

# VALIDIERUNG DES BLOCKS ABSORPTION CHILLER YAZAKI WFC-SC5 MIT MESSDATEN EINES HARDWARE-IN-THE-LOOP-PRÜFSTANDES

---

## INHALT

---

1	Data used for validation / Validierungsdaten .....	2
1.1	Vermessung des stationären Kennfeldes .....	2
1.2	Vermessung des dynamischen Verhaltens.....	5
2	Description of the model / Beschreibung des Modells .....	8
2.1	Beschreibung des AKM-Modells.....	8
2.1.1	Kennfeldmodell.....	9
2.1.2	Heiz-, Rückkühl- und Kältekreisblock .....	10
2.1.3	Lösungsmittelpumpe .....	11
2.2	Einbindung des stationären Kennfelds unter MATLAB/Simulink .....	11
2.2.1	Grundlagen des n-D Lookup Table.....	11
2.2.2	Kennfeldanpassung.....	14
2.3	Abbildung des dynamischen Verhaltens.....	21
3	Results / Ergebnisse.....	22
3.1	Modellvalidierung .....	22
3.1.1	Relativer Fehler .....	22
3.1.2	Validierung .....	23
4	Literature .....	35
A	Anhang .....	36
A.1	Vollständiges Kennfeld des validiertes AKM-Modells .....	37

### Authors / Autoren

Johannes Goebel, Jonas Gottschald, Sandra Lohmann, Rada Radosavljevic,

Fachhochschule Düsseldorf  
E<sup>2</sup> - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz  
Josef-Gockeln-Straße 9  
40474 Düsseldorf

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 1 / 43

**Version of Carnot, Matlab and Operation system / Version von Carnot, Matlab und Betriebssystem**

Carnot 5.3, Matlab R2007b/R2012a, Windows XP/Windows 7

**Complete path of the block in the Carnot Library / Vollständiger Carnot-Pfad**

Carnot/New Blocks

Diese Dokumentation wurde (Adam, Lohmann, Radosavljevic, Goebel, & Gottschald, 2013) unter Kapitel 2.1.5 und 3.6.1 entnommen und zusammengefügt.

Das erste Modell der Absorptionskältemaschine wurde im Rahmen der Bachelor-Thesis „Solare Kühlung – Modellestellung und -validierung einer Absorptionskältemaschine unter MATLAB / Simulink / Carnot“ (Radosavljevic, 2010) durch Rada Radosavljevic erstellt und beschrieben. 2012 wurde dieses Modell dann verbessert, validiert und um Dynamik erweitert.

## 1 Data used for validation / Validierungsdaten

Am HiL-Prüfstand (Adam, Lohmann, Radosavljevic, Goebel, & Gottschald, 2013) wurden zunächst eine Kennfeldvermessung für die Kälteleistung und den COP sowie einige Tests zum dynamischen Verhalten der Absorptionskältemaschine durchgeführt, um damit das Simulationsmodell der AKM zu verbessern und zu validieren. Das Ergebnis ist ein neues, validiertes AKM-Modell mit guter Anpassung der stationären Kälte-, Rückkühl- und Heizkreisleistung. Ebenso bildet das neue Modell das dynamische Verhalten der Leistungen sowie die Totzeit in der Kälteleistung bei Start der AKM besser ab als das bisherige, auch wenn hier noch Optimierungspotenzial besteht.

### 1.1 Vermessung des stationären Kennfeldes

Die Leistungen und der COP der AKM wurden an 27 stationären Betriebspunkten in einem 3-stufigen Raster in Abhängigkeit der drei Eintrittstemperaturen im HT-, MT- und NT-Kreis bestimmt (siehe Tabelle 1.1). Die Volumenströme in den drei Kreisen betrugen dabei 4,33 m<sup>3</sup>/h (HT), 9,16 m<sup>3</sup>/h (MT) und 2,74 m<sup>3</sup>/h (NT), was ungefähr den vom Hersteller geforderten Nennvolumenströmen entspricht. Beim Anfahren der Betriebspunkte wurde Beharrung (Konstanz von Temperaturen und Leistungen) abgewartet. Im Anschluss wurde der Betriebspunkt über eine Dauer von 30 Minuten gemessen und aus den Messdaten Mittelwerte der Temperaturen und Leistungen gebildet. Die Eintrittstemperatur des Heizkreises wurde allein über die Regelung der Heizpatronen eingestellt. Der HT-Mischer wurde nicht eingesetzt, um eine gegenseitige Beeinflussung der Regelkreise gering zu halten und um konstante Volumenströme zu realisieren. Eine Mehrfachvermessung zur statistischen Absicherung der Ergebnisse erfolgte bislang nicht.

Tabelle 1.1 Stufen des Kennfeldes

Kreis	Stufen		
T_HT_IN	70	79	88
T_MT_IN	29	31	33
T_NT_IN	11	12,5	14

Die folgende Tabelle zeigt das gemessene Kennfeld.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 2 / 43

Tabelle 1.2 Kennfeld der AKM. Legende: VP = Versuchspunkt T = Temperatur in °C, Q = Leistungen, HT = Heizkreis, MT = Rückkühlkreis, NT = Kältekreis, Q\_v = Verlustleistung, COP = Leistungszahl, Spalte Anmerkungen gibt die nötigen Einstellungen am Prüfstand wieder und zeigt welche Punkte nicht wie geplant angefahren werden konnten, Temperaturfühler der AKM vom Display abgelesen: LT= Verdampftertempatur, CTI =Rückkühlwassereintrittstemperatur, HWNT= Heizwassereintrittstemperatur, WTO= Kaltwasseraustrittstemperatur

	T <sub>HT</sub> in	T <sub>HT</sub> out	T <sub>MT</sub> in	T <sub>MT</sub> out	T <sub>NT</sub> in	T <sub>NT</sub> out	Q <sub>HT</sub>	Leistungen / kW	Q <sub>MT</sub>	Q <sub>NT</sub>	Q <sub>v</sub>	COP	Anmerkung	Temperaturen Display AKM / °C	LT	CTI	HWNT	WTO
VP1	70,1	67,7	28,9	30,6	10,9	8,7	11,71	17,95	7,11	0,9	0,607		ein Hahn geöffnet, Feinjustage nötig	3,8	29,3	69,7	9,2	
VP2	70,1	68,2	31,0	32,2	10,9	9,4	9,29	13,12	4,86	1,0	0,523		ein Hahn geöffnet, Feinjustage nötig	5,1	31,4	69,7	9,9	
VP3	70,1	68,6	32,8	33,6	10,9	10,1	7,27	8,88	2,77	1,2	0,381		ein Hahn geöffnet, Feinjustage nötig	6,3	33,1	69,8	10,6	
VP4	70,1	67,7	29,0	30,6	12,4	10,3	11,69	17,40	6,94	1,2	0,534		ein Hahn geöffnet	3,8	29,3	69,7	10,8	
VP5	70,1	68,2	31,1	32,2	12,4	11,0	9,24	12,21	4,51	1,5	0,489		beide Hähne geöffnet	5,2	31,6	69,7	11,4	
VP6	70,1	68,6	33,0	33,8	12,4	11,6	7,16	8,41	2,60	1,3	0,363		ein Hahn geöffnet, Feinjustage nötig	6,5	33,3	69,7	12,2	
VP7	70,1	67,7	29,0	30,6	13,9	11,8	11,69	17,44	6,97	1,2	0,556			3,8	29,3	69,5	12,2	
VP8	70,1	68,2	31,0	32,2	13,9	12,5	9,39	12,62	4,79	1,6	0,510			5,1	31,4	69,5	12,8	
VP9	70,1	68,6	33,0	33,8	13,9	13,1	7,25	8,40	2,74	1,6	0,378		ein Hahn geöffnet	6,7	33,3	69,7	13,6	
VP10	79,0	74,8	29,0	32,3	10,9	6,2	20,92	34,81	14,97	1,1	0,716			5,1	29,3	78,3	6,7	
VP11	79,1	75,4	31,0	33,9	10,9	6,9	18,40	30,46	12,94	0,9	0,703		ein Hahn geöffnet	6,6	31,4	78,3	7,5	
VP12	79,1	75,9	33,0	35,4	10,9	7,7	15,67	25,25	10,50	0,9	0,670		ein Hahn nur sehr gering geöffnet	7,7	33,3	78,3	8,3	
VP13	79,1	74,7	29,0	32,3	12,4	7,7	21,36	35,54	15,31	1,1	0,717			5,6	29,3	78,3	8,1	
VP14	79,1	75,3	31,0	34,0	12,4	8,3	18,82	31,53	13,40	0,7	0,712			6,7	31,4	78,3	8,8	
VP15	79,1	75,8	33,1	35,5	12,5	9,0	16,20	26,30	11,12	1,0	0,686			7,9	33,4	78,3	9,6	
VP16	79,0	74,6	29,0	32,3	13,9	9,2	21,44	35,08	15,12	1,5	0,705			5,3	29,3	78,3	9,6	
VP17	79,0	75,2	31,0	33,9	13,9	9,8	18,98	30,91	13,26	1,3	0,659			6,5	31,3	78,3	10,2	
VP18	79,1	75,7	33,0	35,5	13,9	10,4	16,55	26,50	11,22	1,3	0,678			7,9	33,3	78,3	10,9	
VP19	88,0		29,0	31,0	11,0								Takten: war nicht anzufahren nur T <sub>HT</sub> _IN = 85°C, sonst Takt beide Hähne geöffnet	5,7	31,4	84,6	6,7	
VP20	85,1	80,5	31,0	34,5	10,9	6,2	22,68	37,47	15,19	0,4	0,670			5,9	33,3	87,2	7,1	
VP21	88,0	83,4	33,0	36,4	10,9	6,6	22,76	35,77	13,72	0,7	0,603		beide Hähne geöffnet	5,3	29,4	85,4	6,9	
VP22	86,1	80,7	29,0	33,3	12,4	6,4	26,75	45,85	15,33	0,2	0,722		nur T <sub>HT</sub> _IN = 86°C, sonst Takt	6,0	31,4	87,2	7,4	
VP23	88,1	82,9	31,0	35,1	12,4	6,9	25,95	43,43	17,74	0,3	0,683			7,1	33,3	87,2	8,2	
VP24	88,1	83,3	33,0	36,7	12,4	7,6	23,51	38,57	15,43	0,4	0,656		beide Hähne voll geöffnet, Q <sub>HT</sub> zu klein	6,1	29,3	85,4	7,9	
VP25	86,1	80,4	29,0	33,6	14,0	7,4	28,10	48,65	21,01	0,5	0,748		beide Hähne voll geöffnet	6,9	31,4	87,2	8,4	
VP26	88,1	82,6	31,0	35,4	13,9	7,8	27,11	46,00	19,58	0,7	0,722		beide Hähne voll geöffnet	7,9	33,3	87,2	9,0	
VP27	88,1	83,1	33,0	36,9	13,9	8,6	24,40	40,65	17,06	0,8	0,659		beide Hähne voll geöffnet	7,9	33,3	87,2	9,0	

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 3 / 43

Folgende Punkte des Kennfeldes konnten nicht bei den gewünschten Temperaturen gemessen werden:

VP19 (88/29/11): Dieser Betriebspunkt konnte nicht angefahren werden, da hier eine zu niedrige Kaltwasseraustrittstemperatur (WTO) generiert wird. Ab einer Kaltwasseraustrittstemperatur  $\text{WTO} < 6,6^\circ\text{C}$  schaltet die AKM-interne Regelung die Pumpe des Heizkreises ab, die AKM fängt also an zu Takt. Einen Punkt bei niedrigerer Heizkreiseintrittstemperatur anzufahren, macht hier keinen Sinn, da bereits der Betriebspunkt VP10 (79/29/11) bei  $\text{WTO} = 6,7^\circ\text{C}$  liegt.

VP20: Dieser Betriebspunkt konnte aus oben genannten Gründen ( $\text{WTO} = 6,6^\circ\text{C}$  fast erreicht) mit einer maximalen  $T_{\text{HT\_IN}}$  von  $85,1^\circ\text{C}$  gefahren werden.

VP22: Dieser Betriebspunkt konnte aus oben genannten Gründen mit einer maximalen  $T_{\text{HT\_IN}}$  von  $86,1^\circ\text{C}$  gefahren werden.

VP25: Dieser Betriebspunkt konnte bei  $T_{\text{HT\_IN}} = 88^\circ\text{C}$  nicht gefahren werden, da bei Herabsetzen der  $T_{\text{MT\_IN}}$  auf  $29^\circ\text{C}$  die Leistung der Heizpatronen nicht ausreichte, um  $T_{\text{HT\_IN}}$  bei  $88^\circ\text{C}$  zu halten.

Abbildung 1.1 und Abbildung 1.2 zeigen die gemessenen Kälteleistungen und COP der Yazaki WFC-SC05, aufgetragen über der Generatoreintrittstemperatur, sowie Trendlinien zwischen den jeweiligen Punkten.

Wie erwartet steigt die Kälteleistung mit steigender Generator- (höhere treibende Temperaturdifferenz im Generator → mehr Kältemittel kann ausgetrieben werden) und sinkender Rückkühlereintrittstemperatur (Kältemittel wird besser kondensiert und unterkühlt, sowie bessere Abfuhr der Absorptionswärme d.h. auch bessere Absorption). Die Kältekreiseintrittstemperatur hat nur bei hohen Generatoreintrittstemperaturen einen nennenswerten Einfluss. Dabei steigt die Kälteleistung mit steigender Kältekreiseintrittstemperatur (höhere treibende Temperaturdifferenz im Verdampfer → Kältemittel kann besser verdampft werden).

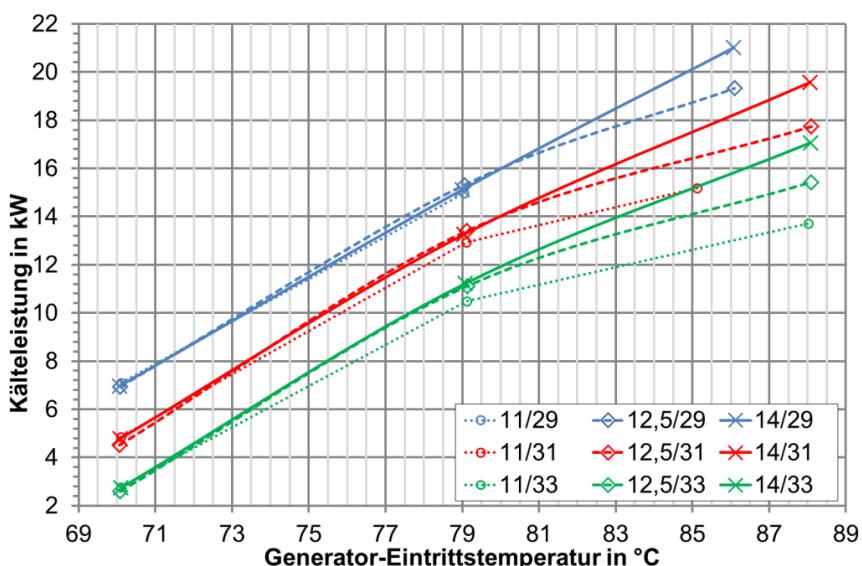


Abbildung 1.1 Kälteleistung über der Generatoreintrittstemperatur bei verschiedenen Rückkühl- und Kältekreiseintrittstemperaturen

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 4 / 43

Der COP besitzt, über der Generatoreintrittstemperatur aufgetragen, einen nichtlinearen Verlauf. Bei höheren Generatoreintrittstemperaturen wird die Zunahme geringer bzw. der COP nimmt bei ansonsten konstanten Randbedingungen wieder ab. In Abbildung 1.2 ist eine quadratische Trendlinie gewählt. Der Einfluss der Generatoreintrittstemperatur auf den COP sinkt mit sinkender Rückkühleintrittstemperatur. Ein Einfluss der Kältekreiseintrittstemperatur ist wiederum nur bei hoher Generatoreintrittstemperatur vorhanden.

Über die Ursachen der Wirkungsgradabnahme bei hohen Generatoreintrittstemperaturen kann ohne genauere Untersuchung keine abschließende Aussage getroffen werden. Eine mögliche Ursache könnte das Einbringen kondensierten Kältemittels in den Verdampfer sein. Liegt der Zustand des Kältemittels nach der Drosselung im Zweiphasengebiet, so steht nur der flüssige Teil des Kältemittels für die Wärmeaufnahme im Verdampfer zur Verfügung. Je besser die Unterkühlung des Kältemittels (bei niedriger Rückkühltemperatur) desto geringer die Wirkungsgradeinbußen.

Im Nennbetriebspunkt (12,5 °C NT, 31 °C MT, 88 °C HT) liegt der COP um 2 Prozentpunkte unter den Herstellerangaben. Die gemessene Kälteleistung ist mit 17,74 kW um 0,14 kW größer als die Angabe des Herstellers, die Heizleistung um 0,85 kW höher als die angegebenen 25,1 kW. Diese Differenzen liegen im Bereich der Messgenauigkeit.

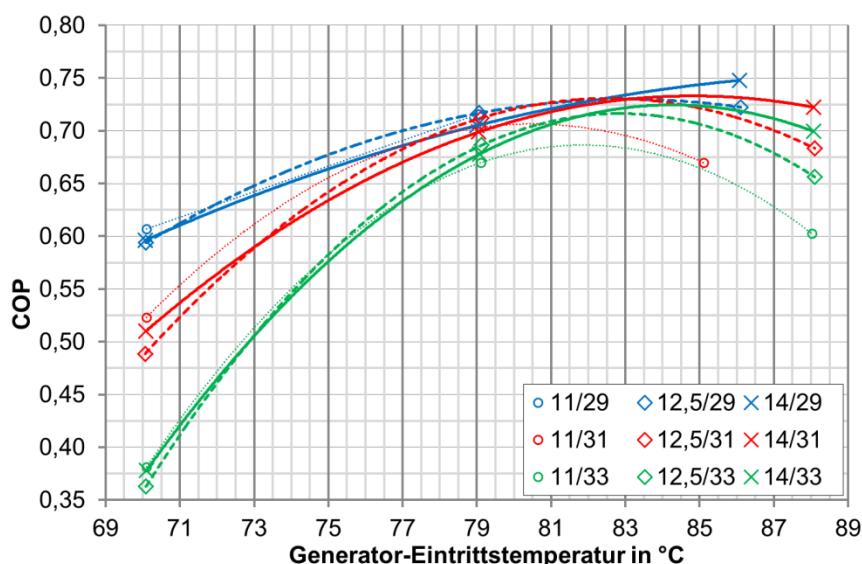


Abbildung 1.2 COP über der Generatoreintrittstemperatur bei verschiedenen Rückkühl- und Kältekreiseintrittstemperaturen

## 1.2 Vermessung des dynamischen Verhaltens

Das dynamische Verhalten der AKM unterliegt neben thermodynamischen Einflüssen auch der maschineninternen Regel- und Steuerungstechnik. Das Anfahrverhalten ist exemplarisch in Abbildung 1.3 dargestellt. Die Schwankungen im Heiz- und Rückkühlkreis werden durch die prüfstandseitige Regelung verursacht.

### Heizkreis (HT)

Beim Start der AKM steigt die Heizleistung zunächst stark an. Dies ist in der großen Temperaturdifferenz am Generator begründet, da die AKM beim dargestellten Versuch mit Umgebungstemperatur startet.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 5 / 43

### Kältekreis (NT)

Die Kälteleistung setzt mit einem zeitlichen Verzug zum Start der AKM (Anstieg Heizleistung) ein. Beim Start der AKM befindet sich zunächst hauptsächlich reiche Lösung in der Maschine. Erst wenn der Generator die Siedetemperatur erreicht und genügend Kühlmittel ausgetrieben und anschließend vom Kondensator verflüssigt wurde, kann Kälteleistung am Verdampfer erzeugt werden. Die Dauer der Totzeit ist von der inneren Maschinentemperatur und den Eingangstemperaturen im HT- und MT-Kreis abhängig.

### Rückkühlkreis (MT)

Im stationären Betrieb gilt ohne die Berücksichtigung von Verlusten: Die Summe aus Heiz- und Kälteleistung ergibt die Rückkühlleistung. Im dynamischen Betriebsverhalten ist dies nicht anwendbar. Ein großer Teil der Heizleistung dient anfänglich, bis die Siedetemperatur erreicht wird, der Erwärmung des Generators und wird somit nicht über den Rückkühlkreis abgeführt.

Diese Erkenntnisse fließen in die Verbesserung des instationären Verhaltens des AKM-Simulationsmodells ein.

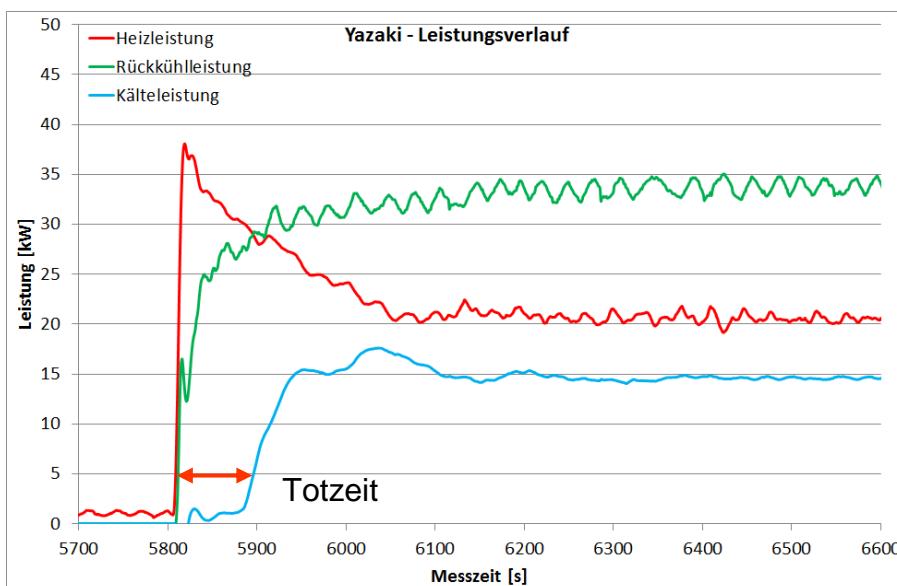


Abbildung 1.3 Exemplarischer Verlauf des dynamischen Anfahrverhaltens der Yazaki WFC-SC 05

### Zeitverzögertes Einsetzen der Kälteleistung

Eine Abbildung der Totzeit im Simulationsmodell könnte über vier Wege erreicht werden:

1. Abbildung des gesamten thermodynamischen Prozesses der AKM in der Simulation
2. Mittels der Berechnung der treibenden Temperaturdifferenz  $\Delta\Delta t$
3. Über eine thermische Trägheit, die eine Totzeit in Abhängigkeit der mittleren AKM-Temperatur angibt
4. über eine empirische Funktion auf Basis einiger Versuche

Eine Abbildung des gesamten thermodynamischen Prozesses stellt eine enorme Herausforderung dar. Eine AKM mit Verdampfer, Kondensator, Absorber und Generator sowie Lösungsmittel LiBr und dem Phasenwechsel des Wassers sowie deren Interaktion ist nur unter großem Zeit- und Arbeitsaufwand zu verwirklichen und ist in diesem Fall nicht zielführend.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 6 / 43

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung der so genannten Charakteristischen Gleichung ( $\Delta\Delta T$  – Gleichung), die das Prinzip der treibenden Temperaturdifferenz nutzt. In der Regel weist die Charakteristische Gleichung einen negativen Y-Achsenabschnitt auf, d.h. es wird erst Kälteleistung produziert, wenn die treibende Temperaturdifferenz einen gewissen Wert erreicht hat. Dieser Effekt könnte eine Totzeit abbilden. Die charakteristische Gleichung wird aber aus stationären Betriebsdaten gewonnen. Es ist fraglich ob es auch auf den dynamischen Betrieb zutrifft. Dieses Verfahren ist zwar deutlich einfacher als die Abbildung der Prozesse, ist allerdings in diesem Fall auch mit hohen Ungenauigkeiten behaftet. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, war die Ermittlung der Koeffizienten der  $\Delta\Delta T$  – Gleichung nicht erfolgreich.

Alternativ zu den bisher genannten Möglichkeiten bietet sich die Simulation einer thermischen Trägheit an. Durch geeignete Wahl einer thermischen Masse ließe sich eventuell eine Funktion finden, mit der die Totzeit in Abhängigkeit der mittleren Temperatur der AKM oder der Stillstandzeit angegeben werden kann.

Die letzte Möglichkeit besteht in der empirischen Auswertung einiger Versuche zum dynamischen Anfahrverhalten. Hierbei werden Temperaturen, Leistungen und Energien an der AKM betrachtet und versucht, diese mit der Totzeit der Kälteleistung in Zusammenhang zu bringen. Dabei sind folgende Ansätze untersucht worden:

1. Zeitpunkt bei dem MT-Leistung = HT-Leistung ist, sobald MT-Leistung > HT-Leistung, muss spätestens Kälteleistung erzeugt werden
2. Energiemenge in HT und/oder MT bis Kälteleistung eintritt
3. Mittlere AKM-Temperatur bei Start der AKM
4. Mittlere HT-Temperatur bei Start der AKM

Aus diesen Möglichkeiten, die Totzeit annähernd aus den äußeren Parametern an der AKM zu bestimmen, erwies sich die mittlere HT-Temperatur bei Start der AKM als die beste. Abbildung 1.4 zeigt die Totzeit der ausgewerteten Versuche in Abhängigkeit von der mittleren HT-Temperatur. Ebenfalls ist dort eine empirische Regressionsfunktion zur Berechnung der Totzeit eingetragen.

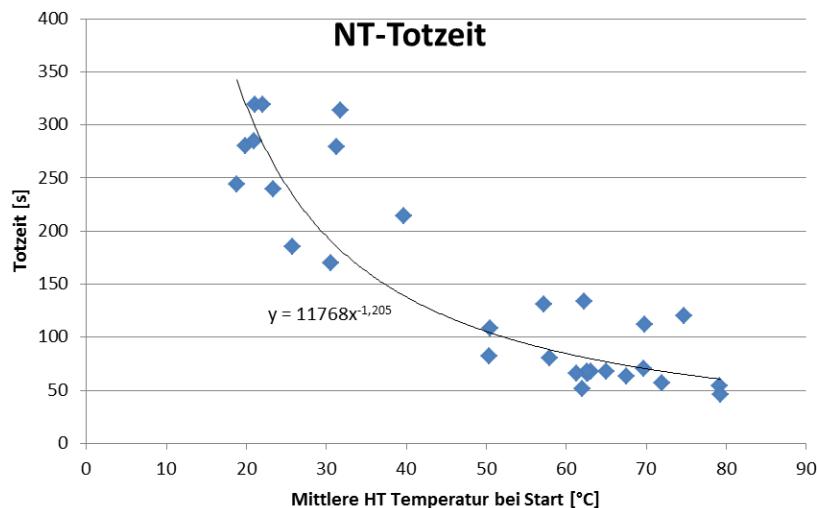


Abbildung 1.4 Totzeit in Abhängigkeit von der mittleren HT-Temperatur

Die Regressionsfunktion lautet:

$$\text{Totzeit}_{NT} = 11768 \cdot (\bar{T}_{HT})^{-1,205} \quad (1.1)$$

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 7 / 43

## 2 Description of the model / Beschreibung des Modells

### 2.1 Beschreibung des AKM-Modells

Das neue AKM-Modell basiert auf dem ersten AKM-Modell von Rada Radosavljevic, welches in ihrer Modelldokumentation (Radosavljevic, 2010) beschrieben ist. Die oberste Ebene entspricht der Abbildung 2.1 und ist an das Modell von Frau Radosavljevic angelehnt.

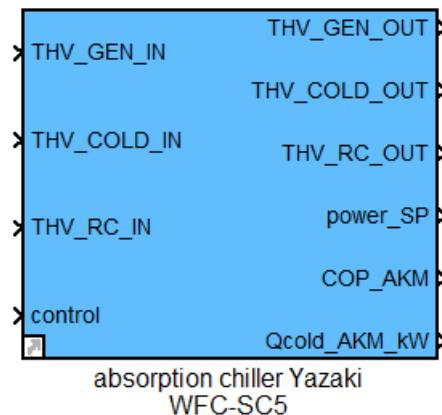


Abbildung 2.1 AKM-Modellblock (oberste Ebene)

Für weitere Informationen zu den Ein- und Ausgängen sei hier auf die Dokumentation von Frau Radosavljevic verwiesen. Die nächste Ebene ist ebenfalls grundlegend an dem vorherigen Modell angelehnt, allerdings mit einigen Änderungen.

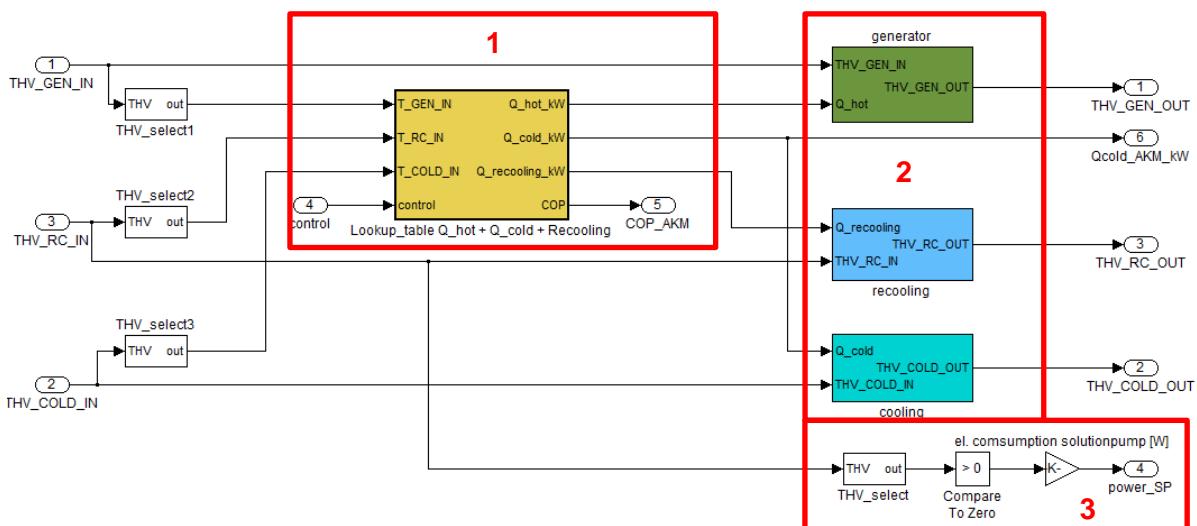


Abbildung 2.2 AKM-Modellblock (zweite Ebene)

Die in Abbildung 2.2 markierten Bereiche werden in dieser Dokumentation detailliert behandelt. Dabei handelt es sich um folgende Teilbereiche des Modells:

1. Kennfeldmodell: Berechnung der Leistungen, des COP und der Kälteleistungstotzeit
2. Heiz-, Rückkühl- und Kältekreisblöcke: Berechnung der Austrittstemperatur der AKM im jeweiligen Kreis
3. Lösungsmittelpumpe: Stromverbrauch der Lösungsmittelpumpe

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 8 / 43

### 2.1.1 Kennfeldmodell

In diesem Modellblock finden die Berechnung der stationären Heiz-, Rückkühl- und Kälteleistung sowie die Abbildung des dynamischen Verhaltens statt. Abbildung 2.3 zeigt die Verschaltung innerhalb des Blocks.

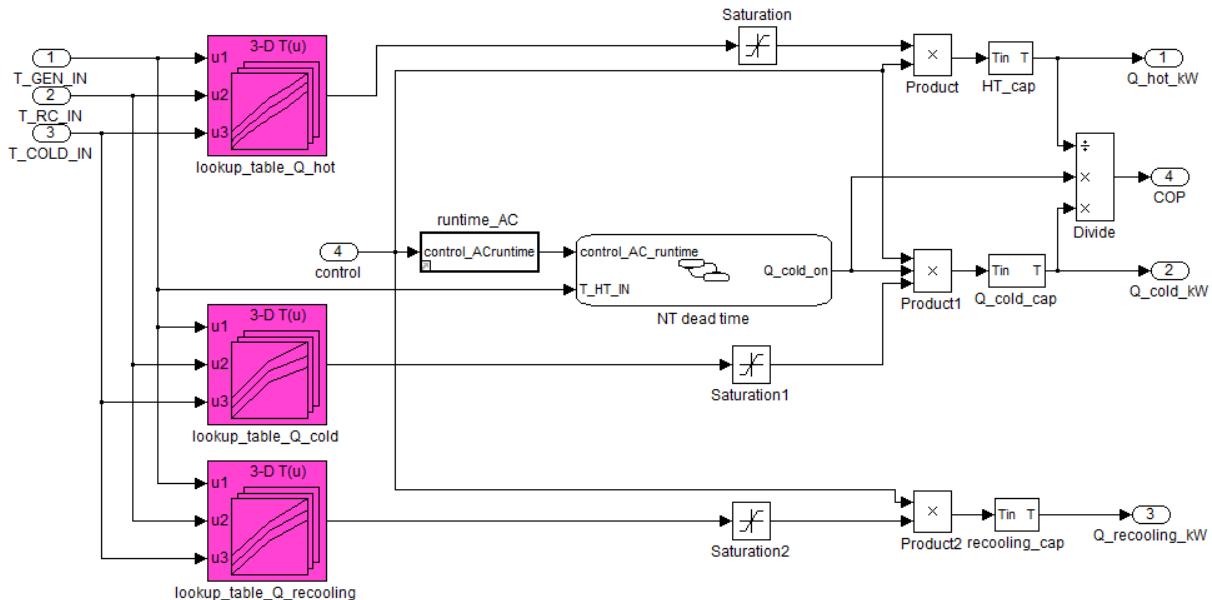


Abbildung 2.3 Block „Lookup\_table Q\_hot + Q\_cold + Recooling“

Die Beschreibung der Funktionsweise beginnt links, bei den Eingängen, und endet rechts bei den Ausgängen. Die Eintrittstemperaturen der drei Kreise sind als Eingänge definiert. Diese gehen in die drei *Lookup\_tables* der Kennfelder ein. Für weitere Informationen zu den Kennfeldern bzw. der Funktionsweise des *Lookup\_table* sei hier auf Kapitel 2.2.1 verwiesen. Die berechneten Leistungen werden anschließend von einem *Saturation*-Block begrenzt, so dass keine negativen Leistungen entstehen können. Als nächster Schritt wird diese Leistung dann mit dem *control* Signal multipliziert, wenn die AKM ausgeschaltet ist, dann wird die Leistung zu Null. Der letzte Block, der *capacity*-Block, prägt der stationären Leistung eine Dynamik auf. Näheres zur Dynamik unter Kapitel 2.1. Die Auswertung mehrerer Versuche an der realen AKM zum dynamischen Verhalten ergab für folgende NTU-Werte die beste Übereinstimmung.

Tabelle 2.1 NTU-Wert des capacity-Blocks

Kreis	NTU-Wert (k·A)/(m·cp)
HT	0,0464
MT	0,0096
NT	0,0191

Neben dem dynamischen Verhalten der einzelnen Leistungen findet eine Abbildung der Kälteleistungstotzeit statt. An der realen Maschine setzt die Kälteleistung zeitverzögert zur Heizleistung bzw. zum Einschaltvorgang ein. Aus der oben genannten Untersuchung des dynamischen Verhaltens der realen AKM stellte sich ein Zusammenhang zwischen der Generatoreintrittstemperatur und der Totzeit heraus. Näheres dazu unter Kapitel 1.2. Die Abbildung dieser Totzeit geschieht mittels Stateflow. Das Stateflow-Chart „NT dead time“ hat die Eingänge: „control\_AC\_runtime“ und „T\_HT\_IN“ und generiert das Ausgangssignal

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 9 / 43

„Q\_cold\_on“. Zusätzlich wird noch die interne Variable „NT\_dead\_time“ verwendet. Diese wird nach Formel ( 2.1 ) aus der HT-Eingangstemperatur berechnet.

$$NT_{Totzeit} = 11768 \cdot T_{HT\_IN}^{-1,205} \quad (2.1)$$

Abbildung 2.4 zeigt das Stateflow-Chart.

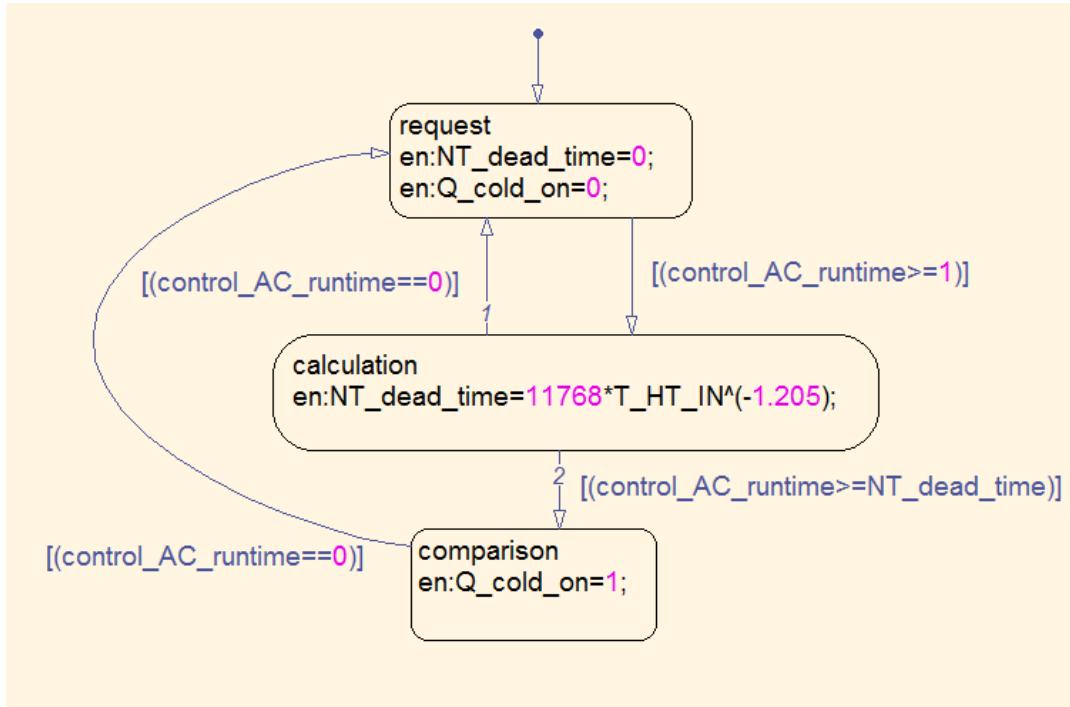


Abbildung 2.4 Stateflow-Chart zur Berechnung der Kälteleistungstotzeit

Im State „request“ werden die Variablen *NT\_dead\_time* und *Q\_cold\_on* initialisiert und mit dem Wert Null belegt. Sobald die Laufzeit der AKM „control\_AC\_runtime“ den Wert 1 oder größer annimmt, wird das State „calculation“ aktiv. Dort findet die Berechnung der Totzeit mittels der oben dargestellten Gleichung statt. Dies geschieht nur einmal, bei Aktivierung des States. Sobald die AKM-Laufzeit größer oder gleich der Totzeit „NT\_dead\_time“ ist, wird *Q\_cold\_on* im State „comparison“ mit dem Wert 1 belegt. Dies kennzeichnet den Zeitpunkt zum Einsetzen der Kälteleistung. Wenn die Laufzeit auf Null zurückgeht, was effektiv dem Ausschalten der AKM entspricht, so springt das System zurück zum State „request“ und die Werte werden zurückgesetzt.

Als weitere wichtige Größe ist der COP zu berechnen. Dieser ist der Quotient aus Kälteleistung zu Heizleistung. Da es wegen der Kälteleistungstotzeit und der Pumpennachlaufzeit zu unrealistischen COPs kommen kann, ist die Berechnung an das Signal *Q\_cold\_on* gekoppelt. Dies fungiert als Steuersignal und gewährleistet eine plausible Berechnung des COP außerhalb der Totzeit und Nachlaufzeit.

### 2.1.2 Heiz-, Rückkühl- und Kältekreisblock

Diese Blöcke dienen der Berechnung der Austrittstemperaturen aus den berechneten Leistungen. Neben dieser Berechnung bildet ein pipe-Block die Strecke und somit die Zeitverzögerung zwischen Ein- und Austritt der Wärmeübertrager an der realen AKM ab. Bei allen Kreisen ist die Vorgehensweise gleich, weshalb hier nur der Generator-Block gezeigt wird.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 10 / 43

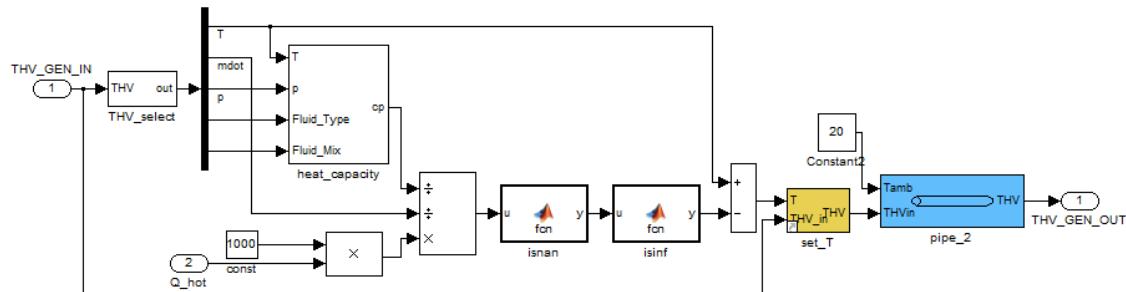


Abbildung 2.5 Generator-Block

Der Eingang ist der Eingangs-THV der AKM. Mittels Heizleistung (*Q\_hot*), Wärmekapazität (*heat\_capacity*) und Massenstrom (*mdot*) berechnet sich zunächst die Temperaturdifferenz. Diese durchläuft dann zwei Blöcke *isnan* und *isinf*, in denen undefinierte Werte abgefangen werden. Eine Subtraktion der Temperaturdifferenz von der Eingangstemperatur bildet die Ausgangstemperatur. Ein Block namens *set\_T* bildet aus dem alten THV und der neuen Temperatur einen neuen THV und gibt diesen weiter an das Rohrmodell (*pipe*). In diesem Rohrmodell findet ausschließlich eine Zeitverzögerung des Temperaturverlaufs statt. Hier werden weder Wärme- noch Druckverluste oder thermische Massen simuliert.

### 2.1.3 Lösungsmittelpumpe

Die elektrische Leistungsaufnahme der Lösungsmittelpumpe, welche den größten Teil des Stromverbrauchs der gesamten AKM ausmacht, ist mit 45 Watt angenommen. Als Steuersignal dient hier der Massenstrom des Rückkühlkreises. Sobald Massenstrom vorhanden ist, startet auch die Lösungsmittelpumpe. Dies ist nicht ganz korrekt, bildet aber den besten Kompromiss zwischen Machbarkeit und Anpassung an die Realität.

## 2.2 Einbindung des stationären Kennfelds unter MATLAB/Simulink

Die Leistungen und der COP der AKM wurden an 27 stationären Betriebspunkten in einem 3-stufigen Raster in Abhängigkeit der drei Eintrittstemperaturen im HT-, MT- und NT-Kreis bestimmt (siehe Tabelle 1.1, Abbildung 1.1 und Abbildung 1.2).

### 2.2.1 Grundlagen des n-D Lookup Table

Zur Einbindung eines Kennfeldes unter MATLAB/Simulink bietet sich das Modell „n-D Lookup Table“ an. Mit diesem Modell ist es möglich ein zwei- bis fünfdimensionales Kennfeld durch verschiedene Algorithmen zu inter- und/oder extrapoliieren. Dabei stehen für die Inter- als auch für die Extrapolation folgende Algorithmen zur Verfügung (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2 Algorithmus unter Lookup-Table

Algorithmus	Beschreibung
Flat	Keine Interpolation, auf nächste Stützstelle gerundet
Linear	Lineare Interpolation
Cubic spline	Kubischer Spline (Polygonzug 3. Grades)

Abbildung 2.6 zeigt den Block und Abbildung 2.7 die Maske zur Eingabe der so genannten Breakpoints (Stützstellen).

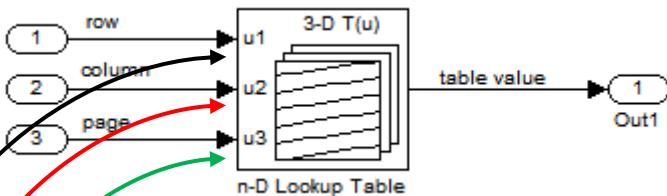


Abbildung 2.6 3-D Lookup Table Block

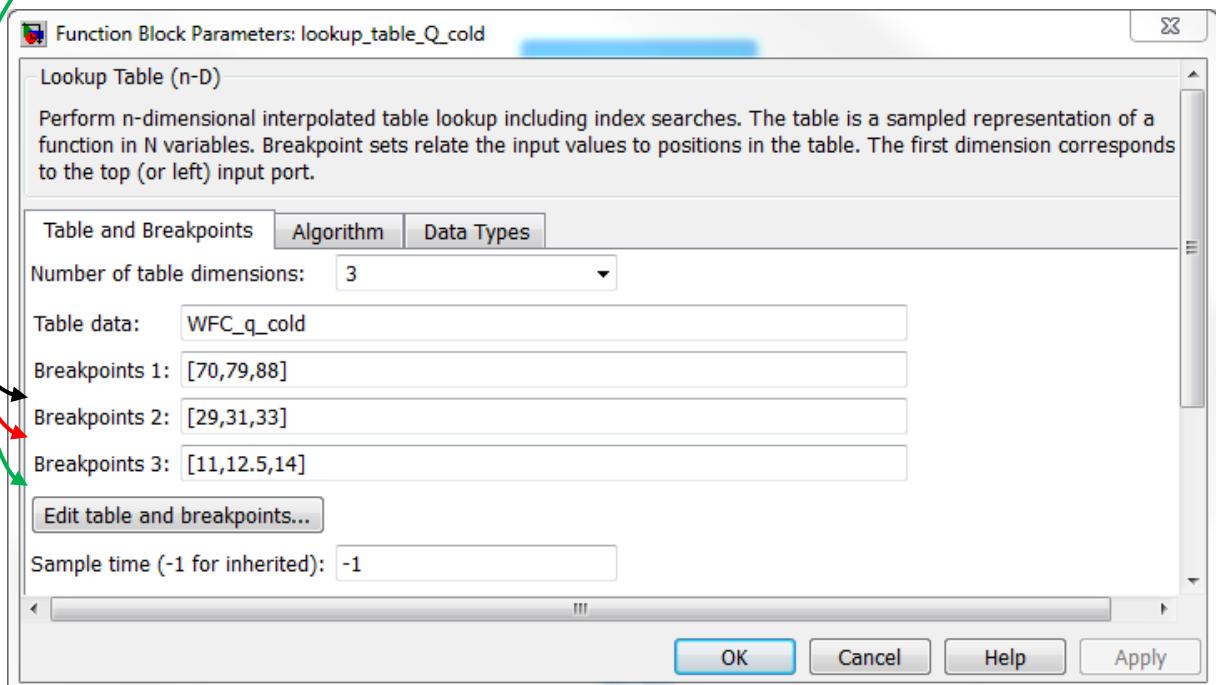


Abbildung 2.7 Lookup Table Maske (Breakpoints) in MATLAB R2012a

Unter „Number of table dimensions“ ist die Anzahl der unabhängigen Variablen einzustellen. In diesem Fall drei, da die Kälteleistung bzw. COP von den drei Eintrittstemperaturen an der AKM abhängen. Somit muss der Array unter „Table data“ ebenfalls dreidimensional sein. In diesem Array sind die Werte der abhängigen Variablen, Kälteleistung, COP usw., an den Breakpoints (Stützstellen) enthalten. „Breakpoints 1“ entspricht dabei die Zeile, „Breakpoints 2“ der Spalte und „Breakpoints 3“ der Seite der „Table Data“. Tabelle 2.3 soll den schematischen Aufbau am Beispiel der Kälteleistung verdeutlichen.

Tabelle 2.3 Table Data Schema

T_NT = 11 °C		T_MT in °C		
		29	31	33
T_HT in °C	70	7.0518	4.8194	2.6535
	79	14.9554	12.9172	10.4798
	88	19.0103	16.2646	13.7505

T_NT = 12,5 °C		T_MT in °C		
		29	31	33
T_HT in °C	70	6.9020	4.5335	2.5632
	79	15.2853	13.3591	11.0985
	88	20.4077	17.7405	15.4332

T_NT = 14 °C		T_MT in °C		
		29	31	33
T_HT in °C	70	6.9392	4.7540	2.7026
	79	15.1023	13.2369	11.1977
	88	22.6100	19.5844	17.0729

Als „Breakpoints 1“ dient die Generatorenreintrittstemperatur (T<sub>HT</sub>), „Breakpoints 2“ die Absorber-/Kondensatoreintrittstemperatur (T<sub>MT</sub>) und „Breakpoints 3“ die Verdampfereintrittstemperatur (T<sub>NT</sub>). Aus diesem Schema wird ersichtlich, dass zu jedem Temperaturtripel ein entsprechender Wert vorhanden sein muss. Neben dieser Bedingung muss das Kennfeld unikonform sein. Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen den Stützstellen innerhalb eines Breakpoints gleich sein muss. Im Falle von T<sub>HT</sub> sind die Stützstellen mit 70, 79 und 88 °C gegeben, was einem konstanten Abstand von 9 K entspricht. Analog dazu ist der Abstand bei T<sub>MT</sub> 2 K und T<sub>NT</sub> 1,5 K. Diese speziellen Voraussetzungen an das Kennfeld führen später zwangsläufig zu einer Anpassung des Kennfeldes. Unter dem Reiter „Algorithm“ der Lookup Table-Maske wird die Inter-/Extrapolationsart eingestellt.

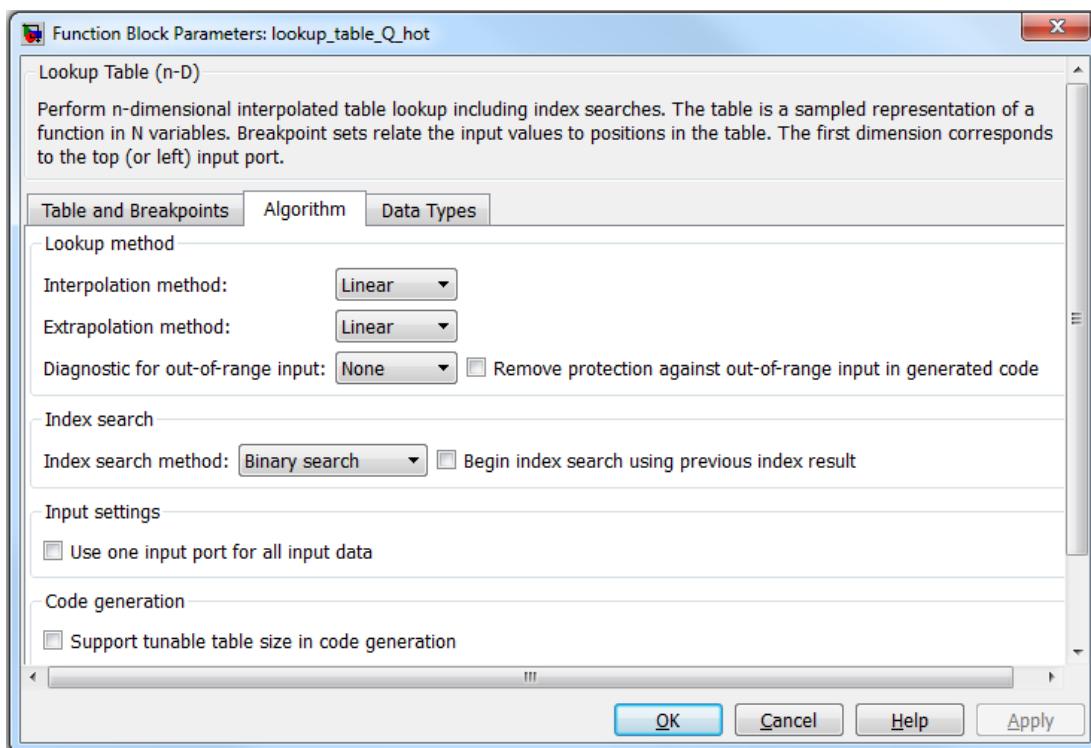


Abbildung 2.8 Maske "Algorithm" in der Lookup Table-Maske

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 13 / 43

Der Algorithmus kann für die Inter- und Extrapolation getrennt eingestellt werden. Außerdem werden hier weitere Einstellungen zum Verhalten des Blocks angepasst, z.B. Einstellungen wie das Verhalten bei Verlassen des Kennfeldes oder in welcher Form die Eingangsdaten vorliegen. Im Reiter „Data Types“ sind weitere Einstellungen zu den Datentypen der Eingangsparameter und des Kennfeldes möglich.

## 2.2.2 Kennfeldanpassung

Der Lookup Table setzt spezielle Anforderungen, wie ein unikonformes Gitter, an das zu verwendende Kennfeld. Das gemessene Kennfeld entspricht diesen Anforderungen nicht, da einzelne Versuchspunkte nicht wie vorgesehen vermessen werden konnten. Diese sind nun aus der Extrapolation der anderen Daten zu ermitteln. Die Vorgehensweise dabei wird in diesem Kapitel aufgezeigt.

### 2.2.2.1 Kälteleistung

Die Kälteleistung besitzt qualitativ betrachtet einen linearen Verlauf in Abhängigkeit der HT-Temperatur. Dies bestätigten auch zwei weitere Versuche bei 75/33/11 und 83/33/11 (T<sub>HT</sub>/T<sub>MT</sub>/T<sub>NT</sub>). Auf Basis dieser Erkenntnis fand die Inter-/Extrapolation der Kälteleistung mit einem linearen Ansatz statt.

Einer der bereits angesprochenen, fehlenden Versuchspunkte liegt bei 88/29/11. Ein erster Wert für diesen fehlenden Versuchspunkt wurde zunächst durch eine lineare Interpolation aller drei Richtungen  $\{(70\dots79/29/11);(88/31\dots33/11);(88/29/12,5\dots14)\}$  ermittelt. Anschließend wurde der neue qualitative Verlauf der Kälteleistung (70\dots88/29/11) geprüft und weiter manuell angepasst bis die Anpassung qualitativ stimmte.

Daneben kam es an drei weiteren Versuchspunkten wegen zu geringer Heizleistung prüfstandseitig zu Abweichungen vom geplanten Kennfeld. An diesen Punkten weicht die HT-Temperatur mit 85 bis 86 °C zwischen 2 bis 3 K vom Sollwert (88 °C) ab. In diesem Fall fand die Extrapolation nur über die HT-Temperatur statt, da der Messwert bei 85 bzw. 86 °C in jedem Fall auf dem neu entstandenen Verlauf liegen sollte.

Zur Nutzung mittels Lookup Table müssen die Daten exakt an den eingetragenen (in der Maske unter Breakpoints) Stützstellen liegen. Im Falle der Kälteleistung sind die Stützstellen in Tabelle 1.1 dargestellt. Aufgrund von Mess- und Regelungsabweichungen erreichen die Einstellungen am Prüfstand diese Werte nie exakt, wodurch eine Inter- bzw. Extrapolation nahezu aller Versuchspunkte notwendig ist. Durch die sehr geringen Temperaturabweichungen, maximal 0,12 K, entstehen aber nur Fehler im vernachlässigbar kleinen Bereich.

Das aus der Anpassung resultierende Kennfeld ist im Anhang enthalten. Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10 enthalten das Kennfeld der Kälteleistung. Die gestrichelten Linien kennzeichnen den qualitativen Verlauf der Messwerte, die durchgezogenen die der Interpolation, wobei die Unterschiede sehr gering sind. Messwerte sind durch Kreuze und Rauten, Interpolationswerte durch die orangefarbenen Punkte dargestellt.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 14 / 43

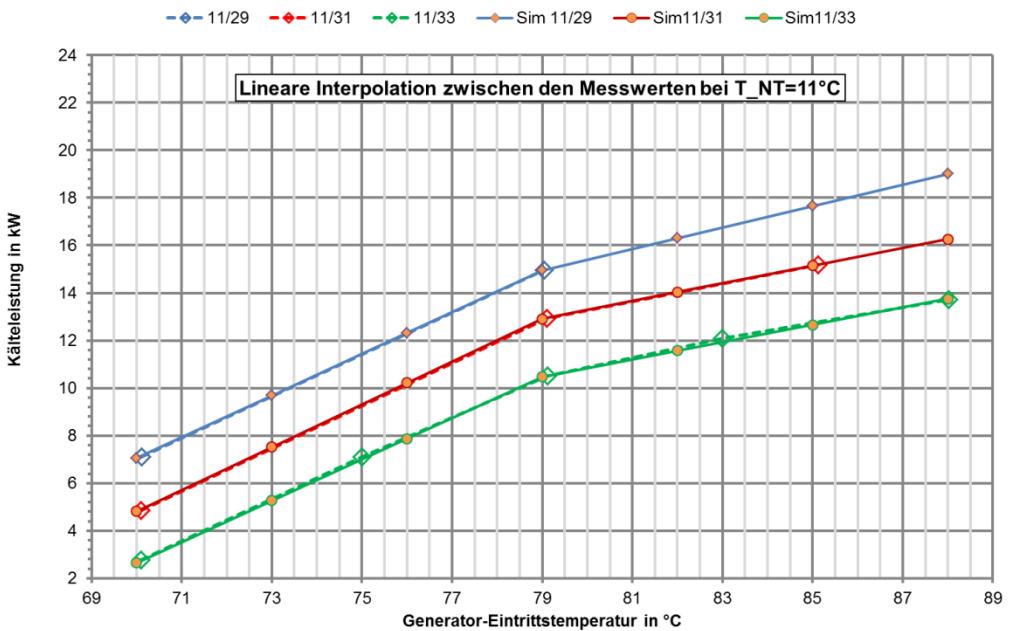


Abbildung 2.9 Kennfeld der Kälteleistung mit interpolierten Werten bei  $T_{NT}=11^{\circ}\text{C}$

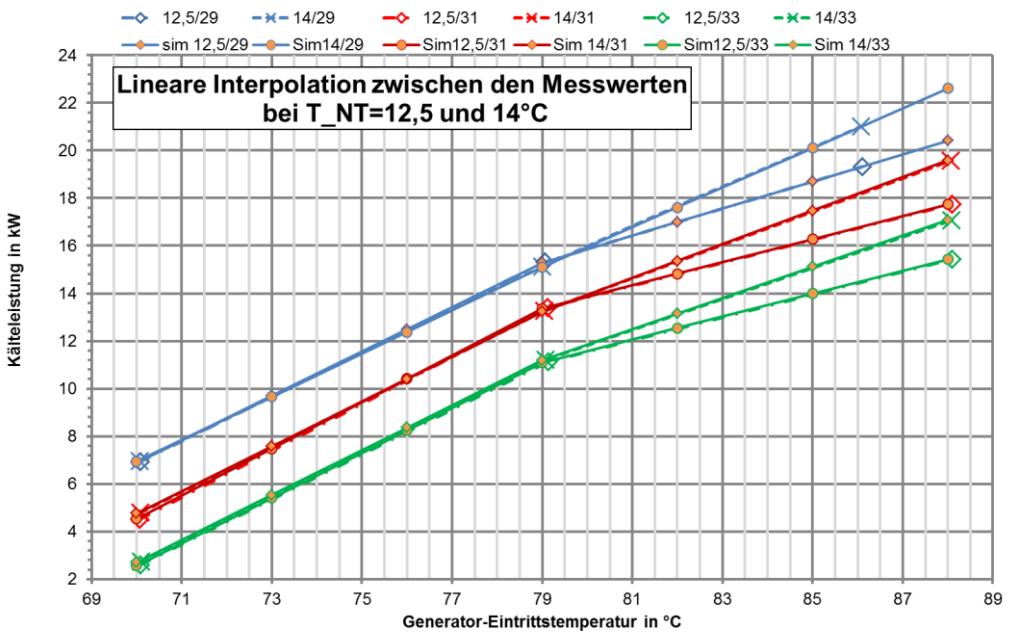


Abbildung 2.10 Kennfeld der Kälteleistung mit interpolierten Werten bei  $T_{NT}=12,5$  und  $14^{\circ}\text{C}$

### 2.2.2.2 Rückkühlleistung

Beim idealisierten System entspricht die Rückkühlleistung der Summe aus Heiz- und Kälteleistung. In der Realität treten Wärmeverluste auf, die zu einer geringeren abzuführenden Rückkühlleistung führen. Eine Abbildung der Wärmeverluste bzw. Verlustleistung in Abhängigkeit der AKM-Temperaturen oder Leistungen führte nicht zum Ziel einer zufriedenstellenden Korrelation. Somit bildet ein Kennfeld auch die Rückkühlleistung ab.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 15 / 43

Bei der Auftragung der Rückkühlleistung aus den Versuchspunkten zeigte sich ein linearer Verlauf. Die Vorgehensweise bei der Anpassung des Kennfeldes ist analog zur Kälteleistung. Der Anhang enthält das Kennfeld in Tabellenform (siehe A) und Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12 zeigen das Kennfeld in Form von Grafiken.

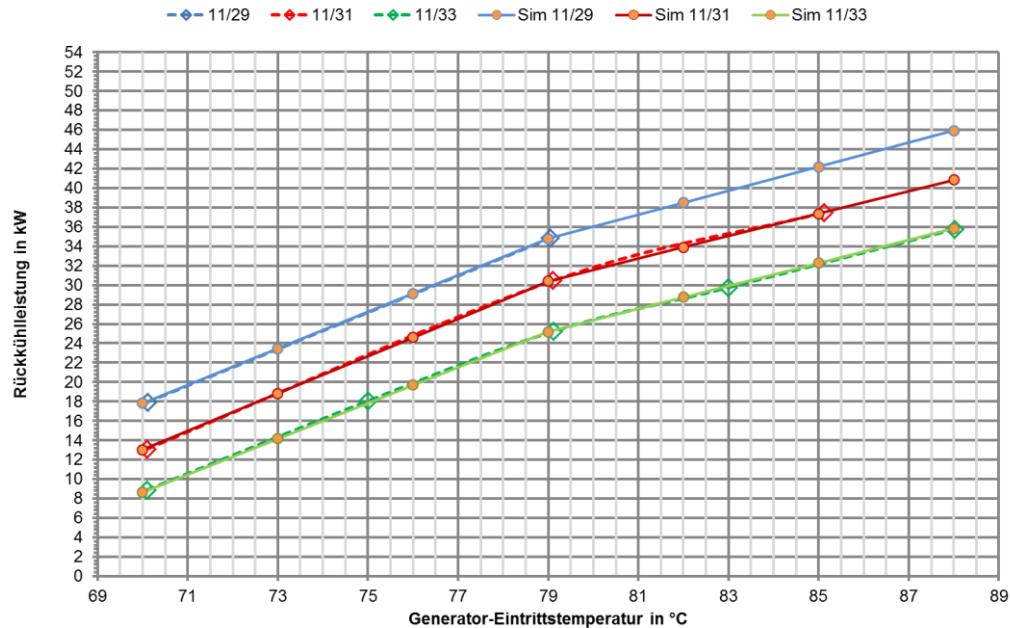


Abbildung 2.11 Kennfeld der Rückkühlleistung mit interpolierten Werten bei  $T_{NT}=11^\circ\text{C}$

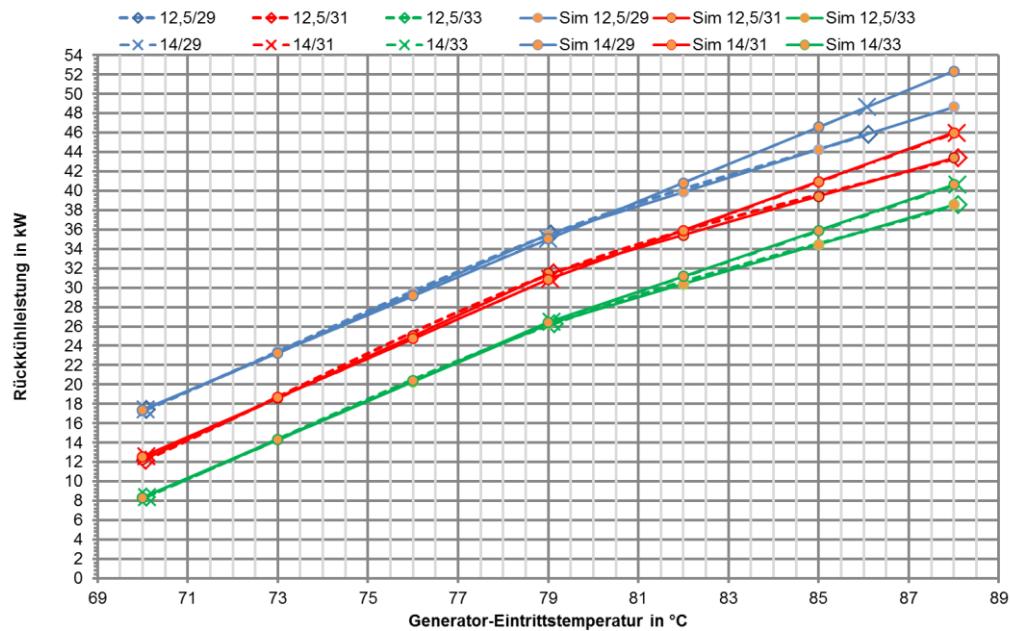


Abbildung 2.12 Kennfeld der Rückkühlleistung mit interpolierten Werten bei  $T_{NT}=12,5$  und  $14^\circ\text{C}$

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 16 / 43

### 2.2.2.3 COP und Heizleistung

Wie in Abbildung 1.2 ersichtlich, zeigt der COP einen deutlich nicht-linearen Verlauf. Aus den zusätzlichen Versuchen bei 75/33/11 und 83/33/11 ergibt sich qualitativ ein eher quadratischer Verlauf bis 79 °C und von 79 bis 88 °C ein annähernd linearer Verlauf. Vor Ermittlung des qualitativen Verlaufs durch die zusätzlichen Versuche kamen zwei Vorgehensweisen zum Einsatz, um den COP anzunähern. Einerseits fand eine Interpolation des gemessenen COP mittels eines kubischen Spline statt, andererseits wurde die gemessene Heizleistung mittels kubischem Spline interpoliert und aus dieser Heizleistung und der Kälteleistung der COP ermittelt. Beide Varianten führten für sich genommen zu einer schlechten Anpassung, wie die zusätzlichen Versuche zeigten. Abbildung 2.13 zeigt die Interpolation des COP, Abbildung 2.14 den COP berechnet aus der interpolierten Heizleistung.

Als Orientierungshilfe dienen die grünen Linien, wobei die gestrichelte Linie die Messwerte inklusive der zusätzlichen Versuche bei 75/33/11 und 83/33/11 repräsentiert. Im Bereich zwischen 70 und 79 °C bildet die Interpolation des COP den qualitativen Verlauf gut ab. Zwischen 79 und 88 °C nicht. Dort existiert bei 83 °C eine große Abweichung zwischen Interpolation- und Messwert. Anders bei der Ermittlung des COP über die interpolierte Heizleistung: In diesem Fall kommt es zu einer schlechten qualitativen Anpassung zwischen 70 und 79 °C aber zu einer sehr guten zwischen 79 und 88 °C.

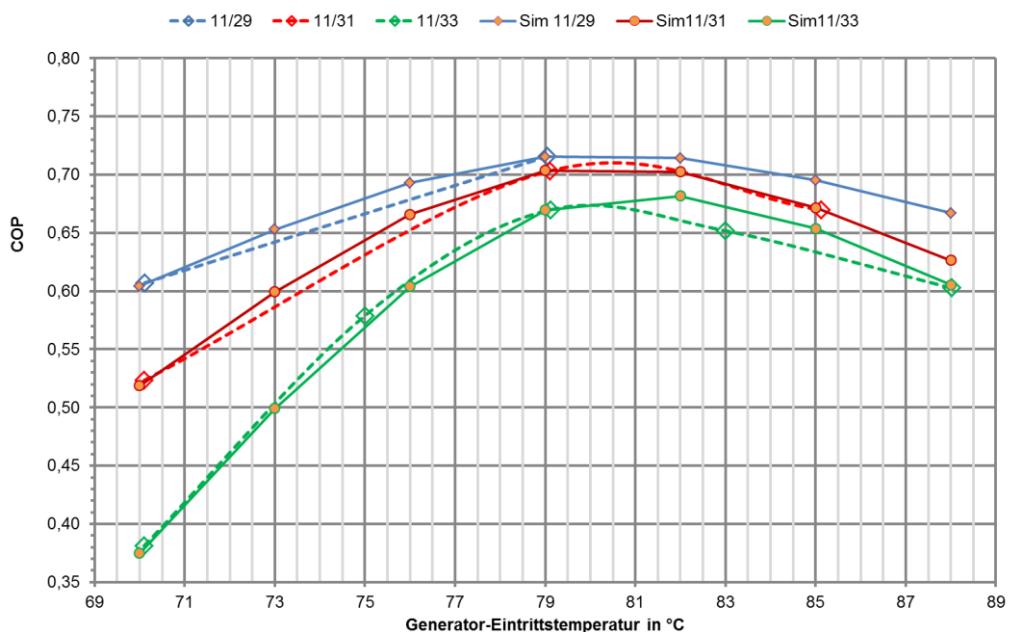


Abbildung 2.13 gemessener und Interpolierter COP bei T\_NT = 11°C

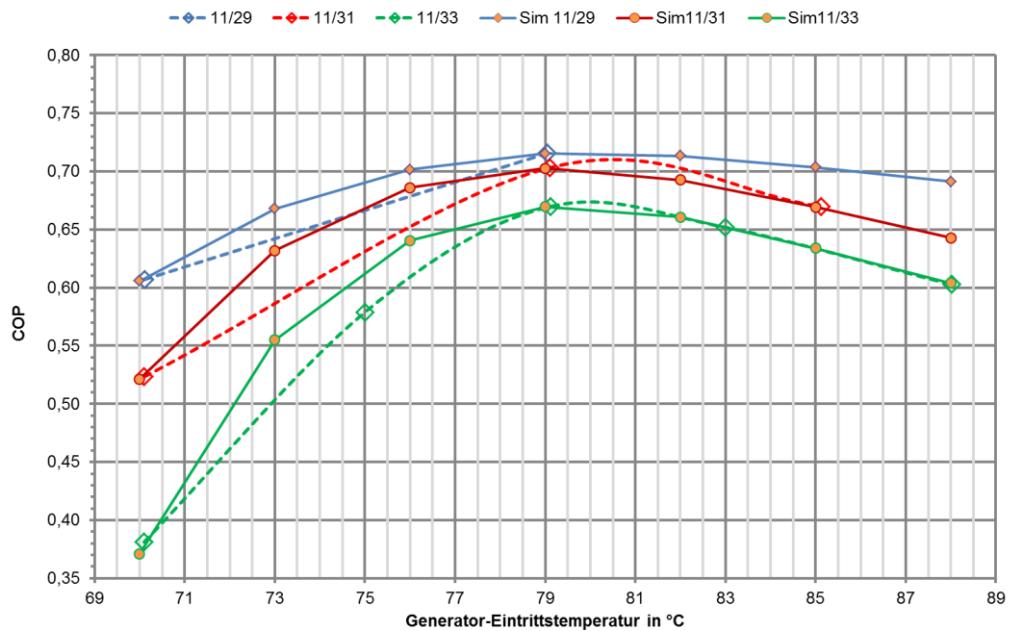


Abbildung 2.14 gemessener und aus interpolierter Heizleistung berechneter COP bei T\_NT=11 °C

Resultierend aus diesen Erkenntnissen beinhaltet das neue Kennfeld eine Kombination aus beiden Varianten. Daraus entstand ein neues Kennfeld aus den interpolierten Daten (orangefarbene Punkte) der beiden Varianten (siehe Abbildung 2.15 bis Abbildung 2.17). Die Kombination beider Varianten ermöglicht eine gute qualitative Anpassung des COP. Der Anhang beinhaltet das Kennfeld in Tabellenform.

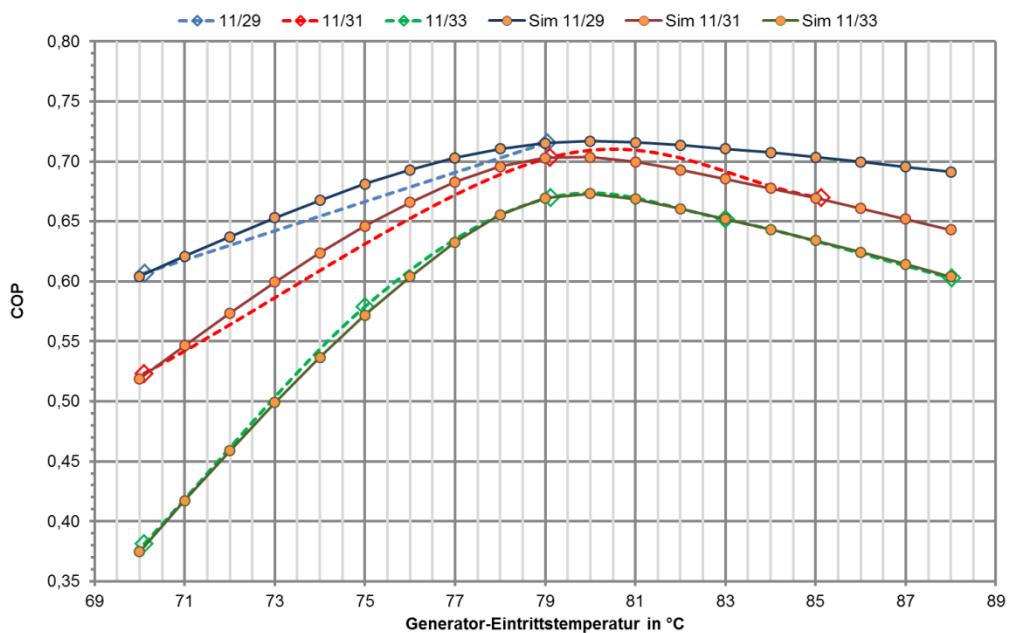


Abbildung 2.15 Kombiniertes Kennfeld vom COP bei T\_NT= 11 °C

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 18 / 43

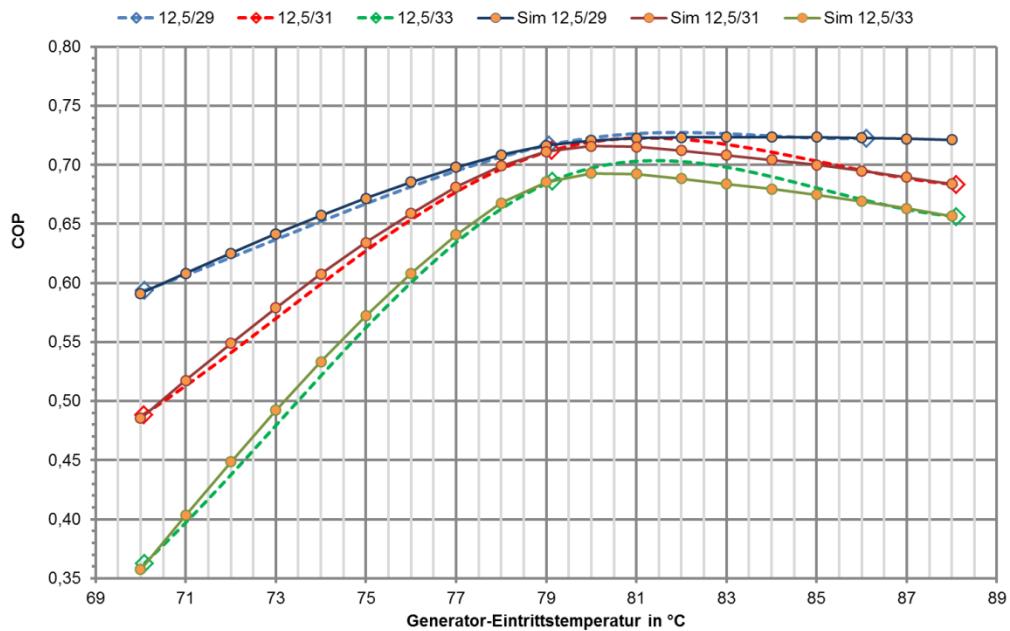


Abbildung 2.16 Kombiniertes Kennfeld vom COP bei  $T_{NT} = 12,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

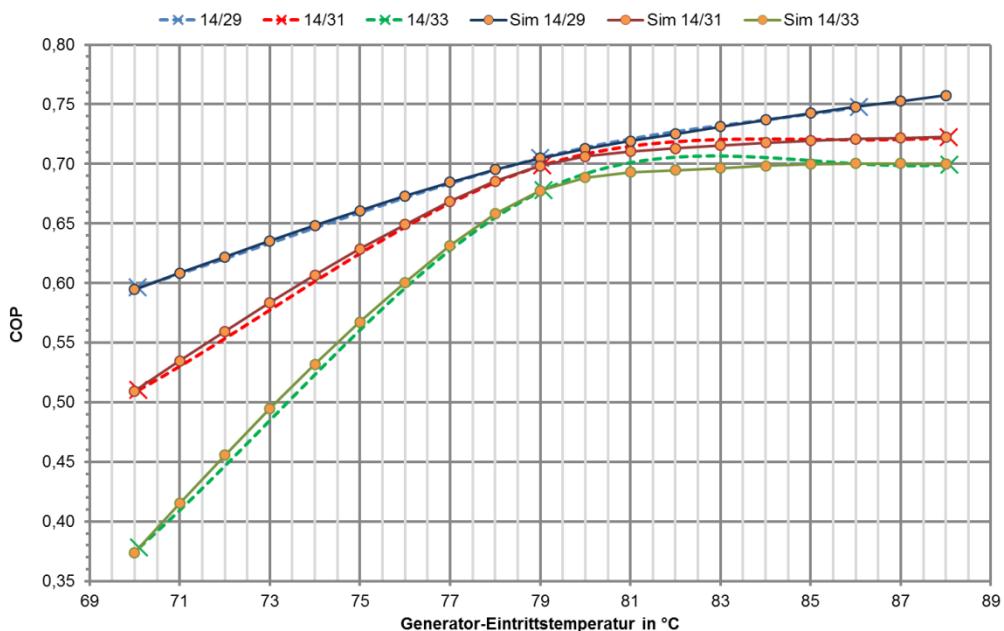


Abbildung 2.17 Kombiniertes Kennfeld vom COP bei  $T_{NT} = 14 \text{ } ^\circ\text{C}$

Aus dem COP-Kennfeld und der Kälteleistung berechnet sich die stationäre Heizleistung:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{NT}}{\dot{Q}_{HT}} \rightarrow \dot{Q}_{HT} = \frac{\dot{Q}_{NT}}{COP} \quad (2.2)$$

Dieser Zusammenhang gilt allerdings nur für den stationären Fall. Eine Umsetzung der Heizleistung über das Kennfeld des COP und der Kälteleistung verursacht Probleme bei der Abbildung der Totzeit der Kälteleistung (siehe Dokumentation zum dynamischen Anfahrverhalten der Yazaki-AKM). Beim Start der AKM setzt die Kälteleistung versetzt zur Heizleistung ein.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 19 / 43

Bei der Berechnung der Heizleistung aus COP und Kälteleistung aus ( 2.2 ) würde die Heizleistung erst beim Einsetzen der Kälteleistung beginnen, was nicht der Realität entspräche. Um dies abzubilden, ist somit ebenfalls die Abbildung der Heizleistung als eigenständiges Kennfeld notwendig. Das aus dem COP und der Kälteleistung berechnete Kennfeld der Heizleistung zeigt einen nicht-linearen Verlauf. Für die Interpolation kommt der kubische Spline zum Einsatz. Um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, sind mehr Stützstellen im Kennfeld der Heizleistung eingefügt. Dies ist nur bei der Heizleistung notwendig, da dieses Kennfeld nur aus bereits Interpolierten, angepassten Kennfeldern (Kälteleistung und COP) unterschiedlicher Interpolationsart besteht. Abbildung 2.18 und Abbildung 2.19 zeigen das Kennfeld. Zudem ist das Kennfeld im Anhang A.1 enthalten.

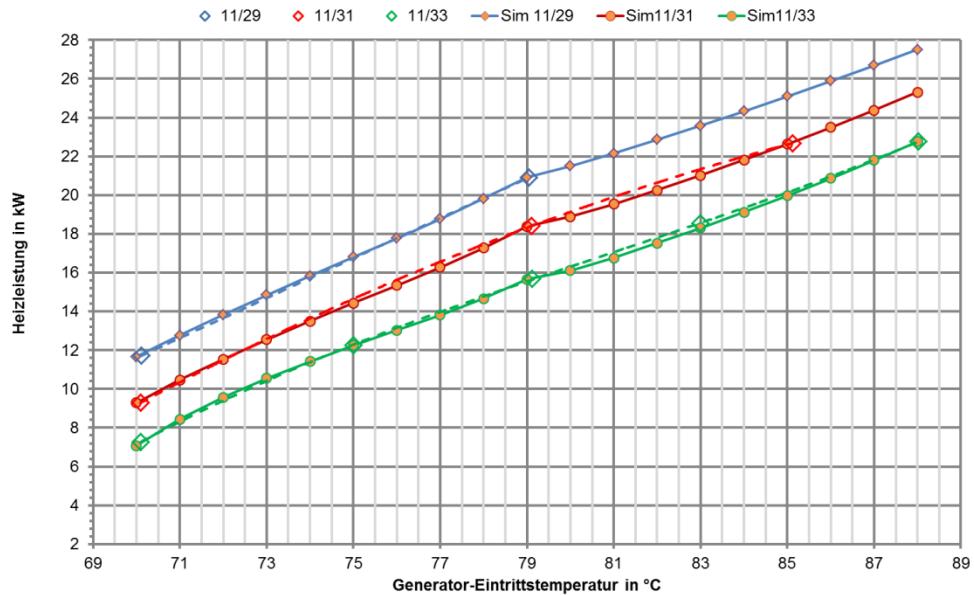


Abbildung 2.18 Kennfeld der Heizleistung, aus COP und Kälteleistung berechnet, bei  $T_{NT} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$

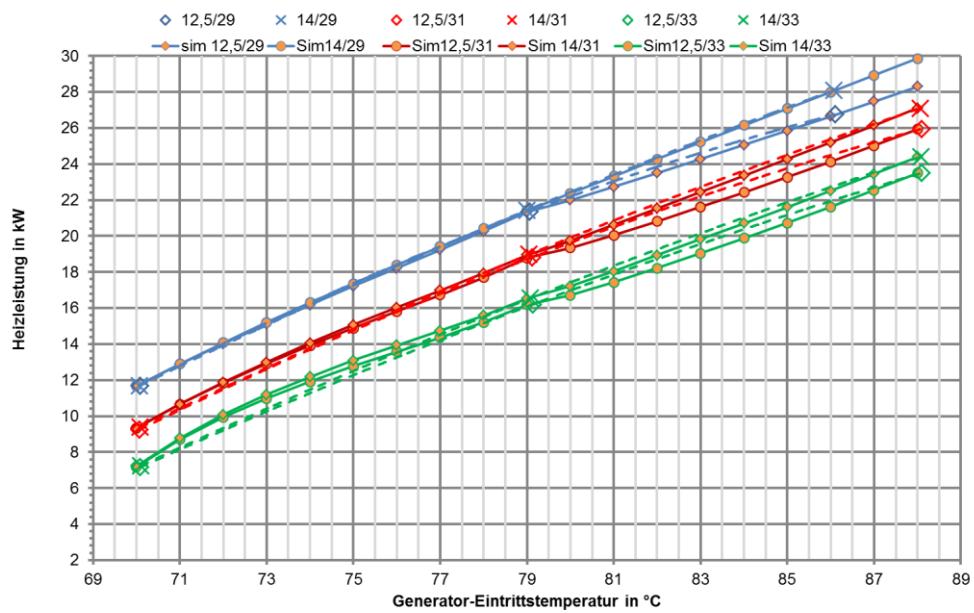


Abbildung 2.19 Kennfeld der Heizleistung, aus COP und Kälteleistung berechnet, bei  $T_{NT} = 12,5 \text{ und } 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 20 / 43

### 2.3 Abbildung des dynamischen Verhaltens

Eine Alternative zur rein mathematischen Beschreibung der Leistungsverläufe durch PT1-Glieder, wie im Modell von Frau Radosavljevic, ist die Abbildung des dynamischen Verlaufs über simulierte NTU-Werte (auch Übertragungseinheiten genannt). Zum vergleichenden Test wurde in jedem Fluidkreis ein *capacity-Block* (statt den PT1-Gliedern) im Modell eingebaut. Dessen Verhalten ist nur von einer Variablen, dem NTU-Wert ( $(k \cdot A)/(m \cdot cp)$ ), abhängig. Dieses Modell simuliert die zeitliche Temperaturänderung einer beliebigen Wärmekapazität ( $m \cdot cp$ ) mittels eines beliebigen Wärmeübertragers ( $k \cdot A$ ). Im Grunde ist es eine einfache Wärmeübertragung an die konstante Masse eines beliebigen Mediums. Beim Test wird das veränderte AKM-Modell von Frau Radosavljevic mit Eintrittsdaten aus Messungen beschickt und der NTU-Wert im Modell solange variiert, bis die Differenz zwischen den Austrittstemperaturen der Simulation und der Messwerte minimal ist. Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass eine Abbildung der Dynamik über den NTU-Wert bei der Validierung der Leistungen bessere Ergebnisse erzielt. Dabei ergaben sich für die verwendeten Versuche folgende Werte.

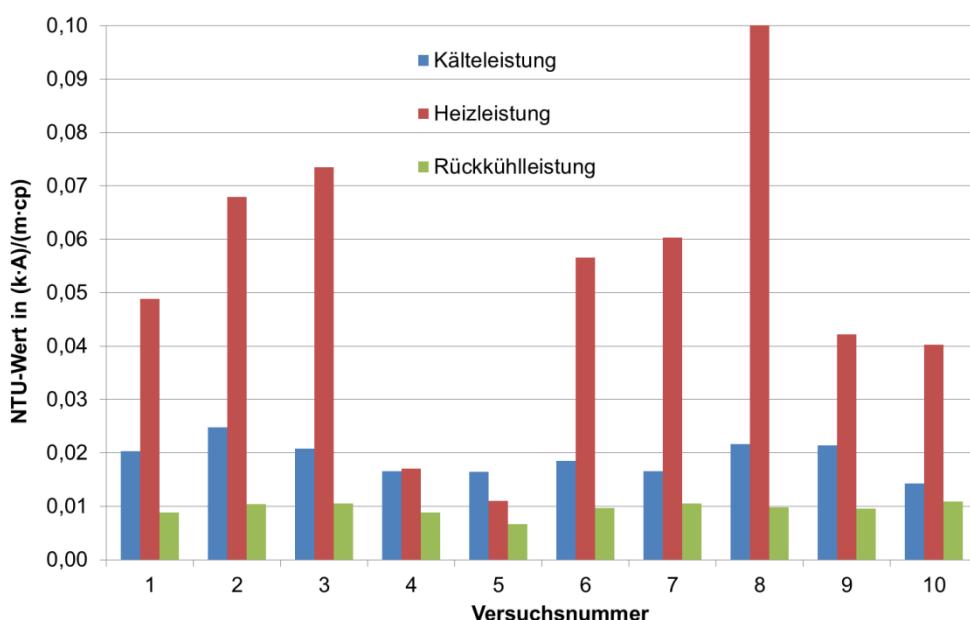


Abbildung 2.20 NTU-Wert der Heiz-, Rückkühl- und Kälteleistung der jeweiligen Versuche

Die Dynamiken der Rückkühl- und Kälteleistung zeigen gute Ergebnisse bei der Anpassung durch die NTU-Werte. Die Kapazität, bei der die beste Anpassung zwischen Simulation und Messung erzielt wird, ist bei allen Versuchen etwa gleich. Eine Abbildung der Heizleistungsdynamik ist aufgrund von prüfstandseitigen Unzulänglichkeiten bei der Heizenergieversorgung sowie dem Einfluss der Prüfstandregelung äußerst schwierig. Für die Verwendung im neuen AKM-Modell kamen die Mittelwerte der ermittelten NTU-Werte zum Einsatz. Diese sind wie folgt:

Tabelle 2.4 Mittelwerte der NTU-Werte aus den Versuchen

Kreis	NTU-Wert ( $k \cdot A)/(m \cdot cp$ )
HT	0,0464
MT	0,0096
NT	0,0191

### 3 Results / Ergebnisse

#### 3.1 Modellvalidierung

Die Validierung teilt sich in zwei Validierungsebenen auf. Zuerst geschieht eine Validierung mittels Messdaten aus der Kennfeldvermessung. Dies ermöglicht eine Überprüfung der Grundfunktionalität des Modells an bekannten Stützstellen der Kennfelder. Die zweite Ebene besteht aus der Validierung mittels Messdaten aus einem HiL-Versuch. Dadurch ist eine Prüfung der Inter- bzw. Extrapolation des Kennfeldes sowie des dynamischen und des Anfahr-verhaltens erreichbar. Für eine bessere qualitative Einordnung des neuen AKM-Modells wird das bisherige, „alte“ Modell ebenfalls dieser Prüfung unterzogen. Damit lassen sich beide Modelle direkt miteinander vergleichen.

##### 3.1.1 Relativer Fehler

Zur Quantifizierung des Validierungserfolgs, je geringer die Abweichung der Simulationsergebnisse von den Messwerten desto besser, findet eine Berechnung des relativen Fehlers in Anlehnung an (DIN EN 12977-3:2012, 2012) statt. Dabei wird für jede Leistung (Heiz-, Rückkühl- und Kälteleistung) jeweils ein relativer Fehler der mittleren übertragenen Leistung als auch für die Abweichung der gesamten Energiemenge berechnet. Die Berechnungsvorschrift für den relativen Fehler der Leistung und der Energiemenge ist wie folgt.

Berechnung des relativen Fehlers der übertragenen Energiemenge:

$$Q_{x,Mess} = \int_t P_{x,Mess} dt \quad (3.1)$$

$$Q_{x,Sim} = \int_t P_{x,Sim} dt \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{x,Q} = \frac{Q_{x,Sim} - Q_{x,Mess}}{Q_{x,Mess}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Mit

- $Q_{x,Mess}$  und  $Q_{x,Sim}$  als gemessene bzw. simulierte Energiemenge in Joule
- $P_{x,Mess}$  und  $P_{x,Sim}$  als gemessene bzw. simulierte Leistung in Watt
- $\varepsilon_{x,Q}$  als relativer Fehler der übertragenen Energiemenge in %
- Der Index x kennzeichnet den entsprechenden Fluid- bzw. Leistungskreis

Berechnung des relativen Fehlers der übertragenen Leistung:

$$\Delta P_x = |P_{x,Sim} - P_{x,Mess}| \quad (3.4)$$

$$\Delta \bar{P}_x = \frac{\int_t \Delta P_x dt}{\int_t \xi_x dt} \quad (3.5)$$

$$\bar{P}_x = \frac{\int_t |P_{x,Mess}| dt}{\int_t \xi_x dt} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{x,P} = \frac{\Delta \bar{P}_x}{\bar{P}_x} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

Mit

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 22 / 43

- $P_{x,Mess}$  und  $P_{x,Sim}$  als gemessene bzw. simulierte Leistung in Watt
- $\Delta P_x$  als Absolutwert der Differenz zwischen gemessener und simulierter Leistung in Watt
- $\bar{\Delta P}_x$  ist die mittlere Differenz der übertragenen Leistung in Watt
- $\xi_x$  fungiert als logischer Schalter mit dem Wert 1 bei Wärmeübertragung, sonst 0
- $\bar{P}_x$  ist die mittlere übertragene Leistung der Messung in Watt
- $\varepsilon_{x,P}$  als relativer Fehler der übertragenen Leistung in %
- Der Index x kennzeichnet den entsprechenden Fluid- bzw. Leistungskreis

### 3.1.2 Validierung

Zur Prüfung des neuen Modells auf Plausibilität wurde das neue Modell, und für den Vergleich auch das alte Modell, mit den Zeitverläufen der gemessenen Eintrittstemperaturen aus der Kennfeldvermessung beschickt. In den folgenden Zeitverläufen sind die gemessenen Verläufe in blau, die Verläufe des alten Modells in rot und die des neuen Modells in grün dargestellt.

#### 3.1.2.1 Validierung mit Kennfeldmessdaten

Eine Gesamtbetrachtung zeigt, dass das alte Modell jederzeit zu wenig Heizleistung ausgibt, die Abweichungen aber betriebspunktabhängig sind. Das neue Modell zeigt ein wesentlich besseres Verhalten. Siehe hierzu Abbildung 3.1.

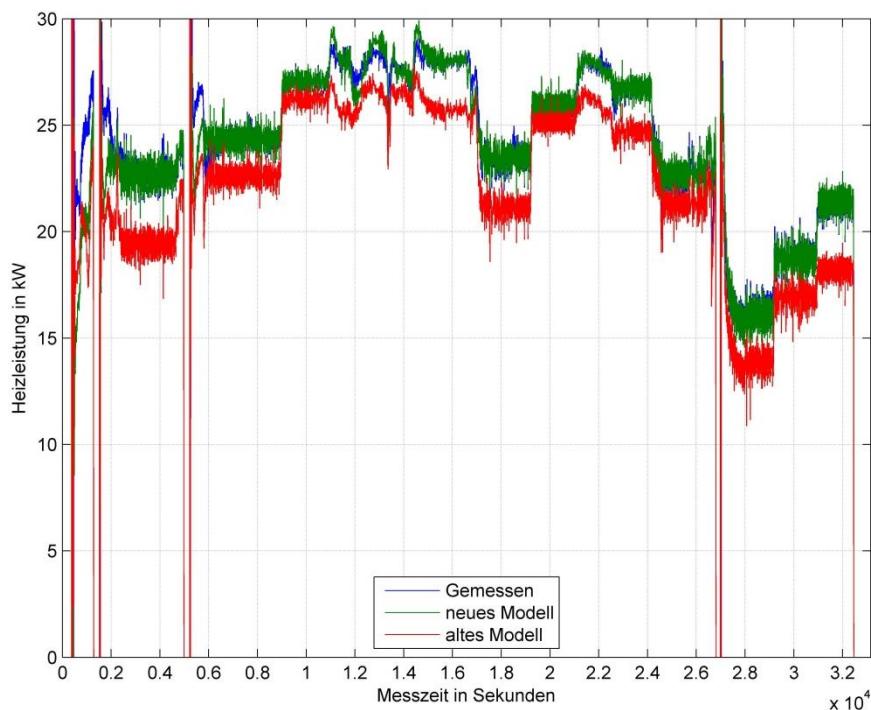


Abbildung 3.1 Gesamtverlauf der Heizleistung

Im Anfahrverhalten fällt ein deutlicher Unterschied in den Leistungsverläufen auf (Abbildung 3.2). Das Absinken der Heizleistung auf negative Werte wird hierbei durch die geringe thermische Masse des Solaremulators verursacht. Dadurch kommt es zu Temperaturschwankungen im Heizkreis, welche dann eine Schwingung der Heizleistung bewirken. Wichtig ist, dass die negativen Heizleistungen nicht real vorhanden sind und nur ein messtechnisches bzw. ein Phänomen der Auswertung sind. Neben diesem Phänomen zeigen die Verläufe des alten und neuen Modells im Bereich von 1600 bis 2000 Sekunden eine Abweichung vom gemessenen Verlauf. Ab 2000 Sekunden nähert sich die Heizleistung aus dem neuen Modell den Messwerten an.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 23 / 43

Dieses spezielle Anfahrverhalten der AKM, in der die Heizleistung zunächst höher ist als im stationären Betrieb und dann plötzlich, innerhalb kurzer Zeit auf den stationären Betrieb absinkt ist derzeit nicht abbildbar.

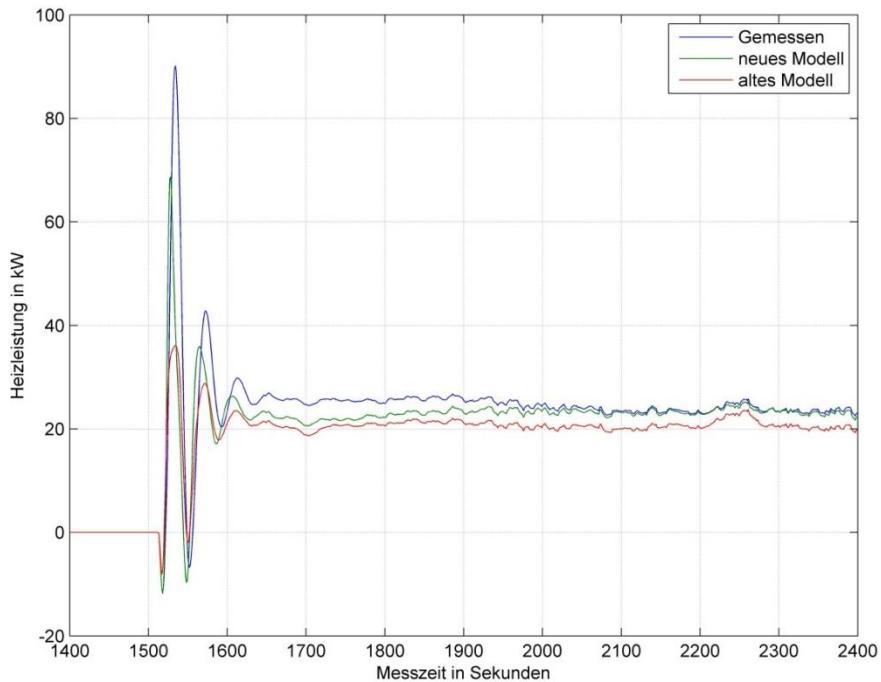


Abbildung 3.2 Dynamik in der Heizleistung

Das dynamische Abfahrverhalten ist im Falle der Heizleistung unerheblich, da hier keine Nachlaufzeit der HT-Pumpe existiert. Im stationären als auch dynamischen Bereich zeigt sich eine gute Übereinstimmung des neuen Modells mit der realen Maschine, siehe Abbildung 3.3.

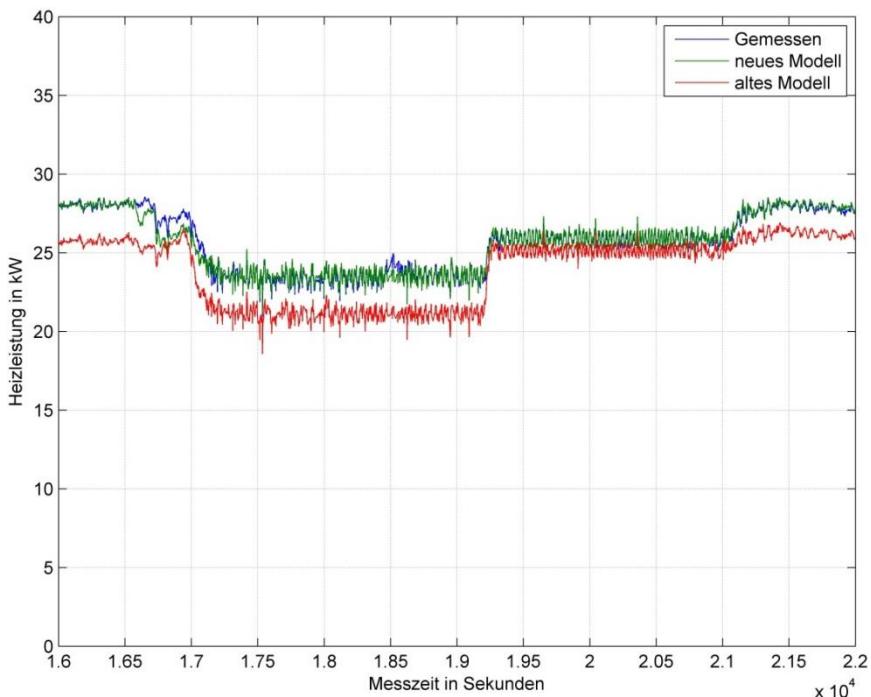


Abbildung 3.3 dynamisch/stationäre Heizleistung

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 24 / 43

Die Verläufe der Rückkühlleistung ähneln in der Gesamtübersicht der Heizleistung, auch hier sind die Abweichungen des alten Modells von den Messwerten betriebspunktabhängig und liegen jederzeit darunter (Abbildung 3.4). Die kurzzeitige große negative Leistung ist analog zum Phänomen der negativen Heizleistungen und ist somit zu vernachlässigen.

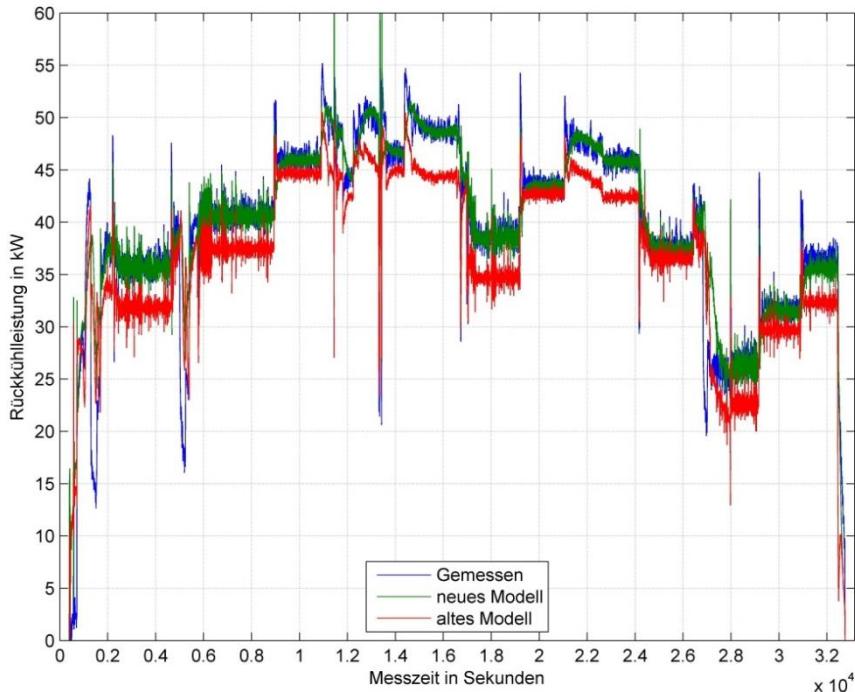


Abbildung 3.4 Gesamtverlauf der Rückkühlleistung

Das Anfahrverhalten zeigt beim neuen Modell anfänglich, zwischen 1500 und 1700 Sekunden, eine deutliche Abweichung gegenüber der Realität (AKM-Start ist bei 1500 Sekunden). Nach 1700 Sekunden wird die Rückkühlleistung durch das neue Modell gut abgebildet. Siehe hierzu Abbildung 3.5.

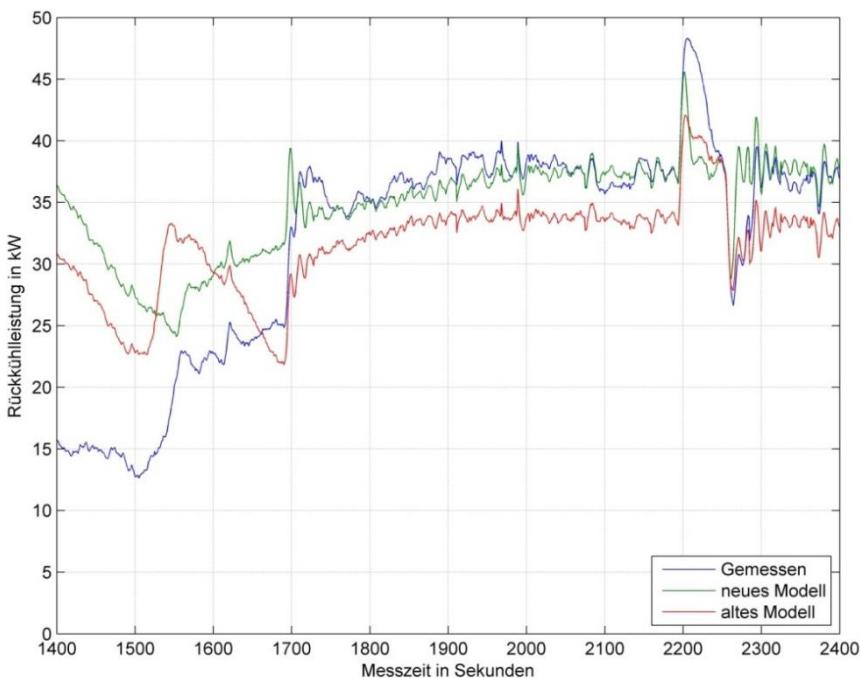


Abbildung 3.5 Dynamik der Rückkühlleistung

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 25 / 43

Das Umschalten des MT-Mischers bei Erreichen der 32 °C ist ursächlich für den Sprung bei 1700 Sekunden. Vor diesem Zeitpunkt wird das Wasser des Rückkühlkreises nicht über den Rückkühler sondern im Kurzschlussverfahren zurück zur AKM geleitet. Dieses Regelungsverhalten des Prüfstandes ist durch das neue Modell nicht abbildbar. Das dynamische Abfahrverhalten bildet das neue Modell gegenüber dem alten Modell besser ab, zeigt allerdings noch gegenüber den Messwerten negative Abweichungen. Abbildung 3.6 zeigt die Verläufe.

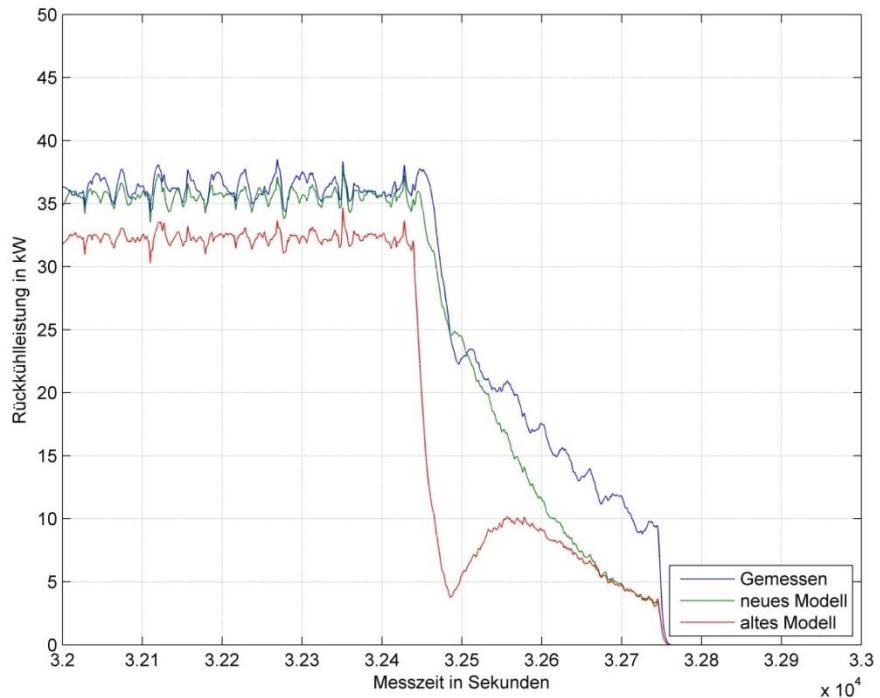


Abbildung 3.6 Abfahrverhalten der Rückkühlleistung

Im dynamischen und stationären Verlauf gilt das neue Modell als validiert. Hier sind nur geringe Unterschiede zwischen dem neuen Modell und den Messwerten feststellbar. Außer in den dynamischen Bereichen in denen die Rückkühlleistung sprungartig ansteigt. Siehe Abbildung 3.7.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 26 / 43

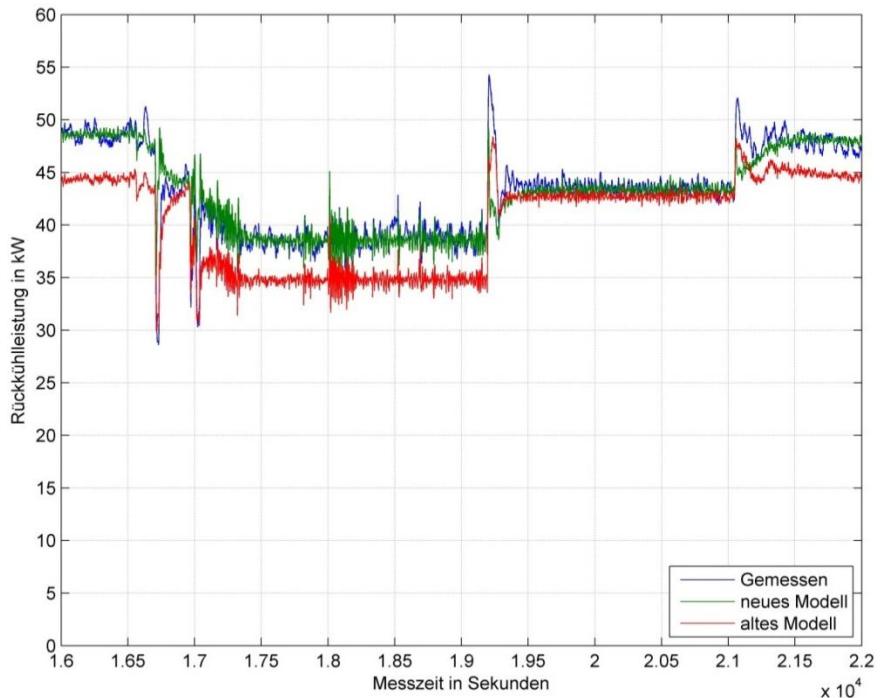


Abbildung 3.7 dynamisch/stationärer Verlauf der Rückkühlleistung

Anders als bei der Heiz- und Rückkühlleistung scheint das alte Modell bei manchen Betriebspunkten die Kälteleistung gut abzubilden. Das neue Modell bildet den stationären Verlauf qualitativ sehr gut ab. Siehe hierzu Abbildung 3.8 mit dem gesamten Messverlauf.

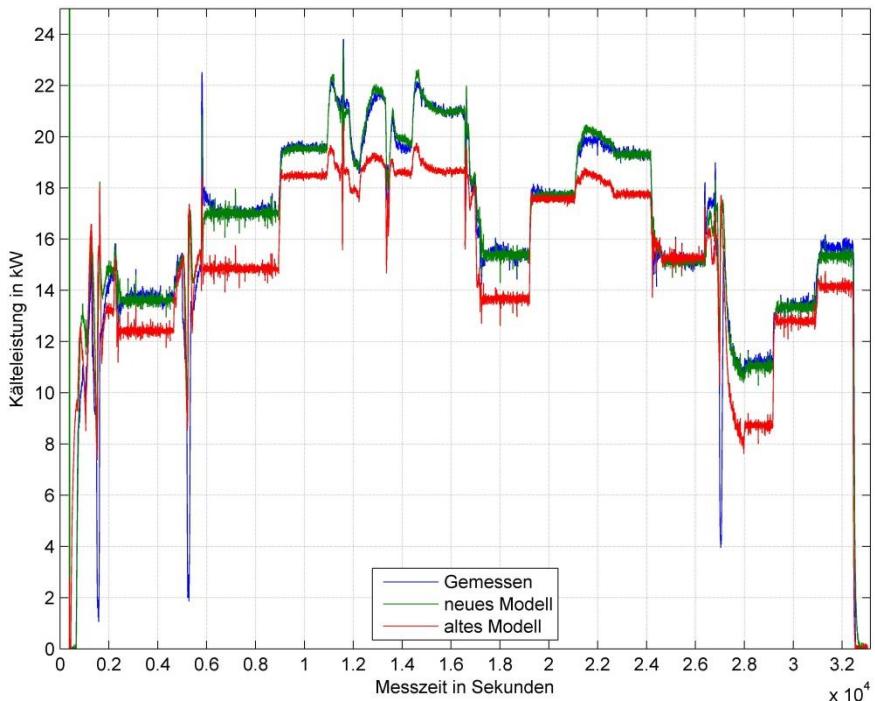


Abbildung 3.8 Gesamtverlauf der Kälteleistung

Das Anfahrverhalten kann weder das alte noch das neue Modell zuverlässig und genau abbilden. Bei manchen Starts ist die Anpassung mit dem neuen Modell qualitativ gut, bei anderen wiederum schlecht. Bei der folgenden Abbildung (AKM-Start bei 1500 s) ist die

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 27 / 43

Anpassung der Modelle schlecht. Auch die berechnete Totzeit liegt beim neuen Modell fern der Totzeit aus den Messungen. Da die Totzeit allerdings aus der HT-Eintrittstemperatur berechnet wird und diese, wie oben bereits erwähnt, beim Start stark schwanken kann, so kann die Totzeit ebenfalls sehr unterschiedlich ausfallen. Bei 2100 Sekunden nähern sich Messwert und berechneter Wert aus dem neuen Modell an.

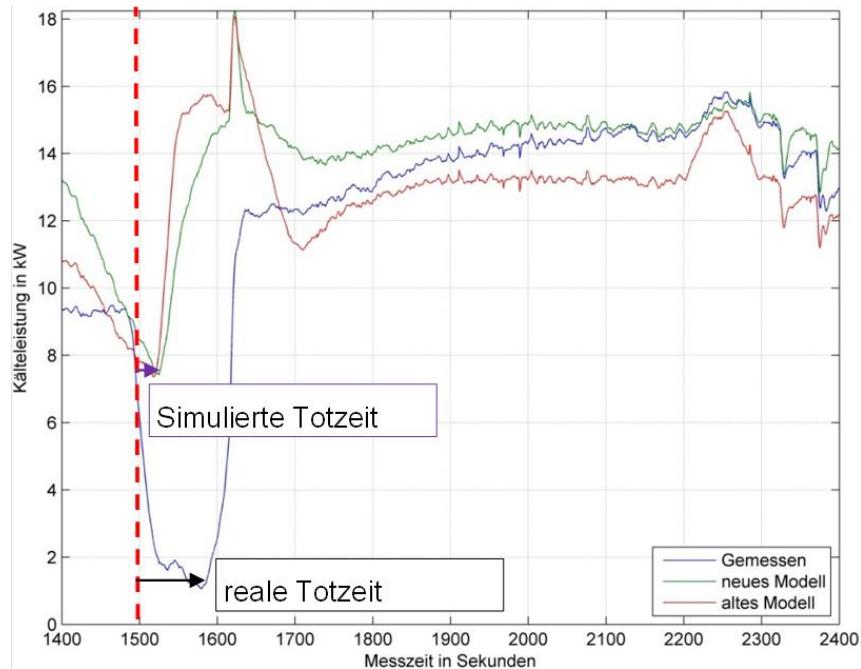


Abbildung 3.9 Anfahrverhalten der Kälteleistung (1)

Die Ermittlung der Totzeit kann auch erfolgreich sein, wie Abbildung 3.10 beweist. In dieser Abbildung steigen der gemessene und der berechnete Wert aus dem neuen Modell, bei rund 650 Sekunden fast gleichzeitig an. Das alte Modell hingegen hat keine Totzeit implementiert. Die Leistungsspitzen sind auch hier auf die geringe thermische Masse des Prüfstands zurückzuführen.

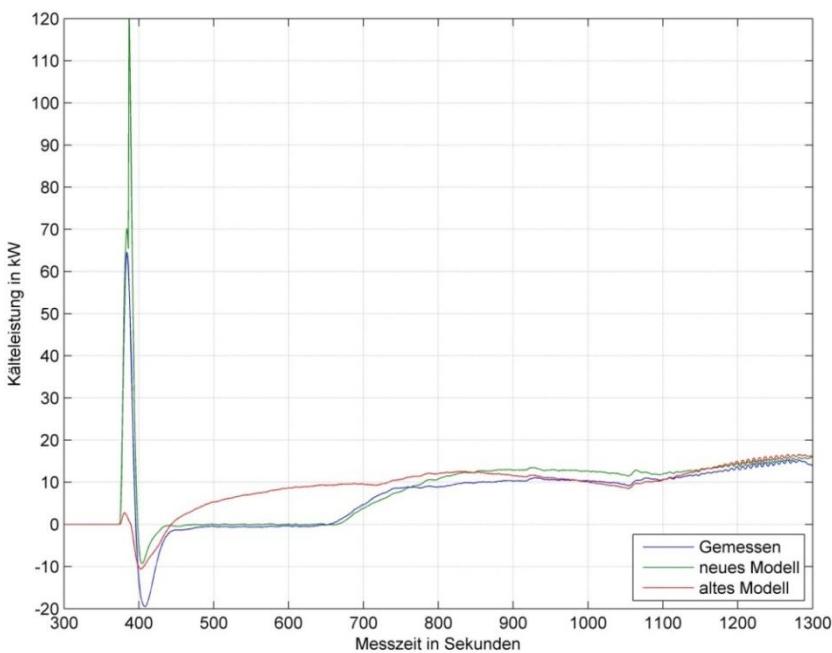


Abbildung 3.10 Anfahrverhalten der Kälteleistung (2)

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 28 / 43

Auch beim Abfahrverhalten bietet das neue Modell eine bessere Anpassung. Die negativen Leistungen in den Messungen sind hier der Prüfstandregelung geschuldet.

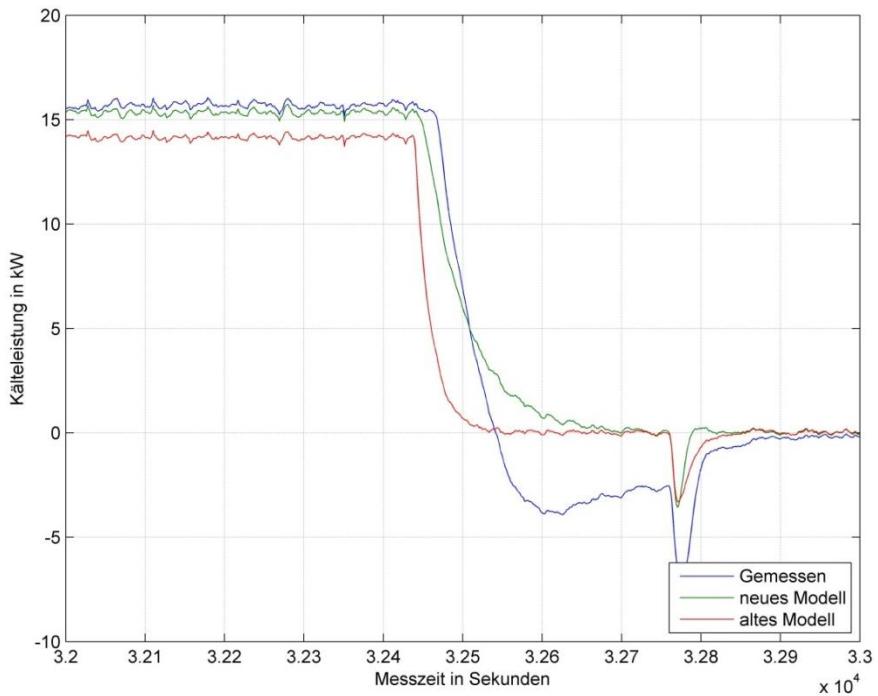


Abbildung 3.11 Anfahrverhalten der Kälteleistung

Im dynamischen und stationären Bereich ermöglicht das neue Modell eine gute qualitative Anpassung an die Messwerte. Wie bereits mehrfach erwähnt, ist die Abweichung der Kälteleistung aus dem alten Modell betriebspunktabhängig. Bei manchen Punkten wird diese gut an anderen dafür schlecht abgebildet. Siehe Abbildung 3.12.

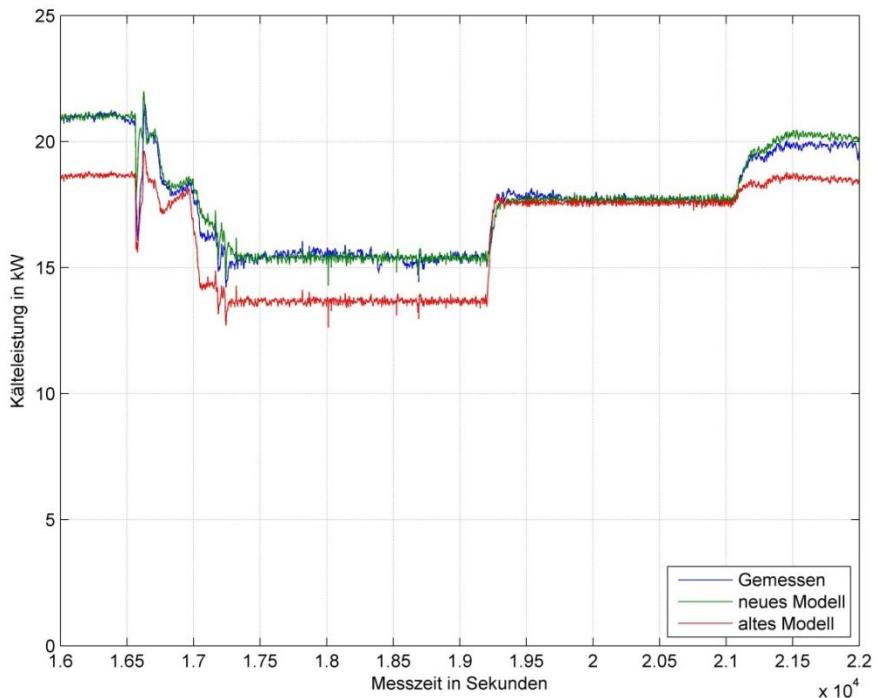


Abbildung 3.12 dynamisch/stationärer Verlauf der Kälteleistung

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 29 / 43

Der Vergleich der Leistungen aus dem neuen und alten Modell mit den Messwerten zeigt, dass das neue Modell die reale Maschine deutlich besser abbildet als das alte Modell. Beim dynamischen Anfahr- und Abfahrverhalten existiert noch Optimierungspotential.

### 3.1.2.2 Validierung mit Messdaten aus HiL-Versuchen

Eine weitere Validierung mittels Messdaten aus einem HiL-Versuch zeigt die Grenzen des neuen Modells auf. Auch hier findet ein Vergleich zwischen dem alten und neuen Modell sowie den Messwerten aus dem Versuch statt. Bei diesem Versuch handelt es sich um den Tag 202 ohne Leistungsregelung. Der Vorteil bei dieser Auswahl ist die hohe Taktung der AKM und der damit verbundene Erkenntnisgewinn in der Validierung des Anfahrverhaltens. Anders formuliert: Die Anforderungen an das Simulationsmodell sind an diesem Tag wegen der Betonung der dynamischen Anfahrvorgänge besonders hoch. Die Betrachtung erfolgt nach folgender Reihenfolge: Heizleistung, Rückkühlleistung, Kälteleistung.

Betrachtet man die Heizleistung, so fällt bei Taktung der AKM auf, dass die Leistung aus dem neuen Modell unter den Messwerten aber über den Werten aus dem alten Modell liegt. Siehe hierzu Abbildung 3.13.

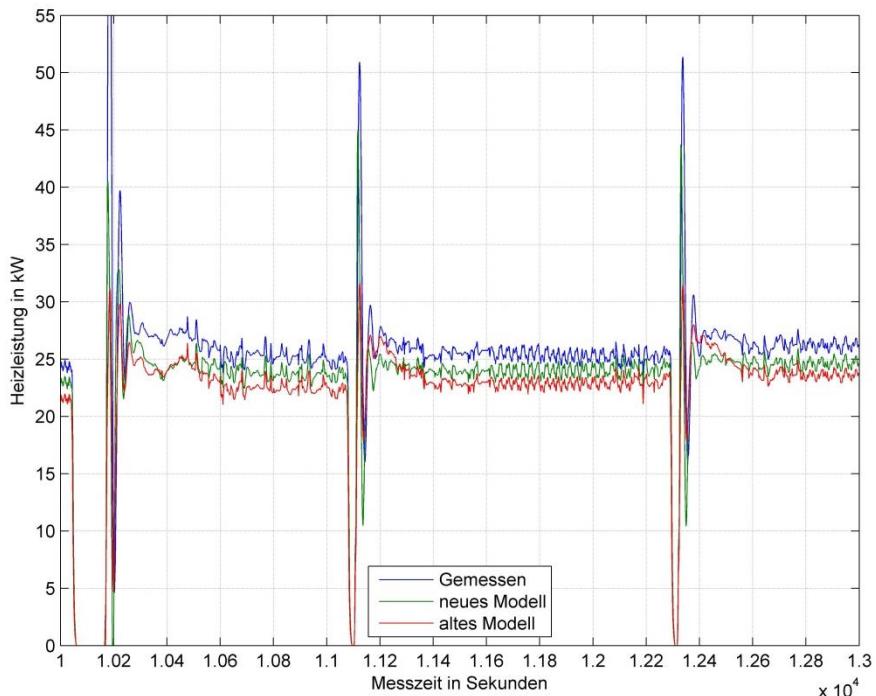


Abbildung 3.13 HiL-Versuch Tag 202 ungeregelt, Heizleistung bei Taktbetrieb der AKM

Ein Vergleich mit einem längeren Betrieb zeigt, dass das neue Modell im stationären Betrieb eine gute Anpassung liefert. Im Taktbetrieb der AKM kommt es zu Abweichungen von bis zu 2 kW.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 30 / 43

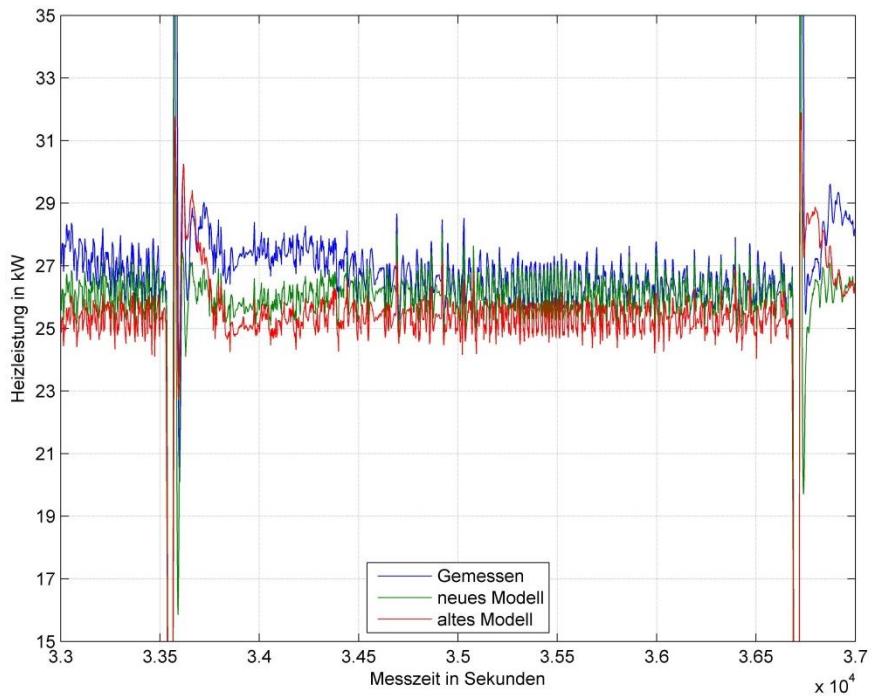


Abbildung 3.14 HiL-Versuch Tag 202 ungeregelt, Heizleistung bei längerem Betrieb der AKM

Analog verhält es sich mit der Rückkühlleistung. Auch hier wird das Anfahrverhalten nicht optimal vom neuen Modell abgebildet (siehe Abbildung 3.15). Es kommt zu Abweichungen von bis zu 3 kW. Im stationären Betrieb gibt es eine gute Anpassung (siehe Abbildung 3.16).

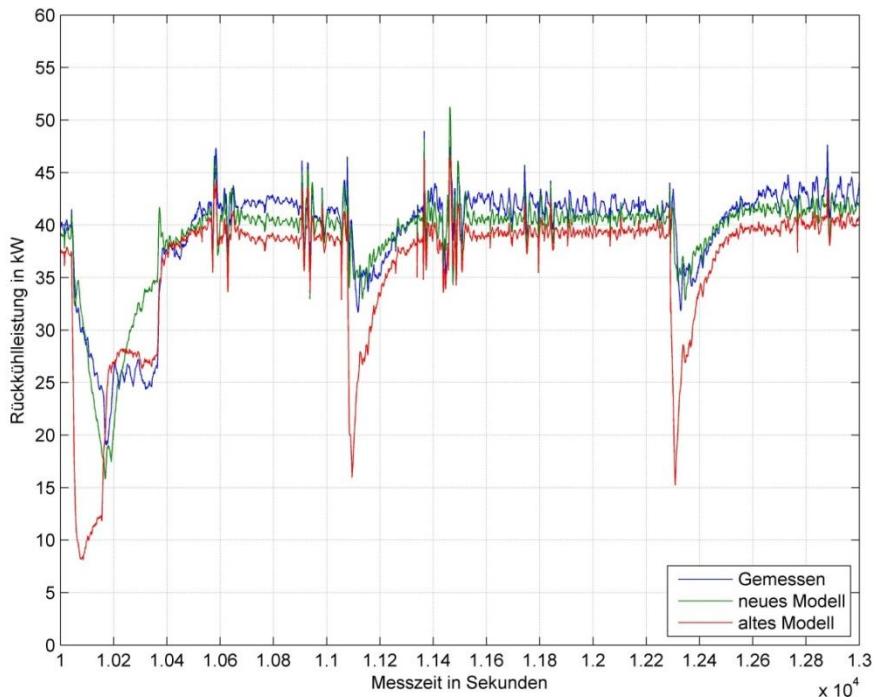


Abbildung 3.15 HiL-Versuch Tag 202 ungeregelt, Rückkühlleistung bei Taktbetrieb der AKM

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 31 / 43

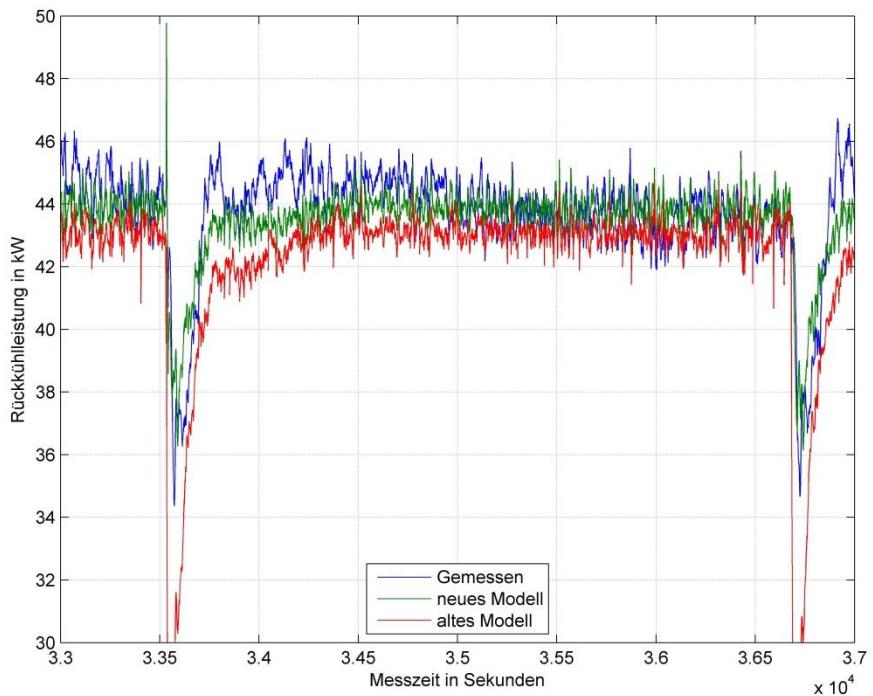


Abbildung 3.16 HiL-Versuch Tag 202 ungeregelt, Rückkühlleistung bei längerem Betrieb der AKM

Auch bei der Kälteleistung ist eine ähnlich gute Abbildung im stationären Betrieb durch das neue Modell erkennbar. Ebenfalls ist, wie bei den anderen Leistungen, die Abbildung des Anfahrverhaltens optimierungsbedürftig. Auffällig ist auch die Abbildung der Totzeit. Hier existieren nur geringe Differenzen zwischen Start der Kälteleistung im Versuch und im Modell.

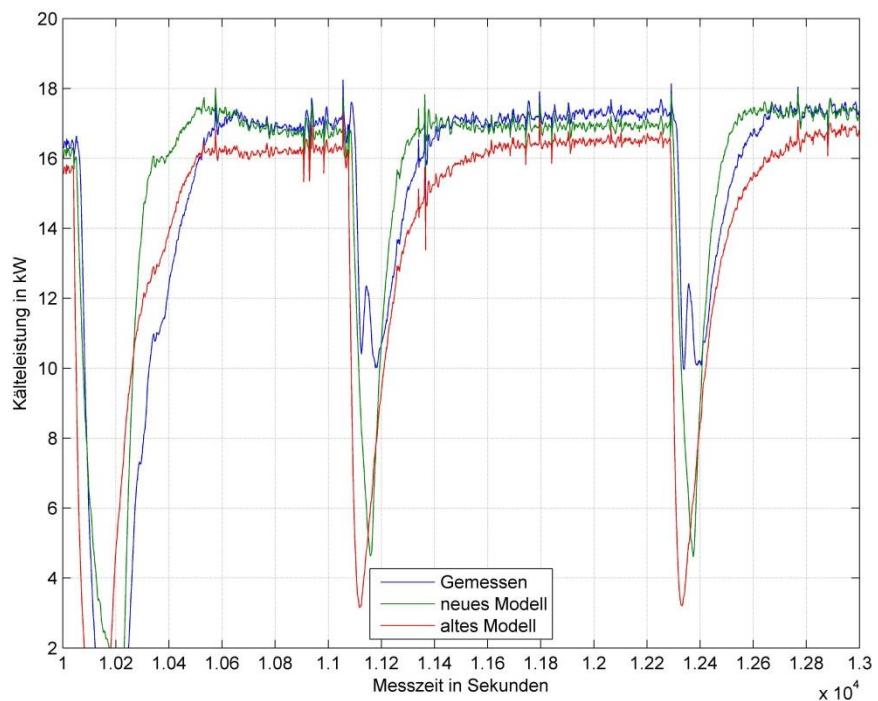


Abbildung 3.17 HiL-Versuch Tag 202 ungeregelt, Kälteleistung bei Taktbetrieb der AKM

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 32 / 43

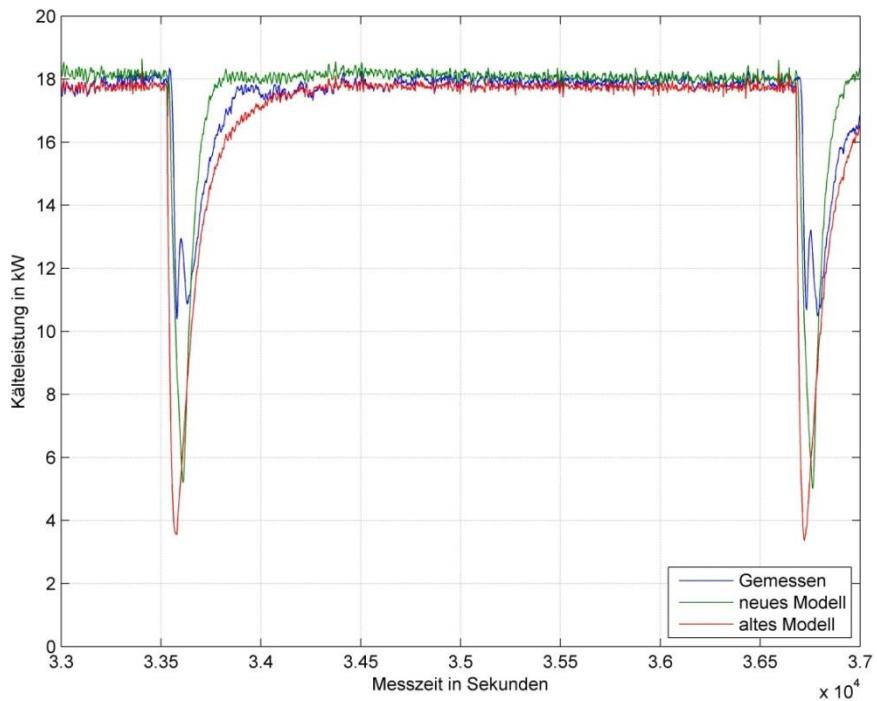


Abbildung 3.18 HiL-Versuch Tag 202 ungeregelt, Kälteleistung bei längerem Betrieb der AKM

### 3.1.2.3 Vergleich altes und neues Modell

Zur Quantifizierung dienen die eingangs erwähnten Kenngrößen der relativen Fehler der Leistung und Energiemenge. Für die drei Referenztagen 137, 202 und 246, sowohl ungeregelt als auch mit Leistungsregelung, wurden die Simulationen mit dem alten und dem neuen Modell durchgeführt und sind in Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 dargestellt. Die Daten vom alten Modell sind in blau dargestellt, die vom neuen Modell in Rot. Die „gefüllten“ Balken entsprechen dem relativen Fehler der Energiemenge, die schraffierten Blöcke dem relativen Fehler der Leistungen. Je näher der Wert des Balkens beim Wert Null liegt, desto besser ist die Anpassung bzw. kleiner der Fehler.

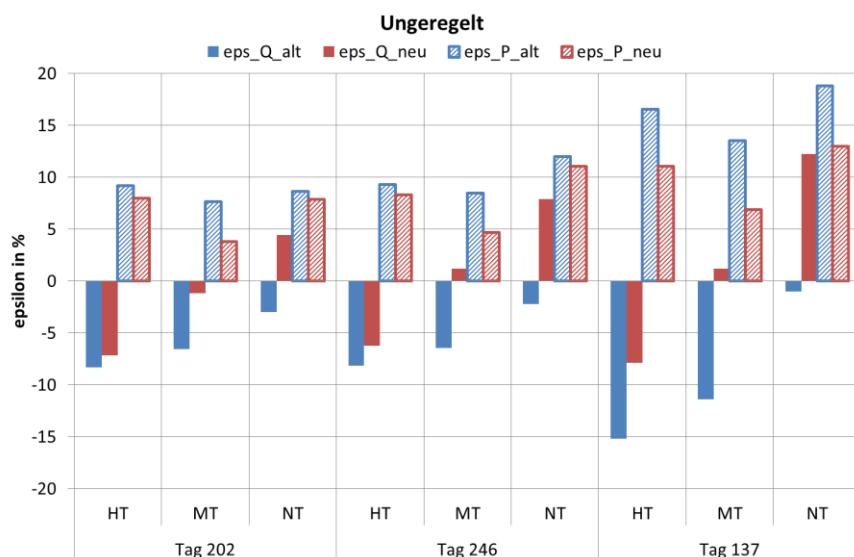


Abbildung 3.19 relative Fehler der Energiemenge und Leistung an verschiedenen Referenztagen ohne Leistungsregelung

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 33 / 43

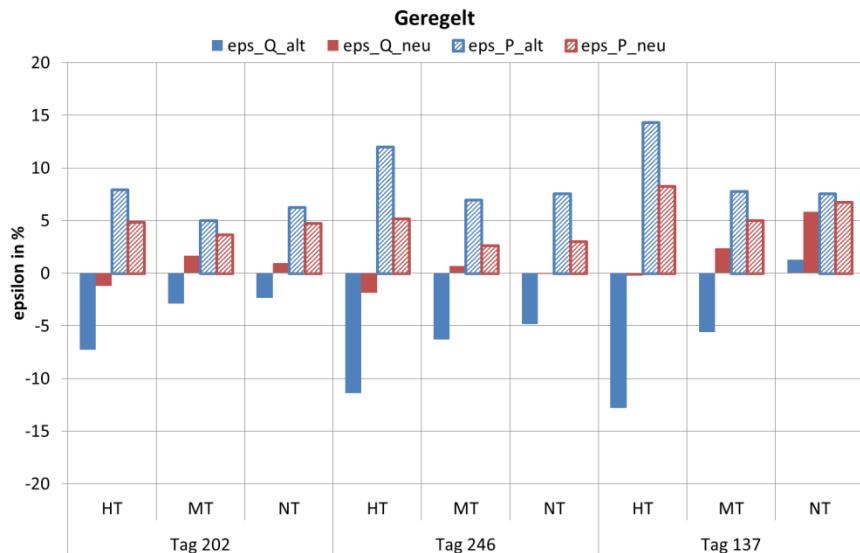


Abbildung 3.20 relative Fehler der Energiemenge und Leistung an verschiedenen Referenztagen mit Leistungsregelung

Zunächst fallen die allgemein größeren Fehler bei den Versuchen ohne Leistungsregelung auf. Dies ist dem Taktbetrieb der AKM geschuldet. Wie bereits erwähnt, ist die Anpassung im Anfahrverhalten durch die Modelle nur mäßig. Durch den höheren zeitlichen Anteil des Anfahrverhaltens gegenüber dem stationären Betrieb ist auch der Fehler höher. In den Versuchen mit Leistungsregelung kommt es nur zu wenig Taktbetrieb. Dadurch ist der Anteil des stationären Betriebs größer und die Anpassung besser. Vor allem jedoch ist ersichtlich, dass das neue Modell bei fast allen Versuchen deutlich besser abschneidet. Dies zeigt den Vorteil des neuen Modells gegenüber dem alten. Allerdings sind weiterhin Optimierungen beim Anfahrverhalten notwendig.

## 4 Literature

- Adam, M., Lohmann, S., Radosavljevic, R., Goebel, J., & Gottschald, J. (2013). *Solare Kühlung im Hardware-in-the-Loop-Test, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FKZ 17 42X 09*. Düsseldorf.
- DIN EN 12977-3:2012. (Juni 2012). Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kundenspezifisch gefertigte Anlagen - Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen.
- Fa.Yazaki. (2009). *Spezifikation*. Japan.
- Jakob, Uli; SolarNext AG. (2008). Auch die Sonne kann kühlen – Ein Überblick über Sorptionskältemaschinen kleiner Leistung. *Erneuerbare Energien*, Vol. 18, Nr. 5, Seiten 64-70.
- Neumann, F., Urbaneck, T., & Platzer, B. (2010). Parameterbestimmung mit der charakteristischen Gleichung. *KI Kälte Luft Klimatechnik*(11), 18-21.
- Radosavljevic, R. (2010). Bachelorthesis: Solare Kühlung - Modellerstellung und -validierung einer Absorptions- und Kompressionskältemaschine unter Matlab / Simulink / Carnot. Düsseldorf.
- Ziegler, F. (1998). Sorptionswärmepumpen: Beschreibung des Betriebsverhaltens durch eine charakteristische Gleichung. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik, Technische Sorptionsprozesse*, 554, 259–279.

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 35 / 43

## A Anhang

A Anhang .....	36
A.1 Vollständiges Kennfeld des validiertes AKM-Modells.....	37

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 36 / 43

## A.1 Vollständiges Kennfeld des validiertes AKM-Modells

Tabelle A. 1 Kennfeld Kälteleistung (Angepasst)

Kälteleistung (lineare Interpolation)			
[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	Q_NT
70	29	11	7,043
79	29	11	14,965
88	29	11	19,010
70	31	11	4,807
79	31	11	12,931
88	31	11	16,265
70	33	11	2,640
79	33	11	10,492
88	33	11	13,752
70	29	12,5	6,894
79	29	12,5	15,293
88	29	12,5	20,408
70	31	12,5	4,521
79	31	12,5	13,373
88	31	12,5	17,747
70	33	12,5	2,554
79	33	12,5	11,113
88	33	12,5	15,441
70	29	14	6,939
79	29	14	15,096
88	29	14	22,610
70	31	14	4,754
79	31	14	13,234
88	31	14	19,590
70	33	14	2,701
79	33	14	11,197
88	33	14	17,076

**Tabelle A. 2 Kennfeld Rückkühlleistung (Angepasst)**

Rückkühlleistung (linear)			
[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	Q_MT
70	29	11	17,827
79	29	11	34,785
88	29	11	45,909
70	31	11	13,027
79	31	11	30,409
88	31	11	40,842
70	33	11	8,644
79	33	11	25,202
88	33	11	35,825
70	29	12,5	17,320
79	29	12,5	35,477
88	29	12,5	48,632
70	31	12,5	12,238
79	31	12,5	31,431
88	31	12,5	43,414
70	33	12,5	8,342
79	33	12,5	26,265
88	33	12,5	38,557
70	29	14	17,369
79	29	14	35,044
88	29	14	52,344
70	31	14	12,546
79	31	14	30,858
88	31	14	45,993
70	33	14	8,314
79	33	14	26,448
88	33	14	40,643

Tabelle A. 3 Kennfeld COP (Angepasst), Teil A

COP (cubic spline)			
[°C]	[°C]	[°C]	[-]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	COP
70	29	11	0,6042
73	29	11	0,6529
76	29	11	0,6930
79	29	11	0,7153
82	29	11	0,7135
85	29	11	0,7036
88	29	11	0,6913
70	31	11	0,5188
73	31	11	0,5994
76	31	11	0,6658
79	31	11	0,7028
82	31	11	0,6928
85	31	11	0,6694
88	31	11	0,6429
70	33	11	0,3747
73	33	11	0,4990
76	33	11	0,6040
79	33	11	0,6695
82	33	11	0,6606
85	33	11	0,6340
88	33	11	0,6039
70	29	12,5	0,5911
73	29	12,5	0,6415
76	29	12,5	0,6855
79	29	12,5	0,7163
82	29	12,5	0,7233
85	29	12,5	0,7235
88	29	12,5	0,7211
70	31	12,5	0,4855
73	31	12,5	0,5791
76	31	12,5	0,6590
79	31	12,5	0,7112
82	31	12,5	0,7121
85	31	12,5	0,6999
88	31	12,5	0,6839
70	33	12,5	0,3573
73	33	12,5	0,4923
76	33	12,5	0,6081
79	33	12,5	0,6856
82	33	12,5	0,6884
85	33	12,5	0,6748
88	33	12,5	0,6568
70	29	14	0,5946
73	29	14	0,6354
76	29	14	0,6730
79	29	14	0,7049
82	29	14	0,7252
85	29	14	0,7426
88	29	14	0,7574
70	31	14	0,5093
73	31	14	0,5837
76	31	14	0,6493
79	31	14	0,6983

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 39 / 43

Tabelle A. 4 Kennfeld COP (Angepasst), Teil B

COP (cubic spline)			
[°C]	[°C]	[°C]	[-]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	COP
82	31	14	0,7131
85	31	14	0,7196
88	31	14	0,7226
70	33	14	0,3740
73	33	14	0,4948
76	33	14	0,6006
79	33	14	0,6776
82	33	14	0,6948
85	33	14	0,6997
88	33	14	0,6999

Tabelle A. 5 Kennfeld Heizleistung (aus COP und Kälteleistung berechnet), Teil A

Heizleistung (linear; mehr Daten, da aus Interpoliertem COP berechnet)			
[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	Q_HT
70	29	11	11,672
71	29	11	12,773
72	29	11	13,823
73	29	11	14,836
74	29	11	15,824
75	29	11	16,801
76	29	11	17,780
77	29	11	18,776
78	29	11	19,811
79	29	11	20,909
80	29	11	21,493
81	29	11	22,150
82	29	11	22,854
83	29	11	23,582
84	29	11	24,330
85	29	11	25,096
86	29	11	25,882
87	29	11	26,684
88	29	11	27,500
70	31	11	9,289
71	31	11	10,466
72	31	11	11,542
73	31	11	12,544
74	31	11	13,498
75	31	11	14,426
76	31	11	15,347
77	31	11	16,283
78	31	11	17,276
79	31	11	18,379
80	31	11	18,888
81	31	11	19,531
82	31	11	20,256
83	31	11	21,018
84	31	11	21,809
85	31	11	22,631
86	31	11	23,489

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 40 / 43

**Tabelle A. 6 Kennfeld Heizleistung (aus COP und Kälteleistung berechnet), Teil B**

Heizleistung (linear; mehr Daten, da aus Interpoliertem COP berechnet)			
[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	Q_HT
87	31	11	24,379
88	31	11	25,300
70	33	11	7,082
71	33	11	8,444
72	33	11	9,571
73	33	11	10,545
74	33	11	11,424
75	33	11	12,245
76	33	11	13,032
77	33	11	13,815
78	33	11	14,661
79	33	11	15,653
80	33	11	16,112
81	33	11	16,759
82	33	11	17,515
83	33	11	18,304
84	33	11	19,119
85	33	11	19,968
86	33	11	20,860
87	33	11	21,795
88	33	11	22,770
70	29	12,5	11,677
71	29	12,5	12,879
72	29	12,5	14,020
73	29	12,5	15,114
74	29	12,5	16,174
75	29	12,5	17,207
76	29	12,5	18,223
77	29	12,5	19,231
78	29	12,5	20,258
79	29	12,5	21,339
80	29	12,5	21,998
81	29	12,5	22,727
82	29	12,5	23,495
83	29	12,5	24,272
84	29	12,5	25,055
85	29	12,5	25,848
86	29	12,5	26,656
87	29	12,5	27,474
88	29	12,5	28,300
70	31	12,5	9,338
71	31	12,5	10,656
72	31	12,5	11,834
73	31	12,5	12,909
74	31	12,5	13,916
75	31	12,5	14,876
76	31	12,5	15,807
77	31	12,5	16,732
78	31	12,5	17,703
79	31	12,5	18,783
80	31	12,5	19,339
81	31	12,5	20,036

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 41 / 43

Tabelle A. 7 Kennfeld Heizleistung (aus COP und Kälteleistung berechnet), Teil C

Heizleistung (linear; mehr Daten, da aus Interpoliertem COP berechnet)			
[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	Q_HT
82	31	12,5	20,812
83	31	12,5	21,610
84	31	12,5	22,423
85	31	12,5	23,261
86	31	12,5	24,128
87	31	12,5	25,023
88	31	12,5	25,941
70	33	12,5	7,174
71	33	12,5	8,705
72	33	12,5	9,940
73	33	12,5	10,986
74	33	12,5	11,915
75	33	12,5	12,768
76	33	12,5	13,572
77	33	12,5	14,360
78	33	12,5	15,203
79	33	12,5	16,187
80	33	12,5	16,711
81	33	12,5	17,418
82	33	12,5	18,222
83	33	12,5	19,044
84	33	12,5	19,876
85	33	12,5	20,731
86	33	12,5	21,621
87	33	12,5	22,546
88	33	12,5	23,499
70	29	14	11,671
71	29	14	12,897
72	29	14	14,071
73	29	14	15,203
74	29	14	16,299
75	29	14	17,363
76	29	14	18,398
77	29	14	19,410
78	29	14	20,413
79	29	14	21,426
80	29	14	22,363
81	29	14	23,318
82	29	14	24,276
83	29	14	25,219
84	29	14	26,150
85	29	14	27,077
86	29	14	28,005
87	29	14	28,931
88	29	14	29,851
70	31	14	9,334
71	31	14	10,655
72	31	14	11,865
73	31	14	12,989
74	31	14	14,050
75	31	14	15,061
76	31	14	16,032

Document	Revision 0.1	Lohmann
Validation_Report_absorption_chiller_Yazaki_WFC-SC5	Date: 07.01.14	Page 42 / 43

**Tabelle A. 8 Kennfeld Heizleistung (aus COP und Kälteleistung berechnet), Teil D**

Heizleistung (linear; mehr Daten, da aus Interpoliertem COP berechnet)			
[°C]	[°C]	[°C]	[kW]
T_HT_IN	T_MT_IN	T_NT_IN	Q_HT
77	31	14	16,977
78	31	14	17,936
79	31	14	18,957
80	31	14	19,744
81	31	14	20,617
82	31	14	21,531
83	31	14	22,445
84	31	14	23,358
85	31	14	24,277
86	31	14	25,210
87	31	14	26,155
88	31	14	27,104
70	33	14	7,226
71	33	14	8,783
72	33	14	10,074
73	33	14	11,185
74	33	14	12,176
75	33	14	13,083
76	33	14	13,929
77	33	14	14,740
78	33	14	15,581
79	33	14	16,526
80	33	14	17,214
81	33	14	18,041
82	33	14	18,934
83	33	14	19,825
84	33	14	20,709
85	33	14	21,601
86	33	14	22,515
87	33	14	23,449
88	33	14	24,393