

# Sensorknoten Netzwerk für In Situ-Temperaturerhebung von Wasseroberflächen in Fließgewässern \*

Amir Yousefi<sup>†</sup>    Ansgar Taflinski<sup>‡</sup>    Florentin Neumann<sup>‡</sup>  
                                 Hannes Frey<sup>‡</sup>

26. August 2014

## Zusammenfassung

In diesem Bericht wird der Einsatz von drahtlosen Sensornetzen zur Temperaturmessung in Fließgewässern untersucht. Es wird Dargestellt inwieweit solche Netze als Bindeglied zwischen Fernerkundung und stationären Sensoren eingesetzt werden können. Es werden die Anforderungen an Sensornetze für die Anwendung Gewässermonitoring ermittelt und eine prototypische Realisierung von Netzknoten für ein solches Sensornetz dargestellt. Als Ergebnis dieser Arbeit werden die Genauigkeit von Temperaturmessungen mit solchen Sensorknoten im Vergleich zu einem Temperaturlogger als Referenzsystem dargestellt. Die Messungen zeigen, dass eine vergleichsweise gute Messgenauigkeit zu geringen Kosten erreichbar ist. Durch Weiterentwicklung des hier dargestellten Prototypen steht für die Temperaturüberwachung in Gewässern ein vielversprechendes und kostengünstiges neues Messinstrument zur Verfügung. Dieses kann auf der einen Seite in tieferen Regionen Gewässertemperaturen messen, als dies mit Fernerkundung möglich ist, und auf der anderen Seite eine höhere räumliche Auflösung als stationäre Messstationen erreichen. Zusätzlich dienen die Literaturrecherche und die Formulierung der Kriterien einer Eingrenzung des

Anwendungsbereichs für weiterführende Arbeiten.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Anforderungen</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Prototyp</b>	<b>4</b>
3.1	Auswahl der Komponenten . . . . .	4
3.2	Hardwareaufbau des Prototypen . .	6
3.3	Softwareaufbau des Prototypen . . .	6
<b>4</b>	<b>Ergebnis</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>8</b>

## 1 Einleitung

Mit zunehmendem technologischem und wissenschaftlichem Fortschritt entstehen neue Untersuchungsmethoden für umweltwissenschaftliche Fragestellungen. Die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen der Untersuchungsmethoden richten sich nach dem Anwendungsbereich, in dem die Informationen benötigt werden. Im umweltwissenschaftlichen Bereich existieren fachliche Themengebiete, die sich inhaltlich überlappen aber nicht vollständig überdecken. So passiert es, dass Untersuchungsmethoden einer Fachrichtung zu Ergebnissen und Daten führen, die für benachbarte Fachgebiete genutzt werden können. Bei dem Transfer der fachlichen Informationen muss der Rahmen in dem die Daten generiert wurden, berücksichtigt werden. Eine zuverlässige Möglichkeit methodische Unterschiede zu

\*Dieser technische Bericht ist das Ergebnis einer Kooperation der *Institute für Integrierte Naturwissenschaften und Informatik* der *Universität Koblenz-Landau*. Das diesem Bericht zugrunde liegende Kooperationsprojekt basiert im wesentlichen auf dem Master Abschlussarbeiten der beiden erstgenannten Autoren. Diese Arbeit soll einen Überblick über die Themen geben. Details können nach Fertigstellung den jeweiligen Master Abschlussarbeiten entnommen werden.

<sup>†</sup>Institut für Integrierte Naturwissenschaften, Abteilung Geographie, Universität Koblenz-Landau

<sup>‡</sup>Institut für Informatik, Universität Koblenz-Landau

erkennen ist der Vergleich ihrer Ergebnisse. Das Referenzieren der Ergebnisse muss durch eine dritte Instanz erfolgen, die unabhängig von den zu betrachtenden Ergebnissen und ihrer Methoden sein muss. Um diese Sachlage mit einem realen Beispiel aus der praktischen Anwendung zu untermauern wird zuerst die Temperaturerhebung von Fließgewässern kurz vorgestellt.

Im Bereich der Fließgewässerforschung werden für gewässerchemische und biologische Untersuchungen Temperaturen erhoben, die für ihren Zweck spezialisiert sind (vgl. [4, 13]). Das methodische Vorgehen für Laboruntersuchungen ist in diesem Bereich gesetzlich definiert durch EN ISO/IEC-17025. In diesem Rahmen sind die Temperaturdaten für die Laboranalysen repräsentativ. Neben der Temperatur für Gewässerchemie und Biologie werden Temperaturdaten für Wärmelastuntersuchungen in Fließgewässern benötigt, die für die Regelung anthropogener Wärmeeinleitungen durch Kraftwerke notwendig sind (vgl. [3, 7, 8, 11]). Die Temperaturdaten für diesen Zweck haben mehrere Quellen und beziehen sich größtenteils auf stationäre Erhebungsmethoden oder in situ-Methoden. Gegenwärtige Arbeiten zu diesem Thema bedienen sich der Methode der thermischen Fernerkundung durch Infrarotsensoren, die eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung abbilden können (vgl. [5, 23, 24]).

Beide Bereiche nutzen Temperaturdaten für die Fließgewässerforschung. Die verschiedenen Methoden der Temperaturerhebung bieten Anlass für einen Vergleich der Informationen für die zukünftige Kombinations- und Verknüpfungsmöglichkeit der Daten. Es bestehen Fragen bezüglich der Verschiedenheit der Ergebnisse durch ihre methodische Erhebung. Fernerkundungsdaten bilden eine große Fläche durch Bildelemente, innerhalb weniger Millisekunden ab und erfassen die obersten Mikrometer der Wasseroberfläche. Während stationäre Daten aus punktuellen Messungen bestehen, die aus einer Tiefe unterhalb von 50 cm erhoben werden und einen Mittelwert von ca. 5-15 Minuten abbilden. Hinzu kommt, dass die Repräsentativität der stationären Daten meistens für Zwecke definiert sind, die für eine flächenhafte Messung der Temperatur im Querschnitt und Tiefe nicht zutreffen.

Dieser Hintergrund führt zu der Frage, wie beide Bereiche durch eine unabhängige Referenzmethode überprüft und verglichen werden können. Das ist notwendig, um räumliche und zeitliche Anomalien als Fehlerquellen zu reduzieren und Unsicherheitsbereiche zu identifizieren. Somit ist eine Übergangstechnologie notwendig, die sich in ihrer methodischen und technologischen Umsetzung, für die

Betrachtung großer und kleiner Skalen (der räumlichen und zeitlichen Dimensionen) nach Bedarf variieren und modifizieren lässt. Für eine umfassende und zukunftsorientierte Lösung sind technische und methodische Erfindungen notwendig, die sowohl inter- als auch transdisziplinäre Ansätze verfolgen. Die Ausrichtung und Abstimmung der einzusetzenden Messtechnologie spielt hier eine zentrale Rolle für die Ergebnisse über dynamische Temperaturverteilungen in Fließgewässern.

Einen technologischen Lösungsansatz für dieses Problem bieten *drahtlose Sensornetzwerke* (engl. *Wireless Sensor Networks*, kurz *WSN*). Für eine ausführliche Betrachtung von drahtlosen Sensornetzen empfehlen wir die Lehrbücher [20] und [10]. Nach Karl et al. [10, S.4 ff.] werden drahtlose Sensornetzwerke für Umweltüberwachungen auf Festland- und Unterwasserzonen eingesetzt. Die Überwachungsstrategien können simple Ereigniswarnungen, periodische Messungen, Tracking (zu deutsch: Verfolgen) und Kombinationen der genannten Strategien sein. Anhand der Möglichkeiten, die Sensorknoten-Netzwerke eröffnen, soll in dieser Arbeit der Einsatz dieser Technologie für den oben genannten Anwendungsbereich untersucht werden. Doch bevor das geschehen kann, muss der Anwendungsbereich durch Kriterien definiert werden, um eine optimale Konfiguration der Sensorknoten zu gewährleisten.

Bestehende Arbeiten zu diesem Thema bestätigen die Stoßrichtung und reduzieren die experimentellen Voruntersuchungen auf einen Mindestmaß.

## Verwandte Arbeiten

Nah an der Wasseroberfläche betriebene drahtlose Sensornetze stehen im Fokus mehrerer Publikationen aus den letzten Jahren. Zur Verwendung drahtloser Sensornetze für die Erkundung von Binnengewässern existieren jedoch nur sehr wenige Publikationen [9]. Nach unserem Kenntnisstand gibt es bis heute nur eine Publikationen die sich speziell mit Fließgewässern auseinandersetzt [21]. Veröffentlichungen finden sich besonders in den Anwendungsbereichen *Ozeanographie* [2, 12, 14, 18] (vgl. hierzu auch den Übersichtsartikel in [1]) und *Wasserqualitätsmanagement* [15–17, 22].

Die oben genannten Veröffentlichungen lassen sich nach der Herangehensweise in verschiedene Gruppen einordnen: Einige Arbeiten befassen sich mit dem Design hoch präziser Sensoren für wissenschaftliche Messungen verschiedener Größen, wie *Phosphatkonzentration* [15], *pH-Wert*, *elektrische Leitfähigkeit*, *Sauerstoffgehalt* [16] und *Dichte* [2]. Die entwickelten Sensoren sind i.d.R. sehr teuer.

Obwohl in [16] Kosteneffizienz als Entwicklungsziel genannt wird, liegt der Stückpreis für die vorgestellten Sensoren bei \$ 1040.

In einer zweiten Gruppe von Veröffentlichungen werden Systeme vorgestellt, die auf handelsüblichen Hardwarekomponenten basieren [9, 17, 22], oder sogar auf käuflichen Sensorknotenplattformen beruhen [12, 14]. In den Arbeiten [9, 22] werden Systeme beschrieben, die auf Bojen befestigt bzw. selbst als befestigte Boje eingesetzt werden können. Rasin [17] stellt hingegen den Aufbau der Systeme in den Mittelpunkt und beschäftigt sich mit Problemen wie der Kompatibilität von Sensoren und bei der Entwicklung von zugehöriger Software auftretenden Fragestellungen.

Unter Betrachtung der Entwicklungsziele unserer Arbeit liegen die folgenden zwei Ansätze unserer Forschung am nächsten: Im Rahmen des Forschungsprojekts *floating sensor networks for river studies* der Berkeley University [21], wurden frei schwimmende und drahtlos vernetzte Sensorknoten entwickelt. Diese als *Drifters* bezeichneten Einheiten nehmen lokale Messungen vor und zeichnen die Messungen über den Strömungsverlauf auf. Anders als unsere Sensorknoten, kann die Bewegung der Drifters im Wasser mittels eines Propellersystems aktiv beeinflusst werden. Letzteres macht das System jedoch komplex und teuer.

Ebenfalls frei schwimmende, jedoch am Meeresboden befestigte, Sensoren werden in dem Projekt *OceanSense* [12, 14] eingesetzt. Die eingesetzten Telos B-Sensorknoten sind an dem Ende eines aus dem Wasser ragenden Stabs befestigt, der mittels Schwimmkörpern aus Kunststoffschäum in mittlerer Höhe und Gewichten am unteren Ende stabil aufrecht schwimmt. Die in 150 cm oberhalb der Wasseroberfläche angebrachten Sensorknoten werden eingesetzt, um die Wassertiefe zu bestimmen [12]. Die verwendete Konstruktion scheint für die hier vorliegenden Ziele, d.h. Einsatz als frei beweglicher, nicht fixierter Schwimmer, jedoch zu instabil zu sein.

## 2 Anforderungen

Die Anforderungen an die Konfiguration der Sensorknoten und die Netzwerkarchitektur ergeben sich aus den Kriterien des Anwendungsbereiches. In diesem Fall ist der Einsatz auf der Wasseroberfläche von Fließgewässern vorgesehen. Die Wassertemperatur soll in einem Bereich von  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  untersucht werden. Die Temperaturdaten der Sensorknoten müssen zeitlich synchronisiert sein und einer räumlichen Position zugeordnet werden. Die zeit-

liche Auflösung der räumlichen Wassertemperaturdaten soll mindestens 1 Sekunde pro Zeitschritt betragen. Die räumliche Position soll mit GPS ermittelt werden.

Weitere Bedingungen, die als übergeordneter Rahmen erfüllt sein müssen sind flexible Einsatzmöglichkeiten für verschiedene Untersuchungsgebiete. Diese Kriterien sehen eine einfache und zuverlässige technische Konstruktion vor. Die Anwendung soll prinzipiell für jeden möglich sein, der sich mit diesem Thema intensiv beschäftigen möchte (finanzielle und technische Kriterien sollen keine unüberwindbaren Grenzen darstellen). Die Kosten der Komponenten sollen minimal gehalten werden. Insbesondere sollten die Stückkosten pro Knoten derart sein, dass es möglich bleibt wenigstens dutzende Knoten herzustellen und zu betreiben. Zudem sollen die technischen Grundlagen simpel und mit einfachen Voraussetzungen realisierbar sein. Deshalb müssen die Hardware Komponenten weltweit verfügbar und in einem angemessenen Kostenrahmen liegen. Für einfache Handhabbarkeit und Transportmöglichkeiten sind Größe und Gewicht weitere Kriterien. Insgesamt sollte ein Sensorknoten geringes Gewicht und kleine Größe haben. Ein modularer Aufbau soll eine Erweiterung gewährleisten und zukünftige Weiterentwicklung vereinfachen. Neben den Hardwarekomponenten muss die Software weltweit kostenfrei und im Quellcode verfügbar sein.

Eine weitere Grenze bildet der Energieverbrauch für die Messung der Temperatur und Übertragung der Daten zu einer Datensinke. Die Datenübertragung über sehr große Strecken erfordert viel Energie und setzt leistungsfähige Akkumulatoren voraus. Es wird aus Energiegründen von Live-Datenübertragungen über große Distanzen abgesehen. Stattdessen sollen die Sensorknoten miteinander kommunizieren und ihre Daten über ein internes Netzwerk übermitteln. Dadurch werden die Sensorknoten zu Sendern und Empfängern. An einer Datensinke sollen die Informationen phasenweise abgerufen werden, sodass in kurzen Zeitabständen zeitnahe Umweltparameter zur Verfügung stehen. Aufwendige und stationäre Netzwerkinfrastrukturen sollten vermieden werden. Im Folgenden beschränken sich die Kriterien auf den Sensor, die Schnittstellen, sowie Parameter die gemessen und übertragen werden sollen.

- Kriterien für den Temperatursensor:
  - Kompatibilität mit dem Microcontroller des Sensorknotens und den anderen Komponenten;
  - Geeignet für den Einsatz im Wasser;

- Ansprechzeit im Wasser unter 1s;
  - Messgenauigkeit +/- 0,4 °C und besser;
  - Normiert nach einem internationalen Standard.
  - Kommerziell erhältlich (und ggf. in großen Stückzahlen produzierbar);
- Kriterien für die Datenübertragung:
    - Drahtlose Datenübertragung;
    - Normiert nach einem internationalen Standard.
  - Kriterien für die Parameter/Datentupel:
    - Positionsdaten
    - Messwerte
    - Zeitstempel

Studien zu dem Gehäuse sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Eine Vorarbeit hierzu ist gegeben durch [21]. Es sind hierzu zusätzliche Untersuchungen notwendig, die im Bereich der Materialforschung liegen. Eine Auseinandersetzung mit diesem Thema würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

### 3 Prototyp

Zur Erprobung der WSN-gestützten in situ Messungen haben wir anhand der im Abschnitt 2 ermittelten Anforderungen einen Prototypen entwickelt. Die Kosten für die Summe der Teile belaufen sich auf 117€ (siehe Tabelle 1). Die Auswahl der Hard-

Komponente	Kosten
TelosB WSN-Knoten	70 €
Pt1000 Class A Sensor	14 €
GPS-Bee GPS Sensor	28 €
Frischhaltedose	3 €
Kleinteile	2 €
<b>Summe</b>	<b>117 €</b>

Tabelle 1: Kostentabelle für die verwendeten Hardwarekomponenten

warekomponenten, Aufbau und die Anforderungen an die Software sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 3.1 Auswahl der Komponenten

Aus technischer Sicht lassen sich die in Kapitel 2 genannten Anforderungen hinsichtlich ihrer Umsetzung aufteilen: In eine Gruppe von Anforderungen die bei der Zusammenstellung der Hardware berücksichtigt werden müssen und in eine Gruppe von Anforderungen die durch Software umgesetzt werden können. Anforderungen, die die Auswahl der Hardwarekomponenten maßgeblich beeinflussen, sind:

- Messung der Wassertemperatur mit definierter Genauigkeit
- Ermittlung der Position eines Sensorknotens
- drahtlose Kommunikation für die Übermittlung der aufgezeichneten Daten

Als zentrale Einheit, die sämtliche Sensoren und Schnittstellen verwaltet, werden in der Regel WSN Micocontrollerbasierte Plattformen eingesetzt. Die Verwendung von Microcontrollern bietet eine hohe Energieeffizienz und stellt dabei noch ausreichend Leistung für die Speicherung und Weitergabe der zu erhebenden Werte bereit.

#### WSN-Knoten

Basisplattformen für WSN-Knoten sind in der Regel mit einem Mikrocontroller, einem Funkchip, einem persistenten (Flash-) Speicher und ggf. einer Grundausstattung an Sensoren ausgerüstet. Basisplattformen für WSN-Knoten sind in der Grundausstattung fertig käuflich, sie können aber auch individuell zusammengestellt werden. Beispielsweise die weit verbreiteten *Arduino* Microcontroller Boards bieten mit ihrem Vielfältigen Zubehör eine Basis, um WSN-Plattformen aufzubauen.

Der Aufbau einer Basisplattform aus Einzelkomponenten stellt preislich eine günstige Alternative zu kompletten Sensorknotenplattformen dar. Die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit vieler Einzelkomponenten erschwert jedoch die lokale Reproduktion für Projekte außerhalb der westlichen Industrieländer. Für die Entwicklung der Software ergibt sich aus der individuellen Zusammenstellung der jeweils günstigen Hardwarekomponenten zudem die Schwierigkeit, die jeweils verwendeten Komponenten einzeln berücksichtigen zu müssen. Die Verwendung von Entwicklungsumgebungen für WSN-Knoten, die i.d.R. Unterstützung für die verbreiteten Sensorknotenplattformen bieten, werden bei der Verwendung eigener Plattformen ausgeschlossen. Umfassende Entwicklungsumgebungen,

die für die Softwareentwicklungen eine Abstraktionsschicht zur Hardware bilden sind z.B. *TinyOS*<sup>1</sup> oder *Contiki OS*<sup>2</sup>.

Das Angebot an (Hardware-)Plattformen für WSN ist vielfältig, hinsichtlich der Prozessorleistung, der persistenten Speicherkapazität, der Größe des Arbeitsspeichers, Funkschnittstelle, sowie der Schnittstellen zur Anbindung weiterer Sensoren.

Auf der einen Seite existieren Plattformen wie der *Waspmote*<sup>3</sup> vom Hersteller *libelium*: Zusätzlich zu der Sensorknotenplattform bietet der Hersteller Erweiterungen wie zusätzliche Sensoren, GPS-Erweiterungen, SIM-Karten-Adapter, etc. an. Für eine Erweiterung der Plattform um einen Sensor existiert für jede vorgesehene Erweiterung genau ein Produkt des Herstellers. Das vom Hersteller bereitgestellte API ist quelloffen, aber auf diese Hardwareplattform beschränkt. Der Preis für eine Basisplatine mit Funkchip und Microcontroller liegt je nach Funkfrequenz und Antenne zwischen 250 US\$ und 285 US\$.

Die von der *University of California, Berkeley* unter dem Namen *Telos B* entwickelte Spezifikation eines WSN-Knotens ist unter freier Lizenz öffentlich<sup>4</sup>. Der *Telos B* verwendet einen Microcontroller der verbreiteten *MSP430*-Familie von Texas Instruments als Hauptprozessor, ist mit einer IEEE 802.15.4 kompatiblen Funkschnittstelle (2.4 GHz Band) ausgestattet und bietet neben 1024 kB persistentem Speicher auch die Möglichkeit weitere analoge und digitale Sensoren anzubinden. Der A/D-Wandler hat eine Auflösung von 12 Bit und kann über separate Kanäle bis zu acht analoge Sensoren auslesen. Nach der *Telos B*-Spezifikation entwickelte WSN-Knoten sind von mehreren Herstellern verfügbar. Der Verkaufspreis eines *Telos B* Knotens liegt bei ca. 70 €.

## Temperatursensoren

Die Basisplattform wird für die Temperaturmessungen um einen Temperaturfühler erweitert. Temperaturfühler gibt es in grundsätzlich verschiedenen Ausführungen: Die meisten Temperaturfühler sind *Widerstandsthermometer*, die bei Änderung der Temperatur den Ohm'schen Widerstand ändern. Widerstandsthermometer können von WSN-Knoten an analogen Eingängen mit *Spannungs-*

*teiler*-Schaltungen verwendet werden. Die tatsächliche Messauflösung ist abhängig von der Auflösung des A/D-Wandlers und dem am Spannungsteiler abfallenden Spannungsunterschied zwischen oberer und unterer Grenztemperatur des Messbereichs. Mit Hilfe eines Operationsverstärkers kann die Messauflösung an die Eigenschaften des A/D Wandlers angepasst werden. Neben den analogen Widerstandsthermometer sind vollständige Sensoreinheiten verbreitet, die über eine serielle, digitale Schnittstelle an den WSN-Knoten angebunden werden können. Diese Temperatursensoren sind Widerstandsthermometer, die mit A/D-Wandler und einer seriellen Schnittstelle wie UART oder I<sup>2</sup>C ausgestattet sind.

Für die Ausstattung des WSN-Knotens fiel die Wahl auf ein analoges Widerstandsthermometer. Gemäß der Anforderungen soll Hardware zum Einsatz kommen, die weltweit preisgünstig verfügbar ist. Die Verwendung eines analogen Widerstandsthermometers erlaubt die Verwendung eines fast beliebigen Sensors mit geringfügigen Anpassungen der Software (Interpretation der Messwerte; Messdauer und -spannung). Der verwendete Sensor ist ein Platinthermometer mit einem Widerstand von 1 kΩ bei 0°C. Die Temperatur-Widerstandszuordnung, die Toleranz und das Ansprechverhalten sind in der Norm DIN EN 60751 festgelegt. Ein solcher Sensor vom Typ Pt-1000 ist schon für ca. 14 € zu beziehen. Für eine erste Erprobung wird der Sensor mit einem Spannungsteiler am A/D-Wandler gelesen, für präzisere Messungen kann ein Operationsverstärker dazwischengeschaltet werden.

## GPS-Sensoren

Das US-amerikanische *Global Positioning System* ist ein die Erde umfassendes Netz geostationärer Satelliten, deren ausgesandte Signale zur Positionsbestimmung genutzt werden. Gegenüber anderen Satellitengestützten Navigationssystemen sind GPS-Empfänger annähernd weltweit verfügbar. Der eingesetzte GPS-Empfänger sollte hinsichtlich Betriebs- und UART-Spannung auf den *Telos B* Knoten abgestimmt sein (verwendbar im Spannungsbereich zwischen 3,6 V und 2,7 V), so dass eine gemeinsame Spannungsversorgung möglich ist. Die Auswahl potentieller Chips ist durch preisliche Vorgaben und den vorgegebenen Arbeitsspannungsbereich stark eingeschränkt. Mit genau passendem Arbeitsspannungsbereich fanden wir nur den "GPS-Bee" des Herstellers *Seeedstudio*. Bei dem ca. 28 € teuren GPS-Modul handelt es sich um Zubehör für gängige Microcontrollerplattformen. Die Übermittlung der Positions- und Zeit-

<sup>1</sup>Projekt-Webseite, gesehen am 13. Mai 2014:

<http://tinyos.net/>

<sup>2</sup>Projekt-Webseite, gesehen am 13. Mai 2014:

<http://contiki-os.org/>

<sup>3</sup>Webseite von libelium, gesehen am 16. August 2014: <http://www.libelium.com/products/waspmote/>

<sup>4</sup>TelosB-Datenblatt, gesehen am 5. Mai 2014:

[http://www.willow.co.uk/TelosB\\_Datasheet.pdf](http://www.willow.co.uk/TelosB_Datasheet.pdf)

daten erfolgt nach dem NMEA-Protokoll (in der Version NMEA-0183). Der GPS Chip ist unter Beachtung der UART-Spannung gegen einen anderen GPS-Empfänger austauschbar, da der Datenfluss bei GPS-Empfängern durch das NMEA-Protokoll festgelegt ist.

### 3.2 Hardwareaufbau des Prototypen

Die in Abschnitt 3.1 ausgewählten Sensoren werden mit der Basisplattform verbunden: Das Widerstandsthermometer Pt-1000 wird in einer Spannungsteiler-Schaltung an den A/D-Wandler angebunden. Der GPS-Chip wird über die UART Schnittstelle, eine serielle Basisschnittstelle an die Komponenten des TelosB Knotens angeschlossen.

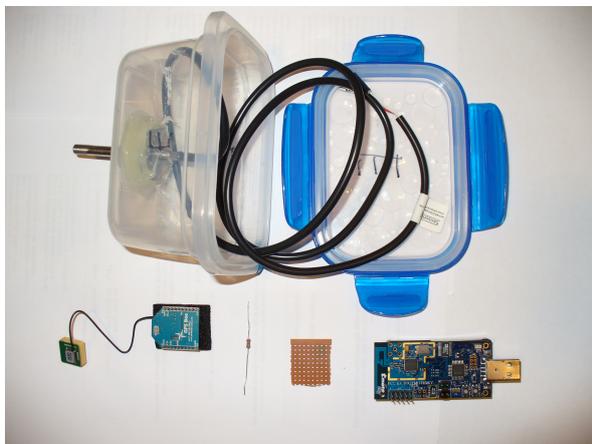


Abbildung 1: Der Prototyp in Einzelteilen

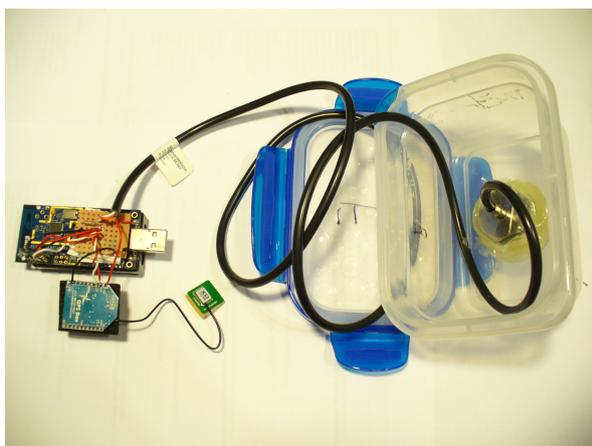


Abbildung 2: Fertiger Prototyp

Für die Betrachtung der Hardwarearchitektur ergibt sich für unseren nun ausgestatteten Sensorknoten das in Abbildung 3 dargestellte Bild.

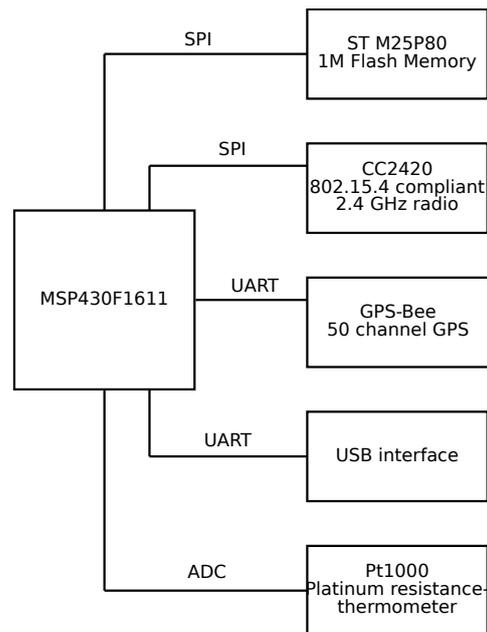


Abbildung 3: Hardwarearchitektur des Prototypen

Um die Wartbarkeit der WSN-Knoten zu verbessern, ist die externe Peripherie über eine kleine Platine angeschlossen. Auf der Platine werden die Pins der zehnpoligen Doppelstiftleiste auf dem Sensorknoten verteilt und ohne weitere zugempfindliche Steckverbindungen mit der Peripherie verbunden (siehe Abbildung 1 und 2).

Als Gehäuse wird eine handelsübliche Frischhaltebox mit Gummidichtung verwendet, die bei geringem Druck gegen die Dichtung ausreichenden Schutz vor Wasser bietet. Der Temperatursensor ist mit Silikon im Boden des Gehäuses eingesetzt. Die Position von Telos B und dem GPS-Sensor im Gehäuse kann mit Schaumstoff fixiert werden.

### 3.3 Softwareaufbau des Prototypen

Die auf den WSN-Knoten eingesetzte Software basiert auf dem Betriebssystem *TinyOS*. TinyOS erlaubt das ereignisbasierte Ausführen von Code und ermöglicht, Hardware, so lange gerade nicht auf sie zugegriffen wird, in energieeffiziente Schlafzustände zu versetzen. Der Umfang von Software für WSN-Knoten ist in diesem Fall schon durch die Hardware begrenzt. So stehen dem Prozessor des Telos B Knotens lediglich 48 kB Flash Speicher zur Speicherung von Programmen zur Verfügung, der mit 10 kB bemessene Arbeitsspeicher schränkt die Menge im Speicher vorgehaltener Datensätze ein. Durch diese Einschränkungen ist eine Beschränkung auf

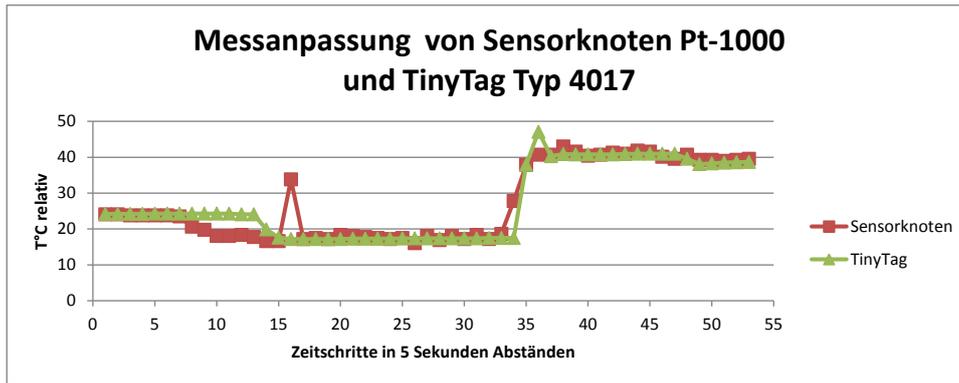


Abbildung 4: Vergleichsmessung/Messanpassung zwischen Sensorknoten-Prototypen und einem TinyTag Plus 2 Logger Typ 4017

die notwendigen Funktionalitäten geboten. Auf den Sensorknoten werden ausschließlich die Funktionalitäten implementiert, die nicht in der Nachbearbeitung der gesammelten Daten ausgeführt werden können. Für die Ausführung auf dem Sensorknoten verbleibende Aufgaben sind somit:

- Initialisierungsphase
  - Synchronisation Uhr mit einer Referenzuhr im WSN
  - Warten auf stabile Positionsbestimmung (GPS-Fix)
- Datenerhebung
  - Ausgelöst durch ein Timer-Ereignis (Intervall einstellbar)
  - Abfragen des am analogen Eingang angeschlossenen Temperatursensors
  - Zeitstempel
  - Letzte GPS Position
  - Speicherung des Datensatzes im persistenten Speicher bzw. Übermittlung via Funk
- Datenübermittlung
  - Übermittlung der Datensätze an eine Datenbank
  - Routing nach dem *Collection Tree Protocol (CTP)* [6]

Die Datenbank speichert die empfangenen Datensätze in einer Datenbank. Zur Darstellung dient eine browserbasierte Benutzeroberfläche, durch die die erhobenen Daten visualisiert werden. Die Benutzeroberfläche kann die rohen Sensorwerte mit zu den eingesetzten Sensoren passenden Temperaturfunktionen als Temperaturwerte darstellen.

## 4 Ergebnis

Anhand der im Vorfeld genannten Kriterien wurden Komponenten ausgewählt und ein Prototyp (siehe Kapitel 3) gebaut. Die Kosten der gesamten Konfiguration für einen Sensorknoten liegen etwa bei 117€. Die Energieversorgung kann mit handelsüblichen AA Batterien erfolgen. Der Prototyp wurde mit einem TinyTag Plus 2 Logger (Typ 4017 von Gemini) unter Laborbedingungen verglichen. Dabei wurden beide Geräte in ein Wasserbad gelegt und mit unterschiedlich temperierten Wassermengen geflutet. Das Diagramm 4 zeigt den Verlauf beider

	Sensorknoten	TinyTag 4017
Min °C	16,1	17,2
Max °C	43,0	47,1
Standardabw.	10,468	10,238
Mittelwert	27,325	27,182

Tabelle 2: Vergleichsmessung/Messanpassung im Labor zwischen Sensorknoten-Prototypen und einem TinyTag Plus 2 Logger Typ 4017. Siehe ebenfalls Abbildung 4

Temperaturkurven. Der Prototyp hat eine schnellere Ansprechzeit und feinere Auflösung als der TinyTag Plus 2 Logger. Der TinyTag Plus 2 Logger besitzt einen 10K NTC Thermistor und ist gegenüber dem Pt-1000 Sensor vom Prototyp ungenauer. Die Tabelle 2 und das Diagramm 4 veranschaulichen die Unterschiede. Die gemessenen Mittelwerte der Wassertemperatur während der gesamten Messung unterscheiden sich ca. um 0,14°C. Die gemessenen Minimum- und Maximumtemperaturen unterscheiden sich erheblich. Da kein amtlich geichtetes Ther-

momenter als Referenzmessgerät genutzt wurde sind die Abweichungen relativ zu bewerten. Für exakte Angaben über die Ansprechzeit und Genauigkeit der des Prototyps sind weitere Versuche notwendig.

Der Laborversuch hat gezeigt, dass der Rahmen für den potenziellen Einsatz in Fließgewässern gewährleistet ist. Anhand des Prototyps können zukünftige Konfigurationen zielgerichtet und anwendungsorientiert erfolgen. Die Erkenntnisse über Material-, Energie- und Zeitaufwand dienen zukünftigen Projekten als Basis. Das Zusammensetzen der Teile und die Überprüfung der Funktionsfähigkeit nimmt weniger als 1 Stunde Zeit in Anspruch. Die Vorbereitungszeit für den Einsatz und die Kalibrierung eines Sensorknoten betragen wenige Stunden.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Temperatur der Wasseroberfläche ist für gewässerökologische Untersuchungen, Wärmelastuntersuchungen und Gewässergüteuntersuchungen im gleichen Maße relevant. Daten über Strömung, Durchmischung, Verteilung von Temperatur und stofflichen Bestandteilen des Wasserkörpers bilden die Grundlage für Modelle, Simulationen und Prognosen (vgl. [7]). Je nach Untersuchungsfrage sind verschiedene Daten mit verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen notwendig. Deshalb werden im Bereich der Temperaturerhebung die Anwendungsbereiche der Wärmelastuntersuchung und die Gewässergüteuntersuchung unterschieden. Trotzdem sind ihre Erkenntnisse für eine Synthese und Kombination zur Lösung und Beantwortung ökosystemarer Problemstellungen notwendig. Damit zukünftige Untersuchungen aus interdisziplinären Fachgebieten näher zusammenrücken können sind die Unterschiede ihrer Ergebnisse anhand ihrer Methoden und technischen Umsetzung zu deuten. Für solche umfassenden Reflexionen ist die Repräsentativität der Daten in ihrem Anwendungsbereich zu beachten. Für die Kombination beider Anwendungsbereiche sind zusätzliche in situ-Messungen über den Querschnitt, im Längsverlauf und in die Tiefe des Fließgewässers notwendig. Diese Art der in situ-Messung erfordert den Einsatz von beweglichen Methoden.

In dieser Arbeit wird der strategische Einsatz von schwimmenden drahtlosen Sensorknoten als geeignete Übergangstechnologie für die Referenzierung von Fernerkundungsdaten vorgeschlagen und mittels Entwicklung eines geeigneten Prototypen untersucht. Der entwickelte Prototyp ist dazu in der Lage, gemäß den hier ausführlich diskutierten An-

forderungsspezifika, mindestens ein mal pro Sekunde die aktuelle Zeit, den aktuellen Standort per GPS<sup>5</sup>, sowie die zugehörige Wassertemperatur 10-15 cm unterhalb der Wasseroberfläche über einen Zeitraum von mehreren Stunden zu datieren. Die Stückkosten von 117 € erlauben die Produktion einer größeren Anzahl dieser Sensorknoten, um so die in dieser Arbeit skizzierte Lücke in der Messmethodik zu schließen. Mittels Zeit- und Ortsinformationen lassen sich zudem Rückschlüsse auf die hydrodynamischen Fließvorgänge eines Fließgewässers ziehen. Durch den Einsatz von kommerziellen und weltweit verfügbaren Hardwarekomponenten wird zudem die Reproduzierbarkeit gewährleistet.

Aus Perspektive des Forschungsgebiets drahtloser Sensornetze ergibt sich mit dieser Arbeit überdies ein neues, interdisziplinäres Anwendungs- und Forschungsfeld. Zwar existieren bereits Sensornetze zum Einsatz auf der Wasseroberfläche jedoch verfolgen diese Systeme andere Zielsetzungen, etwa stationäre Messungen [12, 14] oder es werden hochpreisige mobile Netzknoten [21] eingesetzt.

Aus dieser Arbeit ergeben sich weitere Forschungsfragen: Zunächst müssen mittels umfangreicher Feldversuche Daten erhoben werden, um auf dieser Grundlage eine Synthese von Temperaturerhebungen zu Wärmelastuntersuchung und Gewässergüteuntersuchung vornehmen zu können. Die Untersuchung der oberflächennahen Wasserbewegung eignet sich weiterhin als Datengrundlage zum Einsatz in hydrodynamischen Modellen wie QSim [19]. Diese Feldversuche dienen ebenfalls zur weiteren Erforschung von Eigenschaften der Kanalqualität drahtloser Kommunikation nahe der Wasseroberfläche. Letzteres kann zur Modellbildung wasseroberflächennaher Drahtloskommunikation verwendet werden.

## Literatur

- [1] Cristina Albaladejo, Pedro Sánchez, Andrés Iborra, Fulgencio Soto, Juan A. López, and Roque Torres. Wireless Sensor Networks for Oceanographic Monitoring: A Systematic Review. *Sensors*, 10:6948–6968, 2010.
- [2] Federico Baronti, Gabriele Fantechi, Roberto Roncella, and Roberto Saletti. Wireless Sensor Node for Surface Seawater Density Measurements. *Sensors*, 12:2954–2968, 2012.

<sup>5</sup>Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts wurde die Standorterfassung noch nicht getestet.

- [3] BfG. Referat M4 Projekt "Gewässertemperaturen" der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2014.
- [4] Diehl. Rheingütestation Worms Tätigkeitsbericht 2011, Arbeitsbericht Teil 1, 2012.
- [5] Katharina Fricke and Björn Baschek. Water surface temperature profiles for the Rhine River derived from Landsat {ETM+} data. volume 8887, pages 88870E—88870E–13, 2013.
- [6] Omprakash Gnawali, Rodrigo Fonseca, Kyle Jamieson, David Moss, and Philip Levis. Collection tree protocol. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems - SenSys '09*, page 1, 2009.
- [7] ICPR. Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development Extensive Version. Technical Report 214, International Commission for the Protection of the Rhine, Koblenz, 2014.
- [8] IKSR. Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011. Technical report, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz, 2011.
- [9] Peng Jiang, Hongbo Xia, Zhiye He, and Zhenming Wang. Design of a water environment monitoring system based on wireless sensor networks. *Sensors*, 9(8):6411–34, January 2009.
- [10] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, Chichester, 2005.
- [11] LAWA. Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser – Ausgearbeitet von der LAWA-Arbeitsgruppe – Wärmebelastung der Gewässer, 1991.
- [12] Kebin Liu, Yunhao Liu, Zheng Yang, Mo Li, Zhongwen Guo, Ying Guo, Feng Hong, Xiaohui Yang, Yuan He, and Yuan Feng. Ocean-sense. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 14(2):7, September 2010.
- [13] LUWG. *Gewässer-Untersuchungsstationen zur Überwachung der rheinland-pfälzischen Fließgewässer - Technische Stationsbeschreibung Stand 1998*. Mainz, August 1998.
- [14] Mingxing Jiang, Zhongwen Guo, Feng Hong, Yutao Ma, and Hanjiang Luo. OceanSense: A practical wireless sensor network on the surface of the sea. In *2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pages 1–5, March 2009.
- [15] B O’Flynn, Rafael Martinez-Catala, S. Harte, C. O’Mathuna, John Cleary, C. Slater, F. Regan, D. Diamond, and Heather Murphy. SmartCoast: A Wireless Sensor Network for Water Quality Monitoring. In *32nd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2007)*, pages 815–816. IEEE, October 2007.
- [16] Aravinda S. Rao, Stephen Marshall, Jayavardhana Gubbi, Marimuthu Palaniswami, Richard Sinnott, and Vincent Pettigrovat. Design of low-cost autonomous water quality monitoring system. In *2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, pages 14–19, August 2013.
- [17] Zulhani Rasin and Mohd Rizal Abdullah. Water Quality Monitoring System Using Zigbee Based Wireless Sensor Network. *International Journal of Engineering & Technology*, 9(10):14–18, 2009.
- [18] Frank Reichenbach, Matthias H, and Dirk Timmermann. Monitoring the Ocean Environment with Large-Area Wireless Sensor Networks. Technical report, Rostock University, Rostock.
- [19] Andreas Schöl and Volker Kirchesch. QSim – das Gewässergütemodell der BfG. Ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktondynamik in Flüssen. In: Hydro-ökologische Modellierungen und ihre Anwendungen. 1. Ökologisches Kolloquium am 14./15. Februar 2012 in Kob, 2012.
- [20] Ivan Stojmenovic. *Handbook of sensor networks. algorithms and architectures*. Wiley series on parallel and distributed computing. Wiley, Hoboken, 2005.
- [21] Andrew Tinka, Mohammad Rafiee, and Alexandre M. Bayen. Floating Sensor Network for River Studies. *IEEE System Journal*, 7, 2013.
- [22] Ji Wang, Xiao-li Ren, Yu-li Shen, and Shuangyin Liu. A Remote Wireless Sensor Networks

for Water Quality Monitoring. In *2010 International Conference on Innovative Computing and Communication and 2010 Asia-Pacific Conference on Information Technology and Ocean Engineering*, pages 7–12, 2010.

- [23] Watershed-Science-Inc. Airborne Thermal Infrared Remote Sensing Palouse River Basin, WA/ID. Technical report, 2006.
- [24] Watershed-Science-Inc. Airborne Thermal Infrared Remote Sensing Anchor River Basin, Alaska. Technical report, 2010.