



ALBERT-LUDWIGS-  
UNIVERSITÄT FREIBURG

# Algorithmen für drahtlose Netzwerke

**Drahtlose Sensornetze: Energy Harvesting**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Informatik  
Rechnernetze und Telematik  
Prof. Dr. Christian Schindelhauer



# Literatur Energy Harvesting

- ▶ **Kansal, Hsu, Zahedi, Srivastava**
  - *Power management in energy harvesting sensor networks.* ACM Trans. Embed. Comput. Syst. 6, 4, Sep. 2007

# Motivation

- ▶ **Energy harvesting**
  - kann WSNs von Batterien befreien
  - potentiell unendliche Laufzeit
  - Arbeitsrate kann reduziert werden
- ▶ **Beispiel**
  - Solarenergie nur bei Tageslicht verfügbar
- ▶ **Energiekonzept**
  - für gesamten Zeitraum notwendig
  - regelt Zusammenspiel aus Schlafphase, Datenrate und Kurzzeit-Energie-Speicher

# Harvesting Paradigma

- ▶ **Typische Zielssetzung in Batterie-WSNs**
  - Minimiere Energieverbrauch
  - Maximiere Lebensdauer
- ▶ **Zielsetzung Harvesting-WSNs**
  - Kontinuierlicher Betrieb
    - d.h. unendliche Lebensdauer
  - genannt: Energie-neutraler Betrieb

# Mögliche Quellen

- ▶ **Piezoelektrischer Effekt**
  - Mechanischer Druck wird in Spannung umgewandelt
- ▶ **Thermoelektrischer Effekt**
  - Temperaturunterschied mit Leitern mit verschiedenen Wärmekoeffizient
- ▶ **Kinetische Energie**
  - z.B. Armbanduhren
- ▶ **Mikrowindturbinen**
- ▶ **Antennen**
- ▶ **Chemische Quellen, ...**

# Unterschiede zur Batterie

- ▶ **Zeitabhängig**
  - Betriebsform muss mit der Zeit angepasst werden
  - Mitunter nicht vorhersagbar
- ▶ **Raumabhängig**
  - Verschiedene Knoten bekommen unterschiedliche Energie
    - Lastbalancierung notwendig
- ▶ **Versorgung bricht nicht ab**
- ▶ **Effizienzgedanken**
  - Ausnutzung der Energie für maximale Performanz
  - Unnötiges Energiesparen ergibt Opportunitätskosten

# Ansätze ohne Power- Management

## ▶ Ohne Energiepuffer

- Harvesting-Hardware muss bei minimaler Energieabgabe die maximal notwendige Energie erzeugen
- Nur in speziellen Situationen möglich
  - z.B. Lichtschalter,

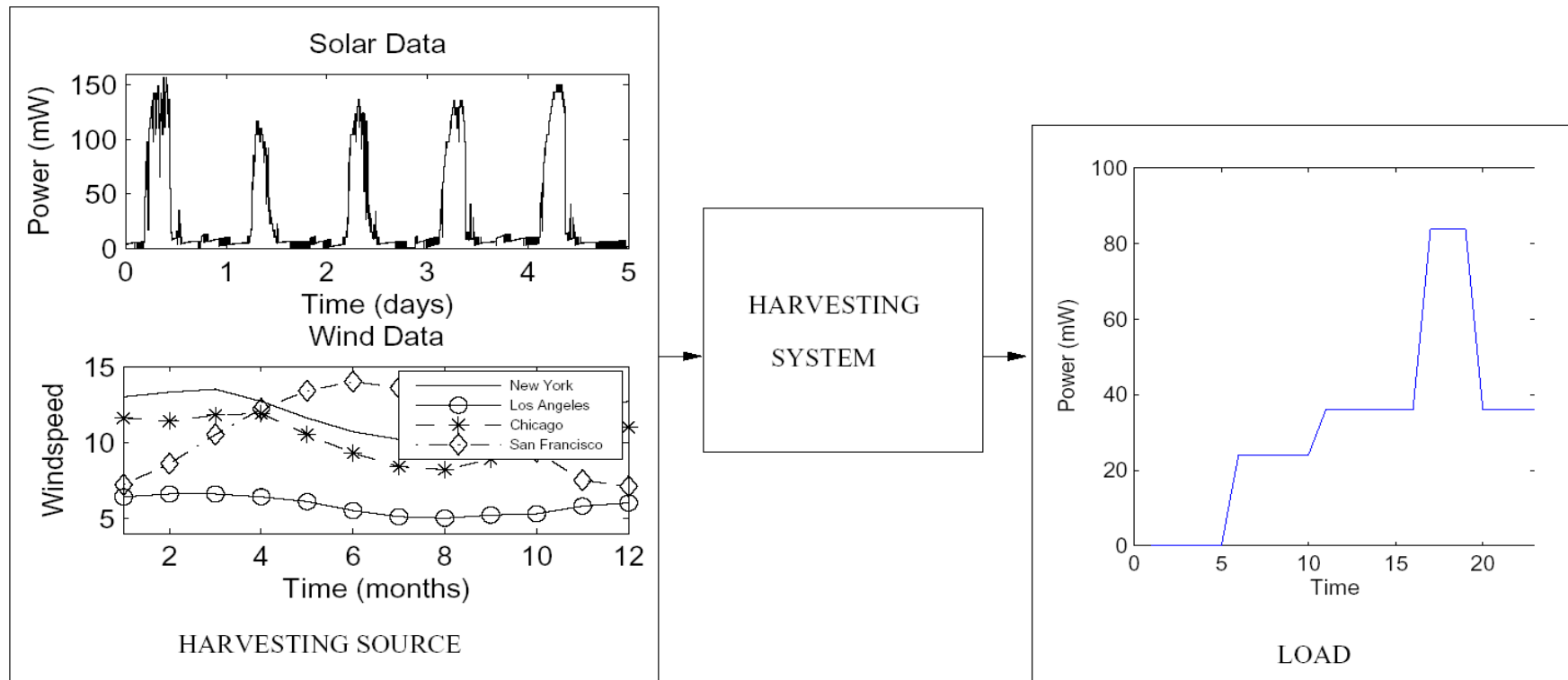
## ▶ Mit Energiepuffer

- Power Management System notwendig

# Power Management System

► Ziel:

- Bereitstellung der notwendigen Energie aus externer Energiequelle und Energiepuffer





# Energiequellen

- ▶ **Unkontrolliert und vorhersagbar**
  - z.B. Tageslicht
- ▶ **Unkontrolliert und unvorhersagbar**
  - z.B. Wind
- ▶ **Kontrollierbar**
  - Energie wird erzeugt, wenn notwendig
  - z.B. Lichtschalter, Dynamo am Fahrrad
- ▶ **Teilweise kontrollierbar**
  - Energie ist nicht immer verfügbar
  - z.B. Funkquelle im Raum mit wechselnden Empfang

# Harvesting Theorie

- ▶  $P_s(t)$ : Energie aus der Quelle zum Zeitpunkt  $t$
- ▶  $P_c(t)$ : Energiebedarf zum Zeitpunkt  $t$
- ▶ **Ohne Energiespeicher:**
  - $P_s(t) \geq P_c(t)$ : Knoten arbeitet
- ▶ **Idealer Energiespeicher**
  - Kontinuierlicher Betrieb, falls
$$\int_0^T P_c(t) dt \leq \int_0^T P_s(t) dt + B_0 \quad \forall T \in [0, \infty)$$
  - wobei  $B_0$  die Anfangsenergie im Speicher ist
  - Energiespeicher hat keinen Verlust, speichert beliebig

# Harvesting Theorie

- ▶  $P_s(t)$ : Energie aus der Quelle zum Zeitpunkt  $t$
- ▶  $P_c(t)$ : Energiebedarf zum Zeitpunkt  $t$

▶ Sei 
$$[x]^+ = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

▶ **Nicht-Idealer Energiespeicher**

- Kontinuierlicher Betrieb, falls

$$B_0 + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T [P_c(t) - P_s(t)]^+ dt - \int_0^T P_{leak}(t) dt \geq 0$$

- $B_0$  die Anfangsenergie im Speicher ist
- $\eta$ : Energieeffizienz des Speichers
- $P_{leak}(t)$ : Energieverlust des Speichers

# Harvesting Theorie

▶  $P_s(t)$ : Energie aus der Quelle zum Zeitpunkt  $t$

▶  $P_c(t)$ : Energiebedarf zum Zeitpunkt  $t$

▶ Sei 
$$[x]^+ = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

▶ **Nicht-Idealer Energiespeicher mit beschränkter Aufnahme  $B$**

- Kontinuierlicher Betrieb, falls

$$B_0 + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T [P_c(t) - P_s(t)]^+ dt - \int_0^T P_{leak}(t) dt \geq 0$$

- $B_0$  die Anfangsenergie im Speicher ist
- $\eta$ : Energieeffizienz des Speichers
- $P_{leak}(t)$ : Energieverlust des Speichers
- zusätzlich:

$$B_0 + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T [P_c(t) - P_s(t)]^+ dt - \int_0^T P_{leak}(t) dt \leq B$$

# Modellierung gutartiger Energie-Quellen

- ▶ Falls die Energiequelle  $P_s(t)$  regelmäßig vorkommt, dann erfüllt sie folgende Gleichungen

$$\int_{\tau}^{\tau+T} P_s(t) dt \leq \rho_1 T + \sigma_1$$

$$\int_{\tau}^{\tau+T} P_s(t) dt \geq \rho_1 T - \sigma_2$$

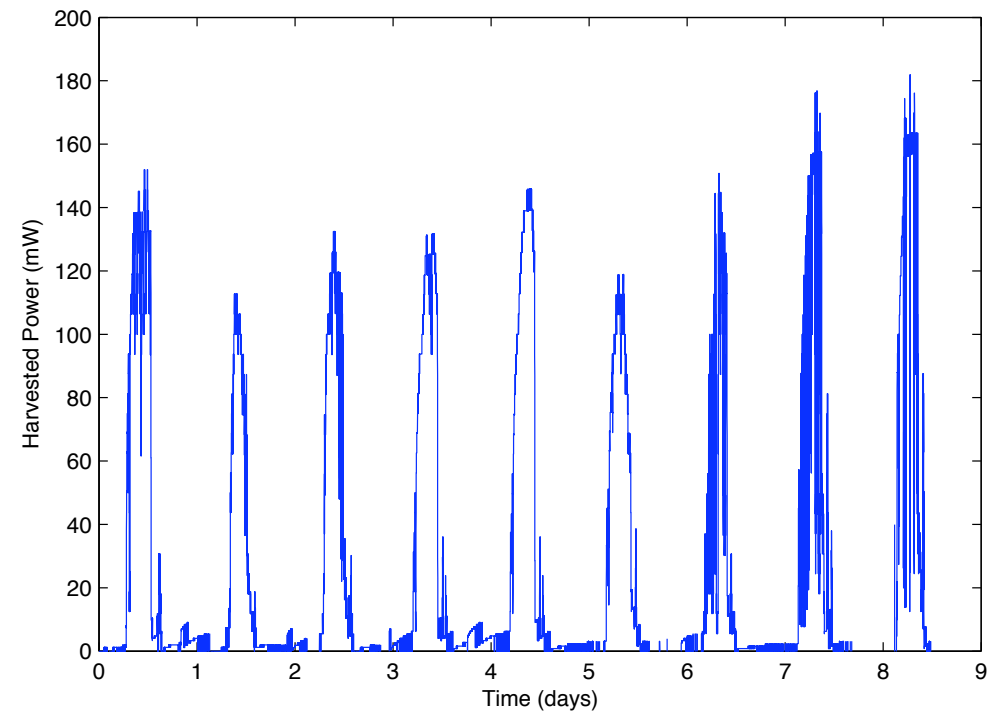


Fig. 2. Solar energy based charging power recorded for 9 days

# Modellierung gutartigen Energie-Bedarfs

- ▶ Gutartiger Energiebedarf  $P_c(t)$  erfüllt folgende Gleichungen

$$\int_{\tau}^{\tau+T} P_c(t) dt \leq \rho_2^T + \sigma_3$$

$$\int_{\tau}^{\tau+T} P_c(t) dt \geq \rho_2^T - \sigma_4$$

# Energieneutralität bei gutartigen Quellen

- ▶ Einsetzen in die nichtideale Energiequellengleichung:

$$B_0 + \eta \cdot \min\left\{\int_T P_s(t) dt\right\} - \max\left\{\int_T P_c(t) dt\right\} - \int_T P_{leak}(t) dt \geq 0$$
$$\Rightarrow B_0 + \eta(\rho_1 T - \sigma_2) - (\rho_2 T + \sigma_3) - \rho_{leak} T \geq 0$$

- ▶ Gleichung muss für  $T=0$  gelten

$$B_0 \geq \eta\sigma_2 + \sigma_3$$

- ▶ Diese Bedingung auch für alle  $T$  gelten

$$\eta\rho_1 - \rho_{leak} \geq \rho_2$$

- ▶ Wenn diese Gleichungen gelten, ist ein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet

# Notwendiger Energiespeicher bei gutartigen Quellen

- ▶ Einsetzen in die zweite Gleichung

$$B_0 + \eta \cdot \max\left\{\int_T P_s(t)dt\right\} - \min\left\{\int_T P_c(t)dt\right\} - \int_T P_{leak}(t)dt \leq B$$
$$\Rightarrow B_0 + \eta(\rho_1 T + \sigma_1) - (\rho_2 T - \sigma_4) - \rho_{leak} T \leq B$$

- ▶ Gleichung muss für  $T=0$  gelten

$$B_0 + \eta(\sigma_1 - \sigma_4) \leq B$$

- ▶ Einsetzen von  $B_0 \geq \eta\sigma_2 + \sigma_3$  liefert

$$B \geq \eta(\sigma_1 + \sigma_2) + \sigma_3 - \sigma_4$$

- ▶ Für  $T \rightarrow \infty$  ergibt sich

$$\eta\rho_1 - \rho_{leak} \leq \rho_2$$

- ▶ Diese Bedingung kann ohne Probleme verletzt werden



# Energieneutraler Betrieb

## ▶ Theorem

- Bei gutartigen Energiequellen kann Energieneutralität erfüllt werden, wenn die folgenden Bedingungen gelten:
  - $\rho_2 \leq \eta\rho_1 - \rho_{\text{leak}}$
  - $B \geq \eta\sigma_1 + \eta\sigma_2 + \sigma_3$
  - $B_0 \geq \eta\sigma_2 + \sigma_3$

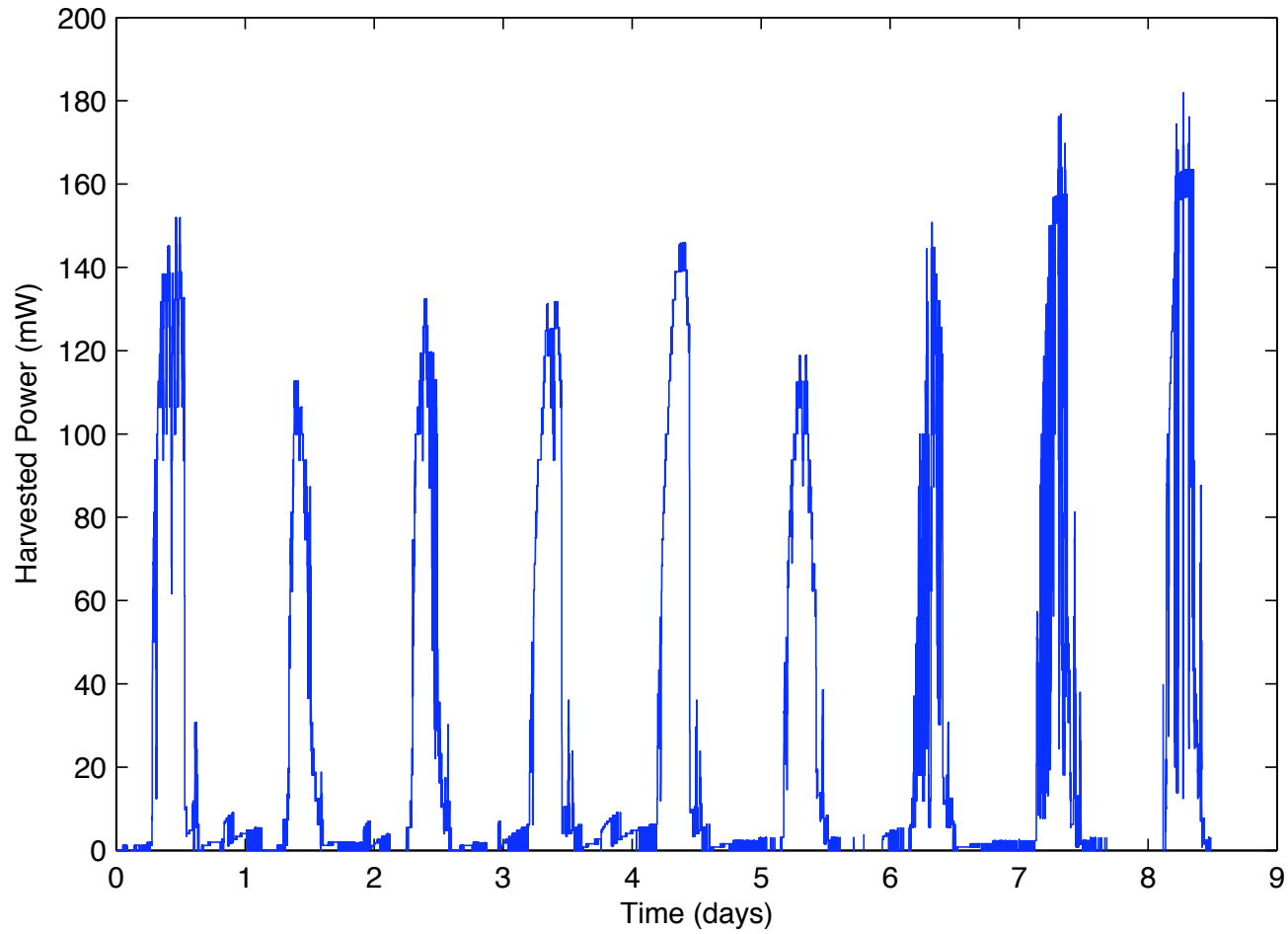


Fig. 2. Solar energy based charging power recorded for 9 days

Parameter	Value	Units
$\rho_1$	23.6	mW
$\sigma_1$	$1.4639 \times 10^3$	J
$\sigma_2$	$1.8566 \times 10^3$	J

# Weitere Überlegungen

- ▶ **Das Verhalten von Energiequellen kann gelernt werden**
  - Dadurch kann die zur Verfügung stehende Energie berechnet werden
  - Die Aufgabe kann an die Energieversorgung angepasst werden
- ▶ **Dadurch**
  - Knoten mit besserer Energiesituation können Routing übernehmen
  - Messwerte können evtl. ausdünnen, versiegen aber nicht



ALBERT-LUDWIGS-  
UNIVERSITÄT FREIBURG

# Algorithmen für drahtlose Netzwerke

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Informatik  
Rechnernetze und Telematik  
Prof. Dr. Christian Schindelhauer

