

WIR

**Willkommen**

# ~500'000 kWh/ pro Jahr?



- ~125 Haushalte
- ~1'666 Kühlschränke
- ~2'800 PC
- ~5'600 Fernsehgeräte
- ~500'000 Kleider-Waschvorgänge
- ~5'000'000 Tassen Kaffee

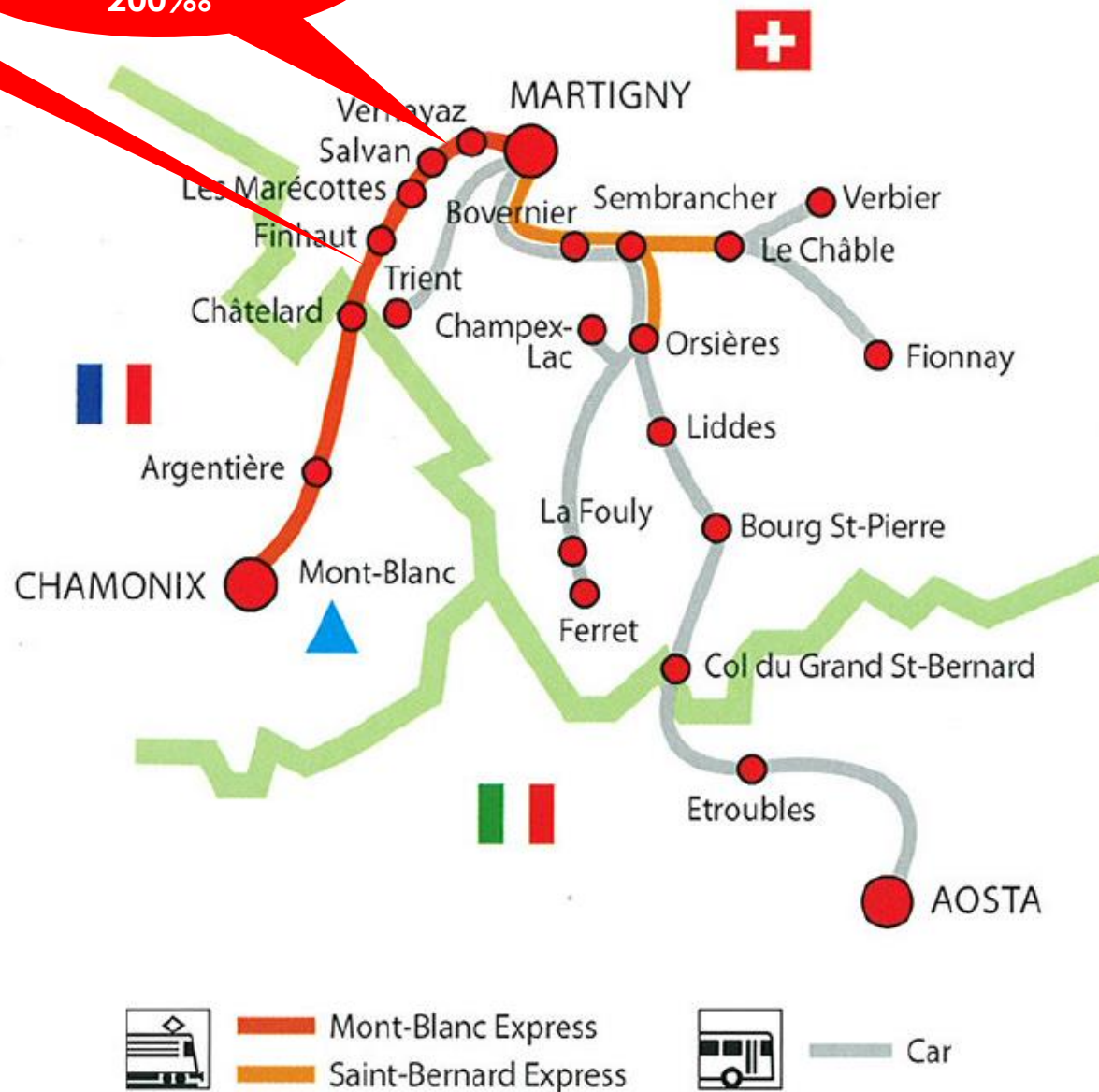


# Rekuperation der Bremsenergie beim Mont-Blanc Express

VöV AGr Energieeffizienz - Schwerpunkt Infrastruktur (01/19)  
22.03.2019 - Bern

CH:  
18 km

Abschnitt mit  
Zahnstange  
200‰

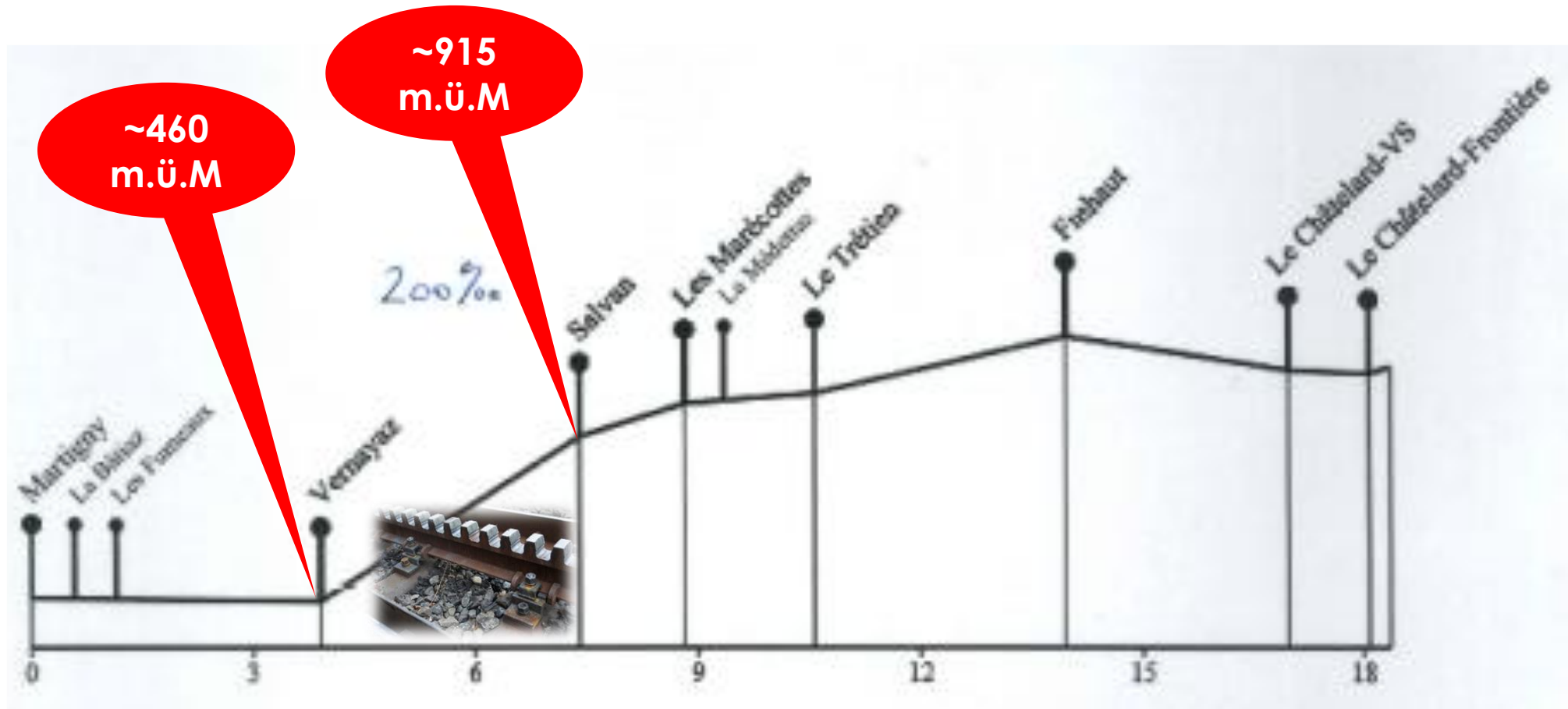






# Streckenprofil

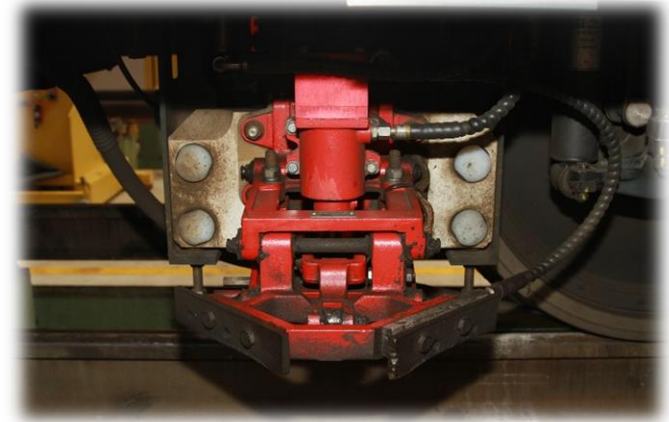
- Höhendifferenz ~455 m zwischen Salvan und Vernayaz





# Eigenschaften der Strecke

- Traktionsstromversorgung durch seitliche Stromschiene und Oberleitung
- 850 V DC
- 3 Unterwerke



# Ausgangspunkte für das Projekt



- Umweltpolitik der TMR:  
Energieeffizienz!
- Absicht, die Bremsenergie nutzen zu können
- Mehrere Studien
- Untersuchung verschiedener Varianten
- SETP 2050 & Unterstützung durch das BAV



# Varianten

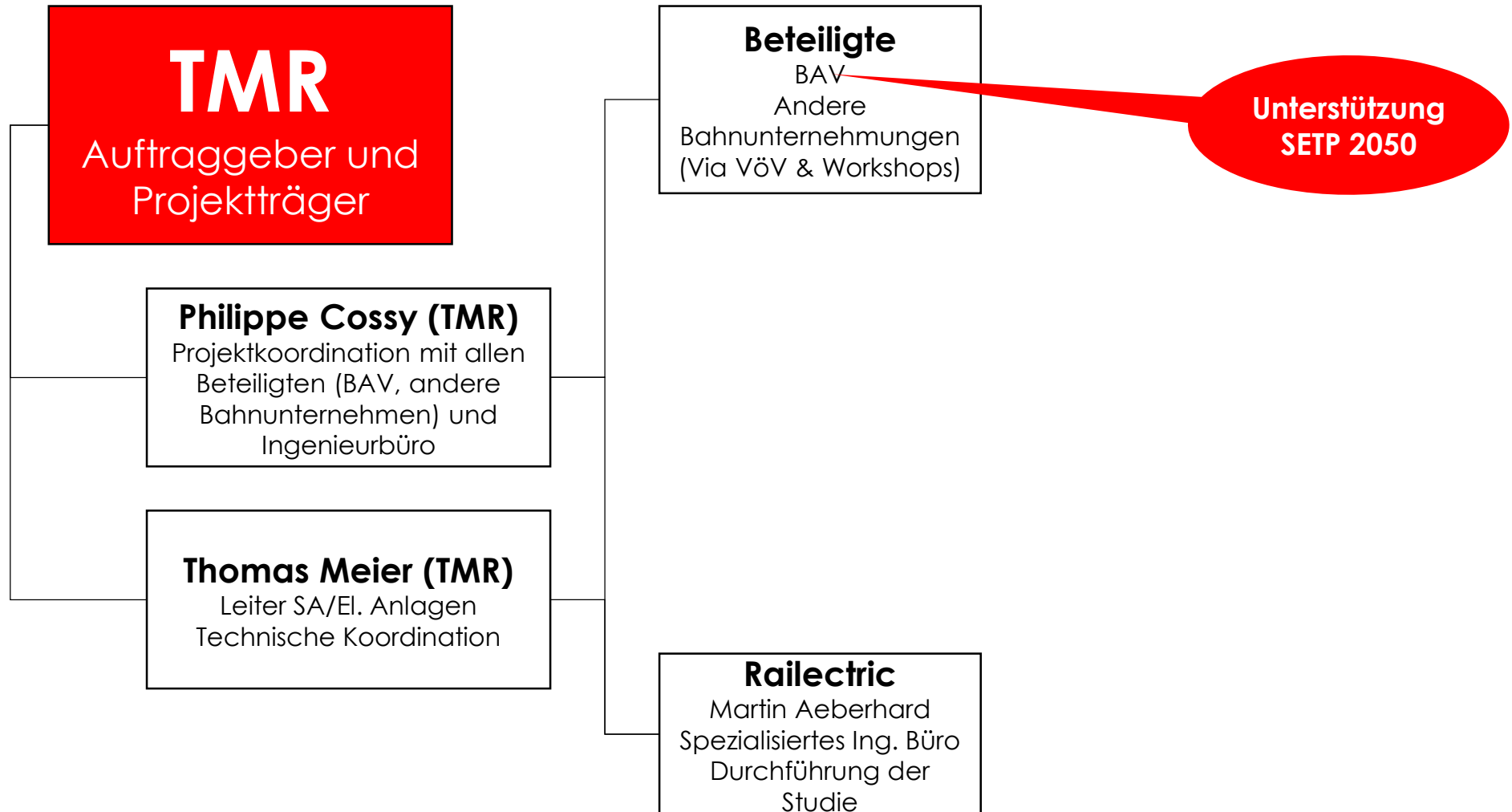
Option	Hindernisse
Direkte Nutzung der rekuperierten Energie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Beim Zeitpunkt maximaler Rekuperation befindet sich der Gegenzug ebenfalls im Gefälle. Der Kreuzungsort müsste geändert werden.</li><li>• Distanz zwischen Erzeuger und Verbraucher, sowie elektrischer Widerstand der (Stahl)-Stromschienen = zur grosser Spannungsabfall.</li></ul>
Wiederverkauf der elektrischen Energie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Notwendigkeit eines rückspeisefähigen Unterwerks</li><li>• Zu tiefe Vergütung für die zurückgegebene Energie</li><li>• <b>Fluktuierende Energieerzeugung, kaum Interesse seitens der Käufer</b></li></ul>
Speicherung auf den Fahrzeugen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zu wenig Platz auf den Fahrzeugen</li><li>• Notwendigkeit einer Neu-Zulassung</li><li>• Zusätzliches Gewicht, bei einer Zahnradbahn besonders unerwünscht</li></ul>

# Projektziele



- Mittels Simulation: Bestimmung der notwendigen Speicherkapazität und eines geeigneten Standorts für einen stationären Speicher. Erstellen einer funktionalen Spezifikation.
- Einholen von Richtofferten für geeignete Speichersysteme gemäss Spezifikation bei Firmen welche geeignete Produkte anbieten können.
- Untersuchungsergebnisse allen Interessenten zur Verfügung stellen.

# Organigramm



# Überprüfung der Ziele!

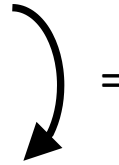
- Speicherung nicht mehr zwingend DIE Lösung
- Interesse für Rückkauf der Energie hat sich geändert





# Rekuperation bei Zahnradbahnen Eine besondere Herausforderung...

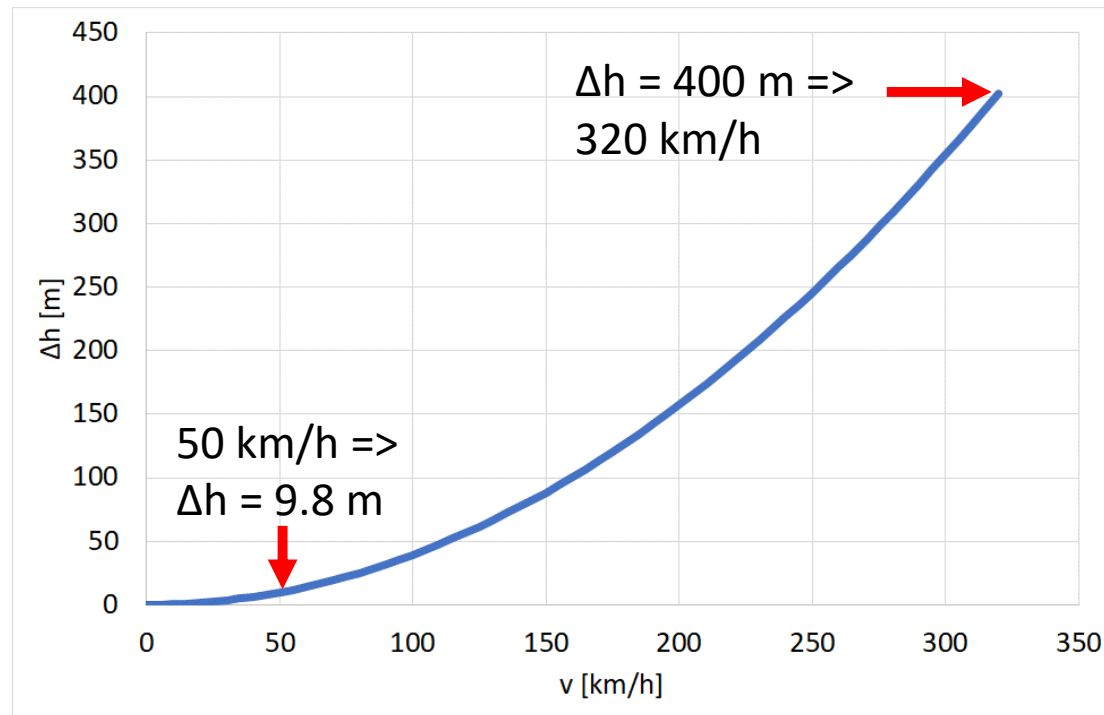
Kinetische Energie:  $E = \frac{1}{2} * m * v^2$



=

$$\Delta h = \frac{v^2}{2 * g}$$

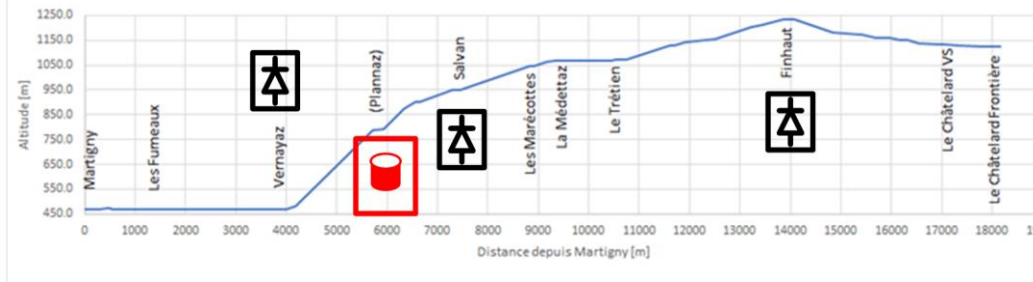
Potentielle Energie:  $E = m * g * \Delta h$



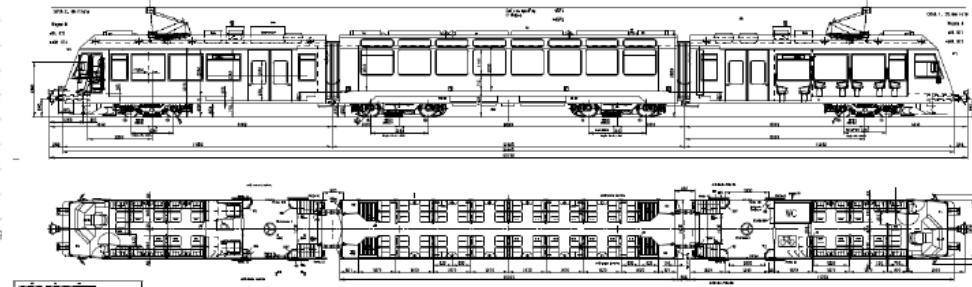
# Simulationsmodell (Tool $\mu$ PAS/ZFS)



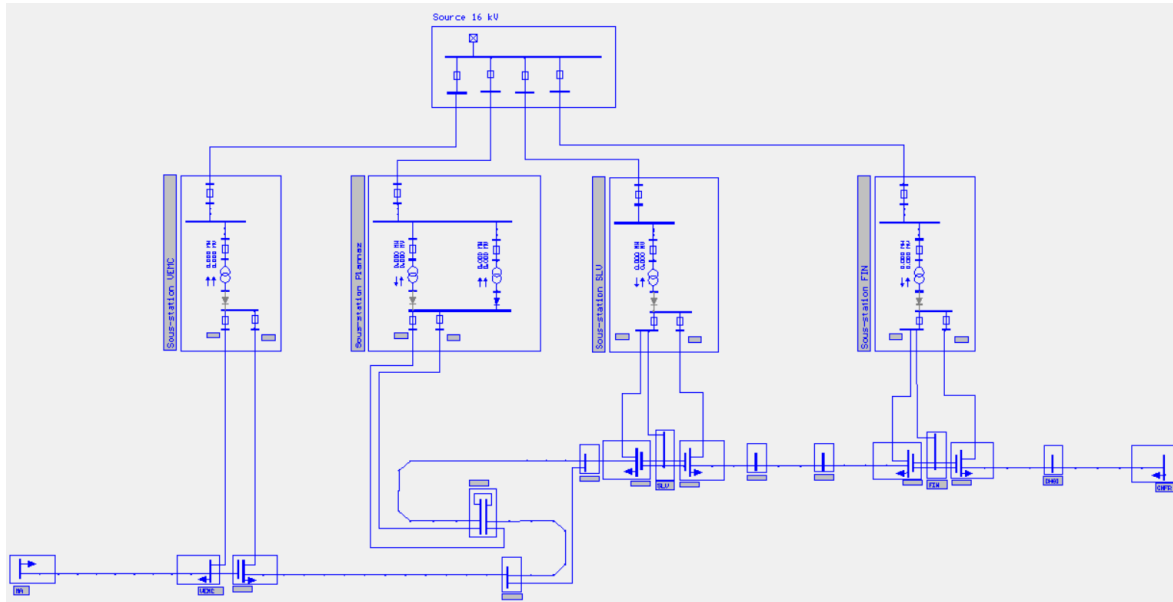
## Streckendaten



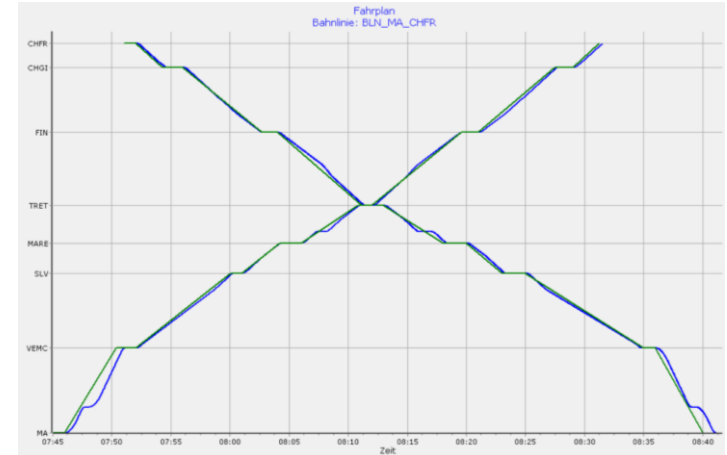
## Rollmaterial



## Speiseschema

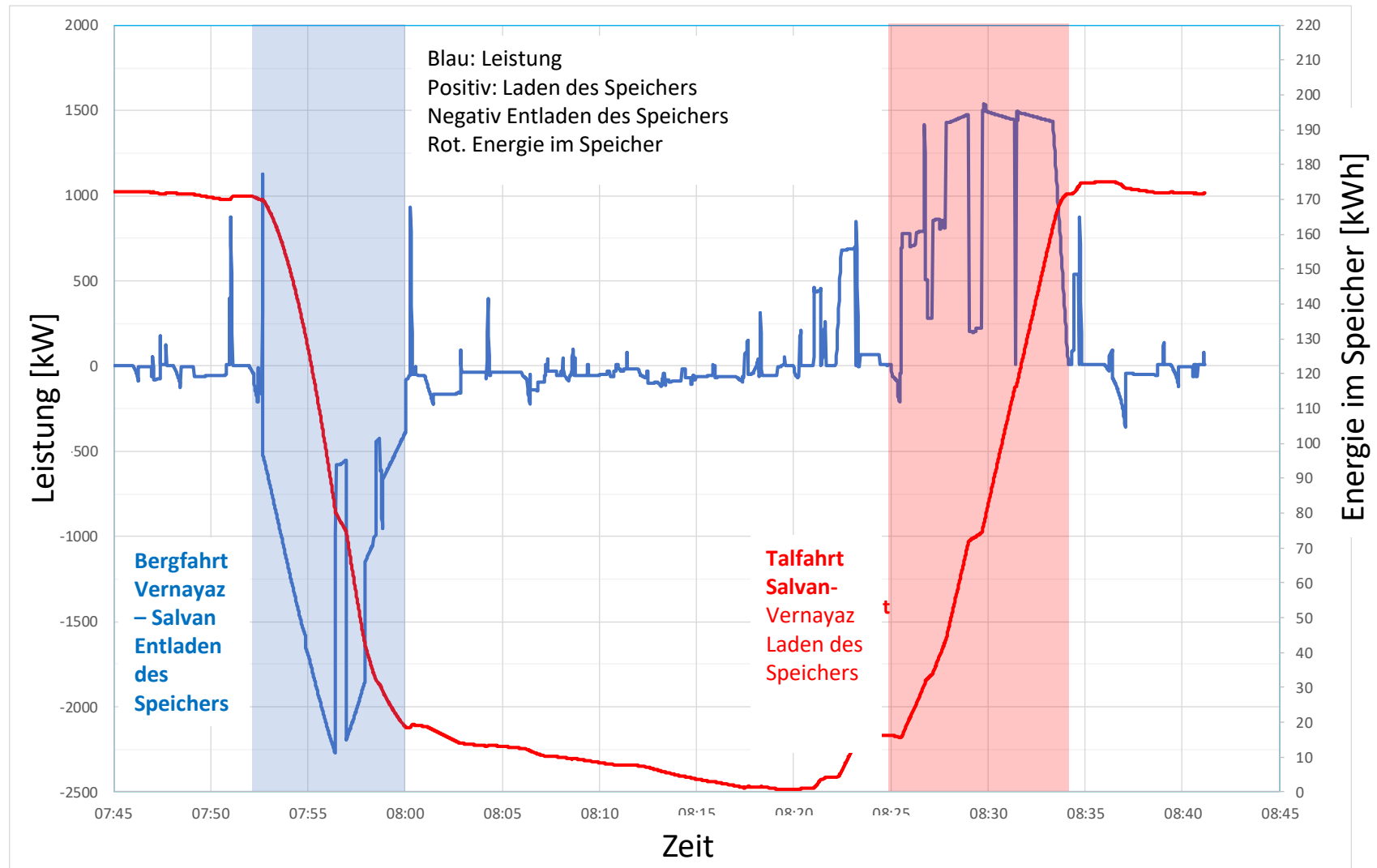


## Fahrplan



# Ergebnisse der Simulationen

1 Beispiel, zwei Z870 in Vielfachsteuerung, maximale Zuladung



# Einflussfaktoren

Zum Beispiel...



... Beladung der Züge



# Einflussfaktoren



Das Rekuperations-Potential ist abhängig von verschiedenen Faktoren :

- Zugskomposition (Einfach- oder Doppeltraktion)
- Typ des Rollmaterials (Z800 oder Z870)
- Beladung (Anzahl Passagiere)
- Hilfsbetriebe-Leistung (Hilfsbetriebe Traktion / Heizung / Klimatisierung)
- Um ein realistisches Bild zu erlangen, ist eine grössere Anzahl Simulationen erforderlich

# Einflussfaktoren



**Z800 US**

**masse vide: 72 t**

2700 aller retour par an

	Puissance auxiliaire minimale (45% ) 14 kW (20% Ptot)	Puissance auxiliaire moyenne (45% ) 35 kW (50% Ptot)	Puissance auxiliaire maximale (10%) 69 kW
<b>Charge minimale</b> 750 kg (60%) 2082 A/R (10 personnes)	<b>A1</b> 937 circulations A/R par an	<b>A2</b> 937 circulations A/R par an	<b>A3</b> 208 circulations A/R par an
<b>Charge moyenne</b> 6'000 kg (20%) 694 A/R (80 personnes)	<b>A4</b> 312 circulations A/R par an	<b>A5</b> 312 circulations A/R par an	<b>A6</b> 70 circulations A/R par an
<b>Charge maximale</b> 13'350 kg (20%) 694 A/R (178 personnes)	<b>A7</b> 312 circulations A/R par an	<b>A8</b> 312 circulations A/R par an	<b>A9</b> 70 circulations A/R par an

**Z800 UM**

**masse vide: 144 t**

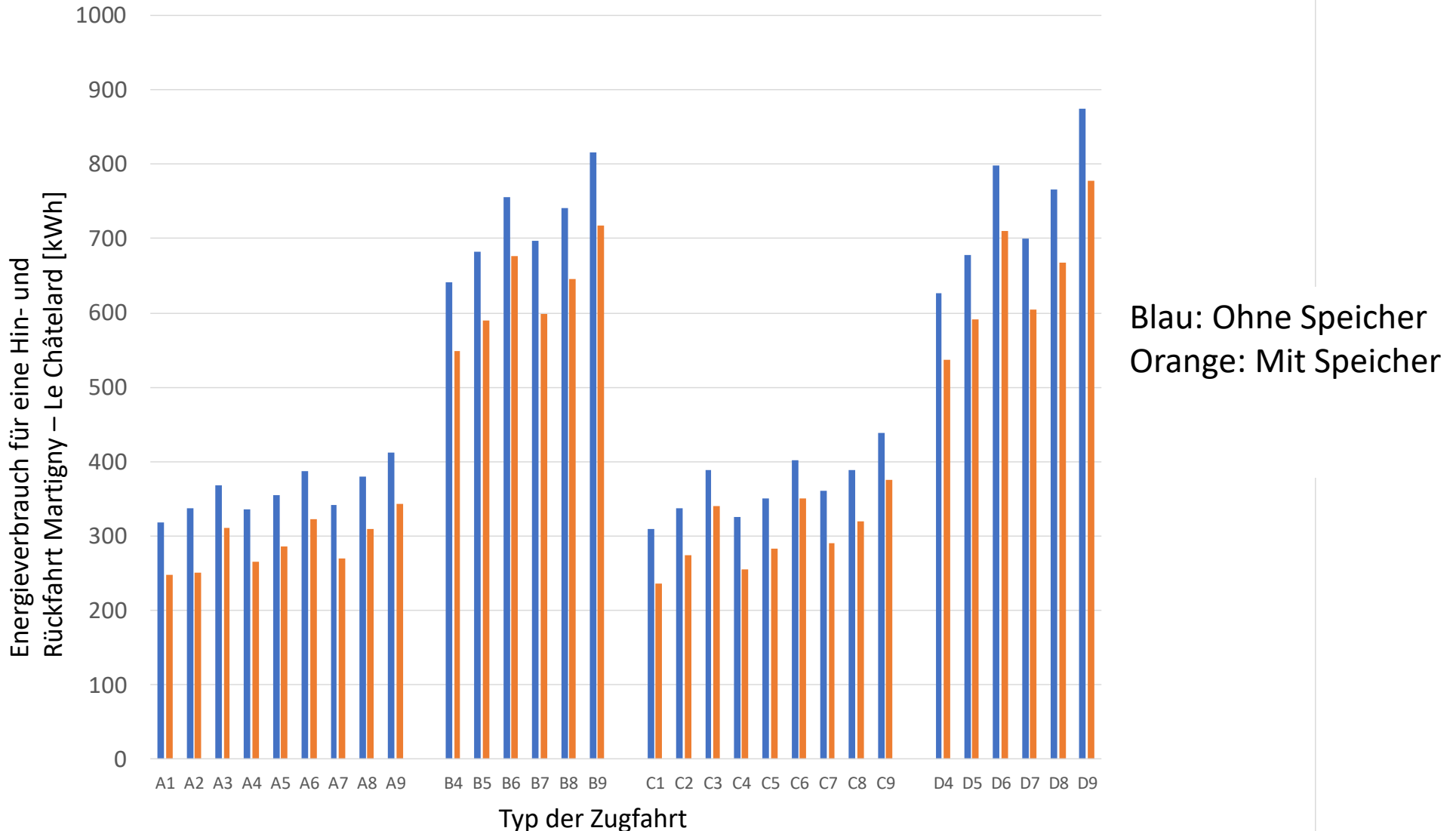
720 aller retour par an

	Puissance auxiliaire minimale (45% ) 28 kW (20% Ptot)	Puissance auxiliaire moyenne (45%) 70 kW (50% Ptot)	Puissane auxiliaire maximale (10%) 138 kW
<b>Charge minimale</b> 750 kg (10 personnes)	<b>B1</b> 0 circulations A/R par an	<b>B2</b> 0 circulations A/R par an	<b>B3</b> 0 circulations A/R par an
<b>Charge moyenne</b> 12'000 kg (80%) 576 A/R (160 personnes)	<b>B4</b> 259 circulations A/R par an	<b>B5</b> 259 circulations A/R par an	<b>B6</b> 58 circulations A/R par an
<b>Charge maximale</b> 26'700 kg (20%) 144 A/R (356 personnes)	<b>B7</b> 65 circulations A/R par an	<b>B8</b> 65 circulations A/R par an	<b>B9</b> 14 circulations A/R par an

Und gleiche  
Tabellen für die  
Z870...

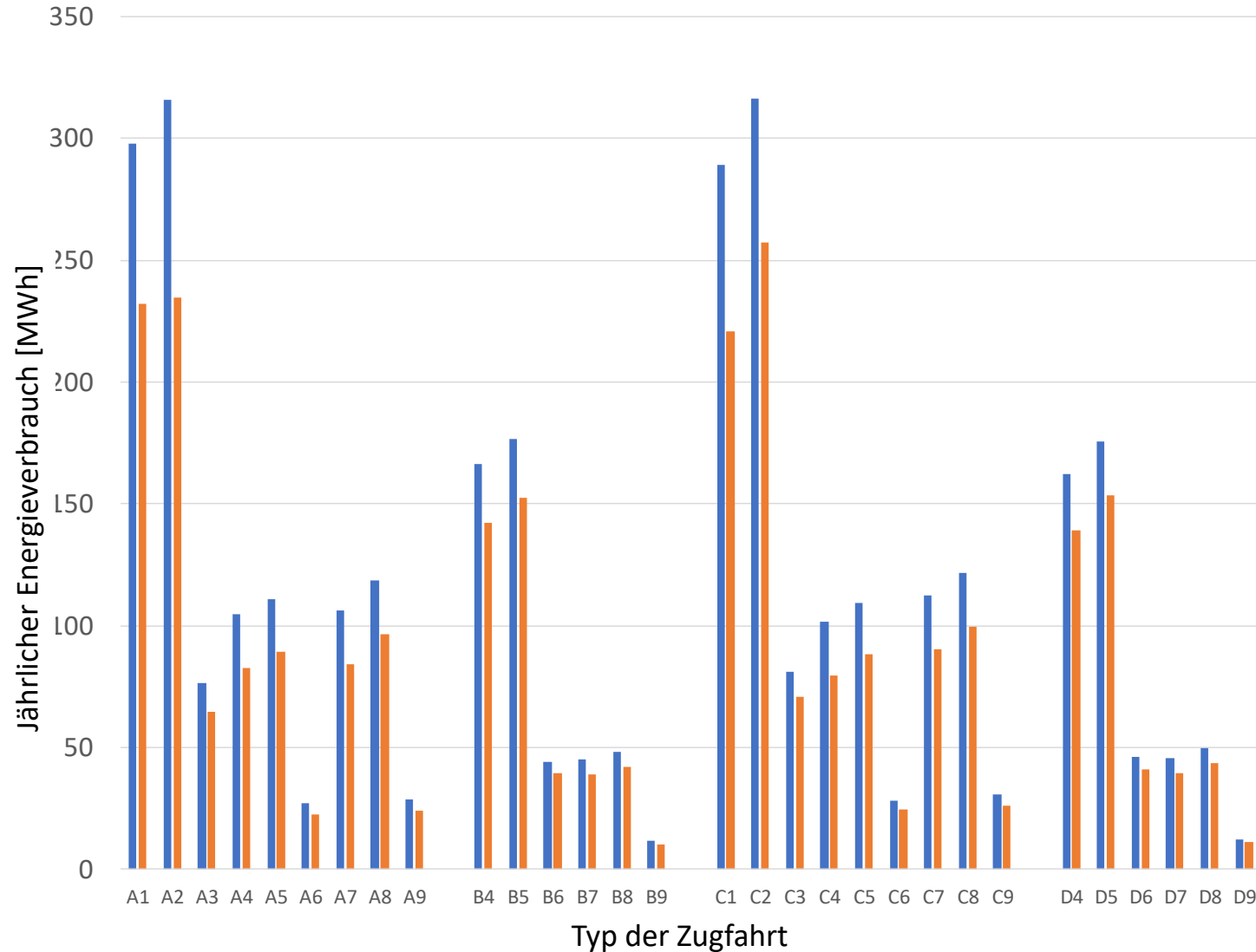
# Ergebnisse der Simulationen

Nach Typen der Zugfahrten, Speicherkapazität 90 kWh



# Ergebnisse der Simulationen

Nach Typen der Zugfahrten, **pro Jahr**, Speicherkapazität 90 kWh

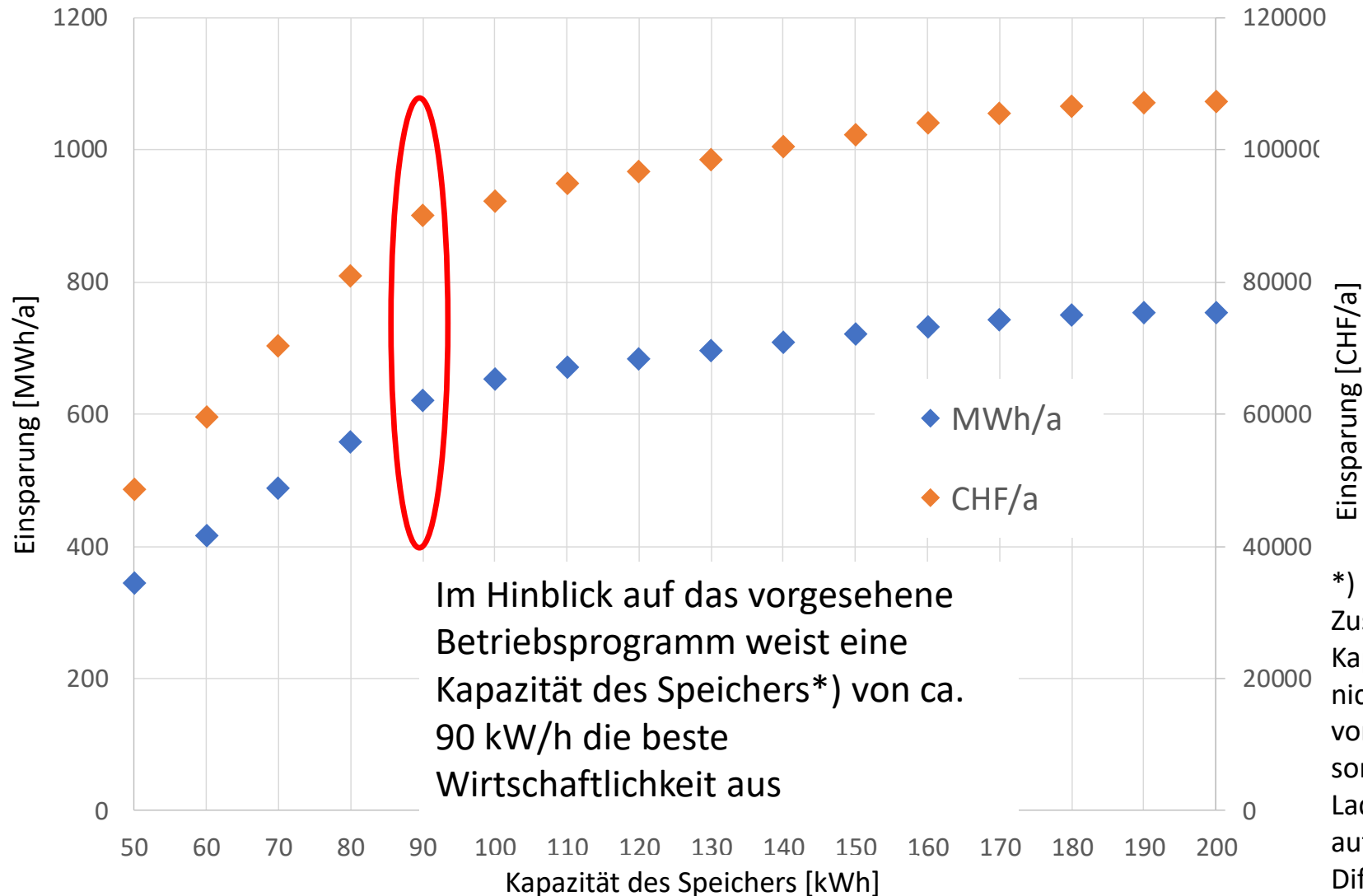


Blau: Ohne Speicher  
Orange: Mit Speicher



# Ergebnisse der Simulationen

## Einfluss der Speichergrösse



\*) In diesem Zusammenhang bedeutet Kapazität des Speichers nicht die physikalisch vorhandene Kapazität, sondern die bei jedem Lade-/Entladezyklus auftretende Energie-Differenz

# Vorgeschlagene Lösungen



Seitens Industrie sind folgende Vorschläge eingegangen

- 3 Varianten mit Batteriespeichern
- 1 Variante mit Schwungradspeicher
- 1 Variante eines Wechselrichters, welcher parallel zum vorhanden UW Vernayaz geschaltet würde (dieses wird dadurch reversibel)

# Batteriespeicher



- Investitionskosten  
Kosten für Tiefbau, Transport und Installation eingeschlossen  
1.1 – 2.1 MCHF
- Lebensdauer der Batterien  
3.8 – 14 Jahre
- Kosten für Batterie-Ersatz  
520 – 600 kCHF
- Kosten für Batterie-Recycling  
(pro Austausch)  
15 – 25 kCHF
- System-Wirkungsgrad  
Stromrichter 96 %, Batterie 90 %  
84.6 %
- Zusätzlich Abschätzung der Kosten für Unterhalt,  
Heizung/Klimatisierung

# Schwungradspeicher



- Investitionskosten 3.5 MCHF  
Kosten für Tiefbau, Transport und Installation eingeschlossen
- Lebensdauer Hauptkomponenten  $\geq 25$  Jahre
- System-Wirkungsgrad 82 %
- Zusätzlich Abschätzung der Kosten für  
Unterhalt, Kühlung

# Wechselrichter

Parallel zum Gleichrichter-Unterwerk Vernayaz



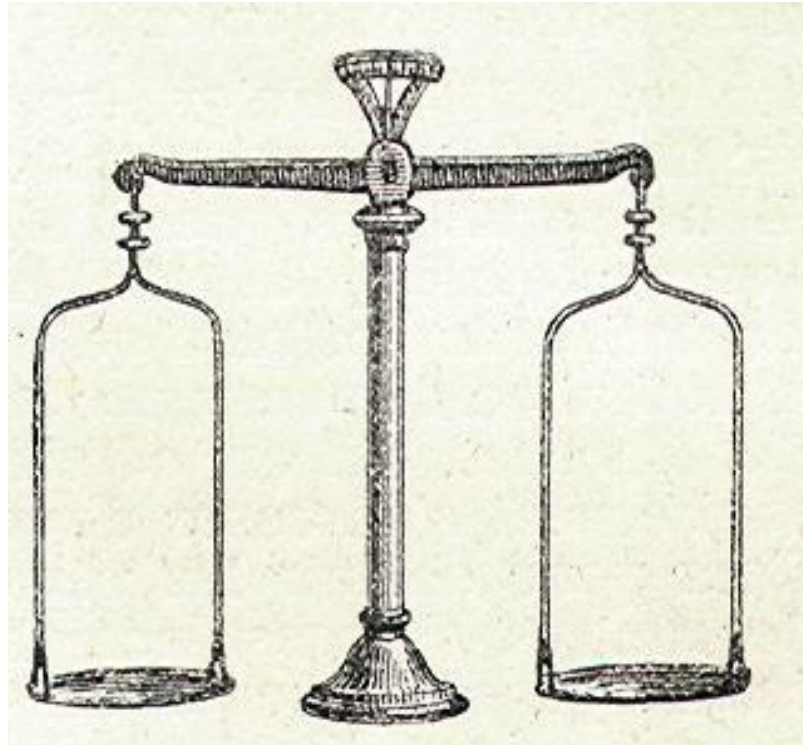
- Investitionskosten 0.915  
MCHF  
Kosten für Tiefbau, Transport und Installation eingeschlossen
- Lebensdauer Hauptkomponenten  $\geq 25$  ans
- System-Wirkungsgrad 97 %
- Zusätzlich Abschätzung der Kosten für Unterhalt, Kühlung
- Container mit zwei Systemen à je 750 kW, mit der Option, das zweite System erst später nachzurüsten (im folgenden wird aber immer davon ausgegangen, dass von Anfang an 2 x 750 kW ausgerüstet werden)
- Inklusive zusätzlichem Abgangsfeld 16 kV
- Optional auch nutzbar als Blindleistungskompensator auf der 16-kV-Seite



# Life Cycle Costs (LCC)

Investitionskosten

Unterhalt / Ersatz  
von Komponenten  
(insbesondere der  
Batterien)



Einsparung  
Energiekosten

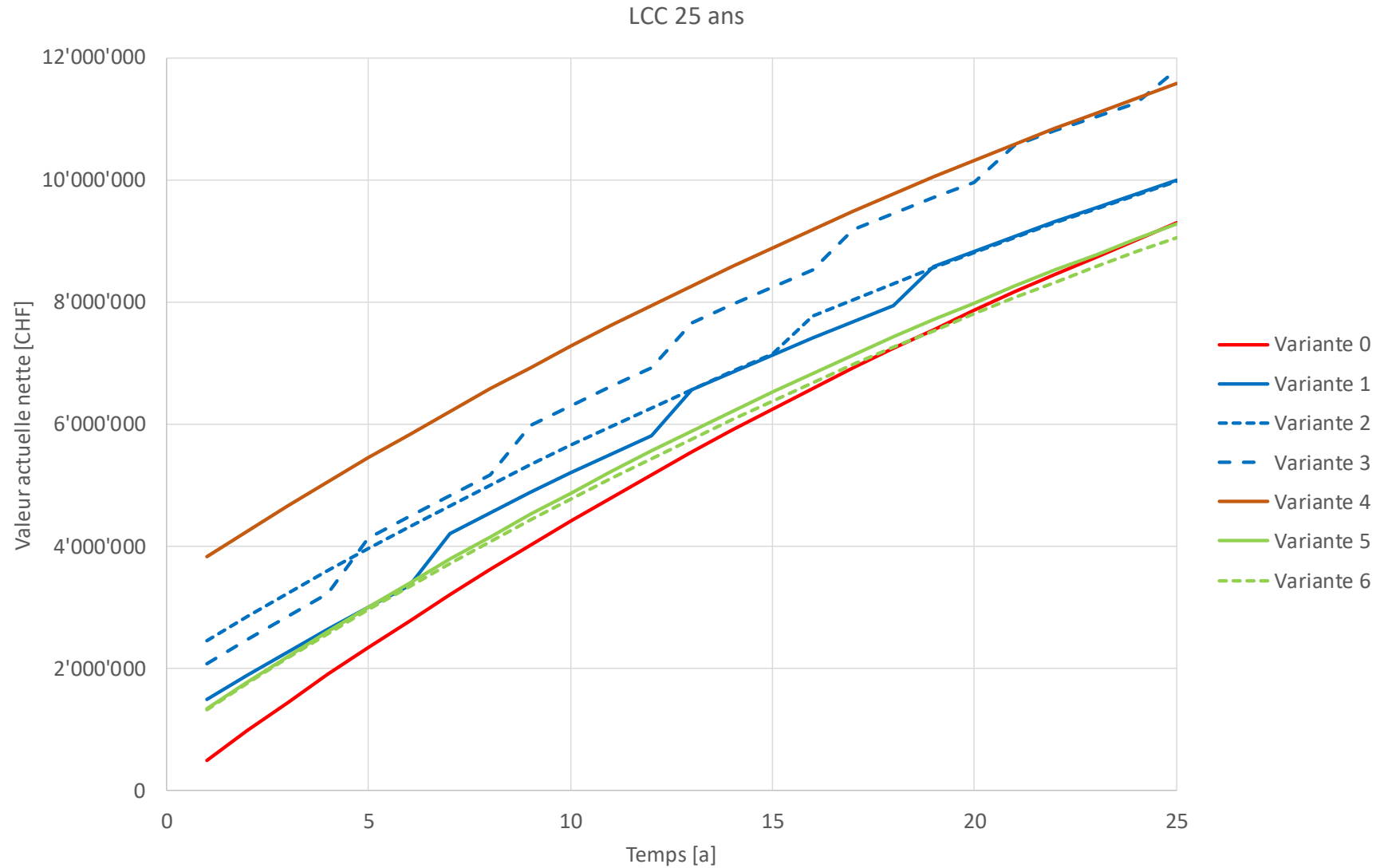
# Life Cycle Costs (LCC)



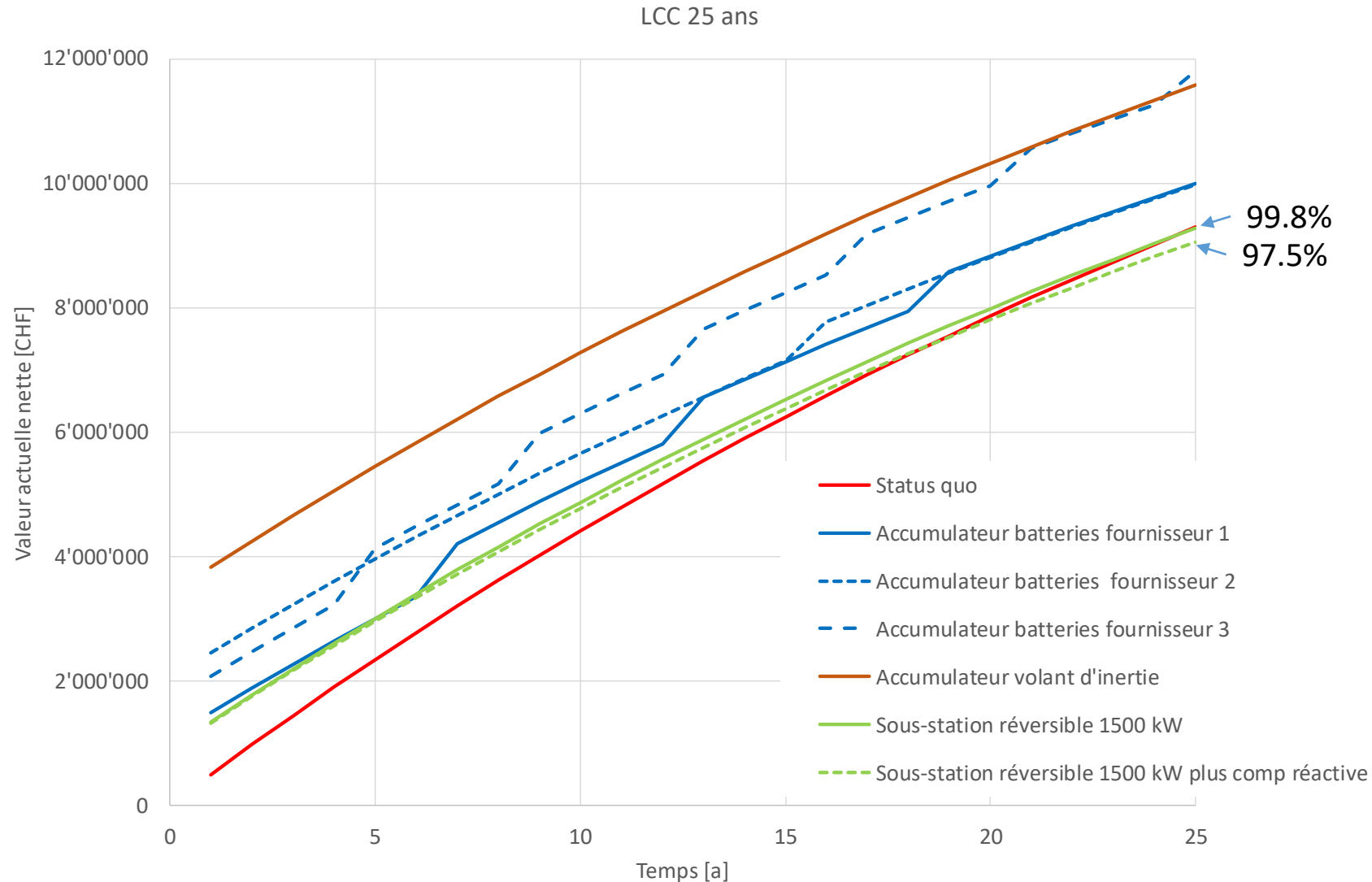
Für alle Varianten gemeinsame Annahmen

- System-Lebensdauer: 25 ans
- Technischer Zinssatz: 2.5 %
- Kosten für Energiebeschaffung  
(inkl. Kosten Netznutzung): 0.15 CHF/kWh
- Rückverkauf der Energie  
(inkl. Kosten Netznutzung): 0.05 CHF/kWh
- Wechselkurs: 1.15 CHF/Euro

# LCC Ergebnisse

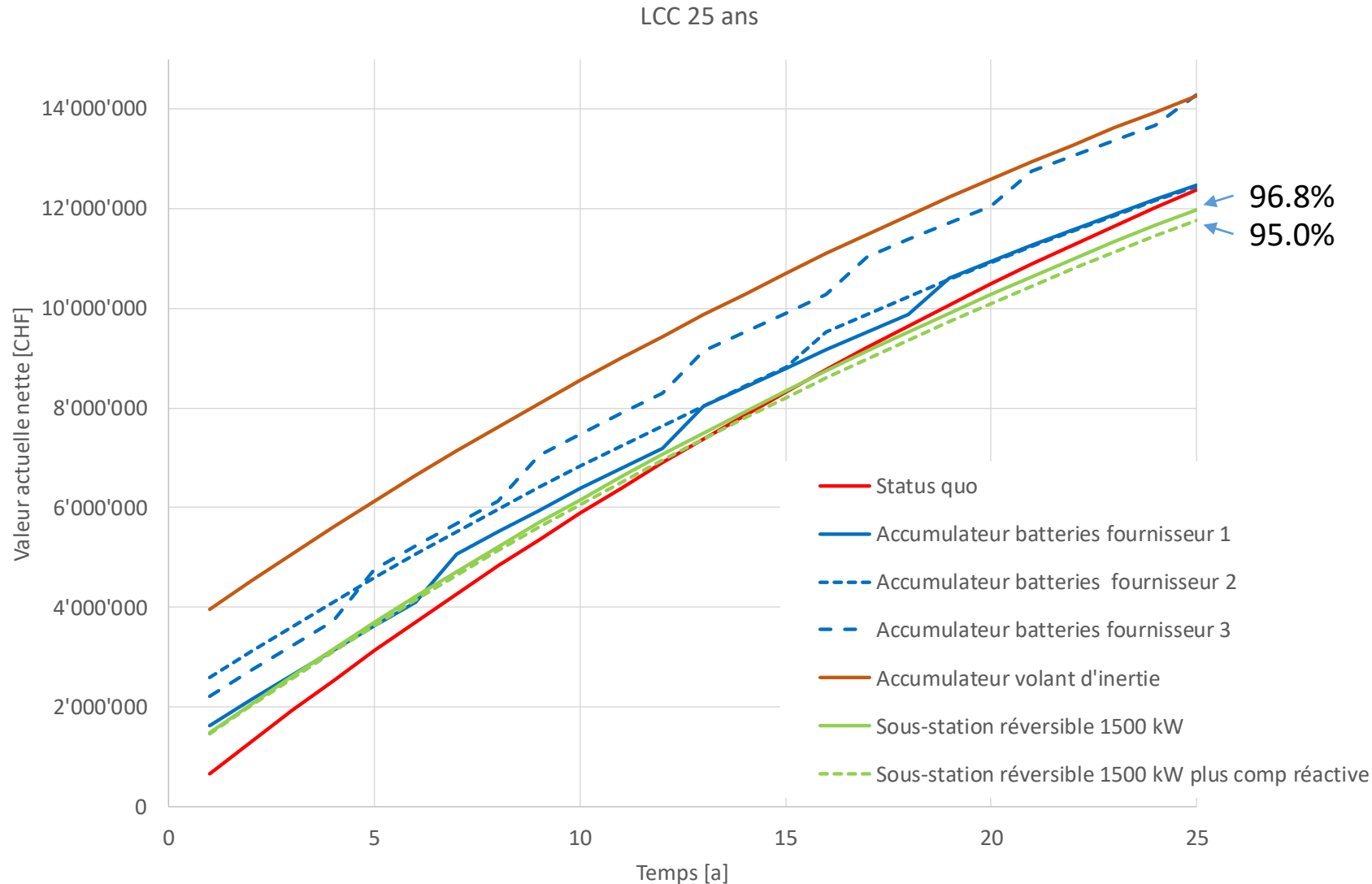


# LCC Résultats (was sich hinter den Varianten versteckt)



# LCC Sensitivitätsanalyse

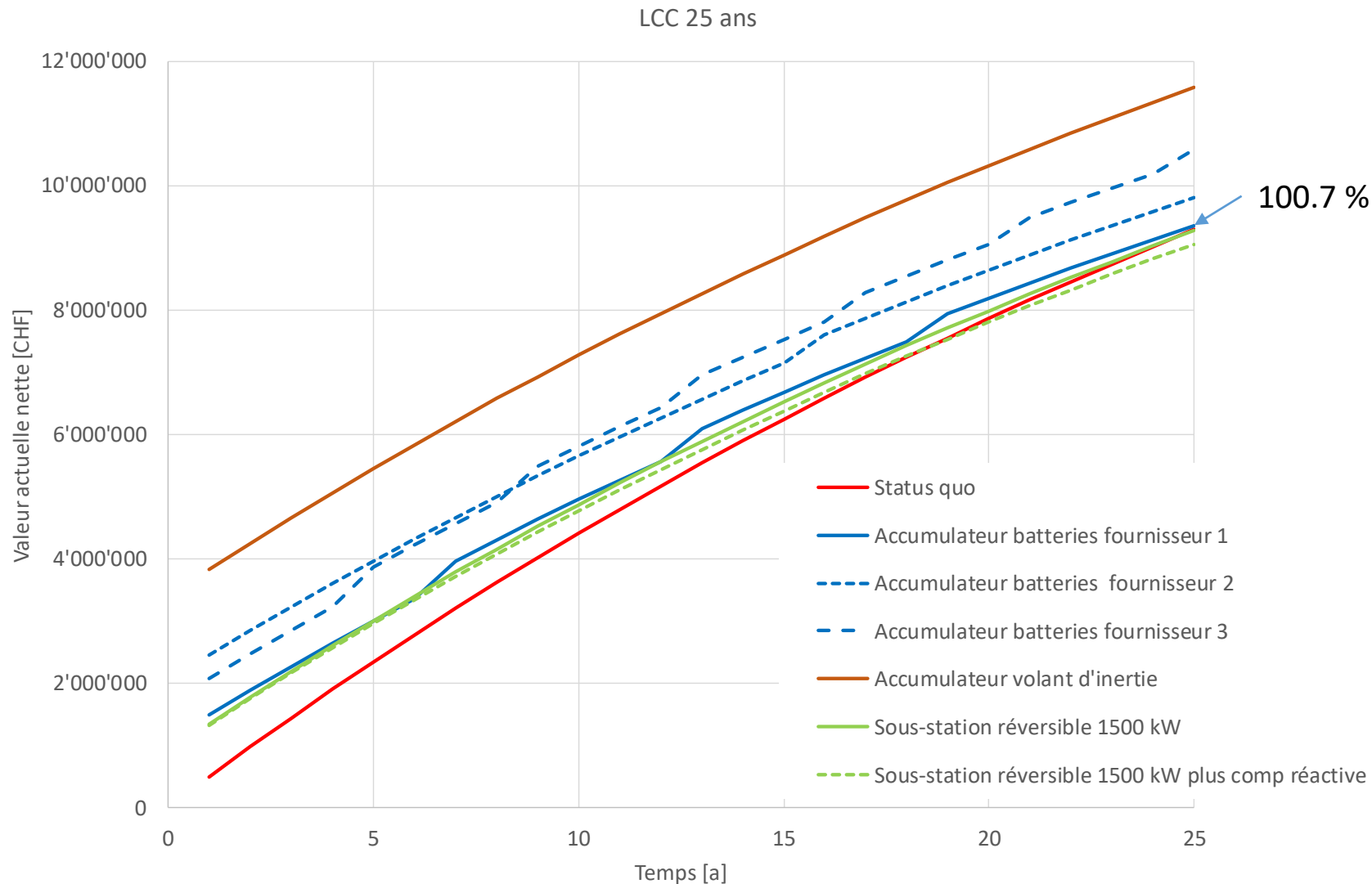
Energie-Einkauf 0.15 -> 0.20 CHF/kWh, Energie-Verkauf 0.05 -> 0.07 CHF/kWh



# LCC Sensitivitätsanalyse

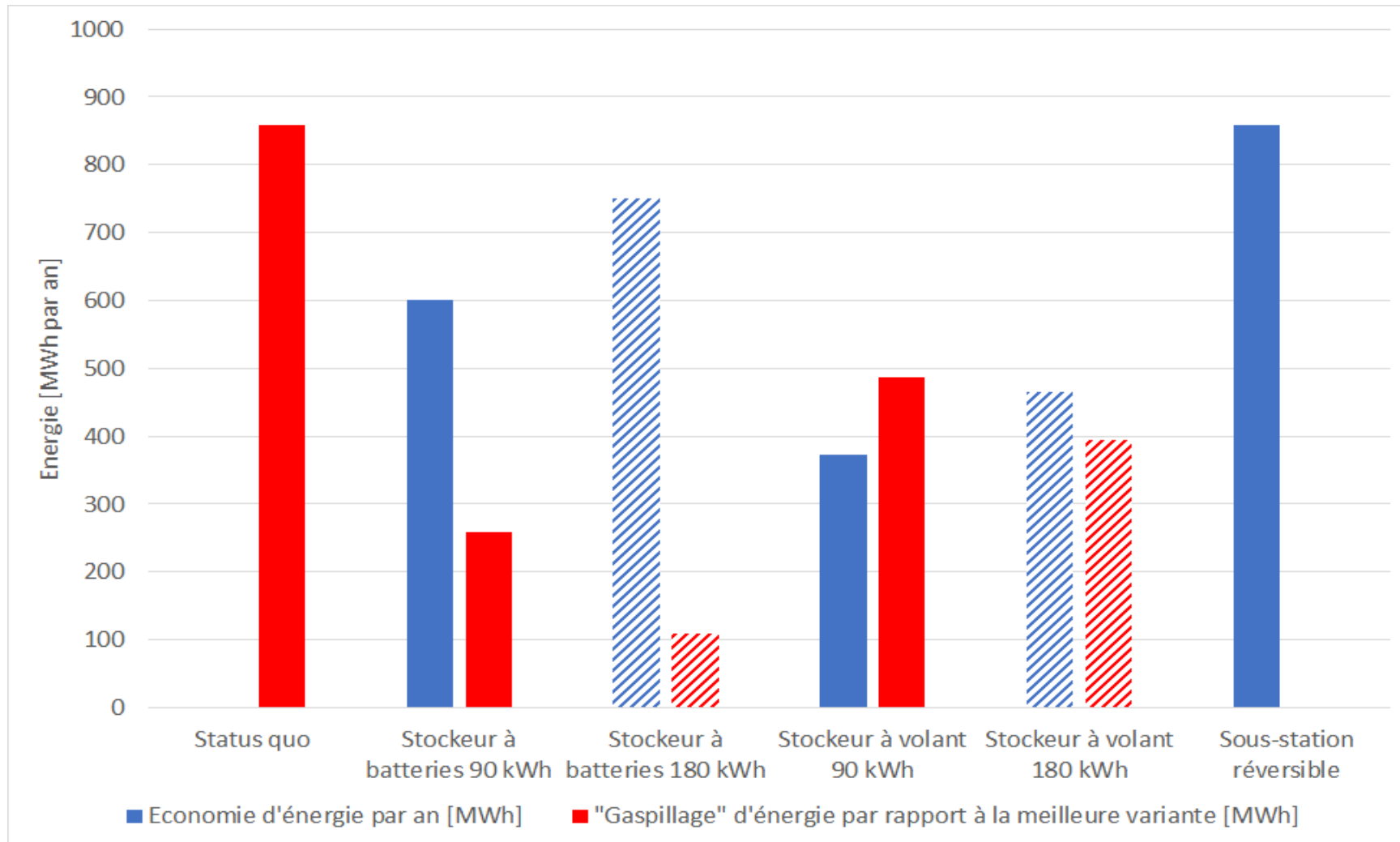
Energie-Einkauf 15 CHF/kWh, Energie-Verkauf 0.05 CHF/kWh

Kosten für Batterieersatz um 50% reduziert





# Abgesehen von den finanziellen Aspekten...



## Abgesehen von den finanziellen Aspekten...



Weitere Aspekte, die berücksichtigt werden müssen:

- «Graue» Energie
- Ökologische Aspekte der Rohstoffgewinnung, der Produktion und des Recyclings
- Bewertung des Nutzens einer zeitlich begrenzt nutzbaren, unabhängigen Energiequelle (z.B. um bei einem Stromausfall einen Zug bergwärts evakuieren zu können) ?

# Diskussion



Merci !

[www.tmr.ch](http://www.tmr.ch) – [www.railectric.com](http://www.railectric.com)