

**SUPSI**

## Accumulatori stazionari a batteria a livello di singoli edifici

Vasco Medici

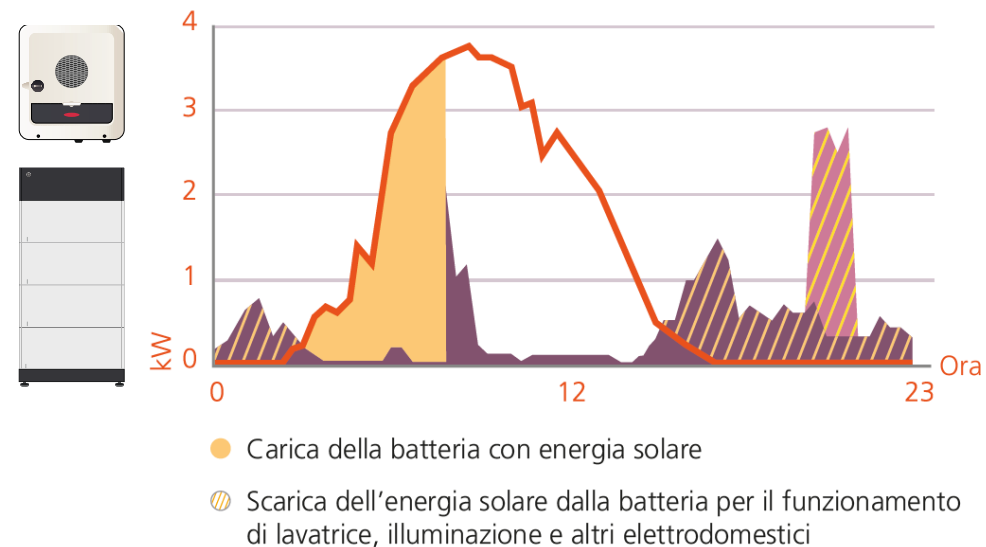
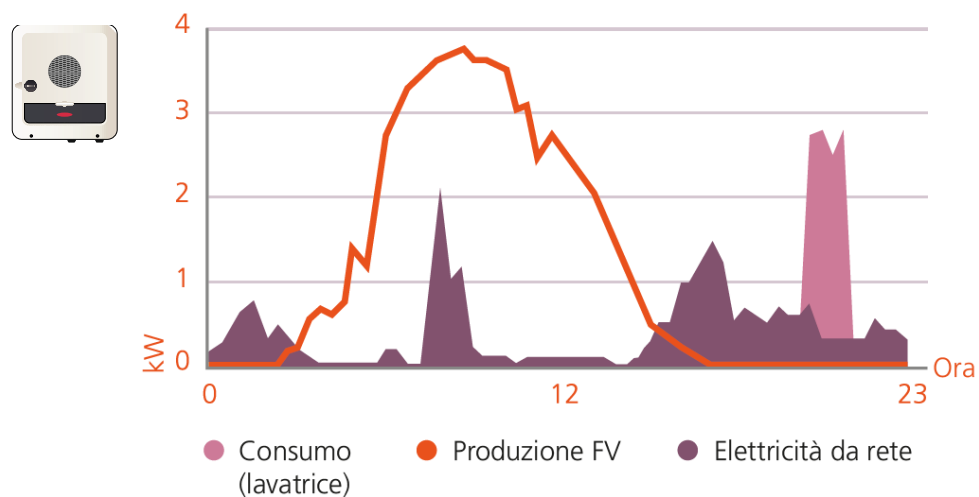
SUPSI - DACD - ISAAC  
Settore Sistemi Energetici



# Stoccaggio a batteria negli edifici per massimizzare l'autoconsumo

## Ottimizzazione dell'autoconsumo nel residenziale con batteria

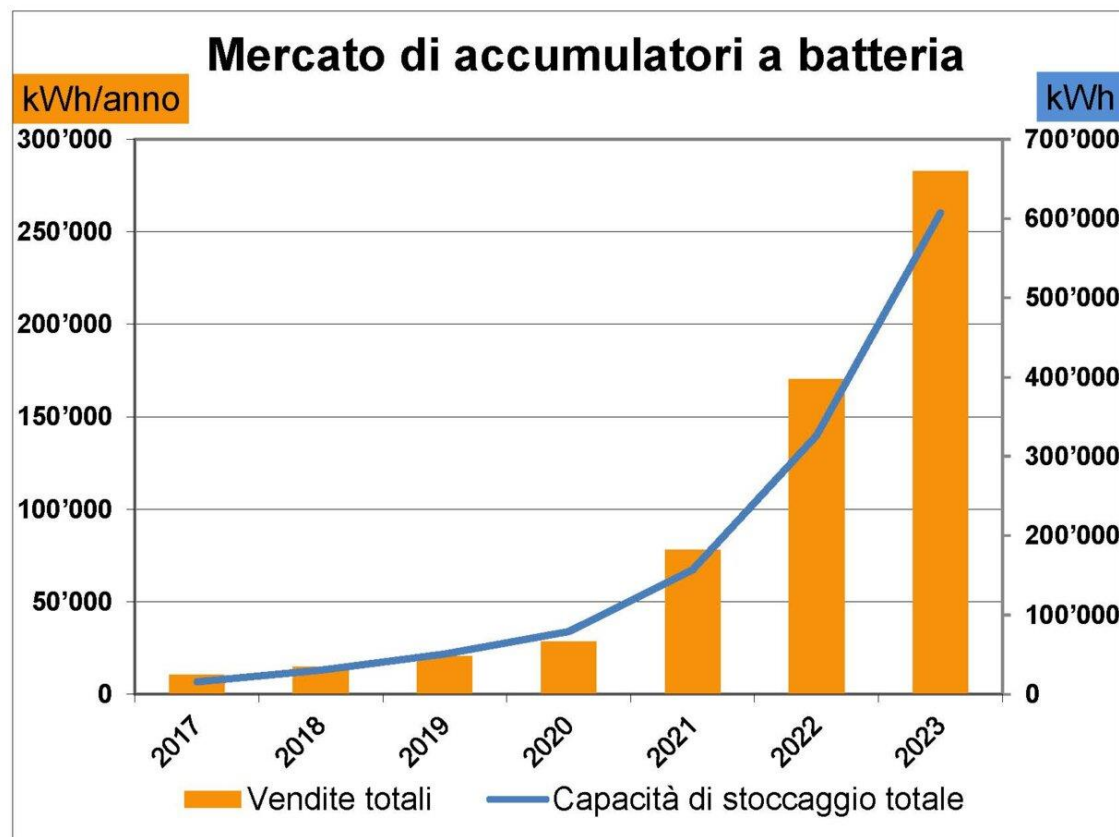
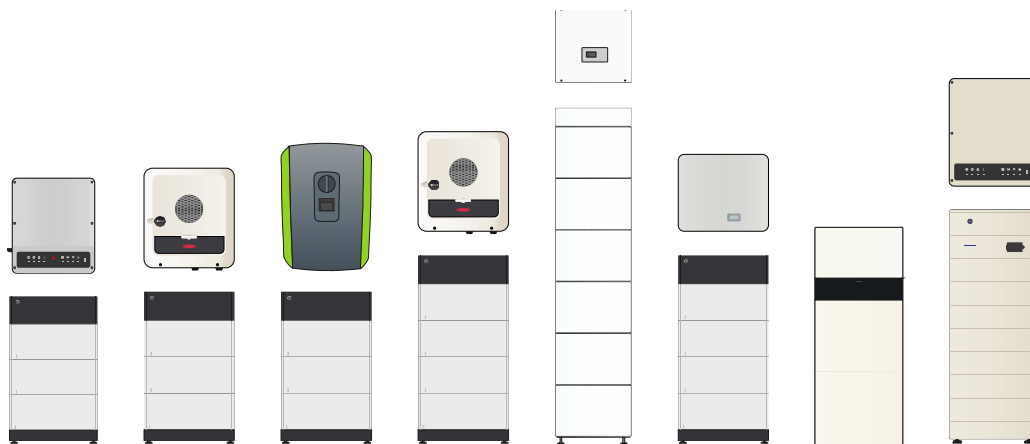
Un ulteriore aumento dell'autoconsumo può essere ottenuto con una batteria che viene caricata durante il giorno con l'elettricità solare e scaricata di sera e di notte



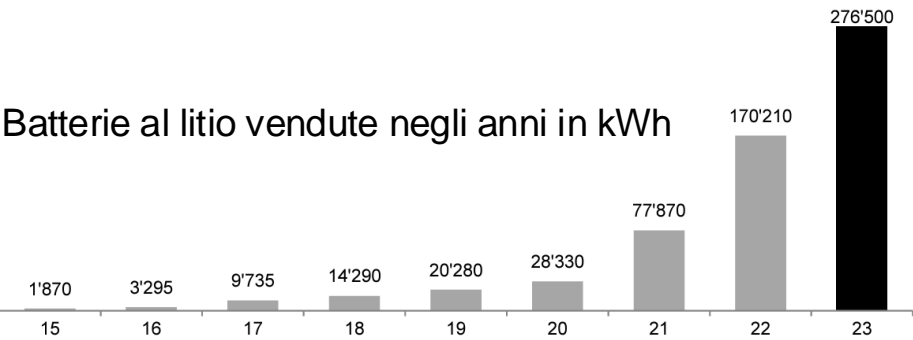
## Mercato di accumulatori a batteria

In Svizzera questa soluzione è **sempre più richiesta**

*Un nuovo impianto fotovoltaico su tre nelle case unifamiliari sarà dotato di un accumulatore a batteria (swissolar 2023)*



Mercato di accumulatori a batteria (al litio)



Batterie al litio installate in CH nel 2023

2023	Anz. Anlagen	Kapazität in kWh	Ø Kapazität in kWh
Einfamilienhäuser	18'094	241'610	13.4
Mehrfamilienhäuser	1'190	23'760	20.0
Industrie, Gewerbe	134	5'135	38.3
Landwirtschaft	143	4'625	32.3
Dienstleistung	9	295	31.6
Öffentliche Dienste	25	725	29.1
Verkehr	-	-	--
Übrige Standorte	25	345	13.8
Total Li-Ionen-Systeme	19'620	276'495	14.1



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
  
Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Analysen und Perspektiven

11. Juli 2024

Statistik Sonnenenergie

Referenzjahr 2023

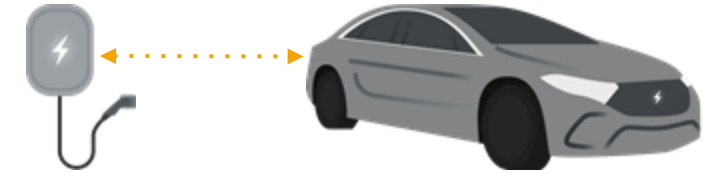
PV installato in CH nel 2023

2023	Nombre de système	Puissance en MW	Ø Puissance en kW
Maisons individuelles	44'104	558.4	12.7
Maisons à plusieurs logements	6'731	205.2	30.5
Industrie, artisanat	4'401	675.7	153.5
Agriculture	1'657	115.2	69.6
Services	312	18.6	59.5
Secteur public	674	53.8	79.8
Transports	34	4.5	131.5
Divers	230	8.7	37.8
Total install. racc. au réseau	58'142	1'640.1	28.2

# Batterie agli ioni di litio

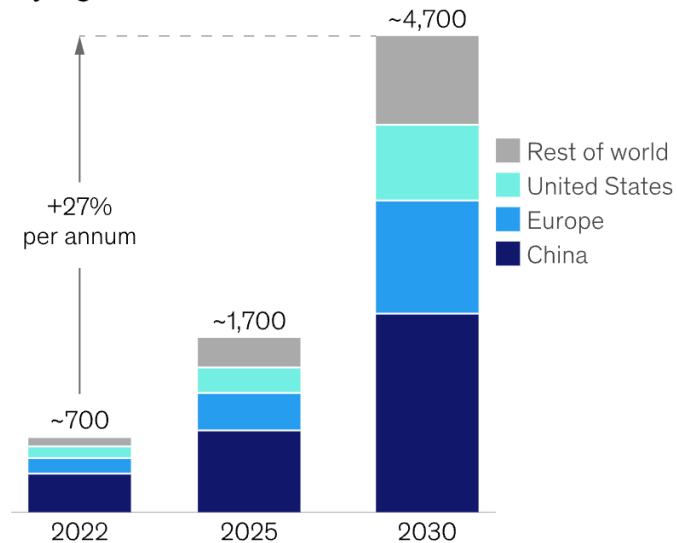
## Accumulatore elettrochimico agli ioni di litio si sta affermando

La tecnologia agli **ioni di litio** si sta affermando soprattutto grazie all'enorme spinta data dalla **mobilità elettrica**, per la quale al momento non esistono alternative sufficientemente mature

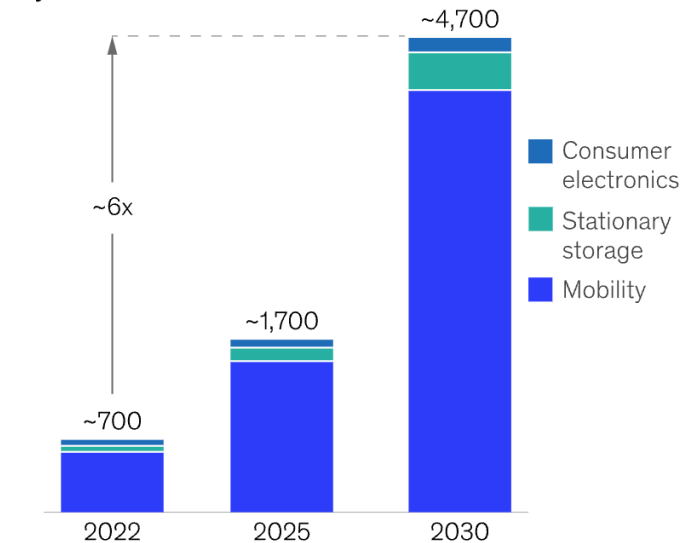


Global Li-ion battery cell demand, GWh, Base case

By region



By sector

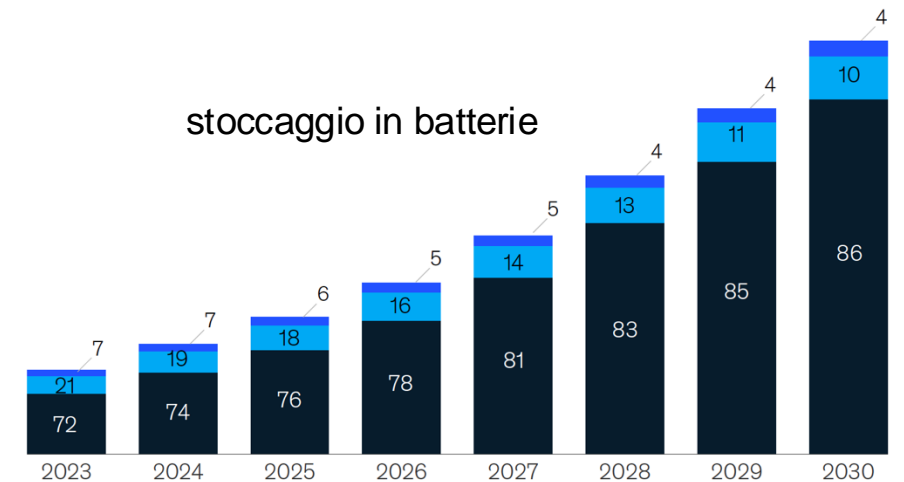


Utility Commercial and industrial Residential

100% in GWh =

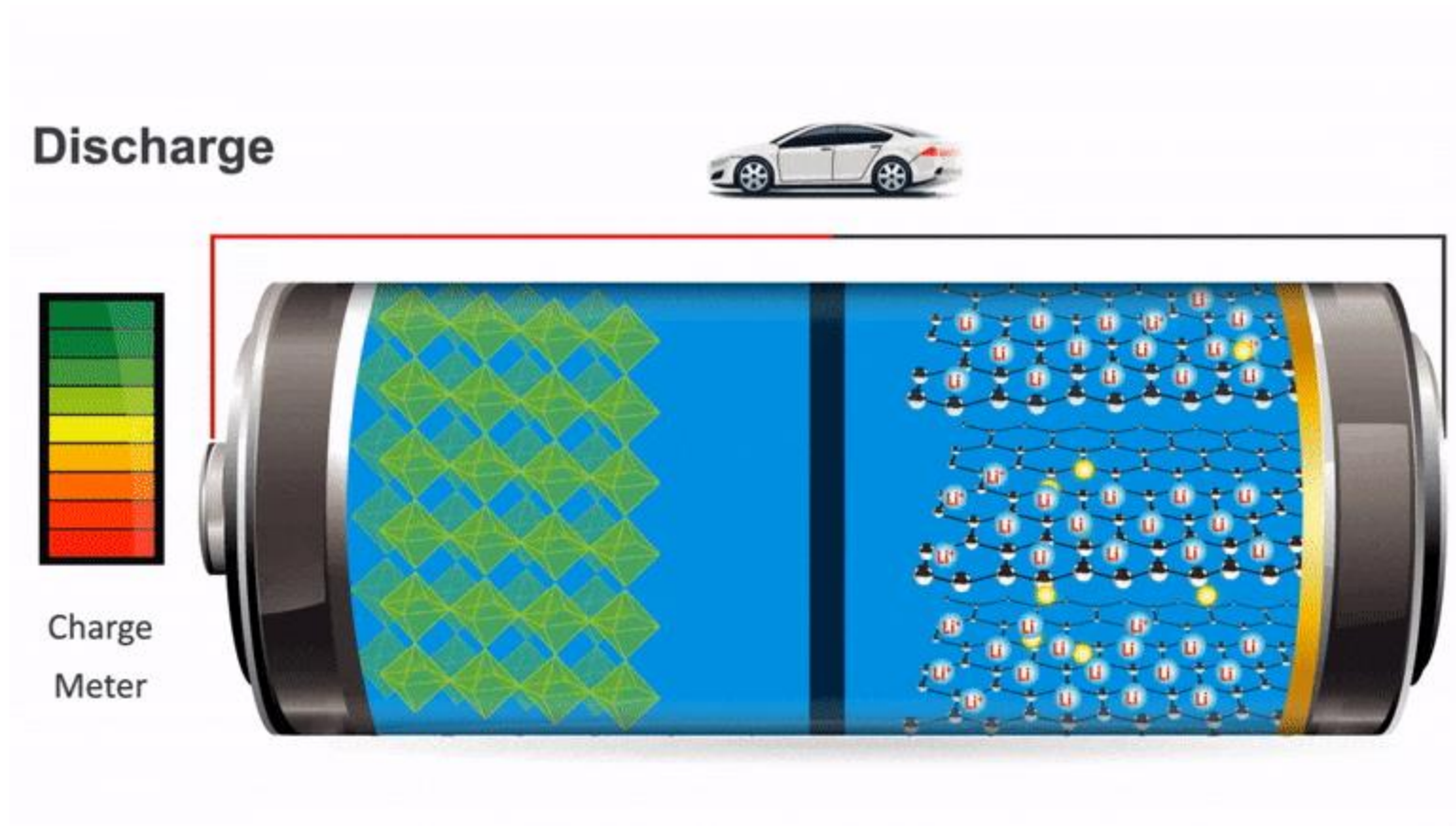
110–140 140–180 175–230 215–290 275–370 350–470 440–580 520–700

stoccaggio in batterie



## Accumulatore elettrochimico agli ioni di litio - principio di funzionamento

- Una batteria agli ioni di litio è un tipo di batteria ricaricabile in cui gli ioni di litio si spostano attraverso un elettrolita:
  - dall'elettrodo negativo (anodo) all'elettrodo positivo (catodo) durante la scarica
  - dall'elettrodo positivo all'elettrodo negativo durante la ricarica.





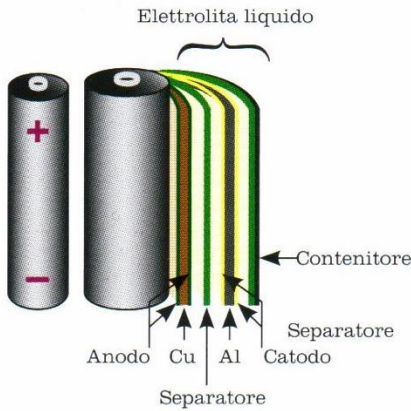
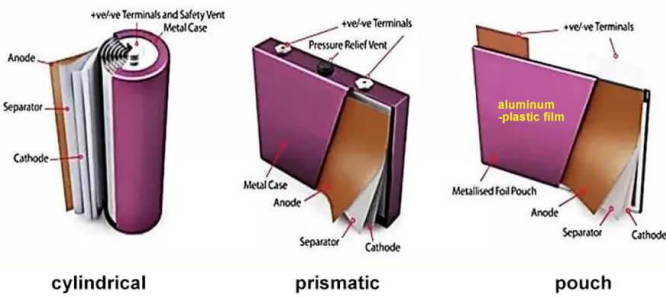
# Accumulatore elettrochimico agli ioni di litio - materiali

- Le batterie Li-ion usano un composto di litio intercalato come materiale per l'elettrodo positivo (catodo) e tipicamente la grafite per l'elettrodo negativo (anodo).

Positive electrode			
Technology	Company	Target application	Benefit
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide NMC, $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$	Imara Corporation, Nissan Motor, <sup>[84][85]</sup> Microvast Inc., LG Chem, <sup>[86]</sup> Northvolt <sup>[87]</sup>	Electric vehicles, power tools, grid energy storage	good specific energy and specific power density
Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide NCA, $\text{LiNiCoAlO}_2$	Panasonic, <sup>[86]</sup> Saft Groupe S.A., <sup>[88]</sup> Samsung <sup>[89]</sup>	Electric vehicles	High specific energy, good life span
Lithium Manganese Oxide LMO, $\text{LiMn}_2\text{O}_4$	LG Chem, <sup>[90]</sup> NEC, Samsung, <sup>[91]</sup> Hitachi, <sup>[92]</sup> Nissan/AESC, <sup>[93]</sup> EnerDel <sup>[94]</sup>	Hybrid electric vehicle, cell phone, laptop	
Lithium Iron Phosphate LFP, $\text{LiFePO}_4$	University of Texas/Hydro-Québec, <sup>[95]</sup> Phostech, Lithium Inc., Valence Technology, A123Systems/MIT <sup>[96][97]</sup>	Segway Personal Transporter, power tools, aviation products, automotive hybrid systems, PHEV conversions	moderate density (2 A·h outputs 70 amperes) High safety compared to Cobalt / Manganese systems. Operating temperature >60 °C (140 °F)
Lithium Cobalt Oxide LCO, $\text{LiCoO}_2$	Sony first commercial production <sup>[98][47]</sup>	broad use, laptop	High specific energy

Negative electrode					
Technology	Density	Durability	Company	Target application	Comments
Graphite			Targray	The dominant negative electrode material used in lithium ion batteries, limited to a capacity of 372 mAh/g. <sup>[33]</sup>	Low cost and good energy density. Graphite anodes can accommodate one lithium atom for every six carbon atoms. Charging rate is governed by the shape of the long, thin graphene sheets. While charging, the lithium ions must travel to the outer edges of the graphene sheet before coming to rest (intercalating) between the sheets. The circuitous route takes so long that they encounter congestion around those edges. <sup>[101]</sup>
Lithium Titanate LTO, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$			Toshiba, Altairnano	Automotive (Phoenix Motorcars), electrical grid (PJM Interconnection Regional Transmission Organization control area, <sup>[102]</sup> United States Department of Defense <sup>[103]</sup> ), bus (Proterra)	Improved output, charging time, durability (safety, operating temperature -50–70 °C (-58–158 °F)). <sup>[104]</sup>
Hard Carbon			Energ2 <sup>[105]</sup>	Home electronics	Greater storage capacity.
Tin/Cobalt Alloy			Sony	Consumer electronics (Sony Nexelon battery)	Larger capacity than a cell with graphite (3.5 Ah 18650-type battery).
Silicon/Carbon	Volumetric: 580 W·h/l		Ampricus <sup>[106]</sup>	Smartphones, providing 5000 mA·h capacity	Uses < 10wt% Silicon nanowires combined with graphite and binders. Energy density: ~74 mAh/g. Another approach used carbon-coated 15 nm thick crystal silicon flakes. The tested half-cell achieved 1.2 Ah/g over 800 cycles. <sup>[107]</sup>

Three types of packaging for lithium ion batteries

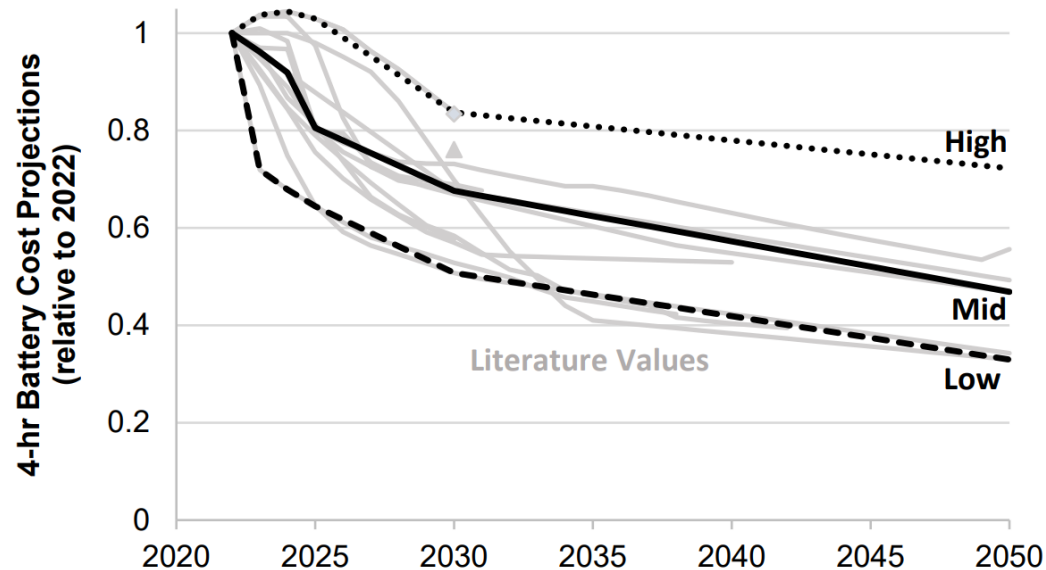


## Accumulatore elettrochimico agli ioni di litio – confronto con batterie al piombo

	Batterie al Piombo	Batterie agli Ioni di Litio
<b>Costo</b>	Generalmente più economiche	Generalmente più costose
<b>Riciclabilità</b>	Altamente riciclabili con processi consolidati	Processi di riciclaggio meno consolidati
<b>Robustezza</b>	Tolleranti alla sovraccarica	Richiedono un sofisticato BMS per la sicurezza
<b>Sicurezza</b>	Generalmente sicure	Possono essere inclini a «thermal runaway» e incendi se danneggiate (ma generalmente sicure)
<b>Peso e Dimensioni</b>	Più pesanti e grandi	Più leggere e compatte
<b>Capacità ed Efficienza</b>	Minore densità energetica ed efficienza	Maggiore densità energetica ed efficienza
<b>Prestazione in potenza</b>	Potenze di carica a scarica limitate	Potenze di carica e scarica elevate
<b>Ciclo di Vita</b>	Tipicamente più breve	Tipicamente più lungo
<b>Prestazioni a Basse Temperature</b>	Possono degradarsi	Migliori prestazioni, anche se ridotte

## Accumulatore elettrochimico agli ioni di litio - prezzi

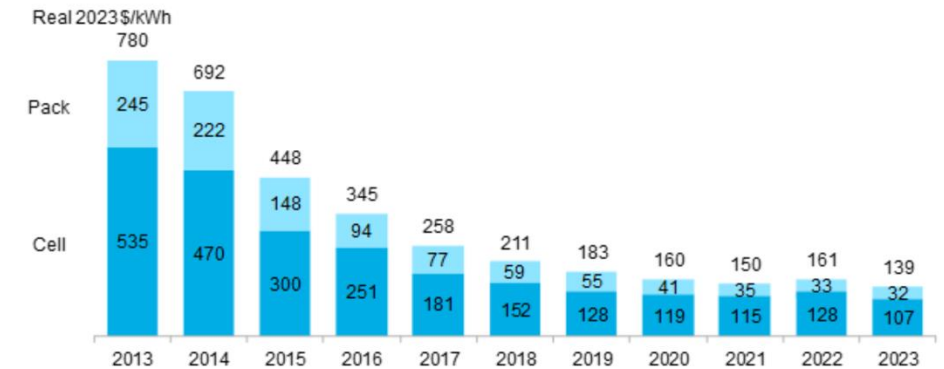
Si prevede che il prezzo continui a scendere nei prossimi anni, anche se ha recentemente subito una battuta d'arresto



Battery cost projections for 4-hour lithium-ion systems, with values relative to 2022.

Fonte: NREL

Figure 1: Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split, 2013-2023



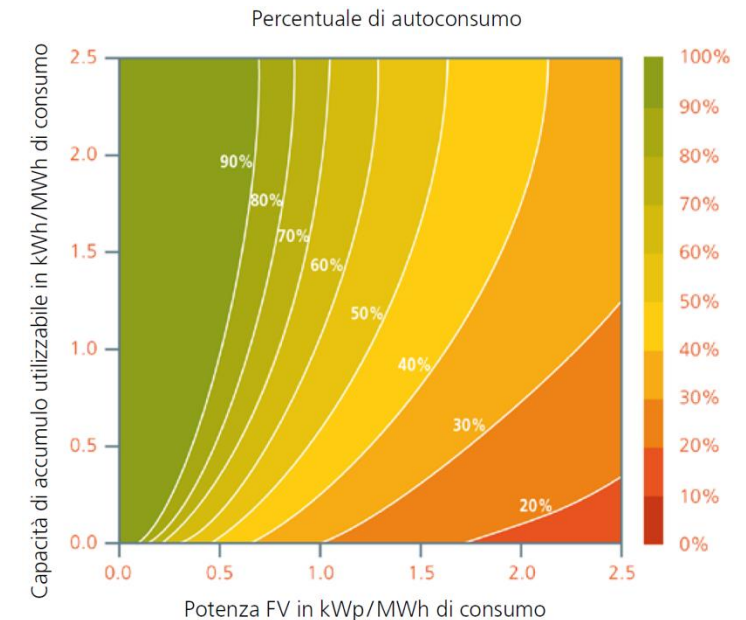
Source: BloombergNEF. Historical prices have been updated to reflect real 2023 dollars. Weighted average survey value includes 303 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles, and stationary storage.

## Dimensionamento di una batteria

## Dimensionamento e accoppiamento dell'accumulo a batteria

- L'accumulo permette di aumentare sia autoconsumo che autosufficienza
- Esistono strumenti che permettono di valutare (nel caso residenziale), il potenziale l'effetto del dimensionamento coordinato di PV e batteria su autocosumo ed autosufficienza

<https://solar.htw-berlin.de/rechner/unabhaengigkeitsrechner/>



## Dimensionamento dell'accumulo a batteria secondo svizzera energia

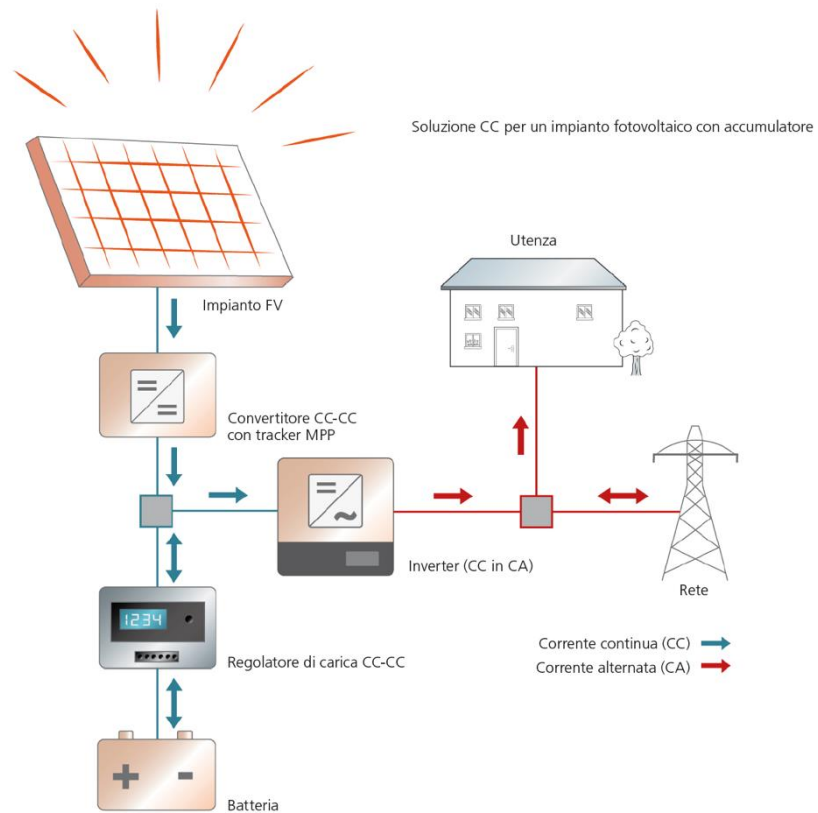
### Valori empirici di riferimento

- (a) capacità utilizzabile dell'accumulatore = da 0.1 a 0.15% del consumo annuale di elettricità della famiglia
  - Per esempio 10MWh/a  $\rightarrow$  10-15kWh
- (b) per sistemi (PV) a partire da 5 kWp in su in case unifamiliari: capacità utilizzabile dell'accumulatore =  $1,5 \times$  potenza del campo fotovoltaico
  - Per esempio 10kWp  $\rightarrow$  10-15kWh
- il valore di riferimento è quindi il valore più piccolo tra (a) e (b)
- (Si tratta ad ogni modo di valori indicativi. Dal momento che in ogni caso ad oggi non vale la pena installare un accumulo non è semplice giustificare la scelta.)



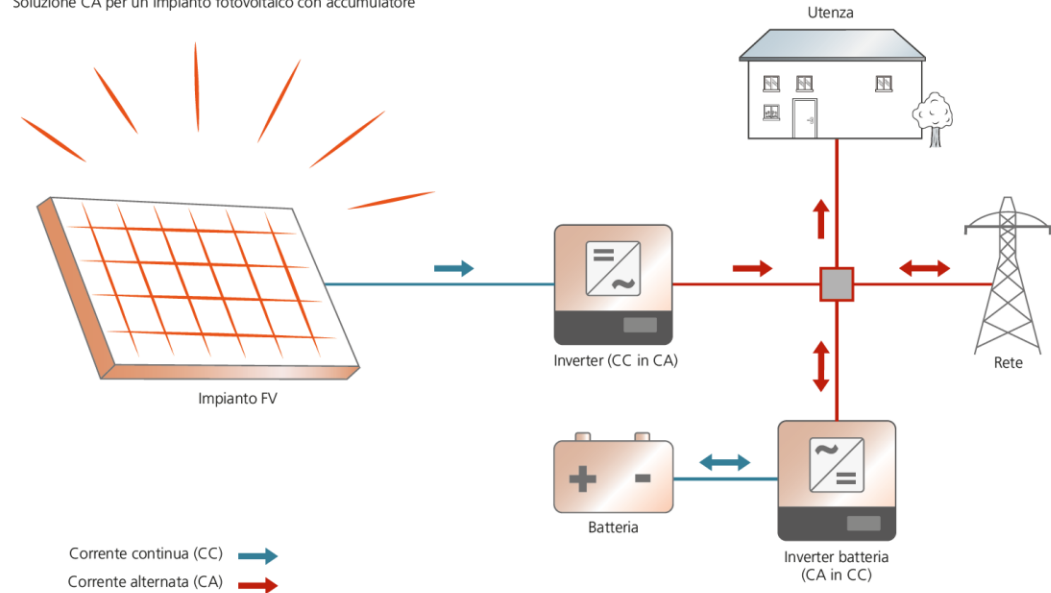
## Collegamento elettrico delle batterie

### Accoppiamento in corrente continua



### Accoppiamento in corrente alternata

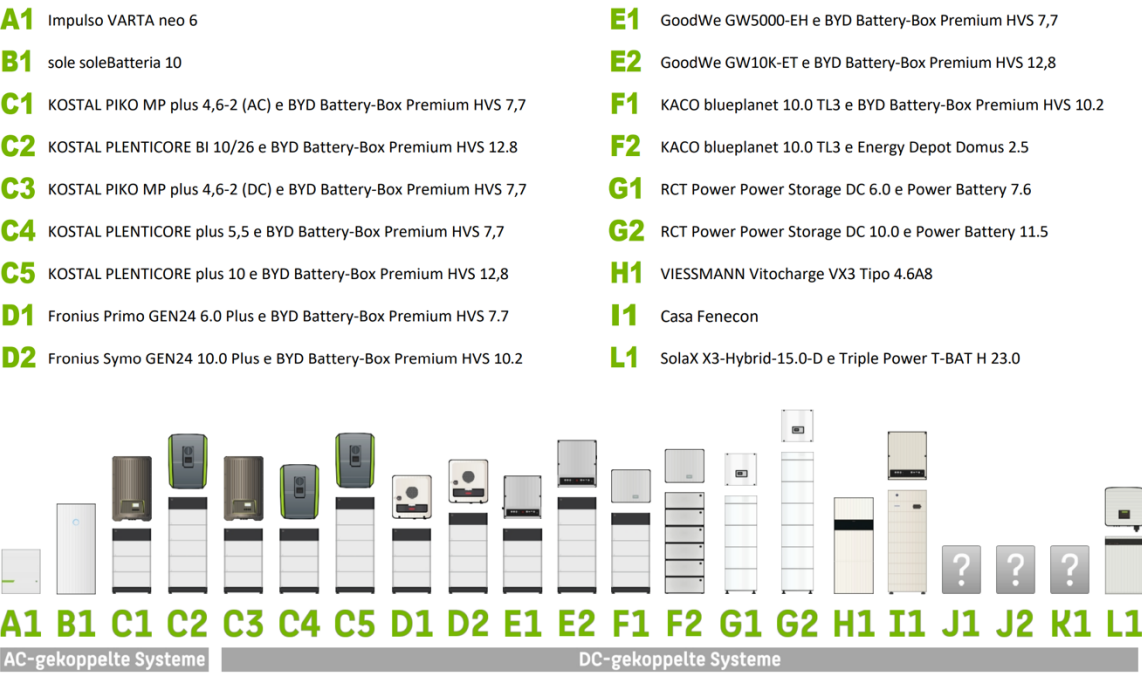
Soluzione CA per un impianto fotovoltaico con accumulatore



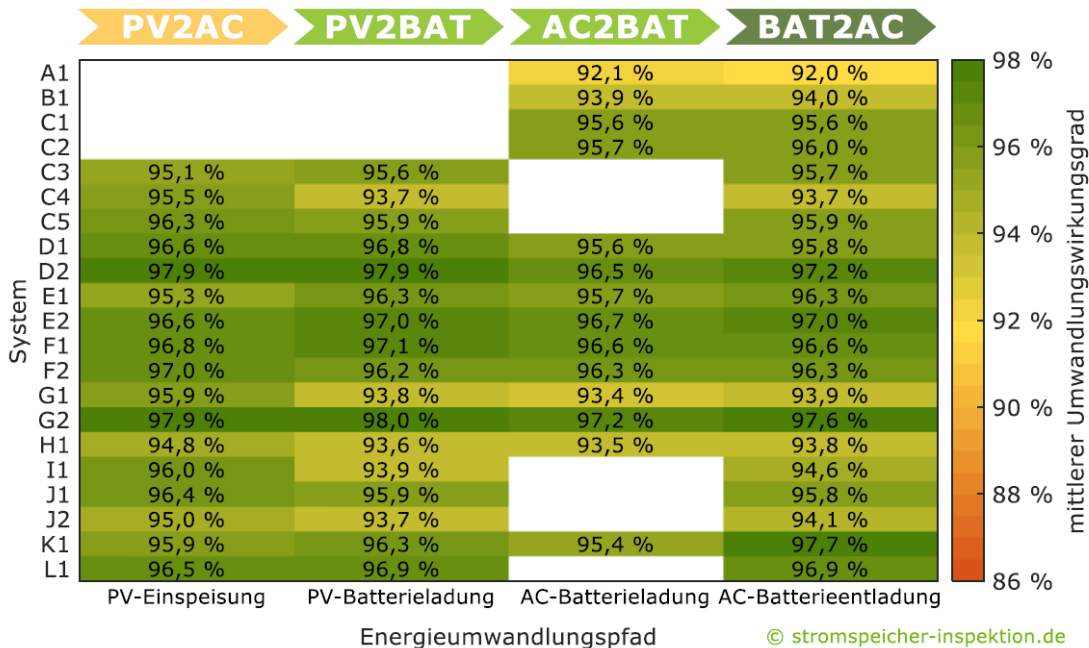


# Collegamento elettrico delle batterie

Su sistemi nuovi prende sempre più piede il collegamento in corrente continua, che garantisce minori costi e maggiore efficienza



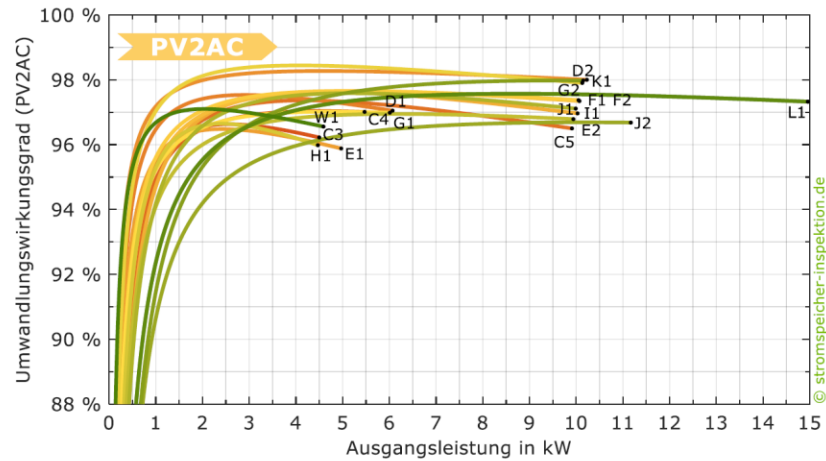
	Accoppiamento CC	Accoppiamento CA
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"><li>Soluzione compatta con inverter, regolatore di carica e batteria</li><li>Per la corrente solare è sufficiente una regolazione della tensione prima dell'accumulo, quindi l'efficienza è tendenzialmente superiore</li><li>Per i nuovi impianti spesso più economico, un solo dispositivo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>L'inverter può essere scelto indipendentemente dalla batteria</li><li>Ideale per impianti fotovoltaici esistenti</li><li>Flessibile in caso di retrofit</li><li>Più flessibilità per la capacità della batteria</li><li>Gli inverter solari e a batterie possono essere combinati liberamente (anche di produttori diversi)</li><li>La batteria può anche essere alimentata dalla rete</li></ul>
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"><li>Solitamente la batteria <del>non</del> può essere alimentata dalla rete elettrica</li><li>Tutti i componenti devono essere abbinati in modo ottimale tra loro (anche l'impianto fotovoltaico rispetto alla batteria)</li><li>Ampliamento a posteriori difficile</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Efficienza tendenzialmente leggermente inferiore rispetto ai sistemi CC</li><li>Tendenzialmente più costoso e complesso, perché si tratta di due dispositivi separati: inverter solare e inverter per le batterie</li></ul>



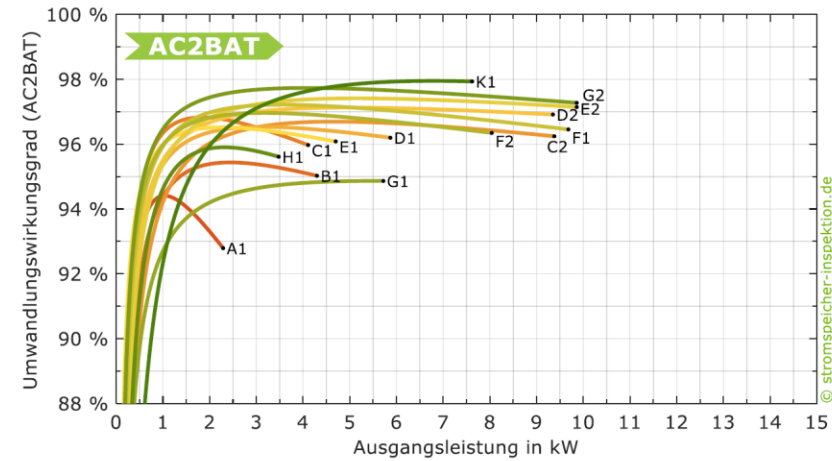


## Collegamento elettrico delle batterie - rendimenti

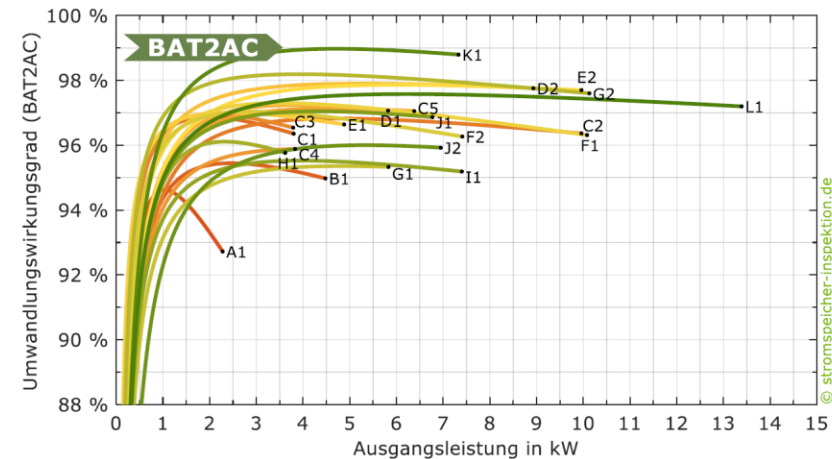
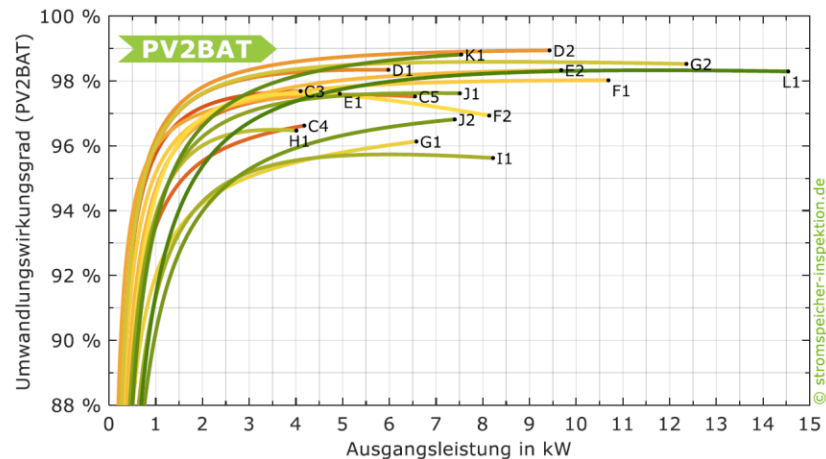
Come per il PV, il rendimento è funzione della potenza, è quindi importante non sovradimensionare l'inverter/charger



**Bild 36** Wirkungsgradkennlinien der PV-Einspeisung (PV2AC) der DC-gekoppelten Systeme sowie der PV-Wechselrichter W1 und W2.

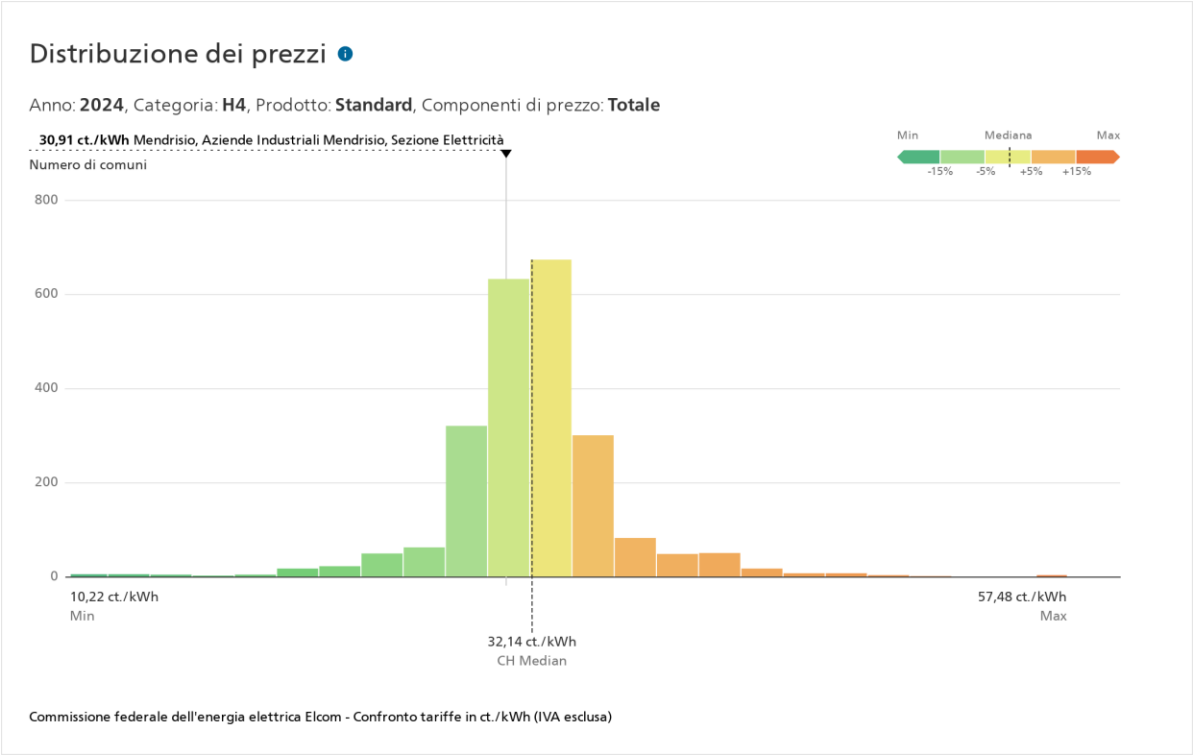
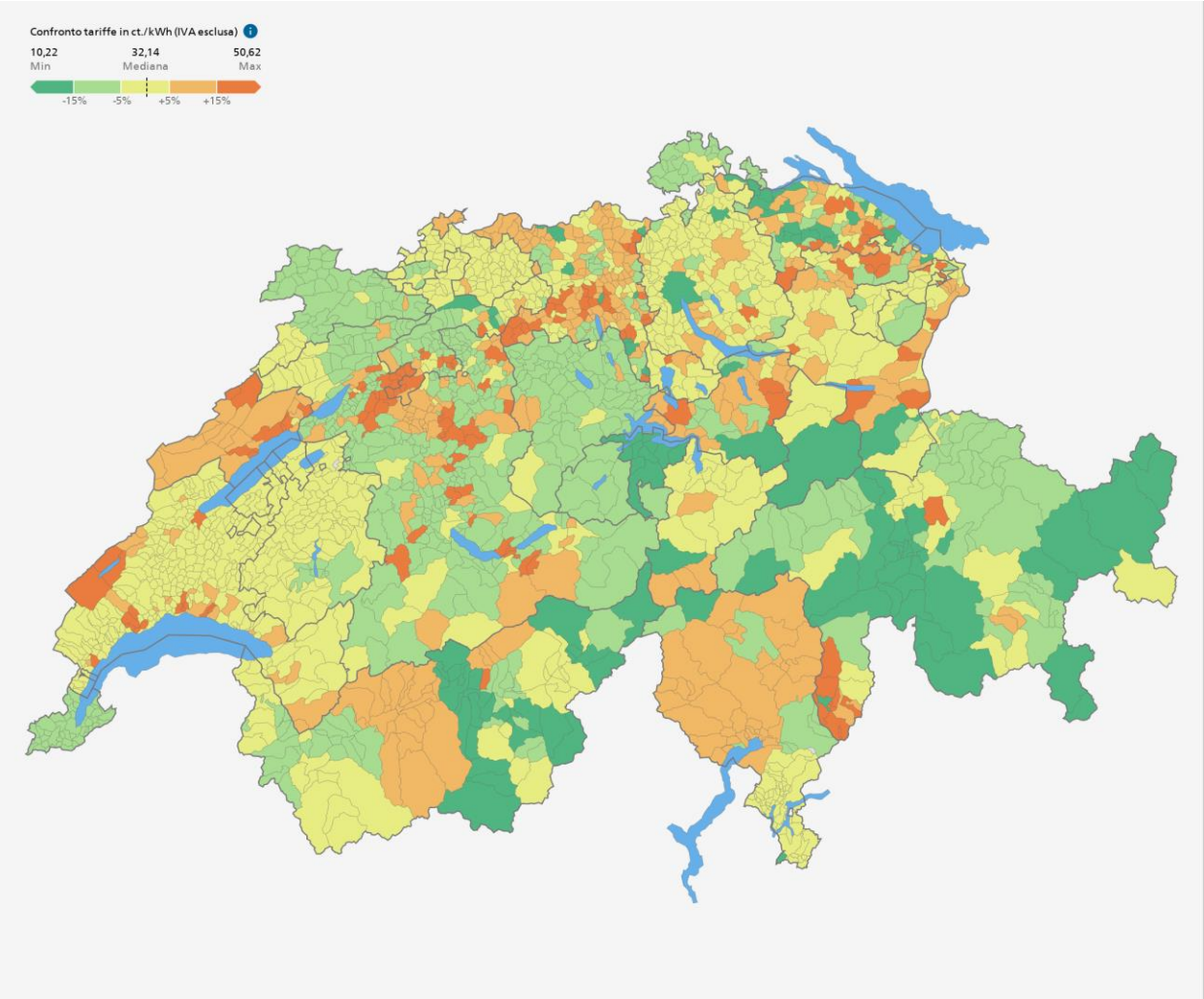


**Bild 38** Wirkungsgradkennlinien der AC-Batterieladung (AC2BAT) der AC-gekoppelten Systeme sowie der DC-gekoppelten Systeme D1 bis H1 sowie K1.



Quanto sono redditizie le batterie?

# Prezzi dell'elettricità in Svizzera per il consumatore finale

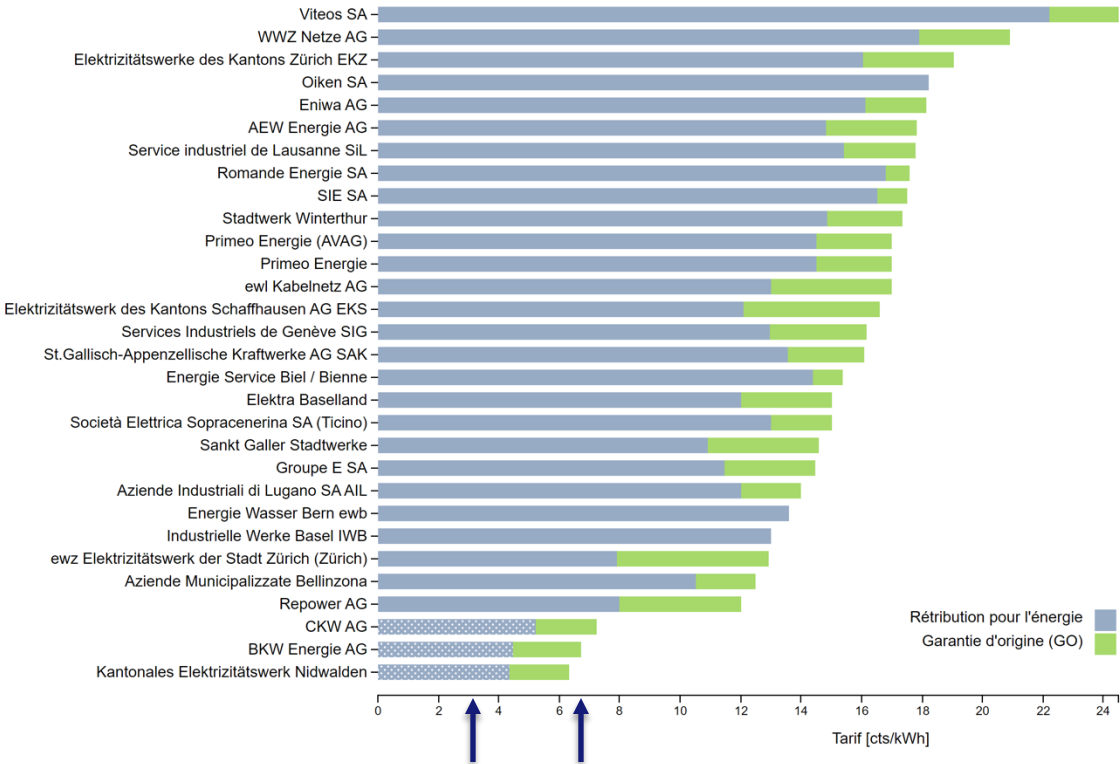
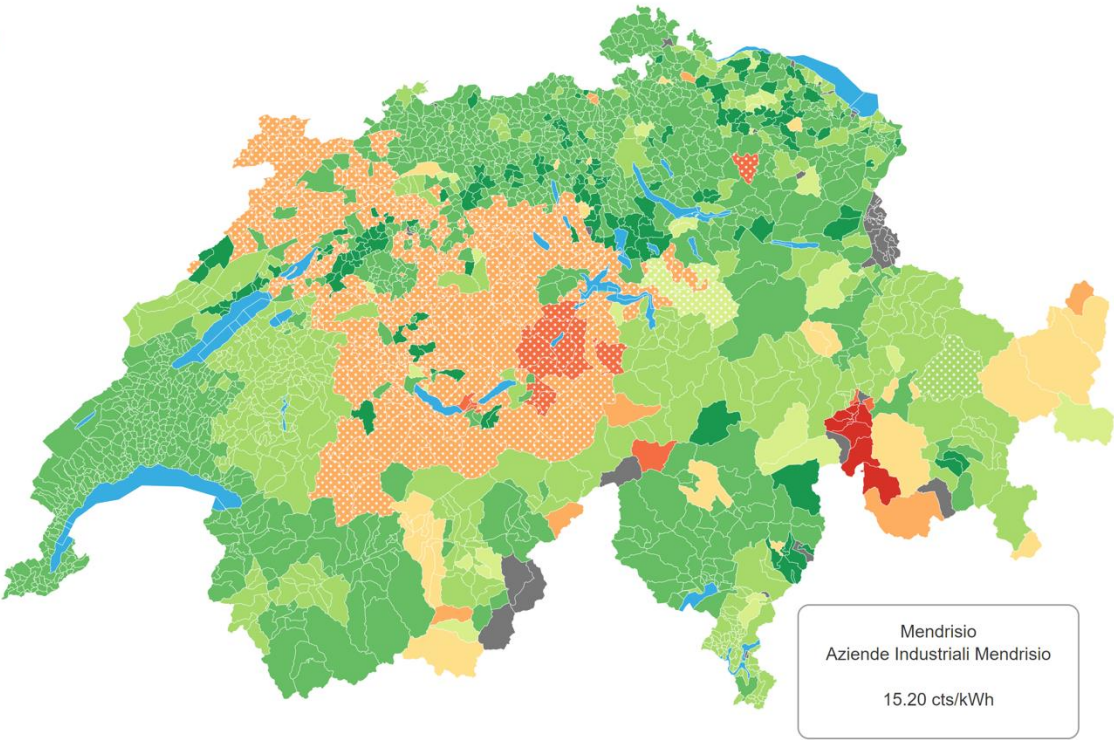
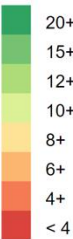


Commissione federale dell'energia elettrica Elcom - Confronto tariffe in ct./kWh (IVA esclusa)

# Prezzo di ripresa del fotovoltaico in svizzera

Année 2024

Tarif [cts/kWh]



AET T2 3.2 cts/kWh  
AET T1 6.5 cts/kWh

## Batterie residenziali - costi

Il modo standard di valutare l'economicità di sistema di stoccaggio dell'energia consiste nel calcolare il costo livellato dell'accumulo o levelized cost of storage (LCOS)

$$LCOS \left[ \frac{CHF}{kWh} \right] = \frac{C_{investimento} + C_{carica} + C_{manutenzione} + C_{smaltimento}}{E_{scaricata}}$$

Per essere redditizio, l'LCOS dev'essere minore del prezzo d'acquisto dell'elettricità dall'azienda elettrica

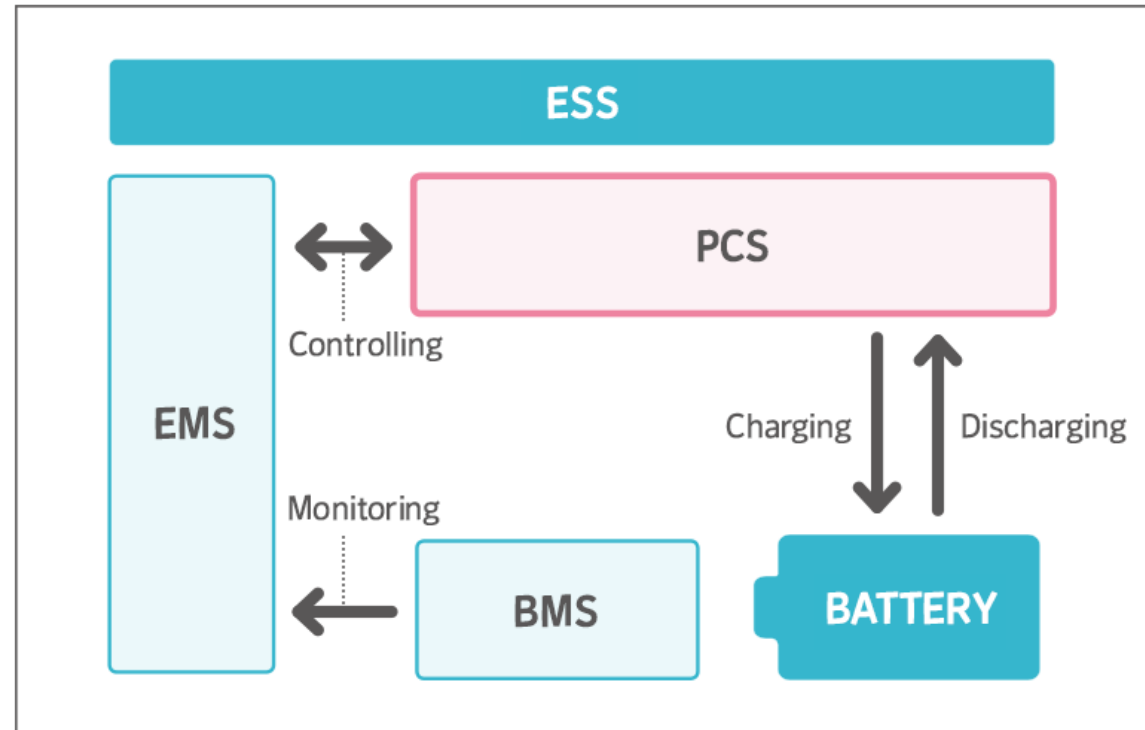
[https://colab.research.google.com/github/supsi-dacd-isaac/teaching/blob/main/2023SelfConsumption/LCOS\\_batteria.ipynb](https://colab.research.google.com/github/supsi-dacd-isaac/teaching/blob/main/2023SelfConsumption/LCOS_batteria.ipynb)

# Controllo di batterie

## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – sistemi di controllo

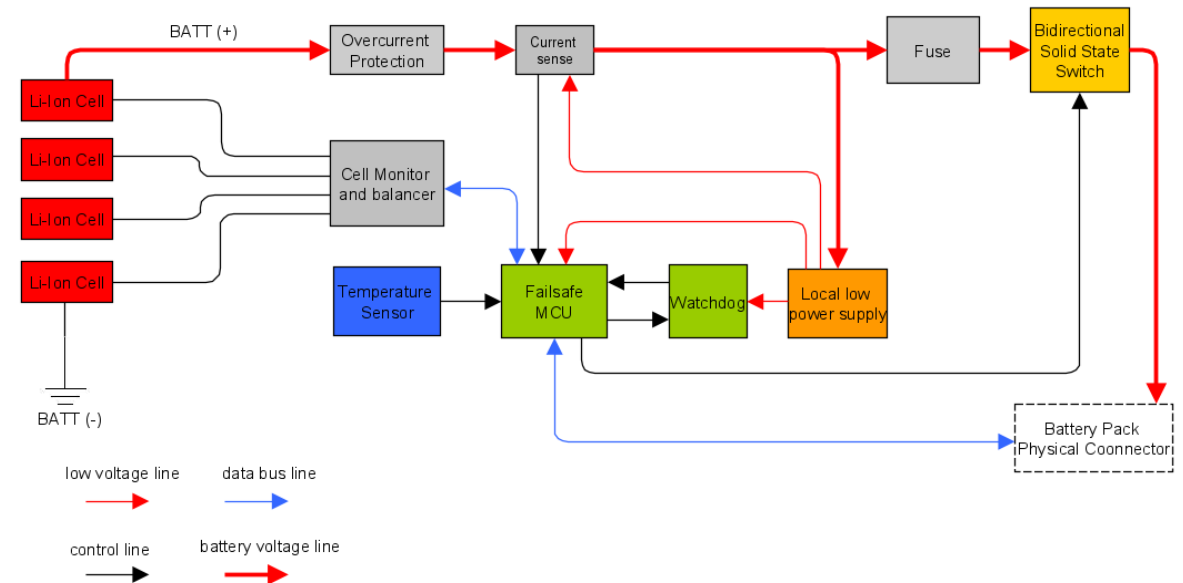
Il controllo della carica e scarica della batteria è condiviso tra:

- battery management system (BMS)
- energy management system (EMS)



## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – BMS

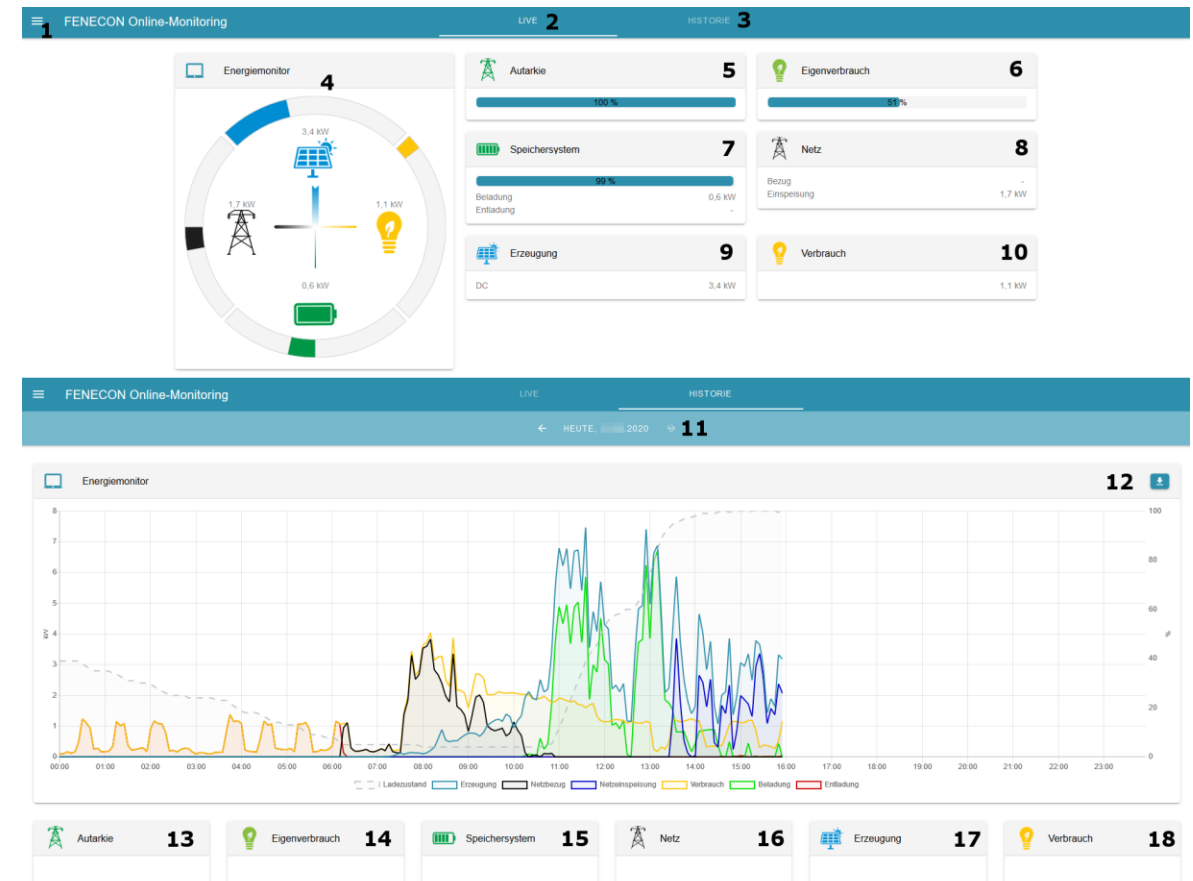
- Misurazione
  - Tensione, Corrente, Temperatura
- Calcolo
  - SOC (Stato di Carica)
    - Algoritmi SOC: Tensione a circuito aperto, Integrazione di corrente, Filtro di Kalman, Rete neurale + Strategie di correzione, ...
  - SOH (Stato di Salute)
    - Algoritmi SOH: Basati sui cambiamenti della capacità della batteria e della resistenza interna
- Gestione
  - Balancing delle celle
  - Identificazione dei guasti e protezione (limitazione della potenza, interruzione della tensione alta)





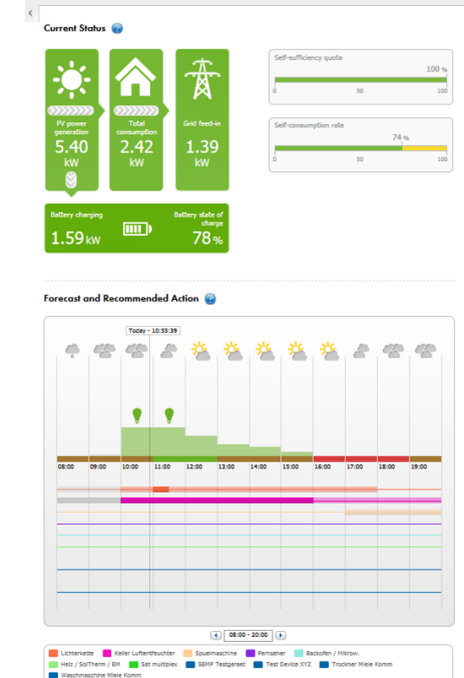
## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – EMS

- L'EMS è il sistema decisionale generale del sistema di accumulo di energia
- Si interfaccia con
  - PCS
  - BMS
  - Altri sensori come per esempio contatori di PV ed edificio
  - Servizi esterni (per esempio meteo)
- Calcola le strategie di controllo ottimali in funzione di
  - massimizzazione dell'autoconsumo
  - minimizzazione dell'impatto sulla rete
  - massimizzazione della durata di vita della batteria
- Fornisce un'interfaccia utente per il monitoraggio ed la scelta delle strategie di controllo



## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – sistemi di controllo

- Per poter meglio pianificare la carica e la scarica della batteria è però necessario utilizzare degli algoritmi in grado di:
  - Prevedere
    - La produzione di energia fotovoltaica
    - I consumi di eventuali altri carichi controllabili
    - I consumi dell'edificio
- Esistono diversi tipi di algoritmi con diversi gradi di complessità, i più complessi fanno uso delle previsioni meteo, altri si basano semplicemente sullo storico dei dati
- Sul mercato esistono già vari prodotti che offrono l'ottimizzazione dell'autoconsumo controllando sia l'accumulo, che termopompe ed elettrodomestici

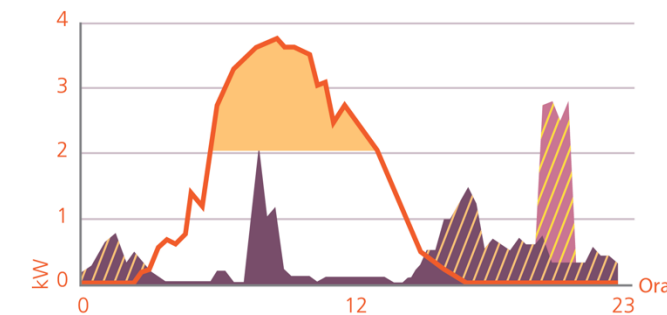
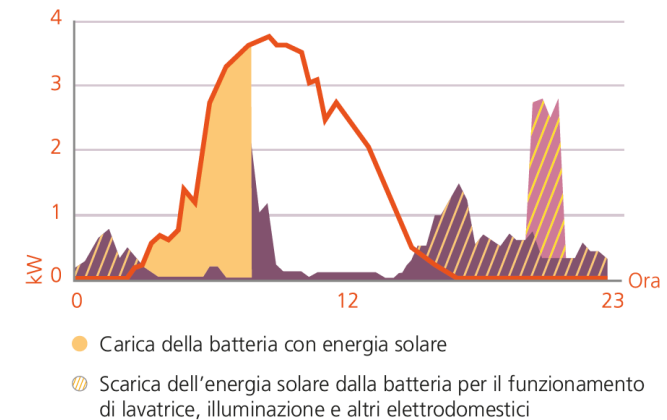


## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria

Un aumento dell'autoconsumo può essere ottenuto con una batteria che viene caricata durante il giorno con l'elettricità solare e scaricata di sera e di notte... ma

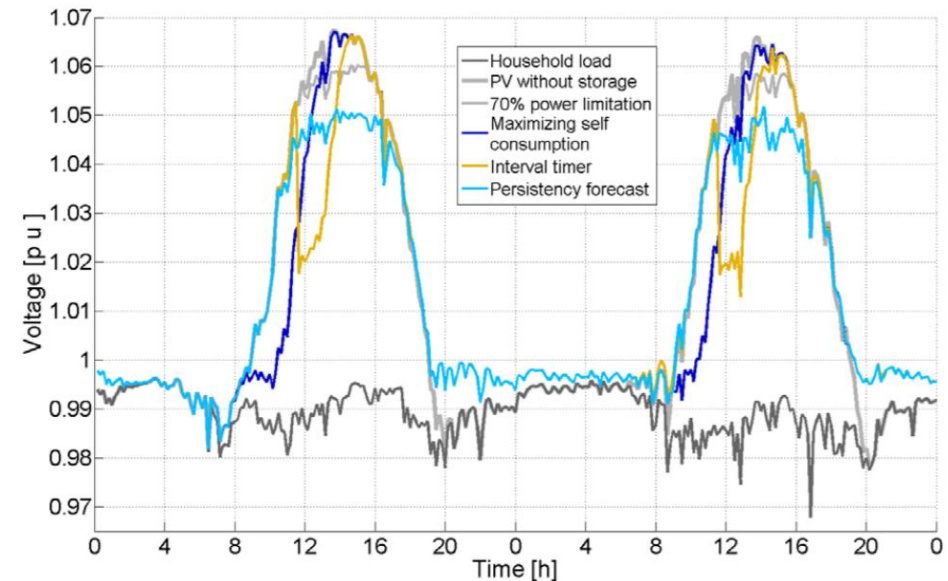
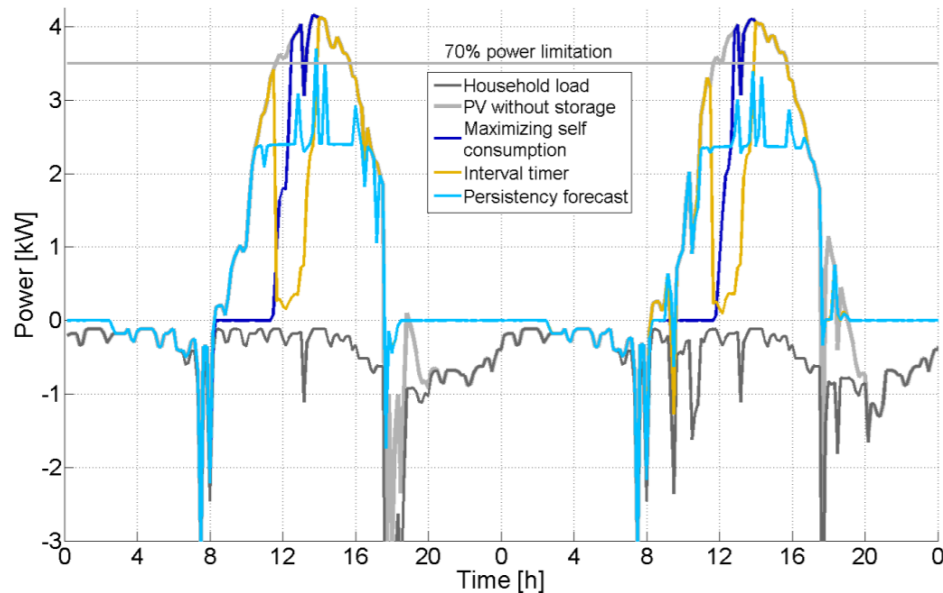
**L'autoconsumo dovrebbe però essere fatto:**

- **tenendo conto di eventuali altri carichi flessibili che possono essere spostati**
  - Per carichi differibili è sempre meglio autoconsumare direttamente il PV che passare dalla batteria
- **in modo più consapevole degli effetti sulla rete**
  - Al momento non sempre si è incentivati a farlo
- **È necessario che l'utente venga incentivato a farlo!**



## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – algoritmi di controllo

- Per poter meglio pianificare la carica e la scarica della batteria è però necessario utilizzare degli algoritmi in grado di:
  - Prevedere
    - La produzione di energia fotovoltaica
    - I consumi dell'edificio
  - Pianificare in modo ottimale la carica e la scarica della batteria
- Esistono diversi tipi di algoritmi con diversi gradi di complessità, i più complessi fanno uso delle previsioni meteo, altri si basano semplicemente sullo storico dei dati



## Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – algoritmi di controllo peak shaving

Alcuni produttori offrono algoritmi di controllo per peak shaving

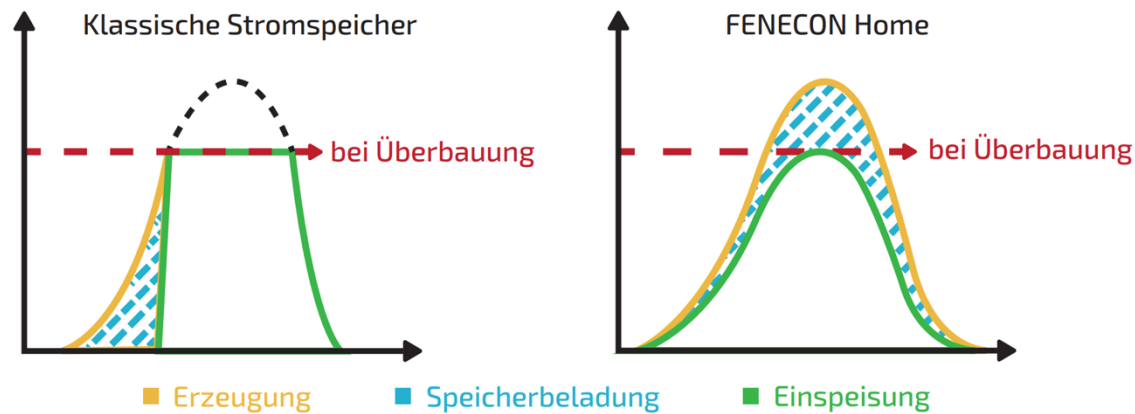
L'attuale sistema di fatturazione rende molto complesso garantire un risparmio in bolletta garantendo il comfort (senza disconnettere carichi)

Controllare una batteria in modo da garantire il livellamento dei picchi è difficile!



[grafana link](#)

# Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – algoritmi di controllo valley filling



- Alcuni produttori offrono algoritmi di controllo per valley filling
- L'attuale sistema di fatturazione non premia valley filling (a parte pochissime eccezioni)
- Controllare una batteria in modo da garantire il livellamento dei picchi di iniezione è meno difficile rispetto al livellamento del picco (vi è sempre la possibilità di limitare l'iniezione PV controllando l'inverter)

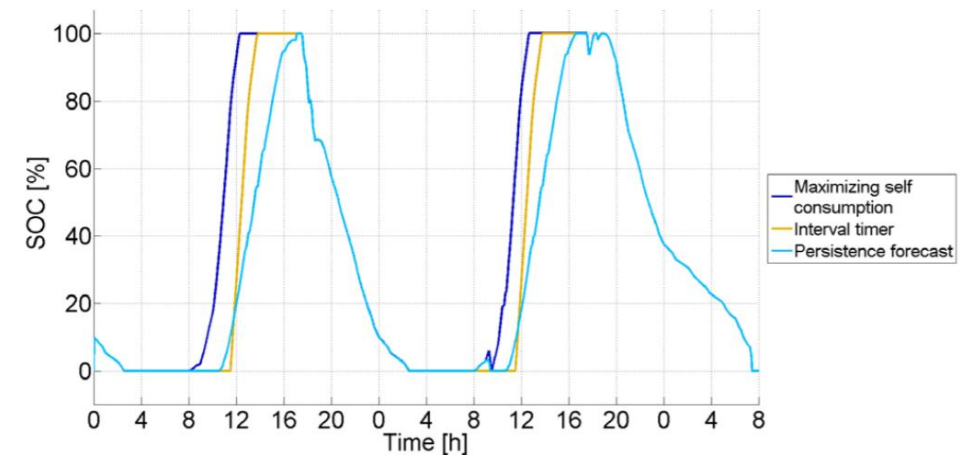
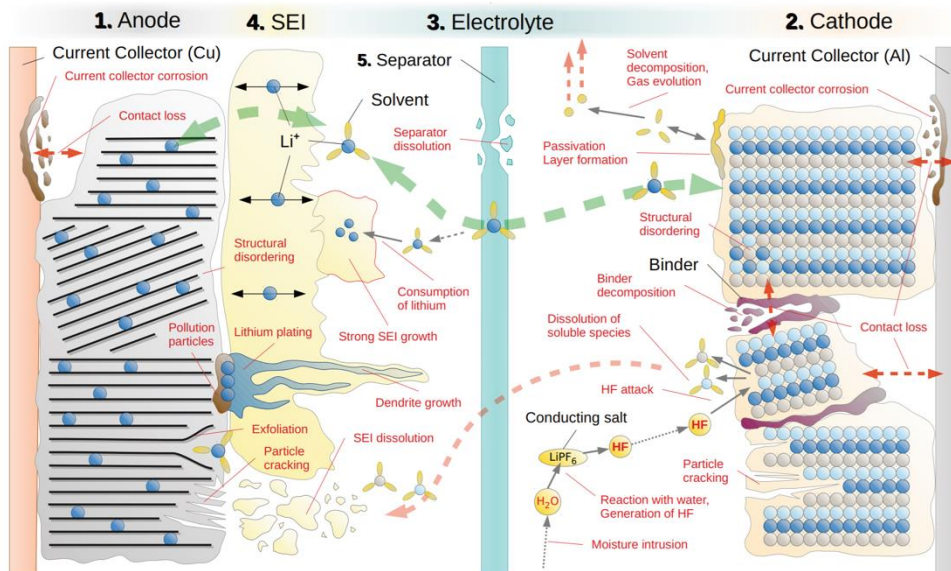




# Ottimizzazione dell'autoconsumo tramite accumulo a batteria – durata di vita

Le strategie di carica e scarica della batteria dovrebbero anche tenere conto dell'invecchiamento della batteria

**Ritardare la carica della batteria ha un effetto positivo sulla sua durata di vita**

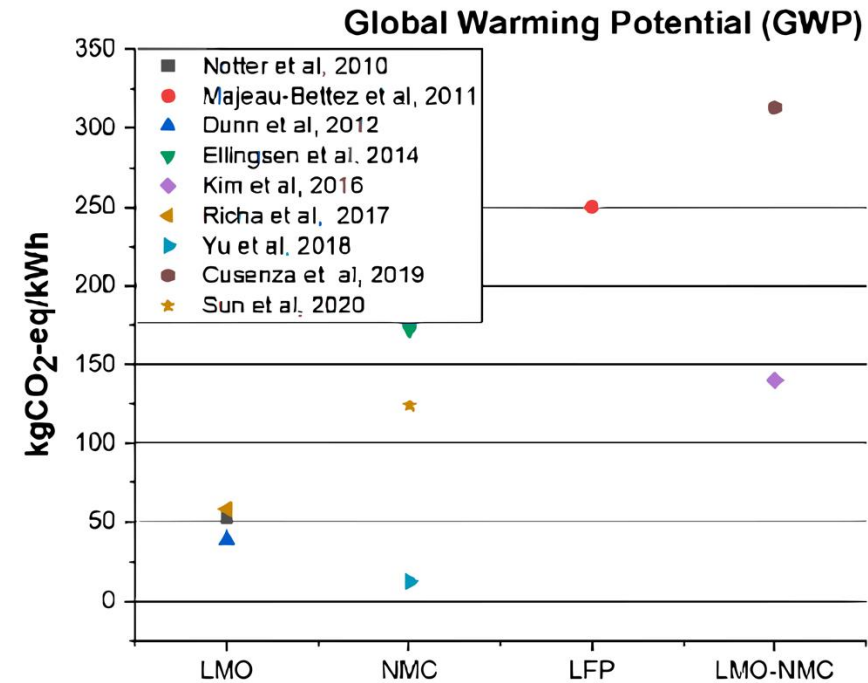


# Analisi del ciclo di vita e impatto ambientale delle batterie



## Impatto ambientale delle batterie agli ioni di litio

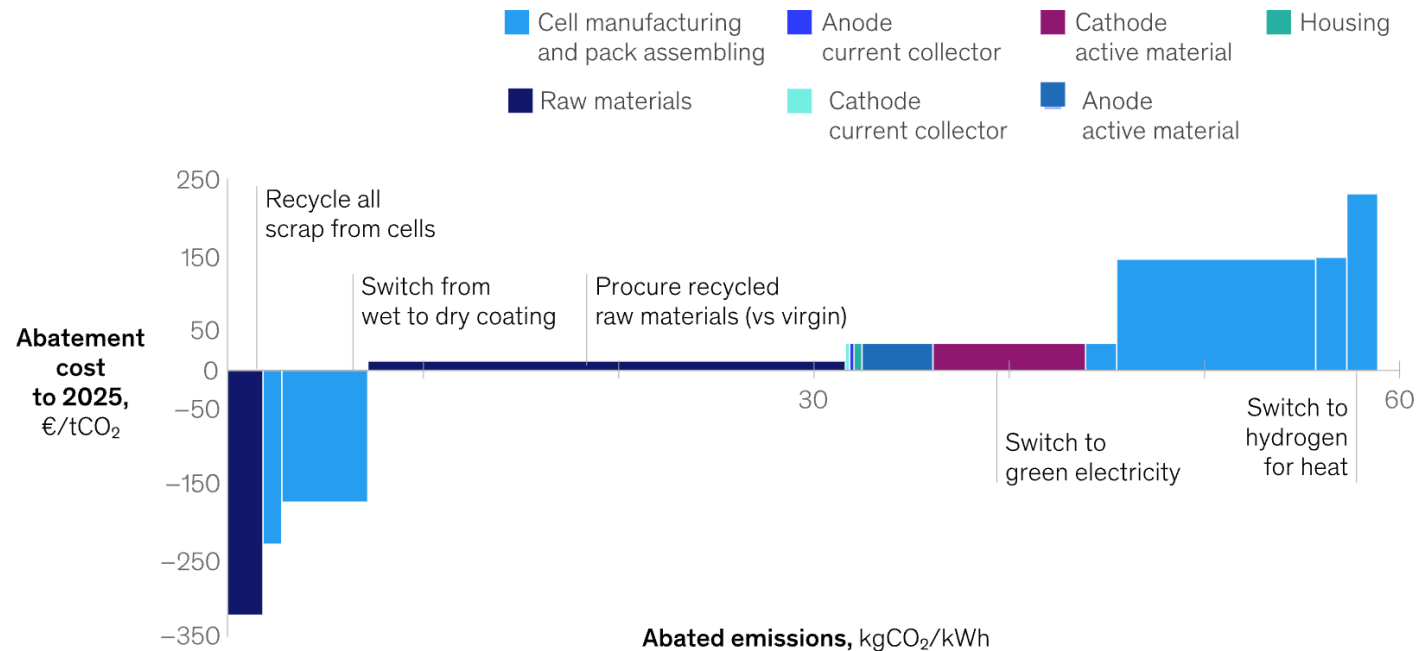
- Oggi per produrre **1kWh** di batteria agli ioni di litio vengono emessi approssimativamente **150kg di CO<sub>2</sub>**
  - Per una home battery da 10kWh equivale a guidare un'auto a benzina (che emette 124gCO<sub>2</sub>/km) per 12096km!
- Per essere sostenibile a livello ambientale, durante la sua vita la batteria dovrà quindi permettere di risparmiare più di 150kg di CO<sub>2</sub> al kWh
  - Se il kWh di batteria permettesse di sostituire il carbone con energia solare:  
 3000 cicli ~3.15MWh di energia solare richiesta e  
 2,85MWh di energia rilasciata  
 Carbone 820gCO<sub>2</sub>/kWh  
 Fotovoltaico 30gCO<sub>2</sub>/kWh  
 $0.820 * 2850 - 0.030 * 3150 = \mathbf{2243 \text{ kg/CO}_2}$
- Ma è applicabile alla Svizzera?  
<https://app.electricitymaps.com/zone/CH>



## Impatto ambientale della batterie agli ioni di litio

Il potenziale di riduzione delle emissioni è buono

L'Europa si è data degli obiettivi chiari sia sulla riduzione del livello di emissioni per la produzione di batterie e sul riciclaggio delle batterie usate



<sup>1</sup>Scope 3 emissions are the result of activities from assets not owned or controlled by the reporting organization but that have indirect impacts in its value chain. Suppliers are assumed to be in China for all components.  
Source: Catalyst Zero, McKinsey, 2022; McKinsey MineLens, 2022; McKinsey analysis for 2025

### TIMELINE – ARTICLE 7, ANNEX II

Carbon footprint for industrial and EV batteries



### TIMELINE – ARTICLE 8

Recycled content in industrial, EV and automotive batteries



<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32023R1542>

## Domande?



Grazie per l'attenzione!