das Kühlfach und das Gefrierfach realisiert. Das Gemüsefach wird nur im Austausch mit dem Kühlfach, durch einen separaten Luftkreislauf, gekühlt. Das bedeutet für den aufgebauten Kältekreislauf, dass alle Verdampferelemente rund um das Compartment Gemüsefach entfernt werden müssen. Die Units Wall_5, in denen die Verdampferelemente eingebettet waren werden durch die Units Wall_1 ersetzt (siehe Abbildung 4.18).

Die duplizierten Elemente werden am Eintritt des ersten Verdampferelementes mit dem Austritt des Sammlers der ursprünglichen Elemente, über eine Stream zusammengeschlossen. Der Austritt der duplizierten Elemente wird mit dem Eintritt des internen Wärmeübertragers verbunden. Es wird eine neuen Geometry_Link erstellt und das neu angelegte Geometrieglobal für die hinzugekommenen Verdampferelemente eingebunden. Nach der erfolgreichen Rechnung, folgt die Duplikation des neu hinzugefügten Teils und geht sonst völlig identisch zum Vorigen vor.

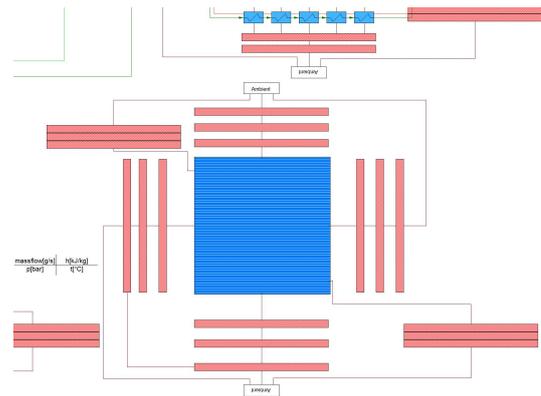


Abbildung 4.18: Stat. Aufbau Gemüsefach

Aufgrund der Länge des Plattenverdampfers am Kühlfach ist eine Auflösung in PSE mit 20 Verdampferelementen nicht notwendig. Um die Rechenzeit zu verkürzen, wird um das Compartment Kühlfach die Anzahl der Verdampferelemente auf 10 reduziert. Auch hier sind die Units Wall_5 mit den Units Wall_1 zu ersetzen. Nachdem das Compartment Kühlfach direkt über die Stream_h Connection mit dem Compartment Gefrierfach zusammengeschlossen wurde, sollte wieder gerechnet werden (siehe Abbildung 4.19).

Da zwischen den Fächern im Kühlgerät ein Wärmeaustausch stattfindet, muss auch im Kreislaufmodell eine thermische Kopplung berücksichtigt werden. Dazu müs-

sen die beiden Compartments für das Kühl- und das Gemüsefach durch die Units `Compartment_Refrigerator` und `Compartment_Bio` ersetzt werden.

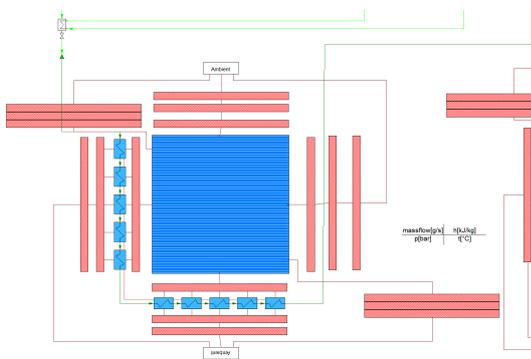


Abbildung 4.19: Stat. Aufbau Kühlfach

Die Variablen für α , $width$, $depth$, $height$ müssen gesetzt werden. Als *Composition* wählt man das Global der Luft. Das `Compartment_Bio` hat zwei abfließende Heat Flux Terminals, um jeweils einmal mit der Unit `Compartment_Refrigerator` (Kühlfach) und einmal mit der Unit `Compartment` (Gefrierfach) verbunden zu werden. Das Gemüsefach wird durch eine Platte vom Kühlfach getrennt, hier ist eine Unit des Typs `Wall_1` zwischen zu

schalten. Zwischen dem Gefrierfach und dem Gemüsefach sind drei Schichten, jeweils das Kunststoffgehäuse und einmal die Schäumung, ausreichend.

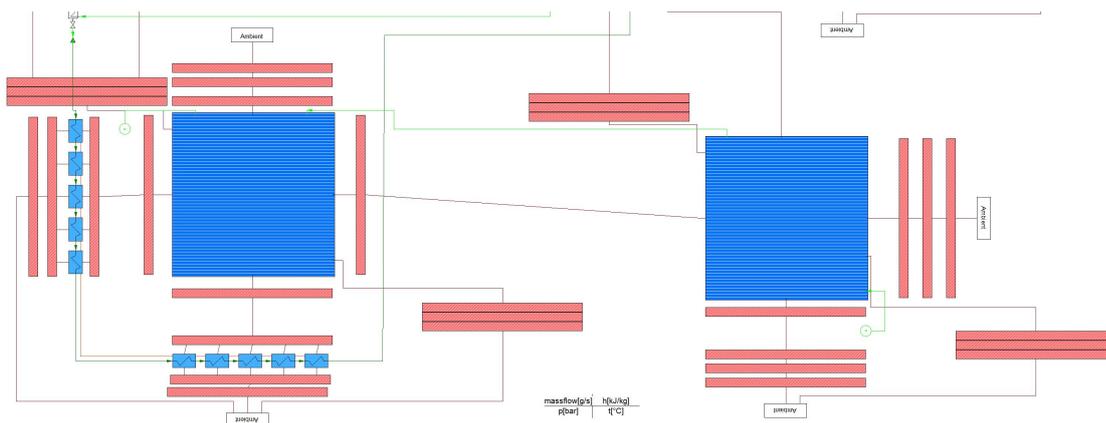


Abbildung 4.20: Stat. Aufbau Luftkreislauf

Zum Aufbau des Luftkreislaufs sind zunächst die Anschlüsse der Stream Terminals für das Kühl- und das Gemüsefach notwendig. Die beiden Compartments werden miteinander verbunden und jeweils ein Stream geht ins Leere. Mit der Setzung $massflow$, h und p auf einem der drei Streams, sollte eine Rechnung ausgeführt und die Schätzwerte geladen werden (siehe Abbildung 4.21).

Als nächstes müssen drei Units des Typs `Compartment_Shaft` im Luftkreislauf verbaut werden. Ihre Anordnung erfolgt für das `Compartment_Refrigerator` an den beiden Seiten, die in direktem Kontakt mit den Verdampferelementen stehen. Für die Platzierung des dritten Luftschachtelementes, kann eine der drei verbliebenen Seiten am `Compartment_bio` gewählt werden. Da der Luftschacht im Kühlgerät

als Kunststoffgehäuse ausgeführt ist, müssen noch zwischen den Compartments drei Units des Typs `Wall_1` eingefügt werden. Die Setzwerte für die Units `Compartment_shaft` sind *width*, *depth* und *height*. Als *Composition* wird das Global für die Luft eingebunden. Die Variable *alpha* muss nicht mehr gesetzt werden, da der Wärmeübergangskoeffizient in diesen Units, abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit berechnet wird.

Um den Luftkreislauf vollständig abzubilden, fehlen noch die Unit `Fan` und die Unit `Connector`, sie können im Luftkreislauf völlig frei angeordnet werden. Das Modell des Fans ist quasistationär, die Variablen *d* und *V_dot* sind zu setzen und als *Composition* wird wieder das Global für die Luft verwendet. Zum Schließen des Luftkreislaufs ist die Setzung *massflow*, *h* und *p* zu lösen. Es muss noch der atmosphärische Druck *p* im `Compartment_Refrigerator` gesetzt und das Modell `Connector` in der gleichbenannten Unit gewählt werden (siehe Abbildung 4.21).

Des Weiteren sind die thermischen Einflüsse des Kondensators auf die drei Kühlfächer im Inneren des Kühlgeräts zu modellieren. Der Kondensator spannt sich über die gesamte Fläche der Rückwand. Etwa die Hälfte der Rückwandfläche wird von Innen durch das Kühlfach bedeckt und die restliche Hälfte teilen sich Gemüse- und Gefrierfach auf. In diesem Verhältnis werden auch die beteiligten Schichten der jeweiligen Compartments mit den Wallelementen der Luft verknüpft.

Die Stream Connection am Eintritt der Shell wird wieder zu einem Kreislauf verbunden und die Setzwerte auf der Connection werden wieder gelöst. Nach dem Auswählen des Modells `Connector` und Anpassen der Free Equation für die Gesamtmasse des Kältemittels, kann eine Rechnung ausgeführt werden. Üblicherweise variiert die Gesamtmasse im Kreislauf bei unterschiedlichen Geräten kaum, dies ermöglicht ein Anpassen durch kleine Änderungen von Rechnung zu Rechnung. Sollte so keine Konvergenz der Lösung möglich sein, muss mit der Unit `Reservoir` wie in Abschnitt 4.1.4.6 gearbeitet werden. Somit ist der stationäre Aufbau der Kühlgefrierkombination abgeschlossen.

4.3.2 Transienter Aufbau

Die Umstellung für den transienten Fall beginnt wieder mit der Auswahl der instationären Modelle. In allen Units des Typs `Compartment` ist die zeitliche Ableitung der Lufttemperatur auf den Wert 0 über *init* zu setzen, dasselbe gilt auch für die neu hinzugefügten Wallelemente. Die Unit `Fan` ist als quasistationäres Modell abgebildet, die Setzwerte verändern sich also nicht gegenüber dem stationären Fall. Im gesamten Luftkreislauf wurde die Möglichkeit der Massenspeicherung vernachlässigt, das Modell `Connector` bleibt daher ausgewählt. Somit ist der transiente Fall für das untersuchte Kühlgerät bestimmt.

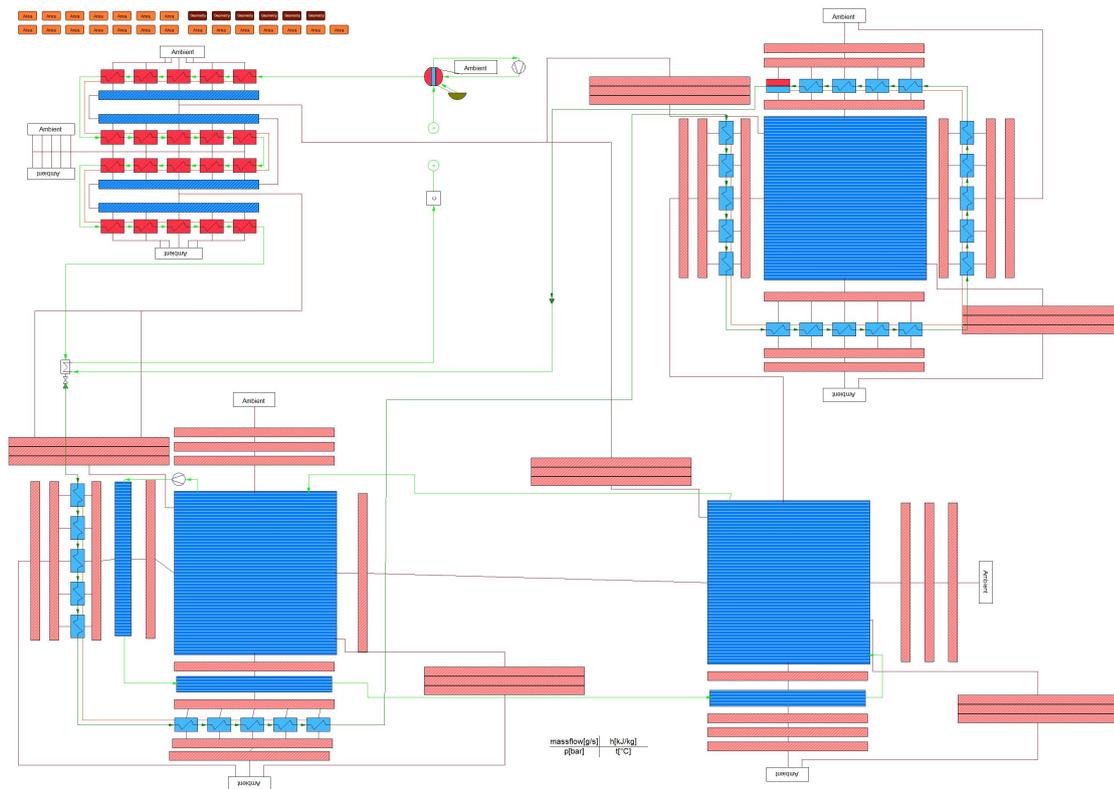


Abbildung 4.21: Stat. Aufbau offen

Aufgrund der komplexen Steuerung konnte nicht die gesamte Regellogik der Kühlgefrierkombination abgebildet werden. Der im Modell implementierte Regelkreis beschränkt sich auf das Ein- und Ausschalten des Kompressors, das Wechseln des Kältekreislaufs, das auch eine Geometrieänderung der Kapillare zur Folge hat und das Ein- und Ausschalten des Ventilators.

Zum Aufbau des Regelkreises sind die Units `I_Control`, `I_Control_2`, `Evaporator_Sens` und `Cycle_Switch` notwendig. Nach etwa zwei Drittel der Länge des Plattenverdampfers wird über einen Verdampferfühler eine von drei Temperaturmessungen im Gerät ausgeführt. Dieser Fühler hat die Aufgabe den Kompressor einzuschalten und den Kältekreislauf durch Aktivieren einer Magnetventilstellung für „Kühlen und Gefrieren“ auszuwählen. Die Magnetventilstellung für „Kühlen und Gefrieren“ lässt das Kältemittel über den Plattenverdampfer für das Kühlfach, als auch über den Verdampfer für das Gefrierfach zirkulieren. Durch die Ventilstellung werden im Kühlgerät unterschiedliche Kreisläufe und als Folge dessen unterschiedliche Kapillaren verwendet. Um den Verdampferfühler anschließen zu können, wird das sechste Verdampferelement des Kühlfachs mit der Unit `Evaporator_Sens` ersetzt. Die Einstellung für die Unit erfolgt wie für die Evaporator Units. Die drei

unbelegten HeatFlux Terminals am Evaporator_Sens werden jeweils mit einer Unit des Typs Temperature_Sensor verbunden. An den drei Temperature_Sensor folgen die Anschlüsse der Unit I_Control_2. Die Einstellungen und Setzwerte für Temperature_Sensor und I_Control_2 sind wie in Abschnitt 4.2.2 zu wählen.

Anschließend werden noch die I_Controls mit der Unit Compressor, Capillary und Cycle_Switch verbunden. Durch die Unit Cycle_Switch können die Verdampferelemente des Kühlfachs adiabat geschaltet werden. Dies bildet den Kreislaufwechsel im Kühlgerät ab.

Dazu werden noch ein Global für die Verdampferelemente des Kühlfachs und ein Global für die Verdampferelemente des Gefrierfachs benötigt. Das Erstellen und Einbinden der Globals geschieht über die Umschaltfläche *Cycle_Switch* in den Units Evaporator. Schlussendlich müssen die Globals jeweils für die Units Cycle_Switch selektiert werden.

Ein Luftfühler im Gemüsefach ist der Gegenpart zum Verdampferfühler, er kann den Kompressor abschalten und das Magnetventil auf die Stellung „Gefrieren“ schalten. Ausgehend von den freien HeatFlux Terminals am Compartment des Gemüsefachs wird genauso vorgegangen wie eben für den Verdampferfühler.

Der Luftfühler im Kühlfach schaltet den Ventilator ein oder aus. Somit sind ausgehend vom Terminal am Kühlfach nur die Units Temperature_Sensor und I_Control notwendig, um die Unit Fan anzubinden.

Damit das Gleichungssystem nicht überbestimmt ist, sind noch die Setzwerte n für den Kompressor, V_{dot} für den Fan und $Length_{Cap}$ für die Kapillare, zu lösen. Damit ist der transiente Aufbau der Kühlgefrierkombination abgeschlossen (siehe Abbildung 4.22).

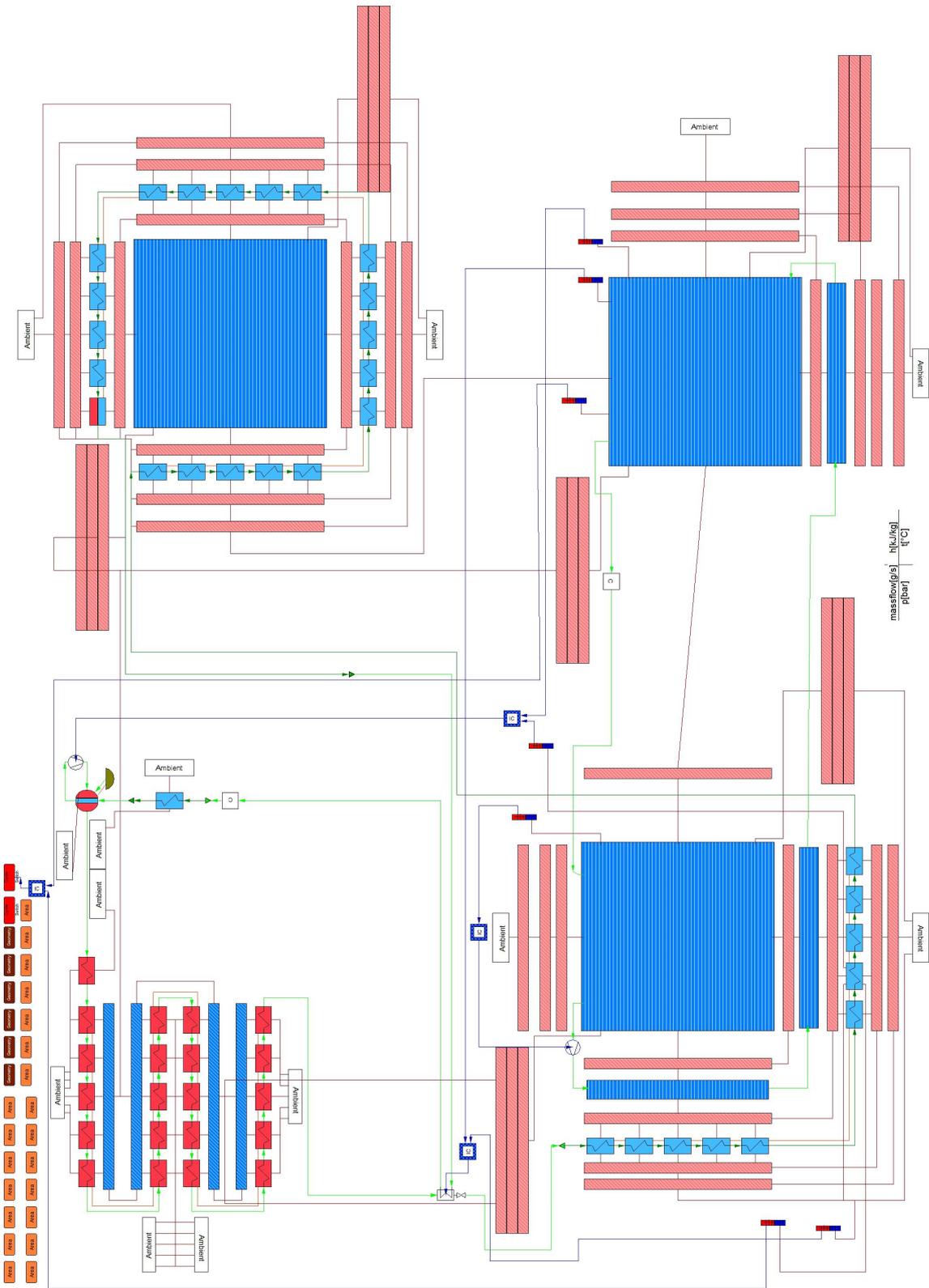


Abbildung 4-22: Trans. Aufbau Kühlgefrierkombination

5 Validierung

Nach der vollständigen Abbildung des Gefriergeräts in PSE ist eine Validierung des gesamten stationären und auch transienten Aufbaus notwendig. Dazu wurden Messungen des Gefriergeräts in einer klimatisierten Kammer ausgeführt und währenddessen Parameter wie elektrische Leistung, Drücke und Temperaturen aufgezeichnet. Es sind mehrere Messungen für den Dauerlauf und für den Zyklusbetrieb bei unterschiedlichen Einstellungen der Temperatur des Gefrierfachs und der Umgebungstemperatur durchgeführt worden.

Bei der Validierung wurde der selbe Ablauf wie für die transiente Entwicklung des Kühlgeräts in PSE verfolgt. Es wurde zuerst eine stationäre Validierung anhand von Dauerlaufmessungen vorgenommen und dann mit den daraus erzielten Parametern die Validierung des transienten Falls ausgeführt.

5.1 Stationäre Validierung

Für die stationäre Validierung ist eine Messung der Parameter im Dauerlauf, sprich bei Vollast des Kompressors bei ca. 2950 U/min, herangezogen worden.

Die Validierung wurde über das Gauß-Newton Verfahren realisiert, für einen detaillierten Einblick des Verfahrens wird auf Rohrhofer [13] verwiesen. Durch Vorgabe von einzelnen Messparametern wie, Druck, Temperatur und elektrische Leistung nähert das Gauß-Newton Verfahren die betroffenen Parameter im Prozessaufbau bestmöglich an.

5.2 Transiente Validierung

Mit den aus der stationären Validierung erzielten Variablenwerten wird nun die transiente Validierung initialisiert. Zur Validierung wird eine Messung bei stationärem Zyklusbetrieb, es bleibt die Umgebungstemperatur und die Temperatureinstellung des Reglers im Kühlfach konstant, verwendet.

Das Anpassen erfolgt nun manuell und beschränkt sich vor allem auf die drei Wärmeübergangskoeffizienten für den Kondensator, für das Kühlgerätegehäuse, welches Einfluss nehmend auf den Verdampfer ist und für das Gefrierfach. Durch Erhöhen und Senken der Wärmeübergangskoeffizienten lässt sich vor allem Einfluss auf den Hoch- und den Niederdruck im Kältekreislauf nehmen und in weiterer Folge auch auf die Kondensations- und Verdampfungstemperatur. Des Weiteren sind die Wärmeübergangskoeffizienten in der Shell maßgeblich, um auf den Ansaugzustand des Sauggases Einfluss zu nehmen.

Tabelle 5.1: Transient angepasste Koeffizienten der Units Ambient und Compartment

	Größe	Variable	Wert	Einheit []
α Kondensator zu Raumluft		alpha	22.8	[W/(m ² K)]
α Kühlgerätegehäuse zu Raumluft		alpha	1.4	[W/(m ² K)]
α Gefrierfach zu Innenluft		alpha	11.3	[W/(m ² K)]

Tabelle 5.2: Transient angepasste Koeffizienten der Unit Shell

	Größe	Variable	Wert	Einheit []
α Motor, Verdichter zu Kältemittel		alpha	2000	[W/(m ² K)]
α Druckleitung zu Kältemittel		alpha	2000	[W/(m ² K)]
α Kompressorgehäuse zu Raumluft		alpha	5.4	[W/(m ² K)]

Tabelle 5.3: Transient angepasste Koeffizienten der Unit Capillary u. des Globals Composition

	Größe	Variable	Wert	Einheit []
Faktor Wärmeübertrageraustrittsenthalpie		eta_h	1.14	[-]
Faktor Massenstrom Austritt		eta_m	0.81	[-]
Faktor Druckverlust Verdampfer		Ev_eta_dp	2.5	[-]
Faktor Druckverlust Kondensator		Co_eta_dp	1.2	[-]

Die Dauer der Ein- und Ausschaltzeiten des Kompressors kann durch die Geometrie und die Stoffeigenschaften des Sensors verändert werden. Durch Änderung von Dichte (ρ), spezifische Wärmekapazität (c) und Volumen (V) des Sensors wird die Temperaturentwicklung infolge der Energiebilanz beeinflusst.

In Tabelle 5.1 sind die validierten Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenfläche des Kondensators, des Kühlschranksgehäuses mit Einfluss auf den Verdampfer und des Kompressors für den transienten Fall angeführt. Die zusätzliche Fläche des Drahtrohrkondensators lässt sich nur schwer abschätzen, darum ist der Flächenanteil der Rohrlamellen im Wärmeübergangskoeffizient des Kondensators berücksichtigt. Dasselbe gilt auch für den Effekt, dass durch die Wärmeabgabe des

Kompressors die Geschwindigkeit der aufsteigenden Luft am Kondensator erhöht wird. Der α Wert $22.8 \frac{W}{m^2K}$ ordnet sich im unteren Bereich für eine mäßig bewegte Luft ein [14].

Der Einfluss von Ecken und Kanten als auch der Türdichtungen sind nur bedingt im Modellaufbau abgebildet. Der α Wert $1.4 \frac{W}{m^2K}$ an den Außenflächen des Kühlschrankgehäuses liegt im unteren Bereich für stehende Luft an einer senkrechten Metalloberfläche [14].

In Tabelle 5.2 sind die validierten Wärmeübergangskoeffizienten im Kompressor für den transienten Fall gezeigt. Vor allem der Wärmeübergang im Inneren des Kompressors ist schwer abzuschätzen (z.B. Effekte durch Sprühen des Öls). Die beiden Wärmeübergangskoeffizienten für Motor, Verdichter und Druckleitung sollen einen überhitzten Zustand des Kältemittels während des Betriebes gewährleisten. Anhand der beiden Koeffizienten ist weiter die Beschränkung aller Wärmeübergangszahlen auf $2000 \frac{W}{m^2K}$ im gesamten Modellaufbau ersichtlich. Dies erfolgt, um numerische Schwierigkeiten beim Lösen aufgrund zu steiler Gradienten zu verhindern.

In Tabelle 5.3 sind die validierten Faktoren der Kapillare und die Druckverlustfaktoren für Kondensator und Verdampfer im transienten Fall zu sehen. Die Faktoren stellen sich als Korrekturfaktoren für den Modellaufbau dar. Die Modelle für Verdampfer und Kondensator unterliegen der Annahme für ein horizontales Rohr, um die auftretende Knicke in der Rohrleitung und den dadurch erhöhten Druckverlust abzubilden waren Korrekturfaktoren notwendig. Die Auswirkungen von Modellierungsfehlern durch Modellvernachlässigungen werden in den beiden Faktoren η_h und η_m der Kapillare berücksichtigt.

6 Ergebnisse

Die generierten Ergebnisse, vor allem für die Wärmeübergangskoeffizienten, können späteren Modellentwicklungen als Referenz dienen. Ferner ist davon auszugehen, dass bei baugleichen Ausführungen, z.B. für den Drahtrohrkondensator, sehr ähnliche Wärmeübergangskoeffizienten wirken. Das bedeutet, dass z.B. die Variation der Länge des Kondensators auf den Energieverbrauch untersucht werden kann.

Modellvernachlässigungen mussten für die Geometrie, physikalische Effekte, Diskretisierung und den Regelkreis in Kauf genommen werden. Die getroffenen Vereinfachungen, um die Komplexität der Modelle einzuschränken, waren notwendig, um das Ziel der Echtzeitfähigkeit zu erreichen.

Wichtige Ziele dieser Arbeit waren, dass Einblicke in das Betriebsverhalten des Kühlgerätes möglich sind. Vor allem, dass Auswirkungen der Variation von z.B. der Drehzahl oder der Umgebungstemperatur, im Hinblick einer Normenergieverbrauchsmessung simuliert werden können. Der durch Vernachlässigungen bedingte absolute Fehler, lässt genaueste Prognosen nicht zu, aber sehr wohl können geringe Einflüsse auf den Kältekreislauf detektiert werden. Dadurch sind geringe Druck- oder Temperaturänderungen feststellbar, die durch Unzugänglichkeit oder Messunsicherheiten nicht mehr erfasst werden können.

Es ist augenscheinlich, dass sich die Modellvernachlässigungen und Unsicherheiten zu einem großen Teil in den freien Parametern der Wärmeübergangskoeffizienten konzentrieren. Dadurch ist aber eine bessere Vergleichbarkeit der Gesamtmodelle möglich, im Gegensatz zu Unsicherheiten welche sich über viele Parameter verteilen.

Die durchgeführten Rechnungen der beiden Modelle lieferten plausible Verläufe der thermodynamischen Zustandsgrößen, Wärmeströme oder Energieverbräuche. Die folgenden Abbildungen geben detaillierte Aufschlüsse über den Zustand des Kältemittels während des Betriebes und über die Einzelkomponenten der Kühlgeräte. Nachfolgend sind Abbildungen zu dem validierten Gefriergerät gezeigt, die der Kühlgefrierkombination findet man im Anhang B.

Die Abbildungen für das Gefriergerät werden aus dem stationären Fall bei Kompressorvollast für den transienten Fall initialisiert. Die Bedingungen sind bei Umgebungstemperatur $t_U = 25.36^\circ\text{C}$ und Standarddruck $p^0 = 1.0133\text{ bar}$ (p^0) konstant gehalten. Die Reglereinstellung der Lufttemperatur erfolgte bei $t_R = -18^\circ\text{C}$.

Die Abbildung 6.1 zeigt die Drehzahl (n) des Kompressors, die Lufttemperatur t_G im Gefrierfach und die Temperatur des Sensors t_S im Gefrierfach über die Zeit (t) von insgesamt fünf Ein- und Ausschaltzyklen des Kompressors.

In Abbildung 6.2 sind n , t_G , t_S der Simulation (S) und t_S der Zyklusmessung (M) über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus des Kompressors abgebildet.

Die Abbildung 6.3 zeigt n und die Leistung (P) des Kompressors über die Zeit.

In Abbildung 6.4 sind n und P der Simulation (S) und der Messung (M) über die Zeit abgebildet.

In Abbildung 6.5 sind der zeitliche Druckverlauf des Kältemittels vor dem Eintritt in den Kompressor und nach dem Austritt aus dem Kompressor und der zeitliche Verlauf der Kompressordrehzahl über fünf Ein- und Ausschaltzyklen dargestellt.

Die Abbildung 6.6 bildet den zeitlichen Druckverlauf des Kältemittels vor dem Eintritt in den Kompressor und nach dem Austritt aus dem Kompressor und den zeitlichen Verlauf der Kompressordrehzahl ab. Die Darstellung der Drücke erfolgt jeweils anhand der Simulation und der Messung über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus.

In Abbildung 6.7 sind die zeitliche Druckverläufe des Kältemittels nach dem Austritt des Kompressors für Simulation und Messung und n über einen Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt.

In Abbildung 6.8 sind die zeitliche Druckverläufe des Kältemittels vor dem Eintritt des Kompressors für Simulation und Messung und n über einen Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt.

In Abbildung 6.9 sind die Verläufe der Massenströme am Kompressor- und am Kapillaraustritt über die Zeit dargestellt.

Die Abbildung 6.10 zeigt die Kältemitteltemperatur t am Eintritt der Kapillare und am Austritt des internen Kapillarwärmeübertragers über die Zeit.

In Abbildung 6.11 ist der zeitliche Verlauf der Kältemittelmasse im Kompressoröl und der Kompressordrehzahl dargestellt.

In Abbildung 6.12 ist der zeitliche Verlauf des Druckverlustes im letzten Kondensator- und Verdampferelement und der Kompressordrehzahl dargestellt.

In Abbildung 6.13 sind die Massenstromdichten (G) aller Verdampferelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Verdampferelementes ab.

In Abbildung 6.14 sind die Massenstromdichten aller Kondensatorelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Kondensatorelementes ab.

Die Abbildung 6.15 zeigt die eingelagerten Kältemittelmassen in den Verdampferelementen und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und Ausschaltzyklus. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Verdampferelementes ab.

Die Abbildung 6.16 stellt die eingelagerten Kältemittelmassen in den Kondensatorelementen und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und Ausschaltzyklus dar. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Kondensatorelementes ab.

In Abbildung 6.17 sind die Wärmeübergangszahlen in den Verdampferelementen und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und Ausschaltzyklus abgebildet. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Verdampferelementes ab.

In Abbildung 6.18 sind die die Wärmeübergangszahlen in den Kondensatorelementen und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und Ausschaltzyklus abgebildet. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Kondensatorelementes ab.

6 Ergebnisse

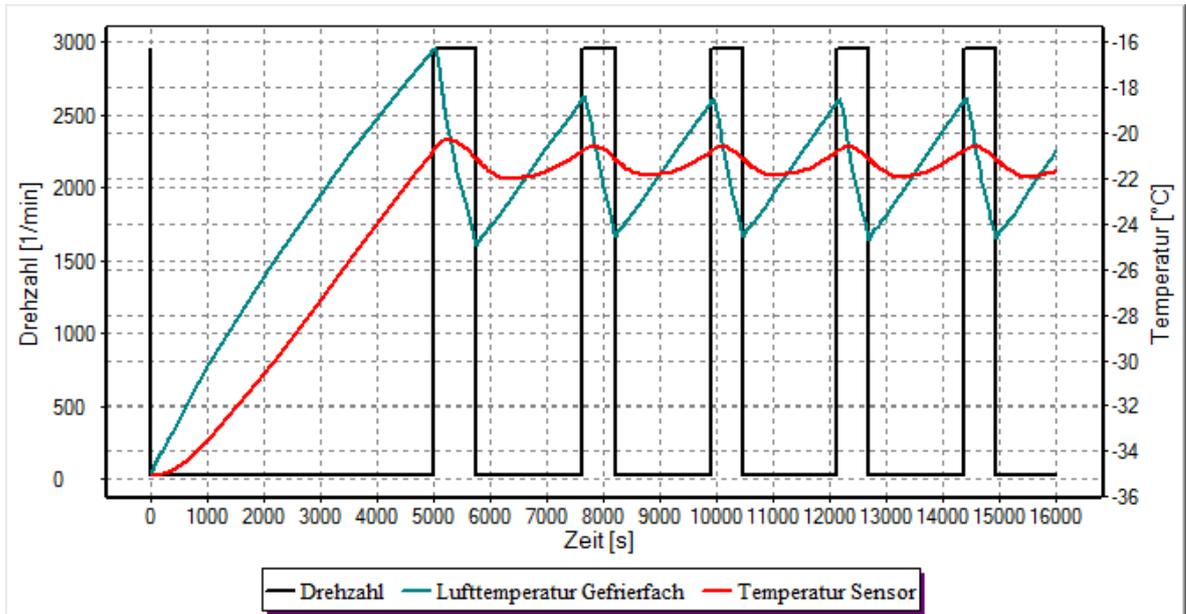


Abbildung 6.1: Kompressordrehzahl, Lufttemperatur des Gefrierfachs und die Temperatur des Sensors über die Zeit

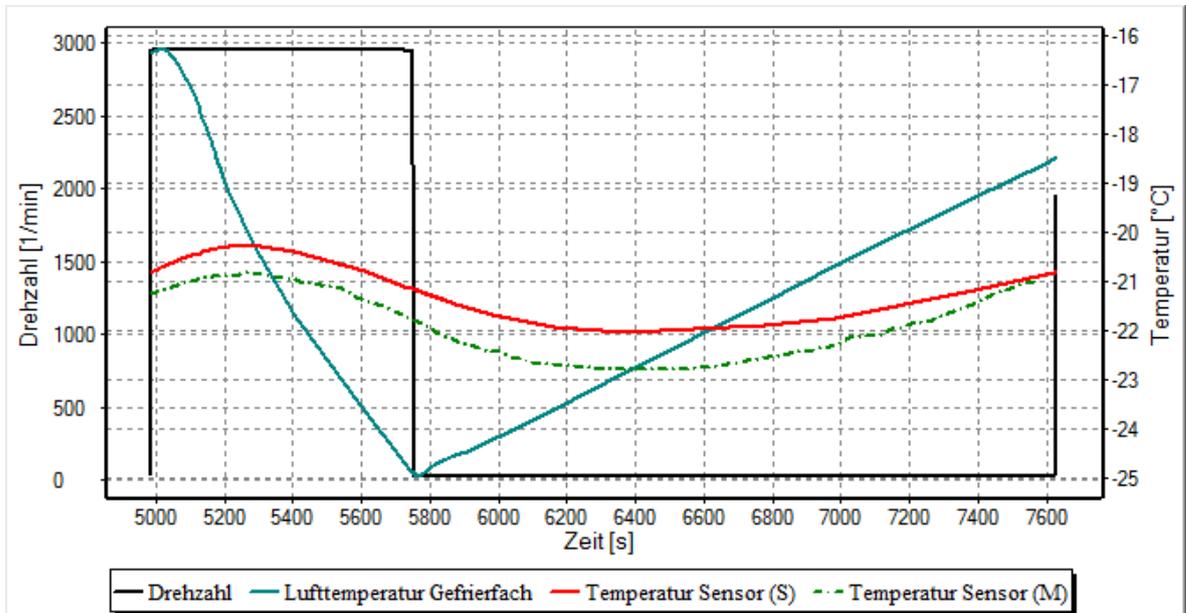


Abbildung 6.2: Kompressordrehzahl, Lufttemperatur des Gefrierfachs und Sensortemperatur aus Simulation (S) und Messung (M) über die Zeit

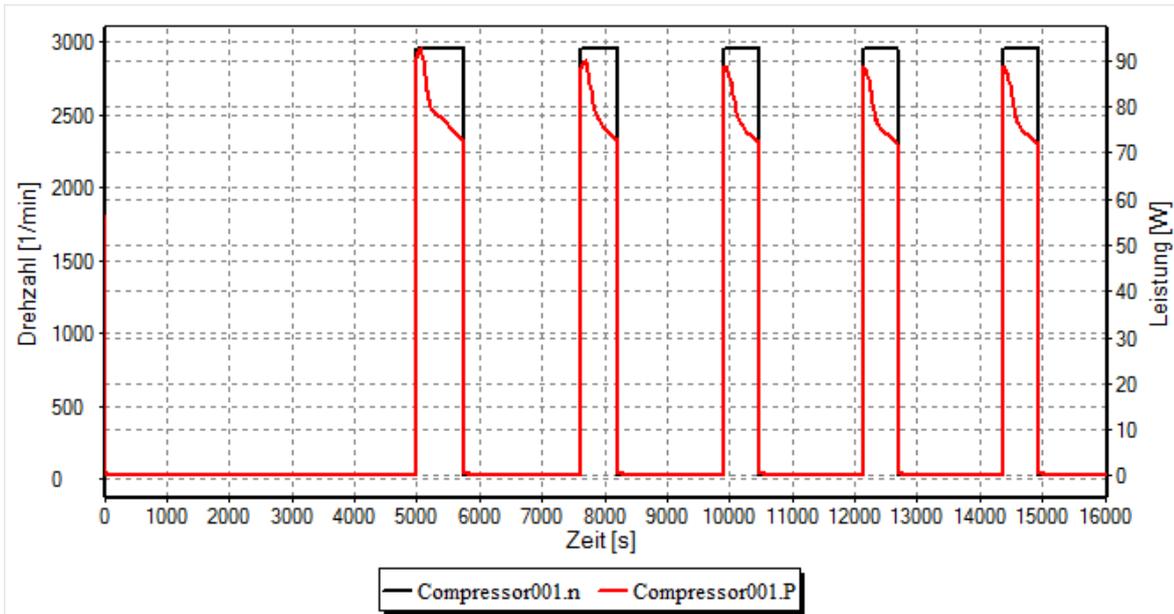


Abbildung 6.3: Kompressordrehzahl und Kompressorleistung über die Zeit

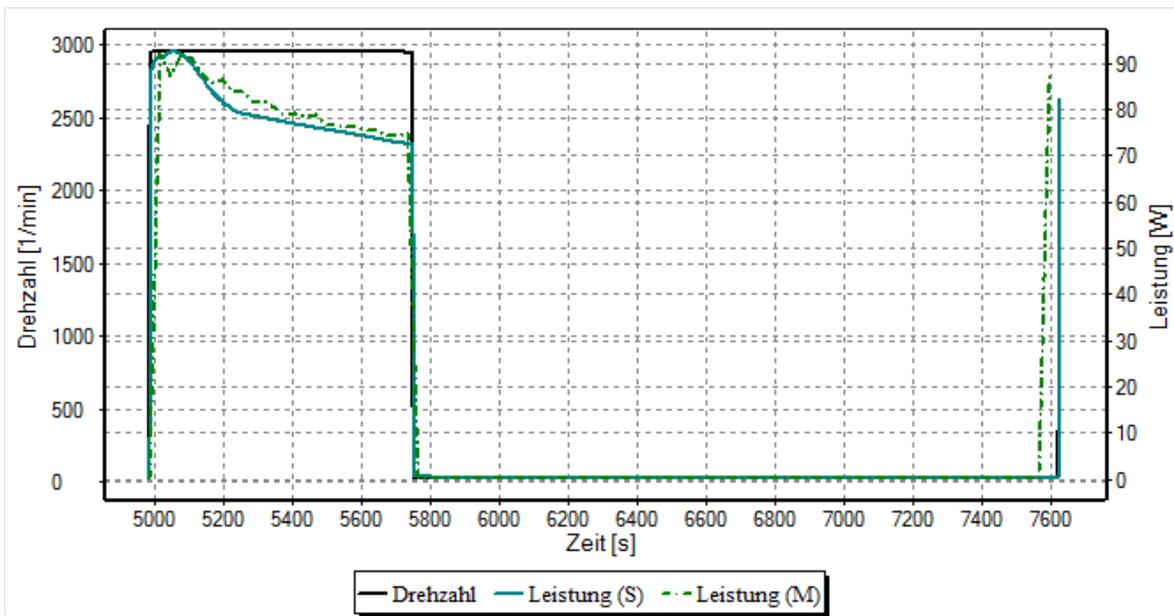


Abbildung 6.4: Kompressordrehzahl und Kompressorleistung aus Simulation (S) und Messung (M) über die Zeit

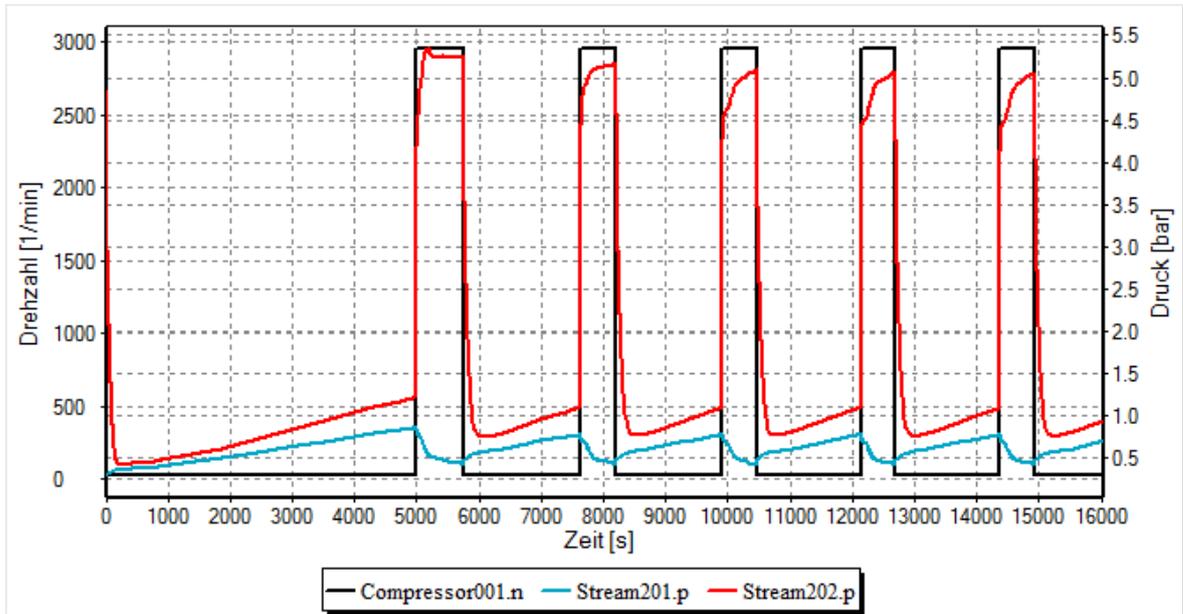


Abbildung 6.5: Druck am Kompressorein- und austritt über die Zeit

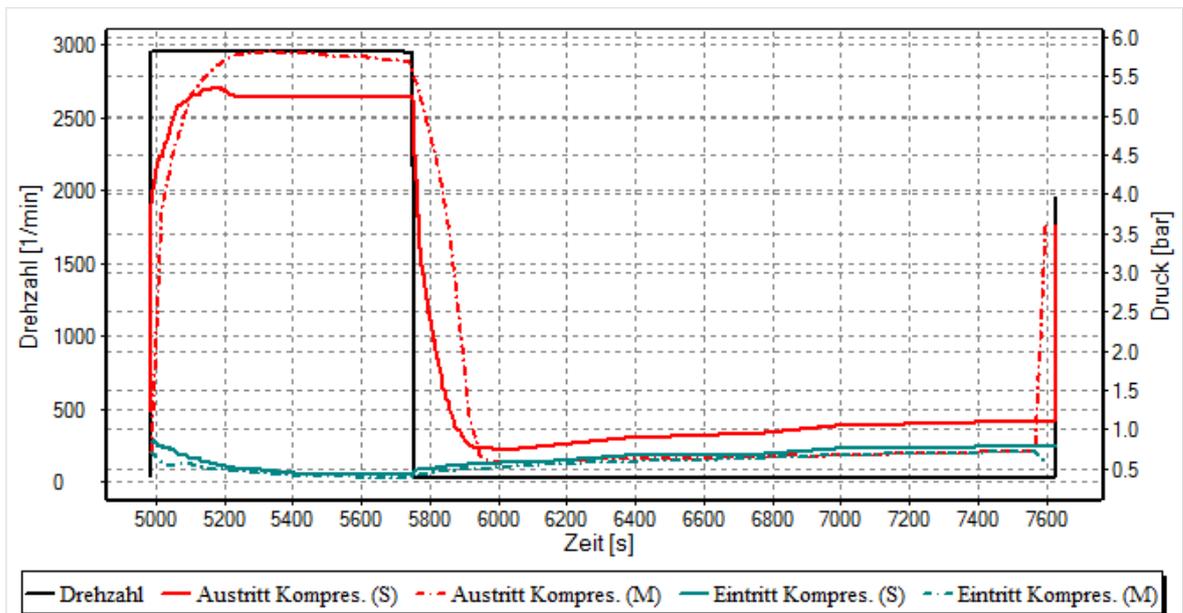


Abbildung 6.6: Druck am Kompressorein- und austritt für die Simulation (S) und die Messung (M) über die Zeit

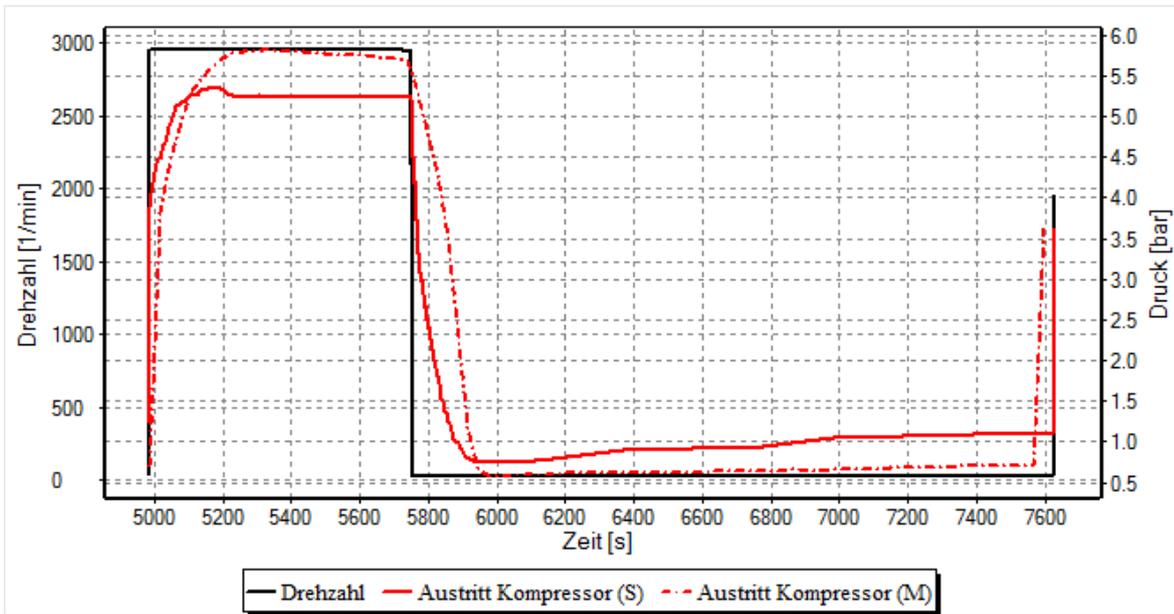


Abbildung 6.7: Druck am Kompressoraustritt für die Simulation (S) und die Messung (M) über die Zeit

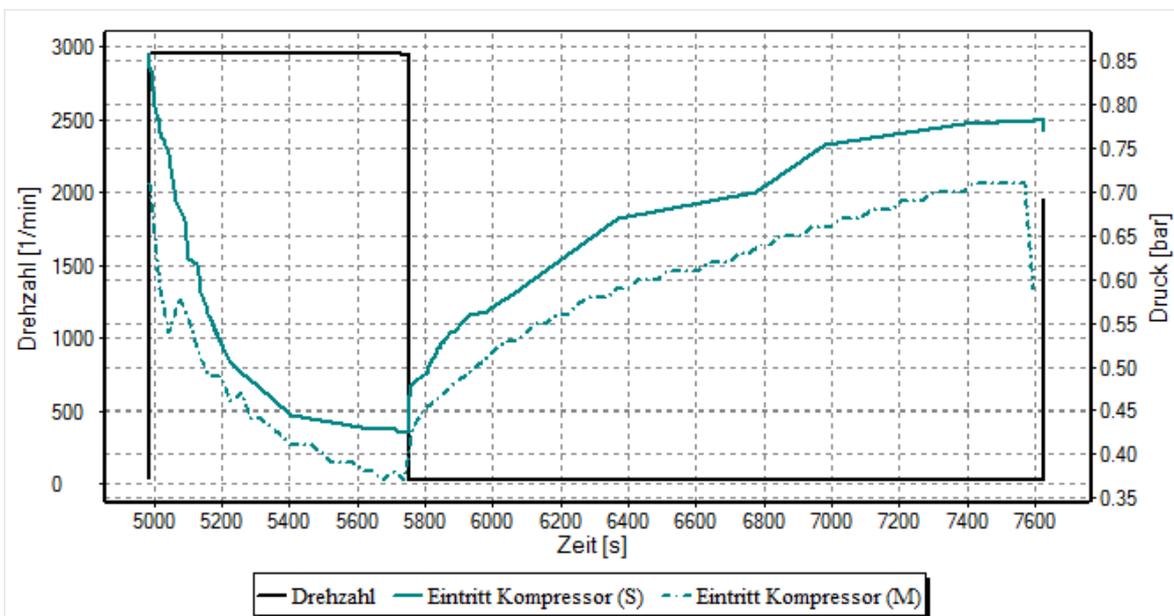


Abbildung 6.8: Druck am Kompressoreintritt für die Simulation (S) und die Messung (M) über die Zeit

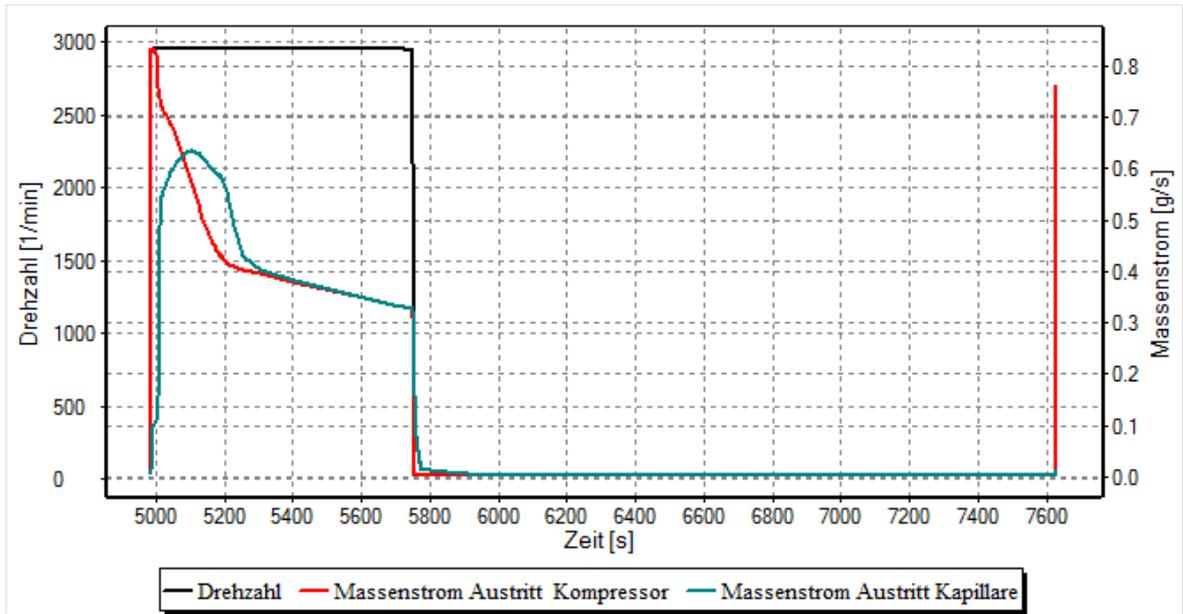


Abbildung 6.9: Lufttemperatur des Kühlfachs, Sensortemperatur über die Zeit

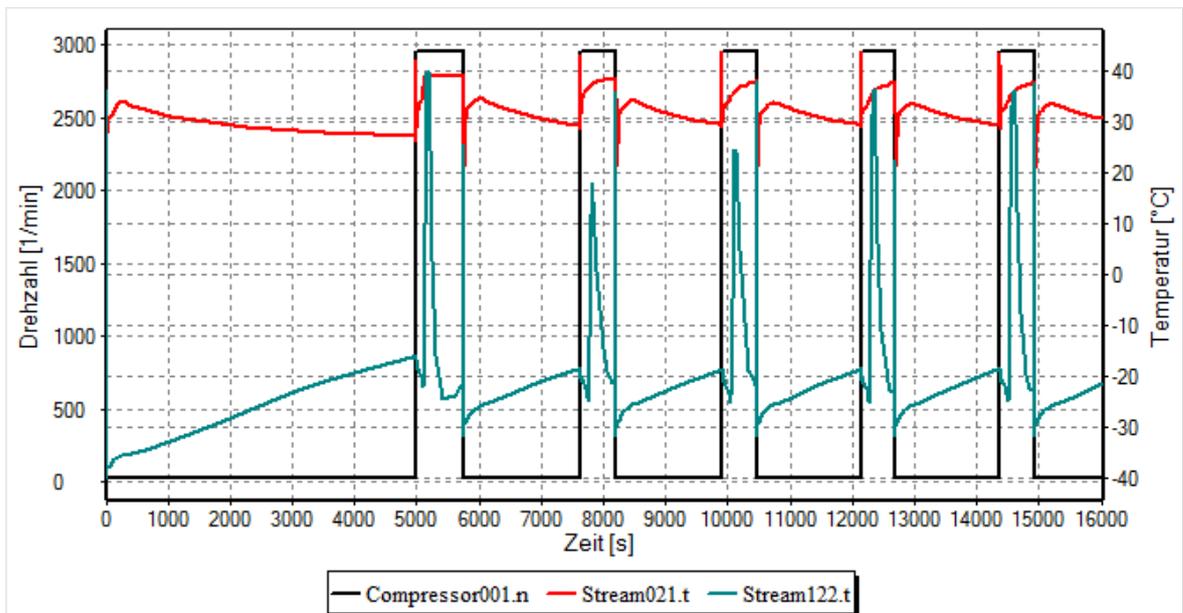


Abbildung 6.10: Kältemitteltemperatur am Kapillareintritt und am internen Wärmeübertrageraustritt über die Zeit

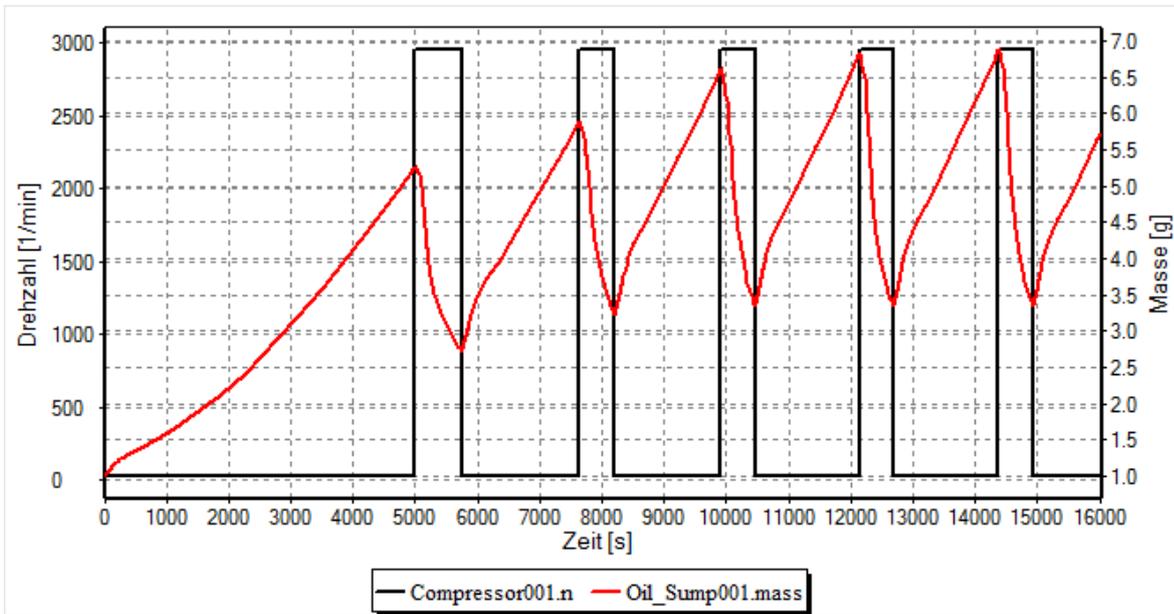


Abbildung 6.11: Kompressordrehzahl und Kältemittelmasse im Kompressoröl über die Zeit

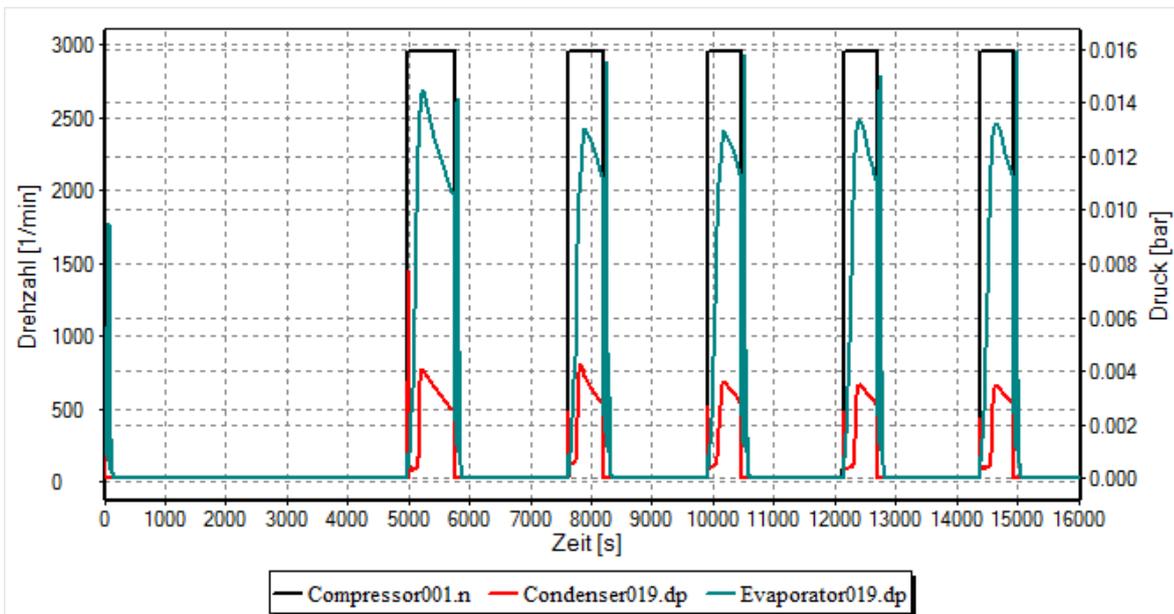


Abbildung 6.12: Druckverlust des letzten Kondensator- und Verdampferes über die Zeit

6 Ergebnisse

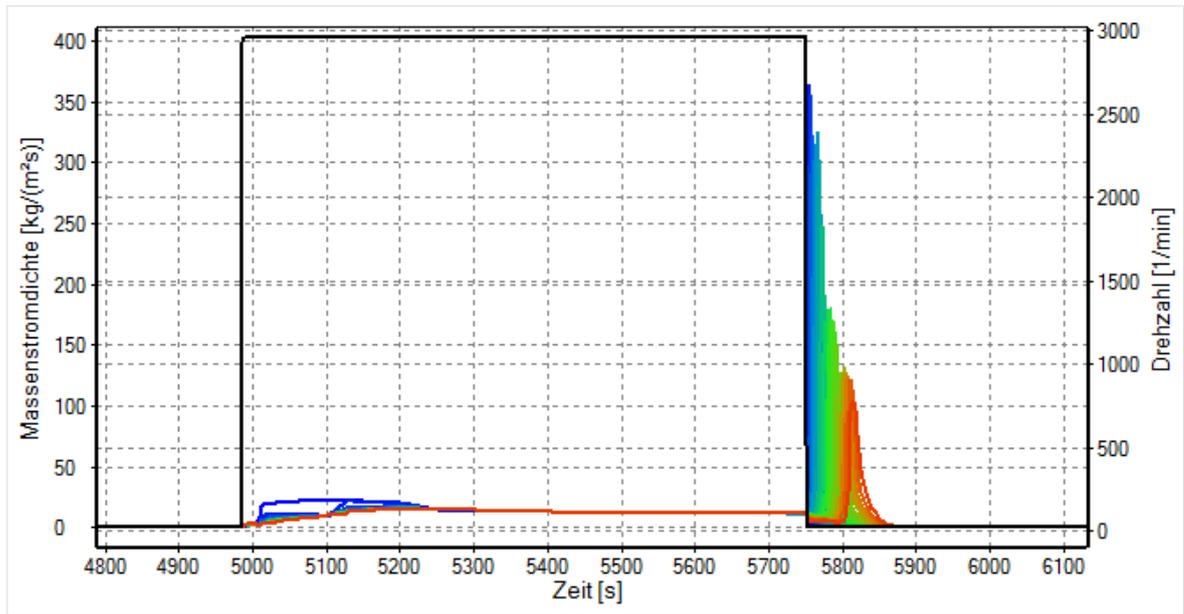


Abbildung 6.13: Massenstromdichten der einzelnen Verdampferelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit

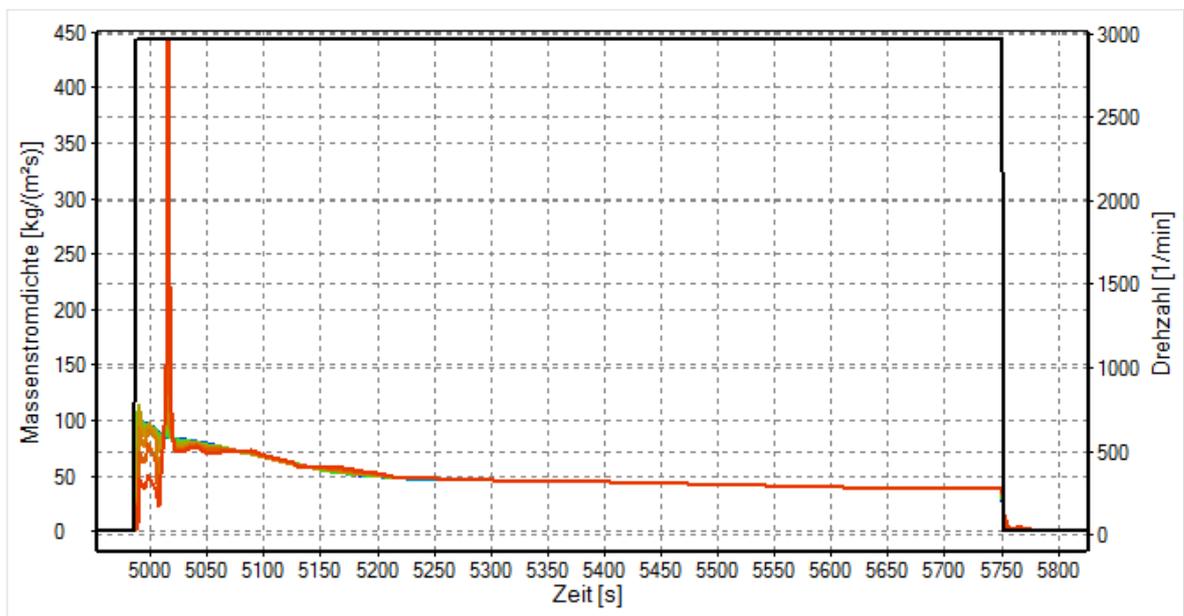


Abbildung 6.14: Massenstromdichten der einzelnen Kondensatorelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit

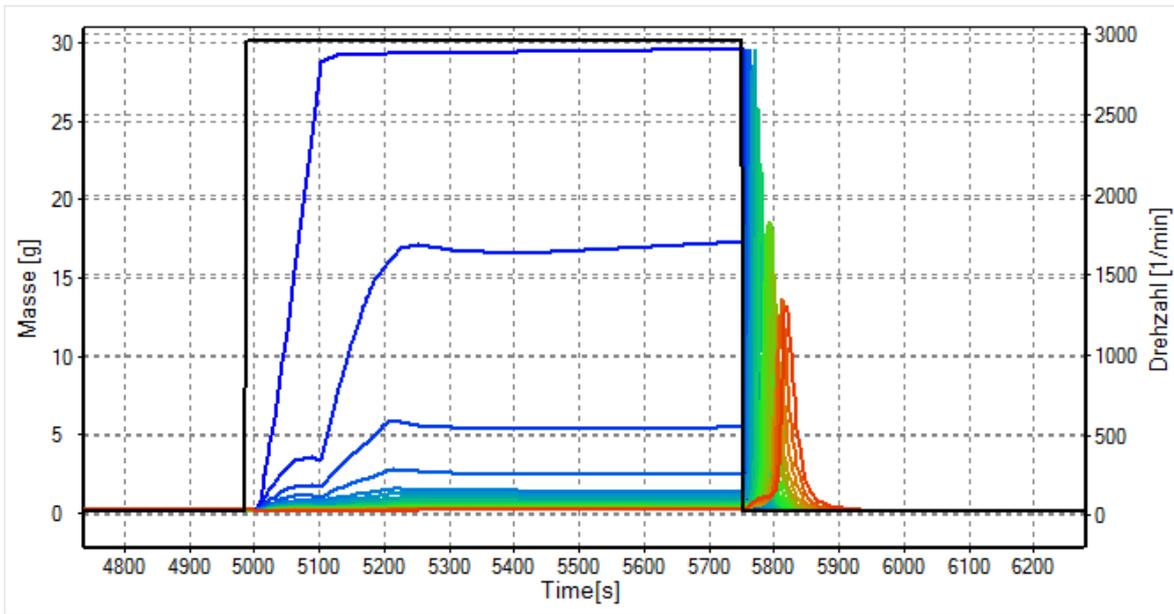


Abbildung 6.15: Kältemittelmassen der einzelnen Verdampferelemente und die Kompressor-drehzahl über die Zeit

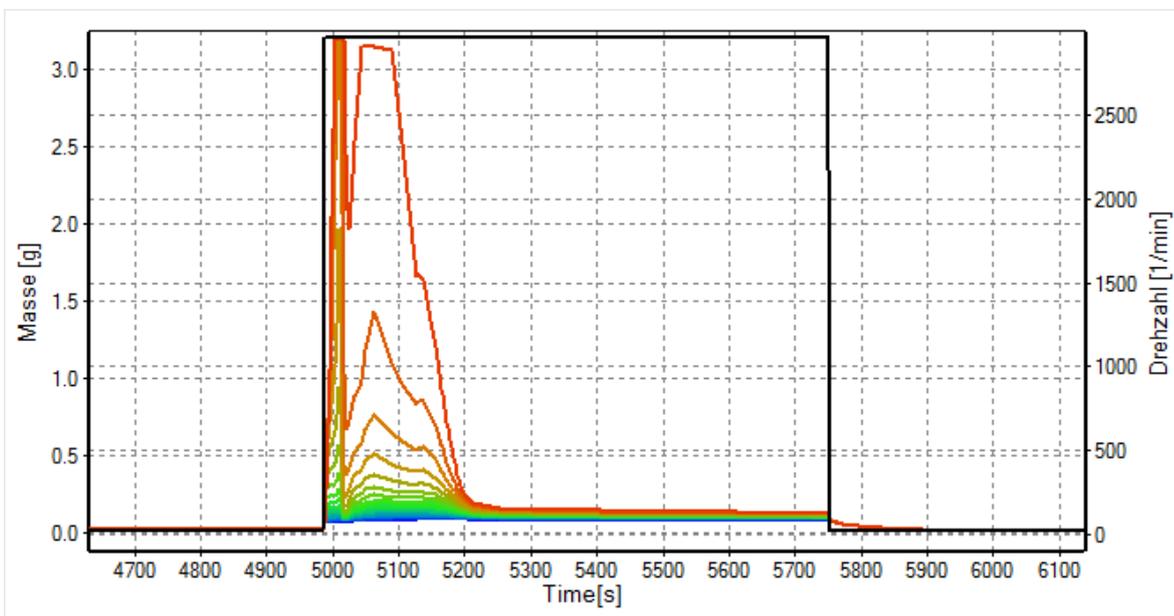


Abbildung 6.16: Kältemittelmassen der einzelnen Kondensatorelemente und die Kompressor-drehzahl über die Zeit

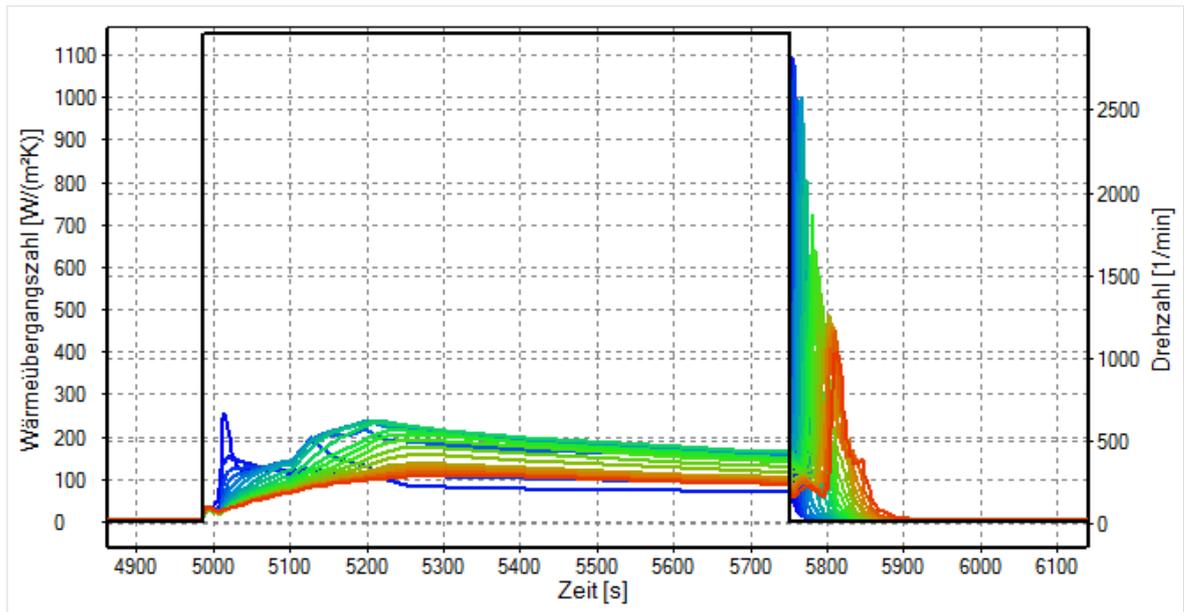


Abbildung 6.17: Wärmeübergangszahlen der einzelnen Verdampferelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit

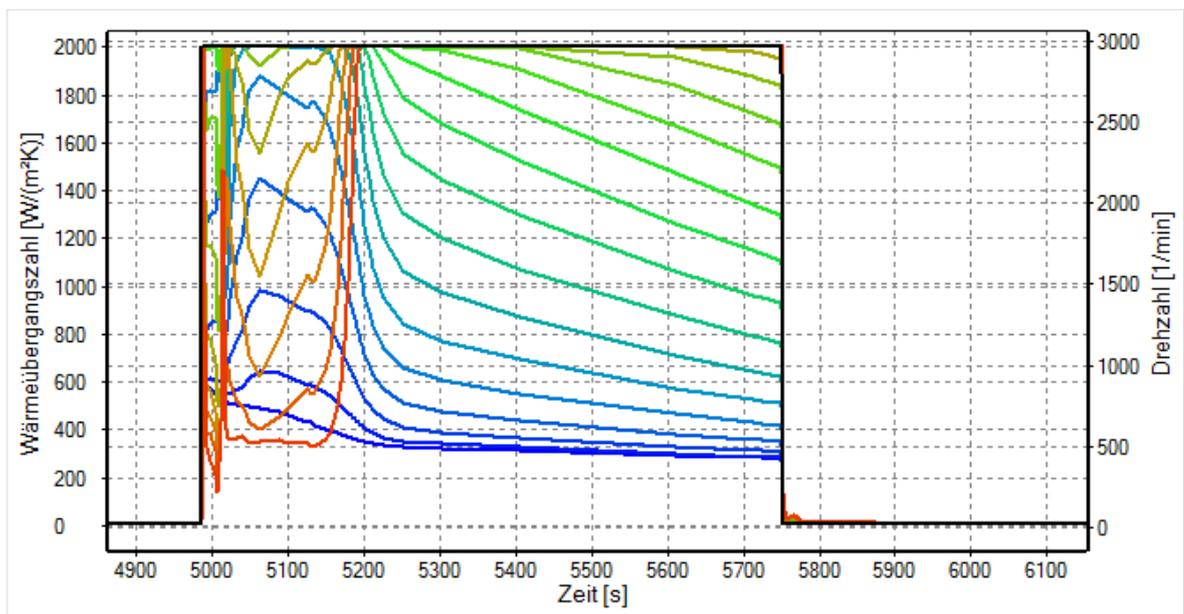


Abbildung 6.18: Wärmeübergangszahlen der einzelnen Kondensatorelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit

Nachfolgend sind einige wichtige Aspekte der im Zuge der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse aufgelistet:

- Es wurde gezeigt, dass die ECO-COOL Library in der Lage ist ein Haushaltskühlgerät samt seiner wichtigsten physikalischen Eigenschaften abzubilden.
- Die aufgebauten Modelle können das stationäre als auch das transiente Verhalten eines Kältekreislaufs für Haushaltskühlgeräte berechnen.
- Die Berechnungsdauer für die instationäre Berechnung liegt unter Echtzeit für das Gefriergerät und über Echtzeit für die Kühlgefrierkombination.
- Es wurden plausible Ergebnisse erzielt.
- Auf Basis der validierten Parameter sind weitere Modellentwicklungen für andere Haushaltskühlgeräte möglich.
- Die Modelle lassen einen detaillierten Einblick in das Betriebsverhalten eines Kältekreislaufs zu.
- Die aufgebauten Modelle können für weitere Parameterstudien verwendet werden.
- Die Ergebnisse unterliegen keinen Messunsicherheiten.
- Hohe Qualität in der Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da immer die selben Randbedingungen eingestellt werden können.

7 Ausblick

Das zu erfüllende gesetzliche Kriterium der Hersteller von Haushaltskühlgeräten bei der Entwicklung sind die Energieeffizienzklassen. Die in der Praxis fast ausschließlich angewandte empirische Vorgehensweise, bei der Mustergeräte aufgebaut und anhand des Energieverbrauchs bewertet werden, bringt wesentliche Nachteile mit sich. Mustergeräte müssen immer wieder aufgebaut und modifiziert werden, geringe Effekte lassen sich nur sehr schwer nachweisen und zeitaufwendige Abstimmungen von geänderten Kühlgerätekomponten sind zwingend notwendig. Die aufgezählten Nachteile können durch die Verwendung eines Kreislaufsimulationprogramms abgeschwächt oder gänzlich reduziert werden.

Die in dieser Masterarbeit entwickelten Kühlgerätemodelle unterstreichen den Schluss, dass Nachteile der empirischen Methode durch eine Modellsimulation ausgeglichen werden können. Im Hinblick auf zukünftige drehzahleregelte Kühlgerätekonzeppte bietet die Simulation einen Vorteil bei der Erarbeitung optimaler Betriebspunkte zur energetischen Bewertung. In der Handhabung lassen sich verschiedene Parameter schneller variieren und Änderungen von Randbedingungen leichter umsetzen. Eine Notwendigkeit zu den Kreislaufsimulationsprogrammen und den damit entwickelten Modellaufbauten wird eine Validierung anhand von Messungen am realen Kühlgerät bleiben. Nur so lassen sich die Eigenschaften eines Kühlgeräts, die aufgrund von Modellierungsfehlern nicht abgebildet werden konnten, auch auf das Modell übertragen. Dadurch besteht trotz der Idealisierung der Modelle die Möglichkeit von gezielten Parameterstudien einzelner Kühlgerätekomponten im transienten Betriebsfall.

Literatur

- [1] Simtech GmbH. *Model Development Kit Manual*. 2016 (siehe S. 3, 4, 7, 10).
- [2] Simtech GmbH. *Process Simulation Environment Manual*. 2016 (siehe S. 3, 5).
- [3] V. Gnielinski. "VDI-Wärmeatlas". In: Springer, 2006. Kap. Durchströmte Rohre (siehe S. 22, 25).
- [4] J. El Hajal, J.R. Thome und A. Cavallini. "Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), S. 3349–3363 (siehe S. 22).
- [5] Martin Heimel, W. Lang und Raimund Almbauer. "Performance predictions using Artificial Neural Network for isobutane flow in non-adiabatic capillary tubes". In: *International Journal of Refrigeration* 38 (2014), S. 281–289 (siehe S. 23).
- [6] Christian J.L. Hermes und Cláudio Melo. "A first-principles simulation model for start-up and cycling transients of household refrigerators". In: *International Journal of Refrigeration* 31 (2008), S. 1341–1357 (siehe S. 1).
- [7] Dagmar I. Jähnig, Douglas T. Reindl und Sanford A. Klein. "A semi-empirical method for representing domestic refrigerator/freezer compressor calorimeter test data". In: *ASHRAE Transactions* 106 (2000), S. 122–130 (siehe S. 19).
- [8] Eric W. Lemmon, Marcia L. Huber und Mark O. McLinden. *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP*. Version 9.1. National Institute of Standards und Technology. 2010 (siehe S. 14).
- [9] Wenhua Li. "Simplified steady-state modeling for hermetic compressors with focus on extrapolation". In: *International Journal of Refrigeration* 35 (2012), S. 1722–1733 (siehe S. 19).
- [10] Jens Philipp. "Optimierung von Haushaltskühlgeräten mittels numerischer Modellierung". Diss. Technische Universität Dresden, 2002 (siehe S. 21).
- [11] Stefan Posch, Erwin Berger, Martin Heimel, Raimund Almbauer, Axel Stupnik und Hans-Peter Schögler. "Comparison and Validation of Semi-empirical Compressor Models for Cycle Simulation Application". In: *Proc. Int. Compressor Engineering Conference at Purdue*. Bd. Paper 1260. 2014 (siehe S. 19).

- [12] Jesús Moreno Quibén und John R. Thome. "Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model". In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28 (2007), S. 1060–1072 (siehe S. 22).
- [13] Mario Rohrhofer. Diss. Technische Universität Graz, 2017 (siehe S. 13, 55).
- [14] Anton Schweizer. *Stoffdaten Wärmeübergangskoeffizienten Gase*. 2016. URL: http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php (besucht am 22.07.2016) (siehe S. 57).
- [15] D. Steiner. "VDI-Wärmeatlas". In: Springer, 2006. Kap. Strömungssieden gesättigter Flüssigkeiten (siehe S. 23).
- [16] J.R. Thome, J. El Hajal und A. Cavallini. "Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), S. 3365–3387 (siehe S. 22).
- [17] Leszek Wojtan, Thierry Ursenbacher und John R. Thome. "Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I—A new diabatic two-phase flow pattern map". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005), S. 2955–2969 (siehe S. 23).
- [18] Leszek Wojtan, Thierry Ursenbacher und John R. Thome. "Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part II— Development of a new heat transfer model for stratified-wavy, dryout and mist flow regimes". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005), S. 2970–2985 (siehe S. 23).

Anhang

A Variablenerklärung MDL Code

Tabelle A.1: Variablensuffix/Variablenpräfix der Connections/Units

Connection/Unit	Variablensuffix/Variablenpräfix	Bedeutung
Connection	<code>_drain</code>	abfließende Größe
	<code>_feed</code>	zufließende Größe
Unit	Composition	Kältemittel (KM)
	<code>drain</code>	abfließende Größe der Stream
	<code>drainH</code>	abfließende Größe der HeatFlux
	<code>feedH</code>	zufließende Größe der HeatFlux
	<code>drainC</code>	abfließende Größe der Control
Allgemein	<code>massflow</code>	Massenstrom KM
	<code>mass</code>	Masse KM
	<code>p</code>	Druck KM
	<code>h</code>	Enthalpie KM
	<code>u</code>	innere Energie KM
	<code>'</code>	erste Ableitung einer Größe

In Tabelle A.1 sind die verwendeten Variablensuf- und präfixe der in Kapitel 3 beschriebenen Connections und Units tabelliert. Eine abfließende Größe, z.B. der Massenstrom des Kältemittels, in einer Unit setzt sich zusammen aus dem Variablenpräfix *drain* und der Variable für den Massenstrom *massflow*, also *drain.massflow*.

In Tabelle A.2 sind die verschiedenen Variablennamen für die Connection Stream und die Connection HeatFlux gezeigt.

In Tabelle A.3 sind die verschiedenen Variablennamen der Units zu den Codefragmenten in Kapitel 3 tabelliert.

Tabelle A.2: Variablenamen der Connections

Connection	Variablenname	Bedeutung
Stream	t	Temperatur KM
	rho	Dichte KM
	s	Entropie KM
HeatFlux	k	Wärmedurchgangszahl
	d	Schichtdicke
	par	Wärmeleitfähigkeit/ Wärmeübergangszahl
	q_dot	übertragene Wärme
	Area	Fläche
	t	Stofftemperatur

Tabelle A.3: Variablenamen der Units

Unit	Variablenname	Bedeutung
Compressor	n	Kompressordrehzahl
	V_h	Hubvolumen Kompressor
	V_flow	Volumenstrom KM
	s	Entropie KM
	P_is	isentropie Leistung
	P	elektrische Leistung
	eta_v	volumetrischer Wirkungsgrad
Shell	eta_comb	kombinierter Wirkungsgrad
	drain	abfließende Größe der Shell side
	feed	zufließende Größe der Shell side
	drain_h	abfließende Größe der Hot side
	feed_h	zufließende Größe der Hot side
	feed_oil	zufließende Größe des Ölsumpfes
	q_Hx	Wärmestrom KM zu Hot side
	alpha_Hx	Wärmeübergangskoeff. KM zu Hot side
	Area_Hx	Fläche KM zu Hot side
	q_Hx	Wärmestrom KM zu Cold side
	alpha_Hx	Wärmeübergangskoeff. KM zu Cold side
	Area_Hx	Fläche KM zu Cold side
	c_w	Wärmekapazität Kompressorkapsel
rho_w	Dichte Kompressorkapsel	
Vol_w	Volumen Kompressorkapsel	

Tabelle A.3: Griechische Buchstaben

Unit	Variablenname	Bedeutung
Oil_Sump	mu	Massenverhältnis KM zu Schmieröl
	mu_sat	Massenverhältnis Sättigungszustand
	tau	Zeitkonstante
Wall	c.wall	Wärmekapazität Schicht
	rho.wall	Dichte Schicht
	Vol.wall	Volumen Schicht
	t	Temperatur Schicht
Condenser	alpha	Wärmeübergangskoeff. KM
	Area_ip	Innenfläche Rohrwand
	t_p	Temperatur Rohrwand
Compartment	rho	Dichte Luft
	c_v	Wärmekapazität Luft
	Vol	Volumen Kühlfach
	t	Temperatur Luft
Fan	delta_p	Druckerhöhung
	V_dot	Volumenstrom Luft
	v	Strömungsgeschwindigkeit Luft
Temperature_Sensor	A	Querschnittsfläche Gebläse
	c	Wärmekapazität Sensor
	rho	Dichte Sensor
	Vol	Volumen Sensor
	t	Temperatur Sensor

B Ergebnisse Kühlgefrierkombination

Da keine ausreichenden Messergebnisse für die Kühlgefrierkombination vorlagen, konnten die erzielten Ergebnisse aus der Simulation nicht hinreichend genau validiert werden. Trotzdem sollen die Ergebnisse die Rechenfähigkeit der abgebildeten Kühlgefrierkombination zeigen und das Betriebsverhalten im transienten Fall verdeutlichen.

Alle Abbildungen für die Kühlgefrierkombination werden aus dem stationären Fall bei einer Kompressordrehzahl von 3000 U/min für den transienten Fall initialisiert. Die Bedingungen sind bei Umgebungstemperatur $t_U = 25.5^\circ\text{C}$ und p^0 konstant gehalten.

Die Abbildung A.1 zeigt die Drehzahl des Kompressors, die Lufttemperaturen im Kühl-, Gemüse- und Gefrierfach über die Zeit von insgesamt zwei Ein- und Ausschaltzyklen des Kompressors.

Die Abbildung A.2 zeigt die Drehzahl und die Leistung des Kompressors über die Zeit.

In Abbildung A.3 sind der zeitliche Druckverlauf des Kältemittels vor dem Eintritt in den Kompressor und nach dem Austritt aus dem Kompressor und der zeitliche Verlauf der Kompressordrehzahl über die Zeit dargestellt.

In Abbildung A.4 sind die Massenstromdichten aller Kondensatorelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Kondensatorelementes ab.

Die Abbildung A.5 stellt die eingelagerten Kältemittelmassen in den Kondensatorelementen und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und Ausschaltzyklus dar. Der blaue Graph bildet den Verlauf des ersten und der rote Graph den Verlauf des letzten Kondensatorelementes ab.

In Abbildung A.6 sind die Massenstromdichten aller Verdampferelemente für das Kühlfach und die Kompressordrehzahl über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt.

Die Abbildung A.7 zeigt die eingelagerten Kältemittelmassen in den Verdampferelementen für das Kühlfach und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und Ausschaltzyklus.

In Abbildung A.8 sind die Massenstromdichten aller Verdampferelemente für das Gefrierfach und die Kompressordrehzahl über die Zeit eines Ein- und Ausschaltzyklus dargestellt.

Die Abbildung A.9 zeigt die eingelagerten Kältemittelmassen in den Verdampfer-
elementen für das Gefrierfach und die Kompressordrehzahl über einen Ein- und
Ausschaltzyklus.

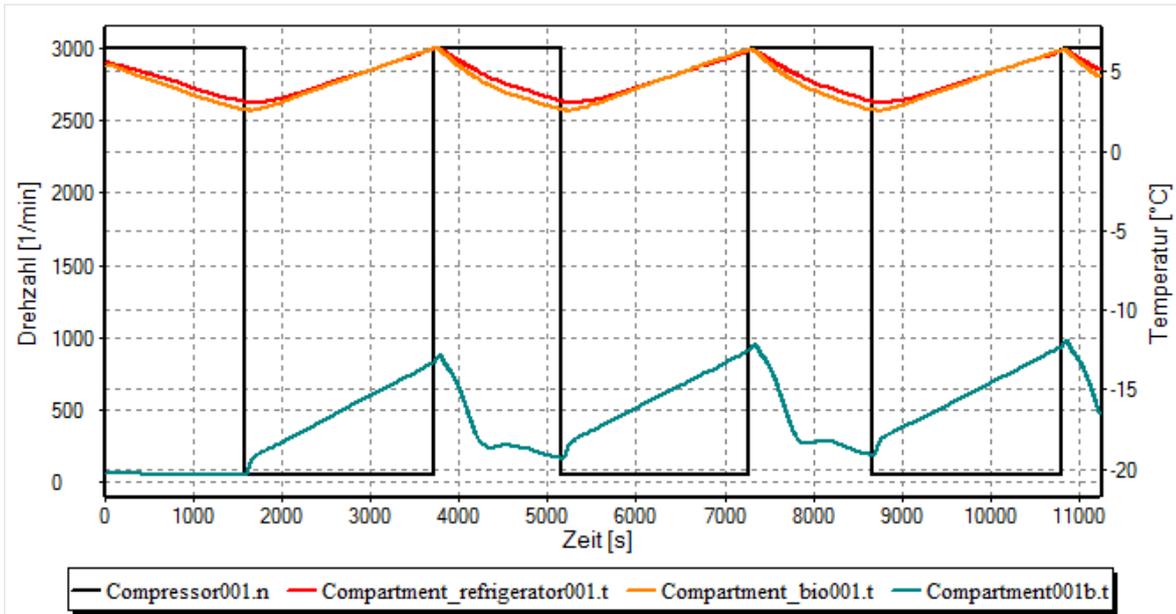


Abbildung A.1: Kompressordrehzahl und die Lufttemperatur des Kühl-, Gemüse- und Gefrierfachs über die Zeit

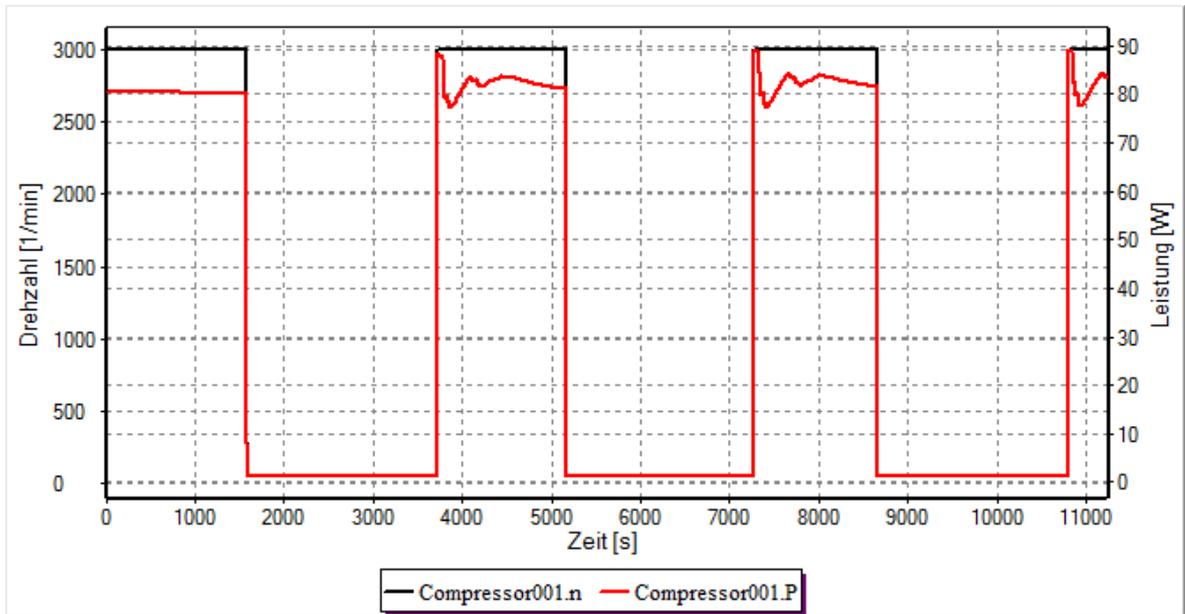


Abbildung A.2: Kompressordrehzahl und Kompressorleistung über die Zeit

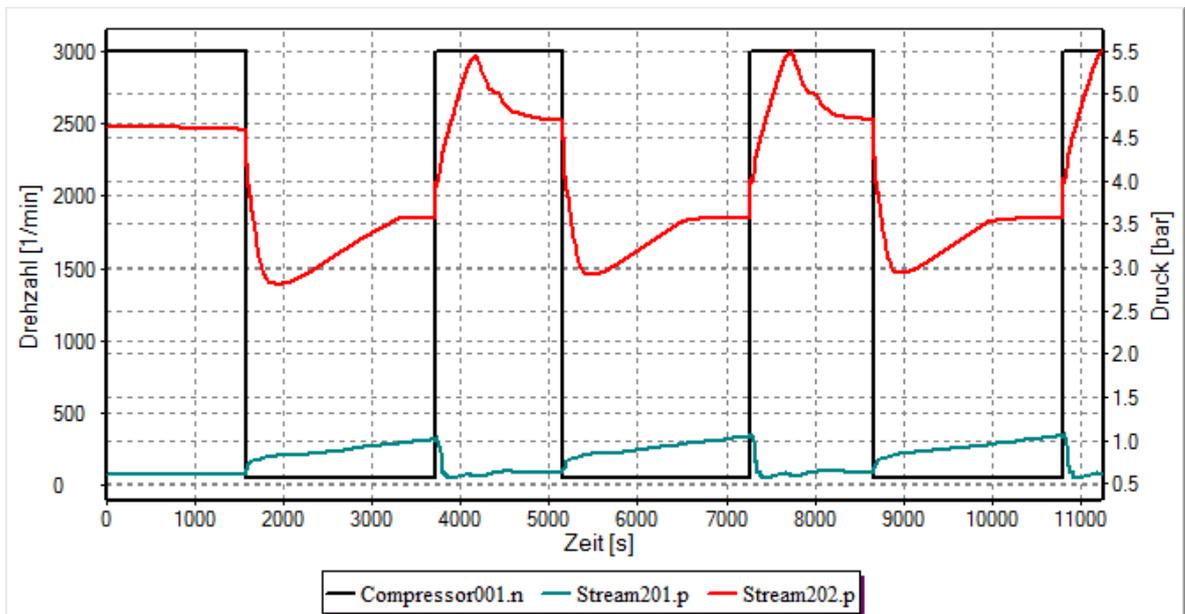


Abbildung A.3: Druck am Kompressorein- und austritt über die Zeit

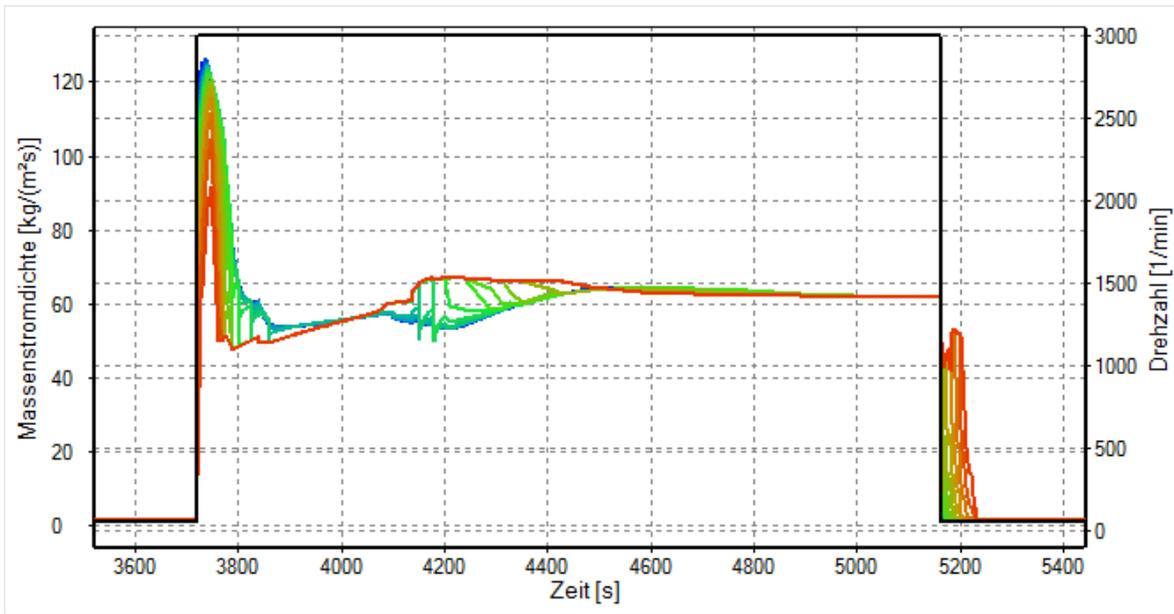


Abbildung A.4: Massenstromdichten der einzelnen Kondensatorelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit

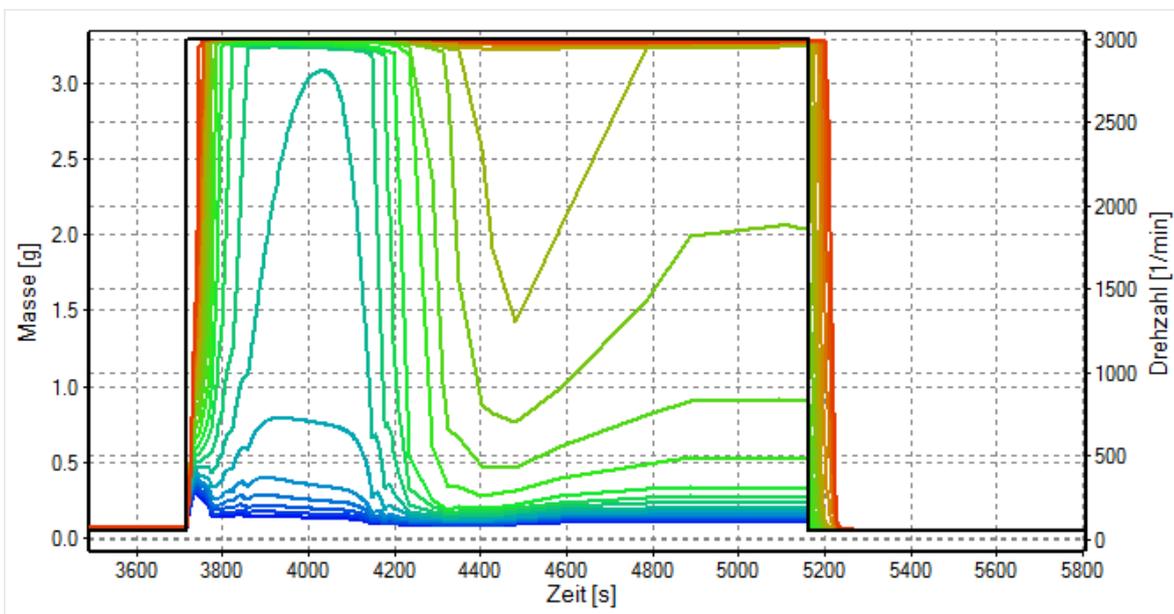


Abbildung A.5: Kältemittelmassen der einzelnen Kondensatorelemente und die Kompressordrehzahl über die Zeit

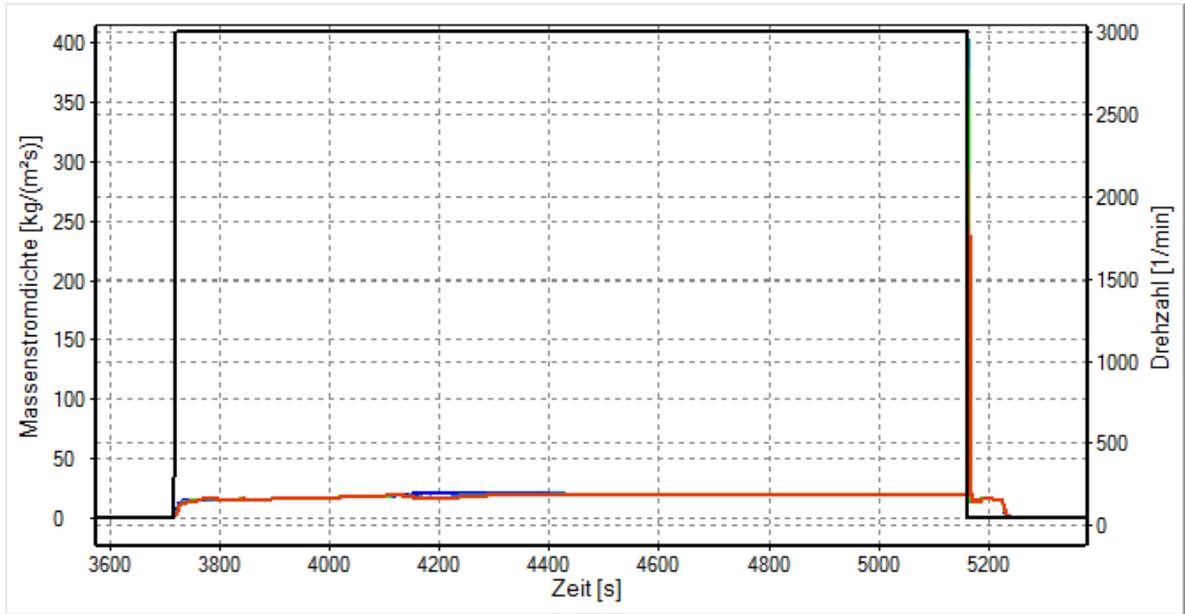


Abbildung A.6: Massenstromdichten der einzelnen Verdampferelemente des Kühlfachs und die Kompressordrehzahl über die Zeit

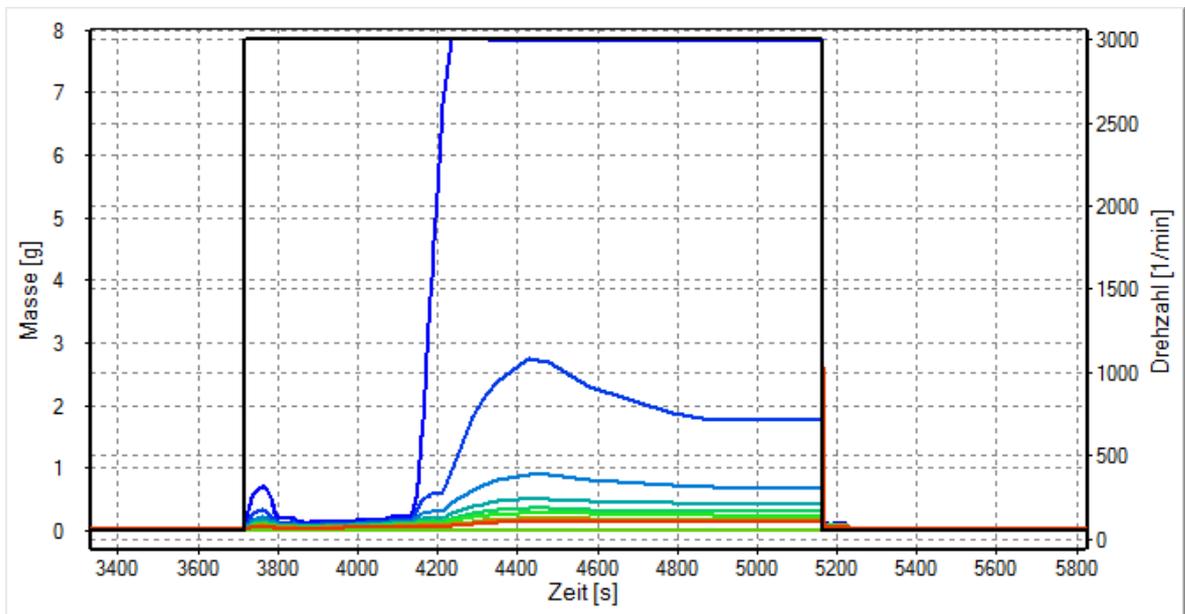


Abbildung A.7: Kältemittelmassen der einzelnen Verdampferelemente des Kühlfachs und die Kompressordrehzahl über die Zeit

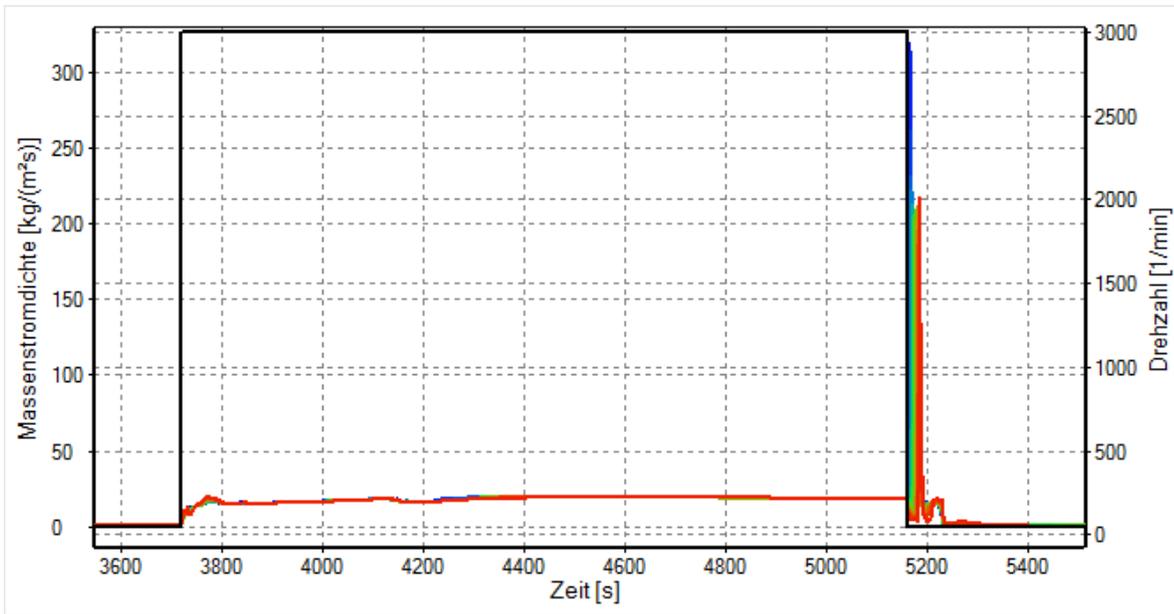


Abbildung A.8: Massenstromdichten der einzelnen Verdampferelemente des Gefrierfachs und die Kompressordrehzahl über die Zeit

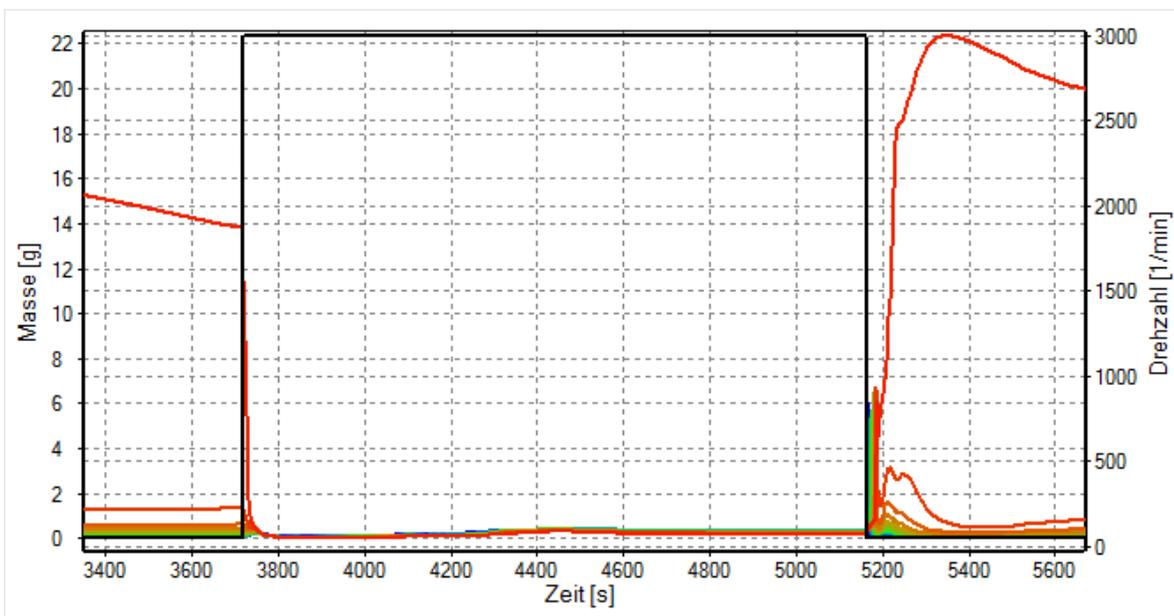


Abbildung A.9: Kältemittelmassen der einzelnen Verdampferelemente des Gefrierfachs und die Kompressordrehzahl über die Zeit