

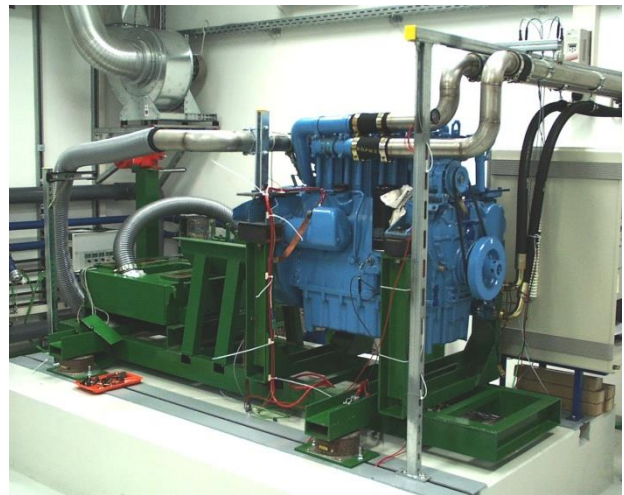
Betriebsverhalten eines Abgasturboladers

0. Grundlagen

- Kennfelder von Verbrennungsmotoren
- Bauformen und Wirkungsweisen von Abgasturboladern (ATL)
- Änderung von Leistung, Energiedichte und spez. Verbrauch durch Aufladung
- Drehzahlabhängigkeit der Drehmomentsteigerung bei unregelmäßigem ATL
- Energieflussdiagramm eines aufgeladenen Verbrennungsmotors

1. Gegeben

- 4-Takt-Vielstoff-Dieselmotor MF-4RTA:
 - Hubraum: $7,46 \text{ dm}^3$
 - Hub/Bohrung: $145/128 \text{ mm}$
 - Nennleistung: 160 kW bei 2000 min^{-1}
 - Max. Drehmoment: 860 Nm bei 1500 min^{-1}
 - Verwendeter Kraftstoff: Diesel (EN 590)
 - Turbolader K27, Firma KKK
- Leistungsprüfstand mit Wasserwirbelstrombremse U1-25, Firma Schenk
- Messwerterfassung für Drücke, Temperaturen und Drehzahl des Abgasturboladers sowie für Motor-Betriebswerte und Umgebung
- Visualisierung aller Daten auf PC



2. Aufgabe

Bestimmen Sie in verschiedenen Vollast-Betriebspunkten eines Dieselmotors die Arbeitspunkte seines Abgasturboladers. Stellen Sie die reduzierten ATL-Betriebswerte jeweils im Verdichter- und Turbinenkennfeld dar. Kennzeichnen Sie anhand der Verdichter- und Turbinenkennfelder den Betriebsbereich des Motors für günstigen ATL-Gesamtwirkungsgrad.

3. Versuchsdurchführung

In einer Warmlaufphase des Motors sind zunächst Öltemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und Ansaugtemperatur zu protokollieren. Am betriebswarmen Motor ($T_{\text{Öl}}$ ca. $80 \text{ }^\circ\text{C}$) ist das Volllastmoment in unterer Drehzahl einzustellen. Mit Start der Messsysteme wird entlang der Volllastlinie zur maximalen Leistung in Drehzahlstufen von 100 rpm gefahren. Diese Stufen werden jeweils 1 Minute gehalten und bilden die Auswertefenster für die einzelnen Betriebspunkte. Die visualisierten Messdaten können ausgedruckt werden. Die Messdateien sind anschließend zur späteren Verarbeitung in einer Tabellenkalkulation zu exportieren.

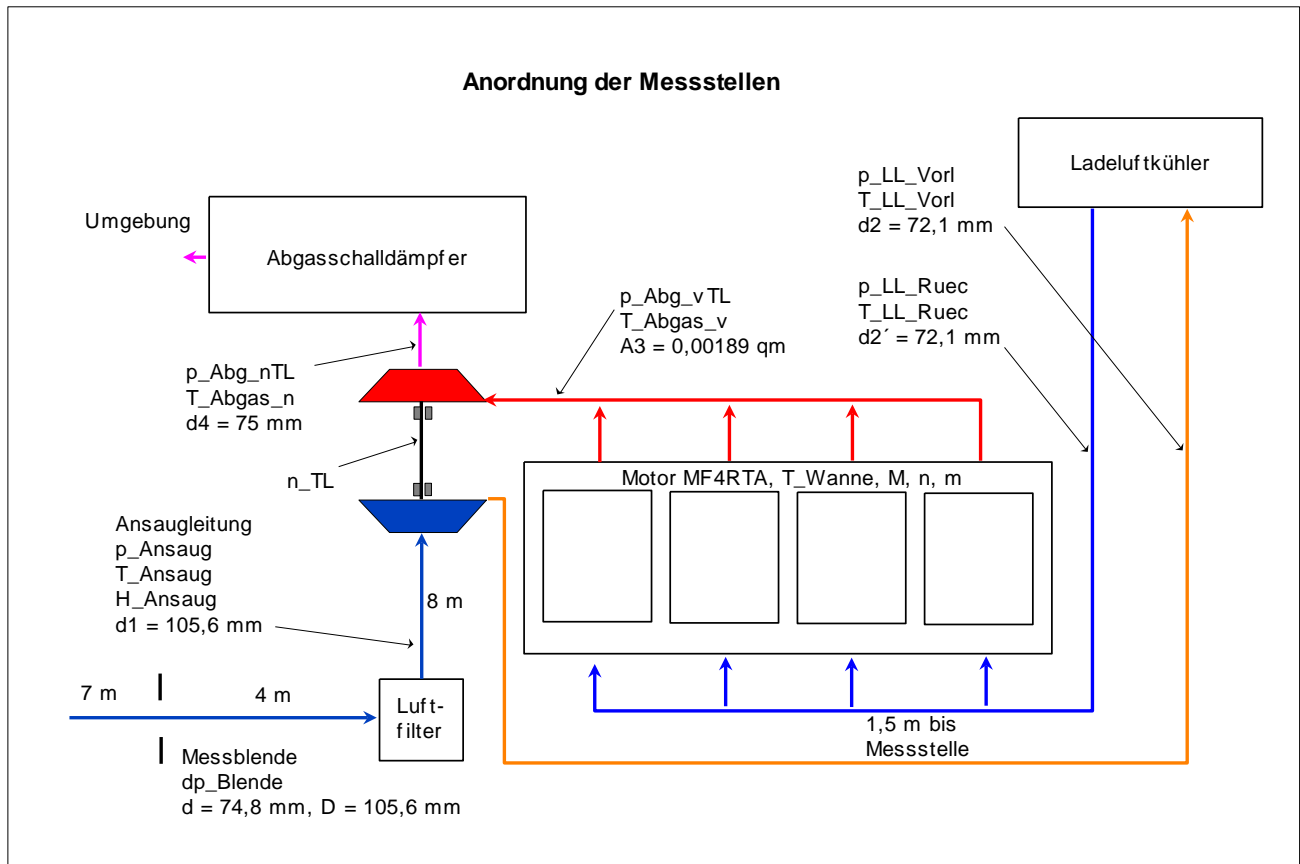
4. Auswertung

- Beschreibung der Aufgabe
- Versuchsaufbau (Skizze), Versuchsbeschreibung
- Messprotokolle, Messschriebe
- Berechnung der Ansaugvolumenströme
- Berechnung aller reduzierten Betriebswerte von Verdichter und Turbine (exemplarisch und tabellarisch)
- Kennzeichnung der Betriebspunkte im Verdichter und Turbinenkennfeld
- Angabe des Motorbetriebspunktes mit bestem ATL-Gesamtwirkungsgrad
- Fehlerbetrachtung

Hinweis: Bringen Sie zum Praktikumtermin Ihre email-Adresse mit!

5. Messstellenliste

Mess- stelle	Gerät	Kurzzeichen	Name	Fehler +/-	=	Bemerkungen
03	Therm	dp_Blende	Differenzdruck Messblende	0,15 mbar	V_1	Wirkdruck
20	Therm	p_Ansaug	Ansaugdruck	2,4 mbar	p_{1st}	reduzieren zu p_{1t}
05	Therm	T_Ansaug	Ansaugtemperatur	0,5 °	T_{1st}	reduzieren zu T_{1t}
06	Therm	H_Ansaug	Luftfeuchte	k.A.		
10	Therm	T_Wanne	Motoröltemperatur	0,5 °		im Ölsumpf
13	Therm	T_LL_Vorl	Ladelufttemperatur vom Verdichter zum Ladeluftkühler	0,5 °	T_{2st}	reduzieren zu T_{2t}
14	Therm	T_LL_Ruec	Ladelufttemperatur vom Ladeluftkühler zum Motor	0,5 °	$T_{2st'}$	
15	Therm	T_Abgas_v	Abgastemperatur vTL	0,5 °	T_{3st}	reduzieren zu T_{3t}
16	Therm	T_Abgas_n	Abgastemperatur nTL	0,5 °	T_{4st}	
1	mgc+	p_LL_Vorl	Ladedruck vom Verdichter zum Ladeluftkühler	0,025 bar	p_{2st}	reduzieren zu p_{2t}
9	mgc+	p_LL_Ruec	Ladedruck vom Ladeluftkühler zum Motor	0,015 bar	$p_{2st'}$	
2	mgc+	p_Abg_vTL	Abgasdruck vTL	0,025 bar	p_{3st}	reduzieren zu p_{3t}
3	mgc+	p_Abg_nTL	Abgasdruck nTL	0,01 bar	p_{4st}	
5	mgc+	M	Motor-Drehmoment	2 Nm		
6	mgc+	m	Kraftstoffmasse	0,005 kg		
7	mgc+	n	Motordrehzahl	0,2 rpm		
8	mgc+	n_TL	Drehzahl Turbolader	12 rpm	n_V n_T	reduzieren zu n_{redV} n_{redT}



6. Messprotokoll für manuell zu erfassende Größen

physikalische Größe	Messstelle	Einheit	Zeitpunkt der Messung	Messwert
Umgebungsdruck	p_{Ansaug}	mbar	noch vor Start des Motors!	
Motoröltemperatur	T_{Wanne}	°C	im betriebswarmen Zustand	
Ansaugdruck	p_{Ansaug}	mbar	für jeden Motor-Betriebspunkt
Ansaugtemperatur	T_{Ansaug}	°C	in Mitte des Messfensters	
Luftfeuchte	H_{Ansaug}	%	in Mitte des Messfensters	

7. Berechnungsgrundlagen zur Auswertung

7.1 Durchflussberechnung an Normblenden (EN ISO 5167)

Öffnungsverhältnis

$$\beta = \frac{d}{D} \quad d; D = \text{Blenden-, Rohrlinnendurchmesser}$$

Durchflusskoeffizient C: ist abhängig von β , Re_D und D (Tabelle A.1...A.11, ISO 5167)

Reynoldszahl

$$Re_D = \frac{U * D}{\nu} \quad U = \text{Strömungsgeschwindigkeit}$$

$\nu = \text{kinematische Viskosität}$

Expansionszahl ε

- *eingangsseitig*

$$\varepsilon_1 = 1 - \left[0,41 + 0,35 * \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] * \frac{\Delta p}{\kappa * p_1} \quad p_1 = \text{Eingangsdruck, } \kappa = \text{Isentropenexponent}$$

für $0,75 < p_2/p_1 < 1$

- *ausgangsseitig*

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 * \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{p_2}} \quad p_2 = \text{Ausgangsdruck}$$

Massenstrom

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} * \varepsilon_{1(2)} * \frac{\pi}{4} d^2 * \sqrt{2 * \rho_{1(2)} * \Delta p}$$

$\rho_1 = \text{Dichte eingangsseitig}$
 $\rho_2 = \text{Dichte ausgangsseitig}$

Volumenströme

$$q_{m_{1(2)}} = \frac{1}{\rho_{1(2)}} * \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} * \varepsilon_{1(2)} * \frac{\pi}{4} d^2 * \sqrt{2 * \rho_{1(2)} * \Delta p}$$

Index 1 = eingangsseitig
Index 2 = ausgangsseitig

Werte für Prüfstand MF4-RTA:

$$D = 105,6 \text{ mm} \quad \kappa_{\text{Luft}} = 1,4 \quad v_{\text{Luft}} = 11,73 \text{ mm}^2/\text{s}$$
$$d = 74,8 \text{ mm} \quad \rho_l = 1,19 \text{ kg/m}^3$$

7.2 Turbolader

7.2.1 Indizes:

1 = Ansaugseite Verdichter

2 = Druckseite Verdichter

3 = Turbine Motorseite

4 = Turbine Auspuffseite

st = statisch (Druck bzw. Temperatur)

t = total (Druck bzw. Temperatur), bezogen auf Nennweite unendlich

7.2.2 Verdichter

Reduzierter Volumenstrom

$$V_{1red} = V_{1t} * \sqrt{\frac{T_{ref}}{T_{1t}}} \quad T_{ref} = 298 \text{ K}$$

Total-Druckverhältnis

$$\pi_V = \frac{p_{2t}}{p_{1t}}$$

Reduzierte Verdichterdrehzahl

$$n_{redV} = n * \sqrt{\frac{T_{ref}}{T_{1t}}}$$

Totaldrücke

$$\text{Saugseite: } p_{1t} = p_{1st} + \frac{\rho_1}{2} * c_1^2 \quad \text{Druckseite: } p_{2t} = p_{2st} + \frac{\rho_2}{2} * c_2^2$$

Totaltemperatur Saugseite (Enthalpiegröße)

$$T_{1t} = T_{1st} + \frac{c_1^2}{2 * c_{pLuft}} \quad c_{pLuft} = 1007 \text{ J/kgK}$$

Luftdichte Druckseite

$$\rho_2 = \frac{p_{2st}}{R_{iLuft} * T_{2st}} \quad R_{iLuft} = 287 \text{ J/kgK}$$

Strömungsgeschwindigkeit Saugseite und Druckseite

$$c_1 = \frac{m_V * 4}{\rho_1 * \pi * d_1^2} \quad c_2 = \frac{m_V * 4}{\rho_1 * \pi * d_2^2}$$

7.2.3 Turbine

Druckverhältnis total zu statisch

$$\pi_T = \frac{p_{3t}}{p_{4st}}$$

Durchsatzkennwert

$$DKW = \frac{m_T \cdot \sqrt{T_{3t}}}{p_{3t}} \quad m_T = m_{Luft} + m_{Brennstoff} \quad m_{Brennstoff} = \frac{m_{Luft}}{L_{Stöch} \cdot \lambda_{Verbr}}$$

Reduzierte Turbinendrehzahl

$$n_{redT} = n \cdot \sqrt{\frac{T_{3ref}}{T_{3t}}} \quad T_{3ref} = 873 \text{ K}$$

Gasdichte Motorseite

$$\rho_3 = \frac{p_{3st}}{R_{iAbgas} \cdot T_{3st}} \quad R_{iAbgas} = 304 \text{ J/kgK (aus Abgaszusammensetzung bei Volllast)}$$

Strömungsgeschwindigkeit im Flansch Turbineneintritt (Messstelle für T_3 und p_3)

$$c_3 = \frac{m_T}{\rho_3 \cdot A_3} \quad \text{Strömungsquerschnitt } A_3 = 0,00189 \text{ m}^2$$

Totaltemperatur am Turbineneintritt (Enthalpiegröße)

$$T_{3t} = T_{3st} + \frac{c_3^2}{2 \cdot c_{pAbgas}} \quad c_{pAbgas} = 1135 \text{ J/kgK (aus Abgaszusammensetzung bei Volllast)}$$

Totaldruck am Turbineneintritt

$$p_{3t} = p_{3st} + \frac{\rho_3}{2} \cdot c_3^2$$

Tabelle A.5: Blenden mit Flansch-Druckentnahmen – Durchflußkoeffizient C für $D = 100$ mm

Durch- messer- verhältnis	Durchflußkoeffizient C für Re_D gleich											
	β	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8
0,13	0,6014	0,5994	0,5982	0,5977	0,5973	0,5971	0,5969	0,5966	0,5964	0,5963	0,5962	0,5962
0,14	0,6018	0,5997	0,5984	0,5979	0,5974	0,5972	0,5970	0,5966	0,5964	0,5963	0,5963	0,5963
0,16	0,6025	0,6001	0,5987	0,5981	0,5976	0,5974	0,5972	0,5968	0,5965	0,5964	0,5964	0,5964
0,18	0,6032	0,6006	0,5991	0,5985	0,5979	0,5976	0,5974	0,5969	0,5967	0,5965	0,5965	0,5965
0,20	0,6039	0,6012	0,5995	0,5988	0,5982	0,5979	0,5976	0,5971	0,5969	0,5967	0,5966	0,5966
0,22	0,6047	0,6017	0,5999	0,5992	0,5985	0,5981	0,5979	0,5973	0,5970	0,5969	0,5968	0,5968
0,24	0,6056	0,6024	0,6004	0,5996	0,5988	0,5985	0,5982	0,5976	0,5973	0,5970	0,5970	0,5969
0,26	0,6065	0,6030	0,6009	0,6000	0,5992	0,5988	0,5985	0,5979	0,5975	0,5973	0,5972	0,5971
0,28	0,6075	0,6038	0,6014	0,6005	0,5997	0,5992	0,5989	0,5982	0,5978	0,5975	0,5974	0,5974
0,30	0,6086	0,6046	0,6021	0,6011	0,6002	0,5997	0,5993	0,5985	0,5981	0,5978	0,5977	0,5976
0,32	0,6098	0,6054	0,6028	0,6017	0,6007	0,6002	0,5998	0,5989	0,5985	0,5981	0,5980	0,5979
0,34	0,6111	0,6064	0,6035	0,6024	0,6013	0,6007	0,6003	0,5994	0,5988	0,5984	0,5983	0,5982
0,36	0,6125	0,6075	0,6043	0,6031	0,6019	0,6013	0,6008	0,5998	0,5993	0,5988	0,5986	0,5985
0,38	0,6141	0,6086	0,6052	0,6039	0,6026	0,6020	0,6015	0,6004	0,5997	0,5992	0,5990	0,5988
0,40	0,6157	0,6099	0,6062	0,6048	0,6034	0,6027	0,6021	0,6009	0,6002	0,5996	0,5994	0,5992
0,42	0,6176	0,6112	0,6073	0,6057	0,6042	0,6035	0,6029	0,6015	0,6008	0,6001	0,5998	0,5996
0,44	0,6196	0,6127	0,6084	0,6067	0,6051	0,6043	0,6036	0,6022	0,6013	0,6005	0,6002	0,6000
0,46	0,6217	0,6142	0,6097	0,6078	0,6061	0,6052	0,6044	0,6029	0,6019	0,6010	0,6007	0,6003
0,48	0,6241	0,6159	0,6110	0,6090	0,6071	0,6061	0,6053	0,6036	0,6025	0,6015	0,6011	0,6007
0,50	0,6266	0,6177	0,6124	0,6102	0,6081	0,6071	0,6062	0,6043	0,6031	0,6020	0,6016	0,6011
0,51	0,6279	0,6187	0,6131	0,6108	0,6087	0,6076	0,6067	0,6047	0,6034	0,6023	0,6018	0,6013
0,52	0,6293	0,6197	0,6138	0,6115	0,6092	0,6081	0,6071	0,6051	0,6038	0,6025	0,6020	0,6015
0,53	0,6307	0,6207	0,6146	0,6121	0,6098	0,6086	0,6076	0,6054	0,6041	0,6028	0,6022	0,6017
0,54	0,6322	0,6217	0,6153	0,6128	0,6104	0,6091	0,6081	0,6058	0,6044	0,6030	0,6024	0,6018
0,55	–	0,6227	0,6161	0,6135	0,6109	0,6097	0,6085	0,6062	0,6047	0,6032	0,6026	0,6020
0,56	–	0,6238	0,6169	0,6141	0,6115	0,6102	0,6090	0,6065	0,6050	0,6034	0,6028	0,6021
0,57	–	0,6249	0,6177	0,6148	0,6121	0,6107	0,6095	0,6069	0,6052	0,6036	0,6029	0,6022
0,58	–	0,6260	0,6185	0,6155	0,6127	0,6112	0,6100	0,6072	0,6055	0,6038	0,6031	0,6023
0,59	–	0,6271	0,6193	0,6162	0,6132	0,6117	0,6104	0,6076	0,6058	0,6040	0,6032	0,6024
0,60	–	0,6283	0,6201	0,6169	0,6138	0,6122	0,6108	0,6079	0,6060	0,6041	0,6033	0,6025
0,61	–	0,6294	0,6209	0,6176	0,6143	0,6127	0,6113	0,6082	0,6062	0,6042	0,6033	0,6025
0,62	–	0,6306	0,6218	0,6182	0,6149	0,6132	0,6117	0,6085	0,6064	0,6043	0,6033	0,6024
0,63	–	0,6318	0,6226	0,6189	0,6154	0,6136	0,6120	0,6087	0,6065	0,6043	0,6033	0,6024
0,64	–	0,6329	0,6233	0,6195	0,6159	0,6140	0,6124	0,6089	0,6066	0,6043	0,6033	0,6022
0,65	–	0,6341	0,6241	0,6201	0,6163	0,6144	0,6127	0,6091	0,6067	0,6042	0,6031	0,6021
0,66	–	0,6353	0,6249	0,6207	0,6168	0,6148	0,6130	0,6092	0,6067	0,6041	0,6030	0,6019
0,67	–	0,6364	0,6256	0,6212	0,6172	0,6151	0,6132	0,6092	0,6066	0,6040	0,6028	0,6016
0,68	–	0,6375	0,6263	0,6218	0,6175	0,6153	0,6134	0,6093	0,6065	0,6037	0,6025	0,6012
0,69	–	0,6387	0,6269	0,6222	0,6178	0,6155	0,6135	0,6092	0,6063	0,6034	0,6021	0,6008
0,70	–	0,6397	0,6275	0,6226	0,6180	0,6157	0,6136	0,6091	0,6061	0,6031	0,6016	0,6003
0,71	–	0,6408	0,6280	0,6230	0,6182	0,6157	0,6136	0,6089	0,6058	0,6026	0,6011	0,5997
0,72	–	0,6418	0,6285	0,6233	0,6183	0,6157	0,6135	0,6086	0,6054	0,6020	0,6005	0,5990
0,73	–	0,6428	0,6290	0,6235	0,6183	0,6157	0,6133	0,6083	0,6049	0,6014	0,5998	0,5982
0,74	–	0,6437	0,6293	0,6236	0,6183	0,6155	0,6131	0,6078	0,6043	0,6006	0,5989	0,5973
0,75	–	0,6445	0,6296	0,6237	0,6181	0,6153	0,6127	0,6072	0,6036	0,5998	0,5980	0,5962

ANMERKUNG: Diese Tabelle dient der bequemen Handhabung. Für genaue Interpolationen ist die Tabelle nicht vorgesehen. Extrapolationen sind nicht zulässig.



Aktiengesellschaft
Kühnle, Kopp & Kausch
D 6710 Frankenthal/Pfalz

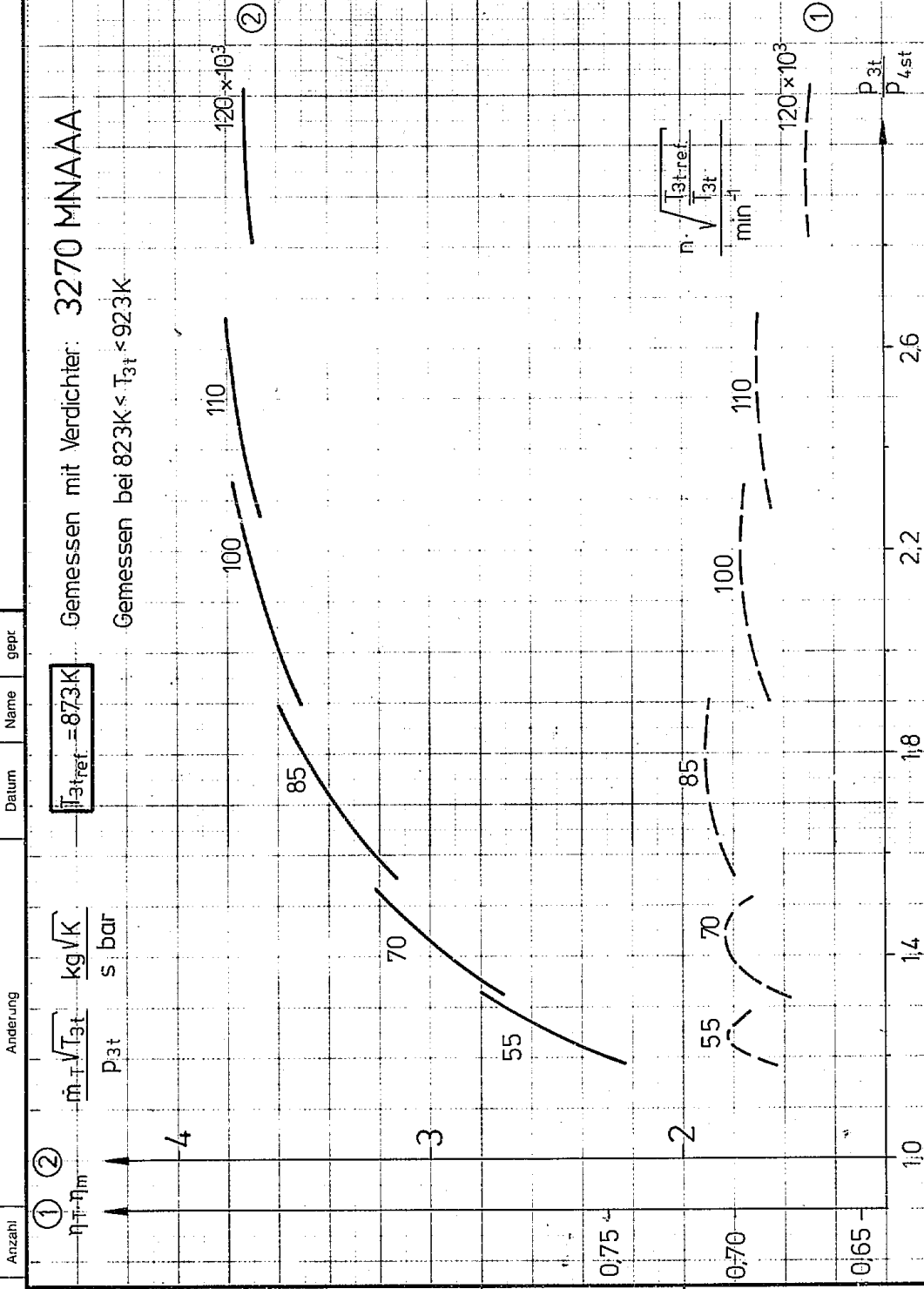
Turbinenkennfeld

K 27- 13.22
GZATD

Gemessen mit Verdichter: 3270 MNAAA

Gemessen bei $823K \leq T_{3t} < 923K$

$T_{3t,ref} = 873K$



Index	Anzahl	Änderung	Datum	Name	gepr
1	2	$\dot{m} \cdot \sqrt{T_{3t}}$			
2	1	$\frac{kg \sqrt{K}}{s \cdot bar}$			

Entw.: Hck Gepr.: *[Signature]* Ersatz für 5327 024 2025 TLV-Nr.: 1992-5039 Zeichn. Nr.: 5327 024 4041 (4) Bl. 1
 Dat.: 27.01.98 Dat.: 30.04.98 Dat.: Vers.-Nr.: 1357