

# Projekt FORTE – Endbericht

Offene skalierbare Daten für evidenzbasierte Entscheidungen im Wald der Zukunft



## Impressum

Projektnehmer:in: Universität Innsbruck

Institut für Informatik

Adresse: 6020 Innsbruck, Technikerstraße 21a

Projektleiter:in: Univ. Prof. Dr. Ruth Breu

Projektmitarbeiter:innen: Univ. Doz. Dr. Mag. Georg Wohlfahrt, Dr. Albin Hammerle, Alexandra Jäger MSc, Zoe Pfister BSc, Anurag Vats MSc, Marie Schröder MSc, Adrian Kronenberg BSc, Bilal Hassan, Moritz Perschke

Tel.: 0512/507 - 53200

E-Mail: [ruth.breu@uibk.ac.at](mailto:ruth.breu@uibk.ac.at)

Kooperationspartner:in: Amt der Tiroler Landesregierung/Gruppe Forst

Finanzierungsstelle(n): Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft

Projektlaufzeit: 1.1.2022 – 31.12.2023

1. Auflage



Wien, 2022. Stand: 11. März 2024

## **Inhalt**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Impressum.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Inhalt.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1 Projektzielsetzung und Zusammenfassung 2. Projektjahr .....</b> | <b>4</b>  |
| <b>2 Projektergebnisse.....</b>                                      | <b>8</b>  |
| 2.1 Anforderungen an das System.....                                 | 8         |
| 2.2 Station.....   | 9         |
| 2.2.1 Zentraler Mast .....   | 10        |
| 2.2.2 Satelliten .....   | 15        |
| 2.2.3 Auswahl der Sensoren und aktuelle Sensorkonfiguration .....    | 18        |
| 2.2.4 Kosten der Station .....                                       | 20        |
| 2.3 Dateninfrastruktur .....   | 20        |
| 2.3.1 Sensorkonfiguration und Datenvalidierung.....                  | 21        |
| 2.3.2 Dashboard.....   | 23        |
| 2.4 Evaluierung .....  | 26        |
| 2.4.1 Labor- und Feldtests zur Sensorauswahl .....                   | 26        |
| 2.4.2 Feldversuch der gesamten Mess-Station .....                    | 33        |
| 2.4.3 Vergleichsmessungen der Station Kaserstatt .....               | 35        |
| <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>                             | <b>39</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                      | <b>41</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                                    | <b>42</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                    | <b>45</b> |
| <b>Abkürzungen.....</b>  | <b>46</b> |

# 1 Projektzielsetzung und Zusammenfassung 2. Projektjahr

Übergeordnetes Ziel des Projektes FORTE war es, angesichts des voranschreitenden Klimawandels die Basis für evidenzbasierte Entscheidungen in der Forstwirtschaft zu legen. Dazu wurde eine adaptierbare, kostengünstige Mess-Station für das Waldmonitoring, zusammen mit der notwendigen Netzwerk-, Daten- und Analyseinfrastruktur entwickelt. Die erhobenen Messgrößen inkludieren Schlüsselprozesse im Kohlenstoff- und Wasserkreislauf des Waldes, als auch die für deren Interpretation notwendigen Hilfsgrößen (in der Regel abiotische Umweltfaktoren). Die erhobenen Daten werden kontinuierlich an einen zentralen Server übertragen, unterlaufen eine Qualitätskontrolle und sind frei verfügbar. Aus den ursprünglichen Messgrößen werden mittels ökophysiologischer Modelle abgeleitete Parameter berechnet, die eindeutige Information über die Funktionalität und Vitalität der untersuchten Bäume geben. Das entwickelte System wurde in einer Pilotanwendung demonstriert und aus Sicht von Forstpraktikern und Ökologie-Forscher:innen evaluiert.

Am Ende des 2. Projektjahres, was dem Ende dieses Projekts entspricht, sind die im Antrag beschriebenen Ergebnisse vollständig erreicht worden:

- Es wurde eine Mess-Station zu Baumwachstum und Waldmikroklima Messung entwickelt, die den Ansprüchen aus der Forschung und Praxis bezüglich Preis, Präzision, Erweiterbarkeit, Energieeffizienz und Benutzungsfreundlichkeit erfüllt.
- Es wurde eine dazu abgestimmte Dateninfrastruktur entwickelt. Diese besteht einerseits aus einem Backend, welches die Daten der Mess-Station entgegennimmt, validiert und speichert, und einem Dashboard, welches die Abbildung der Stationskonfiguration ermöglicht, erhaltene Daten visualisiert und in auf Benutzerrollen zugeschnittenen Auswertungen aufbereitet. Das Backend stellt zusätzlich eine API (Application Programming Interface) zur Verfügung, mit dem es möglich ist, die Daten auch von außerhalb des Systems automatisiert abzurufen und weiter zu verarbeiten.

- Es wurden ökologischen Analysen basierend auf den gemessenen Sensorwerten definiert.

In Zusammenarbeit mit Praktikern aus der Gruppe Forst des Landes Tirol wurde das Baumwachstum und dessen steuernden Umweltparameter als die zentrale Fragestellung definiert, welche mittels der entwickelten Station beantwortet werden sollte.

Das Baumwachstum (Dickenwachstum) wird dabei mittels Bändendrometern gemessen, welche Veränderungen des Stammdurchmessers auf stündlicher Zeitbasis erfassen können. Damit kann mittel- und längerfristig das Dickenwachstum der Bäume, ein aus forstlicher Sicht sehr relevanter Parameter, bestimmt werden, kurzfristig können Veränderungen im Stammwassergehalt und damit im Wasserhaushalt der Bäume beobachtet werden. Diese Sensoren werden an den sogenannten Satelliten der Mess-Station eingesetzt, um einen räumlich flexiblen Einsatz im Gelände und eine breite Abdeckung der Individuen zu ermöglichen.

Als wachstumssteuernde Umweltparameter zur Interpretation der Stammdurchmesseränderungen werden die Wasserverfügbarkeit (Niederschlag und Bodenfeuchte), die verfügbare Sonnenenergie (Sonneneinstrahlung), die Lufttemperatur und -feuchte (daraus resultierend das Dampfdruckdefizit der Luft) definiert. Zusätzlich werden Bildaufnahmen ermöglicht um die Bedingungen vor Ort (z.B. Schneebedeckung, phänologische Entwicklung) festhalten zu können und Bildindices (z.B. GCC – green chromatic coordinates) zu berechnen.

Forstwirtschaftliche Anwendungsszenarien für eine Station in der vorgestellten Konfiguration sind das kontinuierliche Monitoring des Baumwachstums zur künftigen Ertragsabschätzung und die Früherkennung ertragsmindernder Gegebenheiten, insbesondere mit Blick auf klimawandelbedingte Verschiebungen der optimalen Wachstumsregionen verschiedener Baumarten. Weiters wird eine dieser Stationen bereits in einer Versuchsaufforstung dazu eingesetzt das Baumwachstum verschiedener Arten zu vergleichen und so zukunftstaugliche Baumarten zu identifizieren und zu beobachten.

Anwendungsszenarien in der Forschung bestehen im Monitoring, in der Grundlagenforschung zum Thema Baumphysiologie und Einfluss des Mikroklimas auf das Baumwachstum (z.B. in Manipulationsexperimenten), sowie als Zusatzmessungen bei der Anwendung weiterer Messmethoden.

Sowohl die Mess-Station als auch die Dateninfrastruktur wurden im 2. Projektjahr in umfangreichen Feldstudien getestet, evaluiert und bezugnehmend auf das Feedback noch weiter verbessert. Die Tests der Mess-Station-Demonstratoren im Feld fanden in Neustift im Stubaital statt. Es wurden in Absprache mit der Landesforstdirektion Tirol, der Gemeinde und den dort zuständigen Waldaufsehern drei Stationen entlang eines Höhengradienten ausgebracht:

1. Station „Bichelesbergl“, in Nähe der Gemeinde, auf ca. 1000HM. Ausbringung am 18.07.2023
2. Station „Mahderberg“, im Wald auf ca. 1500HM. Ausbringung am 04.07.2023
3. Station „Kaserstatt“, nahe der Kaserstatt Alm, auf ca. 2000HM. Ausbringung am 14.07.2023

Über den Zeitraum der Feldtests wurden die Stationen kontinuierlich überwacht und, wenn nötig, angepasst. Dies hat zu einer weiteren Verbesserung der Stabilität, Energieeffizienz und Benutzerfreundlichkeit des Systems geführt.

Die Feldtests wurden am 10.10.2023 beendet und die Stationen abgebaut. Grund dafür waren die im Winter schwer zugänglichen Ausbringungsorte. Um jedoch weitere Tests der Stationen vornehmen und die Auswirkungen des Winters auf die Leistung feststellen zu können, wurde eine Station bereits wieder auf einer Versuchsfläche des Projektpartners Gruppe Forst Landesregierung am Rechenhof in Rum ausgebracht und wird bis auf weiteres dort verweilen und kontinuierlich sowohl Sensor- als auch Betriebsdaten liefern.

Parallel zur Weiterentwicklung der Mess-Station wurde die benötigte Dateninfrastruktur umgesetzt. Auf Seite des Backends wurden umfangreiche, konfigurierbare Validierungsregeln, sogenannte „Sanity Checks“, entwickelt. Diese ermöglichen es, erhaltene Sensordaten zu prüfen und, im Fall von entdeckten Abweichungen, die Daten entsprechend zu kennzeichnen. Zusätzlich dazu werden für die Station verantwortliche Personen über das ungewöhnliche Verhalten per E-Mail informiert und sind so in der Lage zeitnah zu reagieren.

Der Fokus des Dashboards liegt auf der Bereitstellung von auf Benutzerrollen zugeschnittenen Visualisierungen. Diese lassen sich grob in eine Tageszusammenfassungsansicht und eine Expertenansicht gliedern. Zusätzlich ermöglicht das Dashboard den Download der Daten, die Abbildung der Mess-Stationenkonfiguration sowie das Benutzer- und Rollenmanagement.

Ein Alleinstellungsmerkmal der entwickelten Mess-Station ist der Fokus auf Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit. Zentral ist hier die getroffene Architekturentscheidung zur Trennung der Station in einen zentralen Masten und in räumlich hochgradig unabhängige, Satelliten. Da aktuell bis zu 10 Satelliten von einem zentralen Masten verwaltet werden können, ist es möglich, wesentlich größere Areale mit nur einem Bruchteil der Kosten, die für eine vollständige Mess-Station notwendig wären, abzudecken. Die Flexibilität der Mess-Station, die aktuelle Sensorkonfiguration auszutauschen und zu erweitern, eröffnet vielfältige Anwendungsszenarien, darunter nicht nur die aktuelle Mikroklimaüberwachung im Wald, sondern auch potenzielle Einsätze in der Landwirtschaft oder die Bereitstellung relevanter Daten zur Prognose der Borkenkäferausbreitung.

Die Mess-Station wird durch die zusätzlich entwickelte Dateninfrastruktur optimal ergänzt. Die umfangreichen, konfigurierbaren Validierungsregeln gewährleisten eine hohe Datenqualität. Die gespeicherten und validierten Daten werden dann in auf Benutzergruppen zugeschnittenen Ansichten aufbereitet und den jeweiligen Nutzern zur Verfügung gestellt. Großer Wert wurde auf die Benutzerfreundlichkeit des Systems gelegt.

Zusätzlich zu den Projektergebnissen wurden, beziehungsweise werden, zwei Masterarbeiten basierend auf Themen des Projektes verfasst. Eine bereits abgeschlossene Arbeit von Anurag Vats, MSc mit dem Titel „Requirements Based Data Sanitation of Sensor Systems for Environmental Measurements“ und eine noch abzuschließende Arbeit von Zoe Pfister, BSc mit dem Titel „Concepts and Implementation of a Wireless Sensor Network for Forest Environment Monitoring“.

## 2 Projektergebnisse

Das FORTE-Projekt war eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Informatik und dem Institut für Ökologie, mit der Abteilung Forst der Tiroler Landesregierung als assoziiertem Partner. Das Projekt wurde nach den Prinzipien agiler Systementwicklung durchgeführt. Dies bedeutet in diesem Kontext insbesondere, dass alle Planungen an der Zielgruppe ausgerichtet sind und das Gesamtsystem in Iterationen entwickelt wurde, die qualitätsgesichert und evaluiert werden. Im Folgenden werden die Projektergebnisse im Detail beschrieben: von den generellen Anforderungen des Systems über die Mess-Station und die Dateninfrastruktur bis hin zur Evaluierung.

### 2.1 Anforderungen an das System

Die bereits im Projektantrag formulierten Anforderungen an das System wurden im Projektverlauf wie unten zusammengefasst konkretisiert und vollständig umgesetzt:

- **Datenqualität und Integrität:** Das System validiert jeden eingehenden Datenpunkt auf Korrektheit, um bestmögliche Datenqualität zu erreichen. Weiter werden sämtliche Rohdaten gesichert, um die Integrität zu gewährleisten.
- **Energieeffizienz:** Das System kann über lange Zeit ohne direkten Stromzugang betrieben werden.
- **Kosten:** Die Kosten der Einzelkomponenten müssen möglichst niedrig gehalten werden (zwischen 4.000 und 6.000 Euro), damit in Zukunft eine Skalierung in Betracht gezogen werden kann.
- **Open Source:** Die Software des Systems, die selbst entwickelte Hardware (eigens entwickelte Leiterplatten und die Stationshardware) und Dokumentation sind frei zugänglich, um weitere Forschung, Weiterentwicklung und Verwendung des Systems zu vereinfachen.
- **Verwendbarkeit für unterschiedliche Zielgruppen:** Das System präsentiert die gesammelten Daten zielgruppengerecht, etwa eine leicht verständliche Ansicht für Tageswerte für reguläre Nutzer:innen (z.B. Waldaufseher:innen) und anpassbare Zeitreihengraphen und Downloadfunktionen für Expert:innen (z.B. Forschung).



- **Konfigurierbarkeit:** Das System ist weitgehend konfigurierbar. Das beinhaltet das Erstellen neuer Stationen und Sensoren sowie Bearbeitung von Validierungsparametern.
- **Erweiterbarkeit:** Das System ist für zukünftige Zwecke erweiterbar. Das heißt, sowohl Soft- als auch Hardware müssen das einfache Hinzufügen von Sensoren, oder den Austausch von Technologien (Datenvisualisierungen, Übertragungstechnik) ermöglichen.

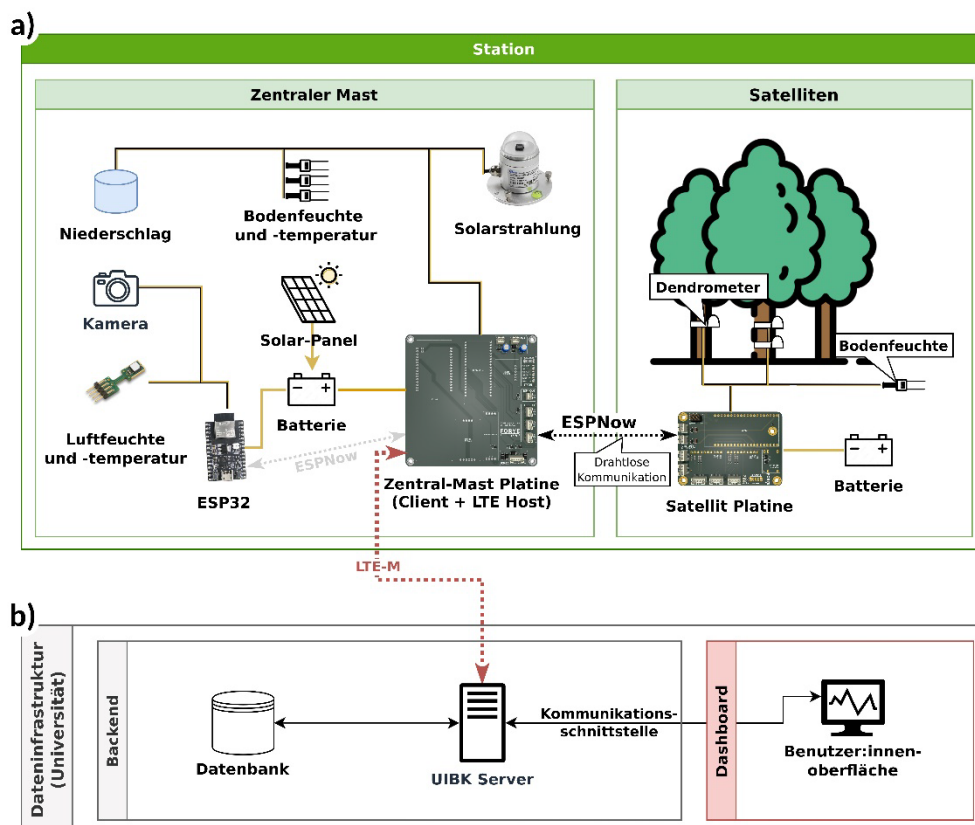
## 2.2 Station

Wie im Projektplan vorgesehen wurde eine Sensorstation entwickelt, die Ansprüche aus Forschung und Praxis bezüglich Anschaffungskosten, Präzision, Erweiterbarkeit, Energieeffizienz und Benutzungsfreundlichkeit erfüllt. Die Sensorstation in ihrer aktuellen Konfiguration wurde für den Betrieb im Wald konzipiert. Sie besteht grundsätzlich aus zwei Komponenten, dem **Zentralen Mast (ZM)** und einem oder mehreren **Satelliten**. Die Komponenten der Mess-Station sind schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die Entscheidung zu dieser Systemarchitektur ermöglicht maximale örtliche Flexibilität der Messungen, in dem die beiden Komponenten örtlich größtenteils unabhängig voneinander platziert werden können.

## 2.2.1 Zentraler Mast

Der zentrale Mast ist das Herzstück der Mess-Station. Abbildung 2 zeigt ein Foto des ZMs, aufgenommen bei der Ausbringung der Stationen für den Feldtest. Die Hauptaufgabe des ZM besteht darin, sämtliche Sensordaten aller der Station zugewiesenen Satelliten zu empfangen, auf eine SD-Karte zu sichern und letztlich mittels LTE-M an das Server-Backend zu übertragen. Gemessene Daten werden aus Energieeffizienzgründen aktuell alle 30 Minuten versendet, diese Zeitspanne ist aber grundsätzlich anpassbar.

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Systems. In a) wird die Station im Wald abgebildet, in b) die zentrale Dateninfrastruktur (derzeit an der Universität).



Sollte es aufgrund von LTE-M-Netzproblemen einmal nicht möglich sein, die Daten zu senden, werden diese auf der SD-Karte behalten und erneut an das Server-Backend verschickt, sobald wieder eine Verbindung hergestellt werden kann. Am Anfang des Projektes wurde neben LTE-M auch LoRaWAN als Übertragungstechnologie in Betracht gezogen. Aufgrund

des höheren Datendursatzes<sup>1</sup> und einfacherer Einbindung in die Dateninfrastruktur fiel die Entscheidung für LTE-M. In Zukunft wäre eine Einbindung von LoRaWAN zumindest bei der Kommunikation zwischen ZM und Satelliten erwägenswert, um die Funkreichweite der Satelliten zu erhöhen. Aktuell wird für die drahtlose Kommunikation zwischen ZM und Satelliten das WiFi-ähnliche ESPNow Protokoll verwendet. Dieses Protokoll erlaubt energieeffiziente Langstreckenkommunikation mit bis zu 20 ESP32 Mikrokontrollern. Da der ZM für die Zeitsynchronisation innerhalb des Netzwerks verantwortlich ist, wurde dieser mit einer Echtzeituhr (Real Time Clock – RTC) ausgestattet, um die Systemzeit und damit auch die Zeitstempel der Messdaten über einen Neustart oder eine längere Offline-Phase aktuell zu halten. Das Innenleben des ZM (die sogenannte LoggerBox) ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 2: Foto eines Zentralen Masts aufgebaut im Rahmen eines Feldtests bei Mahderberg in Neustift.



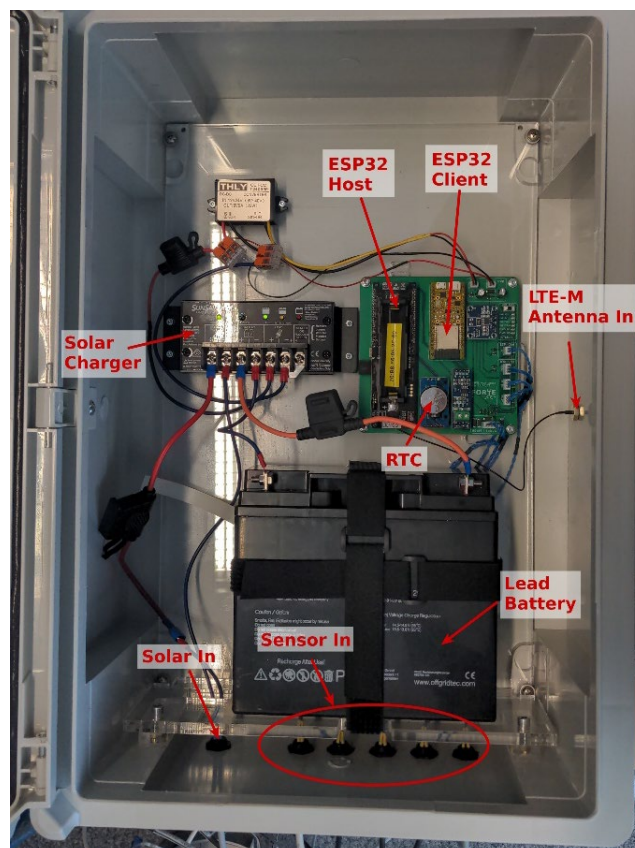
---

<sup>1</sup> Die Menge an Daten, die pro Zeiteinheit übertragen werden kann.

Zusätzlich dazu werden am ZM diverse Messungen vorgenommen: Niederschlag, Solarstrahlung, Lufttemperatur und -feuchte sowie Bodentemperatur und -feuchte in 3 verschiedenen, frei wählbaren Tiefenstufen. Eine kleine Kamera nimmt außerdem periodisch Fotos der Umgebung auf.

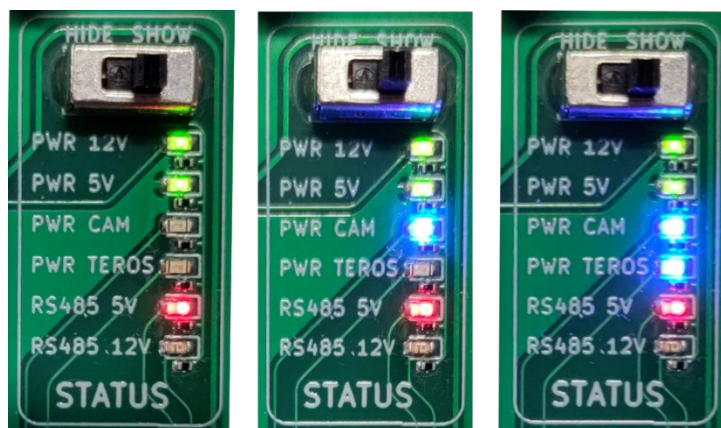
Die Stromversorgung für den ZM liefert ein Bleiakku, der über ein 12V Solarpanel kontinuierlich aufgeladen wird und somit den unterbrechungsfreien Betrieb sicherstellt. Ein vollgeladener Akku kann die Station ohne Sonneneinstrahlung für ca. eine Woche mit Strom versorgen. Die Energieeffizienz am ZM wurde verbessert, indem die Stromversorgung zu Sensoren und deren Kommunikationsschnittstellen unterbrochen wird, wenn keine Messung stattfindet. Lediglich die Stromversorgung für die Niederschlagsmessung muss erhalten werden, damit dessen Werte zwischen den Messungen nicht verloren gehen.

Abbildung 3: Darstellung der LoggerBox am Zentralen Mast. Rechts oben befindet sich die Leiterplatte mit den Host und Client Mikrokontrollern sowie der Echtzeituhr (RTC). Die LTE-M Antenne verläuft zum Host, um eine Verbindung zum LTE-M Netz zu ermöglichen. Auf der Unterseite sieht man den Bleiakкумуляtor (Lead Battery), der die LoggerBox mit Strom versorgt und die eingehenden Steckerverbindungen zu den Sensoren und dem Solarpanel. Links mittig befindet sich das Solarlademodul.



Um die Benutzerfreundlichkeit beim Aufbau des ZM zu gewährleisten, wurden zahlreiche Faktoren beachtet. Die Basis der Station bildet eine eigens entworfene Nivellierplattform (Nivellier Nacho), die mittels Stahlstäben im Boden verankert wird. Der Nivellier Nacho ermöglicht nach der Verankerung ein einfaches Ebenen der Plattform vor dem Aufsetzen der Traverse. Weiter wurden die Sensorverbindungen so konzeptioniert, dass Sensoren nur an ihren korrekten Steckplätzen angebracht werden können. Damit wird verhindert, dass zum Beispiel ein Lufttemperatursensor an die Schnittstelle für Niederschlag angeschlossen wird. Das wird ermöglicht, indem jeder Sensortyp mit einem Stecker mit einer festgelegten Polarität<sup>2</sup> ausgestattet ist. Um die Wartung der Station benutzerfreundlicher zu gestalten, wurden Status-LEDs verbaut, die bei Bedarf eingeschaltet werden können. Diese geben Auskunft über die anliegenden Spannungsversorgungen (5V und 12V) sowie den aktuellen Stromfluss zu Sensoren und deren Kommunikationsschnittstellen. Beispiele der Status LEDs sind in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Die Status LEDs beim ZM in verschiedenen Zuständen. Zunächst (links) liegt die Spannung für 12V und 5V Leitungen an. Die 5V Leitung für den Niederschlagssensor (RS485 5V) liegt ebenso an. Im mittleren Bild wurde die Kamera (CAM) aktiviert. Beim rechten Bild liegt dann auch Spannung für die Bodenfeuchte und -temperatursensoren (TEROS) an.



---

<sup>2</sup> Zum Beispiel 5-Polig für Niederschlag und Solarstrahlung oder 3-Polig für Bodenfeuchte und -temperatur.



Der ZM selbst besteht aus mehreren Einzelkomponenten, um sowohl Sensordaten auszulesen als auch die gesammelten Daten zu speichern und an die Dateninfrastruktur weiterzuleiten:

- **Host:** Ein ESP32 Mikrokontroller mit integriertem LTE-M Modem, ESPNow-Funktionalität, einer SD-Karte und einer verbundenen Echtzeituhr. WiFi-Funktionalität wird benötigt, um Daten von Satelliten zu empfangen. Die SD-Karte dient zur Sicherung der eingehenden Daten. Aktuell ist der Host dauerhaft im Betrieb, um Daten von Satelliten zu erhalten, was sich negativ auf den Stromverbrauch auswirkt. In Zukunft könnte ein Scheduling-Algorithmus entworfen werden, um das Empfängermodul für längere Perioden auszuschalten und somit Strom zu sparen. Eine schematische Ansicht des Hosts ist in Abbildung 5 zu sehen.
- **Client:** Ein ESP32 Mikrokontroller, der für das Auslesen von Sensoren über diverse Kommunikationsschnittstellen und Protokolle zuständig ist. Gesammelte Daten werden dann mittels ESPNow an den Host übertragen. Eine schematische Ansicht eines Clients ist in Abbildung 6 zu sehen.
- **ESP32-CAM:** Die ESP32-CAM ist ein Client mit einer integrierten Kamera, die periodisch Bilder aufnimmt.
- **RS485-Node:** Eine eigens für das System erstellte Platine, die einfachen Zusammenschluss von Sensoren, die das RS485 Protokoll verwenden, ermöglicht.
- **Stromversorgung:** Die Stromversorgung beinhaltet einen Bleiakkumulator sowie ein Modul, das das Aufladen des Akkus mittels Solarpanel erlaubt (SolarSaver). Bei ausreichender Sonneneinstrahlung ist ein dauerhafter Betrieb gewährleistet.
- **Zentralmastplatine:** Eine für den ZM entwickelte Leiterplatte, die alle oben genannten Komponenten miteinander verbindet.

Der Code, der auf den Mikrocontrollern von Host und Clients läuft, wurde in C++ geschrieben. Zur Unterstützung der hardwarenahen Programmierung wurde die Programmierumgebung PlatformIO<sup>3</sup> verwendet. High-level Zugriff auf Systemfunktionen des Mikrocontrollers ermöglichte das Arduino Framework<sup>4</sup>. Kommunikation zwischen den Mikrocontrollern und Sensoren benötigt sogenannte Kommunikationsprotokolle. Zum Zeitpunkt dieses Endberichts erlaubt die Software eine Verbindung zu Sensoren mit den Protokollen RS485, I<sup>2</sup>C, SDI-12, Analogkommunikation und 1-Wire. Weitere Protokolle können entwickelt und ins System eingebunden werden.

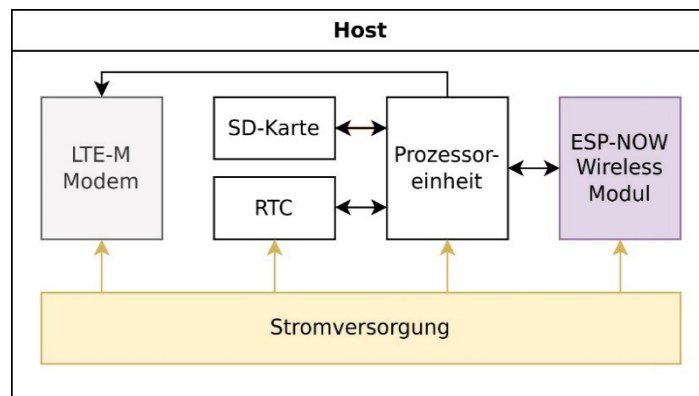
---

<sup>3</sup> <https://platformio.org/>

<sup>4</sup> <https://www.arduino.cc/>

Der ZM erstellt von allen eingehenden Daten eine Sicherung auf einer SD-Karte, bevor sie an die Dateninfrastruktur weitergeleitet werden. Damit wird sichergestellt, dass selbst bei Ausfall der LTE-Verbindung die Daten nicht verloren gehen. Wie bereits erwähnt werden im Falle eines temporären Internetausfalls nicht-gesendete Daten am nächstbesten Zeitpunkt wiederholt übertragen. Um Fehler besser nachvollziehen zu können, wird am ZM auch intensives Logging verwendet. Sämtliche Verbindungsversuche, Datensicherungen und allgemeine Fehlermeldungen werden auf der SD-Karte gesichert. Später können diese Logs ausgelesen werden, um die Station zu verbessern. Der Code wurde so aufgebaut, dass das Hinzufügen weiterer Sensoren ohne großen Mehraufwand möglich ist. Im Wesentlichen erfordert die Erstellung eines neuen Sensors die Implementierung des Interface *ForteSensor*. Danach kann der neue Sensor mittels der benötigten Hardwareverbindung ausgelesen und dann mit ESPNow an den ZM übertragen werden. Je nachdem, welche Sensoren für eine Station erforderlich sind, müssen Anpassungen an der Leiterplatte vorgenommen werden, da verschiedene Sensoren unterschiedliche Kommunikationsprotokolle und damit auch unterschiedliche Hardware verwenden.

Abbildung 5: Detailansicht der Host-Komponente des ZM. Die Stromversorgung liefert Strom an die einzelnen Subkomponenten. Die Proessoreinheit ist für die Kommunikation zwischen den einzelnen Subkomponenten zuständig.

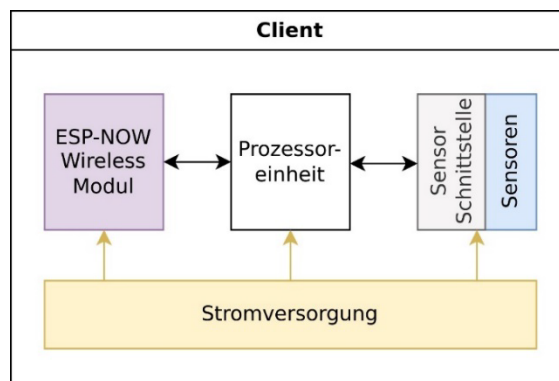


### 2.2.2 Satelliten

Um maximale örtliche Flexibilität bei den Messungen zu ermöglichen, kann der zentrale Mast um bis zu zehn Satelliten erweitert werden. Diese sind kabellos mit dem ZM verbunden, und konnten während der Feldtests mehr als 50m entfernt durch dichten Wald und

starke Steigung platziert werden, ohne die Verbindung zum ZM zu verlieren. Ein Satellit besteht im Wesentlichen aus einem Client (siehe Abbildung 6), der Stromversorgung und den angeschlossenen Sensoren.

Abbildung 6: Detailansicht der Client-Komponente. Die Stromversorgung liefert Strom an die einzelnen Subkomponenten. Die Prozessoreinheit ist für die Kommunikation zwischen den einzelnen Subkomponenten zuständig. Kommunikation zu den Sensoren wird über Sensorprotokolle realisiert (z.B.: SDI-12, RS485, I<sup>2</sup>C, etc.).



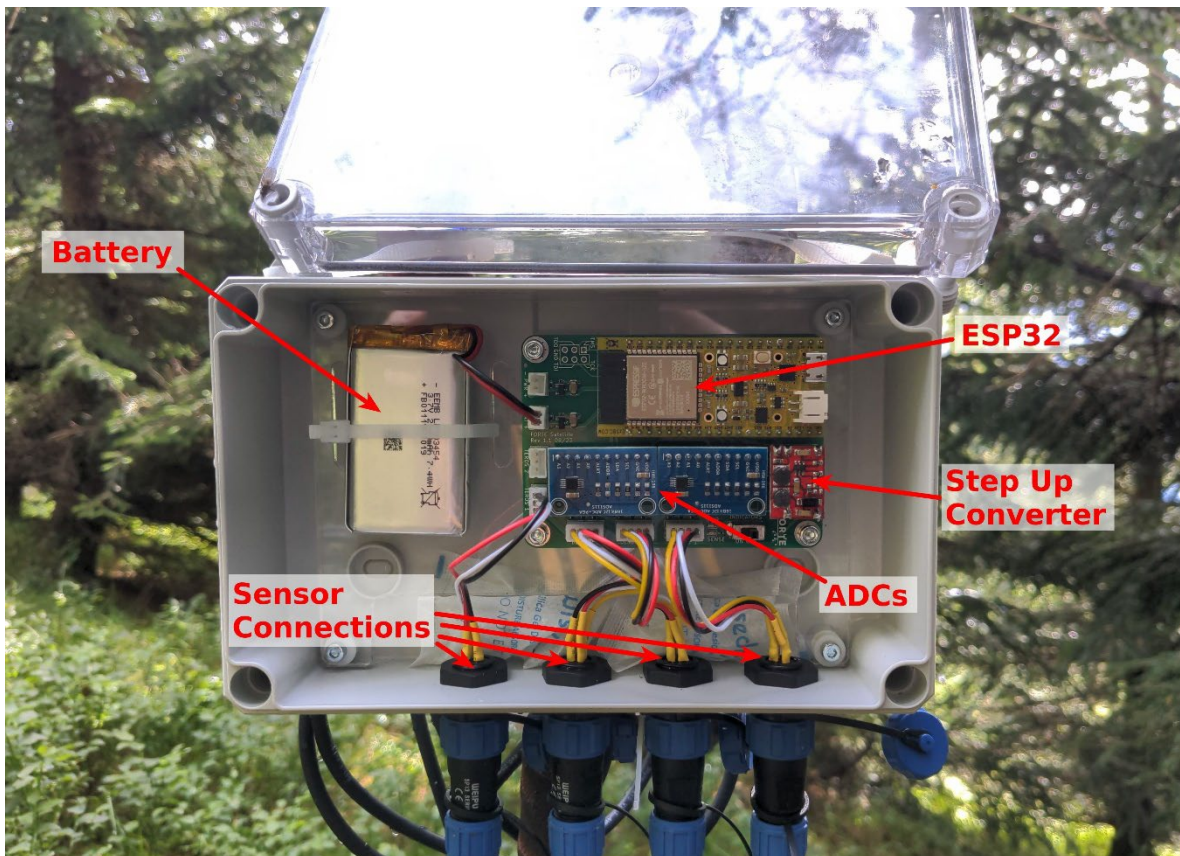
Die aktuell für den Feldtest erstellten Satelliten ermöglichen das Messen von Bodenfeuchte und Baumumfangveränderungen via Banddendrometer. Durch Anpassen der Platine und Software ist jedoch problemlos der Einsatz anderer Sensoren möglich, abhängig vom konkreten Anwendungsfall der Mess-Station. Die aktuell erstellten Satelliten lesen angeschlossene Sensoren in einer Frequenz von 30 Minuten aus und senden daraufhin die Daten an den ZM. Dieses Intervall kann auf Kosten der Energieeffizienz beliebig ( $\geq 1$  Minute) angepasst werden. Abbildung 7 zeigt ein Foto eines Satelliten, aufgenommen bei der Ausbringung der Stationen für den Feldtest.

Ein Satellit wird mittels eines 2000mAh Akkus mit Strom versorgt. Entsprechend unseren Testergebnissen ist mit der aktuellen Konfiguration damit eine Laufzeit von über zwei Jahren (ohne aufzuladen) realistisch. Dies wird vor allem durch den Schlafmodus des Mikrokontrollers ermöglicht. Der Mikrokontroller wacht lediglich auf, um Sensoren auszulesen und deren Daten an den ZM zu senden. Um weiter Strom zu sparen, werden die Sensorschnittstellen nur dann aktiviert, wenn sie benötigt werden. Der durchschnittliche Stromverbrauch eines Satelliten konnte über die Projektzeit auf  $26\mu\text{A}$  reduziert werden (bei einem Ausleseintervall von 30 Minuten). Für den Fall, dass längere Laufzeiten für einen Anwendungsfall notwendig sind, wurde die Möglichkeit bedacht, Satelliten mit kleinen Solar-



panelen auszustatten. Aktuelle Satelliten beinhalten für diesen Zweck bereits einen Steckplatz für ein 5V Solarpanel. Die Effektivität dieser Methode muss allerdings erst getestet werden.

Abbildung 7: Ein im Feldtest ausgebrachter Satellit. Links sieht man den Akku (Battery), der den Satelliten mit Strom versorgt. Rechts oben den ESP32 Mikrokontroller, der für die Logik für das Auslesen der Sensoren und das Versenden der Daten an den ZM zuständig ist. Die als „Step Up Converter“ und „ADCs“ betitelten Komponenten dienen als Schnittstelle zwischen Mikrokontroller und den einzelnen Sensoren, die auf der Unterseite des Satelliten angeschlossen sind.



Genau wie beim ZM verwendet auch der Satellit verschieden-polige Steckerverbindungen, um das Verbinden von Sensoren zu erleichtern. Für die einfache Wartung des Satelliten wurden außerdem noch Status LEDs angebracht, die bei Bedarf anzeigen, ob Strom fließt und wann Sensoren ausgelesen werden. Eine Besonderheit der Satelliten-Leiterplatte bildet die JTAG-Debugging Schnittstelle. Inklusion der Schnittstelle auf der Leiterplatte selbst ermöglicht Fehlerüberprüfung des Codes des Mikrokontrollers ohne langwierige Verbindungen über Steckverbindungen und Breadboards. Wie schon in Kapitel 2.2.1 erwähnt, ist der Code leicht anpassbar, um verschiedene existierende oder neue Sensoren auszulesen. Je

nach Sensorkonfiguration sind Änderungen an der Leiterplatte oder dem Platinengehäuse notwendig, um bestmögliche Integration zu gewährleisten. Im Kontrast zum ZM enthalten Satelliten keine SD-Karte und erstellen somit kein Backup vor Versenden der Daten an den ZM. In zukünftigen Versionen könnte solch eine Funktion noch eingebaut werden.

### 2.2.3 Auswahl der Sensoren und aktuelle Sensorkonfiguration

Die Auswahl der Sensoren für das Messsystem war ein zentraler Fokus des ersten Projektjahres, und wurde in mehreren Iterationen aus Recherche, Labor- und Feldtests durchgeführt. Als Kostenrahmen für die gesamte Station wurde ein Bereich zwischen 4.000 und 6.000 EUR definiert, wobei ein Großteil auf die Sensoren entfällt.

Die für die Standard-Mess-Station relevanten Sensortypen wurden wie folgt in Absprache mit allen Projektpartnern festgelegt:

- Lufttemperatur- und feuchte
- Bodentemperatur- und feuchte
- Niederschlag
- Solarstrahlung
- Dendrometrische Messgrößen (Baumumfangsänderung)
- Kamera

Für jeden dieser Sensortypen wurde eine umfangreiche Onlinerecherche durchgeführt. Ein Auszug dieser Recherche für den Sensortyp „Bodenfeuchte“ ist in Abbildung 8 zu sehen.

Abbildung 8: Ausschnitt der Recherche und Evaluierung der Bodenfeuchtesensoren.

|    | A                   | B                         | C           | D                              | E   | F               | G   | H  | I            | J  | K   |
|----|---------------------|---------------------------|-------------|--------------------------------|---|-----------------|---|--|--------------|--|---|
|    | VWC (soil moisture) | Link to specsheet/website | Operating T | Range                          | accuracy                                  | precision       | output  | Power reqs   | price        | notes  | interesting links, etc  |
| 48 | TEROS 10            | Website                   | -40 to 60   | 0 to -64-70%                   | ±1-2%                                     |                 | 1-2.5 V (analog)  | 3-15 Vdc   | 131 EUR      | 3.5mm "stereo" plug cable. On stock.   | 7.5% discount on orders over 40 pieces. Prices will change in September. Next generation after the ECH2O sensors (below). |
| 49 | TEROS 11            | Website                   | -40 to 60   | 0 to -70-100%                  | ±1-2%                                     |                 | DDI, SDI-12   | 4-15 Vdc current drain 0.03/16 mA asleep/max measuring | 208 EUR      | 3.5mm "stereo" plug cable, measures T as well. On stock.   | 7.5% discount on orders over 40 pieces. Prices will change in September. Next generation after the ECH2O sensors (below). |
| 50 | ECH2O EC-5          | Website                   | -40 to 60   | 0-100%                         | ±0.03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (3%) |                 | 10-50% of excitation voltage (analog)                           | 2.5-3.6V @ 10 mA                                       | 170 EUR      | Analog. No temperature measurement. Not available directly from Meter – replaced by the Teros line, but found it elsewhere | Alpha-omega price   |
| 51 | Delta-T WET150      | Data sheet                | -20 to 60   | 0-100%                         | ±0.03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (3%) |                 | SDI-12  | 6-20 V (22 mA @ 12V / 45 mA peak)                      | 250 EUR      | Measures T and electric conductivity.  |   |
| 52 | Delta-T SMT150T     | Datasheet                 | 0 to 60     | 0-70%                          | ±3%                                       |                 | voltage   | 5-14V, 18 mA   | 209 EUR      | T + hum  |   |
| 53 | Ecomatic SMT100     | Datasheet                 | -25 to 70   | 0 - ~60% (less accurate above) | ±3%                                       | 0.1% resolution | SDI-12 / RS-485 / analog  | 4-24 Vdc, peak 40 mA (when measuring)                  | 131 EUR      | T + hum  | Calibration for better results  |
| 54 | TreeTalker          | Website, specs N/A        |             |                                |   |                 | ±0.7 volt square wave with frequency dependent on water content | 5-18 Vdc (need 65 mA @ 12 Vdc)                         | 96 EUR       | Measures soil T and humidity, air T + humidity   |   |
| 55 | CS616               | Brochure                  | 0 to 70     | 0-100%                         | up to ±1.5%                               | 0.10%           |   | 6-18 Vdc (need 45 mA @ 12 Vdc)                         | 160 EUR      | Analog. No temperature measurement.  |   |
| 56 | CS650, CS655        | Datasheet                 | -50 to +70  | 0-100%                         | ±1% (±3%)                                 | 0.05%           | SDI-12, RS-485  | 6-18 Vdc (need 45 mA)                                  | 244, 260 EUR | Difference in type of soil they're suitable for (towhigh conductivity). Accuracy depends on soil-specific                  |   |

Auf Basis der Recherche in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern wurden die vielversprechendsten Sensoren bestellt und sowohl in Labor- als auch in einfachen Feldtests getestet und bezüglich ihrer Verlässlichkeit und Präzision evaluiert. Das Ergebnis dieser Evaluierung wird in Sektion 2.4 im Detail präsentiert. Die finale Auswahl der Sensoren ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Finale Auswahl der Sensoren für die Standard-Mess-Station.

| <b>Sensorname</b> | <b>Messwert</b>                         | <b>Hersteller</b> | <b>Messort</b> |
|-------------------|---|-------------------|----------------|
| <b>DR26</b>       | Baumumfangsveränderung<br>(Dendrometer) | EMS Brno          | Satellit       |
| <b>TEROS10</b>    | Bodenfeuchte                            | METER             | Satellit       |
| <b>TEROS11</b>    | Bodentemperatur und<br>Bodenfeuchte     | METER             | Zentraler Mast |
| <b>SHT85</b>      | Lufttemperatur und Luftfeuchte          | Sensirion         | Zentraler Mast |
| <b>SEM404</b>     | Niederschlag                            | SenTec            | Zentraler Mast |
| <b>SEM228A</b>    | Solarstrahlung                          | SenTec            | Zentraler Mast |
| <b>ESP32-Cam</b>  | Multimedia-Bildaufnahme                 | BerryBase         | Zentraler Mast |

## 2.2.4 Kosten der Station

Die Gesamtkosten der entwickelten Mess-Station sind in Tabelle 2 aufgelistet und beziehen sich auf folgende Standardausstattung:

- 1 Zentraler Mast
  - 3 kombinierte Bodentemperatur- und feuchtesensoren (TEROS11)
  - 1 kombinierter Lufttemperatur- und feuchtesensor (SHT85)
  - 1 Solarstrahlungssensor (SEM228A)
  - 1 Niederschlagssensor (SEM404)
  - 1 Kamera (ESP32-Cam)
- 2 Satelliten
  - Je 3 Baumumfangsveränderungssensoren (Dendrometer; DR26)
  - Je 1 Bodenfeuchtesensor (TEROS10)

Sie inkludieren zusätzlich die gesamten Kosten für Infrastruktur (Aluminiumgestell, Solarpanel, Mikrokontroller, etc.). Der Stichtag der letzten Preisberechnung war der 9. März 2023 nach der Bestellung aller Sensoren.

Tabelle 2: Preis aller Komponenten einer Standard-Mess-Station, bestehend aus einem Zentralen Masten und 2 Satelliten.

| Komponente                                     | Preis in EUR   |
|--|--|
| Logger/Platinen                                | 165 € (ZM + 2x RS485 Nodes + ESP32-CAM + 2 Satelliten)         |
| Sensoren                                       | 1535€ (Dendrometer) + 1200€ (restliche)                        |
| Gerüste und Gehäuse                            | 600 € (Gerüst, Gehäuse ZM + Satelliten, Stecker, Abspannseile) |
| Power (Solar Panel, Batterie, Solar Regulator) | 150-250 € (ZM + Akku der Satelliten)                           |
| <b>Gesamt</b>                                  | <b>3650-3750 €</b>   |

## 2.3 Dateninfrastruktur

Neben der Entwicklung der Mess-Station wurde parallel dazu auch eine eigene, angepasste Dateninfrastruktur entwickelt. Diese umfasst sowohl ein Server-Backend, welches für die Verarbeitung der Daten verantwortlich ist, als auch ein Dashboard, das für die Visualisierung

der Daten zuständig ist. Die Hauptfunktionalität der Dateninfrastruktur umfasst neben dem Empfang von Sensordaten vom Zentralen Mast mittels LTE-M auch die Sensorkonfiguration, die Datenvalidierung, das Benutzermanagement und die Visualisierung der gesammelten Daten in konfigurierbaren grafischen Ansichten.

### 2.3.1 Sensorkonfiguration und Datenvalidierung

Um das System vielfältig einsetzbar zu gestalten, wird die Konfiguration der Sensoren einer Station unterstützt. Dies bedeutet, dass Sensoren im Backend abgebildet werden und diese Abbildung sich (z.B. bei Erweiterung einer Mess-Station um neue Satelliten und/oder neue Sensoren) über die Zeit verändern kann. Jeder Sensor wird durch die folgenden Eigenschaften abgebildet:

- Einem selbst wählbaren **Namen** und **Beschreibung** für die Ansicht im Dashboard,
- Dem vom **Hersteller gegebenen Namen** des Sensors (z.B.: TEROS10, SHT85),
- Dem **Protokoll** und der **Adresse**, welches der Sensor zur Kommunikation mit dem Mikrokontroller verwendet,
- Den **Status** des Sensors (aktiviert oder deaktiviert), und
- **Informationen zu den einzelnen Messwerten**, die der Sensor liefert<sup>5</sup>, sowie deren Validierungsparametern.

Weiters hat dies zur Folge, dass das System nicht nur die Standard-Mess-Station, in ihrer in diesem Dokument beschriebenen Ausstattung, unterstützt, sondern grundsätzlich beliebige Mess-Stationen. Dies ermöglicht den Einsatz der entwickelten Software für andere Anwendungsfälle, die über das Monitoring von Wäldern hinausgehen.

Zusätzlich zur Abbildung eines Sensors können dessen Validierungsmöglichkeiten erfasst und konfiguriert werden, um die Datenqualität zu sichern. Eine Auswahl an Validierungsmöglichkeiten und deren Parameter sind in Tabelle 3 dargestellt. Bei Dendrometern ist es zusätzlich möglich, die Art des Baumes und den aktuellen Baumumfang anzugeben. Jeder eingehende Wert eines Sensors wird anhand der konfigurierten Parameter validiert und mit einem entsprechenden Status (Wert eingefroren, Wert zu hoch / niedrig, etc.) gekennzeichnet.

---

<sup>5</sup> Einige Sensoren messen mehr als eine Messgröße. Der Sensor „SHT85“ kann zum Beispiel sowohl Lufttemperatur als auch Luftfeuchte messen.

net. Die eigentlichen Sensorwerte werden dabei nicht verändert. Die Person, die als Verantwortliche:r für die Station vermerkt ist, bekommt eine tägliche E-Mail mit Informationen zum Validierungsstatus der Sensoren.

Tabelle 3: Eine Auswahl der im System vorhandenen Validierungsmöglichkeiten.

| Validierung                                 | Beschreibung  | Konfigurierbare Parameter                              |
|---|---|--|
| <b>Wert eingefroren</b>                     | Ein Sensorwert bleibt zu lange gleich.  | Zeitdauer, bis ein gleicher Wert als eingefroren gilt. |
| <b>Wert ist ein Ausreißer</b>               | Ein Sensorwert fällt zu stark ab oder steigt zu stark an.   | Maximal erlaubte Wertänderung pro Zeiteinheit.         |
| <b>Wert ist unter Variationskoeffizient</b> | Der Variationskoeffizient der letzten 24 Stunden ist unter dem gesetzten Variationskoeffizient-Minimum. | Der minimal erlaubte Variationskoeffizient.            |
| <b>Wert zu hoch / niedrig</b>               | Ein Sensorwert ist außerhalb eines festgelegten Wertebereichs   | Minimum / Maximum                                      |

Das Server-Backend der Dateninfrastruktur ermöglicht die Integration des Dashboards mittels eines API<sup>6</sup>. Nach initialer Authentifizierung können über das API bestehende Stationen und deren Daten eingesehen werden. Auch das Erstellen, Löschen und Bearbeiten von Stationen und deren Satelliten bzw. Sensoren wird durch die API unterstützt. Neben dem Dashboard verwenden auch die im Wald aufgebauten Stationen das API des Server-Backends, um gesammelte Daten hochzuladen und um die Echtzeituhr mit der aktuellen UTC-Zeit zu synchronisieren.

Die Dateninfrastruktur verwendet moderne und für Webapplikationen bewährte Technologien. Das Server-Backend wurde mithilfe von Java und dem Spring Framework entwickelt. Als Datenbank dient der NoSQL Document-Store MongoDB. MongoDB wurde aufgrund der seit Version 5.0 inkludierten Unterstützung für Zeitreihendaten ausgewählt. Für die graphische Darstellung der Daten im Dashboard wird Angular mit TypeScript verwendet. Das

---

<sup>6</sup> „Application Programming Interface“. Zu Deutsch: Eine Programmierschnittstelle, die Kommunikation zwischen verschiedenen Programmen oder Komponenten (wie zum Beispiel backend und Dashboard) ermöglicht.

Dashboard wird auch durch die externe Zusatzkomponente ChartJS zur Visualisierung von Zeitreihen erweitert.

### **2.3.2 Dashboard**

Zur benutzungsfreundlichen Aufbereitung der Daten des Systems wird ein Dashboard angeboten, welches neben der Anzeige auf einem normalen Computerbildschirm auch für mobile Geräte optimiert ist. Dieses ermöglicht sowohl den Zugriff auf Verwaltungsfunktionalität wie das Benutzermanagement oder die Konfiguration neuer oder existierender Stationen, als auch Zugriff auf die gemessenen Daten über diverse Visualisierungen. Die Visualisierungen des Systems wurden auf die identifizierten Benutzer-Rollen zugeschnitten.

In Diskussion mit den Projektpartnern konnten folgende Rollen definiert werden:

- Reguläre Benutzer:innen (USER, z.B. private Waldbesitzer:innen, Waldaufseher:innen)
- Expert:innen (EXPERT, z.B. Forstmanagement oder wissenschaftliches Personal)
- Systemadministrator:innen (ADMIN)

Die Hauptaufgabe der Systemadministrator:innen liegt in der Administration und Konfiguration des Systems. Das Konfigurieren neuer Stationen fällt in diesen Aufgabenbereich. In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind Screenshots der Stationskonfiguration dargestellt. Der Aufbau von Stationen ist hierarchisch, und folgt immer dem gleichen Muster. Zuerst wird eine Station als oberstes Organisationselement angelegt. Zu dieser können dann Satelliten hinzugefügt werden. Zu den Satelliten werden dann wiederum Sensoren angelegt. Essenziell ist die Angabe der MAC-Adresse der Satelliten und die korrekten Sensorprotokolle und Adressen der Sensoren. Diese werden benötigt, um die erhaltenen Sensorwerte den jeweils konfigurierten Stationen zuweisen zu können. Auch das Verwalten der Validierungsparameter fällt in den Zuständigkeitsbereich von Systemadministrator:innen. Ein Beispiel dafür findet sich unten in Abbildung 10.



Abbildung 9: Stationskonfiguration im FORTE Dashboard.

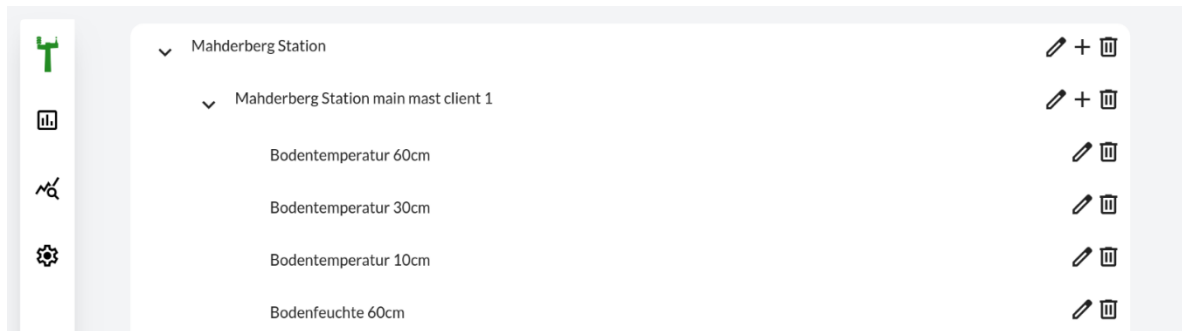
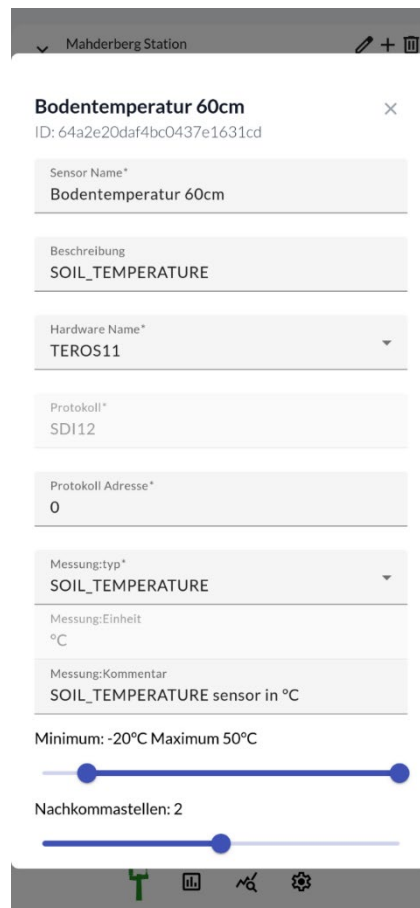


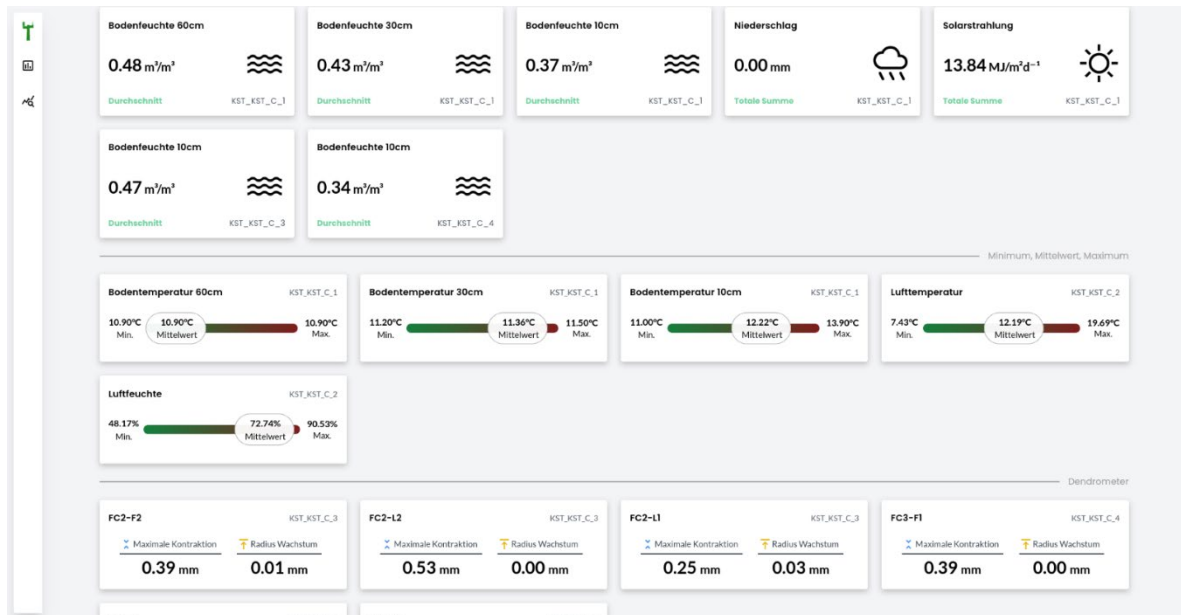
Abbildung 10: Konfiguration eines Sensors inkl. der Validierungsparameter.



Für die Rollen USER und EXPERT wurden speziell zugeschnittene Visualisierungen entwickelt. Die Tagesansicht, sichtbar in Abbildung 11, zeigt nach Auswahl von Station und Datum die Tageswerte der einzelnen Sensoren im Überblick an. Je nach Messgröße werden Tagesdurchschnitte, Tagessummen, oder Tagesminima und –maxima angezeigt. Für Dendrometer werden die maximale Kontraktion und das Wachstum des Baumes im Vergleich zum Vortag dargestellt.

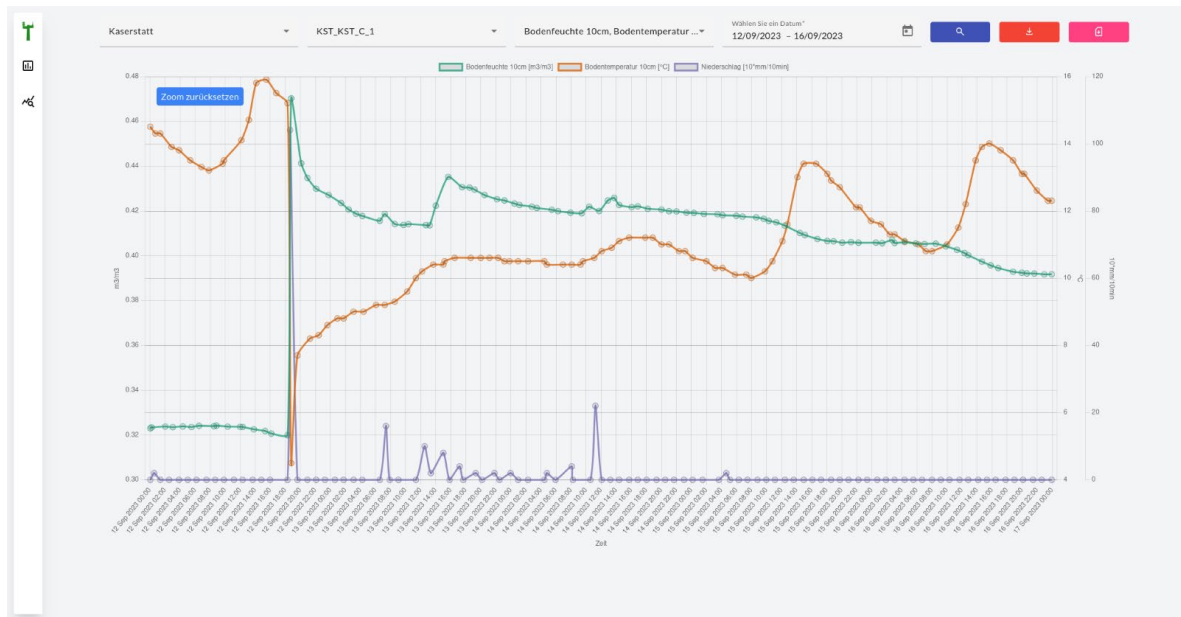


Abbildung 11: Tagesansicht des FORTE Dashboards.



Die Expertenansicht (siehe Abbildung 12) bietet eine Zeitreihendarstellung der gespeicherten Sensordaten an. Dabei können Benutzer:innen beliebig viele Sensoren sowie einen Zeitraum auswählen und sich dann eine Zeitreihe der ausgewählten Sensordaten anzeigen lassen. Die Ansicht kann frei vergrößert und verkleinert werden, und es können auch kurzzeitig einzelne Sensoren ausgeblendet und wieder eingeblendet werden. Für weiterführende Analysen in Spezialtools stellt das System eine Downloadfunktion bereit, mit der die ausgewählten Daten im CSV-Format heruntergeladen werden können. Beim Datenexport wird für jeden Datenpunkt der gesetzte Validierungsstatus hinzugefügt, damit dieser bei der weiteren Verarbeitung berücksichtigt werden kann.

Abbildung 12: Expertenansicht des FORTE Dashboards.



## 2.4 Evaluierung

Sowohl die im Projekt entwickelte Mess-Station als auch die Dateninfrastruktur befanden sich über die gesamte Laufzeit des Projekts intensiv im Test und wurden laufend von den Projektpartnern evaluiert. In den folgenden Kapiteln werden die zentralen Testvorgänge und deren Ergebnisse im Detail beschrieben. Neben den Labor- und Feldtests zur Auswahl der konkreten Sensoren der Standard-Mess-Station, die sich von Oktober 2022 bis April 2023 erstreckten, ist speziell noch der mehr-monatige Feldtest von drei vollständigen Mess-Stationen in Neustift im Stubaital im Sommer 2023 hervorzuheben. Weitere Tests, um die Funktionsfähigkeit der Station über den Winter zu erproben, finden aktuell gerade auf einer Versuchsfläche der Landesforstdirektion Tirol in Rum bei Innsbruck statt.

### 2.4.1 Labor- und Feldtests zur Sensorauswahl

Von Anfang Oktober 2022 bis Jänner 2023 fanden intensive Labor- und Feldtests des entwickelten Gesamtsystems (Mess-Station und Dateninfrastruktur) statt. Zu den Zielen der Testbetriebe zählten folgende Aspekte:

- Ausreichende Versorgung mit Strom
- Benchmark der für die Messstation ausgewählten Sensoren in Bezug auf gemessene Werte hochpräziser Sensoren des Instituts für Ökologie
- Robustheit der Mess-Station im Outdoor-Betrieb
- Verlässlichkeit der Datenübertragung

Abbildung 13: Erster Benchmark der Mess-Station Mieming, Dezember 2022.



Es wurden sechs Testläufe vorgenommen und nach jedem das System angepasst und optimiert:

- 04. Oktober – 10. Oktober 2022: Alle Sensoren wurden auf dem Dach des ACINN (Atmospheric and Cryospheric Sciences) getestet und mit dort vorhandenen Sensoren abgeglichen.
- 25. November – 28. November 2022: Das Gesamtsystem wurde auf dem Dach des ICT-Gebäudes an der Technik getestet. Neben des Funktionstests der gesamten Struktur und Komponenten war hier ein Hauptziel das Testen der Datenübertragung.
- 6. Dezember – 12. Dezember 2022: Ein Teil der Mess-Station befindet sich im Outdoor-Testbetrieb in Mieming (Dendrometer und Globalstrahlung), ein anderer im Testbetrieb im Glashaus des Instituts für Ökologie (Bodentemperatur und -feuchte, Lufttemperatur und -feuchte). Abbildung 13 zeigt den Outdoor-Betrieb in Mieming.

Der Niederschlagsmesser konnte hier aufgrund der Witterung nicht getestet werden, wurde aber bei späteren Tests wieder berücksichtigt.

- 23. Februar – 03. März 2023: Tests des für den Feldversuch geplanten Solarstrahlungssensor im botanischen Garten Innsbruck. Die Werte des Sensors wurden dann mit Werten eines vorhandenen Sensors der Ökologie verglichen.
- 04. März 2023 – 09. März 2023: Tests der initial betrachteten SEM225 Bodenfeuchte- und Temperatur Sensoren sowie den SHT85 Luftfeuchte- und Temperatursensor. Nach Vergleichen mit Sensoren der Ökologie wurde festgestellt, dass die Bodenfeuchte- und Temperatursensoren nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen. Das hatte die Wahl neuer Sensoren zur Folge. Der Luftfeuchte- und Temperatursensor erzielte gute Ergebnisse.
- 07. April 2023 – 11. April 2023: Test der neu gewählten TEROS10 (Bodenfeuchte) und TEROS11 (Bodenfeuchte und -Temperatur) Sensoren. Beide Sensoren stimmten mit den Vergleichsdaten der Ökologie überein.

Der Energieverbrauch des Gesamtsystems und einzelner Komponenten wurden bisher in vier Iterationen untersucht und optimiert. Durch die Umstellung von einem digitalen auf ein analoges Dendrometer konnte der Stromverbrauch von 6 auf 1 mA gesenkt werden. Weitere Verbesserungen könnten durch die Verwendung eines Step-Up Schalters, um den Sensor nur dann mit Strom zu versorgen, wenn eine Messung erforderlich ist, erzielt werden. Weiters wurde die Host-Platine durch ein energieeffizienteres Modell ausgetauscht, welche den Stromverbrauch im Tiefschlaf deutlich reduziert.

Die Evaluierungsversuche für die Solarstrahlungssensoren, Luftfeuchte- und -temperatursensoren sowie den Bodenfeuchte und -temperatursensoren werden in den folgenden Sektionen näher beschrieben.

### Tests der Solarstrahlungssensoren

Zur Messung der Globalstrahlung wurde das Photodiodenpyranometer EM228A (SenTec; Chengdu, China) verwendet und in zwei Vergleichsmessungen mit jeweils einem Thermosäulen-Pyranometer CNR1 (Kipp & Zonen; Delft, Niederlande) (ISO 9060, second class) und einem Thermosäulen-Pyranometer CNR4 (Kipp & Zonen; Delft, Niederlande) (ISO 9060, Class A) getestet.

Hierbei zeigte sich in vergleichenden Freilandmessungen sowohl unter freiem Himmel (Abbildung 14), als auch unter Bedingungen mit signifikanter Horizontüberhöhung (Abbildung

15), um die Situation im Unterwuchs eines Waldes zu simulieren, eine sehr gute bis gute Übereinstimmung der Sensoren. Die vergleichsweise geringfügig schlechtere Übereinstimmung (höhere Streuung) der Sensoren bei großer Horizontüberhöhung erklärt sich zum einen durch die unvermeidlich minimal abweichende Sensorpositionierung im Bestand, welche in solchen Situationen zu unterschiedlichen Beleuchtungssituationen führt, und zum anderen durch Abweichungen im Messprotokoll der beiden Sensoren.

Abbildung 14: Vergleich der Globalstrahlungssensoren bei geringer Horizontüberhöhung. Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm CNR4 vs. EM228A inklusive Regressionsgerade (schwarz;  $y = 1.02x + 1.5$ ) und 1:1 Linie (grau).

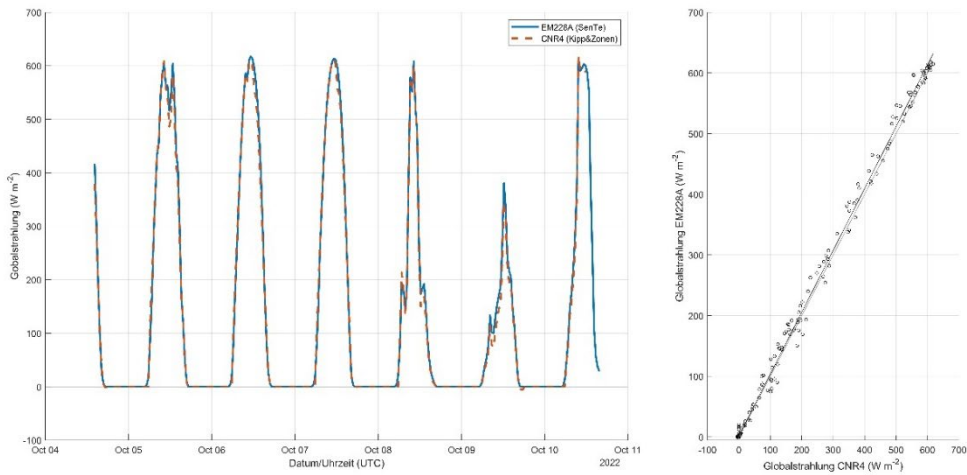
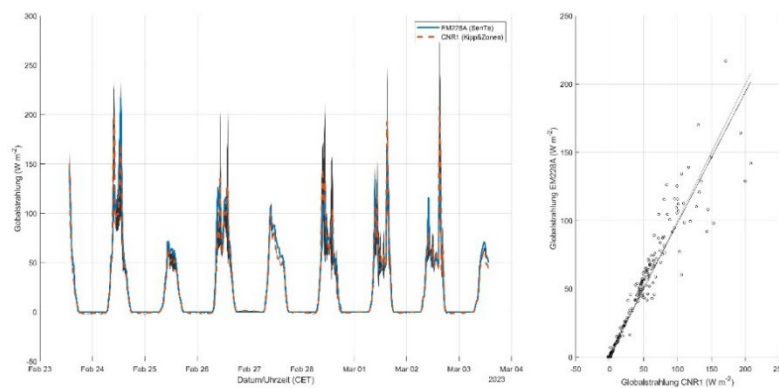


Abbildung 15: Vergleich der Globalstrahlungssensoren bei starker Horizontüberhöhung. Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm CNR4 vs. EM228A inklusive Regressionsgerade (schwarz;  $y = 0.96x + 2.1$ ) und 1:1 Linie (grau).



## Tests der Bodenfeuchte- und Temperatursensoren sowie der Luftfeuchte- und Temperatursensor

Zur Messung der Lufttemperatur und -feuchte wurden die SHT85 Sensoren (Sensirion AG; Staefa, Schweiz) mit einem Standardpräzisionsfühler HC2A-S3 (Rotronic AG; Bassersdorf, Schweiz) in einer Klimakammer verglichen. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Sensoren bezüglich Lufttemperatur- (Abbildung 16) und Luftfeuchtemessungen (Abbildung 17) über den gesamten Messbereich.

Für den Vergleich der ausgewählten Bodentemperatursensoren wurde eine einheitliche Bodenmischung verwendet welche in einem ersten Versuch 3 Sensoren vom Typ SEM226 (SenTec; Chengdu, China) und ein „research-grade“ Sensor vom Typ WET150 (Delta-T; Cambridge, UK) in selber Tiefe eingebaut wurden. Dieser Boden wurde in der Folge in einer Klimakammer unterschiedlichen Temperaturstufen ausgesetzt und so vergleichende Messungen mit den erwähnten Bodentemperatursensoren durchgeführt. Hier zeigte sich allerdings eine schlechte Übereinstimmung zwischen den zwei Sensortypen. Sowohl was die Absolutwerte als auch das zeitliche Ansprechverhalten der Sensoren betrifft. Selbst innerhalb desselben Sensortyps gab es erhebliche Unterschiede (Abbildung 18).

Abbildung 16: Vergleich der Lufttemperatursensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm HC2A-S3 vs. SHT85 inklusive Regressionsgerade (schwarz;  $y = 1.01x - 0.14$ ,  $R^2 = 0.999$ ) und 1:1 Linie (grau).

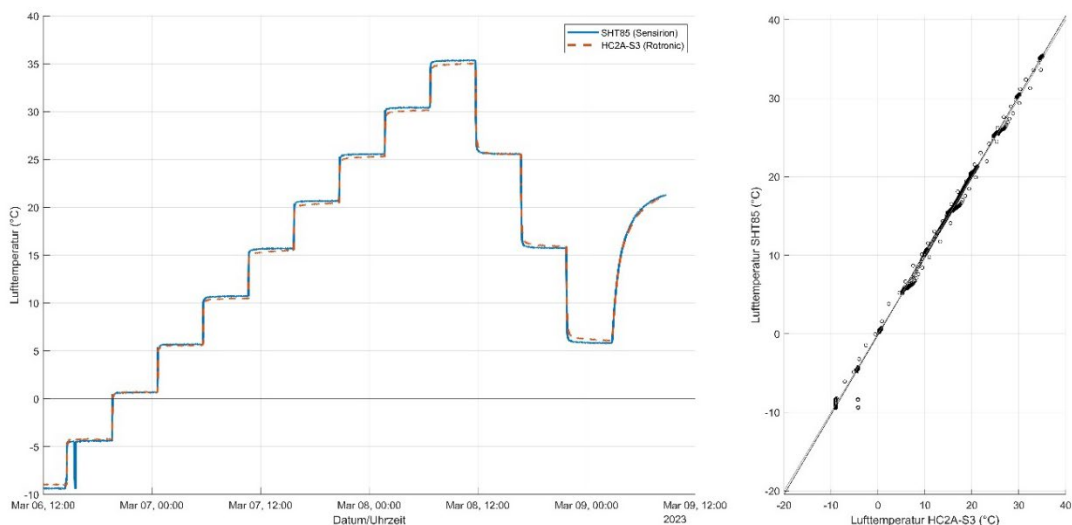


Abbildung 17: Vergleich der Luftfeuchtesensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm HC2A-S3 vs. SHT85 inklusive Regressionsgerade (schwarz;  $y = 1.01x - 1.5$ ,  $R^2 = 0.994$ ) und 1:1 Linie (grau).

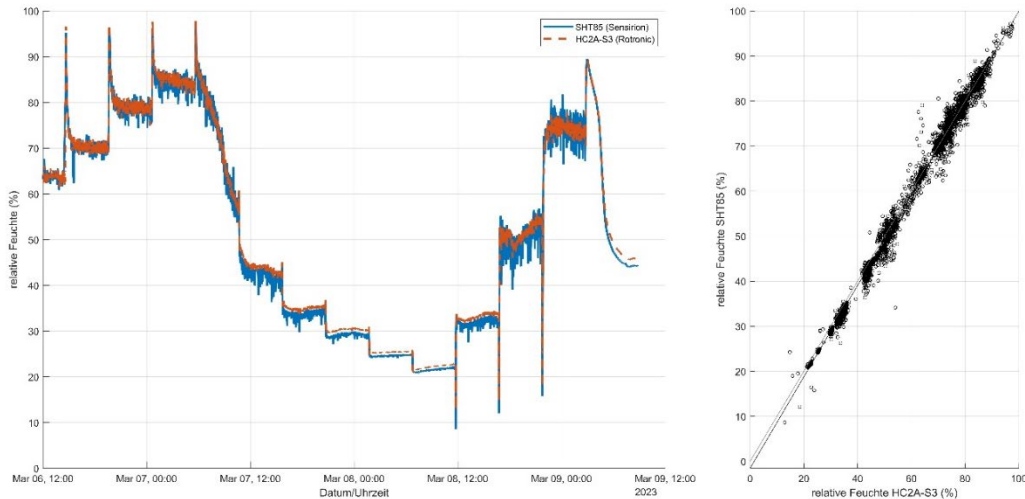
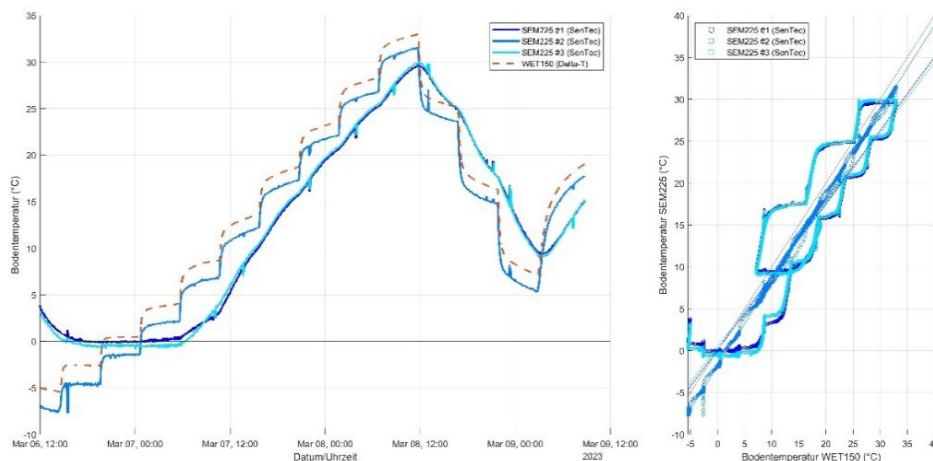


Abbildung 18: Vergleich der Bodentempersensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm WET150 vs. SEM225 inklusive jeweiliger Regressionsgeraden (#1:  $y = 0.84x + 0.45$ ,  $R^2 = 0.857$ ; #2:  $y = 1.02x - 1.89$ ,  $R^2 = 1$ ; #3:  $y = 0.87x + 0.08$ ,  $R^2 = 0.867$ ) und 1:1 Linie (grau).

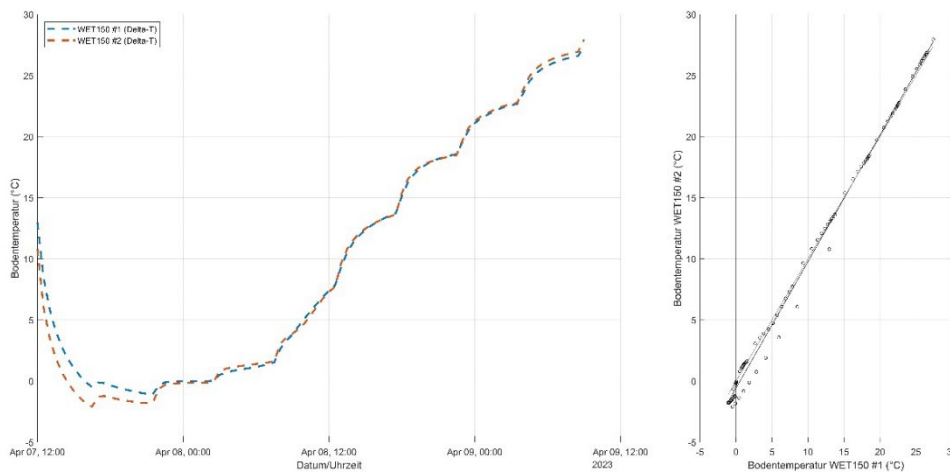


In einem zweiten Versuch wurden daher nach demselben Prinzip zwei TERO11 Sensoren (METER Group; München, Deutschland), drei DS18B20 Sensoren (Analog Devices), sowie zwei der oben erwähnten „research-grade“ Sensoren vom Typ WET150 (Delta-T; Cambridge, UK) verglichen. In Abbildung 19 wird der Vergleich der beiden WET150 Senso-



ren untereinander dargestellt. Dies diente dazu die räumliche Heterogenität der Temperatur innerhalb des Bodenkörpers abschätzen zu können. Hier zeigten sich speziell in der Anfangsphase des Versuchs noch deutliche Unterschiede, welche im Verlauf des Versuchs deutlich geringer wurden (Abbildung 19). Über die gesamte Versuchsdauer ergab sich ein RMSE von 0.66 °C zwischen den beiden Sensoren desselben Typs.

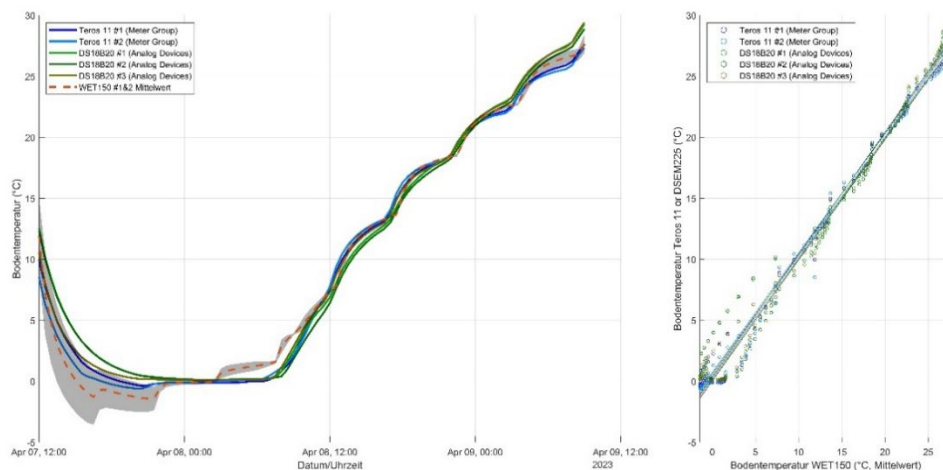
Abbildung 19: Vergleich der beiden Bodentempersensoren vom Typ WET150 („research grade“) unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm WET150 #1 vs. WET150 #2 inklusive Regressionsgerade ( $y = 1.03x - 0.58$ ,  $R^2 = 0.996$ ) und 1:1 Line (grau).



In Abbildung 20 sind die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den WET150 Sensoren und den TEROS11, sowie DS18B20 Sensoren dargestellt. Dabei wurden die zwei Zeitreihen der WET150 Sensoren für den Vergleich mit den anderen Sensortypen gemittelt dargestellt (inklusive 95% Perzentile in grauer Schattierung). Insgesamt zeigten bei diesem Vergleich die TEROS11 Sensoren eine etwas bessere Übereinstimmung mit den WET150 Sensoren. Der RMSE für diese Sensoren im Vergleich mit den WET150 (0.95 und 0.84 °C) lag auf vergleichbarem Niveau wie jener für den Vergleich der beiden WET150 Sensoren untereinander (0.67 °C). Der RMSE für die drei DS18B20 Sensoren (1 - 1.4 °C) war hingegen zum Teil mehr als doppelt so hoch wie jener für die beiden WET150 Sensoren untereinander) (Abbildung 20). Aufgrund dieser Ergebnisse und der kombinierten Bodentemperatur und -feucht Messungen im TEROS11 fiel die Entscheidung auf den TEROS11 für den weiteren Einsatz im Prototyp der Anlage.



Abbildung 20: Vergleich der Bodentemperatursensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Die Werte der WET150 Sensoren werden gemittelt dargestellt, inklusive 95% Perzentile (grau schattiert). Rechts: Streudiagramm Mittelwert der beiden WET150 Sensoren vs. zwei TEROS11 Sensoren und drei DS18B20 Sensoren inklusive jeweiliger Regressionsgeraden (TEROS11 #1:  $y = 0.98x + 0.25$ ,  $R^2 = 0.99$ ; TEROS11 #2:  $y = 0.99x + 0.09$ ,  $R^2 = 0.99$ ; DS18B20 #1:  $y = 0.98x + 0.72$ ,  $R^2 = 0.98$ ; DS18B20 #2:  $y = 0.97x + 0.61$ ,  $R^2 = 0.98$ ; DS18B20 #3:  $y = 0.99x + 0.39$ ,  $R^2 = 0.99$ ) und 1:1 Line (grau).



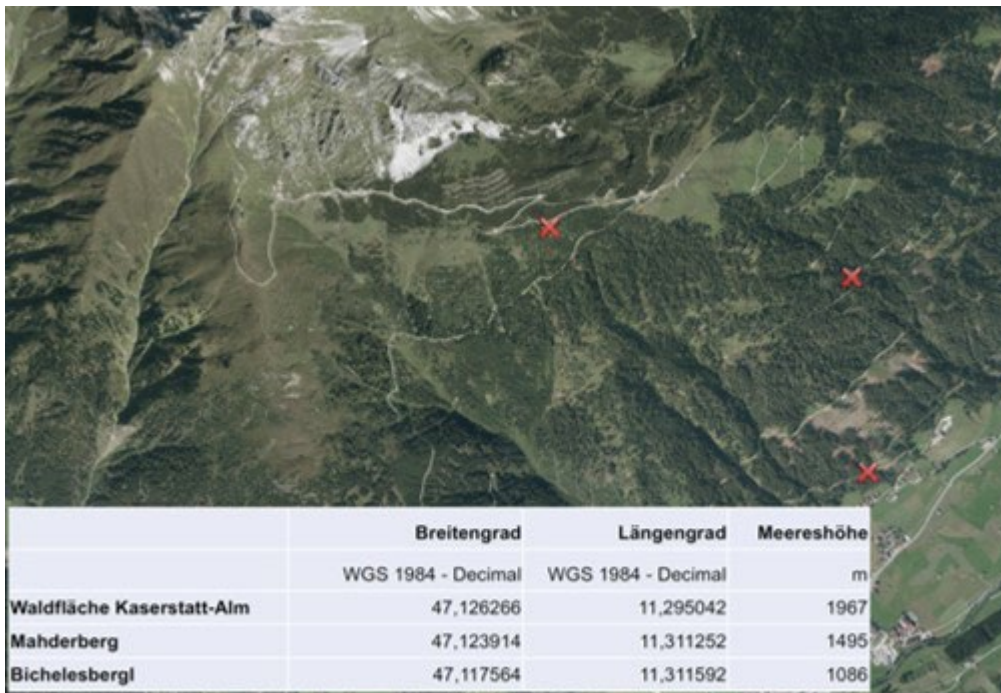
## 2.4.2 Feldversuch der gesamten Mess-Station

Auf Basis der Labor- und ersten Feldtests, beschrieben in Kapitel 2.4.1, konnten die Stationen für einen weitreichenden Feldversuch finalisiert werden. Die Tests der Mess-Station-Demonstratoren im Feld fanden in Neustift im Stubaital statt. Es wurden in Absprache mit der Gemeinde und den dort zuständigen Waldaufsehern 3 Stationen entlang eines Höhengradienten ausgebracht (siehe Abbildung 21):

1. Station „Bichelesbergl“, in Nähe der Gemeinde, auf ca. 1000HM. Ausbringung am 18.07.2023
2. Station „Mahderberg“, im Wald auf ca. 1500HM. Ausbringung am 04.07.2023
3. Station „Kaserstatt“, nahe der Kaserstatt Alm, auf ca. 2000HM. Ausbringung am 14.07.2023

Die Stationen waren dabei jeweils mit der Standardausstattung (siehe Kapitel 2.2.4) bestückt.

Abbildung 21: Ausbringungsorte der drei Mess-Stationen für den Feldversuch in Neustift im Stubaital.



Die Bodentemperatur und -feuchtesensoren des Zentralen Mastes wurden in 3 verschiedenen Tiefenstufen ausgebracht: 10cm, 30cm und 60cm. Pro Satelliten wurde jeweils eine Gruppe von drei Fichten und drei Lärchen überwacht.

Über den Zeitraum der Feldtests wurden die Stationen kontinuierlich überwacht und, wenn nötig, angepasst. Mit Mitte/Ende Juli hat sich herausgestellt, dass aufgrund eines Hardwarefehlers auf den Satelliten die Messdaten nicht durchgängig verwendbar waren. Von diesem Problem waren speziell die Dendrometerdaten betroffen. Der Bug konnte rasch gefunden und durch eine Anpassung des Designs der PCB-Boards behoben werden. Aufgrund der notwendigen Fertigungszeit der neuen Boards konnte die Behebung des Bugs erst mit dem 19.08.2023 erfolgen.

Eine weitere Herausforderung stellten LTE-M-Verbindungsprobleme dar. Von 14.09.2023 bis 27.09.2023 wurden keine Daten von der Station Kaserstatt an das Server-Backend übertragen. Nach manueller Überprüfung und Neuausrichtung der Antenne konnte die Übertragung ohne Probleme wieder gestartet werden. Hervorzuheben ist, dass in diesem Zeitraum die Station ohne Probleme weiter Messwerte erfasst und auf der SD-Karte gespeichert hat. Somit sind keine Daten verloren gegangen.

Schlussendlich konnten mit der Station saubere Daten im Zeitraum vom 19.08.2023 bis zum 10.10.2023 gemessen werden. Im Hinblick auf die schwere Erreichbarkeit der Stationen und den nahenden Winter wurde beschlossen, die Stationen am 10.10.2023 vorerst abzubauen. Um jedoch die für das System wertvollen Erkenntnisse über einen Winterbetrieb zu ermöglichen, wurde eine Station am 21.11.2023 auf einer Versuchsfläche der Gruppe Forst Landesregierung am Rechenhof in Rum erneut ausgebracht und weiter kontinuierlich überwacht.

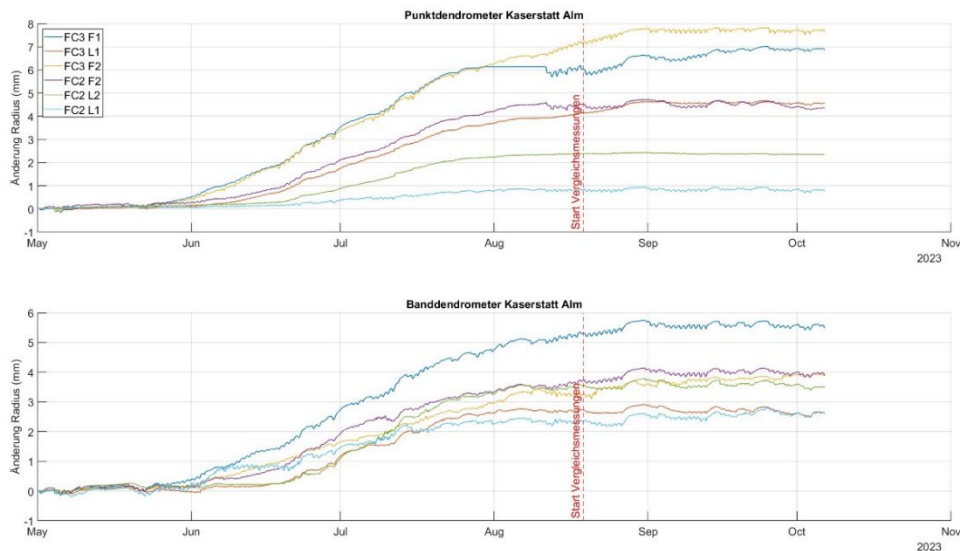
### **2.4.3 Vergleichsmessungen der Station Kaserstatt**

Die Station „Kaserstatt“ wurde für Vergleichsmessungen über mehrere Monate getestet. In diesem Gebiet findet sich die etablierte „long-term ecological research (LTER) master site Stubai valley“ auf welcher seit Jahren von der Universität Innsbruck ökophysiologische Messungen an Bäumen (Lärchen und Fichten) in der Waldgrenzregion durchgeführt werden. Daher bot diese Versuchsfläche die Möglichkeit neben den Umweltparametern auch die verwendeten Banddendrometer für die Messung des Dickenwachstums der Bäume direkt mit Punkt- und Banddendrometermessungen an denselben Individuen zu vergleichen. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsfläche und der verwendeten Sensorik findet sich in Oberleitner et al. (2022).

Für den Vergleich der Banddendrometerdaten wurden jeweils 3 Fichten und 3 Lärchen beprobt, welche bereits mit Punkt- (ZN11-T-WP, Natkon; Oetwil am See, Schweiz) und Banddendrometern (DC2, Ecomatik GmbH; Dachau/München, Deutschland) bestückt waren. Dies erlaubte einen direkten Vergleich der verwendeten Banddendrometer (EMS DRS26, EMS Brno; Brno, Tschechien) mit Messungen nach demselben Prinzip und einer alternativen Methode (Punktdendrometer) am selben Individuum.

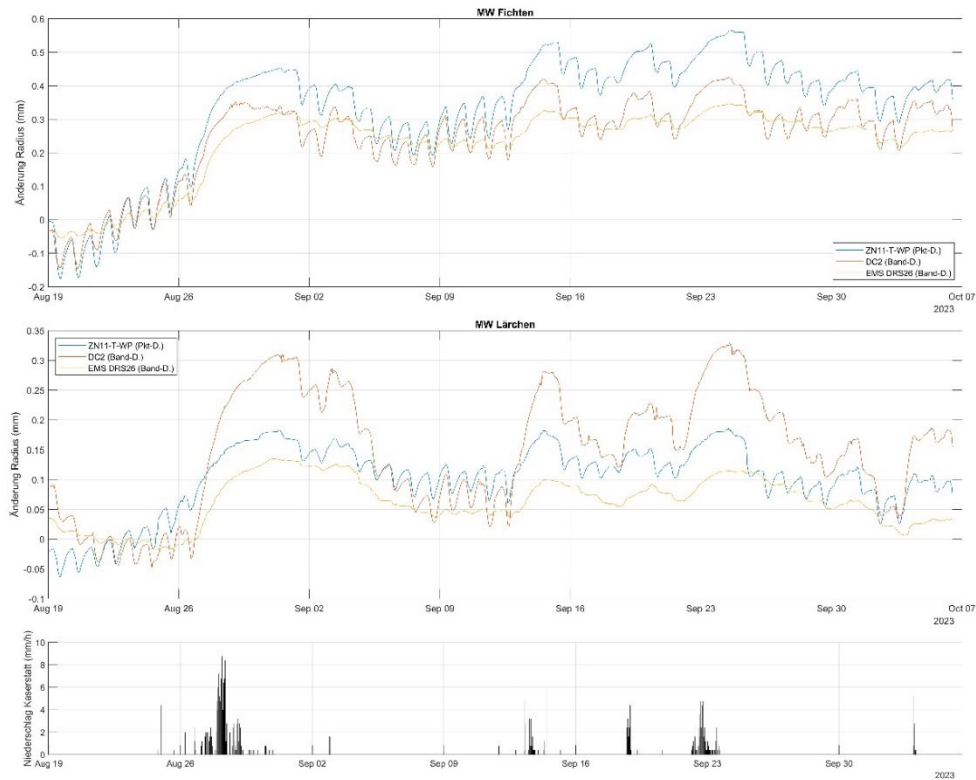
Aufgrund des in Kapitel 2.4.2 angesprochenen Hardwarefehlers in der Anfangsphase der Vergleichsmessungen konnte der tatsächliche Vergleich erst am 19.08.2023 gestartet werden. Wie in Abbildung 22 dargestellt liegt der Start der Vergleichsmessungen damit allerdings schon am Ende der eigentlichen Wachstumsphase mit positiven Radiusänderungen.

Abbildung 22: Wachstumskurven (Radiusänderungen) für die sechs untersuchten Individuen im Gebiet der Kaserstatt-Alm, gemessen mittels Punktdendrometer (ZN11-T-WP) (oben) und Banddendrometer (DC2) (unten) in der Vegetationsperiode 2023. FC2 und FC3 bezeichnen die untersuchten Baumgruppen (plots), F1-F2 bezeichnen Fichten, L1-L2 bezeichnen Lärchen. Die vertikale rote Linie markiert den Startzeitpunkt der Vergleichsmessungen.



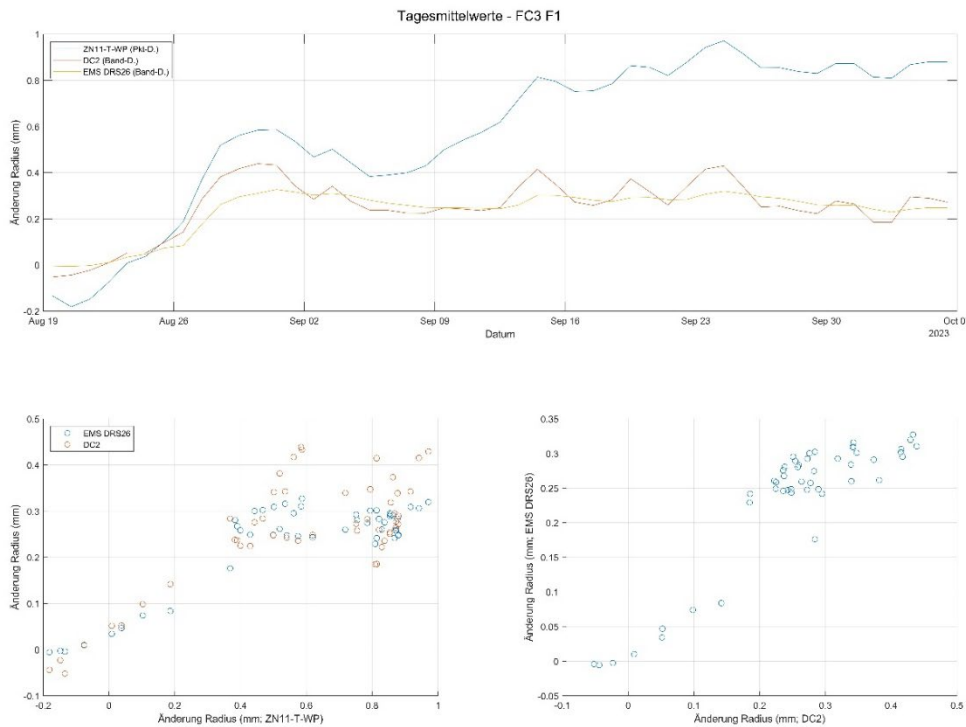
Die verwendeten Banddendrometer (EMS DRS26) zeigten selbst in der messtechnisch schwierig aufzulösenden Stagnationsphase im Herbst 2023 gute Übereinstimmung mit den installierten Punkt- und Banddendrometern der Versuchsfläche (Abbildung 23). So konnten anfänglich vorhandene Wachstumssignale in den Fichten (19.08.2023-26.08.2023) ebenso registriert werden wie Phasen mit anschwellenden Baumstämmen aufgrund feuchter Witterungsbedingungen (z.B. 26.08.2023 – 02.09.2023) und darauffolgenden Austrocknungsphasen. In Abbildung 24 wird exemplarisch eine Zeitreihe und Streudiagramme für ein Baumindividuum dargestellt.

Abbildung 23: Radiusänderungen der untersuchten Fichten (oben) und Lärchen (Mitte) in der Phase paralleler Messungen mittels Punkt- (ZN11-T-WP) und Banddendrometern (DC2 und EMS DRS26). Dargestellt sind gemittelte Werte pro Baumart und Messgerät. Unten: Niederschlagszeitreihe.



Die gedämpften täglichen Schwankungen im gemessenen Stammradius durch die EMS DRS26 Sensoren im Vergleich zu den beiden anderen Sensortypen können durch die kürzlich erfolgte Anbringung der Sensoren und der damit verbundenen teilweisen Entfernung der Borke erklärt werden.

Abbildung 24: Zeitreihe der mittleren tägliche Radiusänderungen einer untersuchten Fichte (oben) und Streudiagramme der Punktdendrometer Messungen gegen die zwei Banddendrometer Messungen (unten links), sowie der beiden Banddendrometer Messungen gegeneinander (unten rechts).



Für die Bodenfeuchte-Sensoren wurden keine endgültigen Vergleichsmessungen im Labor vorgenommen, da für diese in jedem Fall eine standortspezifische bzw. bodentypspezifische Kalibration notwendig sind, um hinreichend präzise Ergebnisse zu erhalten.

Nach erfolgreicher Testung der Anlage im alpinen Freiland besteht aus unserer Sicht noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Langzeitstabilität der verwendeten Sensorik, insbesondere auch was den Einsatz unter Realbedingungen im Winter betrifft. Solche Evaluierungen waren im vorliegenden Projekt nicht vorgesehen und in der gegebenen Projektlaufzeit auch nicht realisierbar. In der Anwendung empfiehlt sich jedenfalls eine regelmäßige Überprüfung/Kalibration der Sensorik mittels einer mobilen Kalibriereinheit.

Am 21.11.2023 wurde eine der Stationen auf einer Versuchsfläche des Forstmanagement in Rum am Rechenhof ausgebracht. Zum aktuellen Zeitpunkt läuft die Station ohne Probleme und sendet kontinuierlich Daten. Diese werden für die Weiterentwicklung des Systems von großem Nutzen sein.

# Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein ganzheitliches Messsystem für die Überwachung des Mikroklimas im Wald konzipiert, implementiert und evaluiert. Dieses Messsystem umfasst sowohl eine eigens entwickelte Mess-Station als auch die für die Speicherung, Validierung und Visualisierung benötigte Dateninfrastruktur. Es ist gelungen, beide Komponenten so zu entwickeln, dass sie den Ansprüchen aus Forschung und Praxis bezüglich Preises, Präzision, Erweiterbarkeit, Energieeffizienz und Benutzerfreundlichkeit gerecht werden.

Ein Alleinstellungsmerkmal der entwickelten Mess-Station ist der Fokus auf Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit. Zentral ist hier die getroffene Architekturentscheidung zur Trennung der Station in einen zentralen Masten und in räumlich hochgradig unabhängige Satelliten. Da aktuell bis zu 10 Satelliten von einem zentralen Masten verwaltet werden können, ist es möglich, wesentlich größere Areale mit nur einem Bruchteil der Kosten, die für eine vollständige Mess-Station notwendig wären, abzudecken. Die Flexibilität der Mess-Station, die aktuelle Sensorkonfiguration auszutauschen und zu erweitern, eröffnet vielfältige Anwendungsszenarien, darunter nicht nur die aktuelle Baumwachstums- und Mikroklimaüberwachung im Wald, sondern auch potenzielle Einsätze in der Landwirtschaft oder die Bereitstellung relevanter Daten zur Prognose der Borkenkäferausbreitung.

Die Mess-Station wird durch die zusätzlich entwickelte Dateninfrastruktur optimal ergänzt. Die umfangreichen konfigurierbaren Validierungsregeln gewährleisten eine hohe Datenqualität. Die gespeicherten und validierten Daten werden dann in auf Benutzergruppen zugeschnittenen Ansichten aufbereitet und den jeweiligen Nutzern zur Verfügung gestellt. Großer Fokus ist hier die Benutzerfreundlichkeit des Systems.

DI Dr. Alois Simon von der Abteilung Forstplanung der Landesforstdirektion Tirol, der das Projekt hinsichtlich der zu messenden Parameter, der Auswahl der Testflächen und die Ausbringung der Messstationen tatkräftig unterstützt hat, zeigt sich beeindruckt, wie weit die Entwicklung der Messstation in der verhältnismäßig kurzen verfügbaren Zeit vorangeschritten ist.

Seiner Ansicht nach haben die Daten der entwickelten Messstation das Potential für die Forstpraxis relevante Informationen zum Zustand und Entwicklung von Waldbäumen in einem sich veränderndem Klima zu liefern.

Bedauert werden die kurze Messperiode und der Fokus auf die Entwicklungsphase im Rahmen des Projekts. Als Praxispartner unterstützt die Landesforstdirektion gern tatkräftig die Produktentwicklung, und erhofft sich einen Mehrwert für die Praxis durch die Implementierung und Weiterführung der entwickelten Produkte und Messstationen.

Um diese Brücke zur Forstpraxis herzustellen, wurde eine der Messstationen am sog. Brunelboden, einer Projektfläche der Stadt Innsbruck an der Nordkette, aufgestellt. Hier wurden eine Reihe von potenziellen zukunftsfiten Laubbaumarten angepflanzt und die Fläche wird für die Ausbildung künftiger Forstwirte und Waldaufseher verwendet. Somit ist es gelungen, die aus dem Projekt hervorgegangenen Entwicklungen bereits für die Forstpraxis nutzen zu machen und es besteht der ausdrückliche Wunsch, diesen Mehrwert möglichst langfristig zu erhalten und fortzuführen.

Die Fertigstellung der Mess-Station für den Serienbetrieb erfordert einige wenige, jedoch entscheidende Schritte. Ein zentraler Aspekt ist die Erreichung der Produktionstauglichkeit, wofür sowohl die Konstruktion als auch die Fertigung weiter optimiert werden müssen. Zusätzlich dazu müssen Verbesserungen in den Bereichen Robustheit und Wartbarkeit vorgenommen werden, um einen zuverlässigen Dauerbetrieb auch in schwer zugänglichen Umgebungen zu gewährleisten. Ein wesentliches Ziel ist es, die Integrität des Systems ohne physische Inspektion der Station feststellen zu können. Erste Ansätze hierfür umfassen die erweiterte Nutzung der Kamera sowie die Integration zusätzlicher Sensoren (Lufttemperatur, -feuchtigkeit, Neigungssensor) im Gehäuse des zentralen Mastes. Die Wartbarkeit kann signifikant durch die Implementierung von "over-the-air" Updates verbessert werden, was es ermöglicht, Softwareaktualisierungen auf das System zu übertragen, ohne vor Ort präsent zu sein. Ein noch ausständiger Schwerpunkt ist auch die Resilienz der Station im Winterbetrieb.



## **Tabellenverzeichnis**

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Finale Auswahl der Sensoren für die Standard-Mess-Station.....   | 19 |
| Tabelle 2: Preis aller Komponenten einer Standard-Mess-Station, bestehend aus einem<br>Zentralen Masten und 2 Satelliten..... | 20 |
| Tabelle 3: Eine Auswahl der im System vorhandenen Validierungsmöglichkeiten. ....   | 22 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung des Systems. In a) wird die Station im Wald abgebildet, in b) die zentrale Dateninfrastruktur (derzeit an der Universität).....   | 10 |
| Abbildung 2: Foto eines Zentralen Masts aufgebaut im Rahmen eines Feldtests bei Mahderberg in Neustift.....   | 11 |
| Abbildung 3: Darstellung der LoggerBox am Zentralen Mast. Rechts oben befindet sich die Leiterplatte mit den Host und Client Mikrokontrollern sowie der Echtzeituhr (RTC). Die LTE-M Antenne verläuft zum Host, um eine Verbindung zum LTE-M Netz zu ermöglichen. Auf der Unterseite sieht man den Bleiakкумуляtor (Lead Battery), der die LoggerBox mit Strom versorgt und die eingehenden Steckerverbindungen zu den Sensoren und dem Solarpanel. Links mittig befindet sich das Solarlademodul. .... | 12 |
| Abbildung 4: Die Status LEDs beim ZM in verschiedenen Zuständen. Zunächst (links) liegt die Spannung für 12V und 5V Leitungen an. Die 5V Leitung für den Niederschlagssensor (RS485 5V) liegt ebenso an. Im mittleren Bild wurde die Kamera (CAM) aktiviert. Beim rechten Bild liegt dann auch Spannung für die Bodenfeuchte und -temperatursensoren (TEROS) an. ....   | 13 |
| Abbildung 5: Detailansicht der Host-Komponente des ZM. Die Stromversorgung liefert Strom an die einzelnen Subkomponenten. Die Prozessoreinheit ist für die Kommunikation zwischen den einzelnen Subkomponenten zuständig. ....  | 15 |
| Abbildung 6: Detailansicht der Client-Komponente. Die Stromversorgung liefert Strom an die einzelnen Subkomponenten. Die Prozessoreinheit ist für die Kommunikation zwischen den einzelnen Subkomponenten zuständig. Kommunikation zu den Sensoren wird über Sensorprotokolle realisiert (z.B.: SDI-12, RS485, I <sup>2</sup> C, etc.). ....  | 16 |
| Abbildung 7: Ein im Feldtest ausgebrachter Satellit. Links sieht man den Akku (Battery), der den Satelliten mit Strom versorgt. Rechts oben den ESP32 Mikrokontroller, der für die Logik für das Auslesen der Sensoren und das Versenden der Daten an den ZM zuständig ist. Die als „Step Up Converter“ und „ADCs“ betitelten Komponenten dienen als Schnittstelle zwischen Mikrokontroller und den einzelnen Sensoren, die auf der Unterseite des Satelliten angeschlossen sind. ....                  | 17 |
| Abbildung 8: Ausschnitt der Recherche und Evaluierung der Bodenfeuchtesensoren.....   | 18 |
| Abbildung 9: Stationskonfiguration im FORTE Dashboard. ....   | 24 |
| Abbildung 10: Konfiguration eines Sensors inkl. der Validierungsparameter. ....   | 24 |
| Abbildung 11: Tagesansicht des FORTE Dashboards. ....   | 25 |
| Abbildung 12: Expertenansicht des FORTE Dashboards. ....  | 26 |
| Abbildung 13: Erster Benchmark der Mess-Station Mieming, Dezember 2022. ....  | 27 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 14: Vergleich der Globalstrahlungssensoren bei geringer Horizontüberhöhung. Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm CNR4 vs. EM228A inklusive Regressionsgerade (schwarz; $y = 1.02x + 1.5$ ) und 1:1 Line (grau). .....   | 29 |
| Abbildung 15: Vergleich der Globalstrahlungssensoren bei starker Horizontüberhöhung. Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm CNR4 vs. EM228A inklusive Regressionsgerade (schwarz; $y = 0.96x + 2.1$ ) und 1:1 Line (grau). .....  | 29 |
| Abbildung 16: Vergleich der Lufttemperatursensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm HC2A-S3 vs. SHT85 inklusive Regressionsgerade (schwarz; $y = 1.01x - 0.14$ , $R^2 = 0.999$ ) und 1:1 Line (grau). .....   | 30 |
| Abbildung 17: Vergleich der Luftfeuchtesensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm HC2A-S3 vs. SHT85 inklusive Regressionsgerade (schwarz; $y = 1.01x - 1.5$ , $R^2 = 0.994$ ) und 1:1 Line (grau). .....   | 31 |
| Abbildung 18: Vergleich der Bodentemperatursensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm WET150 vs. SEM225 inklusive jeweiliger Regressionsgeraden (#1: $y = 0.84x + 0.45$ , $R^2 = 0.857$ ; #2: $y = 1.02x - 1.89$ , $R^2 = 1$ ; #3: $y = 0.87x + 0.08$ , $R^2 = 0.867$ ) und 1:1 Line (grau). .....   | 31 |
| Abbildung 19: Vergleich der beiden Bodentemperatursensoren vom Typ WET150 („research grade“) unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Rechts: Streudiagramm WET150 #1 vs. WET150 #2 inklusive Regressionsgerade ( $y = 1.03x - 0.58$ , $R^2 = 0.996$ ) und 1:1 Line (grau). .....   | 32 |
| Abbildung 20: Vergleich der Bodentemperatursensoren unter Laborbedingungen (Klimakammer). Links: Vergleich der Zeitreihen. Die Werte der WET150 Sensoren werden gemittelt dargestellt, inklusive 95% Perzentile (grau schattiert). Rechts: Streudiagramm Mittelwert der beiden WET150 Sensoren vs. zwei TERO11 Sensoren und drei DS18B20 Sensoren inklusive jeweiliger Regressionsgeraden (TERO11 #1: $y = 0.98x + 0.25$ , $R^2 = 0.99$ ; TERO11 #2: $y = 0.99x + 0.09$ , $R^2 = 0.99$ ; DS18B20 #1: $y = 0.98x + 0.72$ , $R^2 = 0.98$ ; DS18B20 #2: $y = 0.97x + 0.61$ , $R^2 = 0.98$ ; DS18B20 #3: $y = 0.99x + 0.39$ , $R^2 = 0.99$ ) und 1:1 Line (grau). ..... | 33 |
| Abbildung 21: Ausbringungsorte der drei Mess-Stationen für den Feldversuch in Neustift im Stubaital.....  | 34 |
| Abbildung 22: Wachstumskurven (Radiusänderungen) für die sechs untersuchten Individuen im Gebiet der Kaserstatt-Alm, gemessen mittels Punktdendrometer (ZN11-T-WP) (oben) und Banddendrometer (DC2) (unten) in der Vegetationsperiode 2023. FC2 und FC3 bezeichnen die untersuchten Baumgruppen (plots), F1-F2 bezeichnen Fichten, L1-L2  |    |

|  |    |
|--|----|
| bezeichnen Lärchen. Die vertikale rote Linie markiert den Startzeitpunkt der Vergleichsmessungen.....  | 36 |
| Abbildung 23: Radiusänderungen der untersuchten Fichten (oben) und Lärchen (Mitte) in der Phase paralleler Messungen mittels Punkt- (ZN11-T-WP) und Banddendrometern (DC2 und EMS DRS26). Dargestellt sind gemittelte Werte pro Baumart und Messgerät. Unten: Niederschlagszeitreihe. .... | 37 |
| Abbildung 24: Zeitreihe der mittleren tägliche Radiusänderungen einer untersuchten Fichte (oben) und Streudiagramme der Punktdendrometer Messungen gegen die zwei Banddendrometer Messungen (unten links), sowie der beiden Banddendrometer Messungen gegeneinander (unten rechts). ....   | 38 |

## Literaturverzeichnis

**Oberleitner, F., Hartmann, H., Hasibeder, R., Huang, J., Losso, A., Mayr, S. et al.**

(2022) Amplifying effects of recurrent drought on the dynamics of tree growth and water use in a subalpine forest. *Plant, Cell & Environment*, 45, 2617–635.

<https://doi.org/10.1111/pce.14369>

## Abkürzungen

|       |                   |
|-------|-------------------|
| Abk.  | Abkürzung         |
| BGBI. | Bundesgesetzblatt |
| Art.  | Artikel           |
| usw.  | und so weiter     |
| ZM    | Zentraler Mast    |

**Projektnehmer:in** Universität Innsbruck, Institut für Informatik  
[uibk.ac.at/informatik](http://uibk.ac.at/informatik)