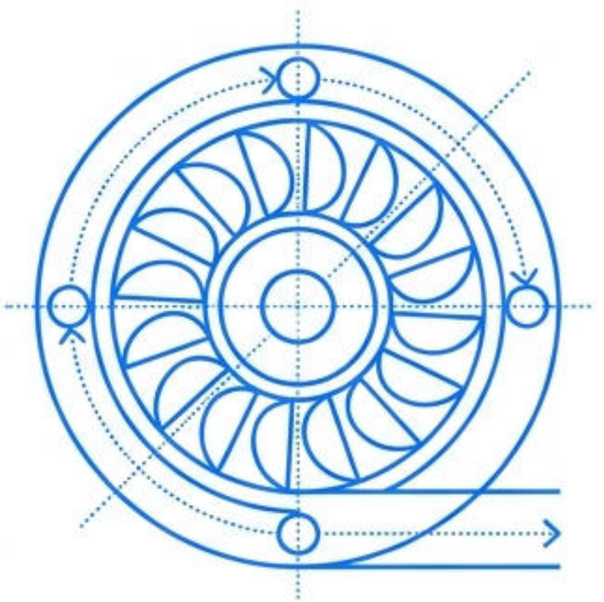
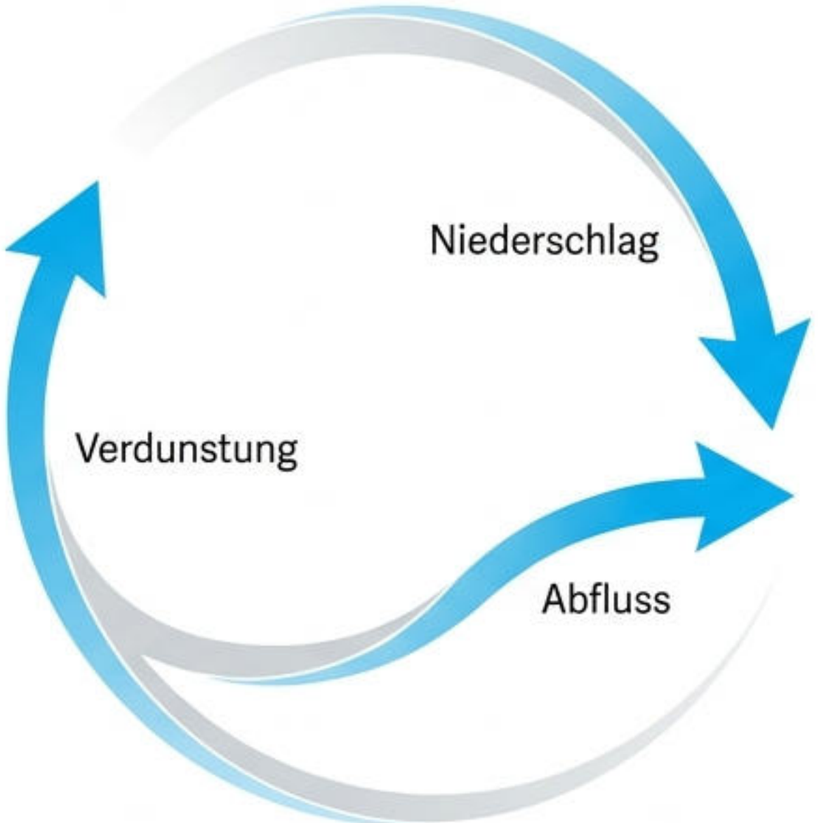
Wasserkraft: Von der Fluiddynamik zur Systemintegration

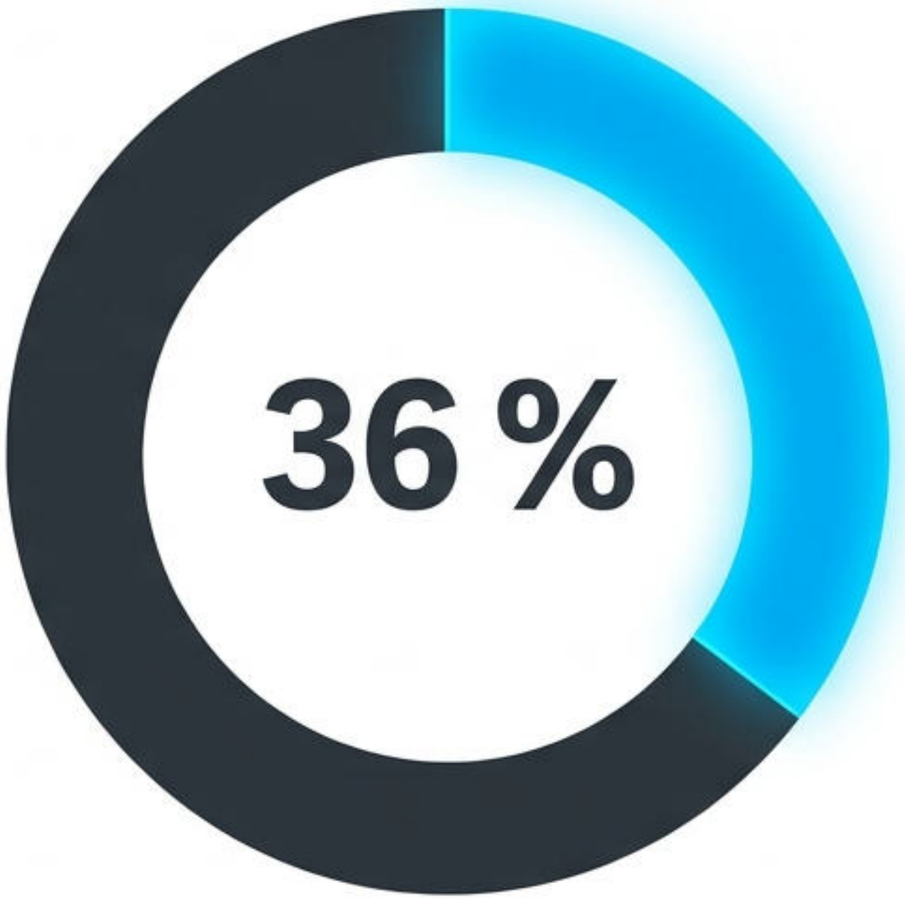
Vorlesung: Physikalische Grundlagen, Anlagentechnik und Praxisbeispiel Zillierbachtalsperre



Gemini Notebook

Der globale Kreislauf und das technische Potenzial





Nutzbare Energie des kontinentalen Niederschlags

Sonne als primärer Motor: Beeinflusst globale Wasserkreisläufe.
Technisches Potenzial: ca. 200 EJ/a.
Thermischer Verfall: Ohne Nutzung wandelt sich die Energie durch Erosion und Wirbelbildung thermisch um.

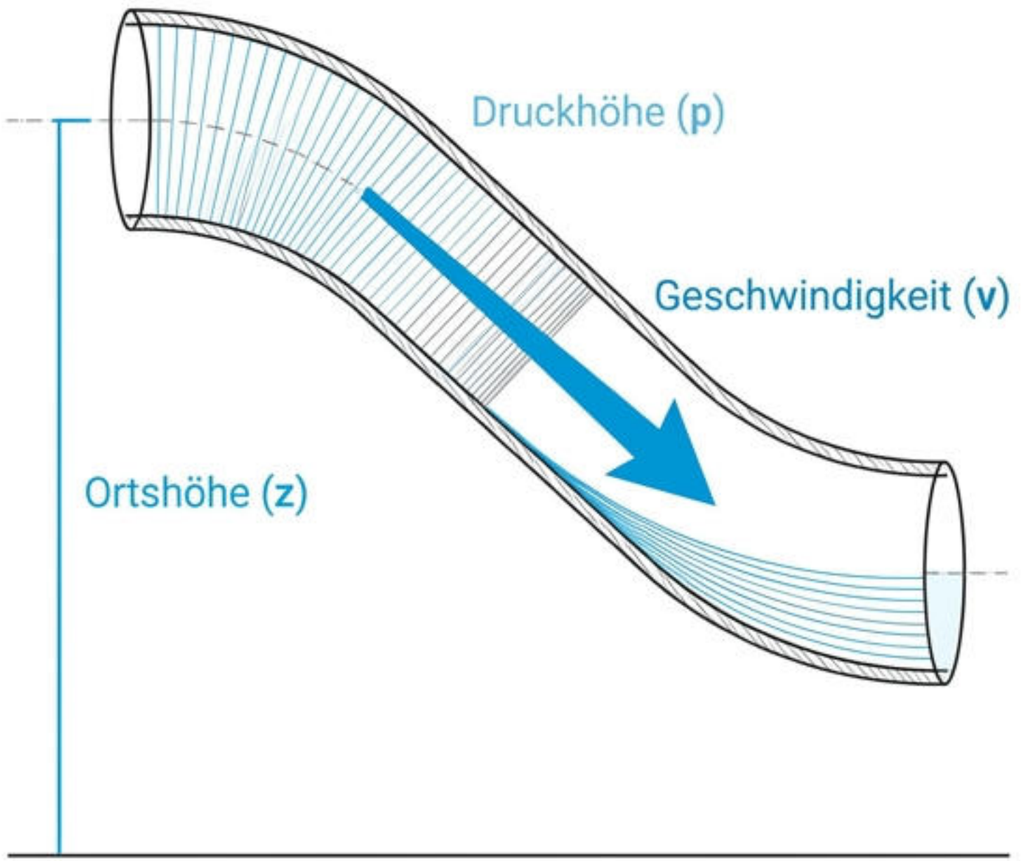
Gemini Notebook

Die Sprache des Wassers: Hydrodynamik nach Bernoulli

$$\frac{p}{\rho \cdot g} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{konstant}$$

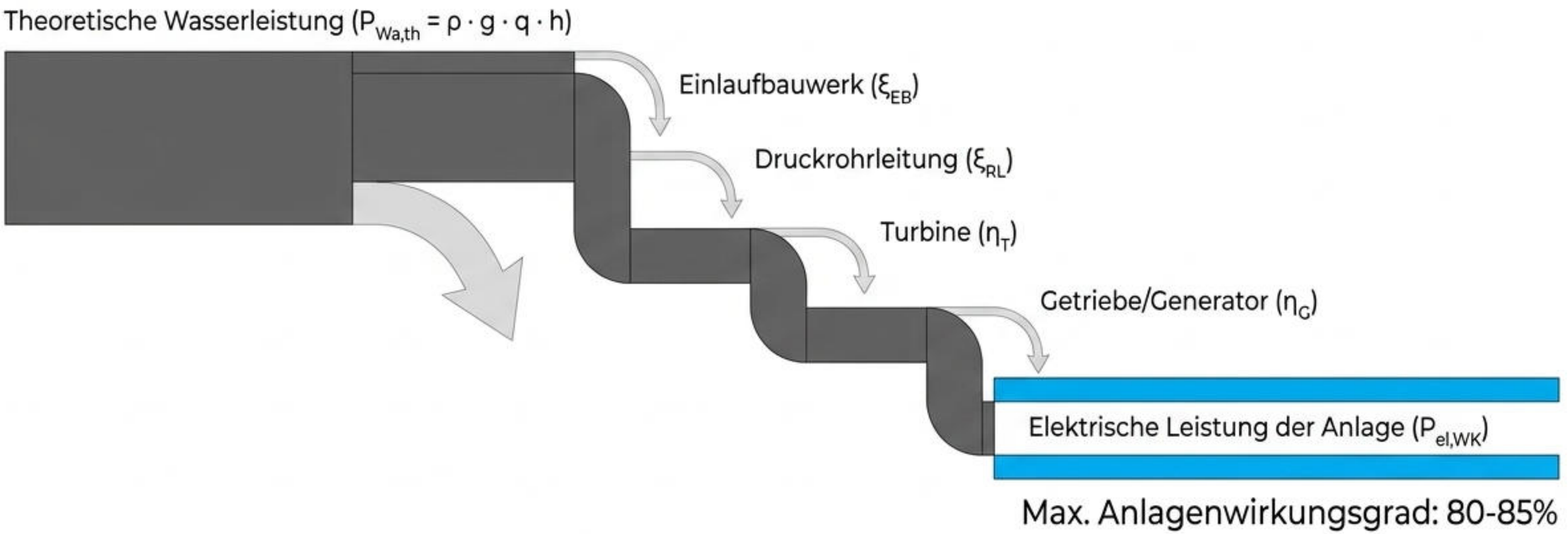
$p / (\rho \cdot g)$ = Druckhöhe
z = Ortshöhe (potenzielle Energie)
$v^2 / (2g)$ = Geschwindigkeitshöhe (kinetische Energie)

Fazit: Die Nutzhöhe (h_{nutz}) ergibt sich aus der Integration von Höhen-, Druck- und Geschwindigkeitsdifferenz.



Gemini Notebook

Der Wasserfall der Verluste: Von der Theorie zur Elektrizität

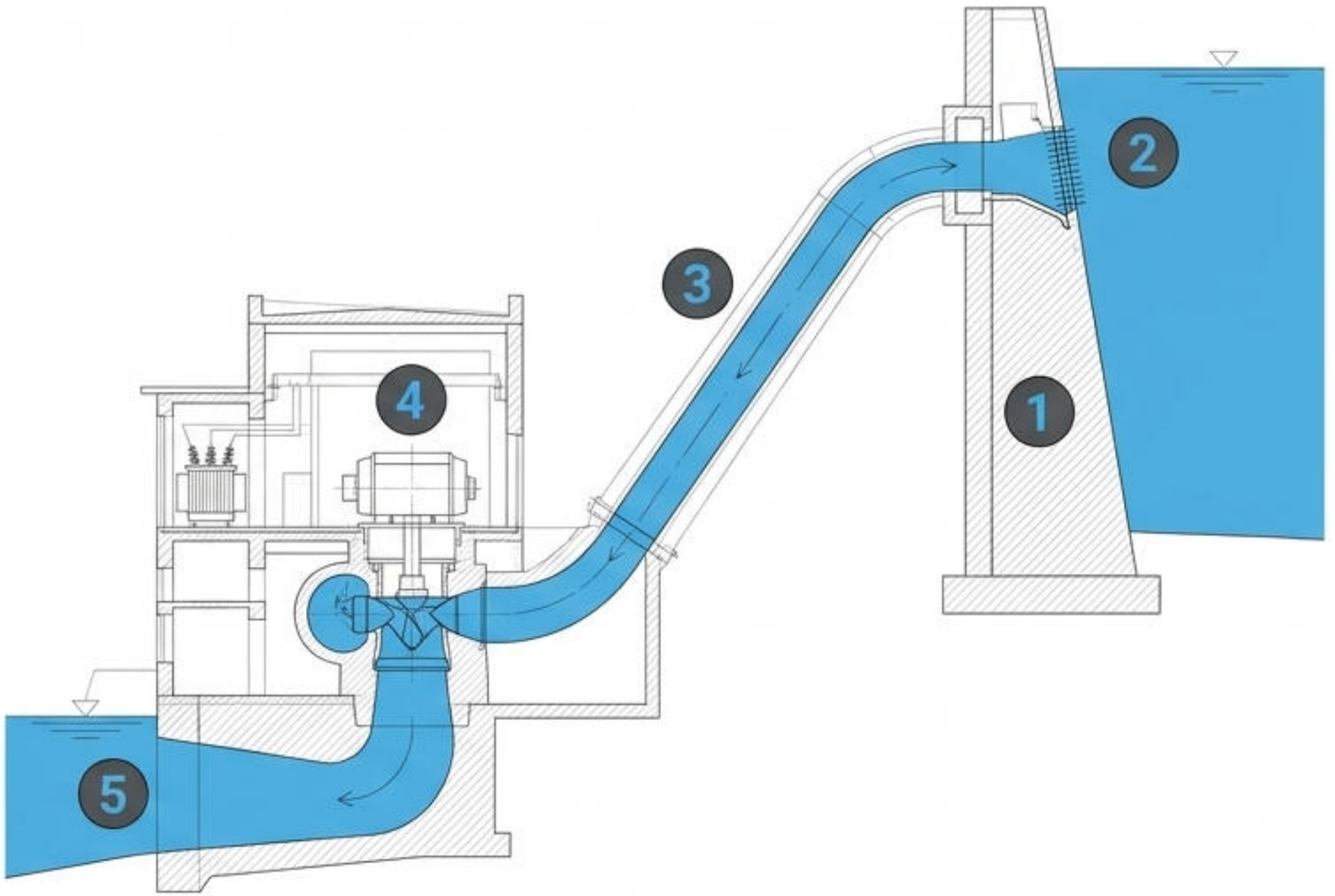


Max. Anlagenwirkungsgrad: 80-85%

Gemini Notebook

Anatomie eines Wasserkraftwerks: Systemkomponenten

1. **Staubauwerk:** Rückhalt und Potenzialaufbau.
2. **Einlaufbauwerk:** Wasserentnahme aus dem Oberwasser.
3. **Druckrohrleitung:** Transportmedium der Fluidenergie.
4. **Krafthaus:** Herzstück der Wandlung (Turbine, Getriebe, Generator).
5. **Unterwasser:** Rückgabe in den natürlichen Kreislauf.



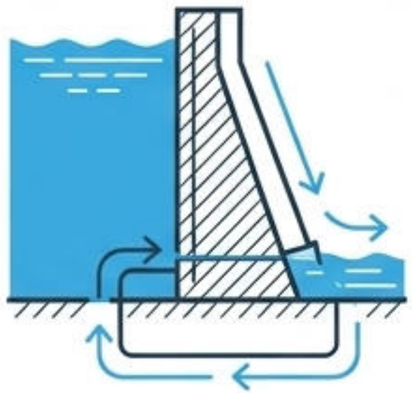
Gemini Notebook

Typologie der Kraftwerke



Laufwasserkraftwerke

- Gewässer wird gestaut, oft als Schwellbetrieb.
- Rolle: 24/7 Betrieb → Grundlast.



Speicherkraftwerke

- Nutzung potenzieller Energie aus höher gelegenen Speichern.
- Sonderform: Pumpspeicher (Rückführung durch Grundlaststrom).
- Rolle: Flexibilität → Spitzenlast.



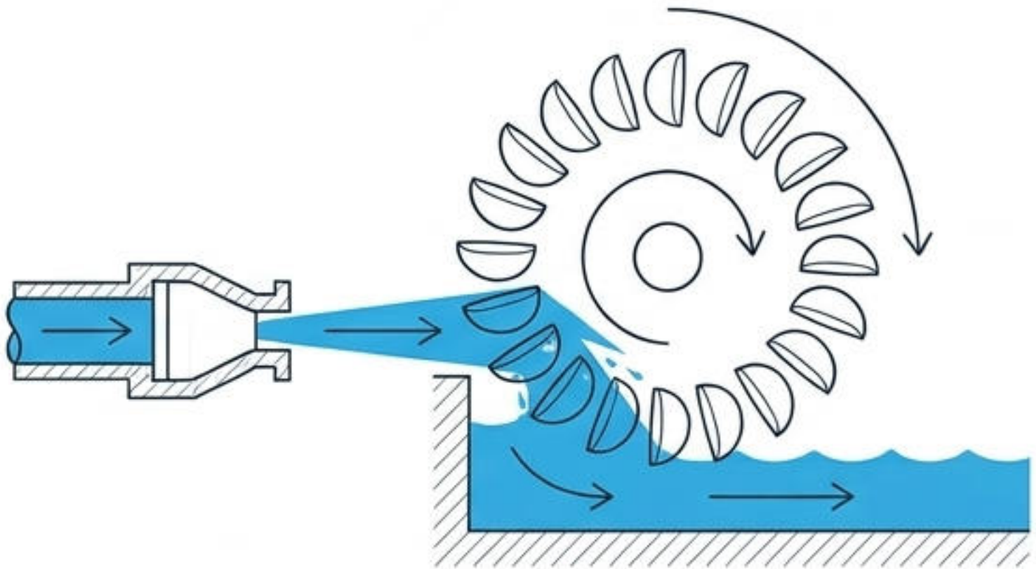
Alternative Ansätze

- Gezeiten (Tidenhub), Wellenkraftwerke, Osmose.
- Rolle: Schwankende Ströme, technologische Nischen.

Gemini Notebook

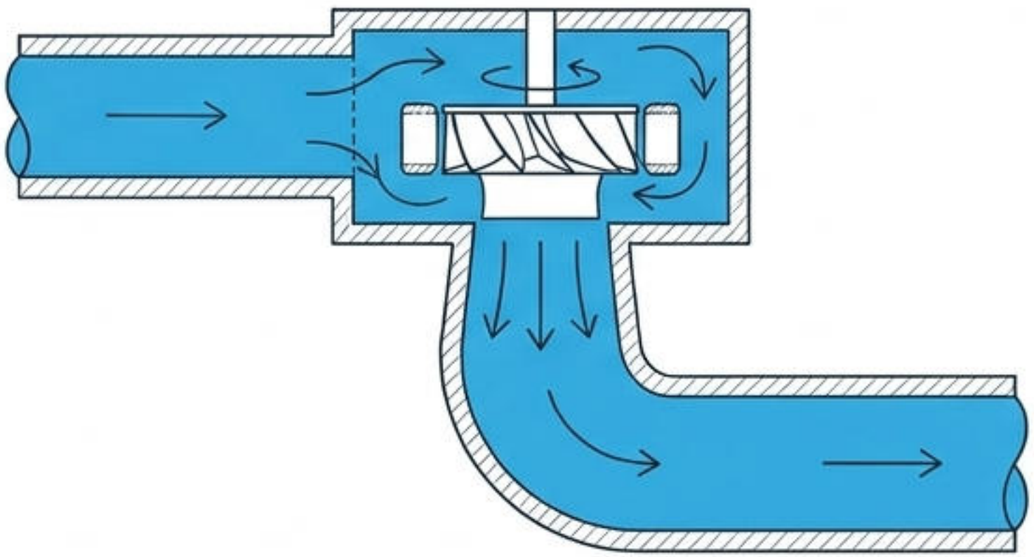
Turbinentechnologie: Gleichdruck vs. Überdruck

Gleichdruckturbinen (Aktionsturbinen)



- Laufrad wird druckfrei angeströmt.
- Gesamte Druckenergie wird vorab in Geschwindigkeitsenergie gewandelt.
- Beispiele: Pelton, Durchström.

Überdruckturbinen (Reaktionsturbinen)



- Hauptsächlich Übertragung von Druckenergie.
- Turbine wird vollständig vom Medium Wasser umströmt.
- Beispiele: Francis, Kaplan, PAT, Propeller.

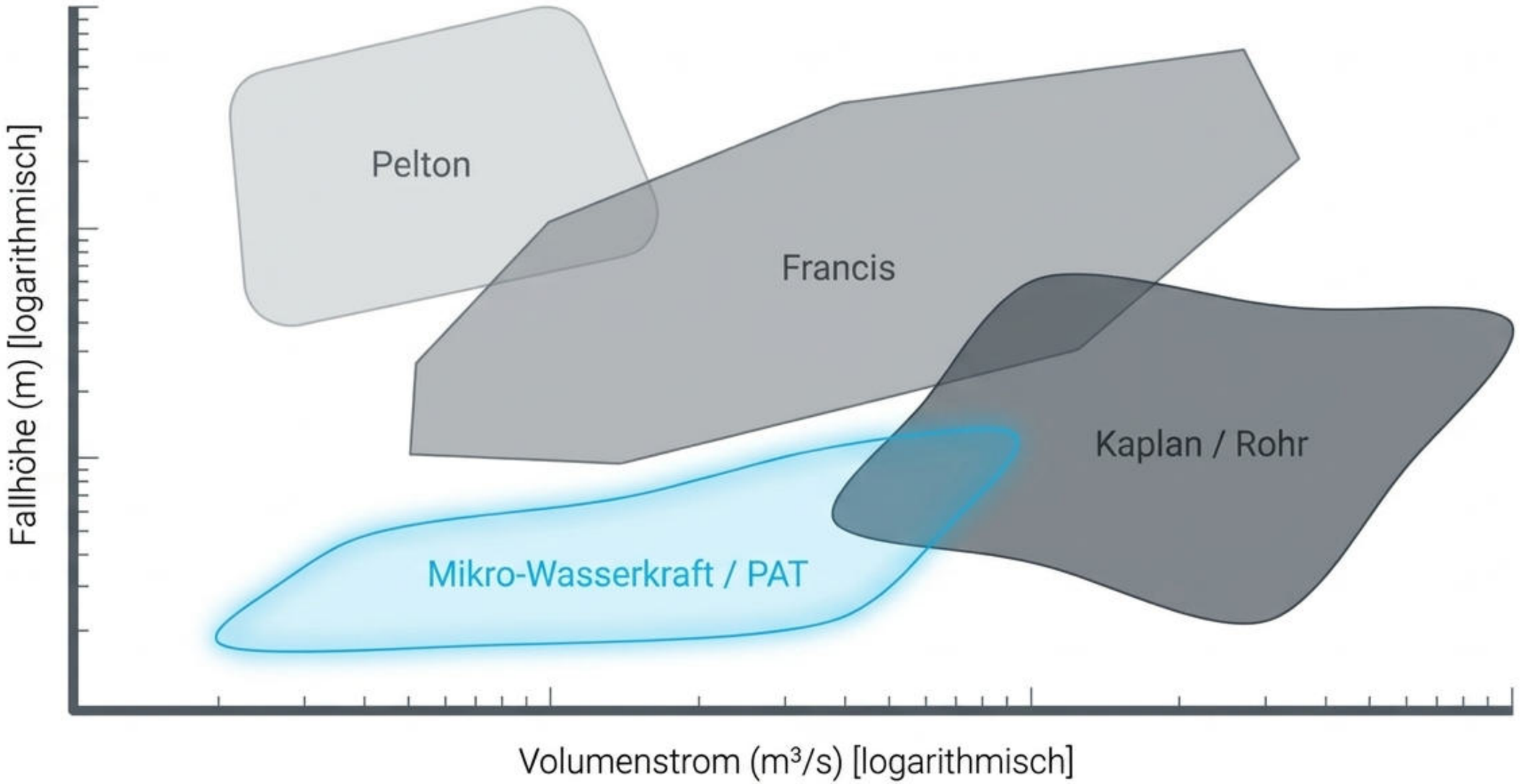
Gemini Notebook

Eigenschaften und Einsatzgebiete im direkten Vergleich

Turbinentyp	Fallhöhe	Durchfluss	Teillast-Verhalten	Besonderheiten
Pelton	>30m	klein bis mittel	exzellent (flache Kurve)	Gefahr durch Abrasion, Reinigung nötig
Francis	>200m	gleichmäßig	moderat (Leitapparat)	weltweit am häufigsten, oft Pumpturbine
Kaplan / Propeller	<80m	sehr hoch	exzellent (Kaplan) vs. schlecht (Propeller)	basiert auf reverser Schiffsschraube
PAT (Pumpe als Turbine)	variabel	konstant nötig	schlecht (steil abfallend)	>30 kW rentabel, sehr geringe Investitionskosten

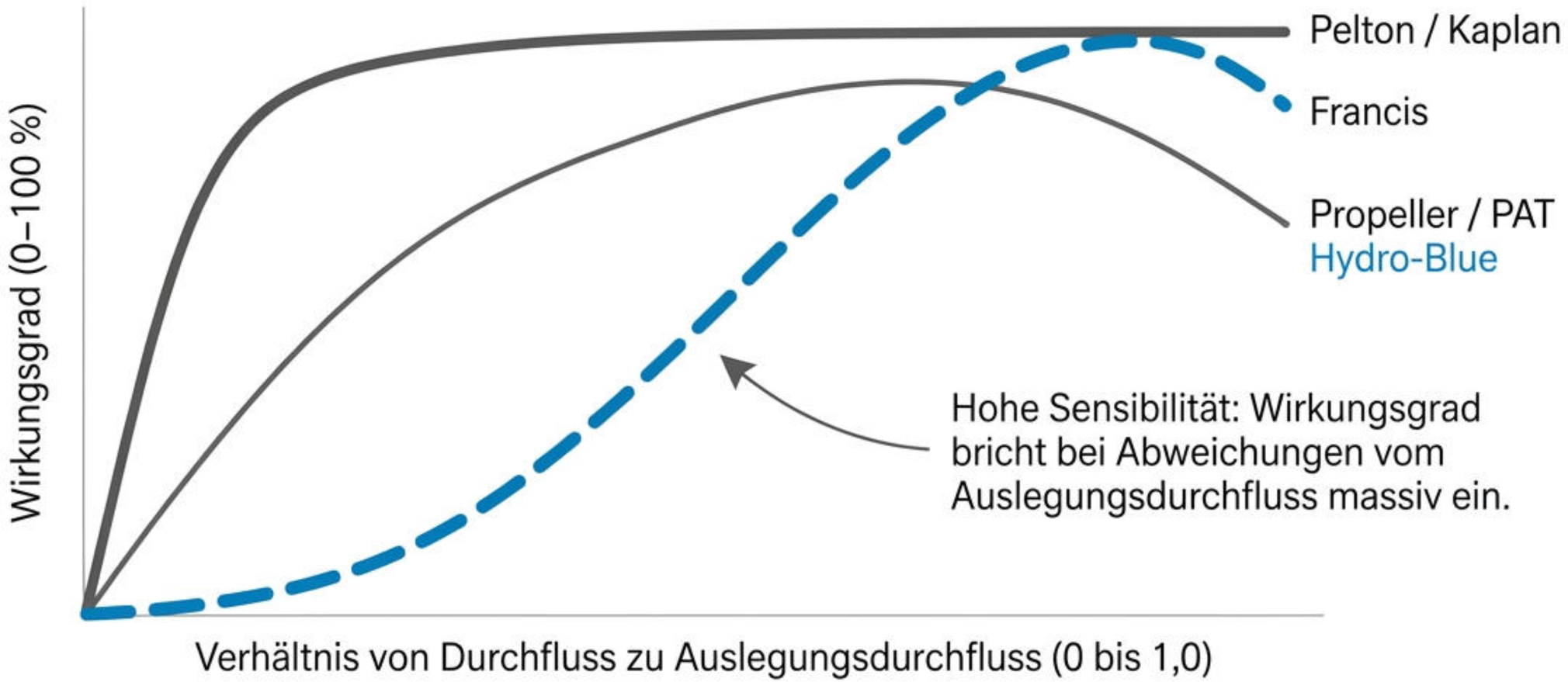
Gemini Notebook

Das Revier der Turbinen: Fallhöhe vs. Volumenstrom



Gemini Notebook

Effizienz unter realen Bedingungen (Teillastverhalten)



Fazit: Regulierbare Maschinen verzeihen Schwankungen.
Unregulierte Maschinen (PAT) fallen bei Abweichungen rapide ab.

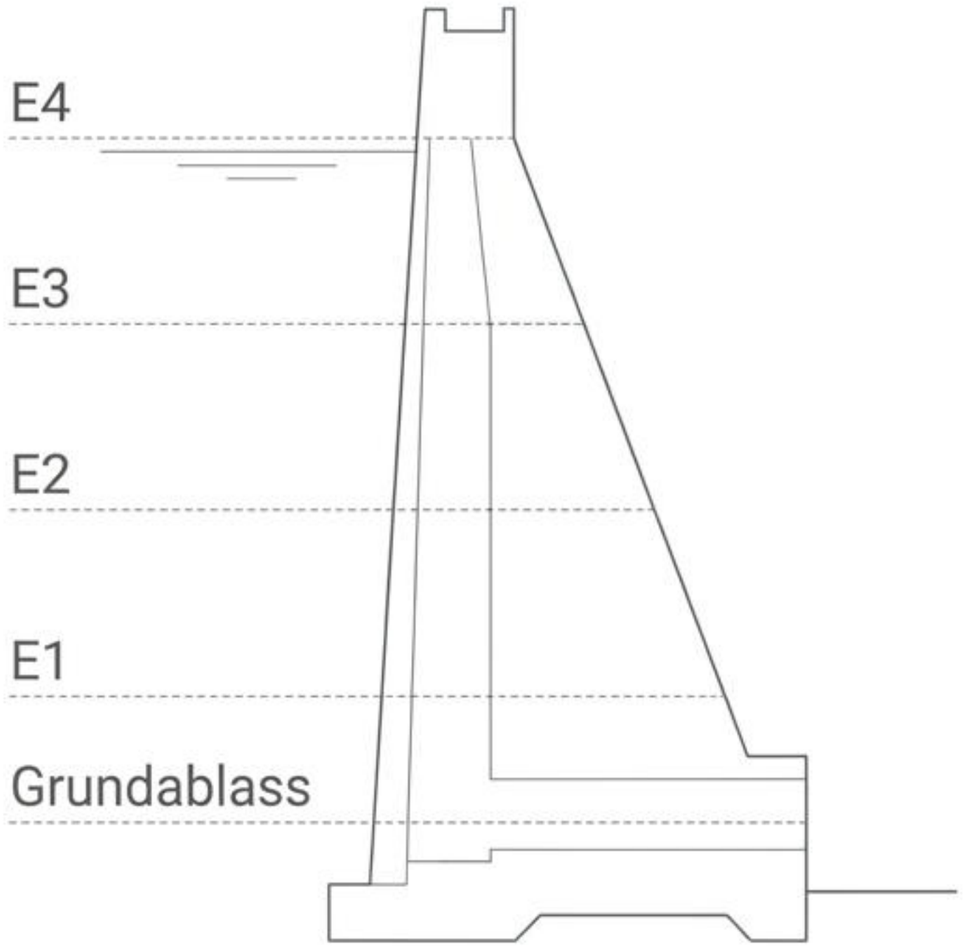
Gemini Notebook

Praxisbeispiel: Wasserwerk Zillierbachtalsperre (WWZ)

644 MWh

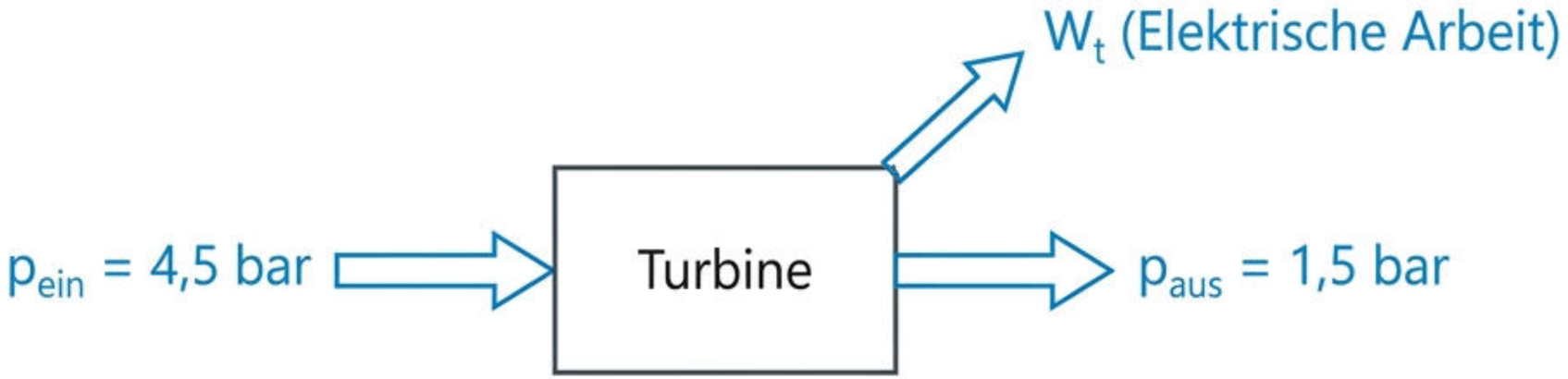
Ziel: Elektrische Energieautarkie pro Jahr.

- Problem: Fallender Trinkwasserbedarf (Prognose 1.000 – 1.500 m³/d).
- Bedingung: Schwankende Zuflüsse erschweren konstanten Turbinenbetrieb.



Gemini Notebook

Thermodynamische Bilanz (Die Berechnungslogik)



Methodik: Bilanzierung zwischen zwei Punkten unmittelbar vor und nach der Druckverminderung (adiabater Prozess).

Vorteil: Druckverluste im Einlauf und der Leitung (ξ_{EB}, ξ_{RL}) sind bereits implizit eliminiert.

Die Energiebilanz:

$$w_{t,12,rev} = \frac{p_{ein} - p_{aus}}{\rho}$$

Gemini Notebook

Potenzialanalyse und Szenarien

Maximal-Szenario
(Mit Grundablass)

321.930 kWh/a

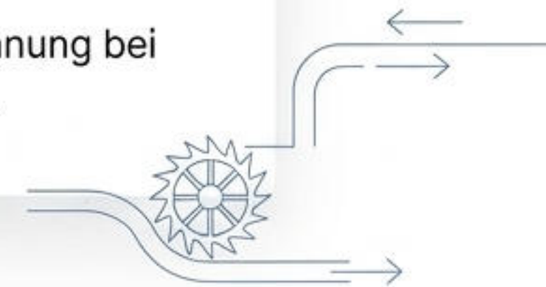
- **Bedingung**: Maximaler Volumenstrom (0,15 m³/s), Δp = 3,5 bar.
- **Wirkung**: Deckt ca. 50 % des Gesamtbedarfs.



Prognose-Szenario
(Reiner Trinkwasserbetrieb)

37.260 kWh/a

- **Bedingung**: Rückgang auf 1.500 m³/d, Δp = 3,5 bar.
- **Wirkung**: Energie-Rückgewinnung bei extrem geringem Durchfluss.



Erkenntnis: 100 % Autarkie wird aufgrund des sinkenden Wasserdurchsatzes nicht erreicht, ein substanzieller Beitrag ist jedoch machbar.

Gemini Notebook

Die Ingenieurs-Entscheidung: Maschinenauswahl

Anforderung: Mikro-Wasserkraft (< 40 kW), 1,5 bar Gegendruck zwingend, Budgetsensibel.

- **Francis?** ✗ Leistung mit <40 kW viel zu gering (üblich ab 400 kW).
- **Klassische Pelton?** ✗ Kein Gegendruck von 1,5 bar einstellbar.
- **Gegendruck-Pelton?** ✗ Zu hohe Investitionskosten (3x teurer).
- **Lösung: Pumpe als Turbine (PAT)** ✓ **Rückwärtslaufender Asynchron-Motor. Kostengünstig, ideal für diesen Druckbereich.**

Lösungsansatz: Die Schwäche der PAT im Teillastbereich wird durch Dynamisierung (Einsatz mehrerer Maschinen) ausgeglichen.

Gemini Notebook

Synthese: Vom Regentropfen zur Versorgungssicherheit

1. Meteorologie & Physik (Natur)

- 200 EJ/a globales Potenzial.
- Energie definiert durch h_{nutz} und Bernoulli-Bilanzierung.

2. Wandlungstechnologie (Maschine)

- Unterscheidung: Gleichdruck vs. Überdruck.
- Komplexe Balance aus Wirkungsgrad und Investitionskosten.

3. Systemintegration (Anwendung)

- Spezifische Problemlösung (Autarkie Zillierbach).
- Unkonventionelle Ansätze: Dynamische PAT-Systeme statt Standard-Turbinen.

Fazit: Wasserkraft ist ein hochkomplexes, interdisziplinäres System. Die reine Physik ordnet sich stets der ingenieurstechnischen und ökonomischen Realität unter.

Gemini Notebook