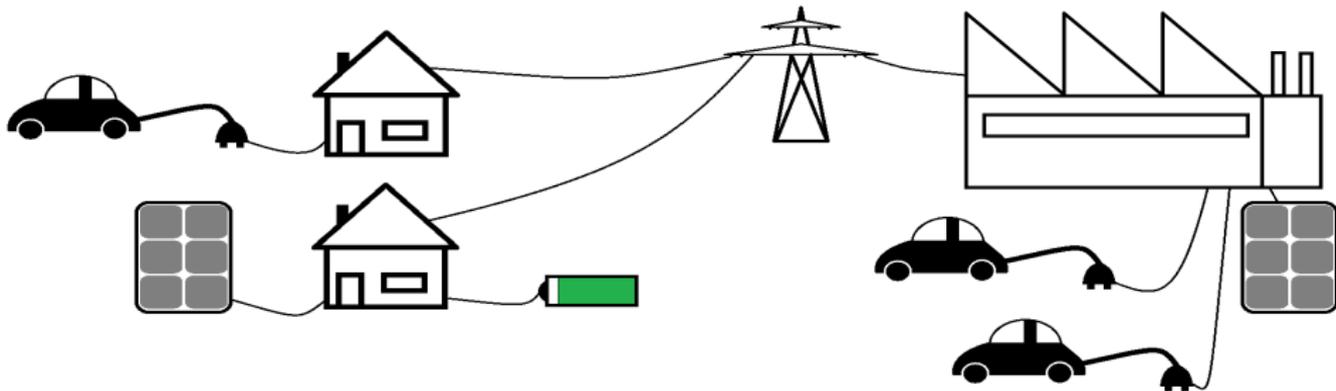


# Multikriterielle Optimierung zur Einbindung von Batteriespeichern

Seminar Energieinformatik

Alexander Dorsch | 9. November 2016

INSTITUT AIFB





- 1 Grundlagen
  - Batteriespeicher
  - Multikriterielle Optimierung
- 2 Praktische Umsetzung
  - Multiobjective Battery Storage to Improve PV Integration in Residential Distribution Grids
    - Modell
    - Optimierungsproblem
    - Sequential quadratic programming
    - Resultate
  - Multi - Objective Scheduling of Electric Vehicles in Smart Distribution System
    - Modell
    - Algorithmen
    - Resultate
- 3 Zusammenfassung

- Arten von Batterien
  - Lithium-Ionen
  - Blei-Säure
  - ...
- Optimierbare Größen
  - Anschaffungskosten
  - Kapazität
  - Lebensdauer
  - Verfallsdatum
  - ...
- Wirkung
  - Optimierung des Stromnetzes (Puffereigenschaft)
  - Notreserve
  - ...



- Exakte Verfahren, Approximationen, (Meta-) Heuristiken
- Optimierbare Größen
  - $CO_2$ -Ausstoß
  - Spannungskurve im Netz
  - Kosten
  - ...

- Viele neue Komponenten im Stromnetz
  - Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge
  - Leistungsstärkere Batterien
  - Erneuerbare Energien (unzuverlässig)
- Elektrofahrzeuge im Stromnetz
  - Lastspitzen durch gleichzeitiges Laden **[Garcia]**
    - Privatsphäre vs. Planung
    - Ladestrategien (zentral vs. dezentral)
    - Ziele: Lastvarianz im Netz und Ladekosten für Nutzer minimieren
    - Ausgleich der Last auf die drei Phasen
  - Koordinieren des Ladens von Elektrofahrzeugen (fast) in Echtzeit **[Soares]**
    - Ziele: Überlastung verhindern, Einspeisung/Verbrauch angleichen
    - Heuristischer Ansatz in problematischen Teilgraphen
- Lebensdauer von Lithium-Ionen Akkumulatoren optimieren **[Dogger]**





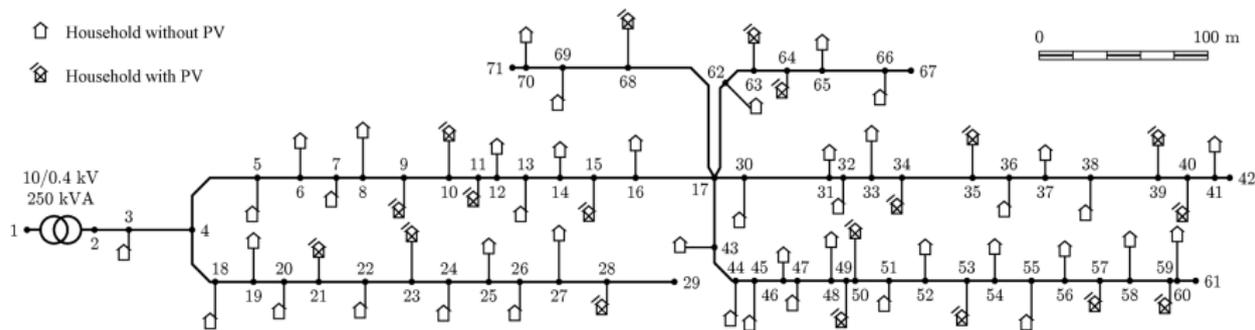


Abbildung : entnommen aus [Tant] S.183 Fig.1

- Probleme
  - Überspannungen im Netz
  - Netzausbau teuer (Alternativen?)
- Lösungen
  - Wechselrichter (Gleichstrom zu Wechselstrom)
  - Batteriespeicher (Mehrwert im Vgl. zu Wechselrichter)
    - Position im Stromnetz

Ausreißer sollen minimiert werden.

$$\Delta U_{\text{rms}}^{\text{peak}} = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{d=1}^{n_d} \max_{k \in \mathcal{K}_d, h \in \mathcal{H}_m, p \in \{1,2,3\}} (|U_{p,h,k}| - U_{\text{nom}})^2}$$

rms – Quadratischer Mittelwert über Zeit

$n_d$  – Anzahl Tage im Auswertungszeitraum

$\mathcal{K}_d$  – Menge der Zeitschritte am Tag  $d$

$\mathcal{H}_m$  – Menge an Häusern unter Betrachtung

$p$  – Phase

$U_{\text{nom}}$  – nominale Netzspannung

Indikator für peak-shaving minimieren.

$$S_{\text{rms}}^{\text{peak}} = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{d=1}^{n_d} \max_{k \in \mathcal{K}_d, p \in \{1,2,3\}} |S_{p,k}^{\text{tot}}|^2}$$

- rms – Quadratischer Mittelwert über Zeit
- $n_d$  – Anzahl Tage im Auswertungszeitraum
- $\mathcal{K}_d$  – Menge der Zeitschritte am Tag  $d$
- $p$  – Phase
- $S_{p,k}^{\text{tot}}$  – Kompletter Energieverbrauch in Phase  $p$  zur Zeit  $k$

Jährliche Kosten verringern.

$$K_{\text{tot}} = K_{\text{depr}} + K_{\text{fix}} + K_E$$

- $K_{\text{depr}}$  – Wertverlust (Abnutzung)
- $K_{\text{fix}}$  – Fixe Kapitalkosten und Wartungskosten
- $K_E$  – Durchschnittliche Energiekosten pro Zeiteinheit

Zielfunktionen zusammenfassen zu

$$\omega(\Delta U_{\text{rms}}^{\text{peak}})^2 + (1 - \omega)(S_{\text{rms}}^{\text{peak}})^2 \quad (1)$$

mit  $0.01 \leq \omega \leq 0.99$  als Gewichtungsfaktor und

$$K_{\text{tot}} \leq K^{\text{max}} \quad (2)$$

mit maximaler Kostenschranke  $K^{\text{max}}$

Dabei ist (1) zu minimieren unter der Nebenbedingung (2).

## Einige Beispiele

- a)  $P_k^c P_k^d = 0$ , Energiefluss am Wechselrichter
- b)  $E_k = E_{k-1} + \eta_c T_s P_k^c - \frac{1}{\eta_d} T_s P_k^d$ , Batterieenergiegehalt in  $k$
- c) Lebensdauer des Batteriespeichers  
 $\min \left\{ \text{Verfallsdatum}, \frac{\text{Anzahl möglicher Ladezyklen}}{\text{mittlere Ladezyklen pro Zeiteinheit}} \right\}$
- d) Eine nichtlineare, nichtkonvexe Bedingung (bzgl.  $K_{\text{depr}}$  - Wertverlust)

Weitere Nebenbedingungen siehe **[Tant]** S.184-187.

Quadratische Zielfunktion (1) und Nebenbedingungen (2) sowie a) bis d) führen zum Problem:

$$\min \omega(\Delta U_{\text{rms}}^{\text{peak}})^2 + (1 - \omega)(S_{\text{rms}}^{\text{peak}})^2 \text{ unter (2), a bis d} \quad (3)$$

wird gelöst per:

Sequential Quadratic Programming (SQP)

# Motivation für Sequential Quadratic Programming

SQP kann Probleme der folgenden Form lösen:

$$\begin{aligned} & \min_x f(x) \\ & \text{unter NB: } h(x) = 0 \\ & \quad \quad g(x) \leq 0 \end{aligned}$$

wobei:

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R}^n &\rightarrow \mathbb{R} && \text{– linear oder quadratisch} \\ h : \mathbb{R}^n &\rightarrow \mathbb{R}^m && \text{– nicht zwingend affin} \\ g : \mathbb{R}^n &\rightarrow \mathbb{R}^p && \text{– nicht zwingend affin} \end{aligned}$$

Idee:

- Approximiere Lösung  $x^*$  iterativ (ähnlich zu Newton-Verfahren)
- Nutze Lagrangefunktion:  $\mathcal{L}(x, \tilde{\lambda}, \tilde{\mu}) = \tilde{\lambda}^\top h(x) + \tilde{\mu}^\top g(x)$   
( $\tilde{\lambda} \in \mathcal{R}^m$ ,  $\tilde{\mu} \in \mathcal{R}^p$ , Lagrangemultiplikatoren)
- Lokale Eigenschaften des ursprünglichen Problems  $\rightarrow$   
quadratischen Teilproblem (quadrat. Zielfunktion, lin. Restriktionen)

Zum Wiederholen/Einlesen: D. Jungnickel. Optimierungsmethoden - Eine Einführung. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2015.

# Sequential Quadratic Programming<sup>1</sup>

Startvektor  $(x^0, \lambda^0, \mu^0)$ ,  $H_{\mathcal{L}}(x^0, \lambda^0, \mu^0)$ , Wertfunktion  $\Phi$ , setze  $k = 0$ . Es sei  $d_x = x - x^k$ .

- 1 Stelle quadratisches Teilproblem auf und löse es (z.B. per ILOG CPLEX [**Loefberg**])
- 2 Wähle Schrittweite  $\alpha$  derart, dass  $\Phi(x^k + \alpha d_x) < \Phi(x^k)$
- 3 Setze:

$$x^{k+1} = x^k + \alpha d_x$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha d_\lambda$$

$$\mu^{k+1} = \mu^k + \alpha d_\mu$$

- 4 Stop – falls nicht exakt genug weiter mit Schritt 5
- 5 Berechne  $H_{\mathcal{L}}(x^{k+1}, \lambda^{k+1}, \mu^{k+1})$
- 6  $k = k + 1$ , weiter mit Schritt 1

<sup>1</sup>Algorithmus aus [**Boggs**]

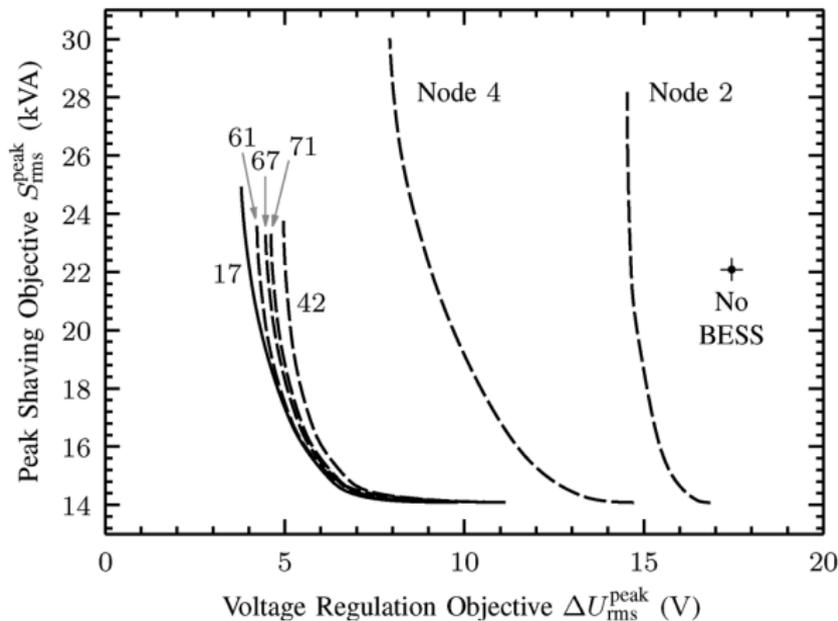


Abbildung : entnommen aus [Tant] S.188 Fig.4

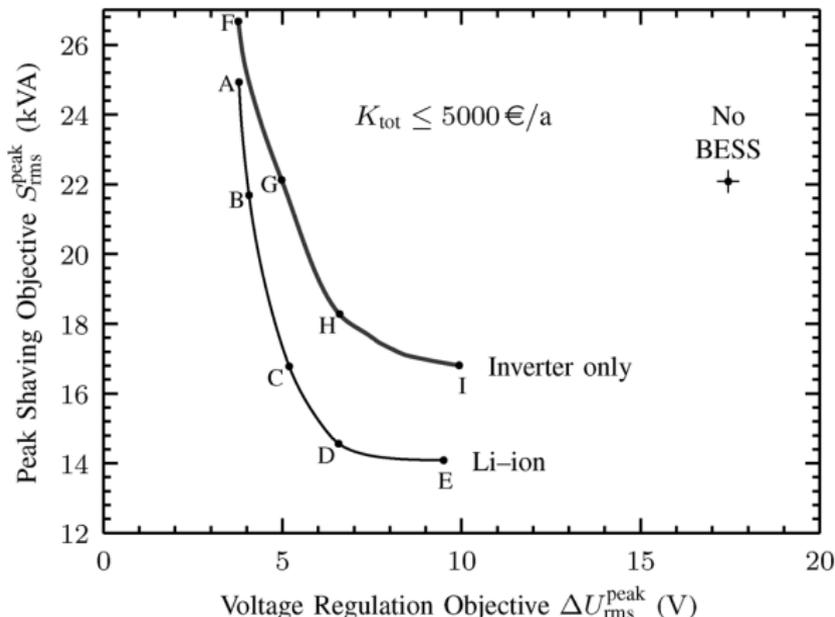


Abbildung : entnommen aus [Tant] S.188 Fig.5

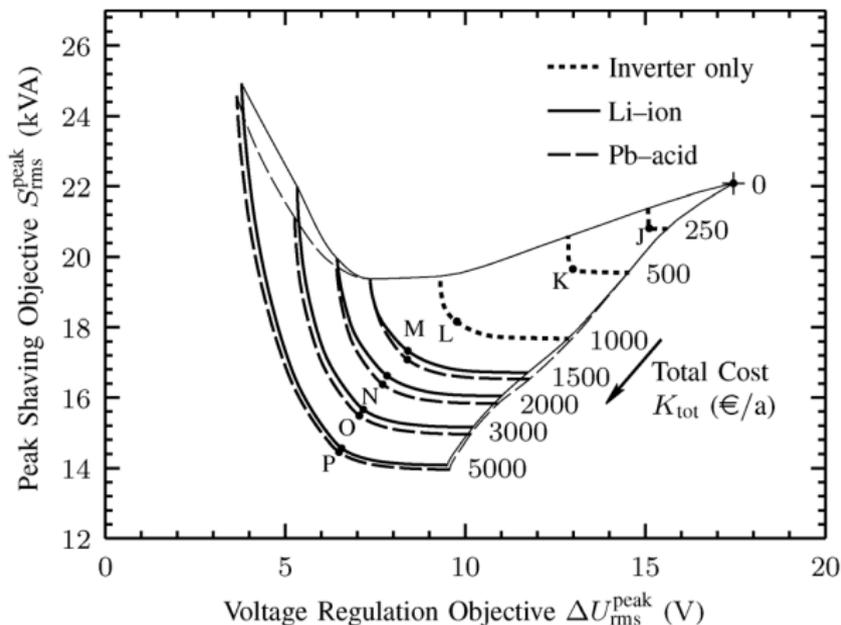


Abbildung : entnommen aus [Tant] S.189 Fig.7

# Elektrofahrzeuge – mobile Batteriespeicher

Im Folgenden:

A. Zakariazadeh, S. Jadid and P. Siano. Multi-objective Scheduling of Electric Vehicles in Smart Distribution System. *Energy Conversion and Management*, 79:43-53, 2014.

Vorgehen:

1. Modell
2. Algorithmus
3. Resultate

## ■ Rahmen

- Elektrofahrzeuge
- (Ent-)Ladestationen am
  - Wohnort
  - Arbeitsplatz
- M (smart meter) – intelligente Messuhr
- DC (data concentrator) – Daten von Niederspannungsnetz zusammenfassen
- MDM/R (Meter Data Management Repository) – Daten kombinieren, speichern, bearbeiten
- DSO (Distributed System Operator) – Ablaufplanung

## ■ Ziele

- Kosten senken
- CO<sub>2</sub>-Ausstoß verringern

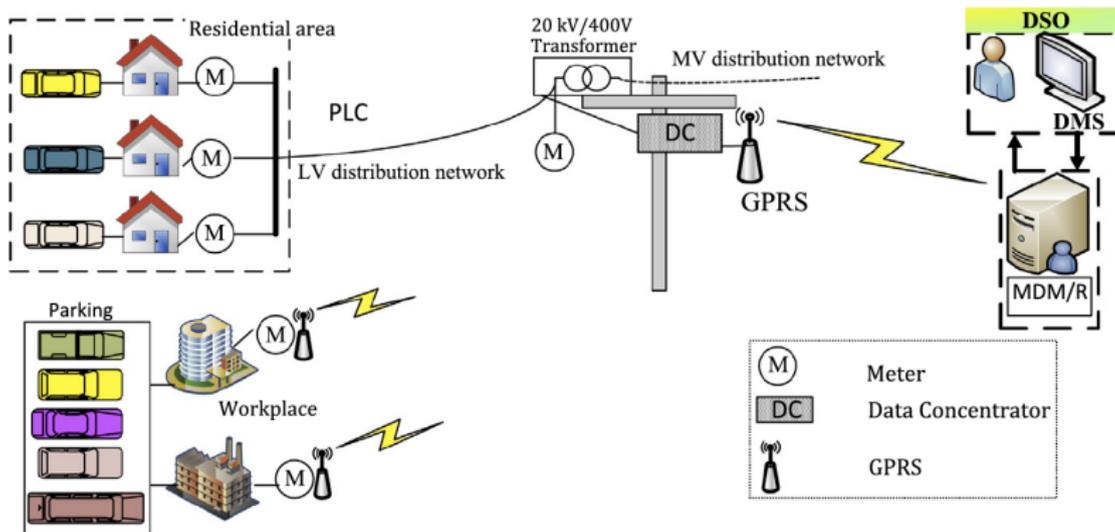


Abbildung : entnommen aus [Zakariazadeh] S.46 Fig.2

- Probleme
  - Fahrverhalten
  - Anreiz zur Teilnahme
- Lösungsansätze
  - Stoch. Modell, Planung von Fahrten
  - Evtl. Vergünstigungen, mögliche Gewinne aus Preisdifferenzen

Gruppe	Wohnort	Arbeitsplatz	anderes Ziel
1	vor Ort	vor Ort	—
2	vor Ort	außerhalb	—
3	vor Ort	—	Einkäufe etc.
4	vor Ort	—	Ausflüge im Planungshorizont
5	außerhalb	vor Ort	—

- Lösen per augmented  $\epsilon$ -constraint method (siehe **[Mavrotas1]** und **[Mavrotas2]**)
  - Berechne Wertebereich  $W$  der Emissionen
  - Äquidistante Zerlegung  $Z$  von  $W$
  - Für jeden Emissionswert von  $Z$  die Zielfunktion optimieren
- Zielfunktion: Kosten  $F^{\text{cost}}$

⇒ Trade-off zwischen Kostenreduktion und Emissionen

Paretopunkte (k)	Kosten (Dollar)	Emissionen(t)	$\mu^k$
1	13,253	63,08	0,079
2	13,314	61,66	0,088
3	13,483	60,24	0,095
4	13,896	58,81	0,102
5	14,510	57,39	0,106
6	15,340	55,96	0,110
7	16,234	54,54	0,113
<b>8</b>	<b>17,541</b>	<b>53,11</b>	<b>0,114</b>
9	19,658	51,69	0,108
10	24,954	50,27	0,084
<b>besten Kompromiss</b>	<b>17,541</b>	<b>53,11</b>	<b>0,114</b>

<sup>2</sup>entnommen und übersetzt aus [Zakariazadeh] S.52 Table.6



Gewichtung der einzelnen Paretopunkte per:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^2 \omega_i \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{10} \sum_{i=1}^2 \omega_i \mu_i^k}$$

- $k$  – Nummer des Paretopunktes (1 bis 10)
- $i$  – Laufindex für Zielfunktionen (hier: zwei Stück)
- $\omega$  – Gewichtungsfaktor (hier:  $\omega_i = \frac{1}{2}$ ,  $i = \{1, 2\}$ )

$$\mu_i^k = \begin{cases} 1, & F_i^k \leq F_i^{\min} \\ \left[ \frac{F_i^{\max} - F_i^k}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} \right], & F_i^{\min} \leq F_i^k \leq F_i^{\max} \\ 0, & F_i^k \geq F_i^{\max} \end{cases}$$





