



# Konfigurationsfreies Ultraschall-Ortungssystem zum Tracking beweglicher Objekte

J. Wendeberg, F. Höflinger, C. Schindelhauer  
Graduiertenkolleg „Eingebettete Mikrosysteme“  
Universität Freiburg

Mai 2011

## Lokalisierung von Objekten mit Ultraschall

- Schallgeschwindigkeit beinahe konstant
- Reflexionen gutmütiger als bei RF-Strahlung
- Ultraschall-Sender und –empfänger leicht und kostengünstig
- ➔ Positionsberechnung durch Auswertung der Laufzeitunterschiede der Signale (TDOA, *time differences of arrival*):  
Multilateration

## Üblicher TDOA-Ansatz

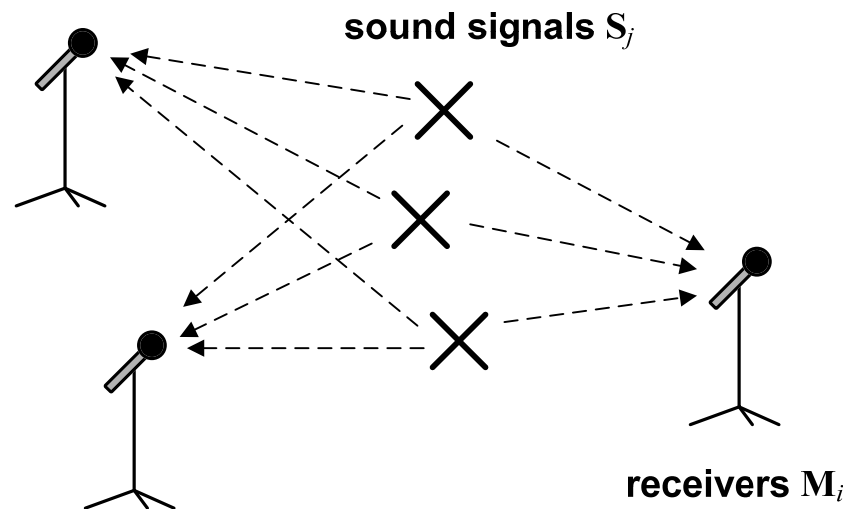
- Für TDOA-Ansätze mindestens drei feste, vorgegebene Ankerpunkte (Empfänger)
- Müssen aufwendig kalibriert (vermessen) werden

## Ankerlose Lokalisierung mittels TDOA

- Keine Kalibrierung der Empfänger notwendig
- Alle Positionen werden aus Laufzeitunterschieden berechnet
- Beliebige Netzwerkverbindung für Synchronisation und Austausch von Zeitstempeln

## Gegeben: Signalquellen $S_j$ und Empfänger $M_i$ ( $j \leq m, i \leq n$ )

- Diskrete (Ultraschall-) Signale entstehen an unbekannten Positionen  $S_j$  zu unbekannten Zeitpunkten  $t_{S_j}$
  - Signale propagieren geradlinig zu (unbekannten) Empfängern  $M_i$  und werden zu synchronisierten Zeitpunkten  $t_{M_i, S_j}$  detektiert
- ➔ Berechne alle Positionen  $S_j$ ,  $M_i$  und Zeitpunkte  $t_{S_j}$



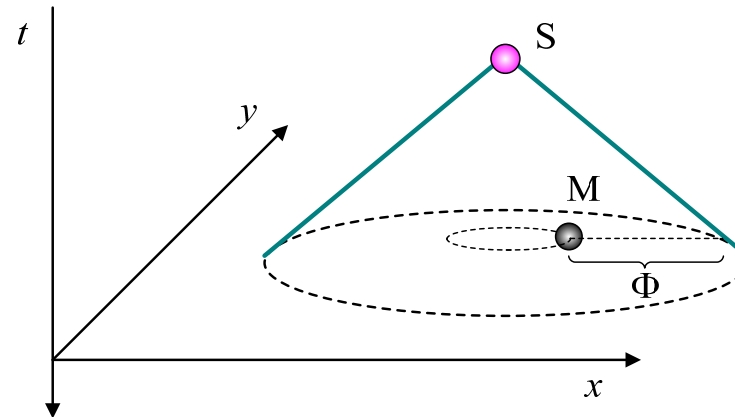
## Optimierungsproblem für alle S und M

- Mindestens **vier** Empfänger notwendig für eindeutige Lösung in der Ebene (→ Iterative Cone Alignment [2])
  - Nichtlineares Optimierungsproblem, iterative Lösung
  - Geschlossene Lösung nur in Spezialfällen [3]
- Alternativ: Lösung unter Vorbedingungen:
  - Annahme entfernter Signalquellen, Reduktion der Mindestzahl von Empfängern auf **drei** (→ Ellipsoid TDOA method [5])
  - Annahme entfernter und gleichverteilter Signalquellen, Reduktion der Mindestzahl von Empfängern auf **zwei** (→ Distance estimation [7])

## Iterative Cone Alignment

- Ziel: Alle Sender  $S_j$  und Empfänger  $M_i$  ( $j \leq m, i \leq n$ ) erfüllen

$$c (t_{M_i, S_j} - t_{S_j}) = \| \mathbf{M}_i - \mathbf{S}_j \|$$



mit gegebenen:

$c$

Signalgeschwindigkeit

$t_{M,S}$

Empfangszeitpunkt an  $M$

und unbekannt:

$t_S$

Signalzeitpunkt

$M$

Empfängerposition

$S$

Senderposition

## Iterative Cone Alignment

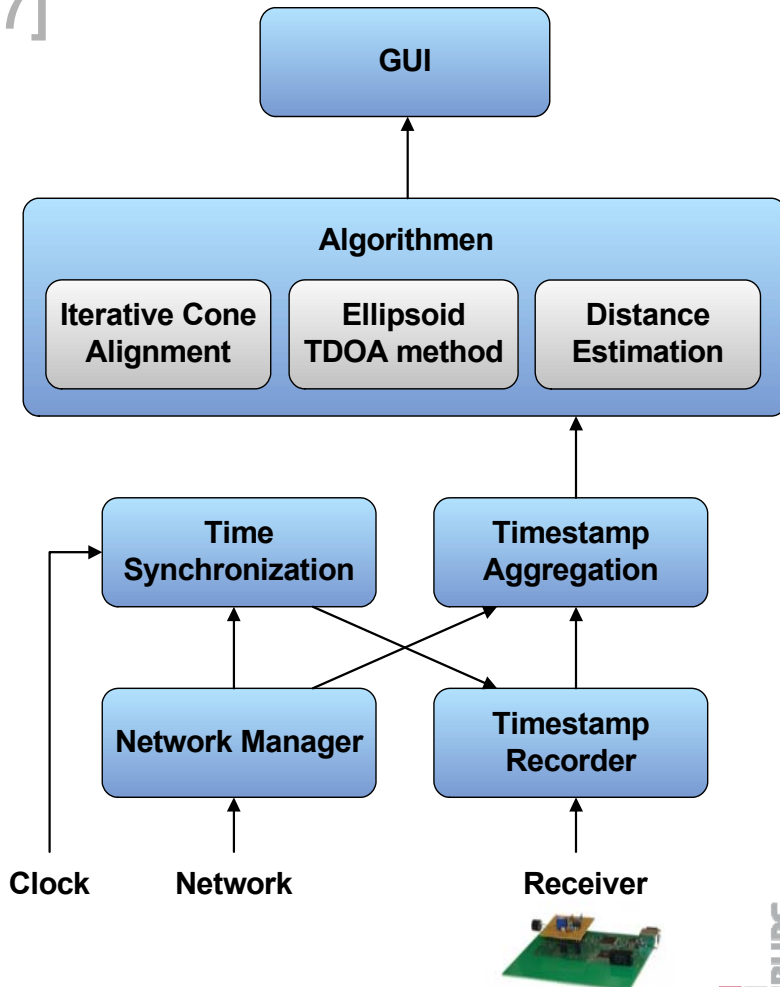
- Iterative Optimierung möglicher Positionen für **S** und **M**
  - Konzept eines Masse-Feder-Systems:
    - *Partikel*: Bewegliche Punkte mit den Eigenschaften: Masse, Position, Geschwindigkeit
    - *Constraints*: Federkräfte zwischen Partikeln
- ➔ Minimierung der Potentialenergie des Systems

## Software für Windows-Laptops [7]

- Bereitstellung einer Umgebung für TDOA-Lokalisierung
- Simulation für die Weiterentwicklung unserer Algorithmen

## Framework bietet

- Netzwerkmodul
- Synchronisierung
- Audioschnittstelle und Signalverarbeitung





## Indoor 2D-Ultraschall-Experiment [2]

- Lokalisierung und Tracking einer Modell-Eisenbahn (Abmessungen: 8 m x 11 m) [16]
- 5 x Ultraschall-Empfänger, angeschlossen an 5 Laptops, in WLAN
- 1 x isotropes Sendermodul (8 Ultraschall-Kapseln)



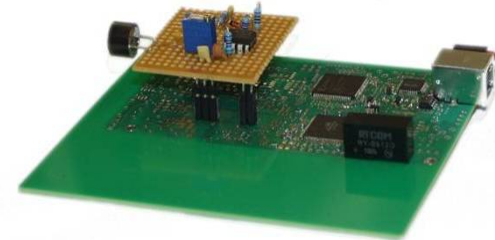
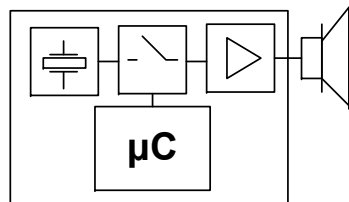
Aufbau Ultraschall-Experiment

# Experiment

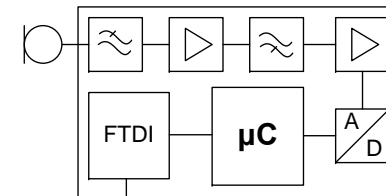
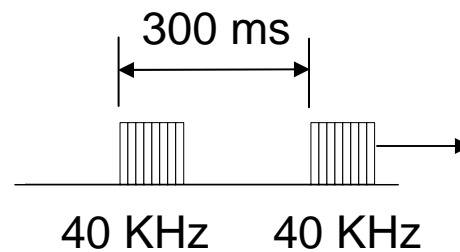
- Sender sendet kurze Ultraschall-Impulse im Zeitabstand von 300 ms
- Empfänger detektiert Ultraschallsignal, Signal wird gefiltert und digitalisiert, anschließend wird am Laptop Zeitstempel bestimmt

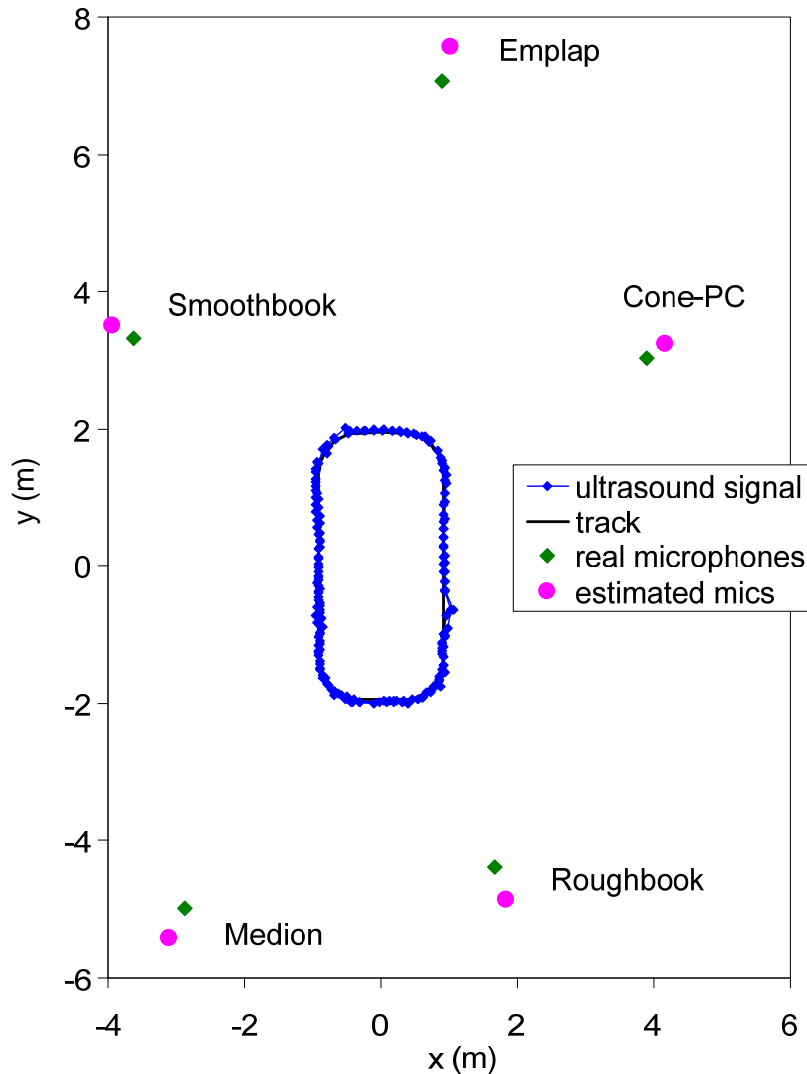


**Sender**



**Empfänger**





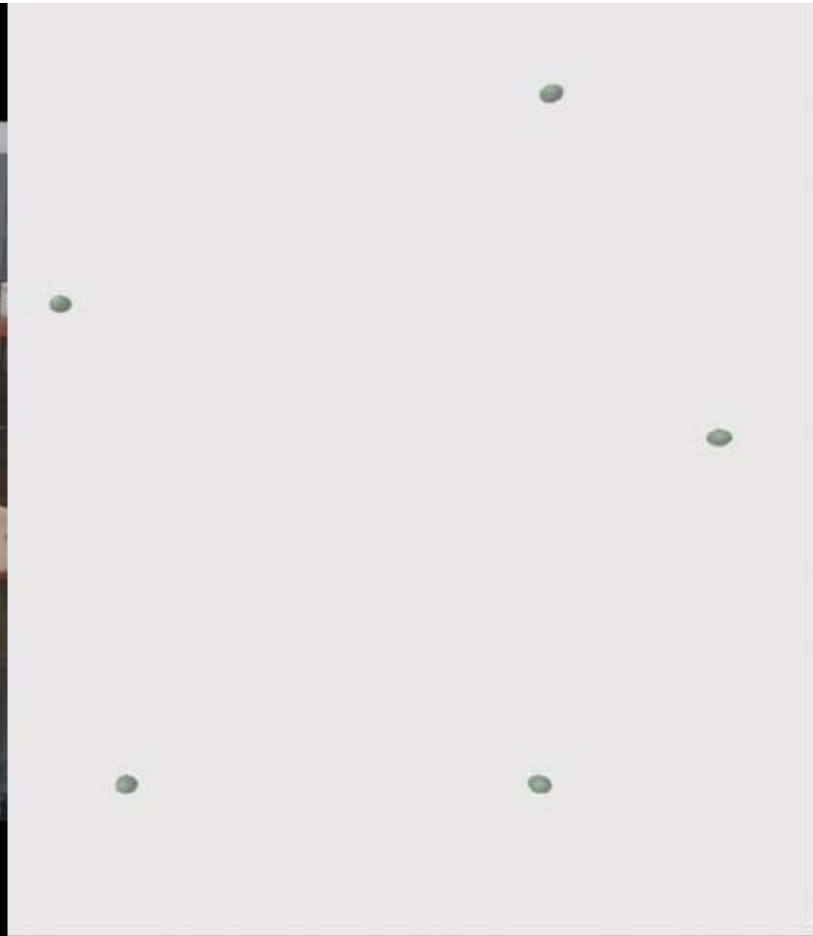
## Ergebnis

- Datenset von ca. 3 Runden
- Bahn (Sender)
  - RMS-Spurfehler:  $\sigma = 2,5 \text{ cm}$
- Empfänger
  - Durchschnittliche Abweichungen zu Realpositionen:  $44,5 \text{ cm}$  ( $\sigma = 7,7 \text{ cm}$ )

# Demonstration



Modellbahn mit Ultraschallsender



Cone Alignment

- Ultraschall-Trackingsystem benötigt keine Ankerpunkte
- Beliebige Netzwerkverbindung erforderlich (Austausch von Zeitstempel, Synchronisierung)

## Pläne für die Zukunft

- Erweiterung der Algorithmen für unsynchronisierte Lokalisierung: Anwendung in instabilen Netzwerken (GSM, UMTS)
- Verbesserung der Sender-Isotropie, kleinerer Ultraschallsender
- 3D-Experimente mit Quadrocopter



[www.parrot.com](http://www.parrot.com)

- [1] R. Biswas and S. Thrun. A Passive Approach to Sensor Network Localization. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ, volume 2, pages 1544–1549, 2004.
- [2] Johannes Wendeberg, Fabian Höflinger, Christian Schindelhauer, and Leonard Reindl. Anchor-free TDOA Self-Localization. To appear in Proceedings of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), May 2011.
- [3] M. Pollefeys and D. Nister. Direct computation of sound and microphone locations from time-difference-of-arrival data. In IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008., pages 2445–2448. IEEE, 2008.
- [4] S. Thrun, Affine Structure From Sound. In Proceedings of Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), MIT Press, Cambridge, MA, 2005, pp. 1353–1360.
- [5] Thomas Janson, Christian Schindelhauer, and Johannes Wendeberg. Self-localization Based on Ambient Signals. In Proceedings of ALGOSENSORS 2010, pages 176–188. Springer, 2010.
- [6] S. Thrun. Affine Structure From Sound. In Proceedings of Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), Cambridge, MA, 2005. MIT Press.
- [7] T. Janson, C. Schindelhauer, and J. Wendeberg. Self-Localization Application for iPhone using only Ambient Sound Signals. In Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pages 259–268, Nov. 2010.
- [8] Frank Dabek, Russ Cox, Frans Kaashoek, and Robert Morris. Vivaldi: A Decentralized Network Coordinate System. In Proceedings of the ACM SIGCOMM '04 Conference, Aug. 2004.
- [9] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The Cricket Location-Support System. In MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, pages 32–43, 2000.
- [10] Brian Ferris, Dirk Hähnel, and Dieter Fox. Gaussian Processes for Signal Strength-Based Location Estimation. In Proceedings of Robotics: Science and Systems Conference (RSS), 2006.
- [11] Mihail L. Sichitiu and Vaidyanathan Ramadurai. Localization of Wireless Sensor Networks with a Mobile Beacon. In Proceedings of the First IEEE Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, pages 174–183, 2004.
- [12] Jean-Marc Valin, François Michaud, Jean Rouat, and Dominic Létourneau. Robust Sound Source Localization Using a Microphone Array on a Mobile Robot. In Proceedings International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 1228–1233, 2003.
- [13] R.L. Moses, D. Krishnamurthy, and R.M. Patterson. A Self-Localization Method for Wireless Sensor Networks. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, pages 348–358, 2003.
- [14] Pratik Biswas and Yinyu Ye. Semidefinite Programming for Ad Hoc Wireless Sensor Network Localization. In IPSN '04: Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks, pages 46–54, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [15] R. Biswas and S. Thrun. A Distributed Approach to Passive Localization for Sensor Networks. In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, volume 20, page 1248. Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press; MIT Press; 1999, 2005.
- [16] M. Sippel, W. Kuntz, and L. Reindl. New approach in precise laser tracking. In IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008, pages 446–451, 2008.
- [17] H. Stewénius. Gröbner Basis Methods for Minimal Problems in Computer Vision. PhD thesis, Lund University, April 2005.
- [18] B. Sundararaman, U. Buy, and A.D. Kshemkalyani. Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey. Ad Hoc Networks, 3(3):281–323, 2005.