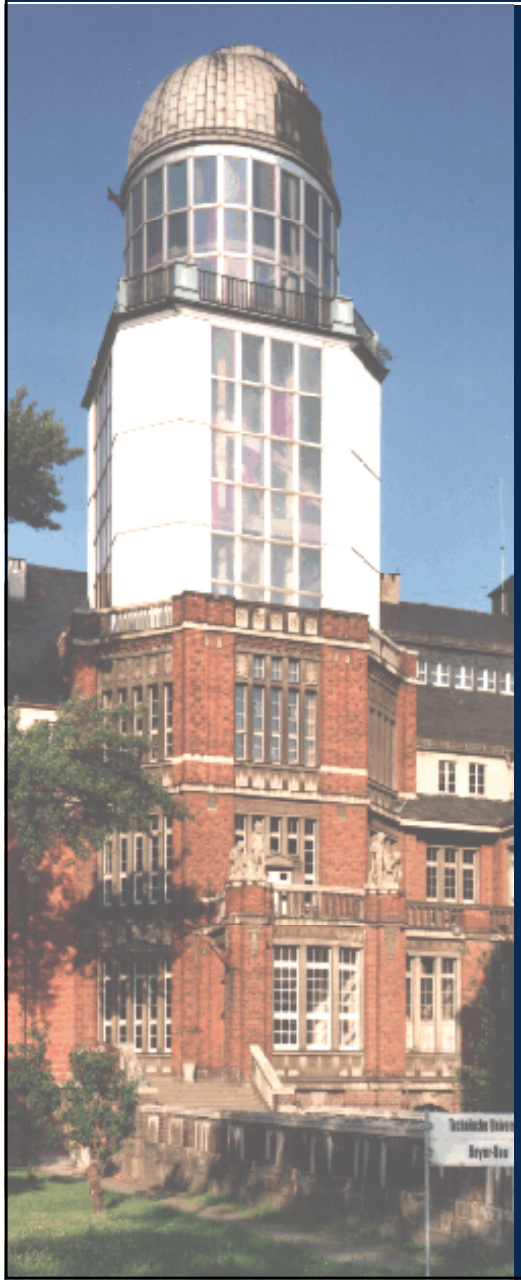
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

VATTENFALL

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft



Beurteilung der Energieeffizienz von Fernwärmesystemen mit EBSILON®Professional

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Wirths — Vattenfall Europe Wärme AG

Dr.-Ing. Thomas Sander — TU Dresden

Dipl.-Ing. Martin Rhein — TU Dresden

Teilthema des Projekts: LowEx-Fernwärme

MULTILEVEL DISTRICT HEATING

Forschungsvorhaben gefördert vom
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
FKZ: 0327400B

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

MULTILEVEL DISTRICT HEATING

- **T1: Komplexanalyse Low Temperature & CHP**
  - Untersuchung der Effizienz von KWK-Anlagen
- **T2: Multifunktionale Fernwärmesysteme**
  - Einbindung von Wärmesenken in Netzrücklauf
- **T3: Einfluss sinkender Vorlauftemperaturen auf die Gebäudetechnik**
  - Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit dem Gebäude
- **T4: Software zur Verbesserung der Einsatzchancen von Fernwärme-Systemen**
  - Netz-Optimierung für die Ausbauplanung
  - Optimierungs-Baustein für die Einsatzplanung von Wärme-Erzeugern

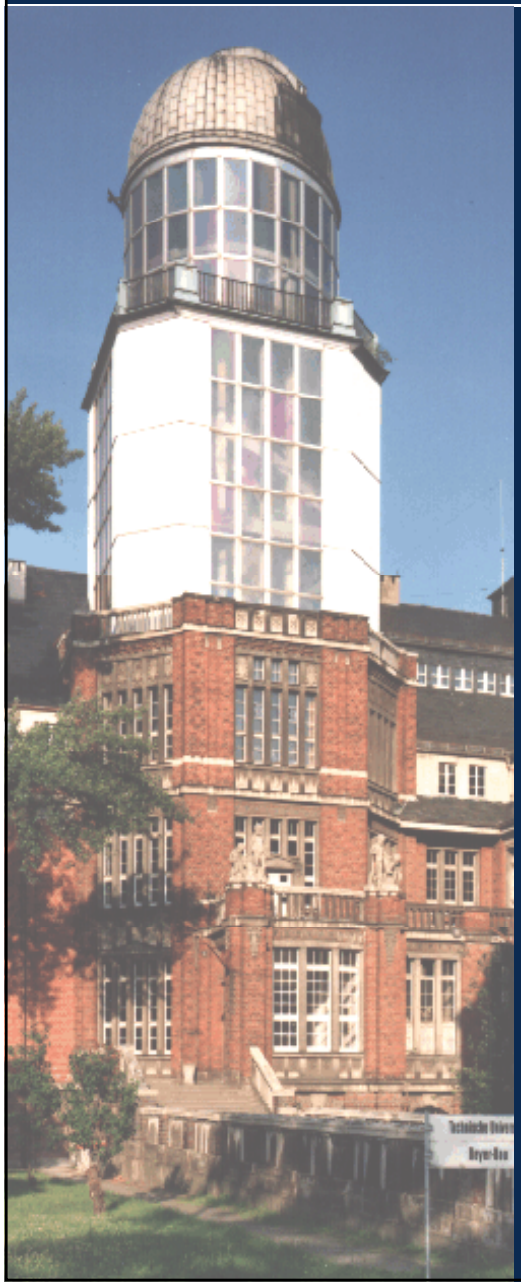
INHALT

- **Einführung**
- **Beurteilung der Energieeffizienz von Fernwärmesystemen unter Berücksichtigung des Fernwärmetemperaturniveaus**
- **Einsatz von EBSILON®Professional – Berechnung von temperaturabhängigen Kraftwerkskennlinien**
  - Anwendungsbeispiel
- **Mathematische Beschreibung der Kraftwerkskennlinien**
- **Berechnung des Stroms aus Kraft-Wärme-Kopplung**
- **Thermohydraulische Analyse/Berechnungen des Fernwärmenetzes**
- **Zusammenfassung und Ausblick**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

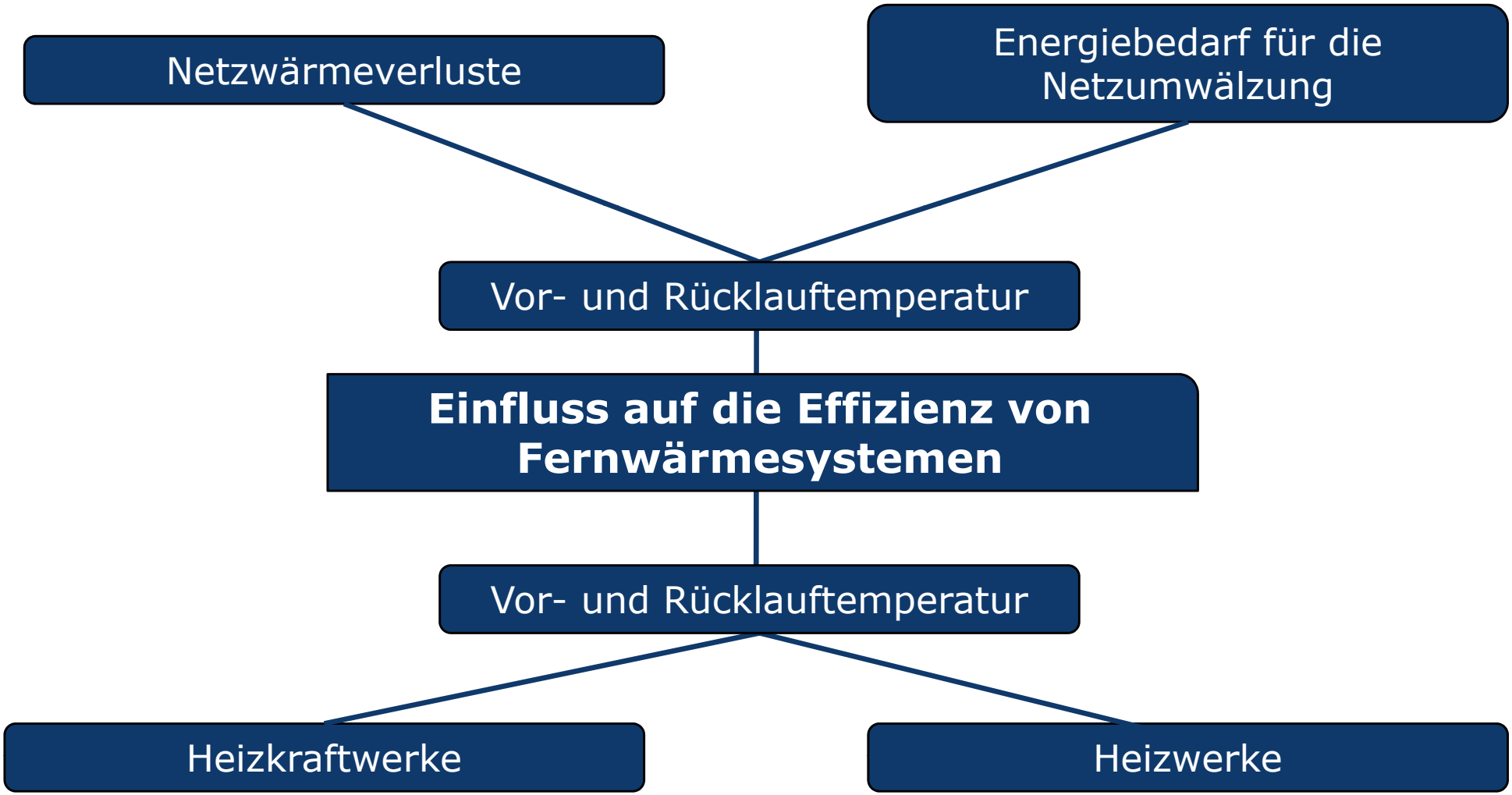
VATTENFALL

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft

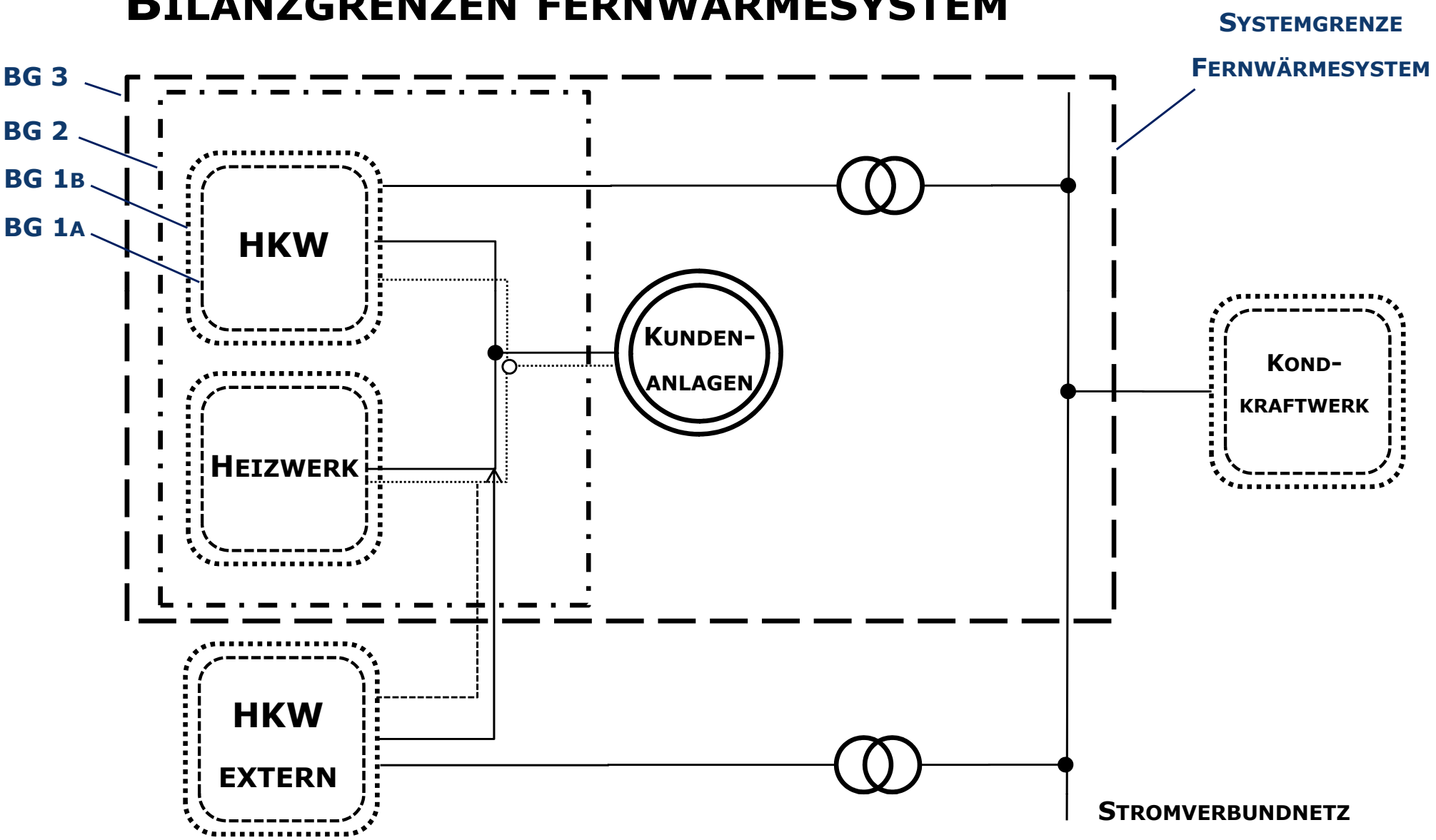


Beurteilung der Energieeffizienz von Fernwärmesystemen unter Berücksichtigung des Fernwärmetemperaturniveaus

BEURTEILUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ VON FERNWÄRMESYSTEMEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES FERNWÄRMETEMPERATURNIVEAUS



BILANZGRENZEN FERNWÄRMESYSTEM



Effizienzkriterien von Fernwärmesystemen

- Primärenergiefaktor des Fernwärmesystems nach DIN V 4701-10
- Bewertung durch Ausweisung von CO_2-Emissionen
  - Umlage der Brennstoffaufwendungen und CO_2-Emissionen auf die Koppelprodukte Wärme und Elektroenergie /Dittmann 09a/
- Hocheffizienzkriterien nach der Europäischen Richtlinie 2004/8/EG
  - „Referenzwirkungsgrade" Brennstoffeinsparung gegenüber getrennter Erzeugung von Strom und Elektroenergie – Vorgehensweise in /Dittmann 09b/
- Exergetische Bewertung des Fernwärmesystems
- Erzeugte Leistung in Kraft-Wärme-Kopplung nach /FW 308/
- Monetäre Bewertung

Fragestellung:

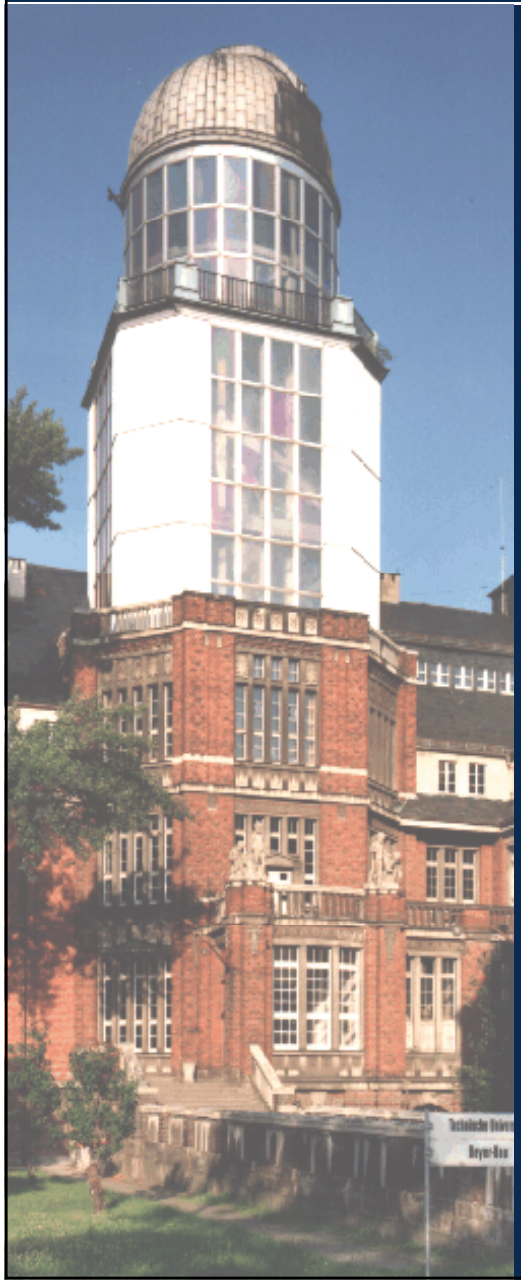
- Bewertung der **Energieeffizienz von Fernwärmesystemen** unter Berücksichtigung des Fernwärmetemperaturniveaus:

Wie verändern sich die Effizienzkriterien durch Veränderung der Vor- und Rücklauftemperatur, sowie der Anschlussleistung?

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

VATTENFALL

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft

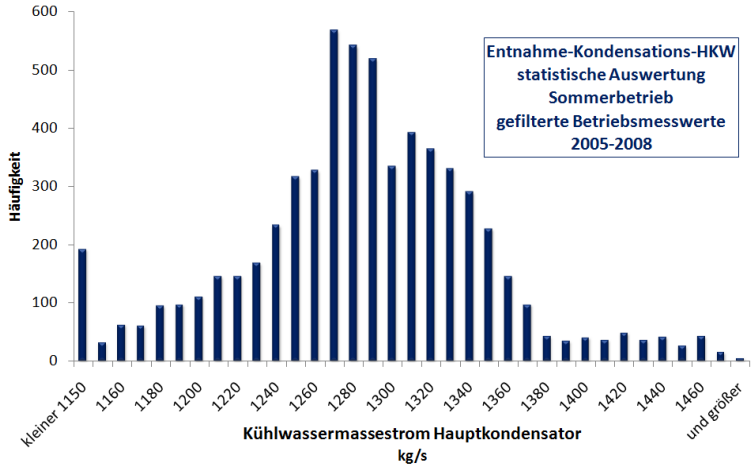


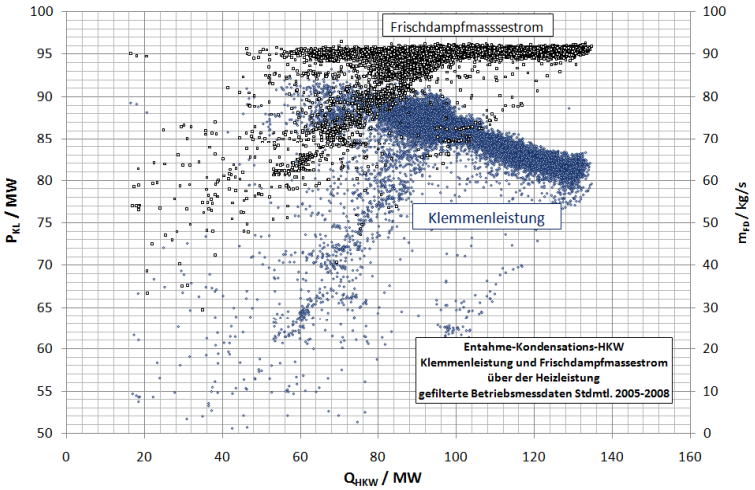
Einsatz von EBSILON®*Professional*

Berechnung von temperaturabhängigen Kraftwerkskennlinien

Berechnung von P-Q-t-Diagrammen

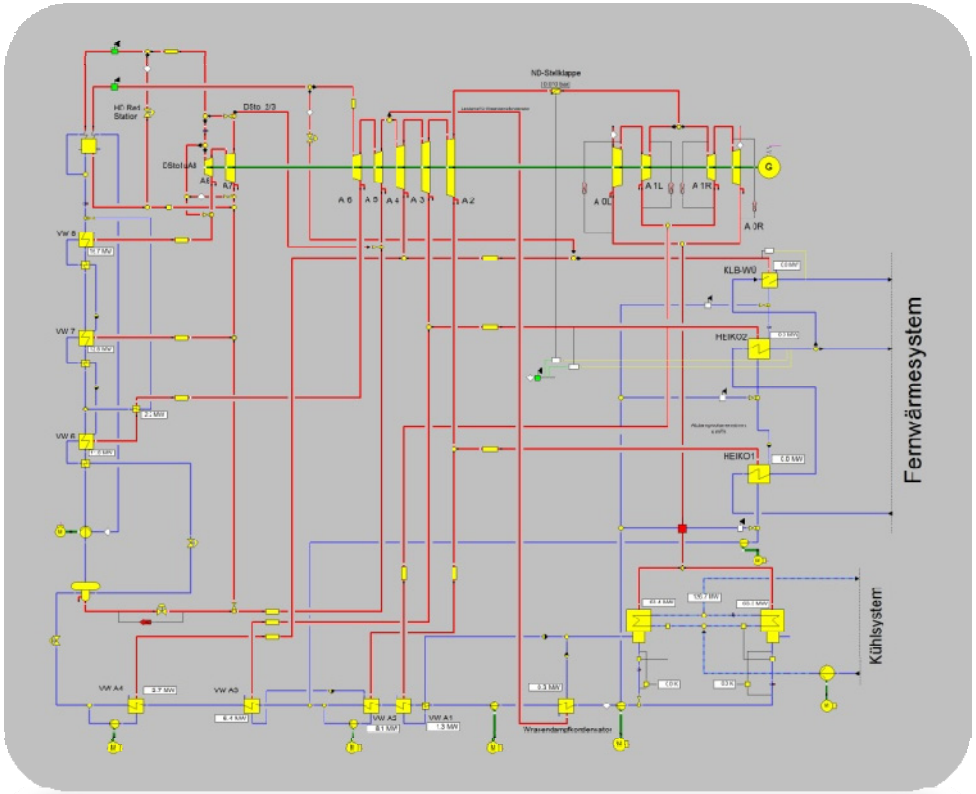
- Grundlage sind vorhandene bzw. neu erstellte Ebsilon Modelle
- Randbedingungen der Berechnung basieren auf Messwerten mehrerer Betriebsjahre
- Validierung mittels Daten einer Leistungskontrollmessung oder Betriebsmesswerten nach FW 308
- Parametervariation innerhalb der Betriebsgrenzen des HKW
  - z.B. Gleitdruckkurve, Kühldampfmassestrom ND-Teil



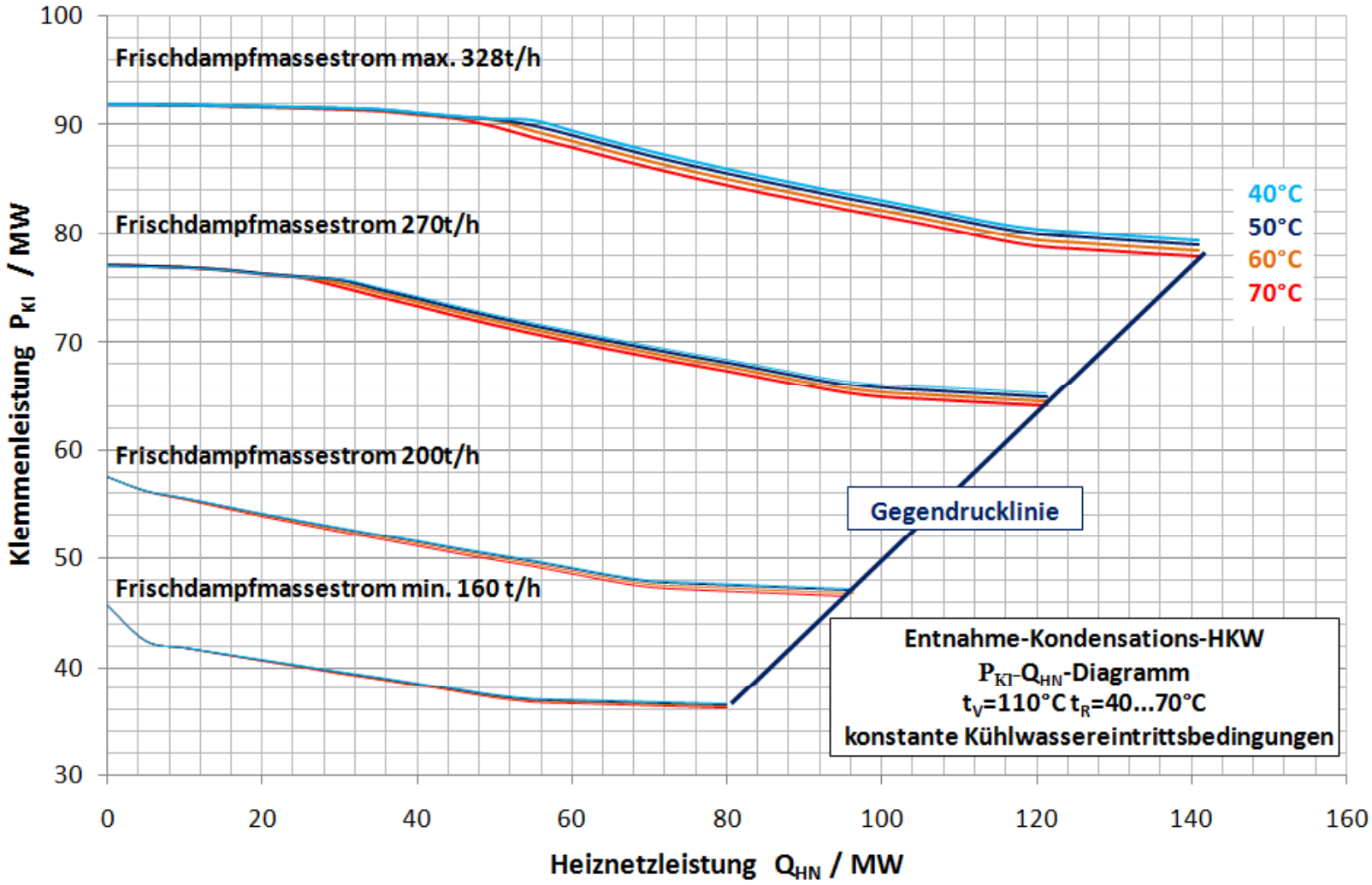


BERECHNUNG VON P-Q-T-DIAGRAMMEN BEISPIEL: ENTNAHME-KONDENSATIONS-HKW

- Diskretisierung der Wärmeleistung zwischen reinem Kondensations- und Gegendruckbetrieb
- Variation
  - Vorlauftemperatur
  - Rücklauftemperatur
  - Kühlwassereintrittsbedingungen
- Darstellung der Auswirkungen auf
  - Brennstoffleistung
  - Generatorleistung
  - elektrischen Wirkungsgrad und Primärenergieausnutzung
  - Stromkennzahl
  - KWK-Stromanteil



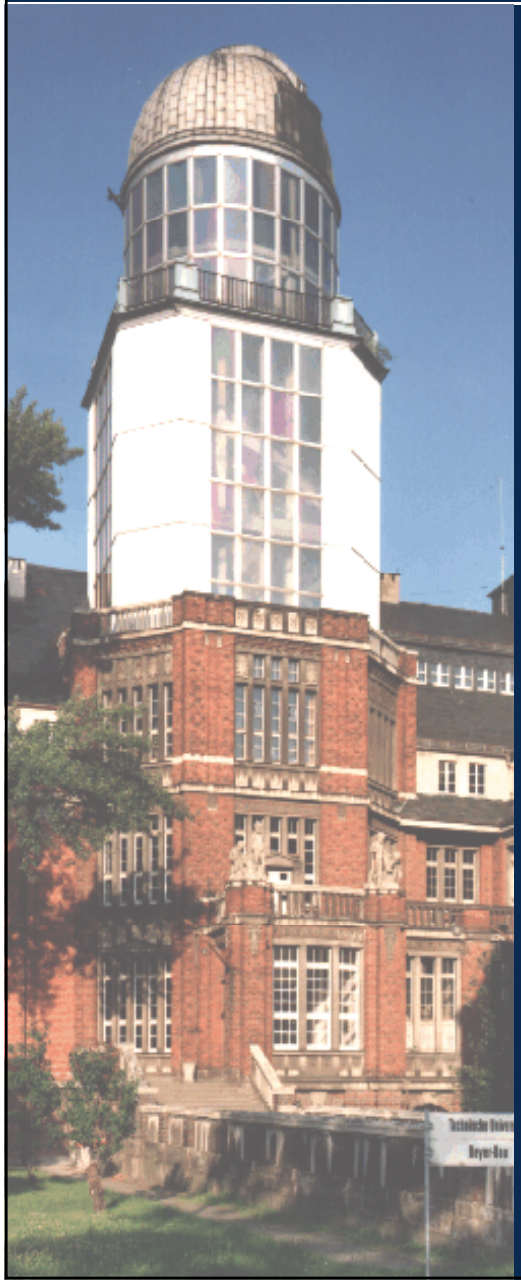
Beispiel P-Q-T_R-Diagramm Entnahme-Kondensation-Heizkraftwerk



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

VATTENFALL

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft



Mathematische Beschreibung der Kraftwerkskennlinien

Mathematische Beschreibung der Kraftwerkskennlinien

- Basierend auf den berechneten Datensätzen erfolgt eine mathematische Beschreibung des Heizkraftwerksverhaltens in Abhängigkeit von den Haupteinflussgrößen.

- Diese sind im einfachsten Fall Vorlauf-, Rücklauftemperatur und Heiznetzmassestrom.

$$P_{Kl} = f(\dot{m}_R, t_V, t_R, \ldots)$$

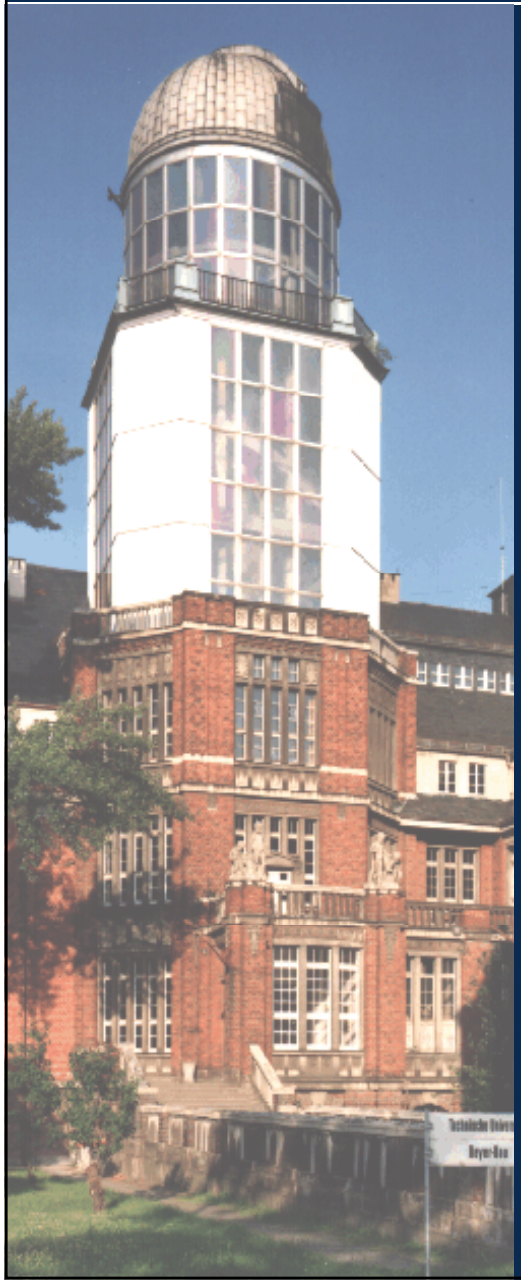
- Bei Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerken sind z.B.
  - die Kühlwassereintrittsbedingungen und die
  - Dampferzeugerlast (Frischdampf) zu berücksichtigen.

- Die Untersuchung ist objektspezifisch durchzuführen. Zur Zeit abgeschlossene Projekte sind z.B. das GuD-HKW Berlin-Mitte /Tost 09/. Weitere Heizkraftwerke befinden sich in Bearbeitung.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

VATTENFALL

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft



Berechnung des Stroms aus Kraft-Wärme-Kopplung

BERECHNUNG DES STROMS IN KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

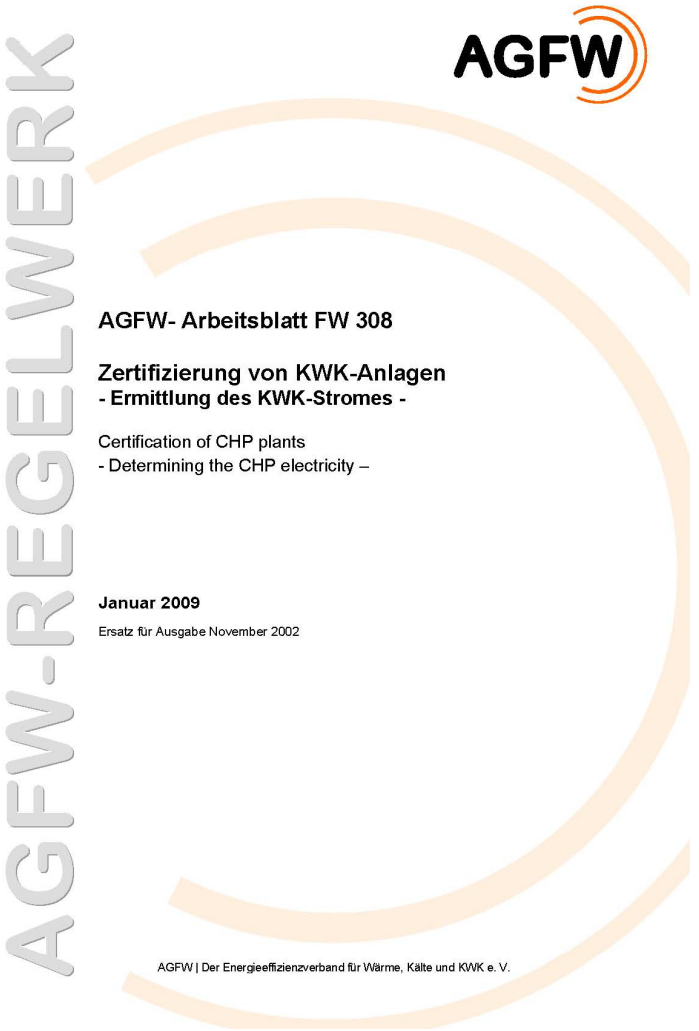
Problemstellung

„Den Prozess kann man als dampfseitige Parallelschaltung eines Gegendruck- und eines Kondensationsprozesses auffassen. Beide beeinflussen sich jedoch gegenseitig im Betriebsverhalten. Insofern ist eine Aufteilung des gesamten erzeugten Stroms in einen Anteil „Gegendruckstrom" und einen Anteil „Kondensationsstrom" nicht ohne weiteres möglich." /VDI 4608-1/

Lösung

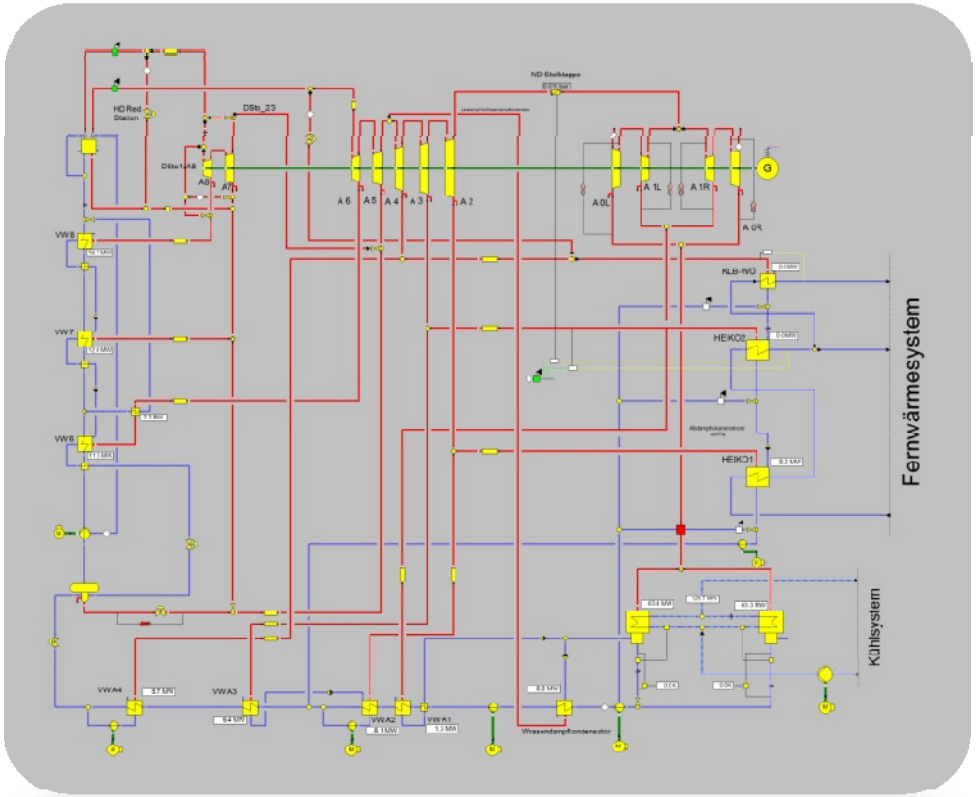
- ✓ Der KWK-Anteil eines Heizkraftwerkes mit Stromverlust infolge Wärmeauskopplung (Entnahme-Kondensations-HKW) kann mittels Kreislaufrechnungen erfolgen /FW 308/.

Mit Kreislaufrechnungen ist der exakte Wert für den KWK-Strom berechenbar.



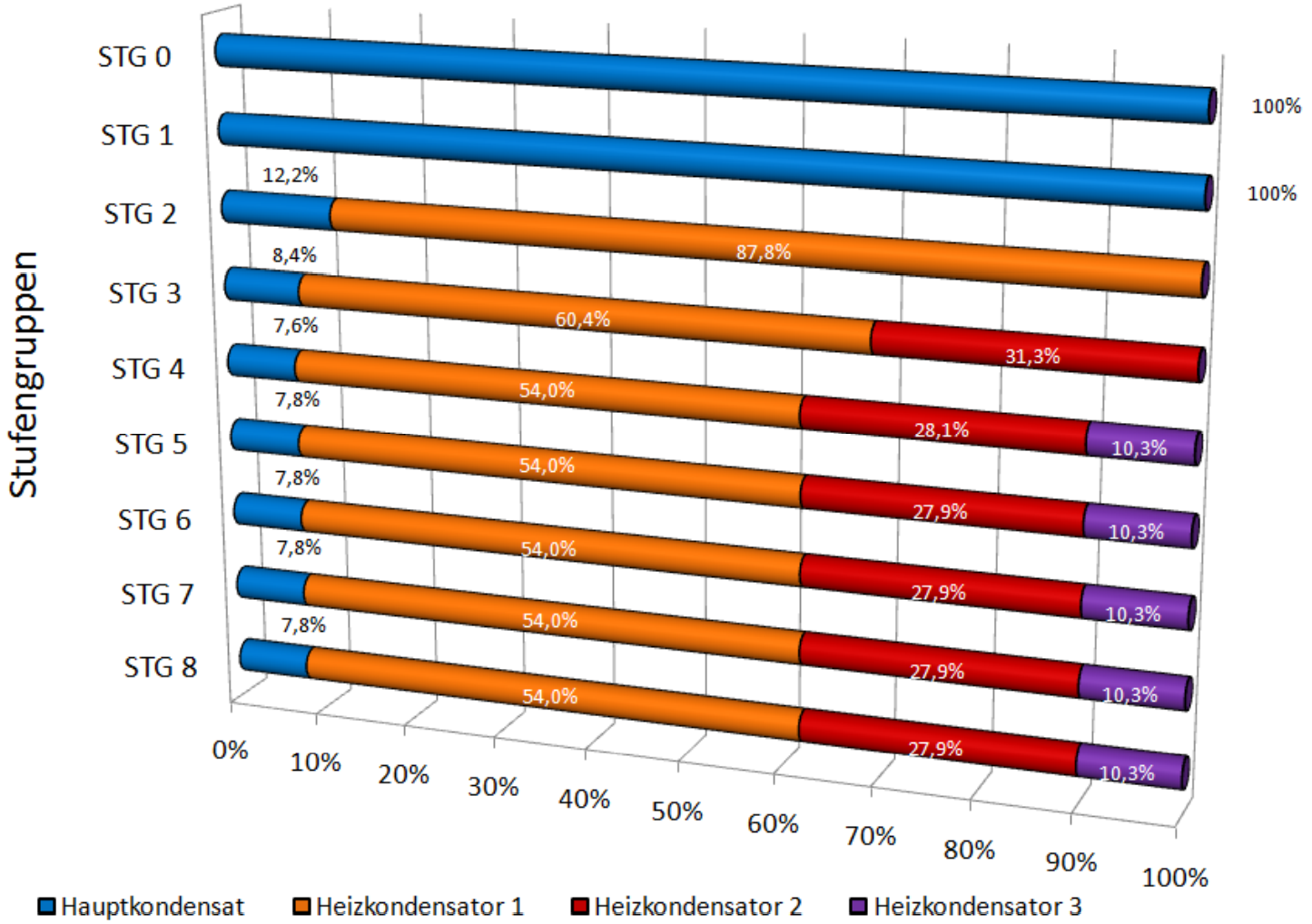
VORGEHENSWEISE MONATLICHER KWK-STROM BERECHNUNGEN MIT EBSILON®*PROFESSIONAL*

- Vorgabe von Monatsmittelwerten
  - Vor- und Rücklauftemperatur
  - Heiznetzmassestrom
  - Klemmenleistung
  - Frischdampfdruck
  - Frischdampf- und Zwischenüberhitzungstemperatur
  - Kühlwassereintrittsbedingungen (Kondensationsdruck)
- Eine Kreislaufrechnung ergibt monatsmittlere „Leitungs- und Bauteilwerte"
- Umsetzung der Aufteilung KWK-Anteil und Kondensations-Anteil mittels *EbsScript-Code*
- Ein- und Ausgabe: User-Excel-Schnittstelle



Quelle: Berechnung des KWK-Stroms nach der „BEWAG-Methode" /Wirths 09/

AUFTEILUNG DES KWK-ANTEILS JE STUFENGRUPPE



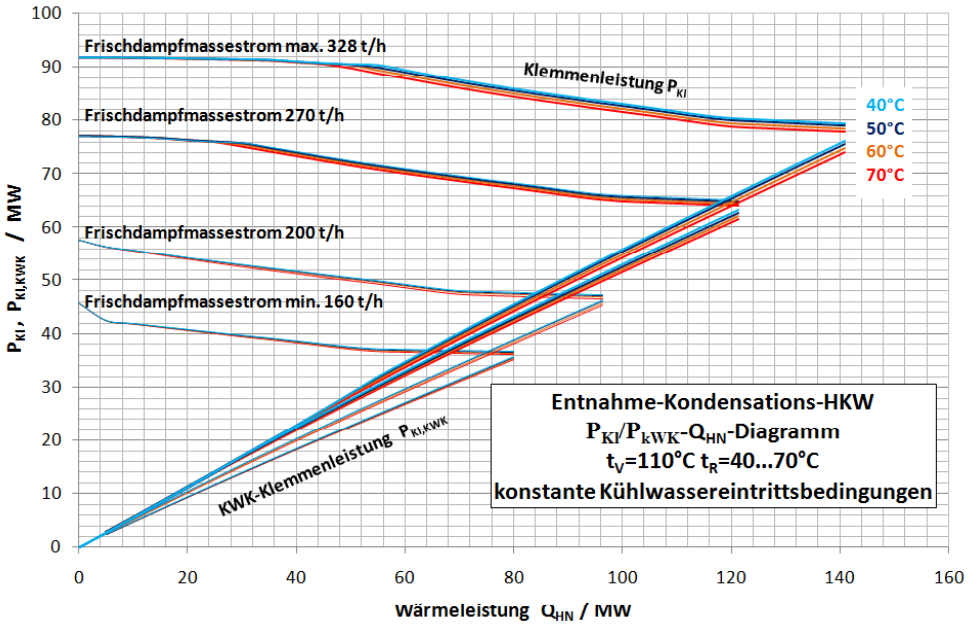
Beispiel: Eigene Rechnung /Wirths 09/

BEISPIEL:

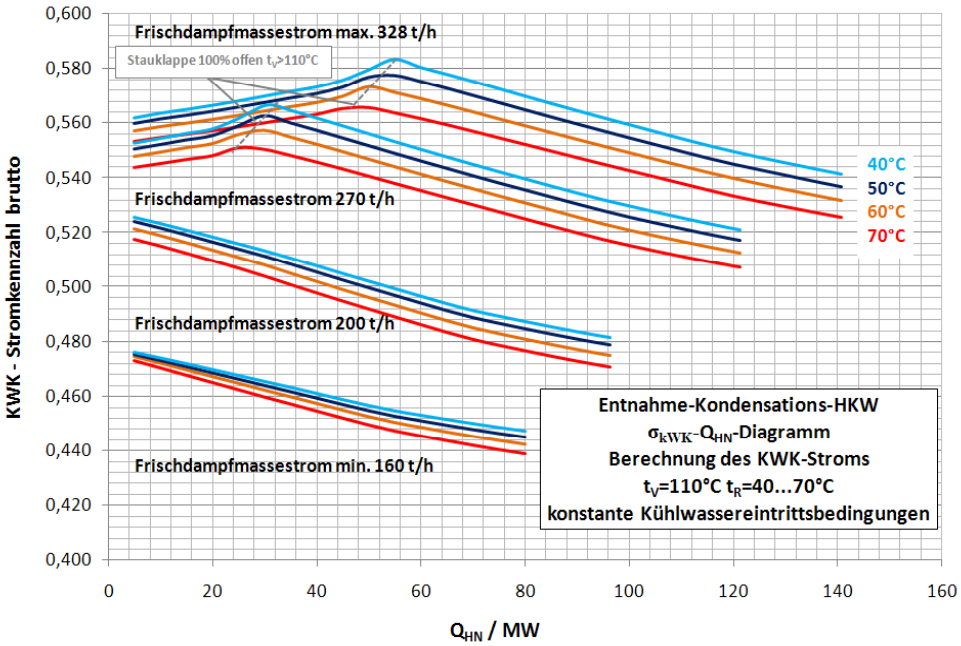
KWK-STROM FÜR EIN ENTNAHME-KONDENSATIONS-HKW

BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER RÜCKLAUFTEMPERATUREN

P_{KWK}/P_{KI}-Q_{HN}-Diagramm



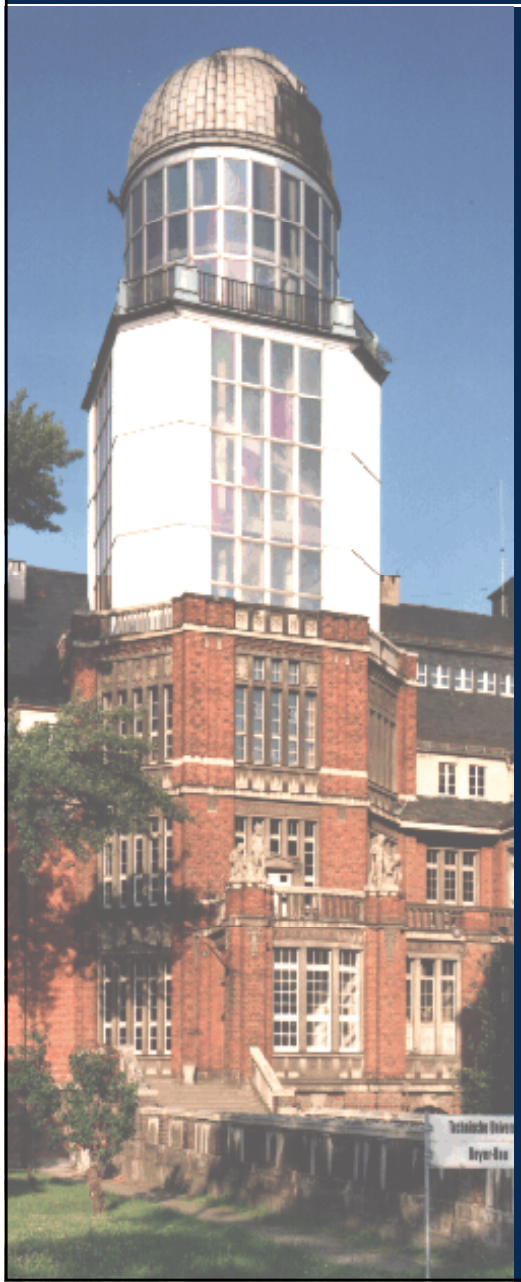
σ_{KWK}-Q_{HN}-Diagramm



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

VATTENFALL

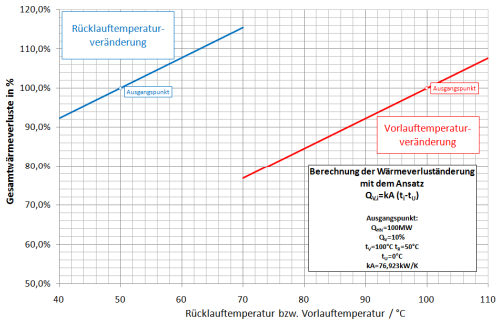
Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft



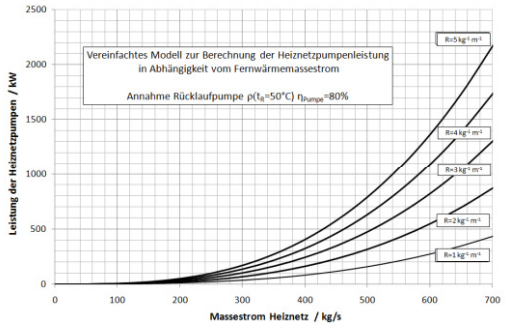
Thermohydraulische Analyse/Berechnungen des Fernwärmenetzes

Thermische und Hydraulische Analyse von Fernwärmesystemen

Näherungsmodelle



Thermisch



Hydraulisch

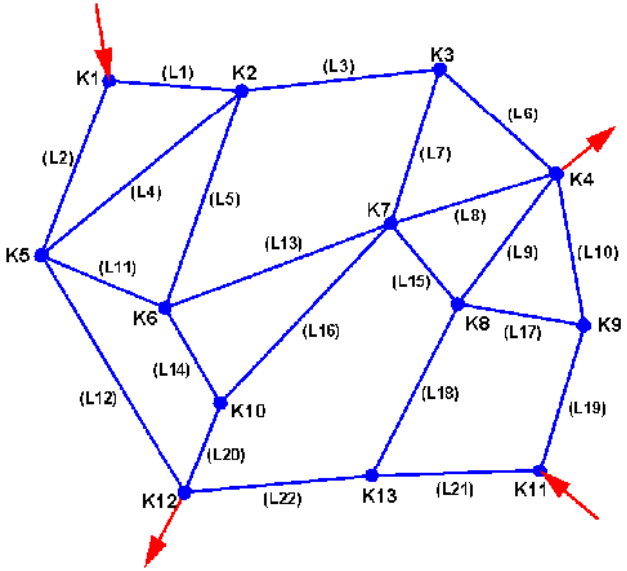
Basis:

- kA-Wert des Fernwärmesystems

Basis:

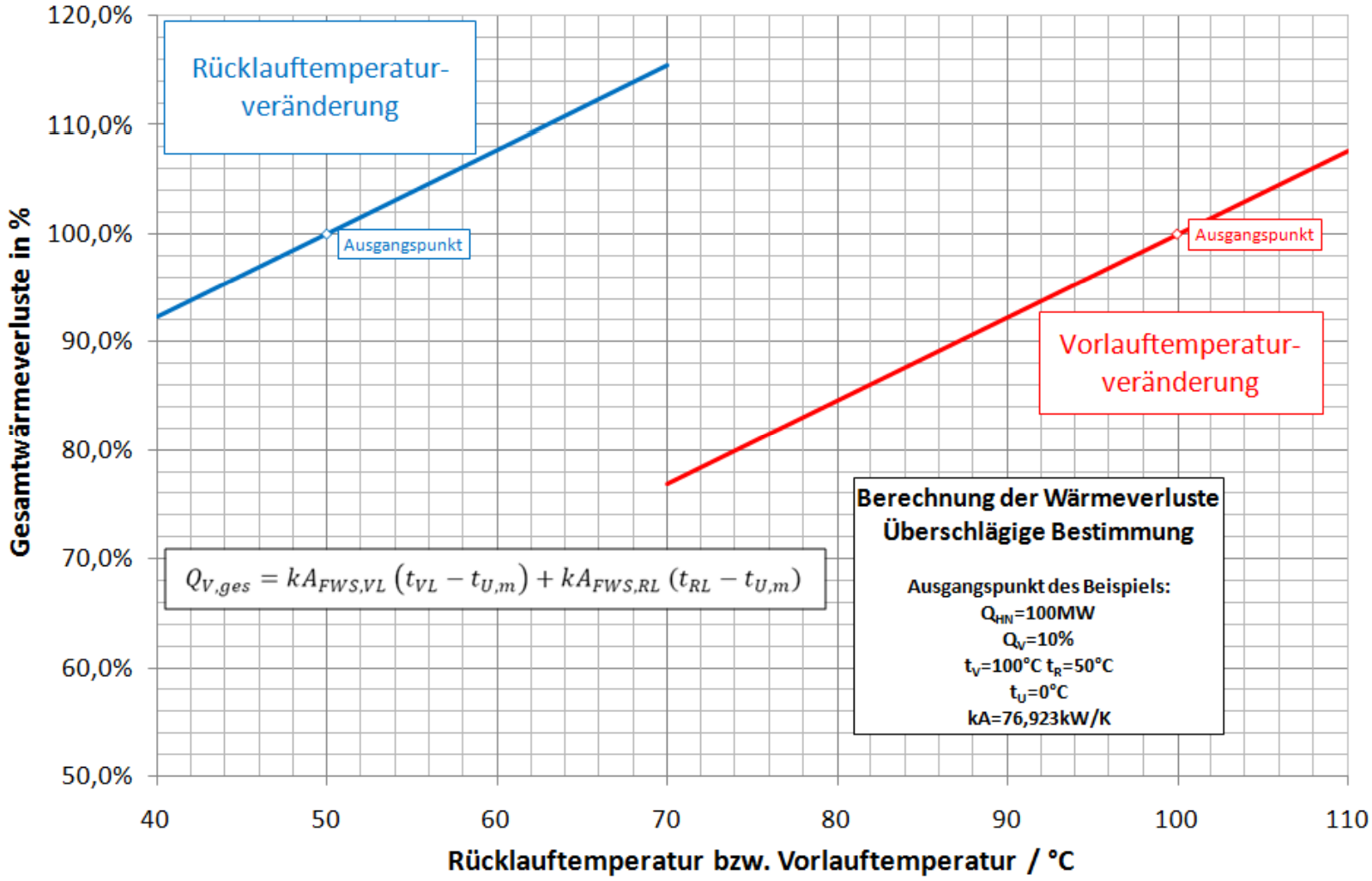
- Netzkennlinie

Thermohydraulische Netzberechnung

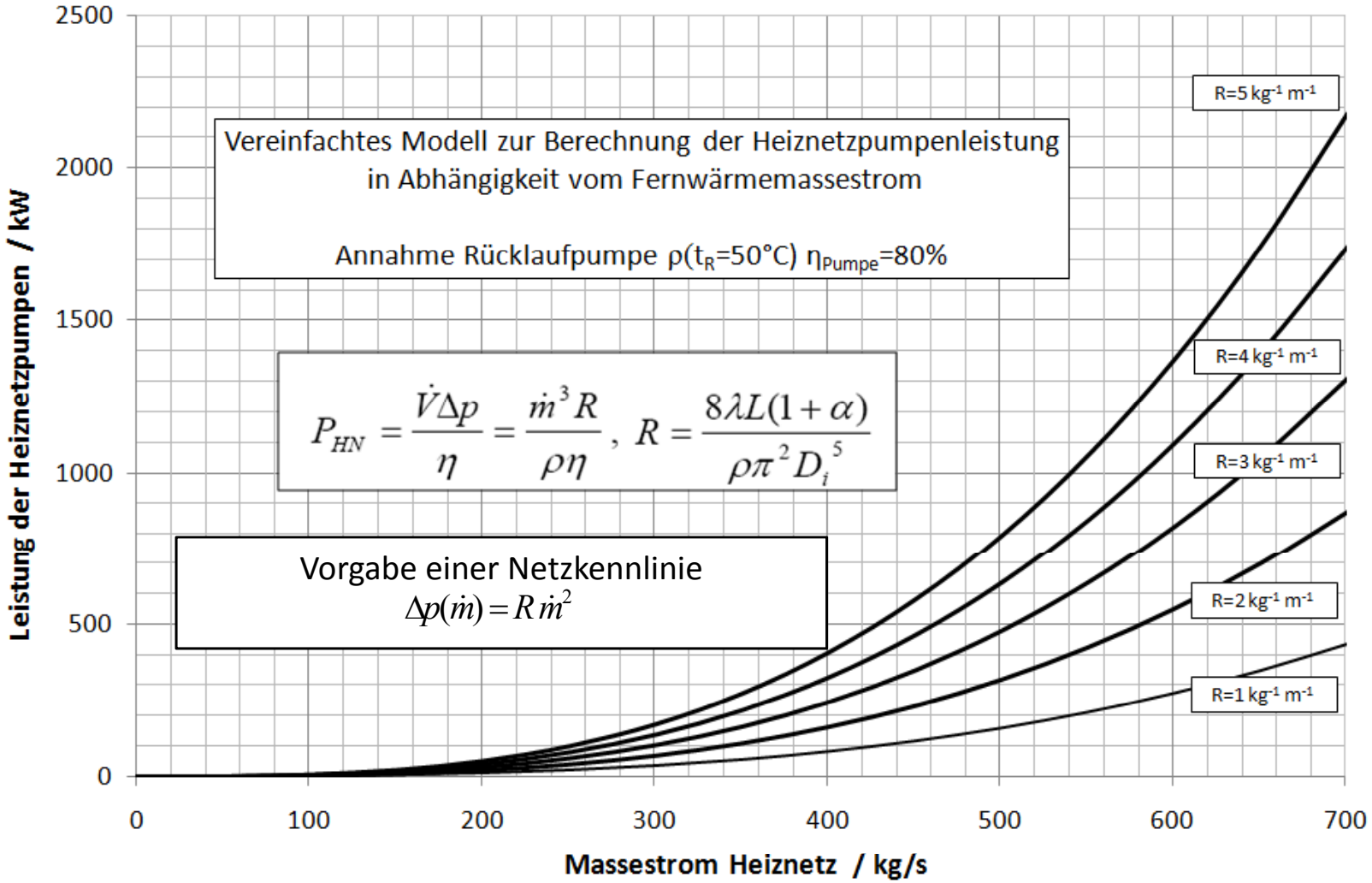


Quelle: /Strelow 09a/

NÄHERUNGSMODELL ZUR BERECHNUNG DER HEIZNETZWÄRMEVERLUSTE



NÄHERUNGSMODELL ZUR BERECHNUNG DER PUMPENLEISTUNG



KOPPLUNG MIT THERMOHYDRAULISCHEN NETZRECHENPROGRAMMEN

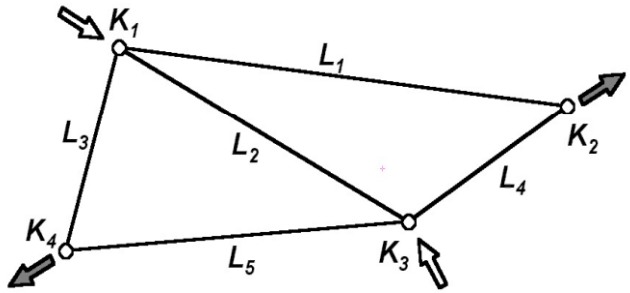
EINFACHES BEISPIEL:

HEIZKRAFTWERKSKENNLINIEN – FERNWÄRMESYSTEM - KUNDENANLAGENSIMULATION

Netz - Tabelle | Berechnung

	Erzeuger 1	Erzeuger 2	Nutzer 1	Nutzer 2
Q / kW	**2000,00**	2310,69	878,49	2577,58
m / kg s^{-1}	6,35	**10,00**	**6,00**	10,35
kA /kW K^{-1}	-	-	-	**250,00**
Φ / -	-	-	-	0,85
T_V / °C	**110,00**	**90,00**	84,86	89,58
T_R / °C	35,06	34,98	**50,00**	30,31

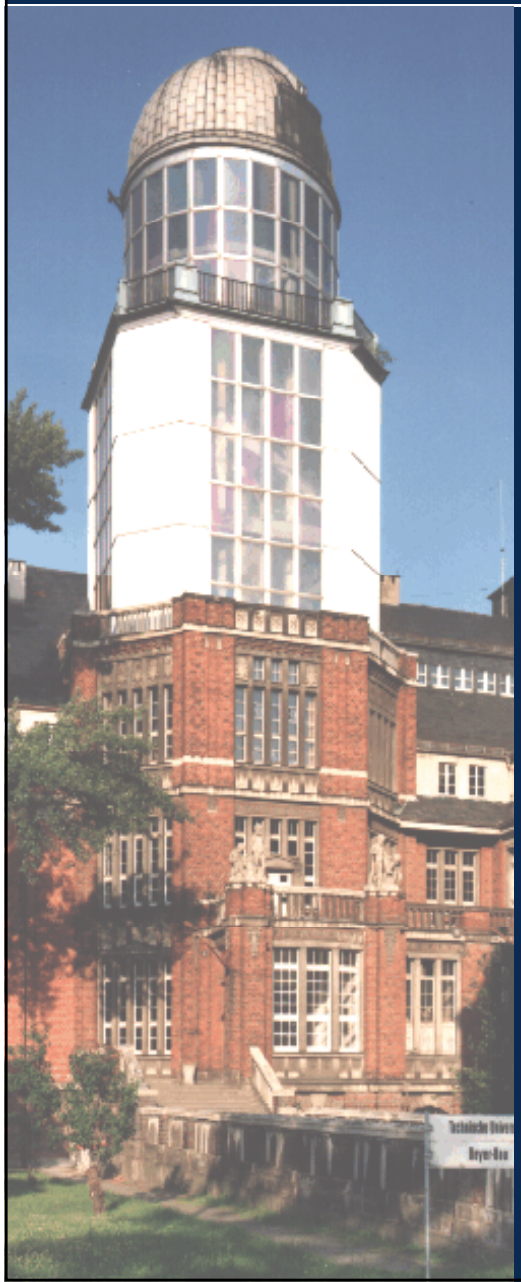
Summe Erzeuger /kW	4310,69
Summe Nutzer kW	3456,07
Verluste / kW	854,61
Bilanz	0



Stationäre Simulation des hydraulischen und thermischen Verhaltens eines Rohrleitungsnetzes (Prof. Dr. Strelow Test-Version 2009/1 für Excel)

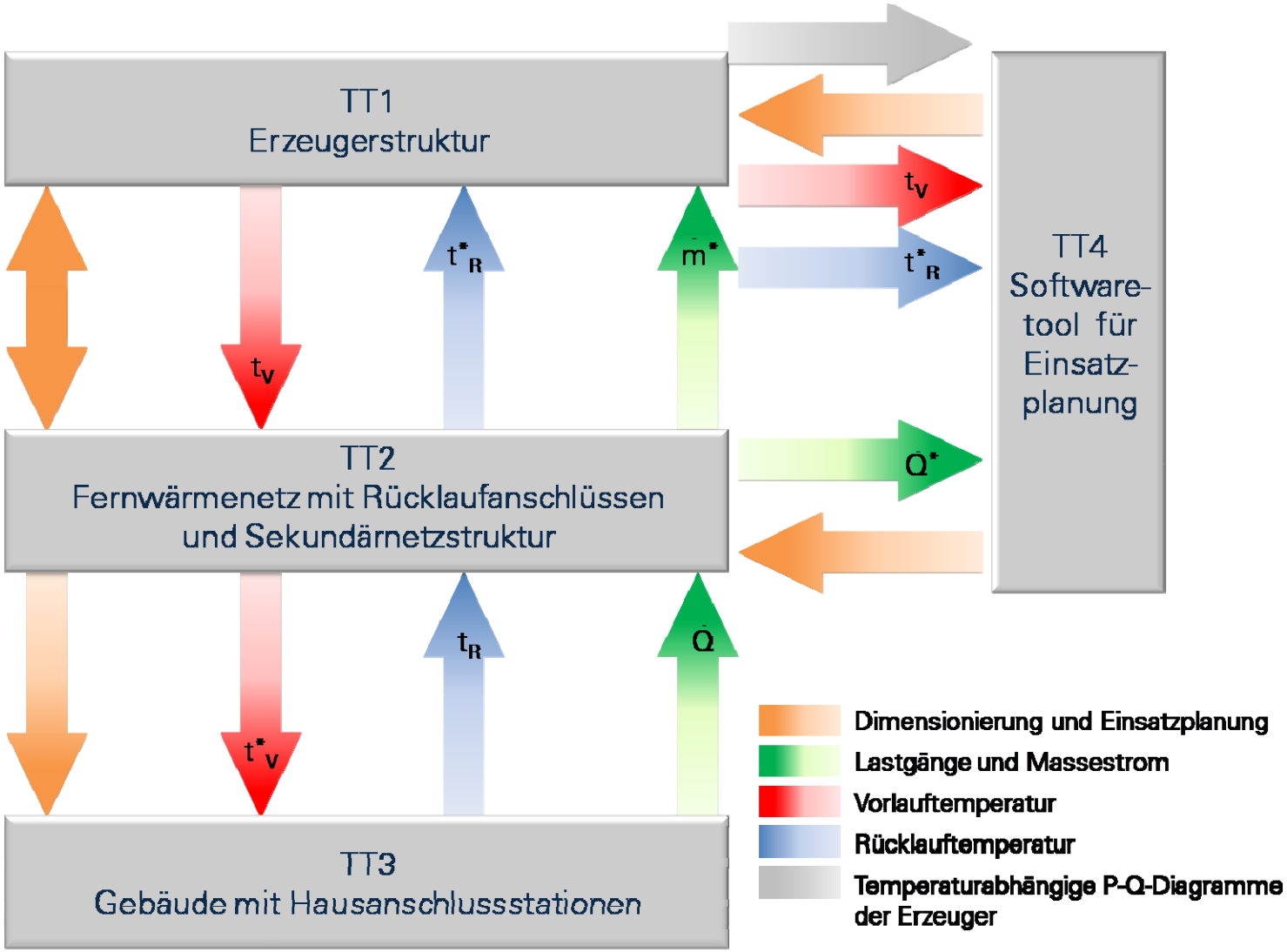
8x10	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	p_{min} / bar	h_{geo} / m	m^{ea} / kg s-1	T_{in} / °C	p / bar	T_{knt} / °C
K1	x	x	x								2,82	0,00	6,35	110,00	3,38	102,69
K2	x			x							2,82	0,00	-6,00	0,00	3,19	84,86
K3		x		x	x						2,82	0,00	10,00	90,00	3,44	90,00
K4			x		x						2,82	0,00	-10,35	0,00	2,82	89,58
K5						x	x	x			2,00	0,00	-6,35	0,00	2,06	35,06
K6						x			x		2,00	0,00	6,00	50,00	2,25	50,00
K7							x		x	x	2,00	0,00	-10,00	0,00	2,00	34,98
K8								x		x	2,00	0,00	10,35	30,31	2,62	30,31
l / m	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00	1250,00					1,32	
d / mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					0,94	
k / µm	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00					1,44	
u / W m^{-2}K^{-1}	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00					0,20	
m / kg s^{-1}	2,77	-1,46	5,04	-3,23	5,32	-2,77	1,46	-5,04	3,23	-5,32					0,20	
Δp / bar	-0,19	0,06	-0,56	0,25	-0,62	0,19	-0,06	0,56	-0,25	0,62						
T^{ein} / °C	102,69	90,00	102,69	90,00	90,00	50,00	35,06	30,31	50,00	30,31	ρ / kg m^{-3}	g / m s^{-2}	η / kg m^{-1}s^{-1}	c / kJ kg^{-1}K^{-1}	p_{um} / bar	T_{um} / °C
T^{aus} / °C	89,87	70,78	95,36	80,55	84,11	45,35	30,93	29,40	45,95	29,44	1000,00	10,00	1,0000E-03	4,20	1,00	20,00
Wärmeverlust	149,41	117,57	155,05	127,95	131,58	54,21	25,30	19,33	54,83	19,38						

Oberfläche Programm NetzF /Strelow 09b/ - Beispiel aus Diplomarbeit von HAAS /Haas 09/



Zusammenfassung und Ausblick

ANWENDUNG IM PROJEKT MULTILEVEL DISTRICT HEATING



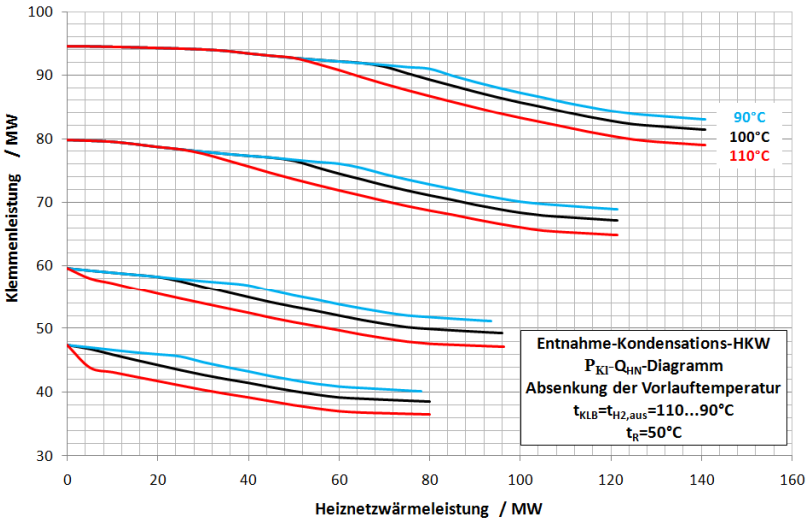
ANWENDUNGSBEISPIELE TEMPERATURABHÄNGIGER KRAFTWERKSKENNLINIEN

Einsatz bei der Bewertung

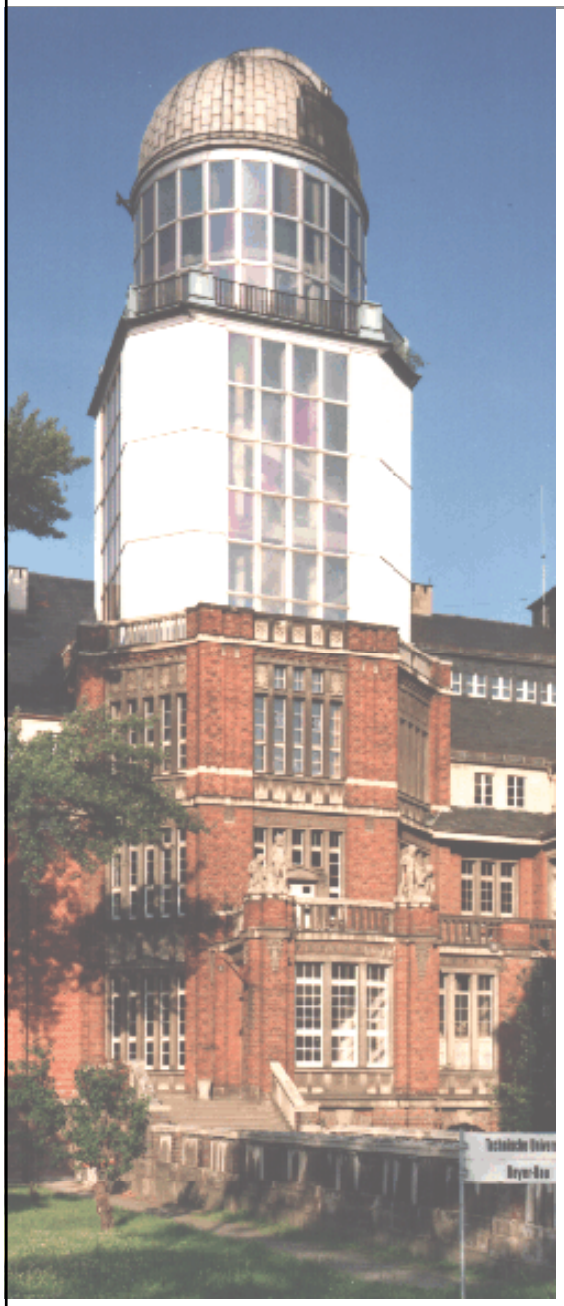
- von Vorlauftemperaturabsenkungen,
- von Maßnahmen zur Reduzierung der Rücklauftemperatur,
- des Anschlusses von Kunden an den Wärmenetzrücklauf,
- des Anschlusses von Absorptionskältemaschinen ,
- der Integration von erneuerbaren Energien in Fernwärmesysteme (z.B. Solarenergie),
- von Netzspeichereffekten,
- der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen.

Basis für komplexe technische, ökonomische und ökologische Bewertung.

Weitere Anwendungsbeispiele temperaturabhängiger Kraftwerkskennlinien



- Thermohydraulische Netzberechnungsprogramme /MDH/
- Prognose und Optimierung der Fernwärmeeinspeiseleistung unter Berücksichtigung thermisch instationärer Speichervorgänge im Netz – Bessere Auslastung von KWK-Anlagen /Recknagel 09a/ , /Recknagel 09b/
- Einsatz in Optimierungsprogrammen/ Einsatzplanung /MDH/



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Quellen und Literaturnachweis – 1/2

/Dittmann 09a/ Dittmann, A., Sander, Th., Menzler, G.: Die ökologische Bewertung von Wärme und Elektroenergie – ein Instrument zur Erhöhung der Akzeptanz der Kraft-Wärme-Kopplung

/Dittmann 09b/ Dittmann, A.; Sander, Th.: Hocheffizienz der Kraft-Wärme-Kopplung aus Sicht der EU. Euroheat & Power Ausgabe 8/2009

/Haas 09/ Haas D.: Weiterentwicklung und Validierung eines Moduls zur thermohydraulischen Simulation von Nahwärmenetzen, Diplomarbeit an der FH Gießen

/MDH/ LowEx-Fernwärme MULTILEVEL DISTRICT HEATING Forschungsprojekt TU Dresden Abschlussbericht in 2010

/Recknagel 09a/ Recknagel V., Wirths, A., Tost, A.
Thermisch-instationäre Speichervorgänge in Fernwärmenetzen Eine Option zur besseren Auslastung von KWK-Anlagen VDI-Tagung Optimierung in der Energiewirtschaft 2009

/Recknagel 09b/ Recknagel, V.: Prognose und Optimierung der Fernwärmeeinspeiseleistung unter Berücksichtigung thermisch-instationärer Speichervorgänge im Netz (Arbeitstitel), Manuskript zur Dissertationsschrift an der TU Berlin, 2009

/Strelow 09a/ Strelow, O.: Fernwärmenetze Matrix-Modell für die thermohydraulische Berechnung und dynamische Simulation ETA[energie] 04/2009

/Strelow 09b/ Energie- und Umweltberatung Dr. Strelow & Partner, Ingenieure; Excel-Programm zur thermohydraulischen Berechnung eines Rohrleitungsnetzes

Quellen und Literaturnachweis – 2/2

/Tost 09/ Tost, A.: Einfluss der Vor- und Rücklauftemperaturen auf den GuD-Betrieb am Beispiel des Heizkraftwerkes Berlin Mitte, Diplomarbeit an der TU Dresden

/Wirths 09/ Wirths, A.: Brennstoffaufteilung HKW Moabit - Analyse, Bewertung und Vorschläge zur Nutzung und Umsetzung des Ebsilon-Profils 2008 24.04.2009 Bericht, Vattenfall Europe Wärme AG *unveröffentlicht*

Technische Richtlinien

/FW 308/ FW308: AGFW- Arbeitsblatt FW 308 Zertifizierung von KWK-Anlagen - Ermittlung des KWK-Stromes – Januar 2009 Ersatz für Ausgabe November 2002

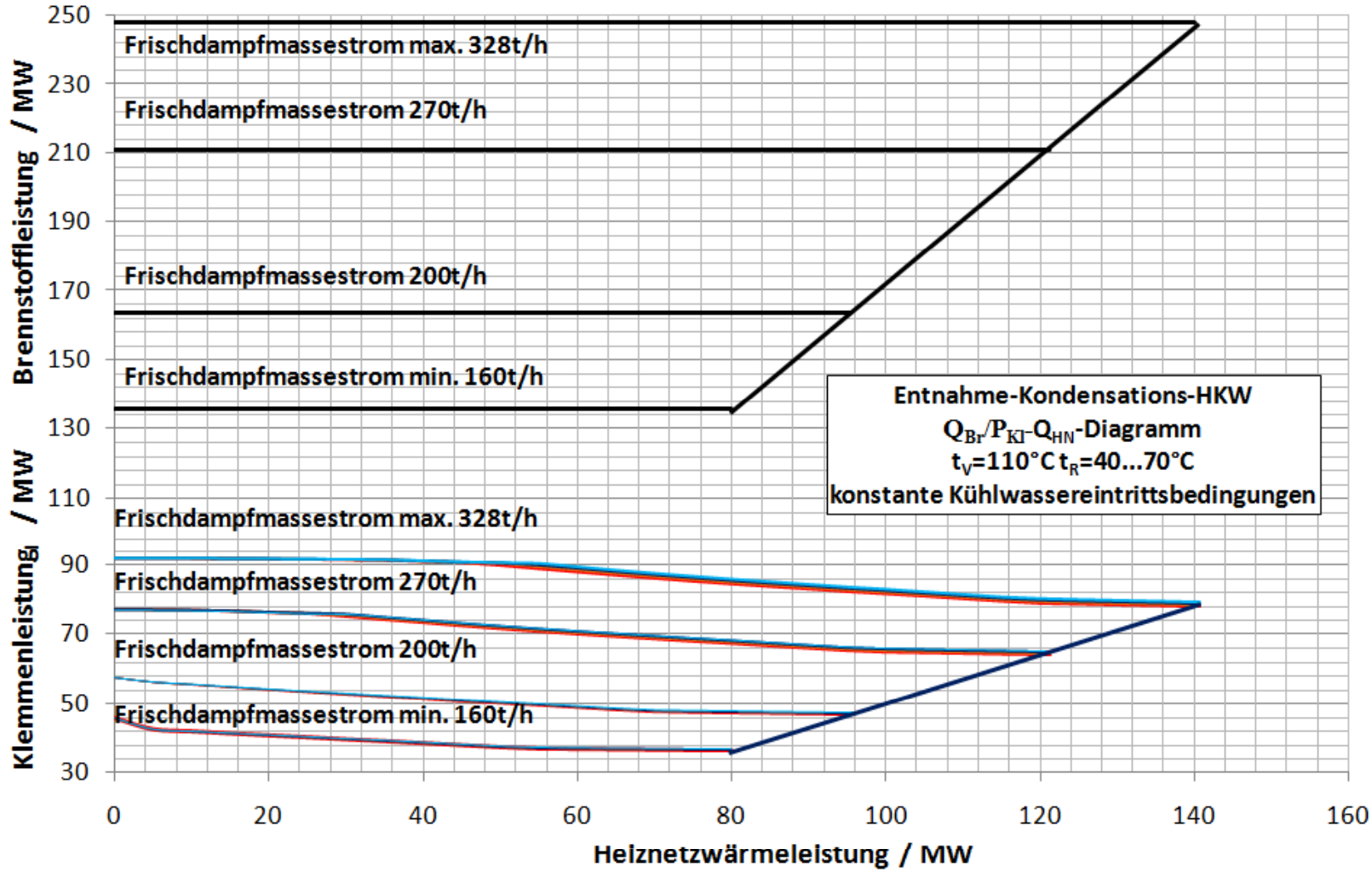
/VDI 4608-1/ VDI 4608-1: Energiesysteme – Kraft-Wärme-Kopplung – Begriffe, Definitionen, Beispiele. 2001

/DIN V 4701-10/ DIN V 4701-10 : Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen

/2004/8/EG/ Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.02.2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt. Amtsblatt der Europäischen Union 21.02.2004 (L 52/50)

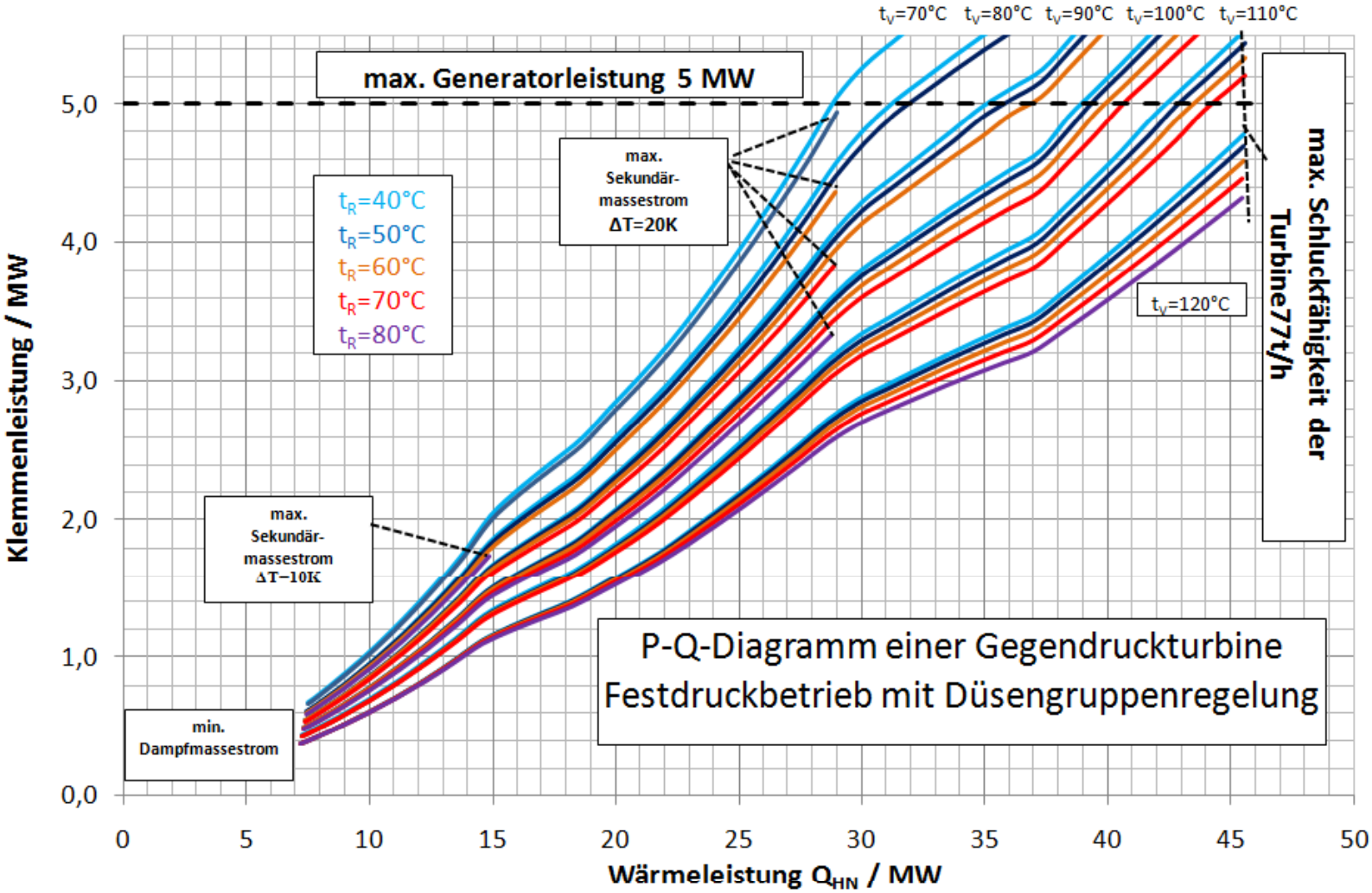
BACKUP FOLIEN

BRENNSTOFFLEISTUNG



BACKUP FOLIEN

P-Q-Diagramm einer Gegendruckturbine



BACKUP FOLIEN

DER DURCHRECHNER

EbsScript - [EbsScript-Editor (neu2 110-70-ohne-KLB328) - Durchrechner [Id: 4]]

EbsScript Bearbeiten Ansicht Erstellen Ausgabe Extras Fenster ?

(Global)

```
//führt in allen Unterprofilen eine Simulation durch
var i,j: integer;

begin

    j:=GetLastProfileId;
    for i:=0 to j do begin
        setCalcProfile (i);
        simulate;
        Berechnungsstatus_2.MEASM:=@calcoptions.res.status;
        end;
    end;
end;
```

Pascal-Elemente Leiste
- Controls
- Constants
- Types
- Logic
- Functions

Schlüsselworte

```
simulated profile: 16            [Referenz], Rechnung nach 293 Iterationen und 1856 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 18            [Referenz], Rechnung nach 574 Iterationen und 3744 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 19            [Referenz], Rechnung nach 531 Iterationen und 3370 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 20            [Referenz], Rechnung nach 452 Iterationen und 2746 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 21            [Referenz], Rechnung nach 467 Iterationen und 2901 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 22            [Referenz], Rechnung nach 321 Iterationen und 2106 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 23            [Referenz], Rechnung nach 385 Iterationen und 2355 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 24            [Referenz], Rechnung nach 411 Iterationen und 2496 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 25            [Referenz], Rechnung nach 431 Iterationen und 2776 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 26            [Referenz], Rechnung nach 503 Iterationen und 3261 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 27            [Referenz], Rechnung nach 478 Iterationen und 2980 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 28            [Referenz], Rechnung nach 520 Iterationen und 3198 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 29            [Referenz], Rechnung nach 657 Iterationen und 3946 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 30            [Referenz], Rechnung nach 694 Iterationen und 4165 ms mit Warnungen abgeschlossen !
simulated profile: 31            [Referenz], Rechnung nach 699 Iterationen und 4181 ms mit Warnungen abgeschlossen !

Program finished successfully!   Time: 9/24/2009 3:03:03 PM
Exit-Code: 0
```

Ausgabe-Leiste

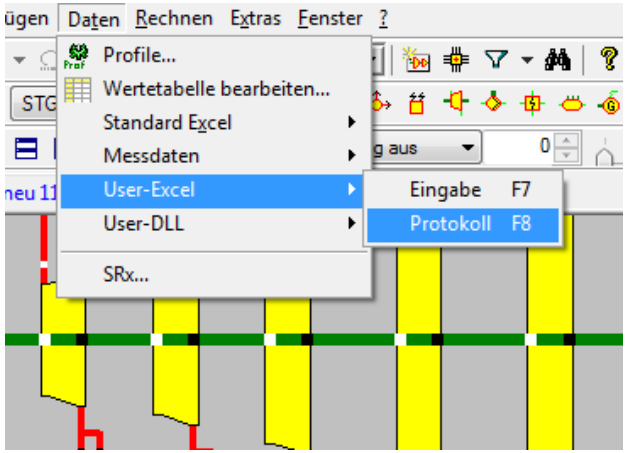
Erstellen | Konsole | Suchergebnisse 1 | Suchergebnisse 2

Bereit Z.: 39, Sp.: 1 NUM

BACKUP FOLIEN

EIN- UND AUSGABE VON PARAMETERN

USER EXCEL SCHNITTSTELLE



EbsNames Row 5	EbsProfiles Row 7 to 50	EbsUnits Row 6	
Profil Nummer	TVLHSOLL.MEASM	TRLC.MEASM	Regler_KLB.FACT
-			
0	110,0	50,0	0,0
1	110,0	50,0	0,0
2	110,0	50,0	0,0
3	110,0	50,0	0,0
4	110,0	50,0	0,0
5	110,0	50,0	0,0
6	110,0	50,0	0,0
7	110,0	50,0	0,0
8	110,0	50,0	0,0
9	110,0	50,0	0,0
10	110,0	50,0	0,0
11	110,0	50,0	0,0
12	110,0	50,0	0,0
13	110,0	50,0	0,0
14	110,0	50,0	0,0
15	110,0	50,0	0,0
16	110,0	50,0	0,0

EINGABE

EbsNames Row 5	EbsProfiles Row 7 to 50	EbsUnits Row 6					
Profil Nummer	Berechnungsstatus.MEASM	DKA.m	DKA.m	DKA.p	DKA.t	Klemmenleistung.Q	PKIKWK.MEASM
-	-	t/h	kg/s	bar	°C	kW	-
0	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91960,6	0,0
1	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91923,7	2767,1
2	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91872,3	5548,3
3	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91700,3	8340,1
4	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91692,6	11145,8
6	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91591,3	13967,5
7	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91476,1	16805,6
8	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	91336,5	19662,2
9	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	90992,0	22532,0
10	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	90638,8	25443,7
11	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	89879,4	28287,9
12	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	88869,6	31011,8
13	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	87957,8	33706,0
14	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	87022,3	36368,3
15	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	86105,1	39000,7
16	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	85258,8	41606,9
17	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	84458,6	44187,3
18	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	83697,8	46744,1
19	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	82985,2	49278,9
20	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	82244,3	51790,4
21	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	81571,4	54282,6
22	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	80899,0	56754,6
23	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	80170,6	59198,4
24	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	79434,0	61615,8
25	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	78831,1	64026,1
26	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	78579,7	66446,3
27	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	78351,7	68856,4
28	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	78129,0	71256,0
29	1,0	328,0	91,1	199,6	540,0	77912,0	73647,3
30	1	328,0000036	91,11111211	199,5648737	540	77877,75998	74029,27602

AUSGABE