

HYBRIDKRAFTWERK: PUMPSPEICHERKRAFTWERK IN VERBUND MIT WINDKRAFTWERK

- KLEINWASSERKRAFT
- PUMPSPEICHERSTANDORTSTUDIE
- KONZEPT, WIRTSCHAFTLICHE ANALYSE
- DRUCKSTOßBERECHNUNG

Helmut **JABERG**, Helmut **BENIGNI**

10./11. Februar 2016, TU Graz

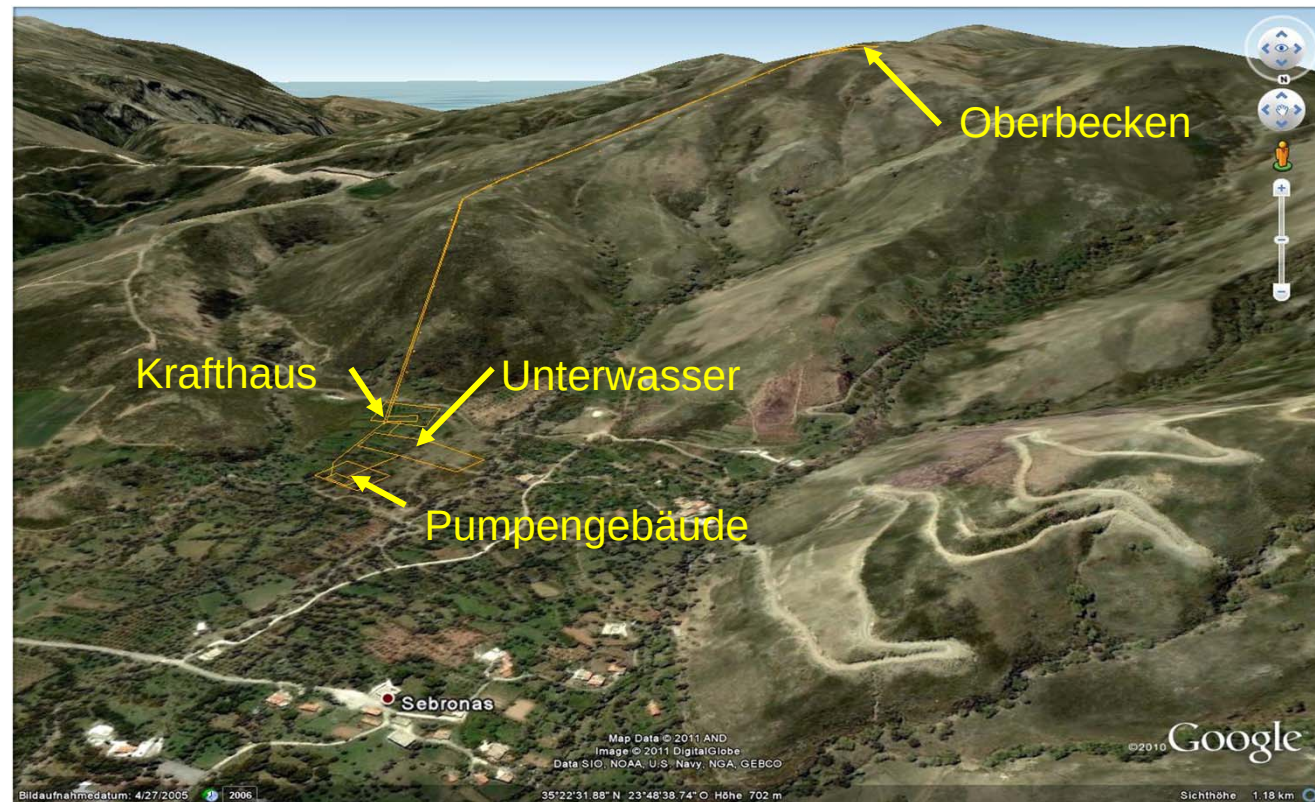


EnInnov2016
14. Symposium Energieinnovation | 10.02.–12.02.2016

¹ Technische Universität Graz, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Kopernikusgasse 24, A-8010 Graz, AUSTRIA

Standort des Kraftwerkes

- Kreta
- 600.000 EW
- Isoliertes Netz
- Wind: Hoher Anteil von nicht zuverlässig zur Verfügung stehender Stromerzeugung
- Schwierige Integration von weiterer Windkraft
- Hohe Lastunterschiede Tag / Nacht
- Hohe Lastunterschiede übers Jahr
- Bedarf an Energiespeicher

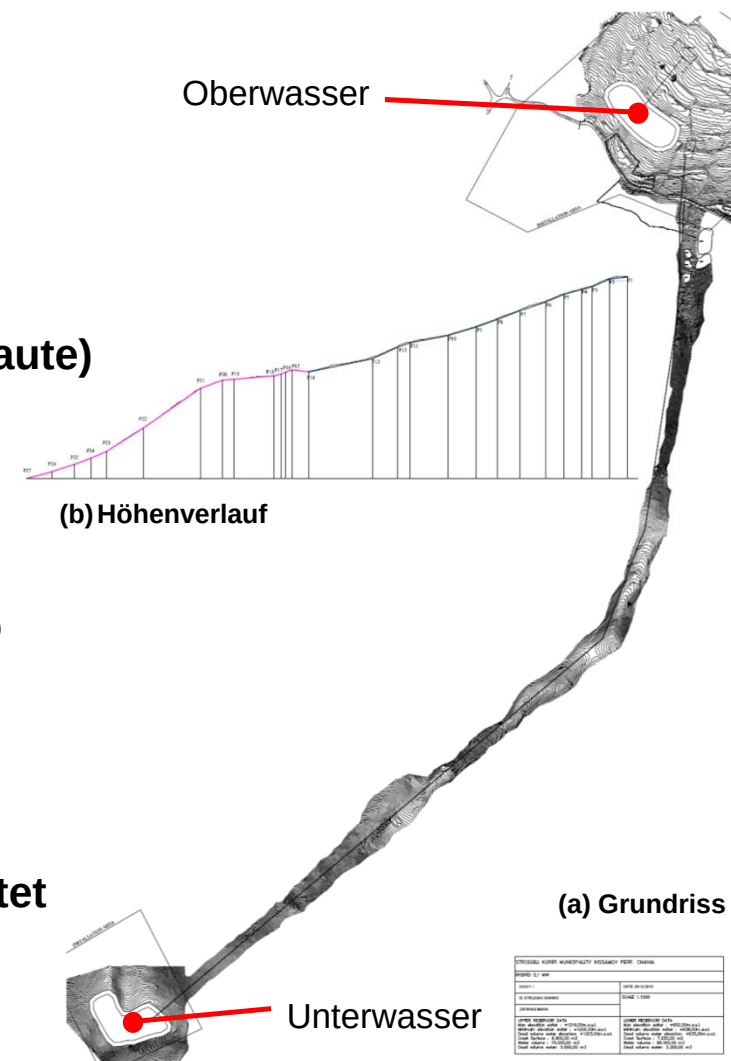


Lizenz:

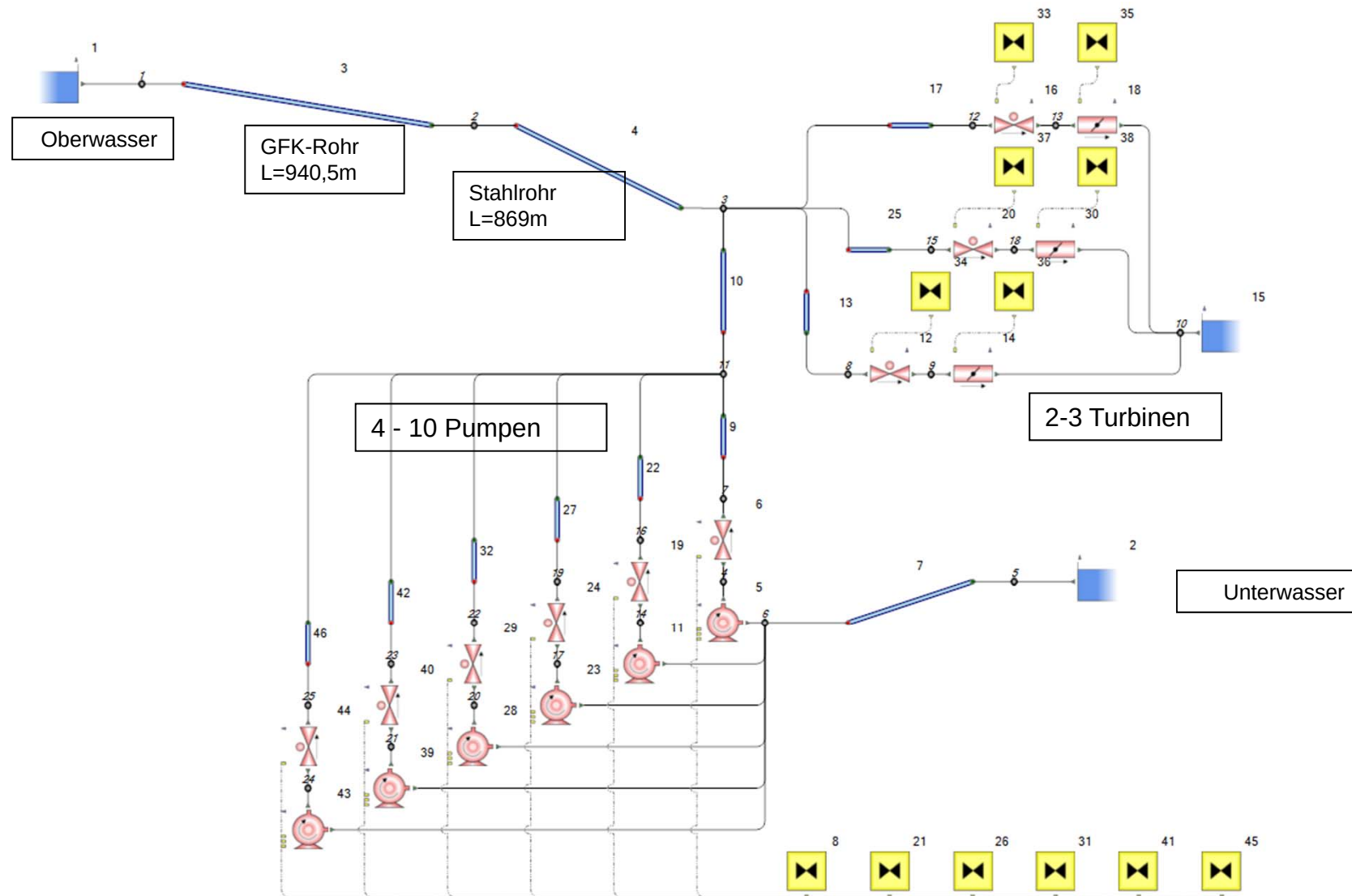
- ➔ Windturbinenpark
- ➔ Pumpspeicherkraftwerk wird vorgeschrieben
- ➔ Benennung: "Hybrid - Kraftwerk"

Randbedingungen

- **Garantiertes Einspeisen und Netzbezug**
 - **Standortanalyse mit Fallhöhe von 550m**
 - **Windturbinen vorhanden**
 - **Lizenz: Bei **allen** Windverhältnissen:**
 - **5 MW für 8 Betriebsstunden (auch bei Flaute)**
 - **Energie: 40 MWh an 5 Tagen**
 - **Profitabelster Betrieb Vergütungen**
 - **Strom aus Wasserkraft, Preisbasis = 100%**
 - **benötigter Pumpstrom = 79% (teuer!)**
 - **Windkraft = 54%**
 - **Leitungsbereitstellung** wird zusätzlich vergütet
- **Maschinenkonzept ?**
- **Speichervolumen?**



Kraftwerksschema



Mögliche Betriebsmodi

Basierend auf der Lizenz sind folgende Betriebsmodi möglich:

- 1. Windenergie (REP) zu 100% für Pumpen;**
- 2. Windenergie und Turbinenleistung, beide gemeinsam ins Netz;**
- 3. Nur Windenergie ins Netz;**
- 4. Kombination aus oben genannten Modi 1 – 3;**

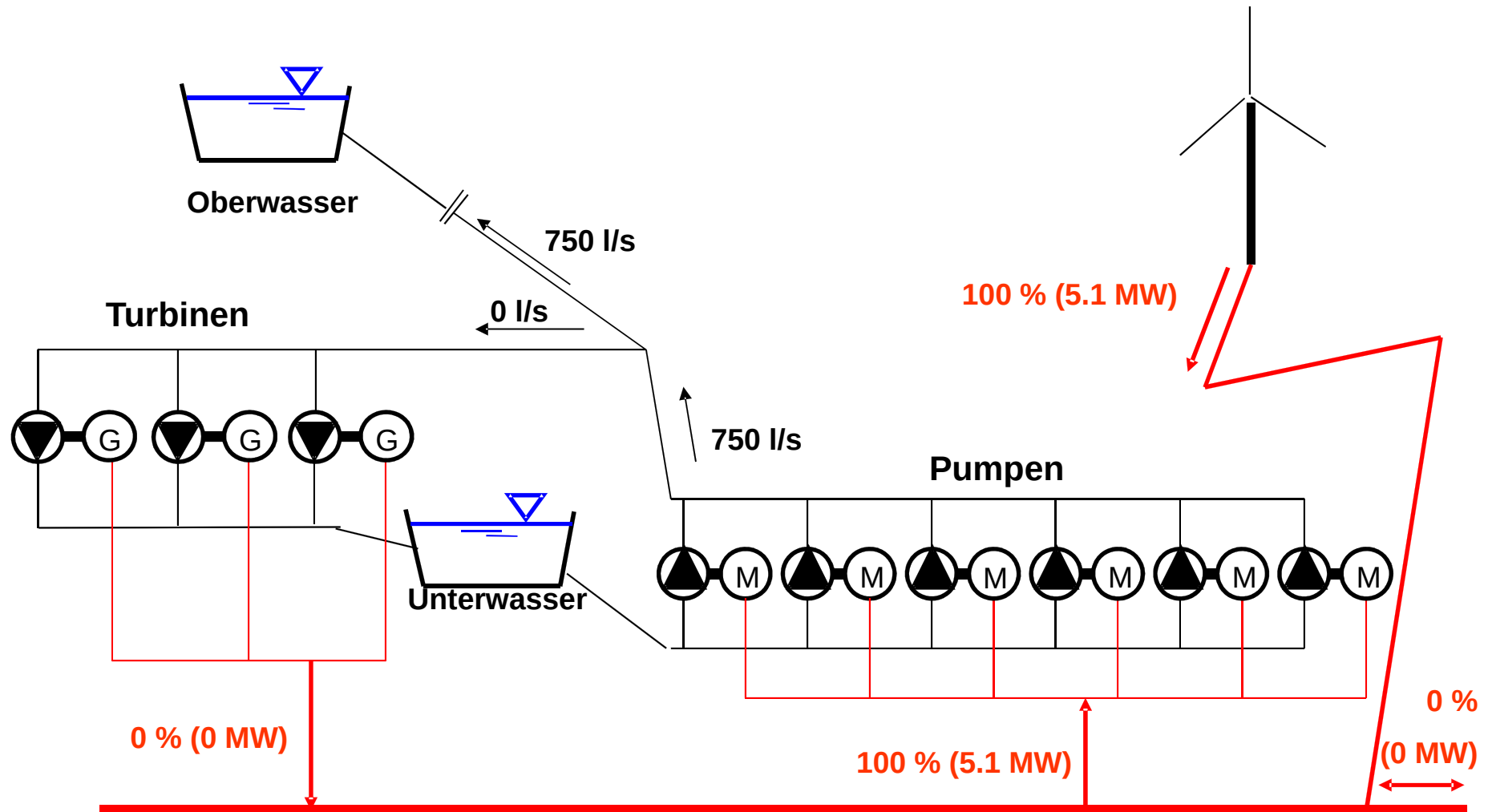
- 5. Hydraulischer Kurzschluss zur freien Leistungseinstellung im Pumpbetrieb:**

→ Das ist nicht Teil der Lizenz, aber ein zusätzlicher Benefit, weil sich nur so die Netzstabilisierung erreichen lässt: Pumpen sind grundsätzlich kaum zu regeln.

Betriebsmodus: Pumpen mit Windkraft (REP)

Betriebsmodus 01, 100% Pumpen, 0% Turbine, 100% Windturbine

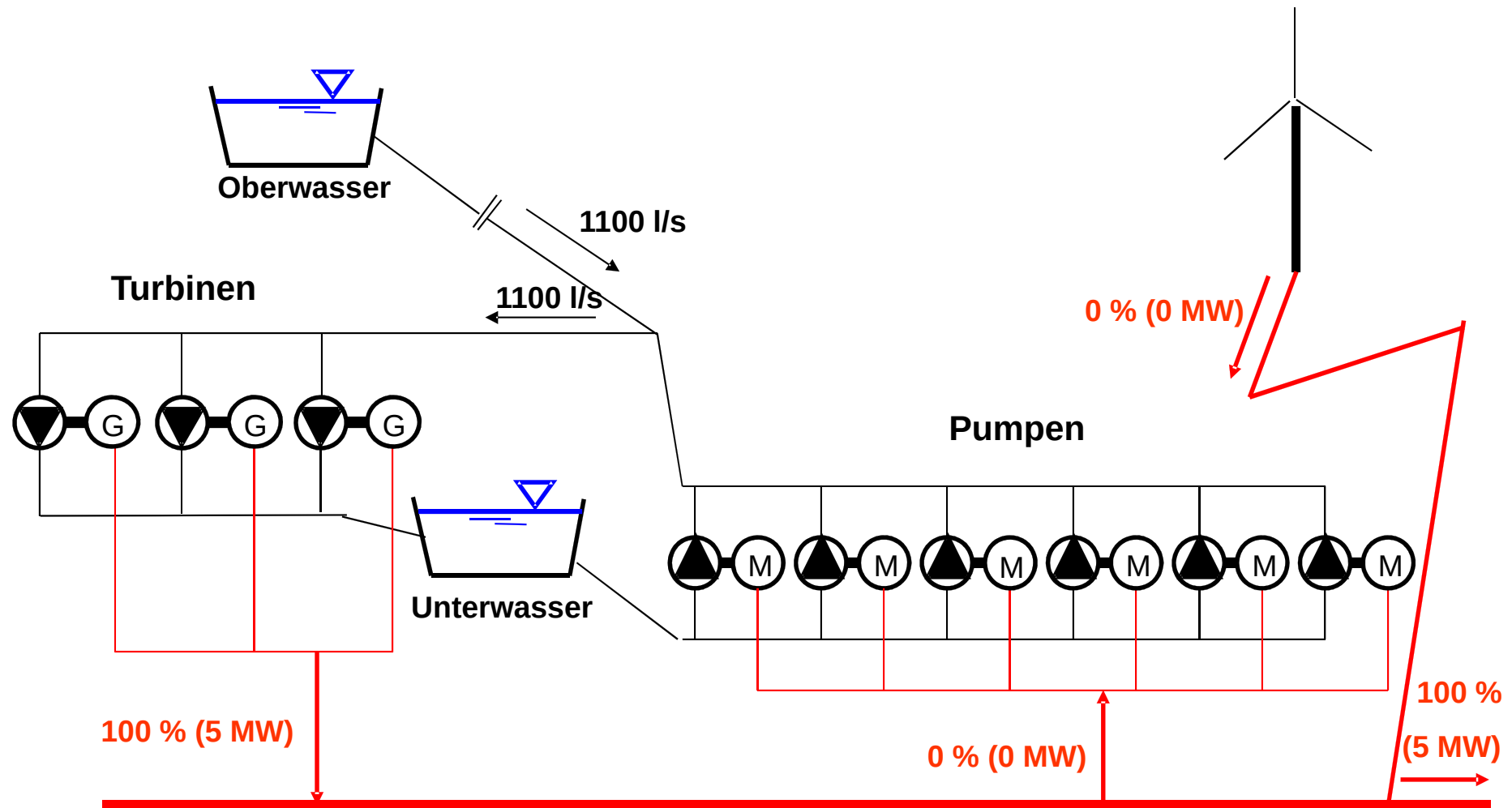
Volllast Pumpen mit der Energie aus den Windturbinen (keine Leistungsabgabe ins Netz)



Betriebsmodus: Volllast ohne Windkraft (REP)

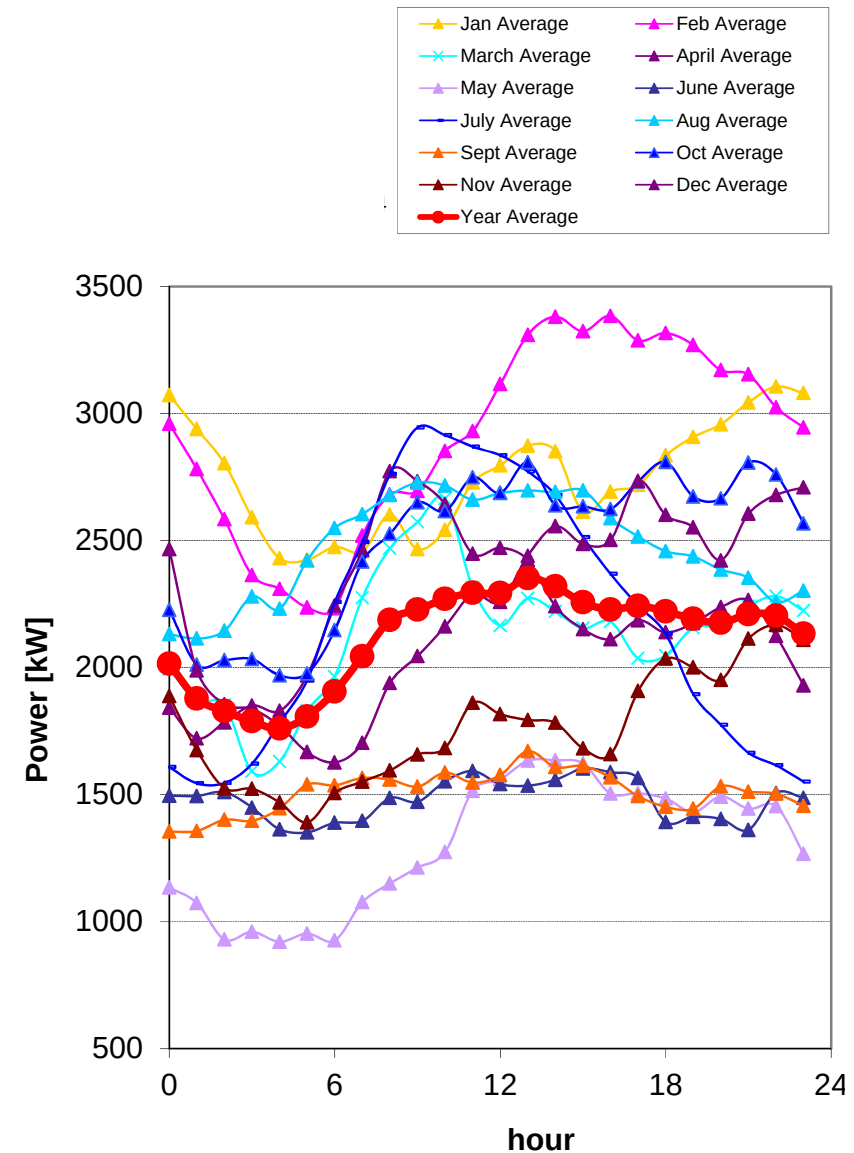
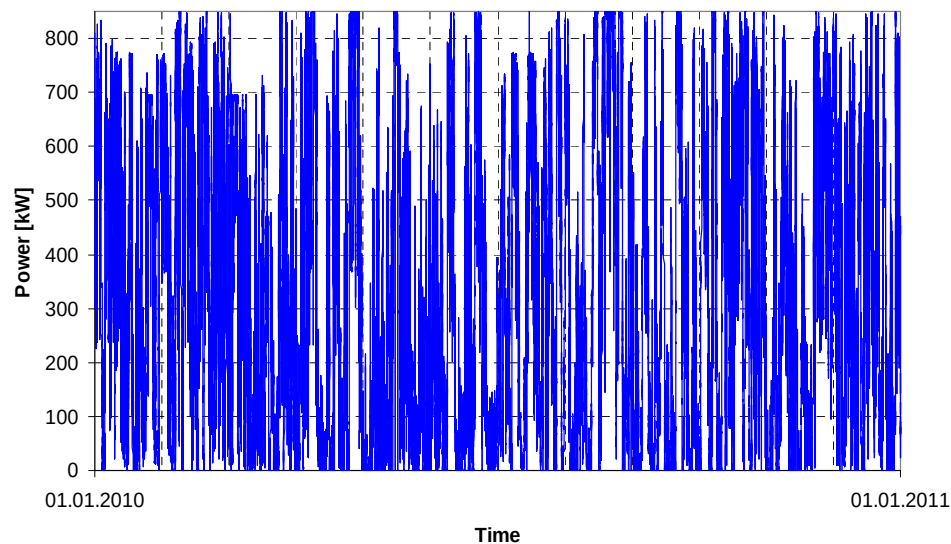
Betriebsmodus 02, 0% Pumpen, 100% Turbine, 0% Windturbine

Volllast Wasserturbinen, keine Energie aus den Windturbinen, volle Leistungsabgabe ins Netz



Windsituation

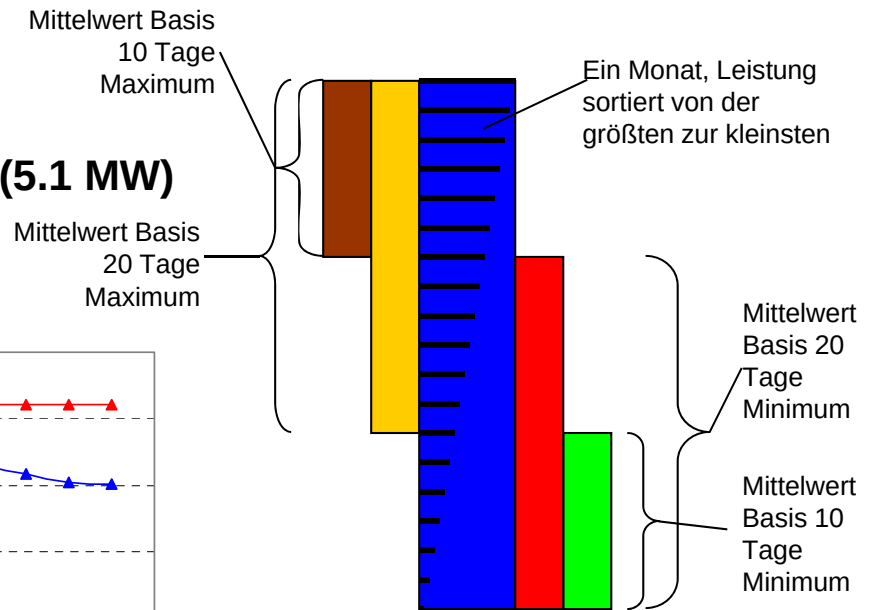
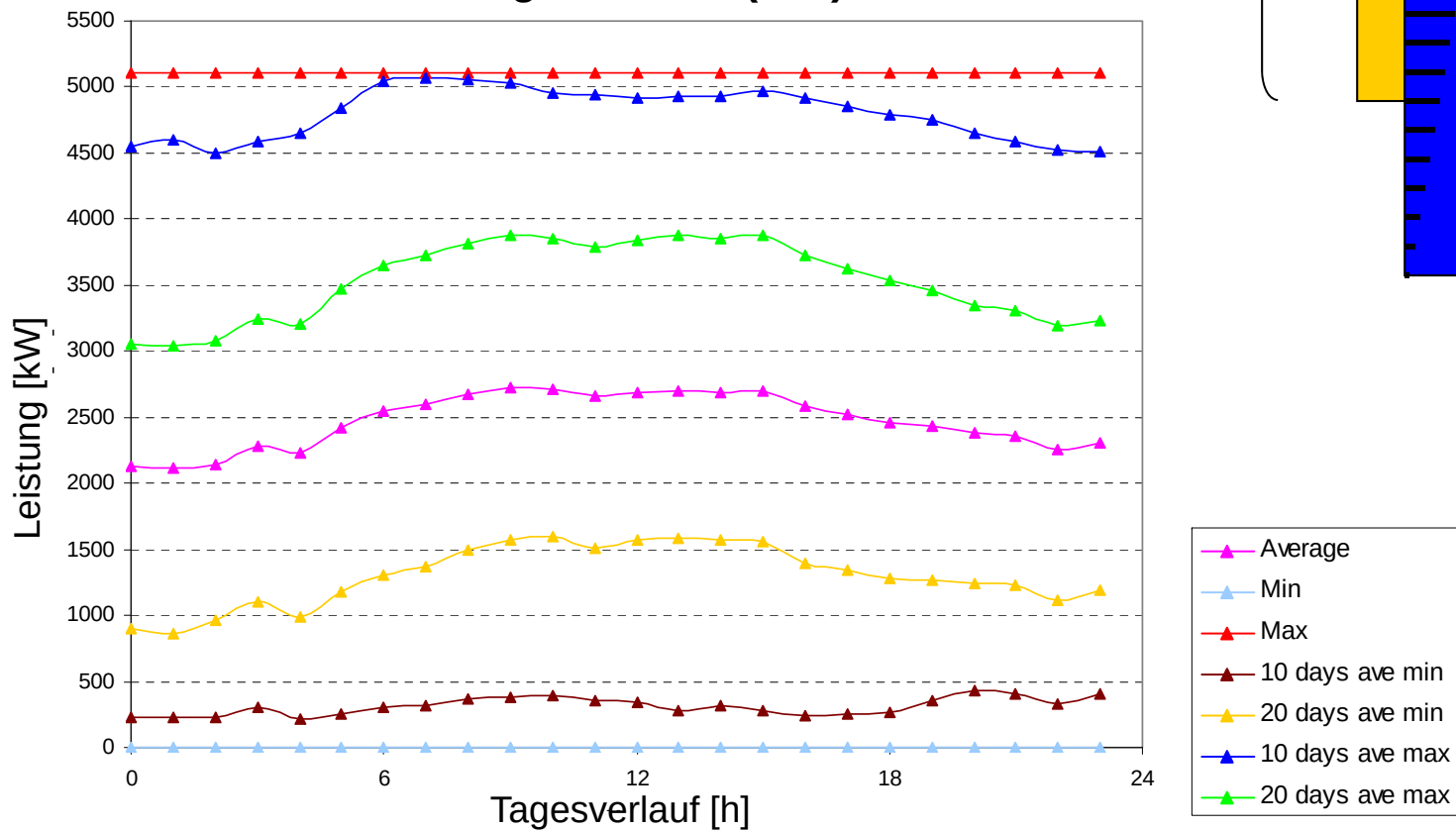
- **Winddaten eines Windparks neben der geplanten Windkraftanlage**
- **Sehr gute Datenbasis des Windparks, 10 Minuten Intervalle**
- **11 Anlagen, Typ Vestas V52**
- **Seit 5 Jahren in Betrieb**



Weitere Aufsplittung der Daten

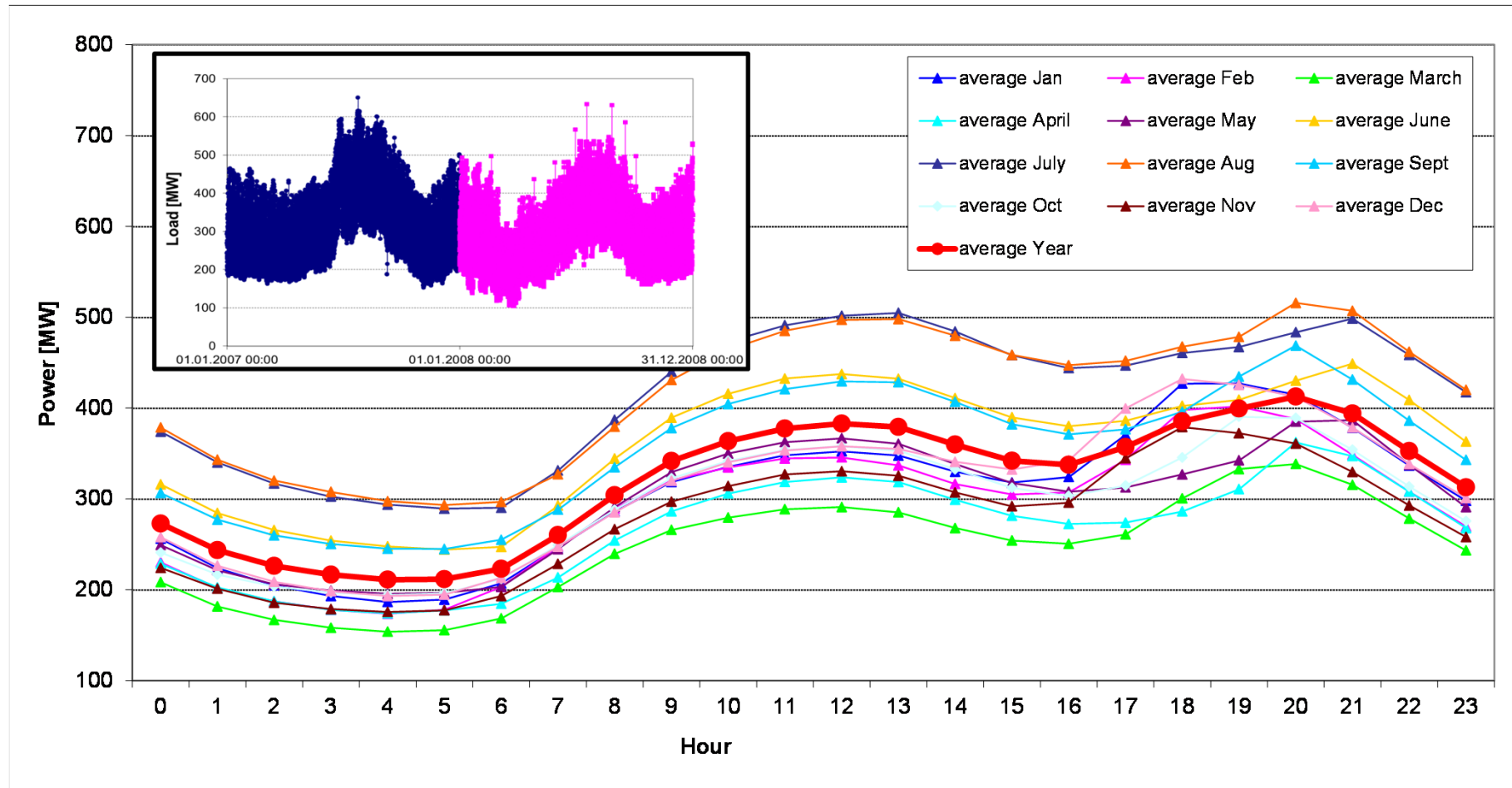
Beispiel August:

- **Niedrigste Energieproduktion: 0 kW !!**
- **Höchste Energieproduktion: Nennleistung (5.1 MW)**
- **Mittelwert: 2480 kW**
- **10 schwächsten Tage: 310 kW (6 %)**



Netzsituation

- Analyse für 2007 und 2008 (15 min. Intervalle)
- Höchstwerte für Juli und August gefolgt von Juni und September
- Täglich: Schwankungen mit dem Faktor 2



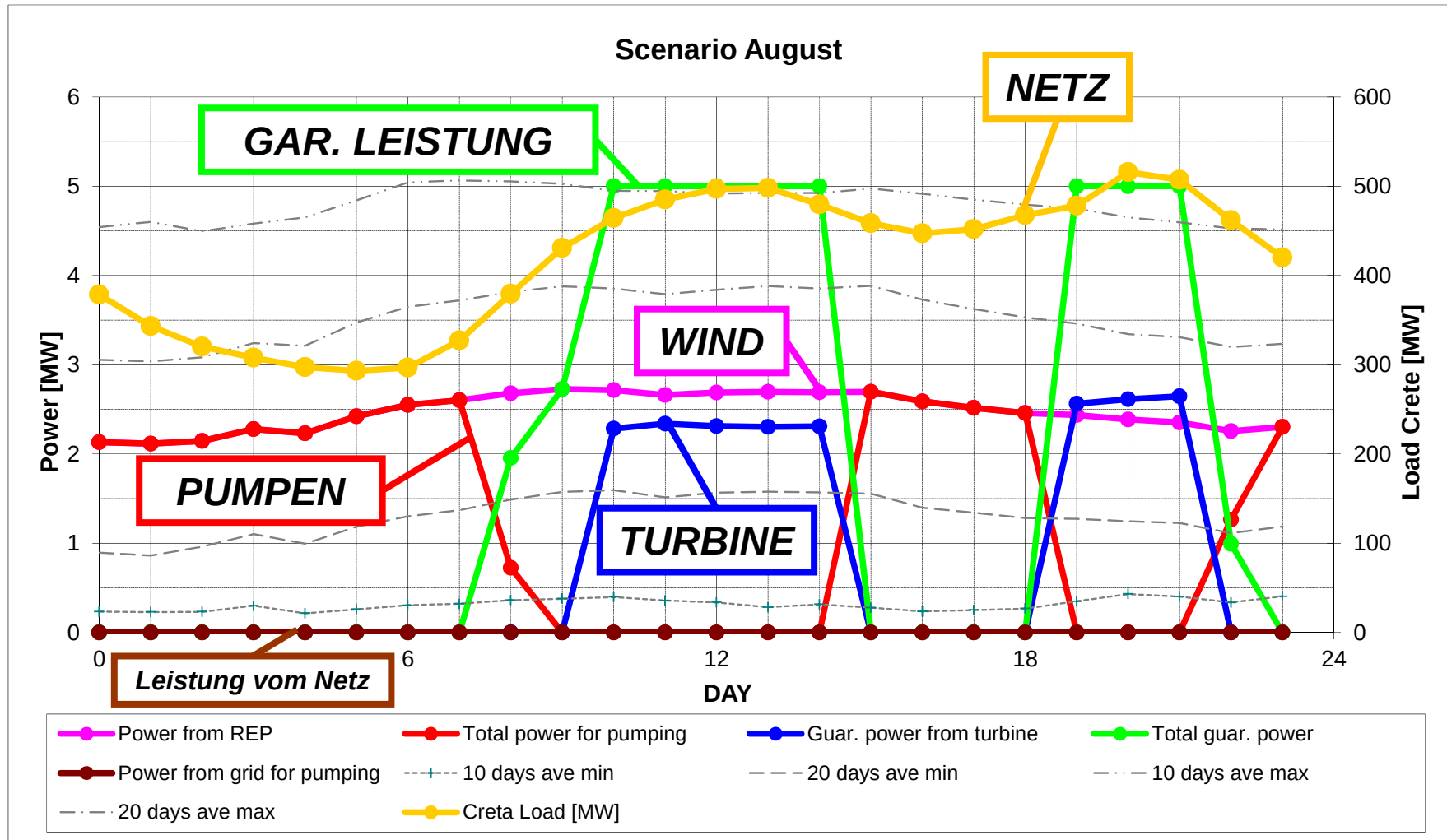
Randbedingungen für die Szenarien

Turbinendurchfluss für Nennleistung	1.1	m³/s
Stunden im Turbinenmodus (2 Tage, je 8h)	16	h
Notwendiges Volumen für Normalbetrieb	63360	m³
Reserve (muss ständig zur Verfügung sein)	2	h
Volume für Reserve	7920	m³
Gesamtvolumen	71280	m³
Gesamtvolumen (aufgerundet, Verdunstung u.ä.)	75000	m³
Pumpendurchfluss für Nennleistung	0.75	m³/s
Faktor Q_{Turbine}/Q_{Pumpen}	1.467	□

- Der Wasserstand am Ende des Tages hat den gleichen Stand als am Beginn des Tages
- Evtl. Zukauf von Pumpenergie (möglichst in der Nacht)

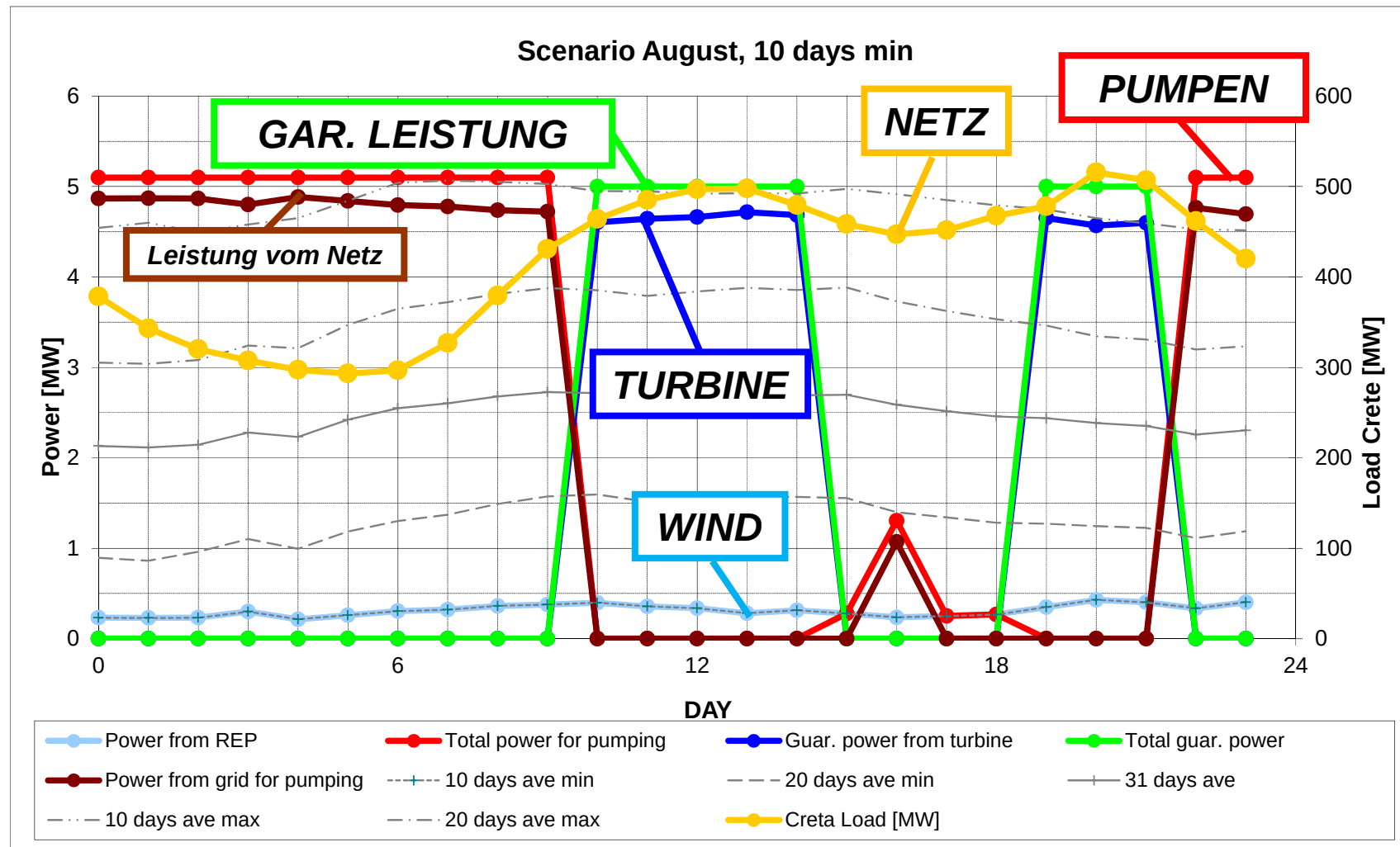
Beispiel Fahrscenario – mittlere Windlast

- Für **jeden** Monat wurden 24h-Szenarios entwickelt: Für **jedes** Windverhältnis



Beispiel Fahrscenario – 10 Tage Minimum

- Hohe Anteile von Benötigter Pumpenergie (Nacht), teure Energie aus dem Netz
- Vergrößerung der Windkraft?



Vergleich von verschiedenen Maschinenkonzepten

- auch mit Redimensionierung der Leistung: Erlösqualität für jedes Szenario

1.6MW					5 MW				
	10 min	10 ave	10 max	Total		10 min	10 ave	10 max	Total
Jän.	-2 691 €	65 016 €	95 792 €	158 117 €	Jän.	-6 311 €	96 744 €	137323.536	227 756 €
Feb.	-148 €	63 332 €	89 604 €	152 787 €	Feb.	-597 €	94 272 €	128182.417	221 858 €
Mär.	-11 705 €	25 541 €	93 903 €	107 740 €	Mär.	-26 845 €	46 371 €	136180.994	155 707 €
Apr.	-11 446 €	33 292 €	92 177 €	114 022 €	Apr.	-27 028 €	52 834 €	131718.808	157 525 €
Mai.	-12 222 €	-6 655 €	62 496 €	43 619 €	Mai.	-29 294 €	-8 695 €	94144.1923	56 155 €
Jun.	-11 615 €	-5 405 €	69 553 €	52 533 €	Jun.	-28 349 €	-5 842 €	104632.855	70 442 €
Jul.	-7 814 €	31 236 €	87 908 €	111 331 €	Jul.	-17 818 €	40 362 €	125061.044	147 605 €
Aug.	-12 144 €	43 683 €	102 471 €	134 010 €	Aug.	-27 543 €	70 628 €	142120.976	185 206 €
Sep.	-11 828 €	-2 751 €	72 521 €	57 942 €	Sep.	-28 349 €	-1 988 €	98539.3865	68 203 €
Okt.	-6 635 €	58 662 €	89 945 €	141 972 €	Okt.	-15 755 €	81 790 €	129771.289	195 807 €
Nov.	-11 828 €	17 407 €	73 876 €	79 456 €	Nov.	-28 267 €	34 275 €	90969.3124	96 977 €
Dez.	-10 171 €	43 479 €	85 919 €	119 228 €	Dez.	-19 261 €	70 699 €	114949.808	166 388 €
	-110 247 €	366 838 €	1 016 165 €	1 272 756 €		-255 415 €	571 450 €	1 433 595 €	1 749 629 €
800 kW REP direkt ins Netz				227 840 €					
Leistungsbereitstellung				127 € / kW / Jahr	Leistungsbereitstellung				127 € / kW / Jahr
Total für 1.6 MW				203200 € / Jahr	Total für 5 MW				635000 € / Jahr
Total				1 703 796 €	Total				2 384 629 €

Das Maschinenkonzept ist profitabel!

ABER, jedes Monat ist trotzdem ein hoher Anteil an Pumpenergie notwendig!

Die Verwendung von Pelton-turbinen und Standardpumpen ist wirtschaftlich sinnvoll, wie ist dies aber technisch?

Tiefere technische (und wirtschaftliche) Untersuchung notwendig



Pumpenkonzept mit Standardpumpen

		Supplier 1				Supplier 2	
Configuration		1a	1b	1c	1d	2a	2b
No of pumps		4	4	6	6	8	6
Stages		3	4	4	5	6	6
eff		80.02%	83.97%	81.05%	82.90%	79.20%	82.91%
Impeller diameter	m	0.383	0.339	0.359	0.313	0.293	0.38
Impeller diameter inlet	m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.2
Head	m	605	605	605	605	605	605
Head per stage	m	201.7	151.3	151.3	121.0	100.8	100.8
Specific speed per stage		23.84	29.39	24.43	28.69	28.91	33.17
Flowrate	m ³ /s	0.183	0.183	0.125	0.125	0.095	0.125
Rotational speed	rpm	2980	2960	2980	2960	2985	2985
NPSH 3%	m	10.68	11.05	5.49	9.3	6.86	8.7
Sigma 3		0.053	0.073	0.036	0.077	0.068	0.086
NPSH 1%	m					10.4	10.4
NPSH 0%	m					11.4	11.4

**4 Hersteller angefragt,
2 Hersteller liefern kaufm. und technisches
Angebot (inkl. 4 Quadranten-Kennfelder) zur
weitem Analyse.**

Wälzwirkungsgrad

Wirkungsgrade:

Im Pumpenmodus:

- Pumpenwirkungsgrad: 81%
- Frequenzumrichter (mit Hardware Bypass, 100%)
- Motorwirkungsgrad: 95.7%
- Transformatorwirkungsgrad: 99.0%

→ Pumpenwirkungsgrad: 76.7%

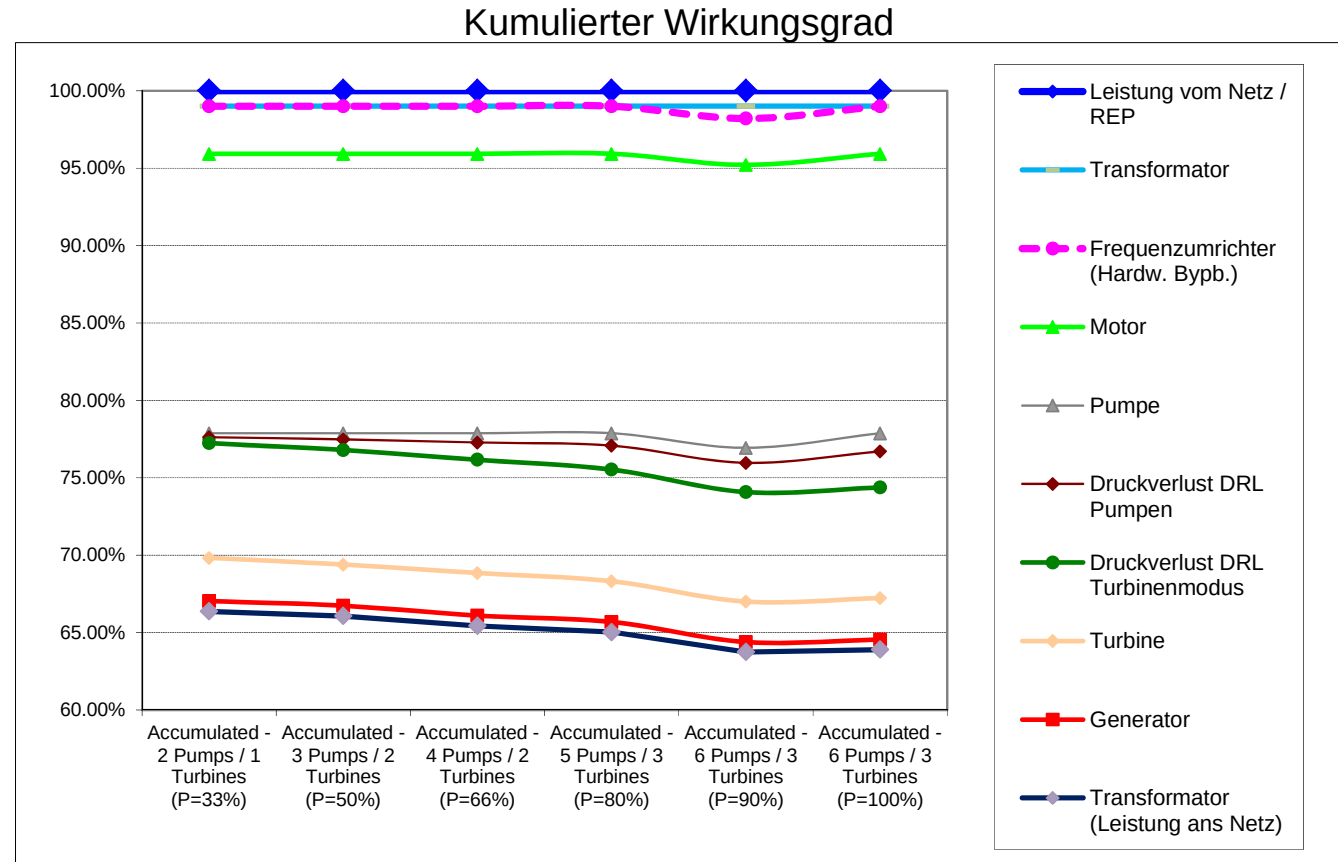
Im Turbinenmodus:

- Turbinenwirkungsgrad: 90.0%
- Generatorwirkungsgrad: 98%
- Transformatorwirkungsgrad : 99%

→ Turbinenwirkungsgrad: 87.3%

Druckrohrleitungen $f(Q)$

Transformator: 99%



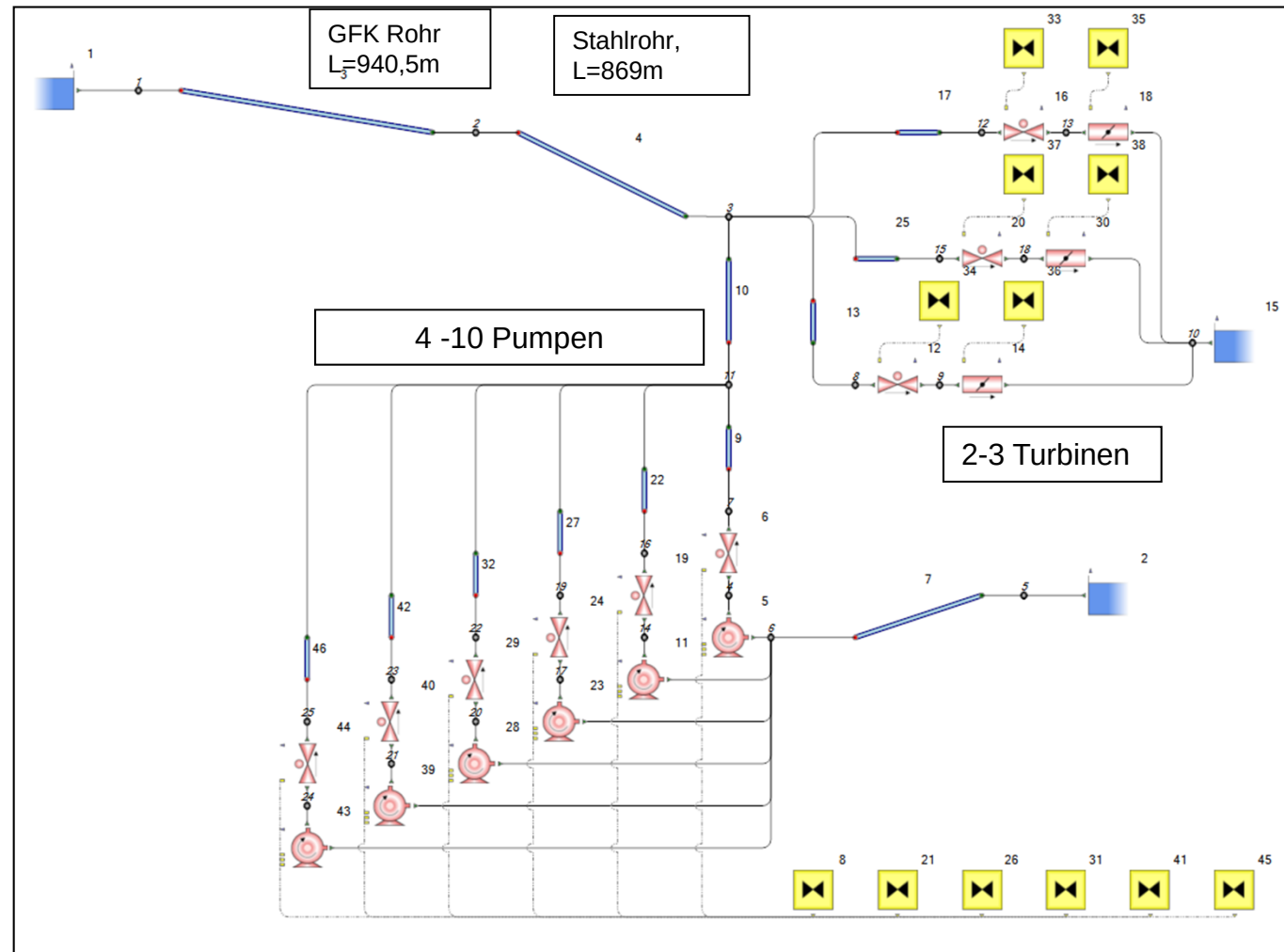
- Der erreichte Wälzwirkungsgrad genügt den Vorgaben
- Vergleich Malta: ca. 70%

Druckstoßberechnung: Modell und Randbedingungen

- 5 MW: typ. Kleinwasserkraft, Kostendruck!
- Sicherer Betrieb ohne Wasserschloss
- Vermeidung von kostenintensiven Druckstoßsicherungen
- Selbst programmierte Komponenten
- Integriert in kommerzielle Software Flowmaster V7®.
- Variation von Herstellern, Größe und Anzahl von Pumpen

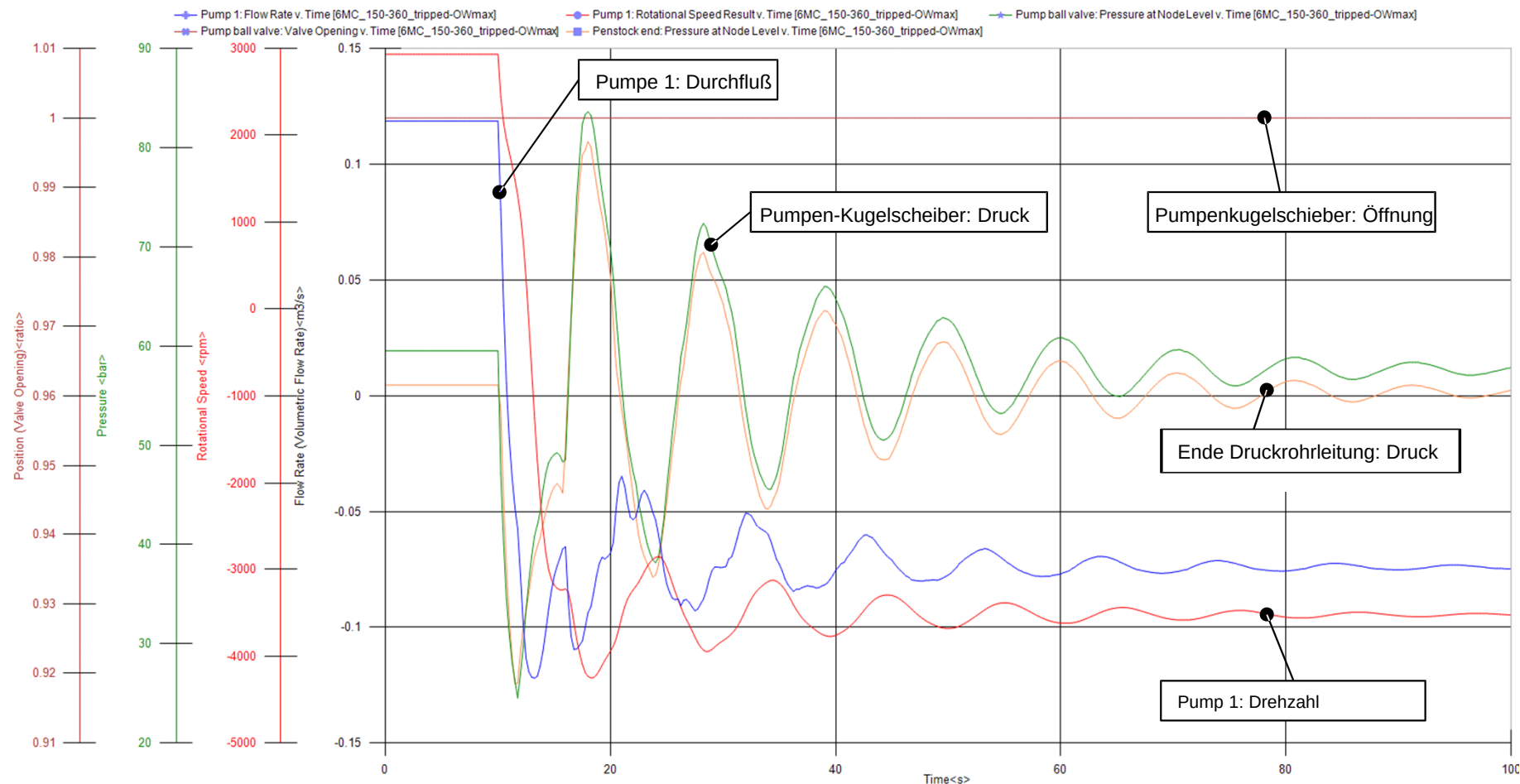
Kritischer Lastfälle:

- Lastabwurf,
- Pumpenabschaltung bei Turbinenstart, jeweils Vollast
- Blockierter Kugelschieber.



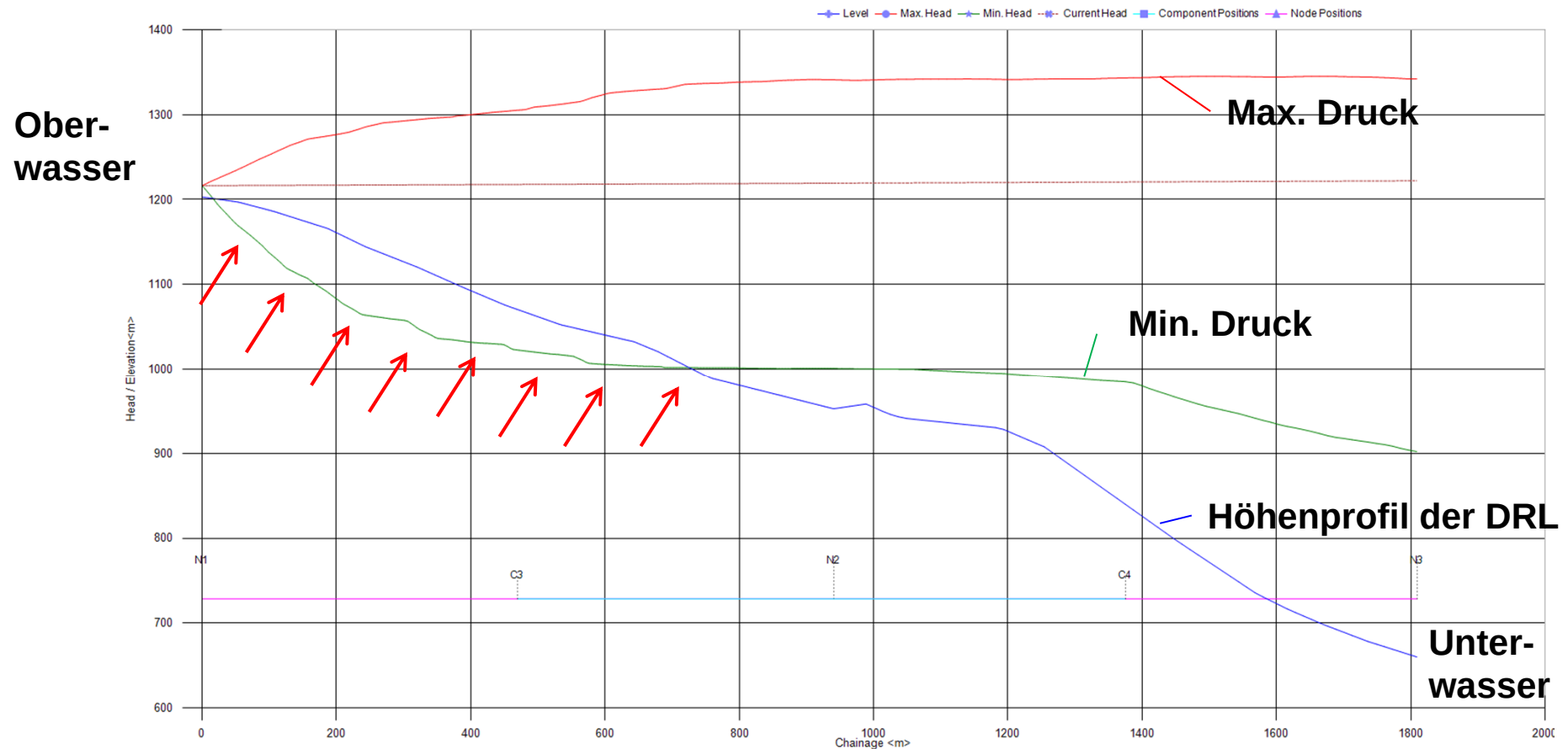
Druckstoßberechnung

- Lastabwurf im Stationärbetrieb → plötzliches Einbrechen der Drehzahl → Durchflußumkehr → Pumpe geht in Gegendrehzahl (Kugelschieber ist offen) → Pumpe mit maximaler Gegendrehzahl von $n = -4000$ rpm
- Druckwelle > 80 bar.



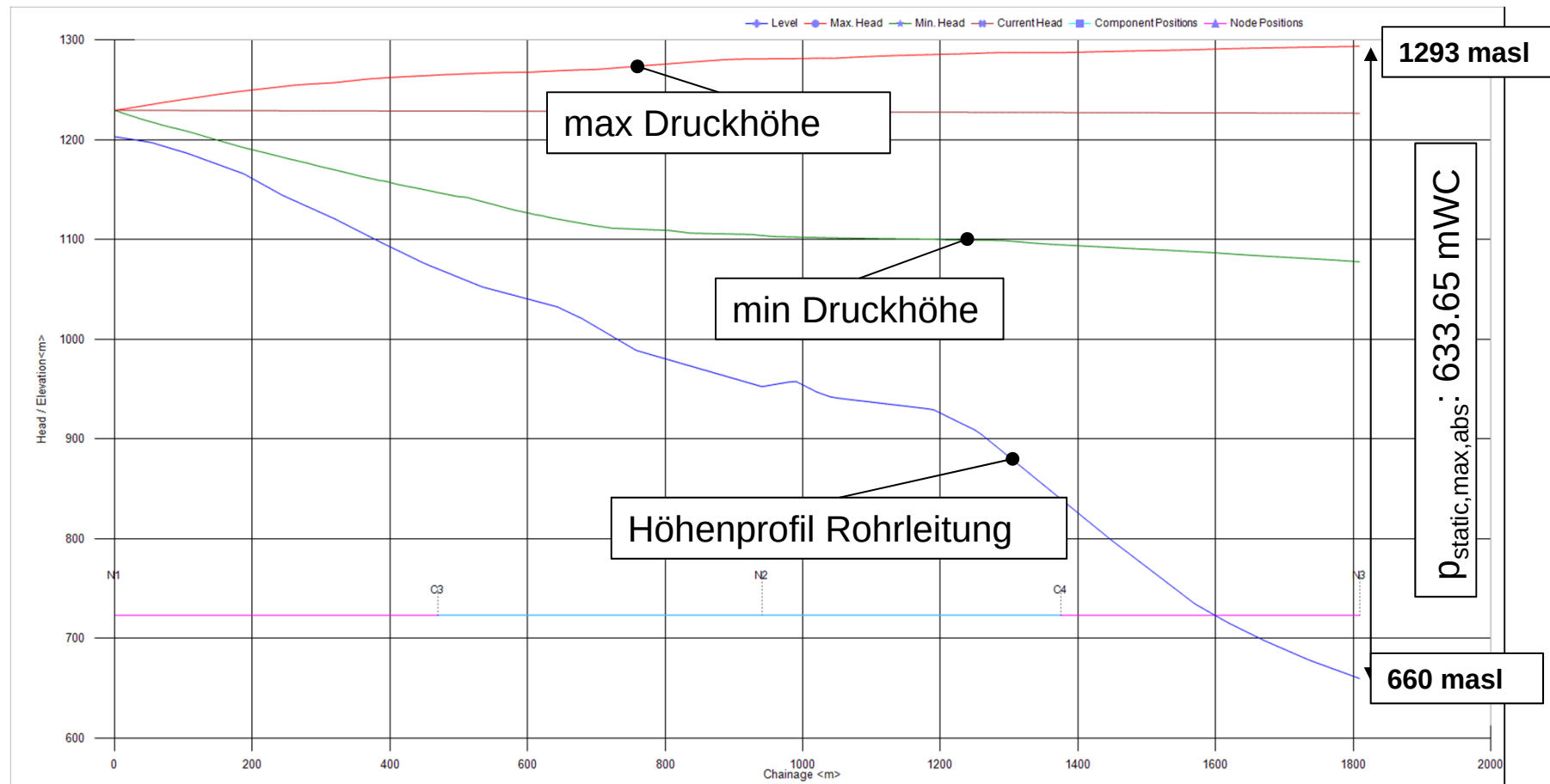
Druckstoßberechnung: kritischer Lastfall

Gleichzeitiges Abschalten der Pumpen aus Vollast bei niedrigem Wasserstand im Oberwasser bei gleichzeitigem Star der Turbinen



Druckstoßberechnung: Pumpen MIT Schwingscheibe

- Trägheitsmoment: $I=25.341 \text{ kgm}^2$ (PU+Motor+Kupplung+Schwingscheibe (Trägheitsmoment von 20 kgm^2))
- Oberwasser_{max}; Unterwasser_{min}
- Kugelschieber bleibt offen



Zusammenfassung

- **Lizenz der PPC, Konzept ist wirtschaftlich mit:**
 - **2 Pelton, je 2.5 MW oder 3 je 1.67 MW**
 - **4-10 Pumpen, je mehr Pumpen umso besser für das Anfahren, jedoch teurer**
 - **Gesamt 5.1 MW Pumpleistung**
 - **Konzept erfüllt auch die notwendigen Vorgaben hinsichtlich Anlagenwirkungsgrad**
- **Druckstoßberechnungen zeigen, dass ein System ohne Wasserschloss oder Windkessel möglich.**
- **Zusätzliche Schwungmasse bei den Pumpen ist notwendig um Kavitation im System zu vermeiden.**
- **Für alle Betriebslastfälle ist für den GFK Bereich PN40 und für die Stahlrohrleitung und die Absperrorgane PN63 ausreichend. (Hydraulischer Kurzschluß nicht näher betrachtet.)**

<http://www.hfm.tugraz.at>

<http://wasserkraft.tugraz.at>