

ASTROSE

autarkes sensornetzwerk zum
monitoring in der energietechnik

Abschlussbericht



Projektpartner:

Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH | Amprion GmbH | MPD GmbH | ELMOS
Semiconductor AG | KE-Automation GmbH | Unilab AG | Fraunhofer ENAS und IZM |
Technische Universität Chemnitz

Projektkoordination:

Dr.-Ing. Steffen Kurth

Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme

Berlin, Dezember 2012

Autoren:

(alphabetisch)

Dr. Andreas Bertz	Technische Universität Chemnitz
Markus Braunschweig	MPD GmbH
Carsten Brockmann	Fraunhofer IZM
Dr. Claus Fleischer	KE-Automation GmbH
Dr. Volker Großer	Fraunhofer IZM
Jan Hefer	Fraunhofer IZM
Prof. Dr. Olfa Kanoun	Technische Universität Chemnitz
Dr. Lars Kemper	Unilab AG
Dr. Thomas Keutel	Technische Universität Chemnitz
Dr. Steffen Kurth	Fraunhofer ENAS
Kay Lehmann	Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH
Dr. Sebastian Lissek	Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH
Fabian Mathar	Fraunhofer IZM
Holger Neubert	KE-Automation GmbH
Markus Nowack	Technische Universität Chemnitz
Dr. Bartosz Rusek	Amprion GmbH
Tobias Schnelle	Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH
Sven Voigt	Technische Universität Chemnitz
Gregor Woldt	MPD GmbH
Xinming Zhao	Technische Universität Chemnitz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung des Verbundes	5
1.1	Thema des Verbundprojektes	5
1.2	Gesamtziel des Vorhabens, Zusammenfassung der Projektbeschreibung	5
1.2.1	Motivation	5
1.2.2	Zielstellung und Lösungsansatz	6
1.3	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen	7
1.4	Verbundpartner und struktureller Aufbau des Verbundes	7
2	Ergebnisse des Verbundprojektes	10
2.1	Ergebnisdarstellung von Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH	10
2.1.1	Problem- und Zielstellung	10
2.1.2	Lösungskonzept	10
2.1.3	Monitoringsystem ASTROSE	10
2.1.4	Planung und Montage	11
2.1.5	Ergebnisse des dritten Feldtests	11
2.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	12
2.2	Ergebnisdarstellung von Amprion GmbH	13
2.2.1	Motivation	13
2.2.2	Aufgaben- und Zielstellung	13
2.2.3	Die Ergebnisse von Amprion	13
2.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	14
2.3	Ergebnisdarstellung von Fraunhofer ENAS	15
2.3.1	Problem- und Zielstellung	15
2.3.2	Lösungskonzept	15
2.3.3	Ergebnisse des Fraunhofer ENAS	21
2.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	38
2.4	Ergebnisdarstellung von Fraunhofer IZM	39
2.4.1	Problem- und Zielstellung	39
2.4.2	Lösungskonzept	39
2.4.3	ASTROSE-Hardware	40
2.4.4	Betriebssoftware ASTROSE-eGrain	47
2.4.5	Basisstation	48
2.4.6	Graphical User Interface	51
2.4.7	Test der Komponenten	52
2.4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	54
2.5	Ergebnisdarstellung von MPD	55
2.5.1	Motivation und Zielstellung	55
2.5.2	Ergebnisse von MPD	56
2.5.3	Zusammenfassung	70
2.6	Ergebnisdarstellung der TU Chemnitz	71
2.6.1	Problem- und Zielstellung	71
2.6.2	Lösungskonzept	71
2.6.3	Ergebnisse	71
2.6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	91
2.7	Ergebnisdarstellung von ELMOS Semiconductor AG	92
2.8	Ergebnisdarstellung von KE-Automation	92

2.8.1	Problem- und Zielstellung	92
2.8.2	Lösungskonzept	92
2.8.3	Ergebnisse zur Basisstation	94
2.9	Ergebnisdarstellung von unilab	96
2.9.1	Middleware-Detailspezifikation & Kommunikationskonzept	96
2.9.2	Entwicklung und Konstruktion der Hardware	96
2.9.3	Software für eGrain Basisstation und autarken Zielsystemen	99
2.9.4	Entwicklung einer Präsentationslogik	101
2.9.5	Qualitätssicherung, Testung und Erprobung	104
3	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse für KMU	106
3.1	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von MITNETZ STROM	106
3.2	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von Amprion	106
3.3	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von Fraunhofer ENAS und IZM	107
3.4	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von MPD	107
3.5	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse der TU Chemnitz	107
3.6	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von KE-Automation	107
3.7	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von unilab AG	108
4	Angebot von Dienstleistungen mit Adressliste	109
4.1	Angebot von Dienstleistungen – envia und MITNETZ STROM GmbH	109
4.2	Angebot von Dienstleistungen – Amprion	109
4.3	Angebot von Dienstleistungen - ENAS	109
4.4	Angebot von Dienstleistungen - IZM	110
4.5	Angebot von Dienstleistungen - MPD	110
4.6	Angebot von Dienstleistungen – TU Chemnitz	110
4.7	Angebot von Dienstleistungen – KE-Automation	111
4.8	Angebot von Dienstleistungen – unilab	112
5	Abbildungsverzeichnis	113
6	Tabellenverzeichnis	117
7	Veröffentlichen/Literatur	118
7.1	Fachartikel	118
7.2	Vorträge	119

1 Einleitung und Problemstellung des Verbundes

1.1 Thema des Verbundprojektes

Intelligentes, energieautarkes mikrointegriertes Sensorfunknetz für Parametererfassung und – monitoring von Freileitungen zur Erhöhung der Netzsicherheit

im folgenden

ASTROSE

1.2 Gesamtziel des Vorhabens, Zusammenfassung der Projektbeschreibung

Grundsätzliches Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung eines autarken, sich selbst konfigurierenden Sensornetzes als Messdatenbasis für eine zeitnahe Anpassung der Stromübertragungsnetze an dezentrale Einspeisungen und an extreme Wetterbedingungen. Die Datenbasis für vor Ort erfasste Messdaten wird durch die ASTROSE-eGrains (ASTROSE-Sensorknoten) geschaffen. Die praktische Gestaltung des Kommunikationsnetzwerkes vom ASTROSE-eGrain zur "Stromschaltzentrale" bildet den zweiten Arbeitsschwerpunkt des Projektes.

1.2.1 Motivation

Die Stromnetzbetreiber stehen zunehmend vor der Herausforderung, den Energietransport bei stark wechselnden Lasten sicherstellen zu müssen. Bei Netzzuständen mit eingeschränkten Netzkapazitäten (Ausfall bzw. Reparatur von Leitungen) oder ungeplanten erheblichen Erhöhungen der Leitungsströme (z.B. unerwartet hohe, temporäre Einspeisung regenerativer Energie) könnten durch bessere Kenntnis der aktuellen Belastungsreserven im Falle der Gefährdung der Netz- und Systemsicherheit etwaige Noteingriffe in die Versorgung (Last- bzw. Einspeisereduzierung) gemäß §13 EnWG in einem höheren Grade vermieden werden. Die Situation hat sich durch gestiegene Anforderungen der Verbraucher an die Zuverlässigkeit und durch erhebliche zusätzliche Auswirkungen der Einspeisung lokaler Windparks verschärft.

Das technische Problem besteht dabei darin, dass sich die Stromleitungen beim Energietransport erwärmen und dadurch länger werden. Der Durchhang vergrößert sich und damit verringert sich der Abstand der Leiterseile zum Boden, und beispielsweise auch zu Bäumen, Häusern und Feldern. Um den geforderten Sicherheitsabstand einzuhalten ist sicherzustellen, dass bei allen Wetterlagen die Ausdehnung des Leiterseils höchstens das entsprechend der Auslegung zulässige Maximum erreicht. Der Witterungseinfluss (Umgebungstemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit) ist stark und unterliegt zusätzlich großen örtlichen Schwankungen. Typisch ist z.B. das gleichzeitige Auftreten sowohl von windexponierten Bereichen (bessere Kühlung) einer Leitung als auch von Bereichen, die im Windschatten liegen. Damit ist es praktisch sehr schwierig, die reale Leiterseiltemperatur an den kritischen Punkten genau genug über diese Umgebungsmessgrößen zu bestimmen, so dass aus Sicherheitsgründen maximale Ströme für die Leiterseile festgelegt wurden, die eine ausreichende Sicherheitsmarge beinhalten (worst-case-Bedingungen). Mit der direkten Temperaturmessung am Leiterseil oder einer anderweitigen Messung des Durchhanges könnte somit eine höhere Leistungsbelastbarkeit bei günstigen Umgebungsbedingungen (niedrige Temperatur, Wind) erreicht und die o.g. Effekte erzielt werden. Die erforderlichen Messungen sind demzufolge über ein topologisch umfangreiches Netzgebiet zu verteilen, müssen aber zentral bewertet werden. Für eine derartige Aufgabenstellung lagen zu Projektbeginn noch keine brauchbaren, zuverlässig funktionierenden und vor allem aufwandsarmen Lösungen vor. Es ist für den Endanwender des in diesem Projekt zu erarbeitenden Sensornetzes z.B. von großer Bedeutung, lokal wichtige Daten aus seinem Netzgebiet zuverlässig, drahtlos und ohne Freischalten der Freileitungen über Jahre hinweg über sein bereits installiertes Netz-Leitsystem einzukoppeln und den Funktionsumfang von

Meldungen über den Netzzustand zu erhöhen.

1.2.2 Zielstellung und Lösungsansatz

Das technische Ziel des Verbundprojektes ist ein mikrosystemtechnisch basiertes Sensornetz für die Erfassung und drahtlose Weiterleitung von physikalischen Prozessgrößen. Der Haupteinsatzfall wird bei der Energieversorgung gesehen. Insbesondere sollen die Temperatur, der Durchhang der Leiterseile, der Winkel des Leiterseils am Isolator bezüglich der Horizontalen, sowie die aktuelle Stromstärke im Leiterseil überwacht werden.

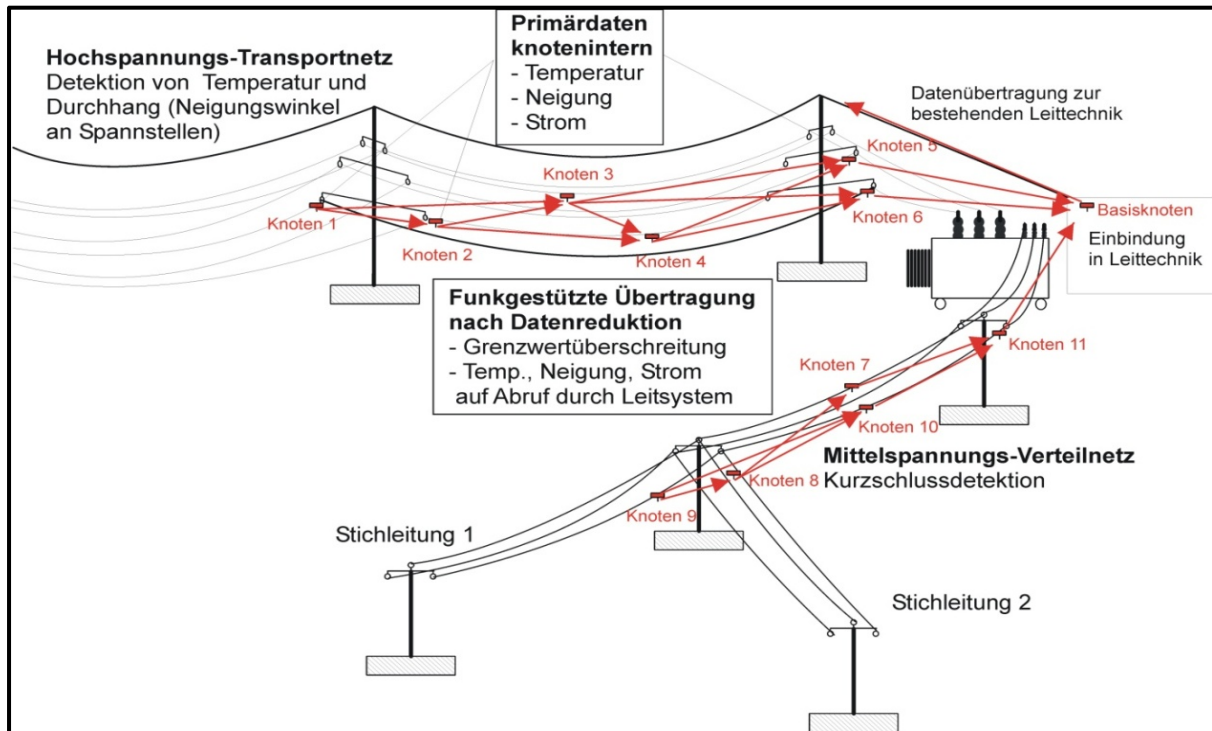


Abbildung 1.2.1: Anwendungsszenario mit Datenfluss und redundanten Sensorknoten für hohe Zuverlässigkeit

Das wirtschaftliche und sicherheitstechnische Ziel im Hauptfokus der Applikation lässt sich daran festmachen, dass bei entsprechender Überwachung, niedrigen Temperaturen und starkem Wind die Transportkapazität einer Freileitung teilweise erheblich gesteigert werden kann. Darüber hinaus kann im Winter der gefährliche Belag der Leitungen mit Eis oder Schnee erkannt werden, um ggf. rechtzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten. Zu Projektbeginn wurde weiterhin davon ausgegangen, dass auch Fehlerstellen mit Kurzschlüssen im Mittelspannungsfreileitungsnetzen schnell und relativ ortsgenau detektiert werden können. Eine wirtschaftliche Bewertung dieser Maßnahmen ist äußerst schwierig. Einerseits gibt es in Deutschland noch kein „offizielles“ Maß dafür, wie Unterbrechungen der Stromversorgung – von der lokalen Störung bis zum Black out – monetär bewertet werden können (z.B. € pro ausgefallene kWh). Zwar haben größere flächendeckende Störungen unabhängig von aktuellen Beispielen eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, sind aber mit erheblichen nachfolgenden Schwierigkeiten verbunden. Die bei den Black out's im Jahr 2003 öffentlich genannten Zahlen in Milliardenhöhe (z.B. USA, Italien) zeigen, dass die Vermeidung bereits eines Black out's die Entwicklungsaufwendungen für entsprechende Technik sogar in erheblicher Höhe volkswirtschaftlich rechtfertigt. Dies führt besonders dann zu entsprechenden Lösungen, wenn die Rahmenbedingungen für die Netzbetreiber (Regulierung, Gesetze, Verordnungen, Vorschriften) entsprechend beschaffen sind.

1.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das autonome vernetzte Sensorsystem wird an bestehende Freileitungen und an Betriebsmitteln der Energieversorgungsunternehmen appliziert. Bei Einsatz einer Internet- oder GSM-basierten Lösung für die Basisknoten (Basisstationen) und entsprechender Software sind zudem Einsatzsituationen in der Transport- und Anlagentechnik möglich. Aus diesem Grund muss es leicht, klein und flexibel sein, was durch die drahtlose und energieautarke Arbeitsweise, den integrierten Mikroprozessor, sowie einen neuartigen ASIC's ermöglicht wird. Alle Komponenten der Sensorknoten werden mit Mikrosystemtechnologien realisiert und in einem kompakten, hochintegrierten Package umgesetzt.

Gleichzeitig werden extrem hohe Anforderungen an die Robustheit der Kommunikation gegenüber Störungen durch Teilentladungen, Knotenausfall usw. und an die Zuverlässigkeit des Systems gestellt. Die energieautarke und energiesparsame Arbeitsweise des Sensorknotens wird durch Ausnutzung der elektromagnetischen Felder um die Freileitung herum zur Energiegewinnung und durch Anwendung von low power Schaltungs- und Übertragungstechnik realisiert. Einen wesentlichen Vorteil bietet an dieser Stelle wiederum die Mikrointegration.

1.4 Verbundpartner und struktureller Aufbau des Verbundes

Das Projektkonsortium besteht aus sechs industriellen Partnern, wobei davon zwei Firmen den KMU-Status (KE-Automation GmbH, unilab AG) erfüllen, sowie zwei Forschungseinrichtungen. Nachfolgend sind die Projektpartner und ihre Aufgabe im Verbundprojekt genannt:

Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH (MITNETZ STROM), Halle

Aufgabe: Gesamtkonzept ASTROSE und Test der Gesamtlösung Hochspannung-Verteilnetz

AMPRION GmbH (AMPRION), Dortmund

Aufgabe: Gesamtkonzept ASTROSE und Test der Gesamtlösung Hochspannung-Transportnetz

Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS), Chemnitz

Aufgabe: Antennenentwicklung für die Sensorknoten und Test des ASTROSE-Netzwerkes

Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Berlin

Aufgabe: Miniaturisierungstechnologien für energieautarke Systeme zum Monitoring in der Energietechnik und Erforschung sowie Entwicklung der ASTROSE-Software

Microelectronic Packaging Dresden GmbH (MPD), Dresden

Aufgabe: Entwicklung des Gehäuses für den ASTROSE-Sensorknotens und Entwicklung der AVT des Neigungssensors

TU Chemnitz – Professur Mess- und Sensortechnik (MST), Chemnitz

Aufgabe: Erarbeitung von Konzepten und deren Umsetzung zur autarken Energieversorgung der ASTROSE-Sensorknoten aus dem Randfeld der Leiterseile

TU Chemnitz – Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM), Chemnitz

Aufgabe: Forschung und Entwicklung von 2D-Lagesensoren

ELMOS Semiconductor AG (ELMOS), Dortmund

Aufgabe: Entwicklung eines Sensorsystems zur Temperatur-, Neigung- und ggf. Schockmessung inkl. Signalauswertung als System-in-Package für energieautarke Applikationen

KE-Automation GmbH (KE-Automation), Limbach-Oberfrohna

Aufgabe: Konzept, Entwicklung und Realisierung der ASTROSE-Basisstation für Anwendungen im Verteilnetz

Unilab AG (Unilab), Paderborn

Aufgabe: Forschung zu und Entwicklung von universellen offenen Basisstationen für das ASTROSE-Sensornetz für erweiterte Einsatzbereiche ohne die Notwendigkeit des Bestehens proprietärer Leittechnik insbesondere für Anwendungen im Transportnetz

1.5 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele der Projektpartner sowie Demonstratoren

In diesem Verbundprojekt sind antragsgemäß

- Sensoren mit erweitertem Messbereich und erhöhter Genauigkeit zur direkten Messung und spezifische ASIC's für die Messwertverarbeitung,
- Software und Algorithmen für die Selbstvernetzung und Rekonfiguration des Netzes bei Störungen (z.B. Blitzeinschlag),
- Integrationstechnologien für Sensoren, ASIC, Controller und Transceiver,
- spezielle Packaging- und Housing-Varianten für extreme klimatische und elektrische Bedingungen,
- neuartige elektronische Schaltungen zur Stromversorgung aus dem Randfeld der Leiterseile,
- leistungsfähige Sende-/Empfängereinheiten einschließlich der erforderlichen Software für Reichweiten bis 500 m,
- Anpass-Hard- und Software zur Einkopplung der Sensorinformationen in das jeweilige Leitsystem der Energieversorger

zu entwickeln und unter realen Einsatzbedingungen zu erproben.

Die Sensoren sollen geeignet sein,

- die Oberflächen-Temperatur der Leiterseile zur Bestimmung der Auslastung (-40°C bis maximal 120°C, Genauigkeit < 2 K),
- Winkel- und Winkeländerungen des Leiterseiles an den Aufhängepunkten zur Bestimmung der Durchgangsänderungen der Leiterseile (Winkeländerung bis 10°, Genauigkeit 0,01°),
- den Strom durch das Leiterseil zur Bestimmung des Betriebsstromes (bis 1000 A, Genauigkeit < 5 %), des Kurzschlussstromes und der kurzschlussbelasteten Leiter (bis 50 kA, Genauigkeit < 5 %)

zu messen. Weiterhin soll die Architektur der Sensorknoten insofern offen sein, um zusätzliche Messgrößen aufnehmen zu können.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele bestehen insbesondere in folgend aufgeführten Innovationen und bilden die hauptsächlichen Forschungsschwerpunkte des Projektes:

- Gewährleistung der Energieversorgung der Sensorknoten aus dem Randfeld von Hochspannungsleiterseilen unter Betriebsbedingungen (Spannungstransienten, Teilentladungen, Netzoberwellen, Bereifung, Eis, Wasser, Blitzeinschlag in Leitungsnetz),
- Niedrigst-Energie Sensorik und ASIC (low power Schaltungsdesign, kapazitive Sensorik) sowie energieoptimierte Betriebsweise des Funkkommunikation,
- Aufrechterhaltung einer Funkkommunikation zwischen den Sensorknoten im

elektrischen Feld von Hochspannungsfreileitungen unter Beachtung der durch Teilentladungen verursachten Breitbandstörung,

- Software-Betriebssystem für die Sensorknoten zum Betrieb als intelligentes Sensorsystem, zur Datenreduktion und zur Vernetzung und zur selbständigen Umkonfiguration des Netzes unter Ausnutzung von Redundanzen,
- Robustes hermetisches System für die Bedingungen am Leiterseil hinsichtlich Messgrößenspanne, Genauigkeit, Einfluss von Temperatur und mechanischen Spannungen durch das Packaging,
- Anbindung an Kommunikationsnetze der Energieversorger,
- Erarbeitung eines universellen Basisknotens für alternative Applikationen.

Im Projekt soll ein Demonstrator in Form eines Sensornetzes mit Basisstation erarbeitet, zuerst in Laboratorien und anschließend im Feldtest an Freileitungen erprobt werden. Nach der Bereitstellung und eingehendem Test wird eine bessere Beurteilung von Maßnahmen zur Vorbereitung der dem Projekt folgenden Umsetzungsmaßnahmen in eine Großserie möglich.

2 Ergebnisse des Verbundprojektes

2.1 Ergebnisdarstellung von Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH

2.1.1 Problem- und Zielstellung

Aufgrund der durch die Bundesregierung ausgerufenen Energiewende erfolgt aktuell ein starker Zubau an regenerativen Energieerzeugungsanlagen im Netzgebiet der MITNETZ STROM. Dabei übersteigt die installierte Leistung aus erneuerbaren Energien bereits heute die Jahresmaximallast bei weitem. Infolge dessen kommt es abhängig von der Wetterlage zu einer Lastflussumkehr und einer starken Belastung des Verteilnetzes. Eine Abschaltung der EE-Anlagen ist aus wirtschaftlichen Gründen zu vermeiden, da nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz auch die nicht eingespeiste Energiemenge vergütet werden muss.

Eine Lösung zur Beseitigung der Netzengpässe ist der Netzausbau. Dieser ist jedoch sowohl kostenintensiv, als auch zeitaufwendig. Langwierige Verfahren zur Genehmigung neuer Stromtrassen verhindern einen zügigen Ausbau.

Eine kurzfristige und vergleichsmäßig kostengünstige Lösung bietet das Freileitungsmonitoring zur optimalen Auslastung des vorhandenen Stromnetzes. Die maximalen Strombelastungen einer Freileitung sind in der DIN EN 50182 für die standardisierten Umgebungsbedingungen von 35°C Außentemperatur, einer senkrechten Windanströmung von 0,6 m/s und voller Globalstrahlung von 900 W/m² angegeben. Da diese Wetterbedingungen nur an wenigen Tagen im Jahr vorliegen, ist es nach VDE-Anwendungsregel VDE-AR-N 4210-5 möglich, den Betriebsstrom zu erhöhen, solange die maximale Leiterseiltemperatur nicht überschritten und die minimalen Sicherheitsabstände zum Boden oder zu Näherungsobjekten nicht unterschritten werden.

Die bisherige Berechnung des zulässigen Maximalstroms basiert auf der gemessenen Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit. Aufgrund geografischer Gegebenheiten ist die Freileitung teilweise sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. So kann zum Beispiel eine durch Wald windgeschützt verlaufende Freileitung eine lokal erhöhte Temperatur und somit einen vergrößerten Durchhang besitzen. Die Berechnung des maximalen Stromflusses muss sich deshalb nach den ungünstigsten Witterungsbedingungen entlang der Trasse richten.

Im vorliegenden Projekt ASTROSE wird ein System zum Leiterseilmonitoring vorgestellt, welches die Temperatur und den Durchhang des Leiterseils an mehreren Punkten einer Trasse ermittelt.

2.1.2 Lösungskonzept

Es existieren bereits verschiedene Konzepte zur Leiterseilüberwachung. Diese lassen sich in direkte und indirekte Methoden unterscheiden. Die direkten Verfahren ermitteln die Temperatur oder den Durchhang des Leiterseils, wodurch unmittelbar auf dessen vorhandene Auslastung geschlossen werden kann. Die indirekten Verfahren ermitteln den Belastungszustand ohne eine direkte Messung von Temperatur oder Durchhang.

Keines der bereits existenten Verfahren misst beide kritischen Netzparameter gleichzeitig. Die indirekten Methoden sind zudem stets auf ein mathematisches Modell angewiesen, dessen Genauigkeit nur mit steigender Komplexität wächst.

2.1.3 Monitoringsystem ASTROSE

Das Monitoringsystem ASTROSE nutzt zur Berechnung des Durchhangs das Verfahren der Nei-

gungswinkelmessung. Es besteht aus energieautarken und autonom arbeitenden Sensorknoten sowie einer Basisstation zur Signalverarbeitung und –weiterleitung.

Die Energieversorgung erfolgt über das elektrische Feld der Freileitung. Das metallbeschichtete Gehäuse des Sensorknotens bildet gemeinsam mit dem Leiterseil zwei Elektroden unterschiedlichen Potentials. Die mit Hilfe eines Transformators und eines entsprechenden Lademanagements umgewandelte Energie wird in einem Doppelschichtkondensator gespeichert.

Innerhalb der Sensorknoten erfolgt die Ermittlung des Durchhangs und der mittleren Temperatur eines Spannungsfeldes über die Messung des Neigungswinkels. Die beiden eingesetzten Neigungssensoren ermitteln den Winkel des Sensormoduls in X- und Y-Richtung. Durch die Montage nahe der Trag- bzw. Abspannklemme lassen sich der Ablaufwinkel (X-Richtung) und das Ausschwingen (Y-Richtung) ermitteln. Weiterhin beinhaltet das Modul einen Temperatursensor. Über diesen ist eine Validierung der berechneten Temperaturen möglich. Die ermittelten Messdaten werden mittels eines Mikrocontrollers weiterverarbeitet und die Signale an eine im Gehäuse integrierte Richtantenne übertragen.

Die Messwerte werden von jedem Sensor an den nächsten und übernächsten Sensor entlang einer Leitungstrasse bis hin zum Umspannwerk mit Hilfe einer WLAN-Verbindung übertragen. Die dort verbaute aktive Antenne empfängt die Daten von bis zu fünf Sensorketten. Ergänzt wird die Antenne um einen Industrierechner, der die empfangenen Daten weiterverarbeitet und über ein Web-Interface zur Verfügung stellt.

2.1.4 Planung und Montage

Die Auswahl der geeigneten Sensorpositionen ist vorrangig von der Sendereichweite der Sensoren abhängig, welche bei ca. 1000 m liegt. Da aus Redundanzgründen jeder Sensor die Daten an zwei vorgelagerte Sensoren überträgt, verringert sich der maximale Abstand der Sensoren auf ca. 500 m. Aus Sicherheitsgründen ist es weiterhin sinnvoll, jedes Spannungsfeld zu überwachen. Um den Montageaufwand zu reduzieren ist es zielführend, beide Spannungsfelder eines Mastes mit Sensoren zu bestücken, wodurch nur jeder zweite Mast angefahren werden muss.

Zur Installation der Sensoren ist eine Freischaltung der betroffenen Leitung erforderlich. Um die Netzstabilität nicht zu gefährden, ist es notwendig, die Montagen mit anderen Instandhaltungsmaßnahmen zu koordinieren. Die Sensormontage ist über eine Hebebühne oder durch Besteigen des Mastes möglich. Dabei ist die Verwendung einer Hebebühne weniger zeitintensiv, jedoch stark von der Zugänglichkeit der Maste abhängig.

2.1.5 Ergebnisse des dritten Feldtests

Zu Beginn des dritten Feldtests am 19.09.2012 wurden vier Sensorknoten auf die 110 kV-Freileitung von Niederwiesa nach Pockau montiert. Die Länge der Sensorkette vom ersten bis zum vierten Sensor beträgt 900 m. Durch die Zuschaltung der Spannung während eines Senderversuchs des Sensorknotens 2 wurde dieser beschädigt und sendet seither nur noch sporadisch. Alle weiteren Sensorknoten laufen im normalen Betrieb.

Der Sensorknoten 1 wurde nahe des Umspannwerkes Niederwiesa auf einem sehr kurzen Spannungsfeld von lediglich 56 m Länge montiert. Aufgrund der geringen Spannungsfeldlänge vergrößert sich der Einfluss der Abspannkette auf die Ausdehnung des Leiterseils. Aus diesem Grund unterscheiden sich der theoretische und der praktische Zusammenhang zwischen Leiterseiltemperatur und Neigungswinkel deutlich. Da sich der Neigungswinkel aufgrund des großen Einflusses der Abspannkette bei steigender Temperatur weniger stark ändert, wird stets eine zu niedrige Temperatur berechnet. Aufgrund der kleinen Durchhänge stellen diese Abweichungen jedoch kein Sicherheitsrisiko dar.

Der Vergleich der aus dem Durchhang berechneten mit der im Sensorknoten gemessenen

Temperatur zeigt eine hohe Übereinstimmung. Lediglich bei Temperaturwerten zwischen 10°C und 5°C existieren größere Unterschiede. Diese sind auf eine vermutlich fehlerhafte Vorzeichenberechnung innerhalb des Mikrocontrollers zurückzuführen.

Der Vergleich der Messwerte der übrigen Sensoren mit den Berechnungen des Trassierungsprogramms FM-Profil zeigt nur eine geringe Differenz von maximal 10cm. Dadurch kann die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des Systems nachgewiesen werden. Da der vom ASTROSE-System berechnete Bodenabstand kleiner ist, als der des Trassierungsprogramms, ergibt sich ein zusätzlicher Sicherheitsabstand.

Mit Hilfe der im Sensorknoten gemessenen Temperatur kann zusätzlich eine Konsistenzprüfung durchgeführt werden. Große Differenzen beider Werte weisen auf einen kritischen Systemzustand, wie z.B. Isolatorbruch oder Eislasten hin. Bei kleinen Spannfeldlängen ist eine gesonderte Definition der kritischen Temperaturdifferenz erforderlich.

Neben der möglichst genauen Berechnung des Durchhanges ist ein zuverlässiger Betrieb für den Netzbetreiber von großer Bedeutung. Die Messung der Signalqualität über einen Zeitraum von 26 Tagen zeigt, dass der Sensor 1 im Mittel 98% der gesendeten Pakete empfängt, die Werte der Sensoren 3 und 4 sind mit 94% und 91,6% etwas geringer. Aufgrund der Beschädigung liegt die Signalqualität des Sensors 2 nur bei etwa 25%.

Der Feldtest zeigt, dass die Signalqualität mit steigendem Abstand zur Basisstation sinkt. Fallen zwei benachbarte Sensorknoten gleichzeitig aus, können die Informationen aller dahinter liegender Knoten nicht übertragen werden. Die Signalqualität ließe sich mit Hilfe einer bidirektionalen Signalübertragung verbessern, bei der an beiden Enden der Sensorkette eine Basisstation installiert wird.

2.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Netzbetreiber hat bei einer benötigten Erhöhung der Transportkapazitäten zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Eine Netzverstärkung bzw. Netzneubau ist nachhaltig, jedoch sehr kostenintensiv und aufgrund aufwendiger Genehmigungsverfahren unter Umständen sehr langwierig. Kurzfristig können Engpässe mithilfe des Freileitungsmonitorings überbrückt werden, indem die Potentiale der Leitungen voll ausgeschöpft werden. Die anfallenden Kosten für die Installation und den Betrieb des Monitoringsystems sollten durch den Erlös der gesteigerten Übertragungskapazität gedeckt werden. In der Kosten-Nutzen-Rechnung müssen die gestiegenen Übertragungsverluste mit berücksichtigt werden, welche sich aus dem höheren Betriebsstrom ergeben.

Das Freileitungsmonitoring-System ASTROSE bietet gute Voraussetzungen, die Netzführung zu optimieren. Das hohe Windaufkommen, welches die Netze aufgrund der großen eingespeisten Energiemengen stark belastet, führt gleichzeitig zu einer starken Kühlung der Freileitungen. Durch die Überwachung jedes Spannfeldes der Freileitung kann diese mit einem erhöhten Strom betrieben werden, ohne dabei die Sicherheitsrisiken zu erhöhen.

Für einen dauerhaften Einsatz im Netzbetrieb ist neben einer Steigerung der Zuverlässigkeit vor allem eine leicht verständliche Visualisierung der Messwerte erforderlich. Der Netzoperator muss in die Lage versetzt werden, in kurzer Zeit einen Überblick über den Netzzustand zu erlangen, um anschließend die benötigten Schalthandlungen abzuleiten. Entscheidend ist die Darstellung der Zustände der am stärksten belasteten Netzabschnitte, da diese den Netzengpass darstellen.

2.2 Ergebnisdarstellung von Amprion GmbH

2.2.1 Motivation

Das Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) setzt Anreize zur Erzeugung der Energie aus erneuerbaren Quellen. Das Ziel ist bis zum Jahr 2020 35% der elektrischen Energie in Deutschland aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen. Die Allokation der erneuerbaren Erzeugung ist weit von den Lastzentren entfernt. Des Weiteren sind die Einspeisungen aus erneuerbaren Energiequellen sehr volatil. Dadurch steigt bereits heutzutage bei nur 10% der installierten erneuerbaren Erzeugung die Belastung des Übertragungsnetzes signifikant. Darüber hinaus bewirkt der Ausstieg aus Kernenergie bis 2022 eine weitere Belastung des Netzes. Da der Freileitungsneubau im Rahmen des heutigen Genehmigungsprozesses und geringer Akzeptanz der Bevölkerung schwierig erscheint, sind für das Erreichen der politischen Ziele neue und innovative Lösungen zur Erhöhung der Übertragungskapazität der bereits vorhandenen Freileitungen notwendig.

Eine solche Lösung ist der Einsatz des „witterungsabhängigen Freileitungsbetriebes“. Die Idee dabei ist die Freileitungen bei niedrigeren Umgebungstemperaturen (<35°C) stärker (>100%) auszulasten.

Für den witterungsabhängigen Freileitungsbetrieb (wFB) werden zahlreiche Informationen über den aktuellen Zustand (Durchhang) der Freileitung benötigt. Anhand dieser Information kann die momentane Strombelastbarkeit der Freileitung berechnet werden.

Das Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Überwachungssystems, welcher den Seildurchhang überwacht bzw. berechnen lässt und die witterungsabhängige Strombelastung der Freileitung ermöglicht.

2.2.2 Aufgaben- und Zielstellung

Die Aufgabe von Amprion (ehemals RWE Transportnetz Strom) im Projekt bestand darin, das Lastenheft zu erstellen, die Entwicklung des Überwachungssystems zu begleiten und die Pilotanwendungen zu realisieren.

2.2.3 Die Ergebnisse von Amprion

- Das Lastenheft¹⁾folgende Seite ist erstellt worden.
- Die Entwicklung der ASTROSE ist wissenschaftlich begleitet worden. Viele Ideen wie z.B. Verwendung der Reparaturspiralen zur Befestigung des Sensors sind in der Finallösung zu finden (siehe Abbildung 2.5.11).
- Amprion hat die Messungen der Funkübertragung am Leiterseil an einer 380-kV-Freileitung¹⁾ ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Funkübertragung gut funktioniert und der Abstand von 500m zwischen Sensoren nicht verringert werden muss (siehe Kapitel 2.3.3.).

Bei der Prüfung hat sich der Einbau des Überwachungssystems an einer 220-kV- und 380-kV-Freileitung als sehr komplex erwiesen. Aufgrund der Höhe der Leiterseile ist die Montage ohne einen speziellen Hubwagen nicht möglich. Die Kosten für einen speziellen Hubwagen und Vorbereitung dessen Arbeitsplatzes übertrifft mehrfach die Herstellungskosten des Sensors. Eine manuelle Montage ist sehr aufwendig, da der Monteur auf den Mast und dann über den Isolator zum Seil klettern muss. Eine derartige Maßnahme dauert ca. einen halben Tag pro Sensor. Für die Bestückung von 100 km der Freileitung wer-

den ca. 200 Sensoren notwendig. Dies entspricht der Freischaltdauer von ca. 50 Tagen (mit zwei Teams). Bei der heutigen Auslastungssituation sind solche Zeiträume kaum denkbar. Der Montageaufwand übertrifft auch in diesem Fall mehrmals die Herstellungskosten des Überwachungssystems. Aus o.g. Gründen ist der Einsatz von ASTROSE nur eine Option für die neugebaute Freileitung.

- Die genaue Messung der Seiltemperatur stellt eine Herausforderung dar. Die Sensoren, die an das Seil angebracht werden, beeinflussen an dieser Stelle die Thermik des Seiles. Die Messung der Temperatur an dieser Stelle, ist mit einem Fehler versehen. Diese Eigenschaft ist im Labor von Amprion untersucht worden. Bei dem Versuch¹⁾ ist noch nicht die zukünftige Befestigung mit der Reparaturspirale berücksichtigt worden. Diese Komponente wird die Messgenauigkeit der Temperatur deutlich verschlechtern.

Unter Anderem haben diese Erkenntnisse dazu geführt, dass sich die weiteren Entwicklungen von ASTROSE auf die Methode über den Neigungswinkel zur Bestimmung des Durchhanges konzentrieren.

- Das Konzept¹⁾ zur Datenformat und zur Datenqualität ist erstellt worden.

Die datentechnische Einbindung derartigen Systeme erfordert die Erfüllung von sehr strengen Sicherheitsstandards (ISMS). Aus diesem Grund war die Einbindung der Pilotanwendung an das LIVE-Leitsystem nicht möglich. Die Ersatzlösung d.h. datentechnische Anbindung über so genanntes DiagnoseLAN ist vorgeschlagen worden.

- Die Pilotanwendung des ASTROSE-Überwachungssystems ist nicht realisiert worden. Die Gründe dafür sind wie folgt:
 - Die aktuelle Auslastungssituation des Netzes hat das mehrmalige Freischalten eines sich im Betrieb befindenden 380-kV-Stromkreises für die Montage der Sensoren und ggf. darauffolgende Einstellungen nicht ermöglicht.
 - Die Befestigung des Systems mit Schraubklemmen ist aufgrund Verkehrssicherungspflicht als ungenügend eingestuft worden. Die Reparaturspirale ist erst in der letzten Projektphase eingeführt worden. Der Vorlaufzeit für eine Pilotanwendung war deutlich zu kurz.
 - Die Hochspannungstests (z.B. Blitzüberspannung) hat das System nicht bestanden.

2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Messung der Temperatur ist mit vielen Ungenauigkeiten verbunden. Aus diesem Grund wird das Nutzen des Neigungswinkels als sinnvoll gesehen

Die datentechnische Einbindung derartigen Systeme erfordert die Erfüllung von sehr strengen Sicherheitsstandards (ISMS).

¹⁾ Hierzu liegen bei Amprion ausführliche zum Teil vertrauliche Berichte vor.

2.3 Ergebnisdarstellung von Fraunhofer ENAS

2.3.1 Problem- und Zielstellung

a) Antenne und Antennenfilter

Für die Kommunikation der Sensorknoten untereinander und mit der Basisstation im 2,4 GHz-ISM-Band sind Antennen erforderlich, die neben einer hinreichend guten Impedanzanpassung im genutzten Frequenzband, einen genügend hohen Antennengewinn besitzen und gleichzeitig im sehr starken elektrostatischen Feld, das in der unmittelbaren Umgebung der Hochspannungsleiterseile vorhanden ist, keine Teilentladungen provoziert. Durch das elektrostatische Feld beeinflusste Ströme sollen in geeigneter Weise über die Schaltungsmasse zum Leiterseil abführbar sein oder zur Gewinnung der Betriebsenergie des Sensorknotens beitragen. Bauform und Ausdehnung der Antennen soll so gestaltet sein, dass sie in die äußere Hülle der Sensorknoten passen und in das elektrische Konzept integrierbar sind. Zur Unterdrückung von Störsignalen und zur galvanischen Trennung der Antenne vom Front-End-Modul des Transceivers wird weiterhin ein Antennenfilter mit guter Impedanzanpassung im genutzten Frequenzbereich, hoher Weitabselektivität und einer Spannungsfestigkeit der Isolation zwischen den beiden Signalports von bis zu 10 kV benötigt.

b) Kalibrierung des Neigungssensors

Als Neigungssensor wird ein zweiachsiger kapazitiver Beschleunigungssensor des Projektpartners ZFM eingesetzt, der in der AIM-Mikromechaniktechnologie hergestellt ist. Ein ASIC des Projektpartners ELMOS wird zur Kapazitätsmessung, Kalibrierung und Wandlung des Signals in digitale Werte räumlich unmittelbar am Beschleunigungssensor eingesetzt. Die Sensoren zeigen Exemplarstreuung in den Parametern Skalenfaktor und Offset, die durch den Kalibrierprozess ermittelt und entsprechende Korrekturwerte in den Speicher des ASIC eingetragen werden. Das Ziel der Kalibrierung besteht darin, den Offset der Sensoren auf ein Minimum nahe Null (2050 LSBs) zu reduzieren und den Skalenfaktor aller Sensoren auf einen identischen Wert (5,5 LSBs je mg) einzustellen.

c) Koordinierung der Feldversuche

Die Funkkommunikation und die Systemfunktion sind nicht vollständig unter Laborbedingungen prüfbar. Deshalb machten sich Feldversuche erforderlich. Folgenden Fragestellungen wurde dabei nachgegangen:

- Inwiefern weicht die Dämpfung des Funksignals unter den besonderen Bedingungen der Montage auf Leiterseilen und mit Metallmasten im Kommunikationsweg von theoretisch vorhersagbaren Werten einer Freifeldübertragung ab?
- Welche Einflüsse üben Teilentladungen im Bereich der Hochspannungsleitungen auf die Übertragungsqualität der Funkkommunikation aus?
- Welche Reichweiten sind zwischen einzelnen Sensorknoten im praktischen Einsatz zu erzielen?
- Ist das Schaltungs- und Entstörkonzept, das beim Aufbau der Sensorknoten verfolgt wurde, für den Einsatzzweck ausreichend?
- Ist die Funktionalität des Systems gewährleistet und welche Schwierigkeiten bestehen im Detail?

2.3.2 Lösungskonzept

a) Antenne und Antennenfilter

Es wurde auf das Konzept einer Schlitzantenne gesetzt. Im Gegensatz zu stabförmigen Antennen lassen sich Schlitzantennen so gestalten, dass sie keine hervorstehenden metallischen Teile aufweisen, die Teilentladungen hervorrufen können. Der eigentliche Strahler wird durch einen relativ großen und recht frei gestaltbaren metallischen Körper gebildet, wobei ein genau

dimensionierter Schlitz den eigentlichen Resonator und somit den Strahler ausbildet.

Das Design basiert auf eine in [1] vorgestellte Breitband-Schlitzantenne. Es wurden in Abweichung zu [1] jedoch zwei Schlitz zu einem Antennenpaar kombiniert, um die Richtempfindlichkeit zu vergrößern und lediglich eine Speisestruktur je Schlitz eingesetzt. Die Antennenstruktur und das Anpassnetzwerk wurden auf zweiseitigem Laminatsubstrat (Rogers 4003) erzeugt. Eine allseitig metallisierte Kunststoffkapsel bildet einen rückseitigen Hohlraum, dadurch dass das Laminatsubstrat auf der Kapselöffnung mit leitfähigem Klebstoff befestigt ist. Details sind in [2] veröffentlicht. Zwei dieser Antennen sind jeweils in einem Sensorknoten stirnseitig so eingesetzt, das die Richtung des maximalen Antennengewinns längs der Leiterseile zeigt.

Zur Dämpfung von Störsignalen, die von der Netzfrequenz oder von Teilentladungen herrühren, wurde ein Edge-Coupled-Mircostrip-Filter 2.Ordnung entwickelt. Dieses Filter besteht aus mehreren metallischen, galvanisch getrennten Leiterzügen. Deren Länge und Abstand zueinander bestimmt die gewünschte Frequenzselektivität. Am Eingang des Bandpassfilters befindet sich ein integrierter Power-Splitter. Damit lässt sich ein Signal auf beide Antennen des Sensorknotens aufteilen bzw. lassen sich umgekehrt von außen kommende Signale auf einen Empfängereingang zusammenführen. Darüber hinaus ist das Filter in einem segmentierten Metallgehäuse eingeschlossen, um eine direkte Kopplung zwischen den Filterstufen zu vermeiden und eine genügend hohe Weitabselektivität zu erreichen.

b) Kalibrierung des Neigungssensors

Das Konzept besteht darin, im Erdschwerefeld mittels eines Teilapparates die Sensoren einschließlich ASIC mit einer definierten Beschleunigung zu beaufschlagen und softwaregesteuert die Sensorkennlinie zu ermitteln. Der Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Neigungswinkel im Erdschwerefeld ist naturgemäß nichtlinear, lässt sich jedoch für kleine Neigungswinkel linear approximieren. Die approximierte Kennlinie beinhaltet den Skalenfaktor und das Offset im zu nutzenden Neigungswinkelbereich (-30° ... 30°). Aus beiden Größen werden Korrekturfaktoren ermittelt, die im ASIC gespeichert, erwarten lassen, dass Offset und Skalenfaktor der Sensoren untereinander nahezu nicht voneinander abweichen. Letztendlich erfolgt eine Überprüfung nach der Kalibrierung.

c) Versuche und Versuchsziele

Dämpfung des Funksignals unter den besonderen Bedingungen der Montage auf Leiterseilen

Um die Rahmenbedingungen für die Antennen- und Filterentwicklung einschätzen zu können wurden zunächst theoretische Untersuchungen bezüglich Sendefrequenz, Sendeleistung, Eingangsempfindlichkeit der Transceiver und dem ASTROSE-Szenario entsprechendem Link-Budget, welches die Eigenschaften der Funkverbindung beschreibt, angestellt. Anschließend wurde zur Bestätigung der Theorie ein umfangreicher Feldtest an einer im Abbau befindlichen und damit geerdeten 110kV Freileitung durchgeführt.

Die Freiraumdämpfung L_{FS} nach folgender Gleichung

$$L_{FS} = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda} \right),$$

beschreibt die Reduzierung der Leistungsdichte bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und ist neben dem Abstand zwischen Sender und Empfänger d von der Wellenlänge λ abhängig. Bei einem angenommenen Link-Budget von 110 dB beträgt die maximale Reichweite 3,2 km bei 2,4 GHz. Die Reichweite bzw. die Übertragungssicherheit wird letztendlich durch die Empfindlichkeit des Receivers bestimmt. Die Empfindlichkeit spezifiziert die Leistung, die am Chip anliegen muss, um dem Decoder zu erlauben, das empfangene Signal vom Rauschen zu unterscheiden. Übliche Werte dafür liegen zwischen -90 dBm und -100 dBm.

Die Eigenschaften einer Funkverbindung werden im Wesentlichen durch das Link-Budget wie folgt beschrieben:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX} ,$$

wobei P_{RX} die empfangene Leistung, P_{TX} die Sendeleistung, G_{TX} der Antennengewinn der Sendeantenne, L_{TX} die Verluste im Sendezweig, L_{FS} die Freiraumdämpfung, L_M eine Zusatzdämpfung, G_{RX} der Antennengewinn der Empfangsantenne und L_{RX} die Verluste im Empfangszweig darstellen.

Bei Annahme einer Sendeleistung von 18 dBm, einem Antennengewinn von 5 dBi, Verlusten der Signalkette von jeweils 3 dB sowie einem zusätzlichen Verlust von 10 dB ergibt sich bei -90 dBm Empfindlichkeit eine maximal zulässige Freiraumdämpfung von 102 dB. Dies entspricht einer theoretischen Reichweite von mehr als 3 km bei 2,4 GHz. Die Abschätzung unterliegt der Annahme, dass die Strommasten sowie andere Einflussfaktoren das Link-Budget um 10 dB reduzieren.

Um diese noch offenen Fragen zu klären wurde am 19.10.2009 ein umfangreicher Feldtest in Leuna Süd an der in der Demontage befindlichen und damit geerdeten 110kV-Freileitung DaLütN4 / HIO-Le-Ws 1 durchgeführt (Abb. 2.3.1).



Abbildung 2.3.1: Satellitenkarte des Versuchsgebiets mit Messpunkten

Teilentladungen im Bereich der Hochspannungsleitungen

Weiterhin wurden Funkübertragungen am unter Hochspannung befindlichen Leiterseil im Hochspannungslabor der Professur Energie- und Hochspannungstechnik der TU Chemnitz durchgeführt. Dabei wurden zunächst die Sprühentladungen durch das offene Ende des Leiterseils provoziert und mit Hilfe des Spektrumanalyzers und einer Wurfantenne (ca. 2m langer Draht) die Störpegel aufgenommen. Anschließend wurde ein Funkknoten bestehend aus Antenne, Funksender und Filter neben der Hochspannungsleitung aufgebaut (siehe Abb.2.3.2) und die Empfangsleistung bei verschiedenen Spannungen (0 bis 80kV) gemessen. Danach wurde der Funkknoten auf dem Leiterseil befestigt und die Empfangsleistung erneut bei verschiedenen Spannungen aufgenommen.

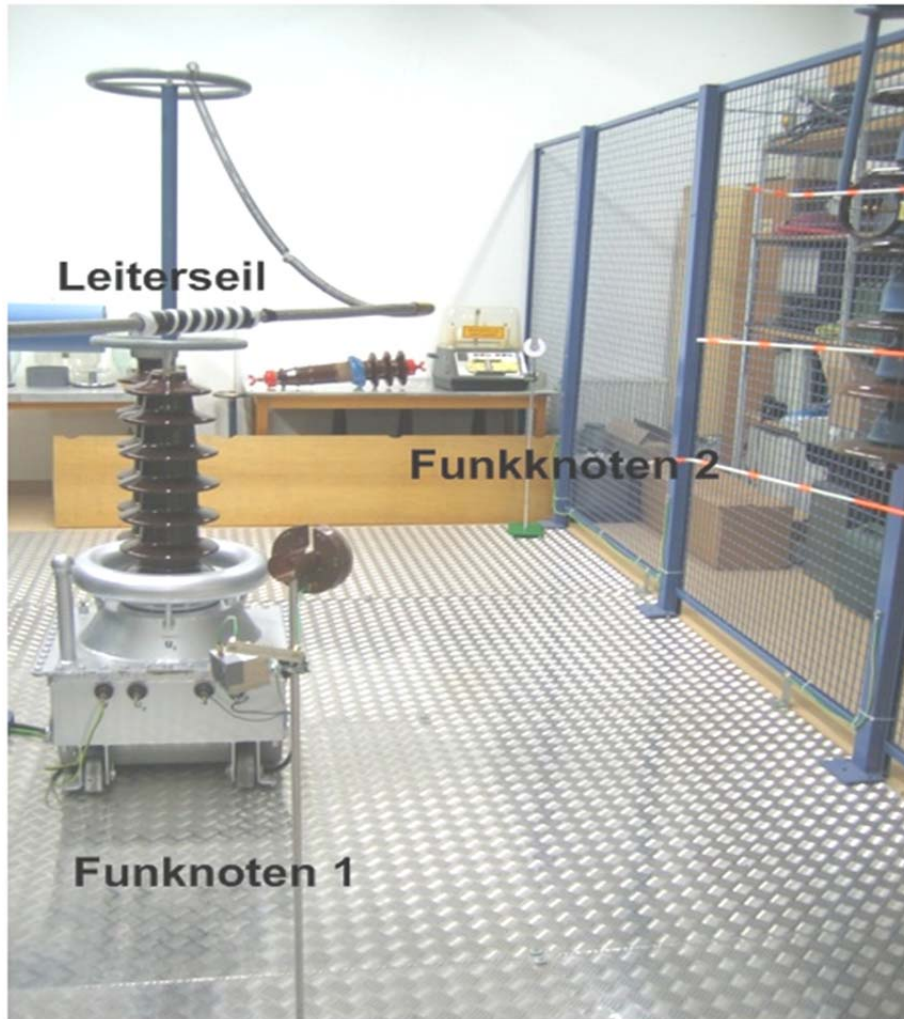


Abbildung 2.3.2: Versuchsaufbau im Hochspannungslabor (Funkknoten neben der Hochspannungsleitung)

Schaltungs- und Entstörkonzept

Im August 2011 wurde ein Feldtest an einer Hochspannungsleitung (110 kV) der Enviam am Ortsrand von Zwönitz (Erzgebirge) durchgeführt. Die Versuchsziele (nach Anpassung an den aktuellen Fortschritt der Softwareentwicklung) bestanden in Folgendem:

Prüfung der Systemfunktionalität der Sensorknoten, speziell:

- Energieharvester (verfügbare Leistung)
- X-Neigungssensor
- Externer Temperatursensor und Korrelation mit X-Neigung
- Qualität der Funkübertragung

Die Sensorknoten wurden noch mit einer Batterie versorgt. Während der Versuchsdauer wurden an der Basisstation folgende Daten aufgenommen und gespeichert:

- Spannung am Energiespeicher (DSK, Supercap) bei periodischem Entladen zur Ermittlung der Ladeleistung
- Strom im Leiterseil
- Temperatur im Inneren des Sensorknotens
- Temperatur am externen Temperatursensor
- Neigung.

Im Oktober wurden zwei Sensorknoten einer Prüfung mit Blitzstoßspannungen bei den Spannungsebenen 110 kV, 220 kV und 380 kV unterzogen. Die Versuche wurden bei FGH Engineering & Test GmbH, Hallenweg 40, 68219 Mannheim durchgeführt. Dazu wurde ein stufenweiser Nachweis der einzelnen Spannungsstufen mit jeweils 15 Stößen, Wellenform 1,2/50 μ s nach IEC 60060-1 mit positiver und negativer Polarität angestrebt. Die Spannungsebenen gliedern sich wie folgt:

- Ebene 1: 123kV mit LI 550 kV
- Ebene 2: 145 kV mit LI 650 kV
- Ebene 3: 170 kV mit LI 750 kV
- Ebene 4: 245/300 kV mit LI 1050 kV
- Ebene 5: 362 kV mit LI 1175 kV
- Ebene 6: 420 kV mit LI 1425 kV
- Ebene 7: 550 kV mit LI 1550 kV

Ein Sensorknoten, der permanent Daten zur Basis sendet, wurde auf einem Leiterseil befestigt und der Blitzstoß mit Hilfe eines Stoßgenerator (Marx-Generator, - Stoßgenerator (Stoßkapazität C_s 37,5 nF, Max. Ladespannung 2000 kV, Entladewiderstand R_e 1680 Ω , Dämpfungswiderstand R_d 264 + 47 Ω , C_b 1,2 nF, Abb. 2.3.2.3) auf das Leiterseil entladen.

Dabei wurde mittels eines Stoßspannungsmesssystems (Dr. Strauss) die Stoßspannung aufgenommen (Schaltung nach Abb. 2.3.4)



Abbildung 2.3.3: Foto vom Blitzstoßversuch mit zwei auf dem Leiterseil montierten Sensorknoten

Es kamen zwei unterschiedliche Ausbaustufen der Sensorknoten zum Test (2 Sensorknoten mit

Drahtbefestigung).

- passive Elektronik: nur Trafo und Sicherung (40 mA), keine weitere Elektronik (wie bspw. μC , Harvesterlektronik, Filter)
- aktive Elektronik: Harvester mit Blitzschutz, μC und Funkkommunikation zur Basis

Mit einer Basisstation, die in der Versuchshalle installiert worden war, konnten die Signale des Sensorknotens mit der aktiven Elektronik empfangen und mittel Laptop gespeichert werden.

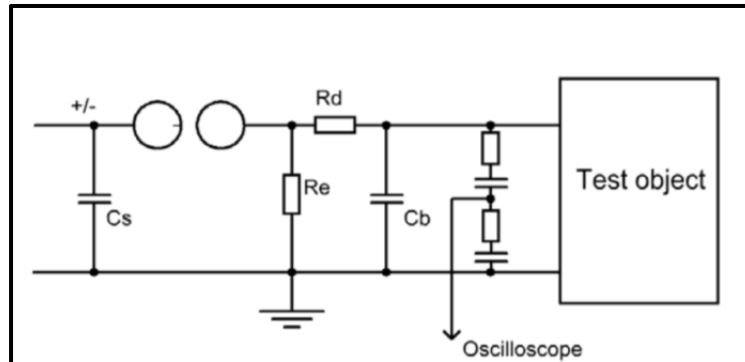


Abbildung 2.3.4: Elektrische Schaltung der Blitzstoßanlage

Funktionalität des Gesamtsystems

Nach einer grundlegenden Überarbeitung der Sensorknoten hinsichtlich des Entstörkonzeptes, und des Gehäuses sowie Anfertigung mehrerer Muster und deren Prüfung im Labor wurde ein Feldversuch geplant, bei dem die Sensorknoten für einen längeren Zeitraum als Sensorkette auf den Leiterseilen verbleiben sollen. Dazu wurde ein Teilstück einer Leitungstrasse in Niederwiesa bei Chemnitz ausgesucht, das unmittelbar an das dort befindliche Umspannwerk grenzt. Dadurch war die Unterbringung der Basisstation und eine Datenanbindung an die Leittechnik verhältnismäßig einfach zu erreichen. Die Antenne der Basisstation wurde an einem kleinen Mast des UW-Gebäudes (siehe Abb. 2.3.5) befestigt. Die Basisstation ist im Antennengehäuse untergebracht und über ein Kabel (LWL und Spannungsversorgung 9V DC) mit dem Industrie-PC verbunden, der im Zentralschrank von KE-Automation eingebracht wurde. Der PC verbindet über das Protokoll IEC60870-101 den Versuch via Chemnitztal nach Taucha, und die Daten sind per Internet von Mitnetz abzurufen.



Abbildung 2.3.5: WLAN-Außenantenne und integrierter Empfangselektronik an Warte im Umspannwerk

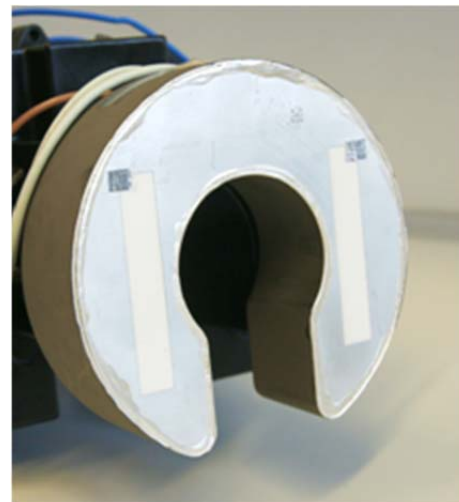
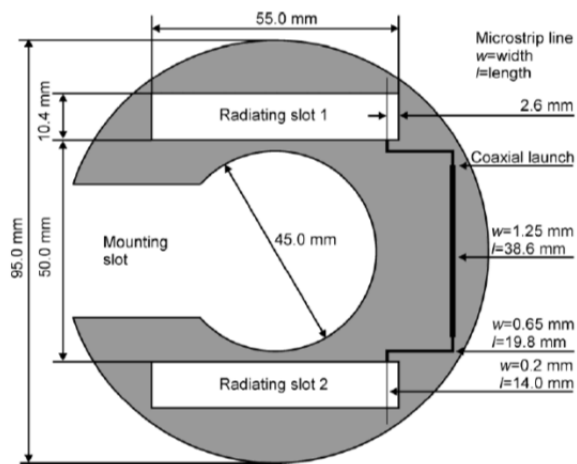


Abbildung 2.3.6: Sensorknoten nach der Montage auf einem 110 kV-Leiterseil beim Feldversuch in Niederwies

2.3.3 Ergebnisse des Fraunhofer ENAS

a) Antenne und Antennenfilter

Die Dimensionen der Antennenstrukturen (Abb. 2.3.7) wurden mithilfe von Simulationen des elektromagnetischen Feldes (CST-Microwave Studio) optimiert.



a)

b)

Abbildung 2.3.7: Schlitzantenne, a) Abmessungen, b) Foto der Antenne mit Kunststoffkapsel am Sensorknoten befestigt

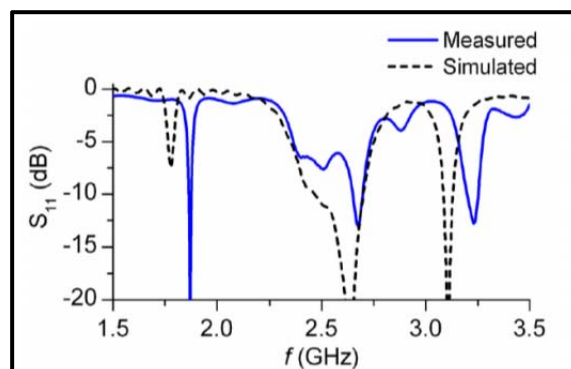


Abbildung 2.3.8: S_{11} -Parameter (Reflexion) der Antenne, Vergleich zwischen Messwert (blaue Kurve) und Simulationsergebniss (schwarze gestrichelte Kurve)

Die Anpassung kann anhand des S11-Parameters abgelesen werden (Abb. 2.3.8). Die Richtcharakteristik wurde durch eine Simulation dreidimensional ermittelt und zeigt einen Gewinn von 8.6 dBi in Hauptstrahlrichtung (Abb. 2.3.9). Ein zweidimensionales Richtdiagramm wurde in einer reflexionsfreien Messkammer experimentell ermittelt. Der Vergleich zu den theoretischen Daten zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung (Abb. 2.3.10).

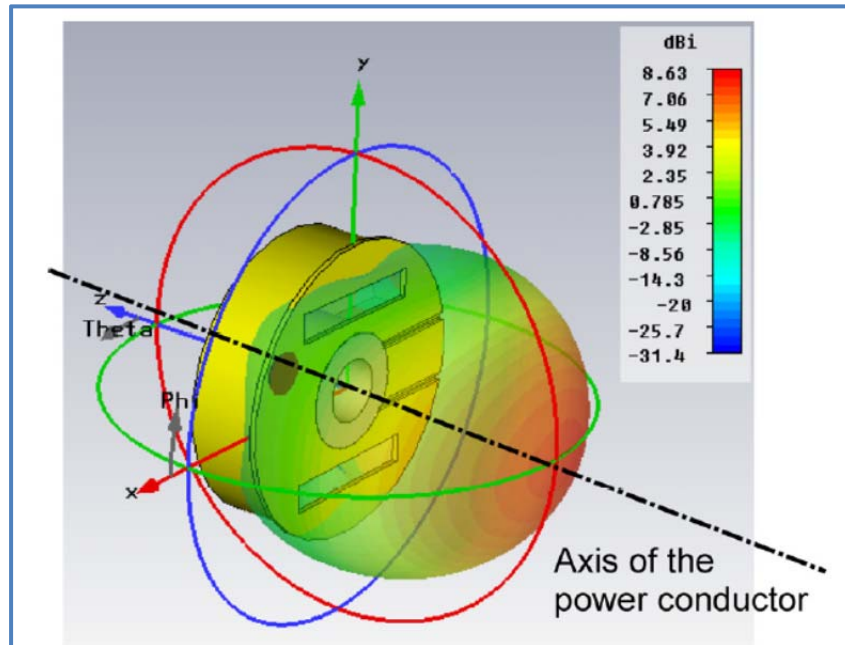


Abbildung 2.3.9: Ergebnis einer Simulation des elektromagnetischen Feldes der Antenne zur Ermittlung der Richtcharakteristik und des Antennengewinns.

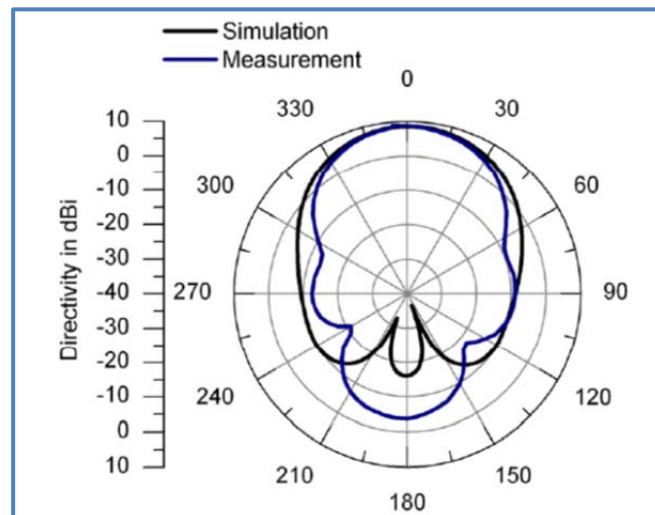


Abbildung 2.3.10: Richtdiagramm der Antenne, Vergleich zwischen Messwert (blaue Kurve) und Simulationsergebniss (schwarze Kurve)

Die Antennen weisen eine exemplarabhängige Streuung der Parameter auf. Für den praktischen Einsatz stellt das wegen der hinreichend großen Frequenzbandbreite kein Problem dar.

Die Antennenfilter sind in Mikrostreifentechnik ausgeführt (Abb. 2.3.11) und enthalten einen

Signalsplitter antennenseitig, so dass beide Antennen des Sensorknotens an das Filter anschließbar sind.

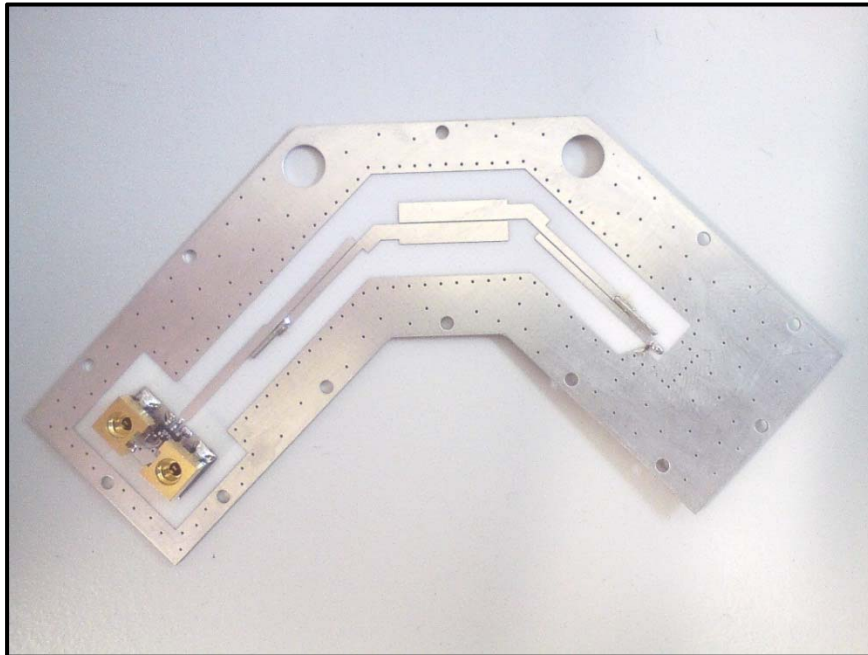


Abbildung 2.3.11: Foto des Antennenfilters ohne Gehäuse

Die Messungen von Anpassung und Einfügedämpfung wurden mit den Mini-Coax-Kabeln, die im Sensorknoten eingebaut werden, mit deren Adaptionern und den MMCX-Kabeln, sowie deren Adaptionern am Network-Analyzer gemessen. Dabei wurde der Durchgang für einen der beide Eingänge des Splitters aufgenommen, während der andere mit einem 50-Ohm-Widerstand abgeschlossen war (Abb. 2.3.12 und 2.3.13)..

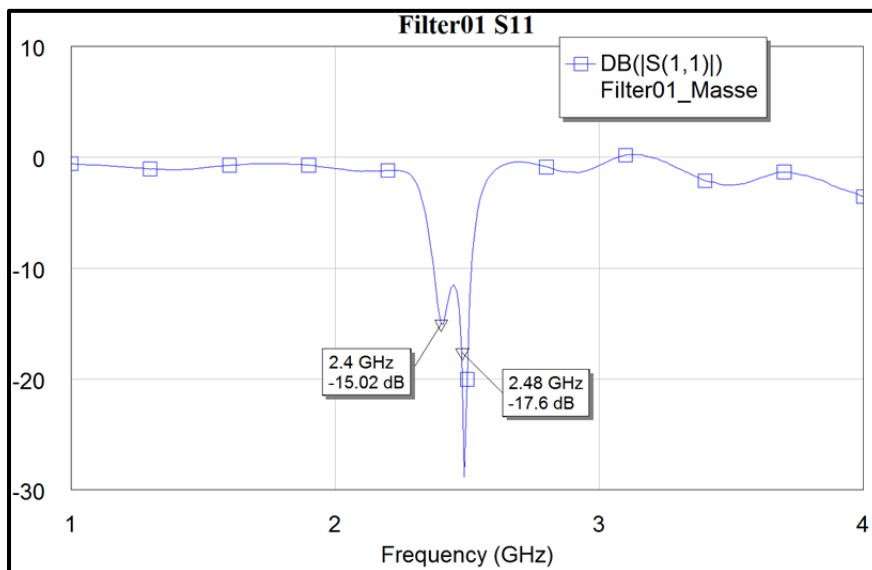


Abbildung 2.3.12: Anpassung eines Filters (Filter 01 exemplarisch)

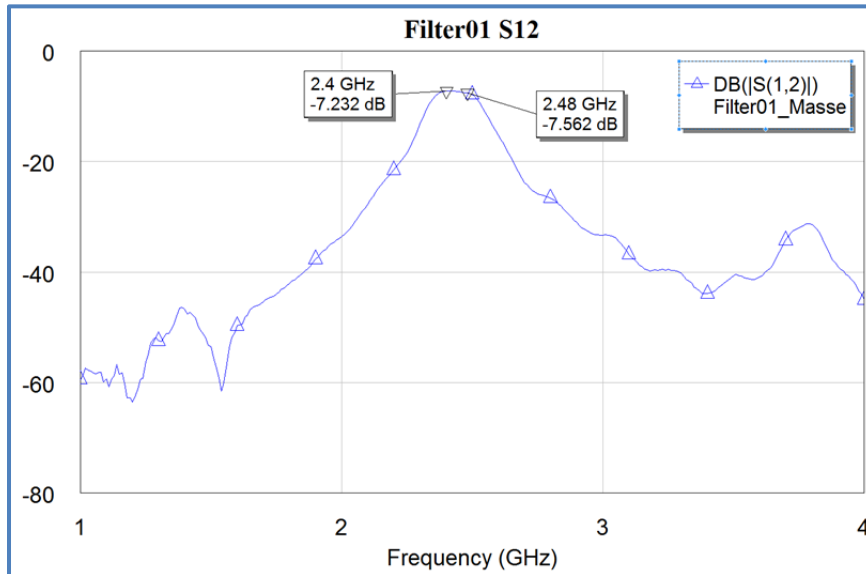


Abbildung 2.3.13: Durchgangsdämpfung des filters mit Splitter (Filter 01 exemplarisch)

Tabelle 2.3.1: Anpassung und Durchgangsdämpfung der Filter mit Splitter (Filterdeckel geschlossen).

FilterNr.	Anpassung S11 in dB			Durchgang S12 in dB	
	2,4 GHz	2,48 GHz		2,4 GHz	2,48 GHz
01	-15,02	-17,6	Max.: ≈ -11	-7,23	-7,56
02	-8,55	-14,78		-7,58	-8,14
03	-7,59	-9,59		-8,16	-7,53
04	-6,11	-9,08		-8,82	-7,72
05	-8,68	-13,55		-7,56	-8,08
06	-5,86	-11,86		-7,54	-6,85
07	-6,16	-15,58		-7,73	-6,75
08	-9,94	-22,05		-6,67	-6,40
09	-4,27	-16,15		-9,49	-6,43
10	-13,02	-20,03		-6,53	-6,43

Die Messwerte für den Einfügedämpfung (Durchgang) wurden außerdem unkalibriert aufgenommen, um den Bereich unter 1 GHz mit aufzunehmen. Ein Vergleich mit kalibrierten Werten zeigt, dass etwa +2 dB hinzuzufügen sind. Aus Abb. 2.3.14 ist zu erkennen, dass wie angestrebt, die Weitabselektivität mit einer Dämpfung von mehr als 50 dB sehr hoch ist.

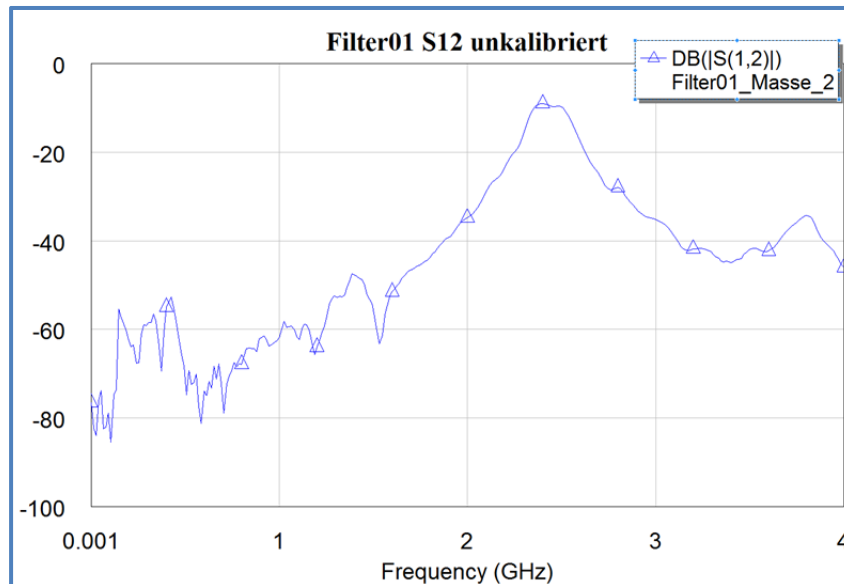


Abbildung 2.3.14: Durchlassdämpfung des Antennenfilters im Frequenzbereich ab 1 MHz

Zwischen der Antenne und dem Leiterseil, welches die Masse der eGrain-Elektronik darstellt, liegen durch die Harvesterelektronik begrenzte 800V. Diese hohe Spannung darf unter keinen Umständen an die eGrain-Elektronik gelangen. Der Filter hat somit neben der Störsignalfilterung die Aufgabe Antenne und eGrain-Elektronik von einander zu isolieren. Zum Test dieser Eigenschaft wurde mit Hilfe des MEGAOHMMETER M4100/4, welches eine Ausgangsspannung von 1000V realisiert, der Isolationswiderstand gemessen. Dieser betrug nahezu 1000MΩ und ist damit mehr als ausreichend, um die Elektronik zu schützen. Zum Schutz vor Feuchtigkeit wurde der Filter zusätzlich mit einem Schutzlack versehen. Dieser ist kriechstromfest (CTI 600), hochisolierend (10^{16} Ohm) und hat keinen Einfluss auf die Filtereigenschaften.

b) Sensorik

Auf der Basis des Teilapparates TANI 160 von Walter Präzisionstechnik wurde ein Messsystem aufgebaut, welches die vom Projektpartner ZfM gefertigten Neigungssensoren im Schwerfeld definiert charakterisiert. Das System besteht neben dem Teilapparat mit Steuereinheit (Abb. 2.3.15), aus einer Klimakammer mit Steuereinheit, einer Aufnahmevorrichtung und Auswerteschaltung für die Neigungssensoren sowie einem PC zur Steuerung des Messablaufes.



Abbildung 2.3.15: Ansicht des Messplatzes zur Kalibrierung der Neigungssensoren

Mit diesem System ist man in der Lage, die für die Charakterisierung der Neigungssensoren benötigten Messgrößen wie bspw. Offset, Empfindlichkeit, Rauschen, Drift, Nichtlinearität, Wiederholgenauigkeit oder Temperaturabhängigkeit, aufzunehmen. Zur Steuerung des Messsystems wurde eine Software in LabWindows/CVI programmiert, mit der manuell jeder einzelne Sensor oder automatisch im Sensorverbund charakterisiert werden kann (Abb. 2.3.16).

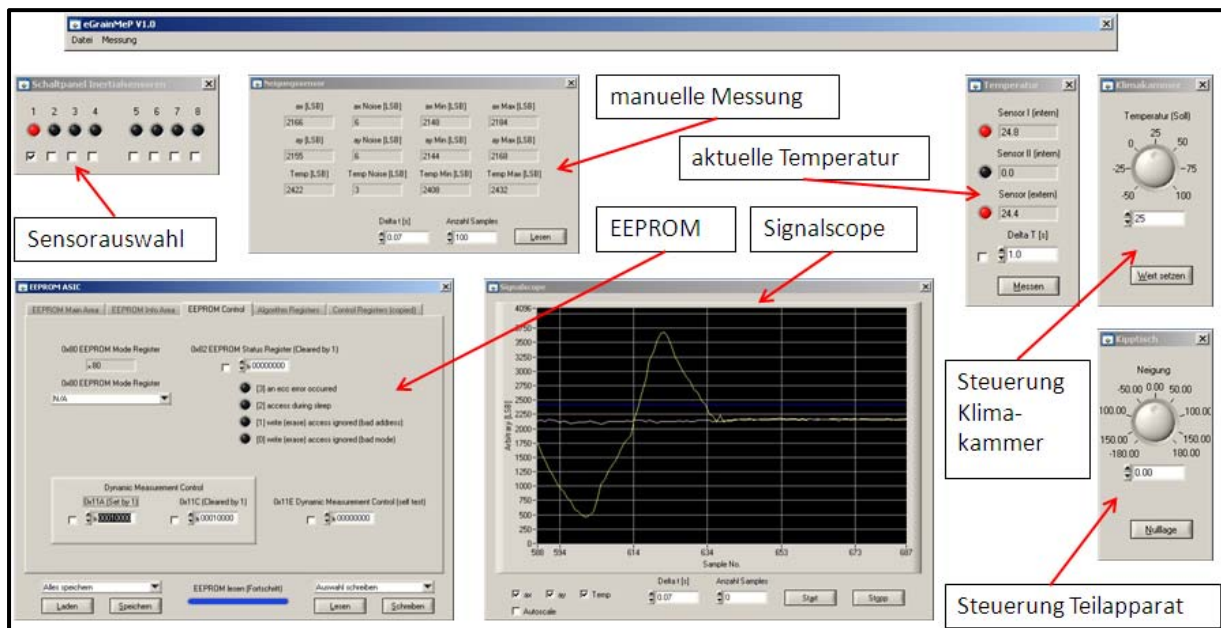


Abbildung 2.3.16: Screenshot der Software zur Messung und Kalibrierung

Tabelle 2.3.2: Messdaten vor der Kalibrierung und Kalibrierdaten der Neigungssensoren, x- und y- Achse getrennt aufgelistet

Sensorsysteme --- Wafer: 72-03-07				Input Kennlinie				X-Achse			
I.f. Nr.	Bezeichnung	Typ		Max [LSB]	Offset [LSB]	Winkel [±°]	Sens Ist [LSB/mg]	Sens Soll [LSB/mg]	Offset Soll [LSB]	Xgain	Xoff
		X	Y								
1	3-01	0,35	1,00	---	2168,0	10,0	6,1175	5,50	2050	0,899	-0,052
2	3-02	0,35	1,00	---	---	10,0	---	5,50	2050	---	---
3	3-03	0,35	1,00	---	2113,2	10,0	4,6963	5,50	2050	1,171	-0,036
4	3-04	0,35	1,00	---	2049,5	10,0	4,5885	5,50	2050	1,199	0,000
5	3-05	0,35	1,00	---	2127,3	10,0	5,5295	5,50	2050	0,995	-0,038
6	3-06	0,35	1,00	---	2277,5	10,0	4,7936	5,50	2050	1,147	-0,128
7	3-07	0,35	1,00	---	2397,5	10,0	5,1126	5,50	2050	1,076	-0,183
8	3-08	0,35	1,00	---	2074,9	10,0	4,6788	5,50	2050	1,176	-0,014
9	3-09	0,35	1,00	---	2102,2	10,0	4,6024	5,50	2050	1,195	-0,031
10	3-10	0,35	1,00	---	2023,1	10,0	4,5161	5,50	2050	1,218	0,016
11	3-11	0,35	1,00	---	2205,0	10,0	4,9585	5,50	2050	1,109	-0,084

Sensorsysteme --- Wafer: 72-03-07				Input Kennlinie				Y-Achse			
I.f. Nr.	Bezeichnung	Typ		Max [LSB]	Offset [LSB]	Winkel [±°]	Sens Ist [LSB/mg]	Sens Soll [LSB/mg]	Offset Soll [LSB]	Xgain	Xoff
		X	Y								
1	3-01	0,35	1,00	---	2125,8	50,0	1,8878	2,00	2050	1,059	-0,039
2	3-02	0,35	1,00	---	2119,2	50,0	2,1219	2,00	2050	0,943	-0,032
3	3-03	0,35	1,00	---	2193,1	50,0	2,0872	2,00	2050	0,958	-0,067
4	3-04	0,35	1,00	---	2072,5	50,0	2,0802	2,00	2050	0,961	-0,011
5	3-05	0,35	1,00	---	2175,4	50,0	1,8765	2,00	2050	1,066	-0,065
6	3-06	0,35	1,00	---	2098,7	50,0	2,3252	2,00	2050	0,860	-0,020
7	3-07	0,35	1,00	---	2241,9	50,0	2,3864	2,00	2050	0,838	-0,078
8	3-08	0,35	1,00	---	2118,6	50,0	2,1072	2,00	2050	0,949	-0,032
9	3-09	0,35	1,00	---	2584,3	50,0	1,9792	2,00	2050	1,010	-0,264
10	3-10	0,35	1,00	---	2129,4	50,0	2,0755	2,00	2050	0,964	-0,037
11	3-11	0,35	1,00	---	2134,5	50,0	2,0718	2,00	2050	0,965	-0,040

Tabelle 2.3.3: Offset und Skalenfaktor vor und nach der Kalibrierung, x- und y-Achse getrennt aufgelistet

I.f. Nr.	X-Achse				I.f. Nr.	Y-Achse			
	Vor Kalibrierung		Nach Kalibrierung			Vor Kalibrierung		Nach Kalibrierung	
	Offset	Sens	Offset	Sens		Offset	Sens	Offset	Sens
1	2168,0	6,1175	2058	5,4948	1	2125,8	1,8878	2055	2,001
2	---	---	---	---	2	2119,2	2,1219	2052	1,999
3	2113,2	4,6963	2052	5,502	3	2193,1	2,0872	2051	1,998
4	2049,5	4,5885	2057,0	5,507	4	2072,5	2,0802	2053	1,999
5	2127,3	5,5295	2065,0000	5,504	5	2175,4	1,8765	2055	1,999
6	2277,5	4,7936	2055,0	5,505	6	2098,7	2,3252	2053	1,998
7	2397,5	5,1126	2056	5,503	7	2241,9	2,3864	2052	1,999
8	2074,9	4,6788	2061	5,502	8	2118,6	2,1072	2056	1,999
9	2102,2	4,6024	2053	5,507	9	2584,3	1,9792	2059	1,997
10	2023,1	4,5161	2059	5,545	10	2129,4	2,0755	2052	2
11	2205,0	4,9585			11	2134,5	2,0718	2055	2

c) Messung der Dämpfung im Freifeld und an Leiterseilen

Die theoretische Empfangsleistung $P_{Empfang}$ mit dem vorhandenen Messaufbau für den Fall der Freiraumdämpfung lässt sich wie folgt berechnen:

$$P_{\text{Empfang}} = P_{\text{VCO}} + G_{\text{WLAN-Antenne}} - L_{\text{Freiraumdämpfung}} + G_{\text{Yagi-Antenne}} - L_{\text{Antennenkabel}}$$

Dabei entspricht P_{VCO} mit 8dBm der Sendeleistung des VCOs, $G_{\text{WLAN-Antenne}}$ mit 2.1dBi der Sendenantennengewinn, der an den VCO angeschlossenen WLAN-Aufsteckantenne, $L_{\text{Freiraumdämpfung}}$ der Freiraumdämpfung, $G_{\text{Yagi-Antenne}}$ mit 8dBi der Empfangsantennengewinn der Yagi-Richtantenne und $L_{\text{Antennenkabel}}$ mit 2dB der Kabeldämpfung des Verbindungskabels zwischen Yagi-Richtantenne und Spektrumanalyzer.

$$P_{\text{VCO}}=8\text{dBm}; G_{\text{WLAN-Antenne}}=2.1\text{dBi}; G_{\text{Yagi-Antenne}}=8\text{dBi}; L_{\text{Antennenkabel}}=2\text{dB}$$

Somit ergeben sich für unsere Messabstände folgende theoretische Empfangsleistungen:

Tabelle 2.3.4: Theoretische und gemessene Empfangsleistung

Position	Entfernung Funksender (P1)	vom	gemessene Empfangsleistung [dBm] Boden/Leiteseilhöhe	berechnete Empfangsleistung [dBm]
P2	35m		-55,3 / ---	-55,0
P3	340m		-70,5 / -72,0	-75,1
P4	1040m		-84,0/-83,9	-84,8
P5	1200m		-83,3/-83,9	-86,0

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Die Signalübertragung am Leiterseil ist prinzipiell möglich. Die in bestimmten Abständen, gemessene Leistung entspricht in guter Näherung der Leistung, die von einem isotropen Kugelstrahler abgegeben wird und lässt sich mit Hilfe der Beziehung für die Freiraumdämpfung berechnen.

Auch zeigte sich, dass die Trägermasten das Signal nicht dämpfen. So ließ sich in 1040m und 3 dazwischen liegenden Trägermasten ein Pegel von ca. -84dBm messen. Dieser Wert weicht kaum von der theoretischen Empfangsleistung von

-85dBm ab. Im Gegenteil, die gemessenen Werte waren im Mittel 1 bis 2 dBm stärker als es die Theorie vorhersagt. Ursache hierfür könnte der geringe Abstand zur Erde, die in der Theorie nicht existiert, sein.

Bei 340m dagegen zeigte sich eine größere Abweichung von ca. 5dBm zwischen Theorie und Praxis. Jedoch könnten hier Reflexionen von der Scheune, über dem Messpunkt P3 lag, oder Reflexionen vom Boden verantwortlich sein.

Durch die nahezu kugelförmige Abstrahlung am Sender sollte es auch keine Probleme bei einer Abwinklung der Leiterführung geben, wie die Messung ca. 400m vom Leiterseil in 1200m Entfernung vom Funkmodul gezeigt hat. Auch hier konnte annähernd der theoretisch zu erwartende Wert gemessen werden.

Auch konnte eine signifikante Verstärkung in Nähe des Leiterseils, wie es bei einer Goubou-Leitung der Fall ist, nicht beobachtet werden. Der Signalpegel am Boden wich kaum von dem in der Höhe des Leiterseils ab. Jedoch konnten sehr geringe Unterschiede zwischen der 15 und 30cm Entfernung zwischen Empfangsantenne und Leiterseilmitte festgestellt werden. So war die Empfangsleistung in 30cm Abstand 0,5 bis 2dBm stärker als in 15cm Abstand zum Leiterseil.

Teilentladungen im Bereich der Hochspannungsleitungen

Im Hochspannungslabor wurden zunächst die Sprühentladungen durch das offene Ende des Leiterseils provoziert und mit Hilfe eines Spektrumanalysators und einer einfachen Antenne (ca. 2 m lange Drahtantenne) der Störpegel aufgenommen. Anschließend wurde ein Sensorknoten bestehend aus Antenne, Funksender und Filter neben der Hochspannungsleitung aufgebaut und die Empfangsleistung bei verschiedenen Spannungen (0 bis 80kV) gemessen. Danach wurde der Funkknoten auf dem Leiterseil befestigt und die Empfangsleistung erneut bei verschiedenen Spannungen aufgenommen.

Tabelle 2.3.5: Störungssituation ohne Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, ohne Hochspannung

Tabelle 2.3.5: Störungssituation ohne Sprühentladungen

Einstellungen Analyzer	Frequenz	Meßpegel [dBm]	Bemerkung
Video BW= 10MHz	0 – 125MHz	< -60	Radio
Resolution BW=3MHz	125 – 500Mhz	< -73	
Attenuation=0dB	500 – 900MHz	< -80	
PreAmp= On	GSM	< -40	Handy
Noise-Pegel= -80dBm	1 – 1,5GHz	< -80	
	1,5 – 2,5 GHz		Einzelne Peaks (Rest auf Noise-Pegel)
	1,86 GHz	< -71	
	2,11 GHz	< -60	
	2,43 GHz	< -70	
	2,5 – 4 GHz	= -80	

Tabelle 2.3.6: Störungssituation mit Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, Hochspannung 30 kV (leichtes Knistern)

Einstellungen Analyzer	Frequenz	Meßpegel [dBm]	Bemerkung
Video BW= 10MHz	0 – 125MHz	< -43	Vermeehrt einzelne Peaks (durch HS)
Resolution BW=3MHz	125 – 500Mhz	< -63	
Attenuation=0dB	500 – 900MHz	< -69	
PreAmp= On	GSM	< -40	Rest auf Noise-Pegel
Noise-Pegel= -80dBm	1 – 1,5GHz	< -80	
	1,5 – 2,5 GHz		
	1,86 GHz	< -71	
	2,11 GHz	< -64	Keine Peaks
	2,43 GHz	< -60	
	2,5 – 4 GHz	= -80	

Tabelle 2.3.7: Störungssituation mit Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, Hochspannung 50 kV (starkes Knistern)

Einstellungen Analyzer	Frequenz	Meßpegel [dBm]	Bemerkung
Video BW= 10MHz	0 – 125MHz	< -16	flächig (komplettes Band durch HS)
Resolution BW=3MHz	125 – 500Mhz	< -35	
Attenuation=10dB	500 – 900MHz	< -48	Mehrere Peaks Keine Peaks
PreAmp= Off	GSM	< -40	
Noise-Pegel= -60dBm	1 – 1,5GHz	< -50	
PreAmp= On	1,5 – 2,5 GHz	< -60	
Attenuation=10dB	2,5 – 4 GHz	< -74	
Noise-Pegel= -80dBm	4 - ...	= -80	

Tabelle 2.3.8: Störungssituation mit Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, Hochspannung 100 kV (sehr starkes Knistern)

Einstellungen Analyzer	Frequenz	Meßpegel [dBm]	Bemerkung
Video BW= 10MHz	0 – 125MHz	< -2	flächig (komplettes Band)
Resolution BW=3MHz	125 – 500Mhz	< -27	
Attenuation=10dB	500 – 900MHz	< -38	flächig
PreAmp= Off	GSM	< -40	
Noise-Pegel= -60dBm	1 – 1,5GHz		
	1 – 1,1	< -40	
	1,1 – 1,5	< -45	
PreAmp= On	1,5 – 2,5 GHz	< -60	flächig
Attenuation=10dB	2,5 – 4 GHz	< -60	flächig
Noise-Pegel= -80dBm	4 - ...	< -80	abfallend

Aus den Ergebnissen ist ableitbar, dass besonders im Frequenzbereich bis zu 1 GHz Störungen mit unterschiedlichem und von der Hochspannung abhängigem Pegel auftreten. Das für dieses Vorhaben genutzte 2,4 GHz-Band ist viel weniger von den Störungen betroffen. Während beispielsweise die starken Teilentladungen bei 100 kV im Frequenzbereich einen Störpegel von -80 dBm ohne Teilentladungen auf bis zu -38 dBm anhoben, konnte bei 2,4 GHz eine Veränderung von -70 dBm auf -60 dBm gemessen werden.

Systemtest mit einzelnen Sensorknoten und Basisstation

Im August 2011 wurde ein Feldtest an einer Hochspannungsleitung (110 kV) der Enviam am Ortsrand von Zwönitz (Erzgebirge) durchgeführt (siehe Abbildung 2.3.16 und 2.3.18).

Die Versuchsziele (nach Anpassung an den aktuellen Fortschritt der Softwareentwicklung) bestanden in Folgendem:

Prüfung der Systemfunktionalität der Sensorknoten, speziell:

- Energieharvester (verfügbare Leistung)
- X-Neigungssensor
- Externer Temperatursensor und Korrelation mit X-Neigung
- Qualität der Funkübertragung

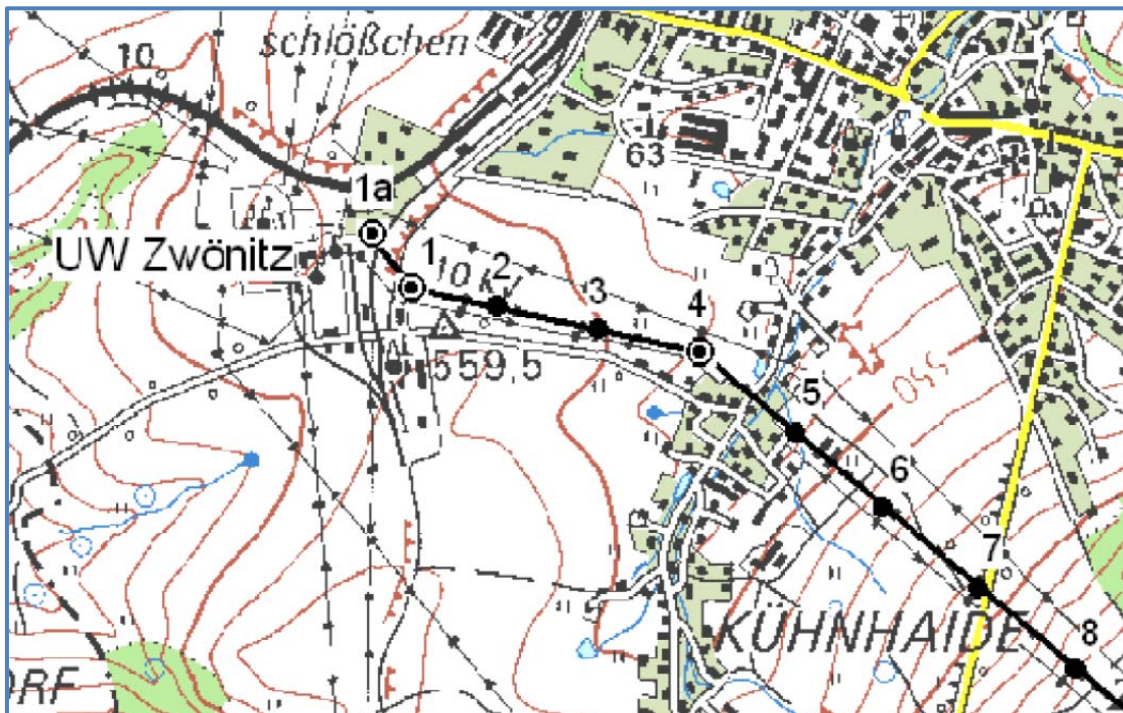


Abbildung 2.3.17: Lageplan des Versuchsortes, Sensorknoten am Mast 1a bzw. Mast 1.



Abbildung 2.3.18: Satellitenaufnahme des Versuchsortes

Die Sensorknoten wurden noch mit einer Batterie versorgt. Während der Versuchsdauer wurden an der Basisstation folgende Daten aufgenommen und gespeichert:

- Spannung am Energiespeicher (DSK, Supercap) bei periodischem Entladen zur Ermittlung der Ladeleistung
- Strom im Leiterseil
- Temperatur im Inneren des Sensorknotens
- Temperatur am externen Temperatursensor (siehe Abb. 2.3.19)
- Neigung.



a)



b)

Abbildung 2.3.19: Sensorknoten mit externem Temperatursensor, a) Gesamtansicht, b) Detail: externer Temperatursensor

Die **Ladeleistung** des Sensorknotens betrug während der Versuchsdauer mindesten 14 mW. Das lässt sich durch Auswertung der Ladekurven (Abb. 2.3.20) ableiten. Der Harvester liefert je nach DSK-Ladespannung Leistungen zwischen 14 und 21 mW.

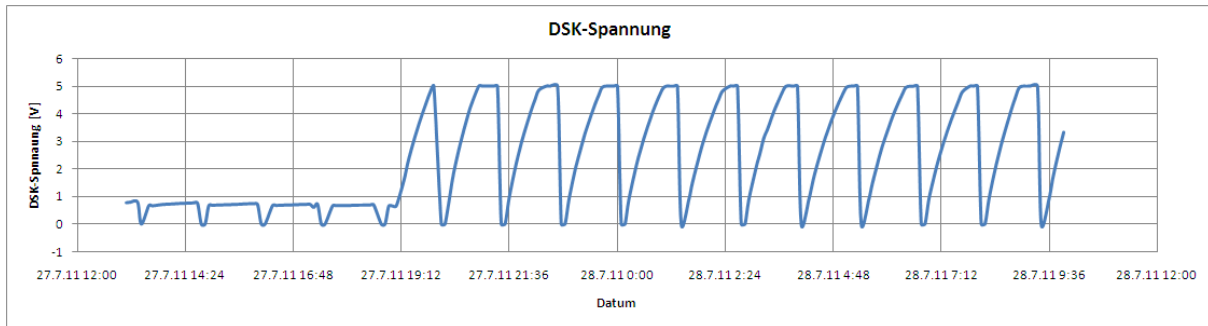


Abbildung 2.3.20: Ladekurven des Doppelschichtkondensators nach dem Einschalten der Hochspannung am 27.7.2011 um ca. 19:00 Uhr.

Der Stromsensor zeigt deutlich das Ein- und Ausschalten der Leitung und den prinzipiellen Tagesverlauf der Last an. Der **Strom im Leiterseil** schwankte während der Versuchsdauer (Abb. 2.3.21). Da an der Leitung gleichzeitig Wartungsarbeiten durchgeführt wurden und die Leitung deshalb mehrmals spannungsfrei geschaltet wurde, gab es auch Zeitabschnitte ohne Stromfluss.

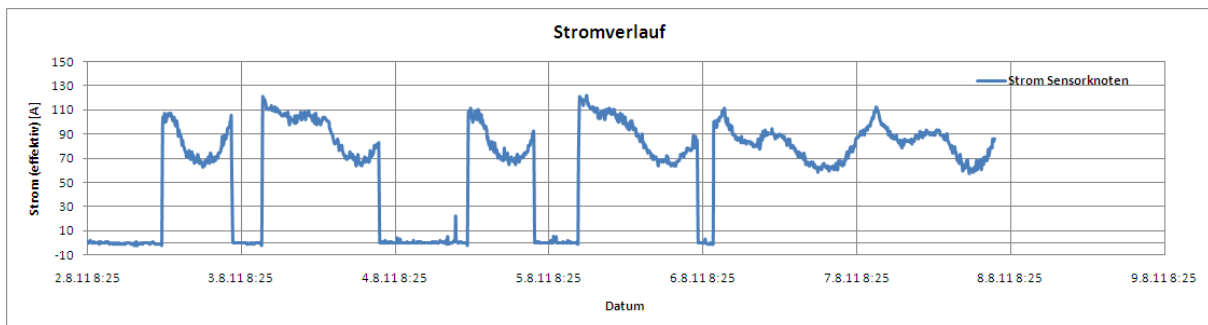


Abbildung 2.3.21: Aufgenommener Stromfluss im Hochspannungsleiterseil

Abb. 2.3.22 zeigt die **Temperatur und die Neigung** in einem Diagramm zum besseren Vergleich. Man erkennt eine deutliche Korrelation von Neigung und Temperatur. Ein Zusammenhang mit dem Strom im Leiterseil (Abb. 2.3.21) ist nicht erkennbar. Das liegt an der relativ niedrigen Last von lediglich weniger als 110 A, durch die eine Erwärmung des Leiterseils so gering ist, dass sie nicht messbar war. Die inneren Temperatursensoren sind im Vergleich zum externen Temperatursensor thermisch träge.

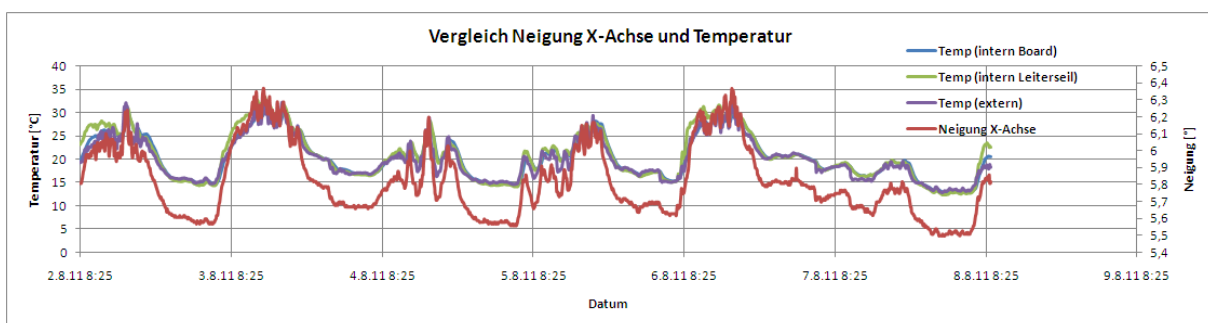


Abbildung 2.3.22: Messwerte von Temperatur und Neigung.

Weiterhin lässt sich erkennen, dass die **Funkkommunikation** (Senden des eGrains, Empfang der Basisstation) wie auch die Gesamtfunktionalität (Neigungs-, Strom- und Temperatursensor) durch die Hochspannung nicht beeinträchtigt wird. Die Empfangsleistung an der Basisstation ist nicht vom Spannungszustand der Hochspannung abhängig (Abb. 2.3.15).

Systemtest mit einer Sensorkette

Zum Projektabschluss wurde am Umspannwerk Niederwiesa ein Test des gesamten Systems mit

Basisstation, Industrie-PC zur Anbindung an die Leittechnik und einer Sensorkette mit 4 Sensorknoten durchgeführt. Dazu wurde in die Warte des Umspannwerk Niederwiesa bei Chemnitz die Technik der Basisstation installiert. Die Sensorkette erstreckte sich vom Umspannwerk ca. 0,9 km in Richtung der Leitungstrasse nach Pockau (Abb. 2.3.23). Der Funkknoten der Basisstation befand sich im Antennengehäuse am Mast außerhalb des Gebäudes (Abb. 2.3.24). Weitere Sensorknoten wurden an der Traverse der Einführung in das Umspannwerk (Sensor 1, Abb. 2.3.25), am übernächsten Tragmast auf einer Anhöhe (Sensorknoten 2 und Sensorknoten 3, Abb. 2.3.26) und am vierten Mast der Trasse in der sich anschließenden Talsenke (Sensorknoten 4, Abb. 2.3.27) montiert.

Die beiden Sensorknoten am zweiten Mast sind durch die Abspannung des Leiterseils gegensinnig geneigt, so dass Sensorknoten 2 einen positiven Neigungswinkel und Sensorknoten 3 einen negativen Neigungswinkel hat. Der Neigungswinkel des Sensorknotens 4 ist analog zu Sensorknoten 2 positiv.

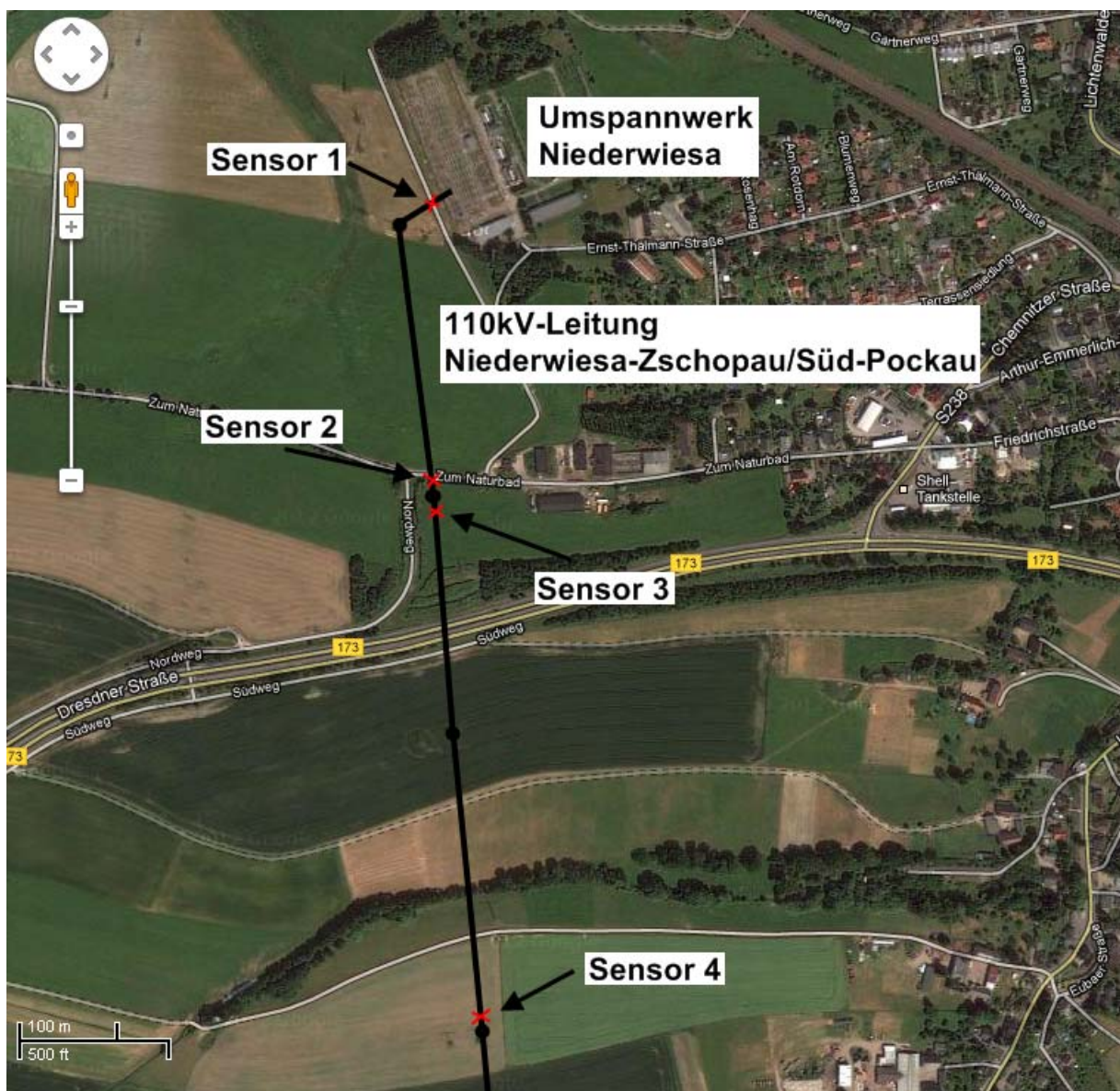


Abbildung 2.3.23: Satellitenaufnahme des Versuchsortes mit eingetragenen Standorten der Sensorknoten



Abbildung 2.3.24: Foto von der Basisstation am Gebäude der Warte im Umspannwerk Niederwiesa



Abbildung 2.3.25: Foto vom Sensorknoten 1 im Umspannwerk Niederwiesa



Abbildung 2.3.26: Foto vom Sensorknoten 2 (hinten) und Sensorknoten 3 (vorn) mit Blickrichtung zum Umspannwerk Niederwies



Abbildung 2.3.27: Foto vom Sensorknoten 4 mit Blickrichtung zum Umspannwerk Niederwies (im Bild hinter der Anhöhe mit dem Baumbestand rechts verborgen)

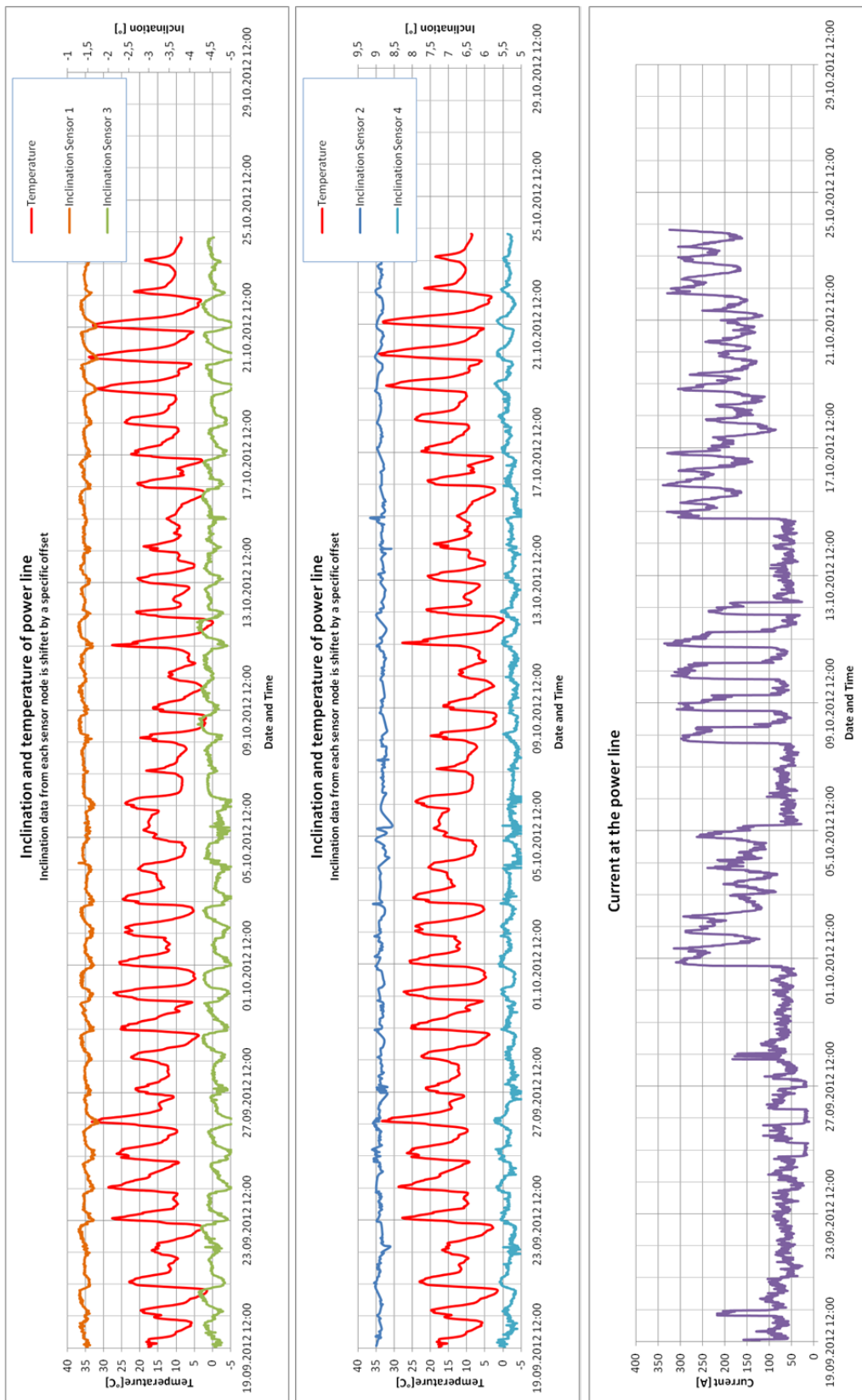


Abbildung 2.3.28: Messdaten vom Feldversuch mit der Sensorkette

Abb. 2.3.28 zeigt die Messdaten vom Zeitraum 19.September bis 24.Oktober. Anhand der Graphen lässt sich folgendes ablesen:

- Die Temperatur beeinflusst die Neigung und damit den Durchhang der Leiterseile deutlich erkennbar. Mit zunehmender Temperatur steigt der Betrag der Neigung.
- Der Einfluss des Stromes auf die gemessene Temperatur ist vom Tagesgang der Temperatur so stark überlagert, dass dieser Zusammenhang anhand der Graphen nicht erkennbar ist.

Zusätzlich ergab die Auswertung der Daten folgende Informationen:

- Sensorknoten 2 lieferte im Beobachtungszeitraum lediglich 691 Datensätze, während die Sensorknoten 1, 3 und 4 zwischen 3052 und 3271 Datensätze lieferten. Das lässt darauf schließen, dass Sensorknoten 3 unmittelbaren Funkkontakt zur Basisstation haben muss und Sensorknoten 4 die Daten über Sensorknoten zur Basisstation übertragen hat.
- Der Ladezustand des Speicherkondensators vor dem Senden war mit einer Ladespannung zwischen 4,6 und 4,8 Volt in jedem Fall ausreichend hoch. Eine Fluktuation war nicht erkennbar.
- Im weiteren Verlauf des Versuches kam es zum Ausfall der Sensorknoten 2 und 4. Die Ursachen sind aus den Messdaten nicht ablesbar.

2.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Die entwickelte Antenne und das Antennenfilter sind für den speziellen Einsatz am Hochspannungsleiterseil geeignet. Die Richtwirkung mit dem Öffnungswinkel von ca. 30° zwingt zu Kompromissen bei der Installation der Sensorknoten und kann dazu führen, dass im Bereich von Winkel-Abspannmasten zusätzliche Sensorknoten eingefügt werden müssen, um die Funkverbindung sicher zu garantieren.

Das Antennenfilter ist ausreichend wirksam, um die Einflüsse von Teilentladungen auf die Funkverbindung zu eliminieren.

Der eingesetzte Typ Neigungssensor mit ASIC ist durch die Kalibriervorrichtung und –Routine mit Teilapparat gut kalibrierbar. Der Einfluss von Lagetoleranzen beim Einbau der Sensoren in die Sensorknoten wird dabei jedoch nicht erfasst.

Aus den Feldversuchen lässt sich erkennen, dass prinzipiell eine Sensorkette mit energieautarkem Betrieb funktioniert. Die Messdaten der Sensorknoten sind plausibel.

Referenzen:

[1] N. Behdad and K. Sarabandi, "A Multiresonant Single-Element Wideband Slot Antenna," IEEE Antennas and Wireless Propagation Let, Vol. 3, pp. 5–8, 2004.

[2] S. Leidich, S. Voigt, A. Gratiás, T. Keutel, S. Kurth, T. Gessner, „Slot-antenna for autonomous sensor systems mounted on overhead power lines“, Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International Issue Date: 5-10 June 2011, Baltimore, MD, USA, pp. 1ff

2.4 Ergebnisdarstellung von Fraunhofer IZM

2.4.1 Problem- und Zielstellung

Das Ziel des Teilprojektes war die Realisierung von energieautarken, miniaturisierten vernetzten Sensorknoten in Hard- und Software. Durch die Miniaturisierung der elektronischen Schaltung und damit des Gesamtaufbaus soll die Durchführung der Messaufgabe auf einem Hochspannungsleiterseil möglich sein. Hierdurch ergeben sich geringere Störeinflüsse durch Felder, die insbesondere im Fehlerfall oder bei Blitzeinschlag induziert werden können.

Aus Sicht der anwendenden Projektpartner ist eine möglichst geringe Größe der Objekte wichtig, da sich zu große Objekte als zusätzliche Massen an dem Leiterseil bemerkbar machen. Die Größe bestimmt jedoch sehr entscheidend den Energieeintrag, der sich am Leiterseil harvesten lässt. Gerade bei einer kapazitiven Lösung ist der Energieeintrag Prinzip bedingt deutlich geringer als bei einer induktiven Variante gleicher Größe. Hierbei würde jedoch bei nur sehr geringem oder keinem Stromfluss das System nicht mehr versorgt werden können.

Die Systemspezifikation sowie die Konzepterstellung und Umsetzung der Funktionalität in Hard- und Software war also unter der besonderen Randbedingung der Energieautarkie und der sparsamen Verwendung von Ressourcen bei gleichzeitiger drahtloser Kommunikation über sehr große Entfernungen durchzuführen.

Darüber hinaus war die Messaufgabe durch die Abtastung mehrerer Sensoren in einem definierten Mindestintervall gegeben. Es galt die Sicherstellung dieser Abtastung sowie einer erfolgreichen Weiterleitung der aufgenommenen Sensordaten über weitere Sensoren in einer Kette an die Basisstation zu erforschen und umzusetzen. Dabei sollte dieses Multihop Sensornetzwerk auch eine Ausfallsicherheit – gegeben durch eine Redundanz – von Knoten besitzen, die im Fehlerfall bewirkt, dass die Daten eines weiter entfernten Sensors empfangen und über mindestens zwei weitere Nachbarn weitergeleitet werden können. Die Entfernung von mind. einem Kilometer um zwei Sensorknoten zu überstreichen, muss durch die geeignete Wahl des Kommunikationsinterfaces gelöst werden. Störungen bei der Übertragung dürfen nicht zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen, d.h. fehlerhafte Übertragungen müssen erkannt werden.

2.4.2 Lösungskonzept

Entsprechend des Antrags erfolgte die Bearbeitung des Arbeitspakets in den unten genannten Schritten:

- Konzept des Gesamtsystems
- Spezifikation des ASTROSE-eGrains
- Erforschung, Design, Konstruktion und Realisierung der ASTROSE-eGrains
- Co-Design Hard- und Software
- Softwarekonzept, -architektur und -realisierung
- Testunterstützung bei Labor- und Feldtests

Bei der Erstellung der genauen Spezifikation des Gesamtsystems wurde die Versorgung durch kapazitives Harvesting festgelegt. Dadurch war ein sehr viel geringerer aber dafür kontinuierlicher Energieeintrag auch bei wenig oder keinem Stromfluss gesichert, der das System in einem kontinuierlichen Mess- und Netzwerkbetrieb hält. Es zeigte sich jedoch, dass selbst kleinste Leckströme und selbstverständlich Standby-Ströme der gesamten Komponenten zu berücksichtigen und durch geeignete Schaltungskonzepte zu minimieren waren.

Als Sensorschnittstellen sind digitale Bussysteme (I2C) spezifiziert worden. Dies erlaubte eine Anbindung sowohl der im Projekt entstehenden Neigungssensoren als auch zusätzlicher Digitalsensoren für andere Messgrößen wie Temperatur. Sie waren allesamt abschaltbar und mit sehr geringen Leckstrom bzw. Standbyverlusten behaftet. Durch die Verwendung der digitalen Schnittstellen, die sich extrem ressourcenarm und damit energieschonend in einem Mikrocontroller umsetzen lassen, war jedoch die Gefahr gegeben, dass sich durch Störungen Fehler in dem Ablauf der Betriebssoftware ergeben.

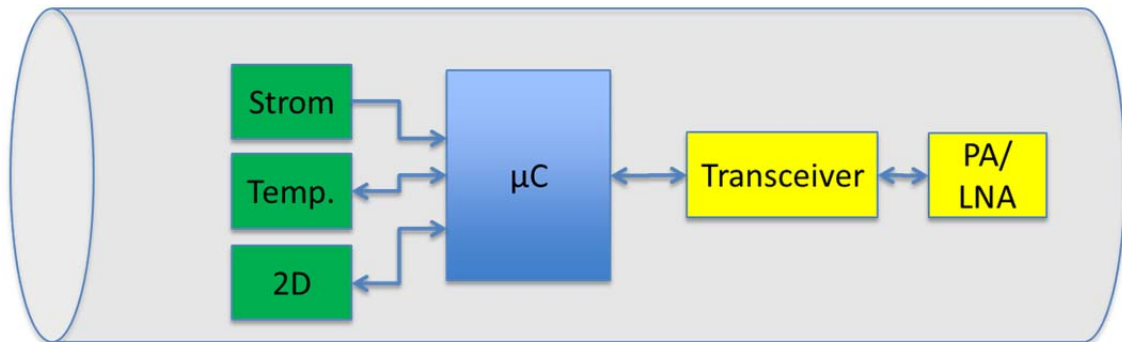


Abbildung 1.4.1: Schematische Darstellung des Elektronikkonzepts

2.4.3 ASTROSE-Hardware

In diesem Abschnitt werden die erzielten Forschungsergebnisse näher beschrieben.

Realisiertes elektronisches Konzept

In der anfänglichen Diskussion zu Projektbeginn stellte sich das zur Verfügung stehende Energiebudget als eine der kritischsten Punkte heraus und erforderte ein entsprechendes Konzept an Sensorik, Datenverarbeitung und Kommunikationsschnittstelle, um einen Zielverbrauch von wenigen Milliwatt zu erreichen.

Diesbezüglich wurden alle elektronischen Komponenten vor allem unter den Aspekten des Leckstromverlustes, der Abschaltbarkeit und der Skalierbarkeit ihrer Leistung bewertet und ausgewählt. Dies führte zu einer Architektur eines ultra-low power Mikrocontrollers mit einem Funkchip auf dem 2,4GHz Band mit externem Sende- und Empfangsverstärker, sowie größtenteils digitaler integrierter Sensorik.

Das Hardwarekonzept berücksichtigt die Bereitstellung busfähiger digitaler Schnittstellen zur Anbindung der Sensorik und der Steuerung des Funktransceivers. Die nach Datenblatt ermittelten Leckstromangaben finden sich in nachstehender Tabelle.

	A	B	C	D	E	F
1 Zustand	<i>Normalbetrieb</i>					
2		Senden	Empfangen	Idle	Sleep	Messung
3 Zeitspanne (s)		4,5	26	10	823,7	2
4						
5 Stromaufnahme (mAh)						
6 Neigungssensoren		0,007	0,007	0,007	0,007	0,7
7 Transceiver		17,3	18,8	0,5	0,23	0,23
8 Temperatur		0,15	0,15	0,3	0,0003	0,15
9 MCU		3,2	3,2	3,2	0,05	3,2
10 RTC		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
11 RF Amp		112	4	0,001	0,001	0,001
12 Zwischensumme		133,107	26,607	4,458	0,7383	4,731
13						
14 Summe		133,107	26,607	4,458	0,7383	4,731

Tabelle 2.4.1: Energieverbräuche bezogen auf verschiedene Betriebszustände

Zu ersten Testzwecken und zur Verifikation der anfallenden Energieverbräuche sowie der Möglichkeit die Realisierung der Software zu beginnen, wurde ein Evaluationsboard entwickelt, das zahlreiche Schnittstellen bereithält, um diverse Messaufgaben durchzuführen. So wurde unter anderem eine genaue Messung der Leistung während der Kommunikation durchgeführt. Die durchgeführten Messungen wurden in Verbindung mit den in Tabelle 2.4.1 aufgezeigten Szenarien ausgewertet.

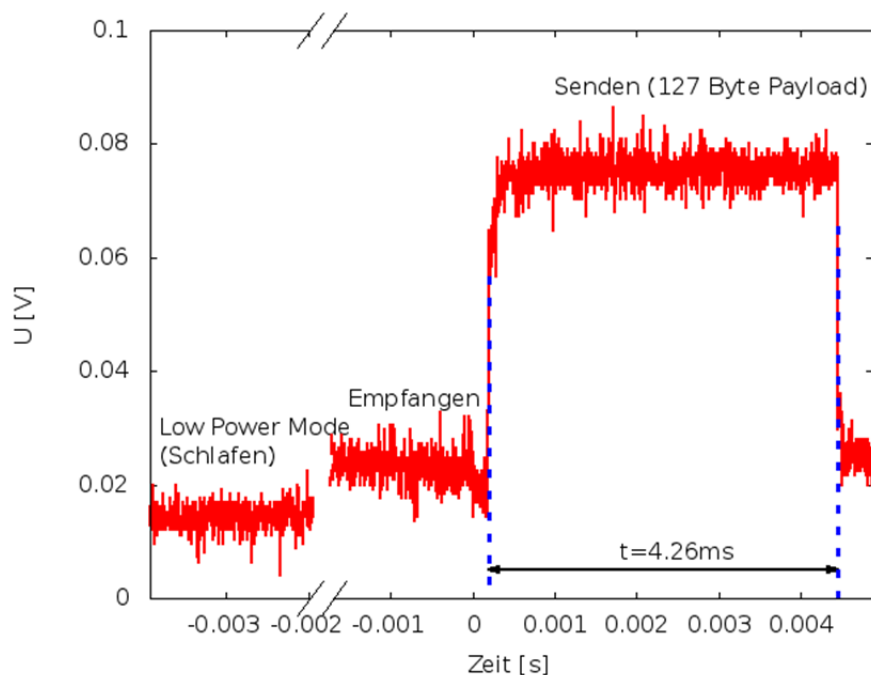


Abbildung 2.4.2: Spannungsverlauf bei verschiedenen Betriebszuständen

Das Konzept der elektrischen Schaltung besitzt einen ultra-low power Mikrocontroller und ein Kommunikationsfrontend von TI bestehend aus einem Transceiver und einem RF Verstärker.

Sensorsystementwicklung

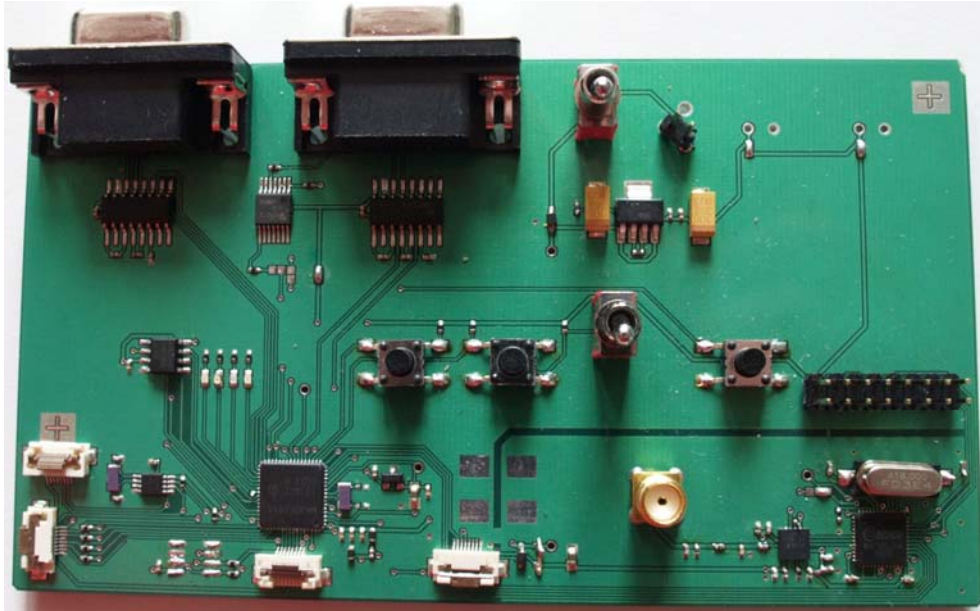


Abbildung 2.4.3: Version des ASTROSE-eGrain-Evaluierungsboards zu Testzwecken

Die Realisierung der ersten Leiterplatte erfolgte durch das Evaluationboard als abtrennbarer Abschnitt. An dieser waren Messungen sowie Justagearbeiten einfach möglich. Zahlreiche Debugschnittstellen ermöglichten ein effizientes Messen und Implementieren von Funktionalitäten sowie die Fehlersuche. Dabei war die Platzierung der Bauelemente so gewählt, dass sich der untere Teil als funktionaler Streifen ausbildete und für die ersten Konstruktionen des ASTROSE eGrains als Zentralplatine diente. Dies reduzierte den Aufwand eines neuen Designs mit gleichen elektrischen Eigenschaften.

In einer zweiten Revisionsstufe ist das Board mit weiteren Schnittstellen ausgerüstet worden und besitzt nun Aufnahmen für bspw. die Sensorplatine, die im Folgenden noch näher erläutert wird.

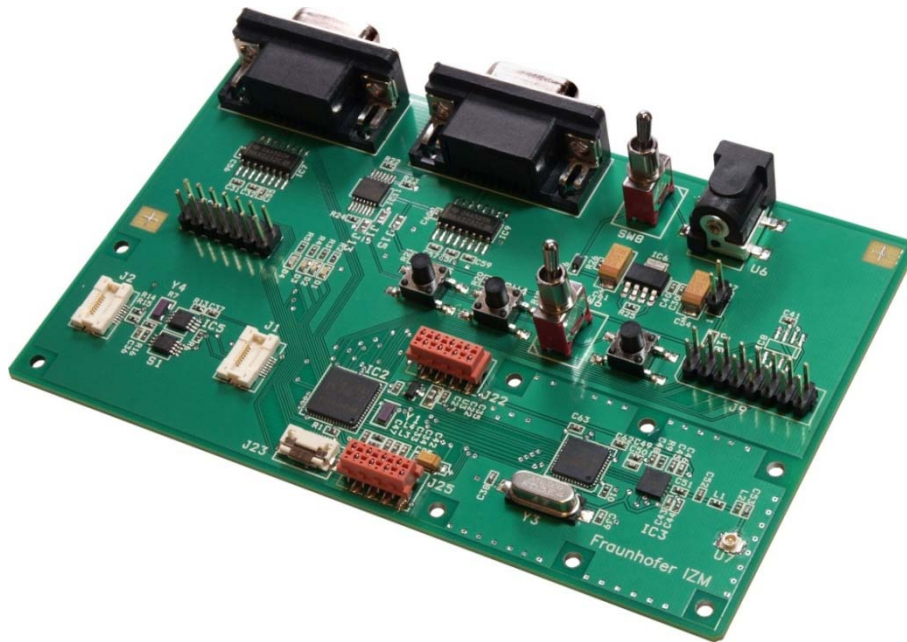


Abbildung 2.4.4: Version des ASTROSE eGrains inklusive Schnittstellen und Aufnahmen für Sensorik

Die funktionale Abtrennung ist in Abbildung 2.4.5

Abbildung als „Streifen“ gut zu erkennen. Auf dem linken Teil befindet sich die Sensorik bzw. ihre Schnittstellen. Im Zentrum der Leiterplatte befindet sich der Mikrocontroller und im rechten Teil der Funkteil. Die nachfolgenden HF Komponenten wie Streifenfilter und Antennen werden über einen UFL Stecker mit HF Kabel massebezogen angeschlossen. Die schwarzen Quadrate sind Freistellungen für die Bohrungen, die die Leiterplatte bzw. den darüber liegenden Streifenfilter tragen. In Abbildung 2.4.10 ist die Realisierung in Verbindung mit dem ersten Entwurf des Gehäuses zu sehen. Die Abmaße der Leiterplatte betragen 110mm x 30mm. Durch eine entsprechend gute Platzierung und Entflechtung konnte die Schaltung im zwei-Lagen Design und einseitiger Bestückung realisiert werden.

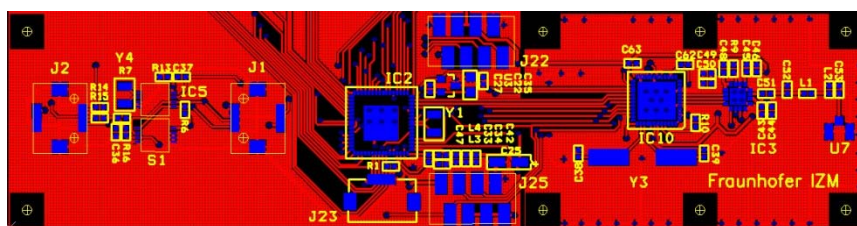


Abbildung 2.4.5: Layout für die Sensorknoten-Baugruppe

Die von den Projektpartnern parallel dazu entwickelte Sensorik wurde zu besseren Test- und Messzwecken auf einem separaten Träger aufgebracht, der über Mini-Steckkontakte, wie sie im Mobilfunkbereich verwendet werden, an die Zentralplatine angeschlossen werden kann. Die folgenden vier Abbildungen zeigen die Entwicklung dieses Trägers.

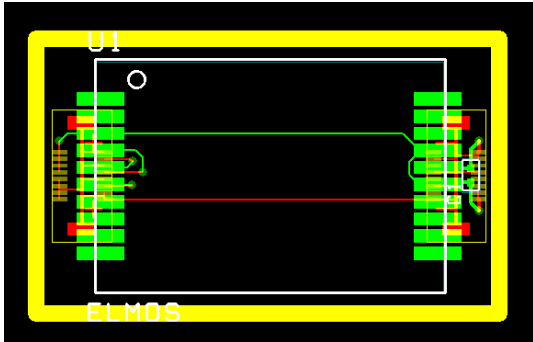


Abbildung 2.4.6: Layout Sensorträger

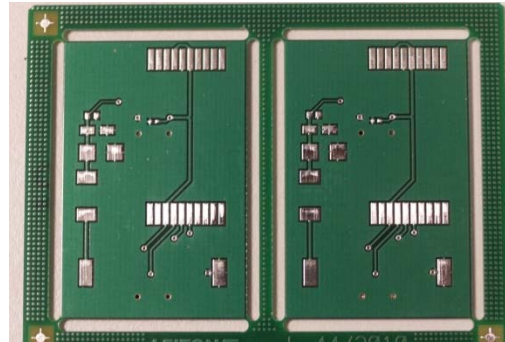


Abbildung 2.4.7: Platine Sensorträger

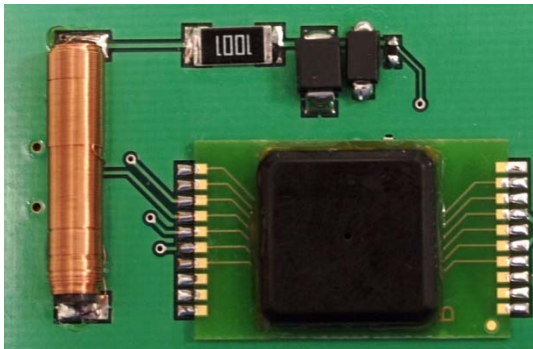


Abbildung 2.4.8: Oberseite Sensorplatine

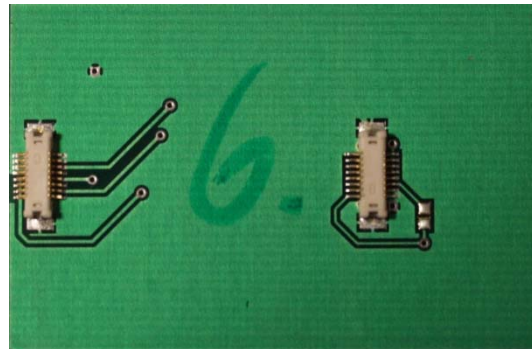


Abbildung 2.4.9: Unterseite Sensorplatine

Sowohl Zentralplatine als auch Sensorträger sind in eingebautem Zustand in Abbildung 2.4.10: Blick auf die komplette ASTROSE eGrain Baugruppe 2.4.10 zu erkennen. Die roten Stecker dienen zum Anschluss des Harvesters bzw. externer Sensorik. Die Schaltung wurde dahingehend ausgelegt u.U. durch mehr als einen Temperatursensor erweitert zu werden.

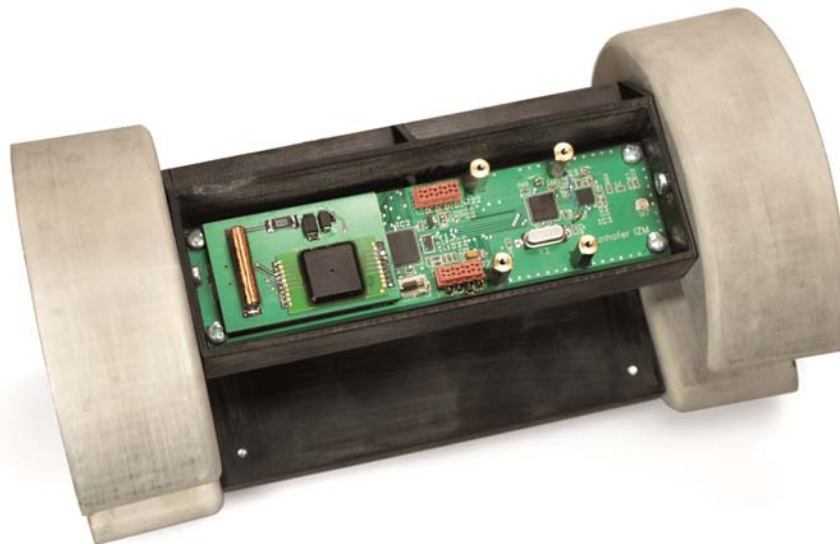


Abbildung 2.4.10: Blick auf die komplette ASTROSE eGrain Baugruppe

Durch die Notwendigkeit der Miniaturisierung und einer Neuausrichtung der Schaltung innerhalb des Gehäuses, ein verbessertes Schirmkonzept gegenüber elektromagnetischen Feldern und Strahlung umzusetzen, wurde die Leiterplatte nun um das Seil geführt und in einem geschlosse-

nen Gehäuse gekapselt. Die Masseführung wurde auf einen zentralen Punkt geführt.

Bei der Neuausrichtung war jedoch die Kontaktierung und Befestigung des Neigungssensors nicht mehr so einfach, wie bei der vorangegangenen Generation. Über eine Steckverbindung auf der Zentralplatine wurde die elektrische Kontaktierung sichergestellt. In dieser Generation wurde ferner der komplette Energy-Harvester auf der Leiterplatte integriert. Für Messzwecke ist der Harvester als separate Baugruppe realisiert worden. Dabei bestand eine große Herausforderung in der Platzierung der Bauelemente auf dem nur einseitig zu bestückenden Baugruppenträger. Die Anschlüsse wurden als metallisierte Randkontakte ausgeführt.

Die Zentralplatine selbst ist zur Verbesserung der funkttechnischen Eigenschaften nun vierlagig ausgeführt. Wiederum ist die Platzierung und Verdrahtung so optimiert worden, dass eine einseitige Bestückung möglich ist. Dies reduziert den Aufwand für das Handling und somit die Kosten der gesamten Baugruppe.

Abbildung 2.4.11 zeigt zum einen eine Visualisierung der Platine für eine entsprechende Abstimmung mit dem mechanischen Konzept und zur besseren Visualisierung kritischer Strompfade, sowie die anschließende Realisierung.

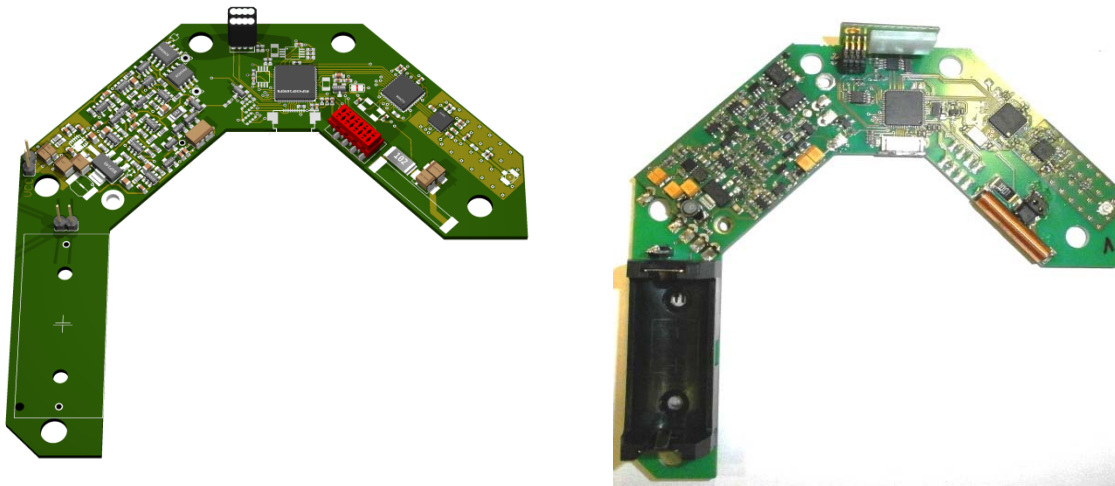


Abbildung 2.4.11: Layoutsimulation und Realisierung der optimierten ASTROSE eGrain Sensorleiterplatte

Mechanische Konzeption des Innengehäuses

Wie schon beim Design der Zentralplatine beschrieben, war die Notwendigkeit einer vollständigen Kapselung verbunden mit einer Neuausrichtung der Elektronik innerhalb des eGrain-Gehäuses notwendig. Anhand Abbildung 2.4.12 Abbildung 2.4.12: Optimierte Konstruktion des Zentralgehäuses innerhalb des neuen Außengehäuses (Entwurf) kann man gut die Ausrichtung der elektronischen Baugruppen längs der Magnetfeldlinien erkennen, die sich konzentrisch um das Leiterseil ausbilden. Durch die Kapselung in einem geschlossenen Metallgehäuse können Störstrahlungsquellen von außen von der Elektronik ferngehalten werden. Ferner ergibt sich ein weiterer Synergieeffekt: Die Kammerstruktur des Streifenfilters konnte in das Gehäusekonzept integriert werden. Dies ist in Abbildung 2.4.13: Konstruktion des inneren Zentralgehäuses zur Aufnahme der kompletten Elektronikbaugruppe noch besser zu erkennen.

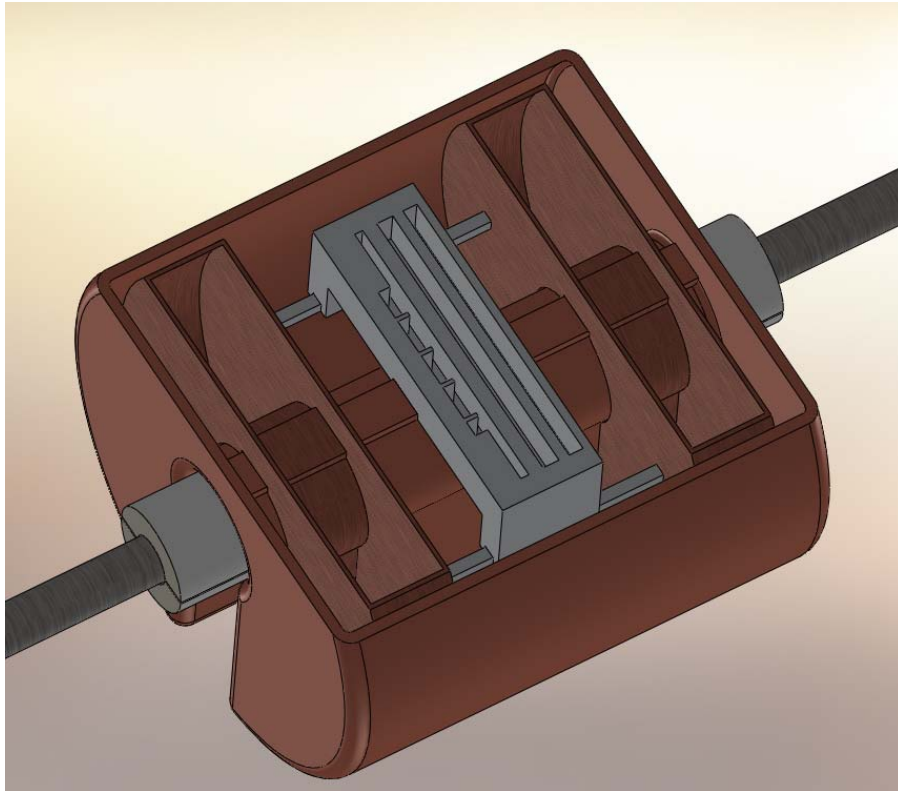


Abbildung 2.4.12: Optimierte Konstruktion des Zentralgehäuses innerhalb des neuen Außengehäuses (Entwurf)

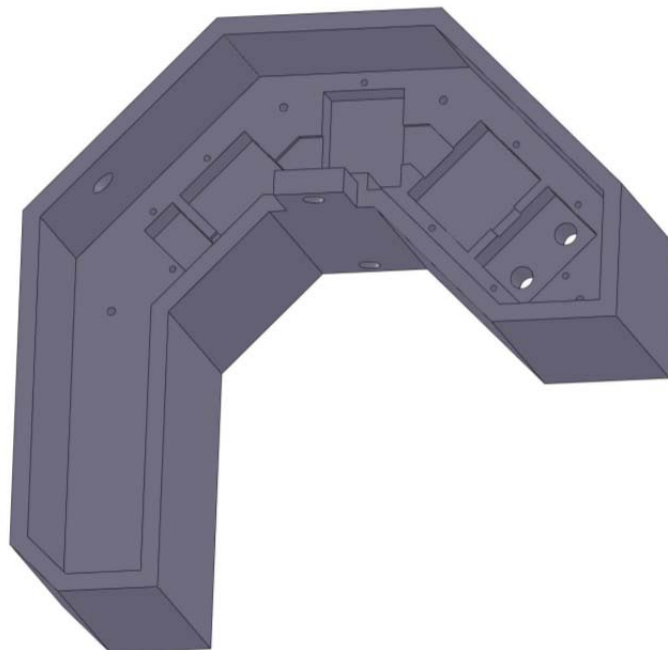


Abbildung 2.4.13: Konstruktion des inneren Zentralgehäuses zur Aufnahme der kompletten Elektronikbaugruppe

Für den Anschluss der Antennen an den Streifenfilter sind zwei Löcher in der ersten Kammer des Filters eingebracht. Dies erlaubt zum einen eine einfache Montage der fertigen Baugruppe zum

anderen sind die Strecken zur Verbindung der elektrischen HF-Baugruppen sehr kurz. Der Streifenfilter wird direkt mit der darüber befindlichen Zentralplatine über ein HF-Kabel kontaktiert. Seitlich werden über Durchführungsfilter die Anschlüsse des Energy Harvesters in das Gehäuse eingeführt.

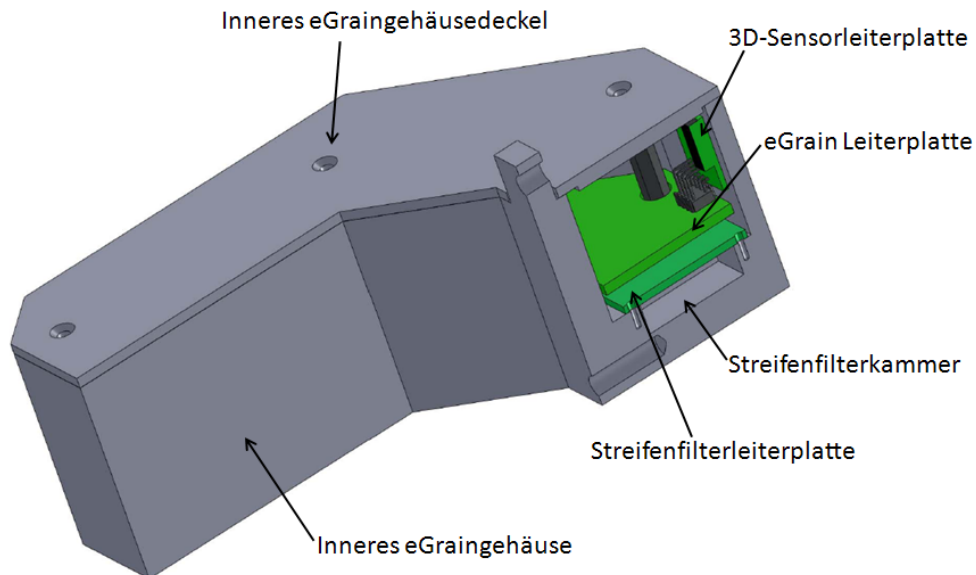


Abbildung 2.4.14:2 Aufbau der Elektronik innerhalb des Zentralgehäuses

2.4.4 Betriebssoftware ASTROSE-eGrain

Für den Betrieb und die Bereitstellung der Funktionalität der Sensorknoten ist eine umfangreiche Softwareentwicklung durchgeführt worden. Dabei waren durch die Spezifikation des Systems und die Randbedingungen der Applikation folgende wichtige Aufgabenfelder zu untersuchen und Lösungskonzepte zu erarbeiten:

- Ressourcenschonendes Betriebssystem für die Umsetzung der Messaufgabe sowie aller betriebsrelevanten Abläufe
- Treiberimplementierung für die Ansteuerung der Sensorik und der Schnittstellen
- Energiesparende Vernetzung mit anderen Sensoren zu einer Kette mit redundanter Einbindung von benachbarten Sensorknoten
- Fehlertolerante Implementierung der Methoden und Funktionen

Ressourcenschonendes Betriebssystem

Beim Betriebssystem war die Aufgabe ein besonders ressourcensparendes System zu entwickeln, das die Messaufgabe sowie die Kommunikation führen kann ohne dabei einen nennenswerten Beitrag zum Energieverbrauch zu leisten. In der Entwicklung wurde sich hierbei gegen ein multi-tasking fähiges System entschieden, weil der Overhead für die Prozessverwaltung zu hoch gewesen wäre und sich kein Nutzen ableiten ließ, da sich bei einem festgelegten Messintervall von 15 Minuten die anfallen Berechnungen und Aufgaben sequentiell abarbeiten ließen.

Treiberimplementierung

Eine Schlüsselposition kommt der Implementierung der Treiber für die angeschlossene Sensorik zu, da sie mitentscheidend für den Energieverbrauch ist. Daher wurden alle Möglichkeiten der angeschlossenen Sensoren genutzt, um den Energieverbrauch zu senken. Dazu gehört das kontrollierte An- und Abschalten der Sensoren, so dass die Einschwingphase gerade abgeklungen ist und im direkten Anschluss der Wert abgetastet wird. Da die Schnittstellen für den Datentransport limitierend sind, wurde ein Clock-Scaling eingeführt, das den Systemtakt optimal auf die Operationen anpasst. So sind in ALU-IDLE Zyklen nicht unnötig viele Systemtakte ungenutzt verstrichen.

Energiesparende Vernetzung

Den Hauptteil der Firmware auf den ASTROSE eGrains macht das Kommunikationsprotokoll und die Vernetzungsfähigkeit der Sensorknoten aus. Hier sind verschiedene Konzepte erarbeitet worden und evolutionär im Laufe des Projektes weiterentwickelt worden. Dazu gehört zum einen die erste Synchronisation der Knoten untereinander. Das Verfahren basiert auf einem stochastischen Ansatz und kurzzeitigem Senden eines „suchenden Sensorknotens“ und einem „Ankerknoten“, der den Schedule des Netzwerkes mitteilt. Sende- und Empfangszeit sind so gewählt, dass spätestens nach einem Messzyklus eine Synchronisation mindestens zweier Knoten gelingt. Bei jeder Messwertübermittlung wird dabei dieser Schedule mitgesendet, so dass auch bei Verlust der Netzwerkorganisation eine Wiedereingliederung eines Knotens möglich ist.

Ein weiterer wichtiger Schritt war die Realisierung einer Driftkorrektur. Die Uhren auf den Sensorknoten driften im Durchschnitt ca. 2 Sekunden pro Tag. Der genaue Drift ist von vielen Faktoren abhängig: unter anderem Bauteiltoleranzen, Temperatur und Alterung. Es wurde ein Algorithmus implementiert, der den Drift der eigenen Uhr korrigiert, wenn die Abweichung größer 1 Sekunde ist.

Da durch die Applikation eine lineare Topologie vorgegeben ist und eine extrem ressourcenschonende Protokollimplementierung erfolgen musste, wurde ein statischer Routingansatz gewählt. In der Implementierung vorgesehen ist jedoch die Impfung des Knoten mit der aktuellen Topologie bei der Synchronisation im Netzwerk. Durch diese „übermittelte“ Topologie ist der Sensor in der Lage, statische Routen zu halten.

Fehlertolerante Implementierung

Insbesondere durch die Möglichkeit von eingekoppelten Störungen kann ein peripherer Teil der Schaltung ausfallen oder die Kommunikation mit ihm gestört sein. Daher ist es besonders wichtig die Schnittstellen so fehlertolerant auszulegen, dass sich der Mikrocontroller unter keinen Umständen an der Abarbeitung der Kommunikation aufhängen kann. In der Schaltung sind dazu verschiedene Sensorschnittstellen hard- und softwareseitig eigenständig ausgeführt.

2.4.5 Basisstation

Zur Überführung der Messdaten der Sensoren in die bedrahtete Infrastruktur wird eine Empfangseinheit benötigt, die ferner auch koordinierende Aufgaben im Sensornetzwerk übernehmen muss. Das Konzept für eine solche Basisstation beruht auf einer „store and forward“-Architektur, die den Datenverkehr über die Drahtlosschnittstelle puffert und der bedrahteten Schnittstelle zuführt. Die Basisstation bildet die komplementäre Protokollschnittstelle zu den Sensorknoten. Ihre Firmware gleicht bei der Funkprotokollimplementierung denen der Knoten, besitzt jedoch zusätzlich eine interruptgesteuerte bedrahtete Kommunikation über die RS232 Schnittstelle, auf der sie Daten senden und empfangen kann. Die Basisstation kann dabei jeden der in einer Kette befindlichen Knoten auch direkt empfangen im Gegensatz zu den Knoten, die auf den Empfang der direkten und übernächsten Nachbarn festgelegt sind.

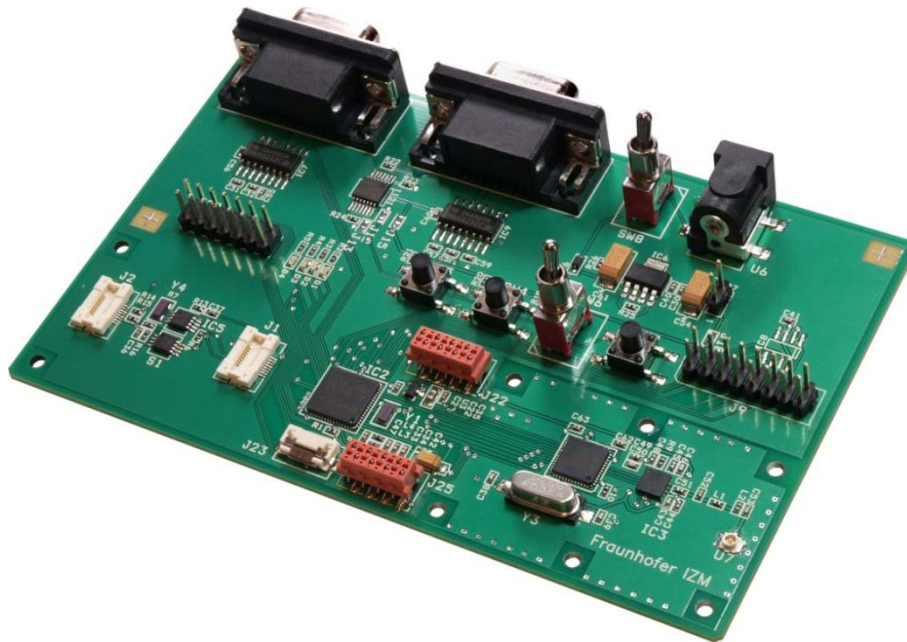


Abbildung 2.4.15: ASTROSE-Basisstation

Erstellung von Testboxen zur Protokollentwicklung

In enger Abstimmung mit den Partnern KE-Automation und unilab wurde ein Übertragungsprotokoll für die serielle Schnittstelle der Basisstation entwickelt, über die die Daten an die angeschlossenen Backend Geräte übergeben werden und entsprechend weiterverarbeitet werden. Dazu wurden die Verbindungsparameter und die Telegrammstruktur sowie die einzelnen Telegrammtypen, die bei ASTROSE zum Einsatz kommen sollten, in einem Dokument festgelegt. Um die Implementierung des Protokolls bei allen Partnern unabhängig testen zu können und insbesondere parallel die Auswertung und Darstellung der Daten weiter zu realisieren, wurde auf der Zielhardware der Basisstation eine Testsoftware geschrieben, die das Protokoll beinhaltet aber Pseudo-Random oder festgelegte Sensordaten sendet. Somit können die Einhaltung der Telegrammstruktur sowie echtzeitkritische Methoden getestet werden. Das Protokoll ist dann in seiner abgestimmten Version implementiert worden. Die Datenübergabe hat gut funktioniert.



Abbildung 2.4.16: Testbox zur Protokollimplementierung

Abbildung 2.3.16 zeigt die Testbox, die in einem eigens konstruierten Gehäuse zur Generierung von Daten und zur Testung des Protokolls dient. Eine zweite serielle Schnittstelle auf der Leiterplatte erlaubt ein Programmieren via Bootstrap-Loader, so dass Korrekturen an der Firmware einfach durchzuführen sind.

Der Aufbau des Protokolls ist in einen Header gegliedert, der Synchronisations-, Versions- und Parserinformationen enthält. Daran anschließend finden sich die Sensordaten. Den Abschluss bilden optionale Prüfsummenfelder. Abbildung 2.4.17 zeigt schematisch die Belegung der Felder beispielhaft am Befehl „Initialisierung der Basis“.

Initialisierung der eGrain Basis (0xF0)

Bedeutung	Synchbyte 1	Synchbyte 2	#Payload	Version	Command	Checksumme
#Bytes	1	1	1	1	1	2

Feld	Beschreibung	Zahlenwert	Umrechnung
Synchbyte 1	Synchr. auf Telegramm-Beginn	0xAA	Keine
Synchbyte 2	Synchr. auf Telegramm-Beginn	0xAA	keine
#Payload	Anzahl der nachfolgenden Bytes des Telegramms	4	keine
Version	Versionsnummer des verwendeten Protokolls	1	keine
Command	Versetzt die Basisstation in den Gateway Betrieb und liefert die verfügbaren Protokollversionen zurück	0xF0	keine
Checksum	Checksumme über alle Daten (optionale Auswertung)	0x0000...0xFFFF	In dieser Protokollversion ist keine Checksummenprüfung implementiert

Antwort: Zustandstelegramm (0x8n)

Bedeutung	Synch- byte1	Synch- byte2	#Payload	Version	Command	Protokollvers. 1	Protokollversion n	Checksumme
#Bytes	1	1	1	1	1	1	1	2

Abbildung 2.4.17: Telegrammstruktur des Kommunikationsprotokolls zwischen Basisstation und Infrastruktur

Die Testbox wurde auch unter anderem dazu genutzt, die Implementierung des Protokolls in der Visualisierungssoftware zu testen, die im folgenden Kapitel näher beschrieben wird.

Vernetzung der Basisstation mit der Infrastruktur

Die Anbindung der Basis an die Infrastruktur der Leittechnik über die Komponenten von KE-Automation und Unilab erfolgt über eine serielle Schnittstelle. Für eine Übertragung über weite Strecken und eine potentialfreie Übertragung wurde die Lichtwellenleitertechnik als Übertragungstechnologie gewählt. Es wurden dabei aktuell knapp 30m von der Antenne auf der Außenseite des Gebäudes bis in die Leittechnik realisiert. Die Spannungsversorgung wird parallel dazu über eine Zweidrahtleitung an die Basisstation geführt.

2.4.6 Graphical User Interface

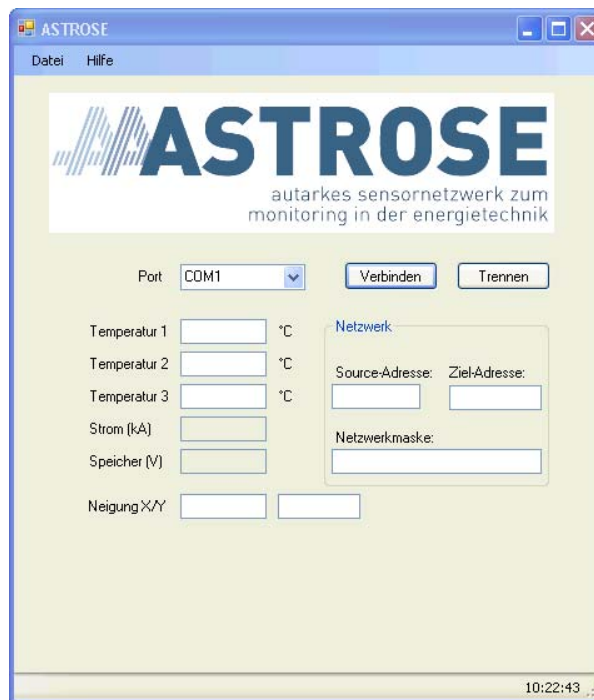


Abbildung 2.4.18: Erste Version der Visualisierungssoftware

Parallel zum Hardware-Software-CoDesign wurde zusätzlich eine Anzeigesoftware entwickelt, die es erlaubt eine grafische Darstellung und Speicherung der Daten auf einem Laptop oder PC vorzunehmen. Dieses Softwarewerkzeug erwies sich während der gesamten Laufzeit als extrem nützlich und hilfreich und wurde deshalb kontinuierlich weiterentwickelt.

Abbildung 2.4.18 zeigt dabei den ersten Entwurf, der speziell dazu diente, die Testergebnisse der Funkstrecke zwischen Sensorknoten und Basisstation verbunden mit der Anzeige der Sensorwerte darzustellen. Durch Abgleich mit den anliegenden physikalischen Größen an den Sensorelementen konnte dadurch effektiv die Fehlersuche bei der Implementierung der Sensorsoftware insbesondere bei der Erstellung der Treiber für die Ansteuerung der Sensoren gestaltet werden.

Über die Anzeige der empfangenen Sensordaten soll zusammen mit der grafischen Darstellung ein Überblick über die Verhältnisse am Leiterseil in nahezu Echtzeit geschaffen werden. Die Daten selber wurden im Feldversuch in Zwönitz über mehrere Tage hinweg zur Speicherung in eine Datei geschrieben, die sich wiederum in Excel einlesen lässt. Später wurde eine Steuerung der Basisstation implementiert, die zusätzliche Befehle für das Auslesen und Löschen eines auf der Basisstation befindlichen Speichers hatte. Mittels eines Befehls „Offline-Betrieb“ konnte die Basisstation die empfangenen Telegramme auf diesem Speicher zwischenspeichern, die sich dann mittels der Software auslesen ließen. Somit war eine erste Möglichkeit geschaffen worden, die Basisstation auch über die Software steuern zu können.

Das Resultat der Entwicklung im Projektes zeigt Abbildung 2.4.19. Über die Auswahl einzelner Sensorgruppen lassen sich die wesentliche Daten eines Sensors online anzeigen. Dies ermöglicht im Feldversuch eine schnelle Abschätzung zur Funktionalität des Sensorknotens und seiner Funkverbindung zur Basisstation.

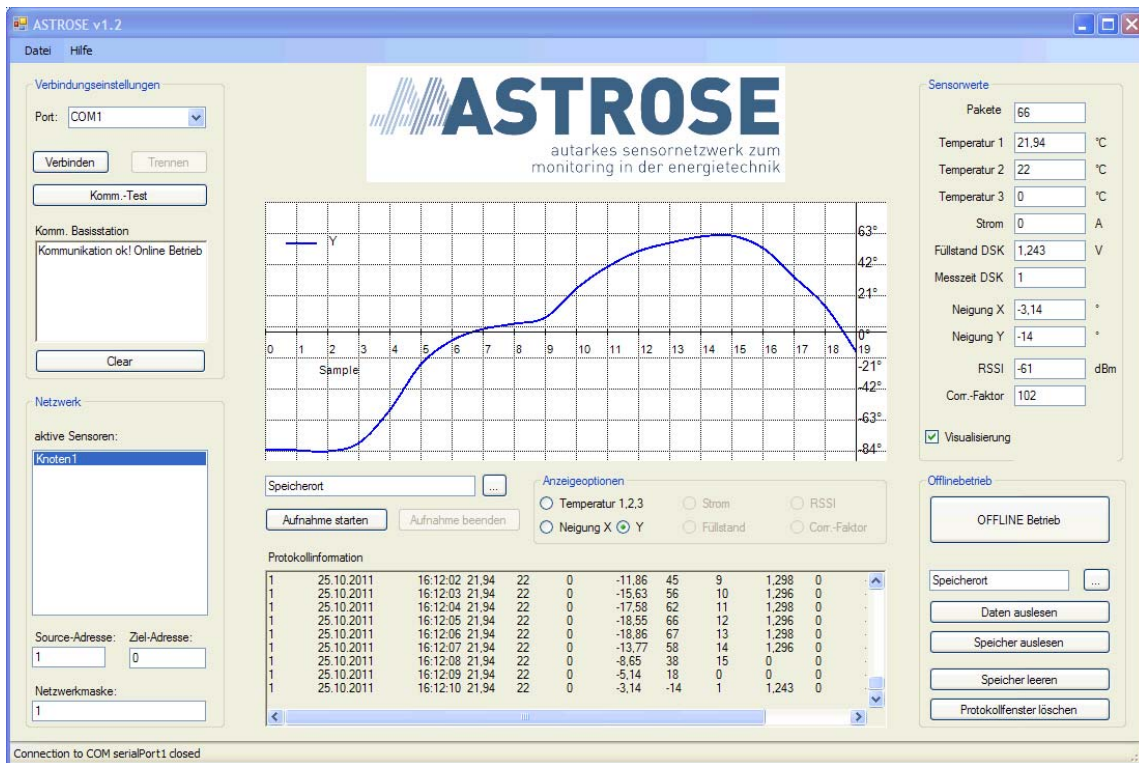


Abbildung 2.4.19: Software zur Steuerung der Basisstation und Anzeige der Sensorwerte

2.4.7 Test der Komponenten

Während des Projektes wurden sowohl kleinere Messungen an der Elektronik, selbst zur Verifikation der Funktionalität und Einhaltung der spezifizierten Eigenschaften durchgeführt, sowie größere Messungen in Form von Hochspannungslaborversuchen und Feldtests unterstützt.



Abbildung

Abbildung 2.4.20: Unterstützung bei der Testung eines ASTROSE eGrains im Hochspannungslabor in der TU Chemnitz

Die Ergebnisse der Labortests wurden in den jeweiligen Optimierungsschritten aller Komponenten berücksichtigt. Anschließend erfolgten die erneute Fertigung und die Inbetriebnahme der Komponenten im Labor.

Abbildung 2.4.21 zeigt beispielhaft einen Test zur Funktionalität der Sensorknoten insbesondere der Vernetzung der ASTROSE eGrains untereinander.

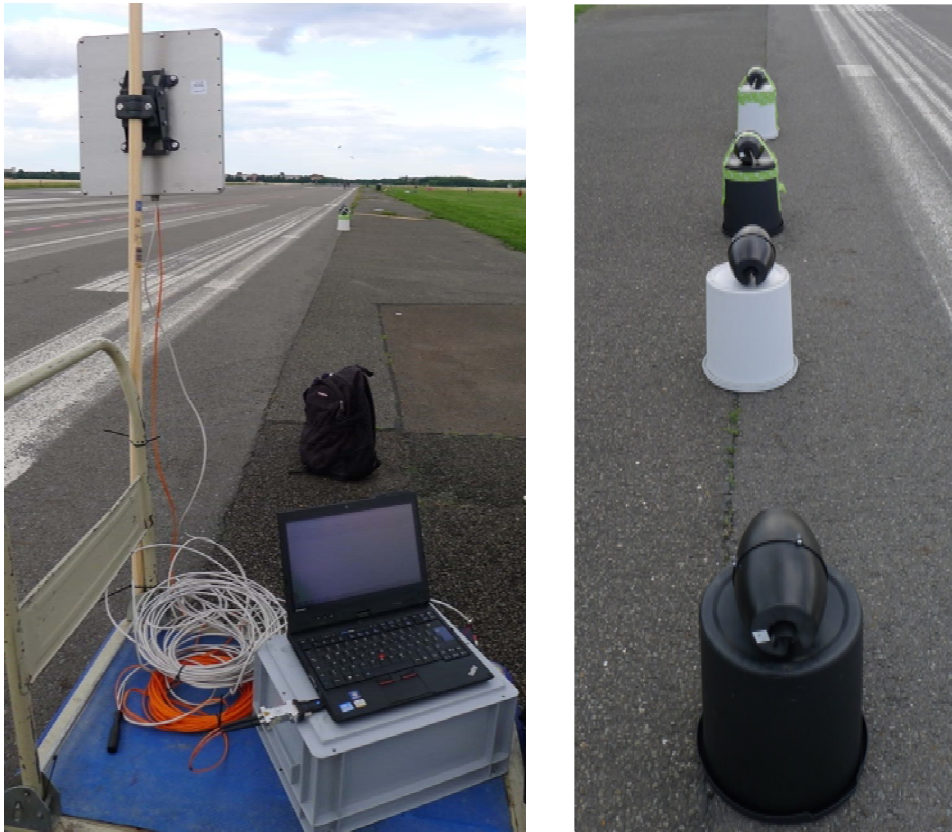


Abbildung 2.4.21: Funktionstest der Vernetzung der Sensorknoten

2.4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die elektronische Schaltung des Sensorknotens sowie die Basisstation mit ihren Schnittstellen zur bedrahteten Infrastruktur wurden zum Abschluss des Projektes einem Gesamtsystemtest in Niederwiesa unterzogen. Dabei sind Messdaten von Knoten über andere weitergeleitet und von der Basisstation übergeben worden. Das System wird anhand der ermittelten Spannungswerte am Doppelschichtkondensator allein durch den Harvester versorgt und hält das ihm damit zustehende Energiebudget für die Umsetzung der Messaufgabe ein.

Anhand der einlaufenden Daten kann sicher darauf geschlossen werden, dass:

- die spezifizierten Energieverbräuche durch das realisierte Schaltungskonzept und die implementierte Betriebssoftware eingehalten worden sind,
- die Betriebssoftware voll funktionstüchtig ist,
- die Ansteuerung der Sensoren funktioniert, da die gemessenen und übermittelten Werte den erwarteten physikalischen Gegebenheiten am Leiterseil entsprachen,
- der Empfang der Sensorwerte durch die Basisstation funktioniert und die anschließende Übermittlung der Daten in die Infrastruktur zuverlässig durchgeführt wird.

2.5 Ergebnisdarstellung von MPD

2.5.1 Motivation und Zielstellung

Das Aufgabenfeld für das Verbundvorhaben ASTROSE hatte sich für die MPD GmbH im Wesentlichen in zwei Aufgabenbereiche gegliedert.

Gehäusedesign

Die Entwicklung eines Gehäusedesign für das ASTROSE-System am Leiterseil (Sensorknoten) war Bestandteil des ersten Aufgabenbereiches. Neben der Auswahl des Gehäusematerials und Gestaltung des Gehäuses mussten Befestigungstechnologien der einzelnen Komponenten im Gehäuse und der ASTROSE-Sensorknoten an den Stromseilen sowie dessen Interfaces hinsichtlich elektrischen, mechanischen und klimatischen Anforderungen entwickelt werden. Die Gehäusegestaltung musste so vorgenommen werden, dass es keine Auswirkung auf die Funktion der im Sensorknoten enthaltenen Komponenten durch Umwelteinflüsse jeglicher Art gibt.

Konkret sollten und wurden folgende Komponenten im Sensorknoten integriert werden:

- Controller/Transceiver
- Antenne
- Power-Modul (Energieharvester)
- Sensorik (Temperatur, Neigung, Strom)

Anhand von Demonstratoren waren die Entwicklungsstände zu den Montageverfahren und zur Aufbaukonstruktion und – Technologie des Moduls nachzuweisen, welche auch Grundlage für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen im Labor und im Feld waren. Die Demonstratoren sollten im späteren Projektverlauf überarbeitet werden, so dass Änderungen der Aufbaukonstruktion mit Überarbeitung der Montagetechnologie, Materialmodifikationen und Verfahrensoptimierung sowie Nachentwicklung der Gehäusekonstruktion optimiert werden konnten. In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sollte durch MPD eine optimierte Materialauswahl, Bauteilanordnung und Gehäusetechnologie sichergestellt werden.

AVT Neigungssensorik

Für die Integration eines Neigungssensors in Form eines MEMS bedarf es konkreten Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT). Das Ziel dieses Aufgabenbereiches war die Entwicklung einer Montagetechnologie für die MEMS-Sensorik unter werkstoffwissenschaftlichen und wirtschaftlichen Aspekten sowie unter Gesichtspunkten der Zuverlässigkeit. Für moderne AVT-Konzepte sind Kleben, Löt- und Schweiß- geeignete Kontaktierungstechnologien, die jedoch für spezifische Anwendungen weiterentwickelt oder angepasst werden müssen. Es galt, den Einfluss klimatischer Bedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur) auf das Sensorsystem mittels der Auswahl von geeigneten Materialien bzw. Kombinationen sowie einer Montagetechnologie zu reduzieren bzw. zu verhindern. Darüber hinaus musste die Sensorik so gestaltet werden, dass eine Kalibrierung des Systems und schlussendlich eine Montage im ASTROSE-Sensorknoten möglich war. Anhand von Funktionsdemonstratoren sollte die Performance und somit entwickelte AVT der Neigungssensorsysteme nachgewiesen werden.

Die Lösung der MPD-Teilaufgaben erfolgte stets in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Teilergebnisse und Vorgaben der Partner wurden durch die MPD in technische Lösungen umgesetzt und gemeinsam erprobt. Die Bearbeitung der Teilvorhaben erforderte die kontinuierliche Präzisierung der Zielstellung und Realisierungsvariante in der Zusammenarbeit der Partner.

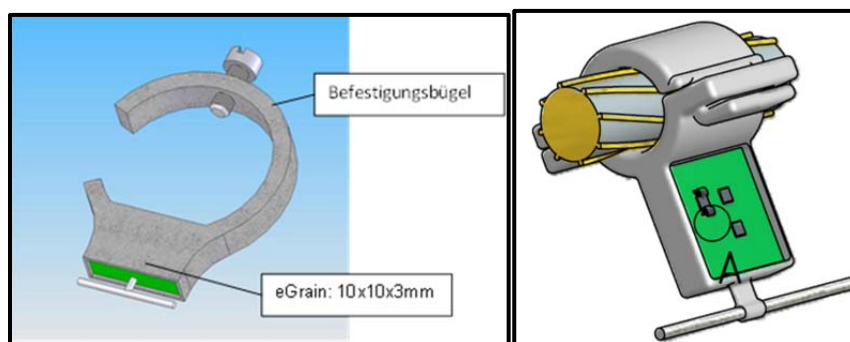
2.5.2 Ergebnisse von MPD

Gehäusedesign

Nachfolgend werden die Arbeiten der MPD GmbH zur Entwicklung des ASTROSE-Sensorknotens erläutert. Diese beinhaltet insbesondere die konstruktive Entwicklung des Gehäuses sowie dessen Montagetechnologie. Neben der mechanischen Unterbringung aller Baugruppen innerhalb des Gehäuses mussten deren Funktion und Zusammenspiel untereinander berücksichtigt und sichergestellt werden. Die Konstruktion wurde per Software im 3D-CAD-System Autodesk Inventor erstellt. Zum einen konnte somit schnell auf Konstruktionswünsche eingegangen werden, zum anderen konnte die elektronisch erstellten Dateien für die Prototypenherstellung genutzt werden. Sämtliche Konstruktionsdaten stehen bei der MPD GmbH für die Projektpartner zur Verfügung.

Im Wesentlichen baute der Gehäuseentwurf auf den Vorgaben der einzelnen Projektpartner, die die Entwicklung der einzelnen Komponenten des ASTROSE-Sensorknotens vorangetrieben haben, auf.

Bereits kurz nach Projektbeginn stellte sich heraus, dass die geometrischen Zielabmessungen für den Sensorknoten von 10 x 10 x 3 mm bei Weitem nicht ausreichend waren. Der Hauptgrund lag hier maßgeblich in den zu erwartenden Dimensionen des Energieharvesters. Dieser soll kapazitiv aus dem elektrischen Feld des Leiterseils Energie bereitstellen können. Erste Versuche der TUC zeigten, dass eine kleine Antenne nicht ausreichend sei, sondern vielmehr eine Röhre im gleichmäßigen Abstand x um das Leiterseil. Damit ergab sich ein völlig neues Layout für den Sensorknoten. Eine weitere mögliche Harvesterform als Kugel am Leiterseil hängend wurde verworfen, da damit keine Symmetrie am Leiterseil mehr gegeben ist. Dieser Punkt ist wichtig hinsichtlich Problematiken wie Leiterseilschwingung und -torsion. Die ersten Entwicklungsstadien sind in Abbildung 2.5.1 und 2.5.2 dargestellt.



**Abbildung 2.5.1: Erster Entwurf des ASTROSE-eGrains, am Leiterseil eingespannt
 (links: Skizze aus Antrag)**

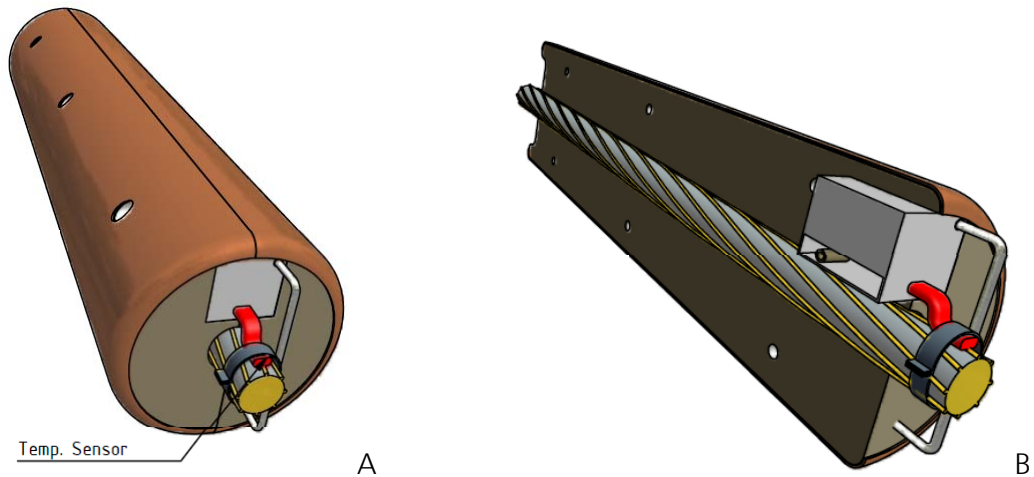


Abbildung 2.5.2: ASTROSE-eGrain als Zylinder in Voll- (A) und Schnittdarstellung (B)

Der äußere Rand (braun) stellt den Harvester dar. Im vorderen Bereich befindet sich die eigentliche Elektronik mit Antenne und Temperatursensor. Der Zylinder wird in zwei Hälften hergestellt, welche am Leiterseil miteinander verbunden werden. Das Innere Volumen ist ausgeschäumt.

Anschließend fanden wesentliche Änderungen an der Antenne statt. Eine Stabantenne genügte auf Grund ihrer schlechten Richtcharakteristik nicht mehr den Anforderungen zur Erreichung einer hohen Reichweite innerhalb des Leiterseilfeldes. Eine Ausführung auf dem Funktionsprinzip einer Rohrschlitzantenne sollte stattdessen das alte Konzept ersetzen. Jedoch bedarf diese Ausführung besonderer Geometrien und Abschirmungen, die zusätzlich am Harvesterkonzept implementiert werden mussten. In Abbildung 2.5.3 ist eine solche Antenne dargestellt. Diese sollten jeweils an den Stirnflächen des Harvesters montiert und mit der Elektronik im Gehäuseinneren verbunden werden.

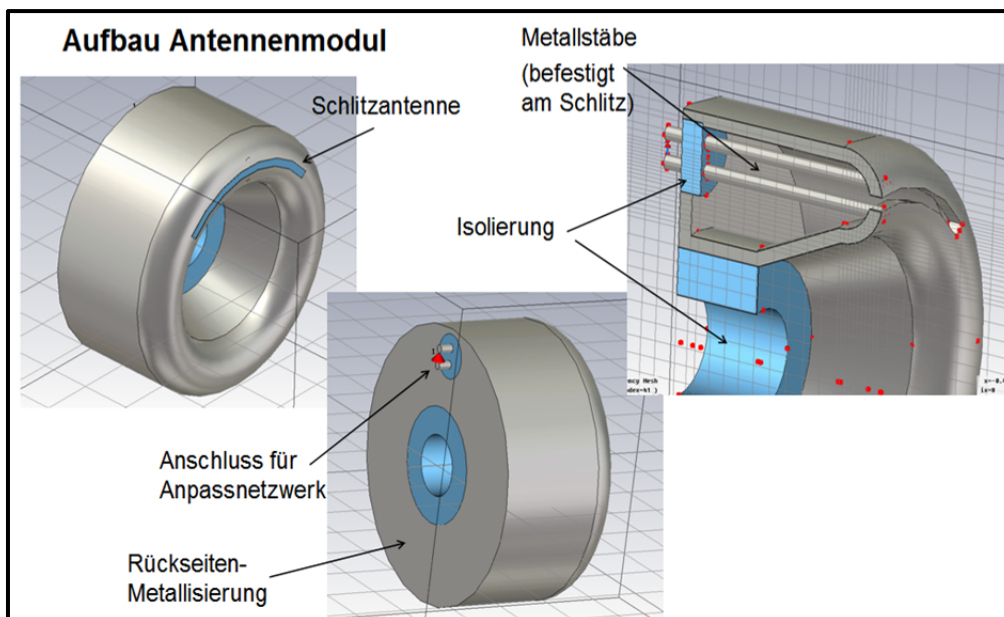


Abbildung 2.5.3: Entwurf einer Rohrschlitzantenne (ENAS FhG)

Um eine ausreichend hohe Leistung für die gesamte Elektronik bereitstellen zu können, legte man sich auf eine Größe des Harvesters fest: Länge 200mm, Durchmesser 100mm. Des Weiteren musste für die Energiebereitstellung ein Transformator und eine Anpasseelektronik (Übertrager & Gleichrichter) im Inneren des Gehäuses Platz finden. Diese wurden in zwei Kammern platziert, welche sich über das komplette Gehäuse erstreckten (Abb. 2.5.4).

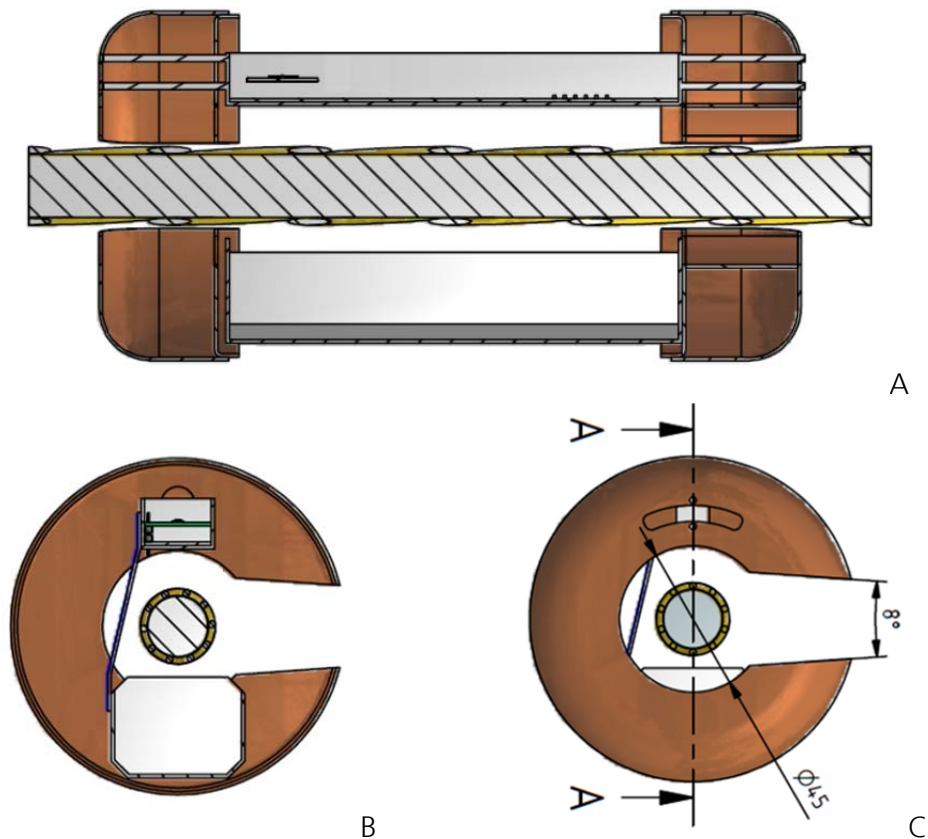


Abbildung 2.5.4: A Schnittdarstellung längs, B quer zum Leiterseil.

An den Stirnseiten sind die Bereiche der Antenne (ca. 35mm tief) dargestellt. Der obere Teil ist (grau) für die Unterbringung der eGrain-Elektronik vorgesehen, der untere Teil (grau) stellt den Bauraum des Transformators einschließlich Elektronik dar. Der äußere Zylindermantel ist aus Anschauungszwecken nicht dargestellt. In B ist die Einschuböffnung rechter Hand zur Befestigung am Leiterseil zu erkennen. Das Gegenstück ist nicht dargestellt, verschließt diesen Raum aber formschlüssig. In C ist eine Stirnseitenansicht mit der Schlitzantenne dargestellt.

Mit dieser ersten entwickelten Variante für den Sensorknoten war man nun in der Lage, erste Demonstratoren herzustellen, um die Funktionsweise des Harvester und die der Antennen labortechnisch untersuchen zu können. Auf diesem Entwurf beruhend sind Konzepte für die Herstellung der Komponenten Antenne/Außenmantel diskutiert worden. Es musste eine geeignete Technologie gefunden werden, mit deren Hilfe ein derartiges Gehäuse aus leitfähigem Material hergestellt werden konnte. Wie bereits in der vorangegangenen Abbildung farblich angedeutet, sollten die Antennen sowie der Außenmantel aus Kupfermaterial gefertigt werden. Die Antenne nimmt dabei eine sehr komplexe Form ein, welche aus mehreren Teilen bestand. Da die Herstellung derartiger Rundungen nicht durch Fräsprozesse bewerkstelligen

sind, kamen nur Zieh- oder Drückprozesse für die Fertigung der Einzelteile in Frage. Ziehprozesse werden von Maschinen durchgeführt und benötigen ein entsprechendes Gegenstück. Da der finanzielle Aufwand zu teuer war, entschied man sich für das Drücken der Hälften. Drücken wird in der Regel durch Handarbeit auf einem entsprechenden Gegenstück, meist aus Holz, durchgeführt. Als die ersten Muster fertig gestellt waren, konnten diese den Projektpartnern für erste Untersuchungen zum Harvester und der Antenne zur Verfügung gestellt werden (Abb. 2.5.5).



Abbildung 2.5.5: ASTROSE-Modul aus Kupferblech gefertigt

Nach Abschluss der ersten Untersuchungen an diesen Demonstratoren entschied man sich schnell für eine Vereinfachung des Gehäuses und deren Herstellungsprozess. Die Entwicklungsarbeiten zur Antenne schritten soweit voran, dass die Antenne revidiert werden konnte. Ein großer Vorteil dabei war, dass sich die Gestaltung der Antenne an beiden Stirnseiten stark vereinfachte und die Herstellung unkomplizierter machte. Die Antennen und der Außenmantel sollten nunmehr aus Kunststoff (Polyurethan) über Spritzgussverfahren hergestellt und anschließend mit Kupfer oder Aluminium durch Aufdampfen (wenige μm stark) beschichtet werden. Gleichzeitig entschied man sich ebenfalls für die Herstellung des gesamten Gehäuseinneren (Elektronikhalter) aus Kunststoff. Die Form des Gehäuses wurde wie in der Vorgängerversion als U-Form gewählt. Das Gehäuse kann somit auf das Leiterseil von der Seite ohne größeren Montageaufwand aufgeschoben werden. Zur Gegenhalterung werden passgeformte Gummielemente eingeschoben, die für einen sicheren Halt sorgen sollten. Das Leiterseilpotential wurde über eine Kugeldruckschraube, die zusätzlich vor Wassereindrang abgedichtet worden ist, ins Gehäuseinnere zur Elektronik geführt. Zum Abgreifen der Außentemperatur wurde ein Temperatursensor über Kabelverbindung außen am Leiterseil direkt befestigt. Hier war man sich im Klaren, dass das vorerst nur eine Notlösung darstellen sollte. Das Gehäuse wurde überwiegend über Schraubkontakte zusammengebaut (Abb. 2.5.6 bis Abb. 2.5.8)



Abbildung 2.5.6: Gehäuse mit Längsschlitz für die Seilmontage

Das Gehäuse besitzt oberhalb einen 40mm breiten Längsschlitz, um dieses von unten auf das Leiterseil aufzuschieben zu können. Anschließend wird eine Halbschale (weiß) eingeschoben, die formschlüssig für den festen Sitz des Gehäuses sorgt. Die untere Halbschale ist bereits vorher mit dem Gehäuse fest verbunden



Abbildung 2.5.7: Leiterseilbefestigung und -kontakt über eine Kugeldruckschraube, die bei Befestigung das Leiterseil berührt.

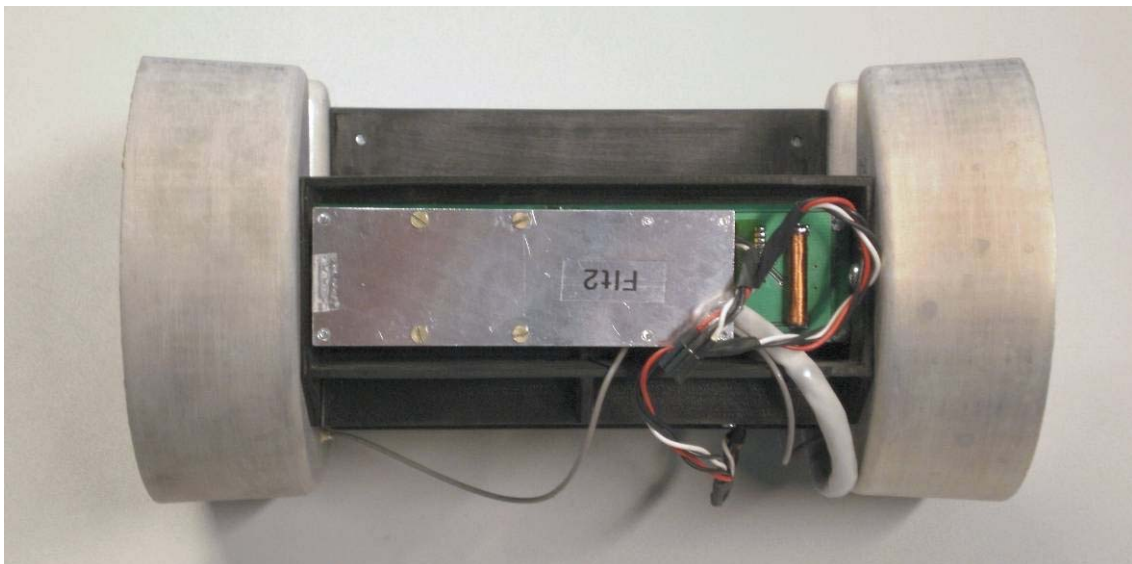
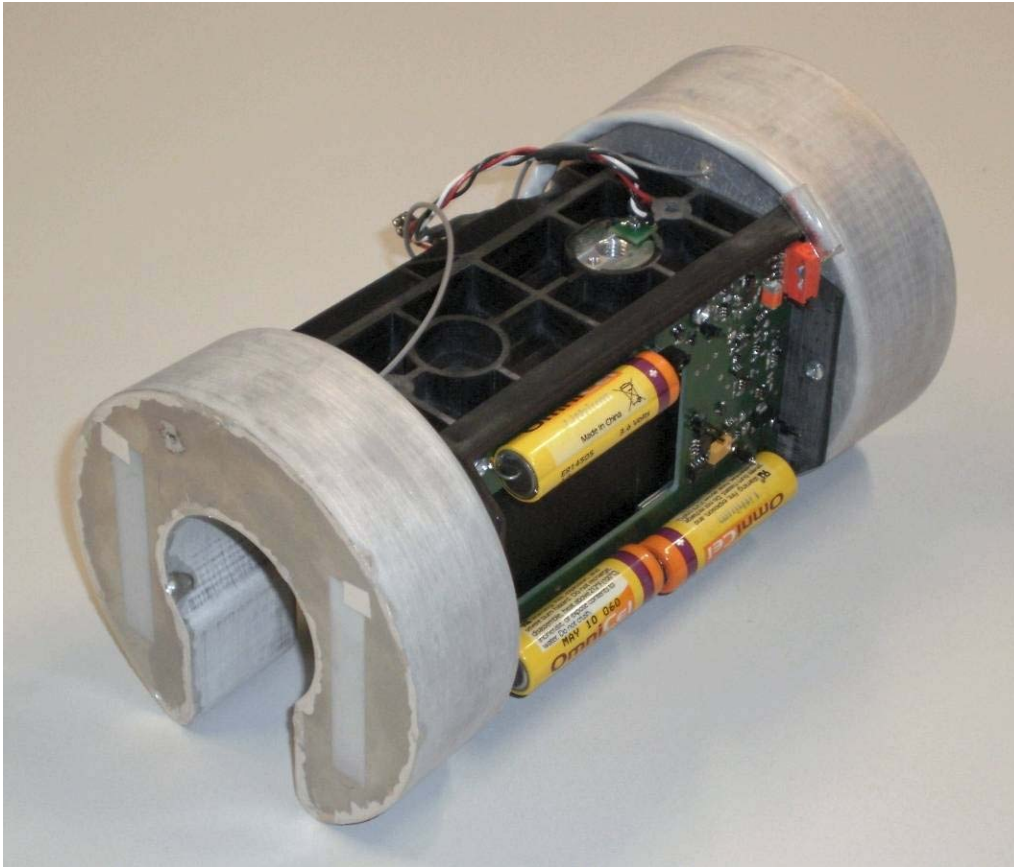


Abbildung 2.5.8: Gehäuseinnere mit Elektronik und stirnseitig angeordneten Antennen

Auf der Elektronik befindet sich die komplette Elektronik und Steuerung. Sie beinhaltet ebenfalls den Neigungssensor und den Stromsensor.

Mit dem Entwurf und der Herstellung dieser Sensorknoten anschließend konnten praxisnahe Untersuchungen zur Erreichung der Forschungsergebnisse der einzelnen Projektpartner durch Charakterisierung der Module erreicht werden.

Darunter zählten insbesondere Untersuchungen zur Performance und Funktionsweise

- der Sensorik (Neigung, Strom, Temperatur)
- der abstandsabhängigen Sende-/Empfangsleistungen der Antennen,
- der Harvesterfunktion im Hochspannungsbetrieb,
- der Mechanik und Konstruktion des Moduls.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse sollten anschließend für eine weitere Überarbeitung der Sensorknoten genutzt werden.

Während den Erprobungsphasen kam es regelmäßig zu Problemen mit der Funktionsfähigkeit bis hin zu Ausfällen der aufgebauten Module. Da eine schnelle Herstellung neuer Module nicht sinnvoll war, wurden die existenten Demonstratoren vorerst überarbeitet. Dazu zählten:

- Eine zusätzliche Kontaktierung zum Leiterseil über eine um das Seil gewickelten Metalldraht. Der Kontakt über die Kugeldruckschraube erwies sich als unzureichend.
- Befestigung der Module mittels zusätzlichen Spannverbindungen. Die alleinige Befestigung mittels der Isolatoren konnte nicht umgesetzt werden, da die Leiterseildurchmesser erheblich variierten.
- Abdichten der Gehäuse mit zusätzlich angebrachten Dichtbändern sowie Silikonschmierstoffen. Das Eindringen von Wasser konnte damit verhindert werden.
- Schirmung der inneren Elektronik mittels Metallfolien.
- Umrüsten sämtlicher Steckverbindungen auf geschirmte Steckverbindungen.

In einer weiteren Untersuchungsphase erwiesen sich die Änderungen am System für sinnvoll, die Ausfallrate konnte minimiert werden. Dem Konsortium wurde deutlich, dass eine Schirmung der inneren Elektronik vor dem elektrischen Leiterseilfeld von großer Bedeutung ist. Aus diesem Grund wurde im Förderprojekt ASTROSE eine weitere und auch letzte Überarbeitung der Sensorknoten vorgenommen. Neben der Schirmung sollten ebenfalls konstruktive Verbesserungen am Gehäuse vorgenommen werden, die auch eine Montage am Leiterseil stark vereinfachen sollten. Der finale Stand des Sensorknotens wird nachfolgend mit Hilfe von Abbildungen genau erläutert.

Außenansicht:

Der Sensorknoten wurde im Durchmesser und Länge auf 270 x 170 mm vergrößert. Das war notwendig, um die notwendige Elektronik und ihren schirmenden Komponenten innerhalb des Gehäuses unterbringen zu können. Die Stirnseiten wurden im Durchmesser nicht vergrößert, dadurch konnte man das bisher bewährte Antennenkonzept beibehalten. Daher die ovale Form des Sensorknotens. Auch das Gehäuse dieser Version besteht aus zwei Hälften, die miteinander verschraubt sind.



Abbildung 2.5.9: Außenansicht ASTROSE-Sensorknoten

Elektronikhalterung & Antennen

Im inneren des Sensorknotens bildet die Elektronikhalterung das Herzstück. Auch diese besteht aus zwei Kunststoffteilen, welche miteinander verschraubt sind. Daran werden außen die Antennen angeschraubt. Entsprechend an der Halterung angebracht sind Potentialverteiler sowie Gewinde zum Fixieren mit der Außenhülle. Der Querschnitt ergibt ebenso wie der des Außengehäuses eine U-Form.

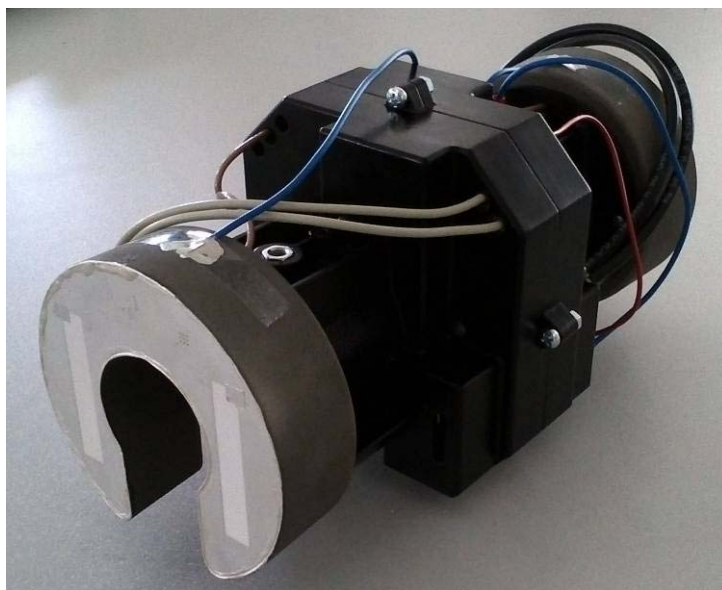


Abbildung 2.5.10: Elektronikhalterung und Antennen – Ansicht A

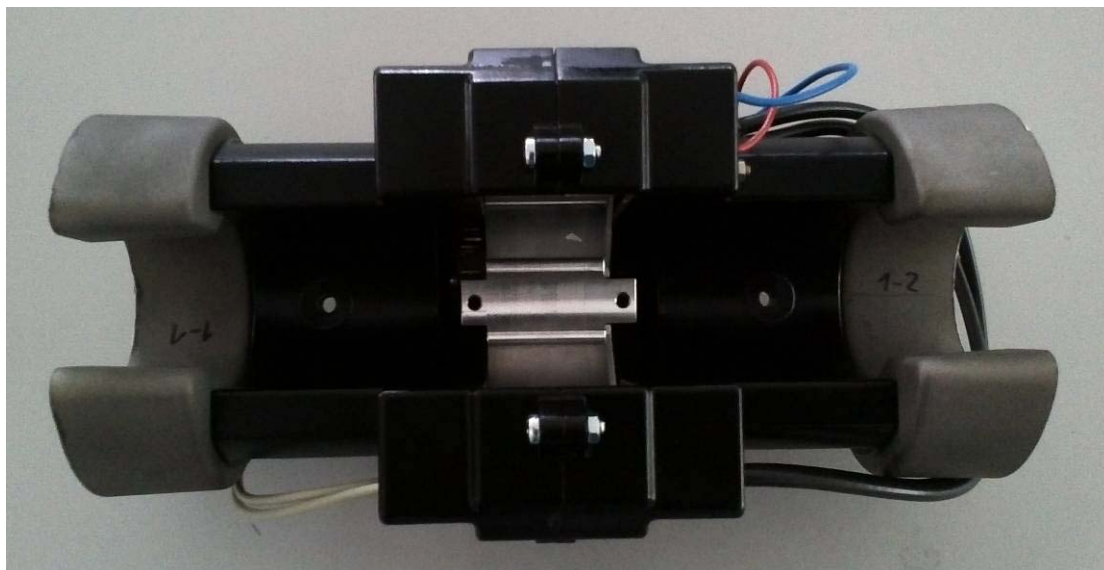


Abbildung 2.5.10: Elektronikhalterung und Antennen – Ansicht B

Elektronik

Die Zentralelektronik für den Sensorknoten befindet sich im Inneren eines Aluminium-Gehäuses, welches in der Elektronikhalterung formschlüssig eingefasst ist. Eine genaue Beschreibung dieser Baugruppe ist im Abschnitt zu den Ergebnissen der Arbeiten der Projektpartner FhG IZM und FhG ENAS zu finden. Zusätzlich in seitlich eingefassten Taschen werden die Elektronik für den Blitzschutz und der Trafo in der Elektronikhalterung montiert. Die elektronische Verbindung aller Komponenten Antenne, Trafo, Blitzschutzelektronik, Zentralelektronik erfolgt über Kabelverbindungen.

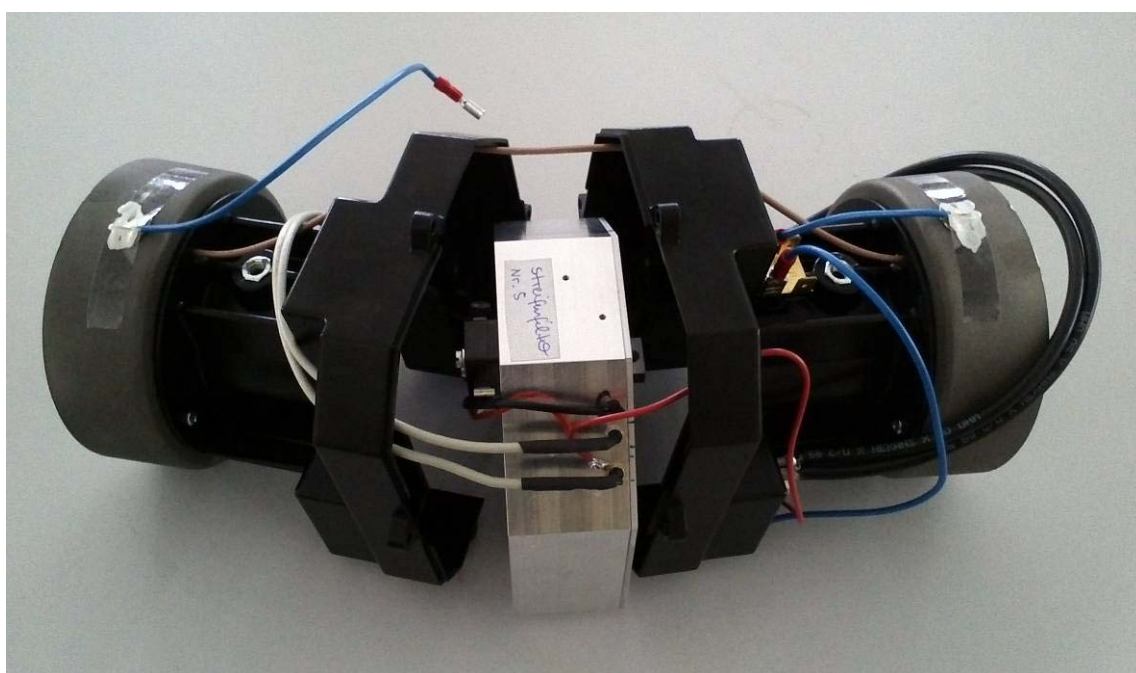


Abbildung 2.5.10: Elektronikhalterung und Antennen – Ansicht C**Montage**

Die Montage der Sensorknoten erfolgt durch Befestigung mittels Reparaturspiralen. Diese Montagemethode hat sich in der Freileitungsinstallation bisher bewährt und wurde deswegen zum Einsatz gebracht. Vorversuche mit diesen Spiralen haben ergeben, dass diese Methode ein schnelles Montieren der Module am Leiterseil durch entsprechendes Fachpersonal, eine sichere mechanische Verbindung Sensorknoten – Leiterseil sowie einen guten elektrischen Kontakt zum Abgreifen des Leiterseilpotentials ermöglicht.





Abbildung 2.5.11: Montage des ASTROSE-Sensorknotens

Da die Verwendung von Standard-Spiralen aus konstruktiven Gründen nicht möglich war, mussten diese durch Einschweißen eines Zwischenstücks modifiziert werden. Die Spiralen werden an dieses Zwischenstück aus Aluminium angeschweißt. Das Zwischenstück weist Bohrungen zum einen für die mechanische Verbindung mit dem ASTROSE-Gehäuse und zum anderen zur elektrischen Verbindung Leiterseil – Zentralelektronik auf.

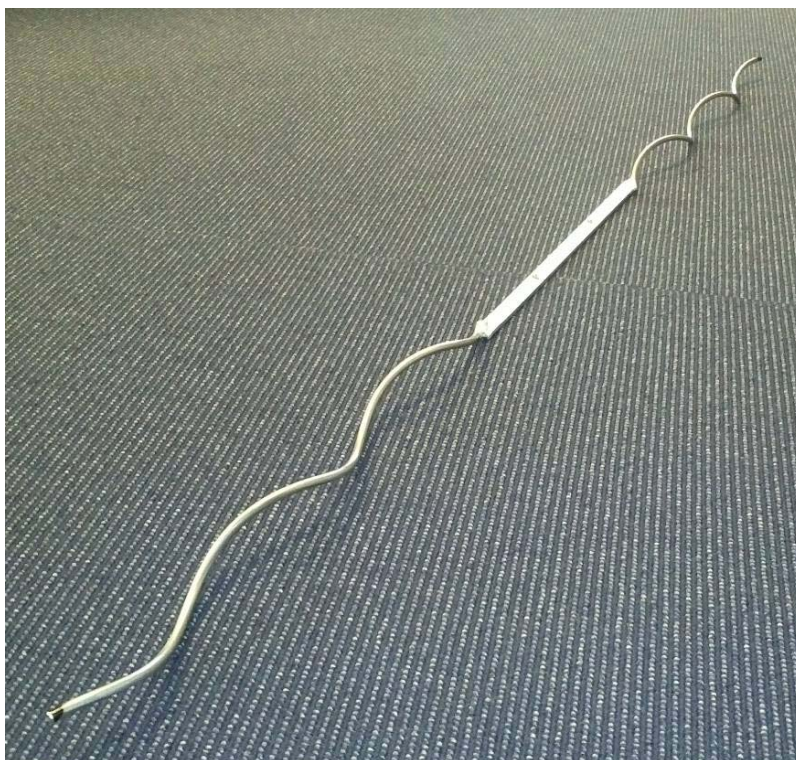


Abbildung 2.5.12: modifizierte Reparaturspirale

Die Zwischenstücke aus weichem Polyurethan wurden beibehalten und dienen ausschließlich der Abdichtung des Gehäuses vor Feuchtigkeit.

In Abbildung 2.5.13 ist eine 3D-CAD-Ansicht des kompletten Sensorknotens mit Schnittdarstellung dargestellt.

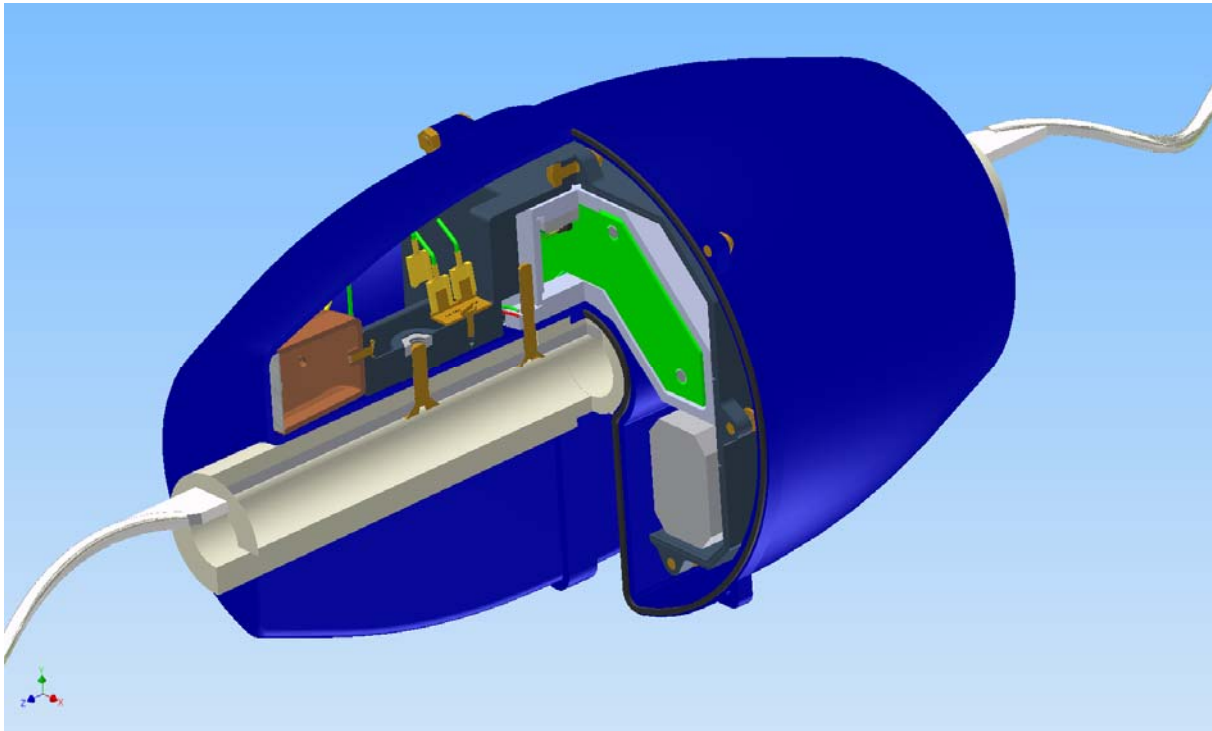


Abbildung 2.5.13: 3D-CAD-Darstellung ASTROSE-Sensorknoten

Spezifikation Gehäuse (Finale Variante):

Material:	Polyurethan, schwarz
Länge:	270 mm
Durchmesser Stirnseiten:	115 mm
Durchmesser Mitte:	170 mm
Wandstärke:	2 mm
Metallbeschichtung:	selektiv Cu + NiCr
	Cu 1-2µm
	NiCr 0,15µm

AVT Neigungssensor

Zur Entwicklung einer geeigneten Montagetechnologie für die MEMS-Sensoren die vom ZfM Chemnitz bereitgestellt wurden, sind zu Beginn des Projektes mögliche Materialien und Materialkombination für die AVT spezifiziert worden. Ziel war es, das MEMS zusammen mit der Verarbeitungselektronik (ASIC), die von Fm. ELMOS bereitgestellt worden ist, spannungsarm und kostengünstig auf einen Laminatträger aufzubringen und elektrisch über Drahtbondverbindungen zu kontaktieren. Auf Grund verschiedener Ausdehnungskoeffizienten der Materialien FR4, Klebstoff und Silizium muss die AVT so gewählt werden, dass diese im Temperaturbereich -40°C bis 125°C zu keiner Verspannung des Systems führt. Derartige Verspannungen führen dazu, dass die Mikrosystemstruktur des MEMS nicht mehr die Performance besitzt, wie gewünscht. Bemerkbar macht sich dieser Effekt durch die Detektion falscher Winkelwerte. Das Verhältnis der Ausdehnungskoeffizienten vom Laminat (FR4) und MEMS (Silizium) beträgt 15:3 und liegt damit sehr hoch. Der Klebstoff, mit dem die Chips montiert werden, soll also nicht nur das System mechanisch verbinden sondern auch die unterschiedliche Ausdehnung der Materialien kompensieren. In der Regel wählt man dazu ein Material, welches mit seinem Ausdehnungskoeffizienten dazwischen liegt oder den mechanischen Stress ausgleichen kann. Dazu zählen typischerweise weiche Materialien wie Silikone oder weiche Epoxidharze.

Der Aufbau des Sensorsystems wurde ausschließlich anhand von Demonstratoren bewertet. Als Referenz dienten Systeme, bei denen MEMS und ASIC zusammen im Keramikgehäuse gebondet und vom ZfM bewertet wurden. Da Keramik nahezu den gleichen Ausdehnungskoeffizient wie Silizium hat, konnte die Performance der Neigungssensorik ohne Einfluss der AVT bestimmt werden.

Im weiteren Schritt sind Aufbauten realisiert worden, bei denen MEMS und ASIC zusammen auf ein FR4-Träger gebondet worden sind. Im Vorfeld dazu musste eine Leiterplatte entworfen werden, die es ermöglichte, durch geeignete Interfaces die Sensorik zu kontaktieren und an ein Messsystem anzuschließen. Für den Klebstoff wurden verschiedene Materialien ausgewählt und am System angewandt (Abbildung 2.5.14).

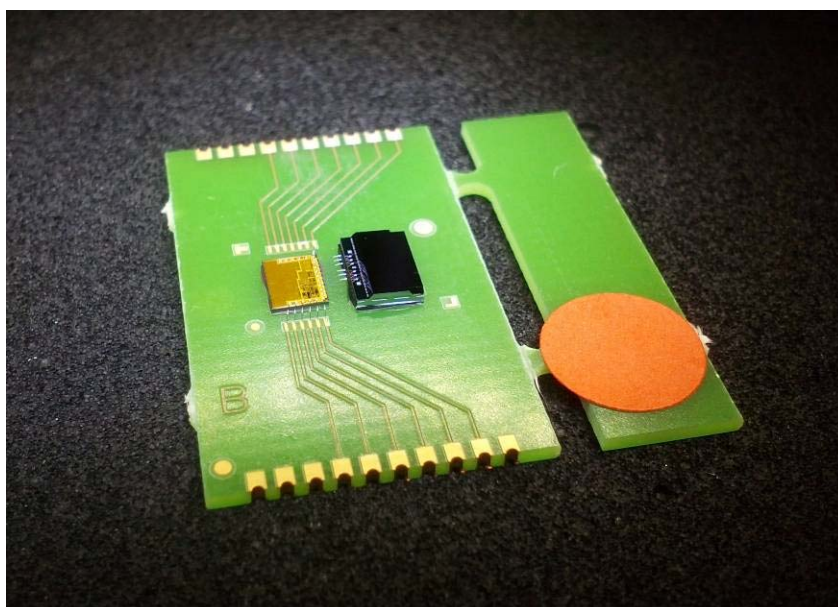


Abbildung 2.5.14: ASIC (links) und MEMS-Neigungssensor (rechts) auf Laminatträger gebondet.

Beide Chips sind über Drahtbrücken miteinander verbunden. Des Weiteren ist der ASIC über Drahtbrücken mit dem Laminat verbunden und die Kontakte für eine Messfassung nach außen geführt.

Für das System sind neben der Performance des Systems die Haftfestigkeit der Klebeverbindung untersucht sowie mikroanalytische Untersuchungen durchgeführt worden. Die Funktion des Systems und Performance-Bewertung im Temperaturbereich -40°C – 125°C erfolgte beim ZfM. Die Haftfestigkeit der Klebeverbindung wurde per Stud-Pull-Test bei MPD für unterschiedliche Materialien bewertet. Untersuchungen zur Verspannung des Mikrosystems sind beim Institut Fresenius beauftragt worden, welche anhand der Demonstratoren bewertet werden konnten. Über ein Laserreflexionsverfahren wurden absolute Werte der Verkrümmung des Systems über eine Strecke detektiert und aufgezeichnet.

Mit dem in den Vorversuchen evaluierten Silikon des Typs ELASTOSIL®, welches für die Klebeverbindung des MEMS sich als geeignet erwiesen hat, wurden im weiteren Projekt Systeme für den Sensorknoten aufgebaut (Abb. 2.5.15).

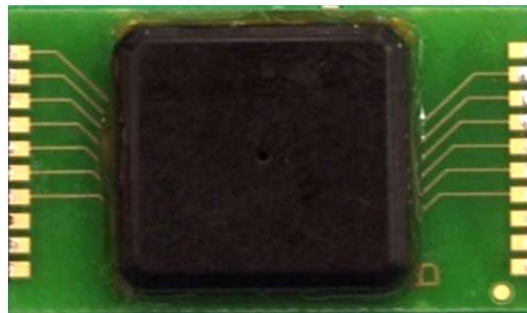


Abbildung 2.5.15: Neigungssensorik zum Schutz mit Kunststoffkappe abgedeckt. Unter ihr befinden sich MEMS und ASIC.

Mit der Änderung der Konstruktion der Baugruppen im Laufe des Förderprojektes wurde das Layout des Neigungssensorsystems ebenfalls geändert. Neben der Änderung der Außengeometrie des Trägers wurden Bohrlöcher für die Befestigung innerhalb des Gehäuses der Zentralelektronik via Schraubverbindung vorgesehen. Außerdem wurde das Interface als 8-polige Steckverbindung ausgeführt. Neben dem ASIC und MEMS wurden auf dem Träger weitere passive Bauelemente untergebracht. Diese Variante (Abb. 2.5.16) ist die finale Version, die innerhalb des Förderprojektes ASTROSE für die Neigungssensorik entwickelt worden ist.

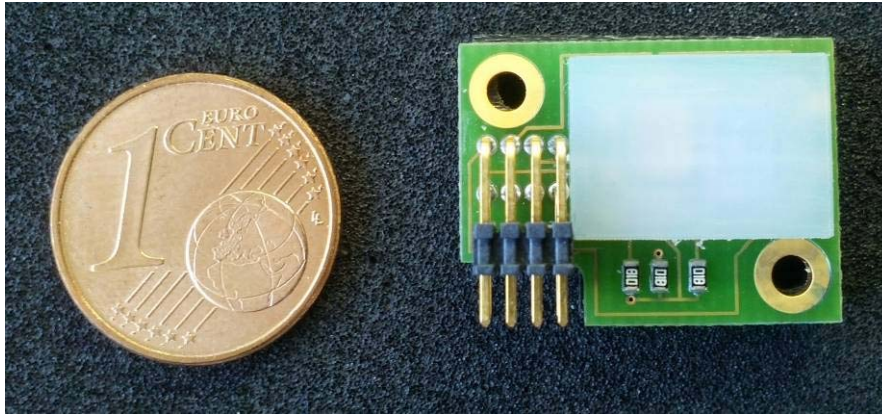


Abbildung 2.5.16: Neigungssensorik im finalen Zustand. Unter der weißlichen Kunststoffkappe befinden sich MEMS und ASIC.

2.5.3 Zusammenfassung

Für das Förderprojekt ASTROSE konnte die MPD GmbH Ihren Aufgaben gerecht werden und ein Sensorknoten konstruieren, der sich im finalen Feldversuch als tauglich erwies. Zu Beginn des Vorhabens war eine weitaus kleinere Geometrie angestrebt worden, diese musste aber schnell verworfen werden, da eine Unterbringung der Einzelbaugruppen auf Grund wachsender Komplexität nicht mehr möglich war. Es galt sich neuen Herausforderungen zu stellen und Erfahrungen in neuen Herstellungstechnologien sowie in der Entwicklung von Systemen in derartigen Einsatzgebieten zu sammeln. Eine Konstruktion zur Unterbringung aller Komponenten, einschließlich der Gewährleistung der Funktion, konnte realisiert werden. Die Materialauswahl der Einzelkomponenten und Technologien zur Herstellung dieser konnte ebenfalls erfolgreich entwickelt werden. Der Sensorknoten wurde so entworfen, dass trotz seiner Komplexität durch Modularbauweise ein einfacher Zusammenbau gesichert werden konnte. Ferner wurde eine sichere Montagetechnologie der Sensorknoten am Leiterseil entwickelt. Die innerhalb des Projektes hergestellten Funktionsdemonstratoren sind ausschließlich Prototypen, die keiner Serienfertigung gerecht werden. Auch die finale Version des ASTROSE-Sensorknoten weist Verbesserungspotentiale in allen Bereichen auf, die jedoch nicht mehr innerhalb der Vorhabenszeit realisiert werden konnte. Die Funktionsweise des ASTROSE-Systems konnte jedoch erfolgreich nachgewiesen werden.

Die entwickelte AVT für die Neigungssensorik konnte erfolgreich für die Herstellung der ASTROSE-Sensorsysteme angewandt werden. Die Module wurden so konstruiert, dass sie in ihren Geometrien und elektrischen Anschlüssen den Anforderungen an das Gesamtsystem entsprechen. Die geeignete Auswahl der Materialien und Verbindungstechnologien für die Montage der Halbleiterelemente MEMS & ASIC wurde in Untersuchungen nachgewiesen und konnte die gewünschte Performance der Sensorik unter verschiedenen klimatischen Bedingungen sicherstellen.

2.6 Ergebnisdarstellung der TU Chemnitz

2.6.1 Problem- und Zielstellung

Innerhalb des Projektkonsortiums war die TU Chemnitz für zwei Aufgabenschwerpunkte zuständig. So war eine Lösung zur Bereitstellung der für die Sensorknoten erforderlichen Energie an der Professur Mess- und Sensortechnik (MST) zu erarbeiten. Ein zweiter Schwerpunkt bestand in der Realisierung von Sensoren, die den „Belastungszustand“ der Leiterseile charakterisieren. Im Falle einer zunehmenden Durchhängung der Hochspannungsseile sollten dabei Temperatur- und Strommessungen erfolgen sowie Lage- (Winkel-) Änderungen der Seile von unter $0,01^\circ$ nachweisbar sein. Die Sensorlösungen wurden vom Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM) erarbeitet.

2.6.2 Lösungskonzept

Sensorik:

Bei den geplanten Sensoren wurde zunächst nach Zukaufteilen gesucht, die das Potential für einen erfolgreichen Einsatz im Sensorknoten haben. So konnte anhand der spezifizierten Anforderungen (Pflichtenheft) aus den am Markt verfügbaren Temperatursensoren ein geeigneter Sensor recherchiert und identifiziert werden. Dabei war die Minimierung des Stromverbrauchs eine der wichtigsten Anforderungen an das ASTROSE-eGrain.

Sowohl im Falle des Stromsensors als auch beim Neigungssensor waren Eigenentwicklungen erforderlich, da keiner der kommerziell verfügbaren Sensoren den gestellten Anforderungen gerecht werden konnte. Für die Strommessung am Leiterseil kamen zwei Realisierungsmöglichkeiten in Frage, die Messung über einen Hall-Sensor oder mit Hilfe einer Induktionsspule. Auch in diesem Fall wurde im Hinblick auf den Stromverbrauch entschieden und somit eine Lösung mittels Induktionsspule erarbeitet. Beim Neigungssensor konnte bereits auf eigene Erfahrungen bei der Herstellung von Systemen mit hoher Genauigkeit zurückgegriffen werden. So war geplant, mit der vorhandenen Technologie Systeme für einen spezifizierten Messbereich ($\pm 20^\circ$ für X-Achse und $\pm 50^\circ$ für Y-Achse) als Zielwert zu realisieren.

Energiebereitstellung:

Für die Energiegewinnung unter den speziellen Randbedingungen einer Hochspannungsfreileitung mussten mögliche Konzepte gefunden und evaluiert werden, da auf keine existierende Lösung zurückgegriffen werden konnte. Aus Sicht der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit wurde von den prinzipiell möglichen Varianten zur Energiegewinnung das elektrische Feld favorisiert. So liegt in den meisten Betriebszuständen eine konstante Spannungshöhe vor. Hingegen ist bei einer Nutzung des Stromflusses im Leiterseil sowie beim Tageslicht (solare Nutzung) mit starken Fluktuationen zu rechnen.

2.6.3 Ergebnisse

A Neigungssensor

Der erste Arbeitspunkt bestand in der Ableitung und Untersetzung der Anforderungen an das Sensor/ASIC-System und daraus wiederum für das kapazitive Sensorelement (Sensordesign) basierend auf dem Gesamtsystem. In jedem ASTROSE-eGrain ist ein zweidimensionaler Neigungssensor integriert. Die erste Achse (X-Sensor) bestimmt die Winkeländerung des Leiterseiles am Isolator und charakterisiert den Durchhang, daher ist die sensitive Richtung parallel zum Leiterseil. Diese Winkeländerung ist direkt abhängig von elastischen und plastischen Änderungen der Seillänge. Elastische, reversible Änderungen der Seillänge resultieren aus thermischen Belastungen (Stromwärme, solare und terrestrische Energiestrahlung, die

konvektive Wärmeabgabe des Seiles oder Wind) sowie aus mechanischen Belastungen, wie etwa eine Eislast am Seil oder die Durchnässung des Seiles infolge von Regen. Die plastischen, irreversiblen Änderungen der Seillänge resultieren aus der Geometrie des Spannungsfeldes (Niveauunterschied, Seillänge, Spannweite) sowie Alterungserscheinungen infolge von Kriechdehnung und Materialwanderung. Unter Einbeziehung aller Randbedingungen (plastische Änderungen führen stets zu einer Zunahme der Seillänge, 50 Jahre Betriebsdauer, Temperaturbereich -40°C bis +80°C) haben Recherchen ergeben, dass Längenänderungen des Seiles von rund -1,4 m/km bis +3,2 m/km zu erwarten sind. Sowohl die Winkeländerung der Leiterseile am Isolator als auch der Durchhang in Abhängigkeit der Seillänge kann mathematisch durch die Funktion einer Kettenlinie (Katenoide, Kettenkurve) beschrieben werden. Basierend auf diesen Berechnungen wurden anhand zweier konkreter, nachfolgend beschriebener Beispiele die Anforderungen an das Sensor/ASIC-System spezifiziert.

Eingangsgröße Seillänge [m]	Mast A	Mast B	maximaler Durchhang	
	Winkel [°]	Winkel [°]	x [m]	D [m]
500,5	-4,43	4,43	250,00	9,69
501,0	-6,26	6,26	250,00	13,70
501,5	-7,66	7,66	250,00	16,79
502,0	-8,84	8,84	250,00	19,39
502,5	-9,87	9,87	250,00	21,69
503,0	-10,80	10,80	250,00	23,77
503,5	-11,65	11,65	250,00	25,68
504,0	-12,44	12,44	250,00	27,46
504,5	-13,18	13,18	250,00	29,14
505,0	-13,88	13,88	250,00	30,73
505,5	-14,54	14,54	250,00	32,24

Tabelle 2.6.1: Berechnung der Winkeländerung in Abhängigkeit der Längenänderung des Leiterseiles (Spannweite 500 m, Niveauunterschied 0 m)

Eingangsgröße Seillänge [m]	Mast A	Mast B	maximaler Durchhang	
	Winkel [°]	Winkel [°]	x [m]	D [m]
500,5	0,30	4,27	250,06	4,34
501,0	-2,57	7,13	250,14	10,63
501,5	-4,29	8,83	250,19	14,39
502,0	-5,65	10,17	250,23	17,36
502,5	-6,80	11,30	250,26	19,90
503,0	-7,81	12,30	250,29	22,15
503,5	-8,73	13,20	250,32	24,19
504,0	-9,58	14,03	250,34	26,08
504,5	-10,37	14,80	250,37	27,84
505,0	-11,11	15,53	250,39	29,50
505,5	-11,81	16,21	250,41	31,07

Tabelle 2.6.2: Berechnung der Winkeländerung in Abhängigkeit der Längenänderung des Leiterseiles (Spannweite 500 m, Niveauunterschied 20 m)

Aus den Berechnungen folgt, dass bei beiden Beispielen keine Winkeländerungen bezüglich der Einbaulage des Seiles erwartet werden, die größer als $\pm 10^\circ$ sind. Wie Abbildung 1 verdeutlicht, weist jedoch jedes Leiterseil eine Vorauslenkung bezüglich der Horizontalen auf. Der Betrag dieser Vorauslenkung ist direkt abhängig von der Geometrie des Spannungsfeldes. Auf Grund dessen und weil der Messbereich des Sensorelementes stets symmetrisch zur Horizontalen ist, muss diese Vorauslenkung beim Design berücksichtigt werden.

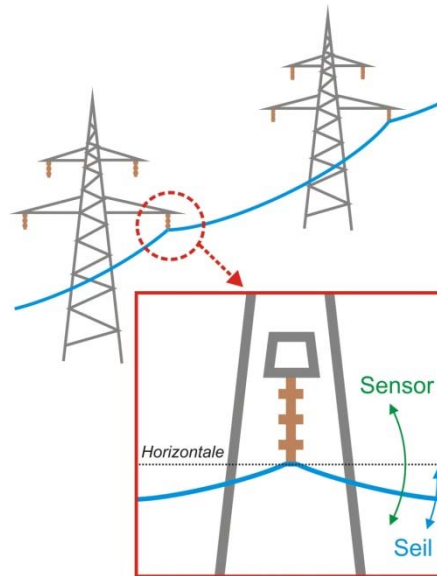


Abbildung 2.6.1: Schematische Darstellung der Winkeländerung der Leiterseile und des Arbeitsbereiches der Sensorstruktur

Es lässt sich aus den Recherchen und Berechnungen schlussfolgern, dass sich der Messbereich des Sensorelementes aus einer Vorauslenkung und einer Winkeländerung in Abhängigkeit der Längenänderung der Leiterseile zusammensetzt. Da die Geometrie der Spannfelder (Niveauunterschied der Masten und Spannweite) sehr unterschiedlich sein kann, wurde der absolute Messbereich der primären Achse (X-Sensor) mit $\pm 20^\circ$ spezifiziert. Um die Berechnungen des Durchhangs der Leiterseile durchführen zu können, ist es notwendig die Winkeländerung so exakt wie möglich zu bestimmen. Daher wurde die Auflösung des Sensor/ASIC-Systems (X-Sensor) mit $0,01^\circ$ spezifiziert. Damit kann eine Längenänderung der Leiterseile von 5 mm und eine Änderung des Durchhangs von 22 mm aufgelöst werden. Durch die Anpassung von Verstärkungs- und Offsetkoeffizienten des ASIC's sollte die Auflösung des Sensor/ASIC-Systems zusätzlich verbessert werden, da dadurch der Messbereich des Sensorelementes auf den zu erwartenden Arbeitsbereich der Leiterseile abgestimmt wird.

Neben der primären Achse (X-Sensor) verfügt die kapazitive Sensorstruktur über eine zweite, um 90° versetzt angeordnete Achse (Y-Sensor), welche die Drehung um das Leiterseil charakterisiert. Somit kann das Ausschwingen im Wind oder die Verdrillung des Seiles bestimmt werden. Die Abschätzung des Messbereiches beruht auf Erfahrungswerte des Projektpartners AMPRION und wurde mit $\pm 50^\circ$ Winkeländerung sowie einer Auflösung von $< 0,1^\circ$ spezifiziert. Da ein Ausschwingen der Seile um mehr als 50° als unrealistisch betrachtet werden kann, dient die sekundäre Achse in erste Linie dazu, die Torsion des Seiles zu detektieren.

Aus dieser Anforderungsmatrix wurde ein XY-Neigungssensor mit zwei unterschiedlich sensitiven Achsen entworfen. In diesem Basisentwurf dienen die spezifizierten Messbereiche ($\pm 20^\circ$ für X-Achse und $\pm 50^\circ$ für Y-Achse) als Zielwert. Des Weiteren wurden drei weitere XY-Neigungssensoren aus dem Basisentwurf abgeleitet, um möglichst schon bzw. gerade in der ersten Projektphase ein breiteres Spektrum an Sensorstrukturen für die Projektpartner bereitstellen zu können. Die wichtigsten Parameter der vier einzelnen kapazitiven Sensorstrukturen sind in nachfolgender Tabelle 1 aufgelistet. Somit stehen vier XY-Kombinationen zur Verfügung:

- Variante 1: Kombination von Ast 0,35g mit Ast 0,75g (**Basisentwurf**)
- Variante 2: Kombination von Ast 0,35g mit Ast 1,00g
- Variante 3: Kombination von Ast 0,45g mit Ast 0,75g
- Variante 4: Kombination von Ast 0,45g mit Ast 1,00g

Auf Grundlage der Charakterisierungsergebnisse erfolgte in der zweiten Projektphase ein Redesign, welches die Anzahl auf ein optimales XY-System begrenzt.

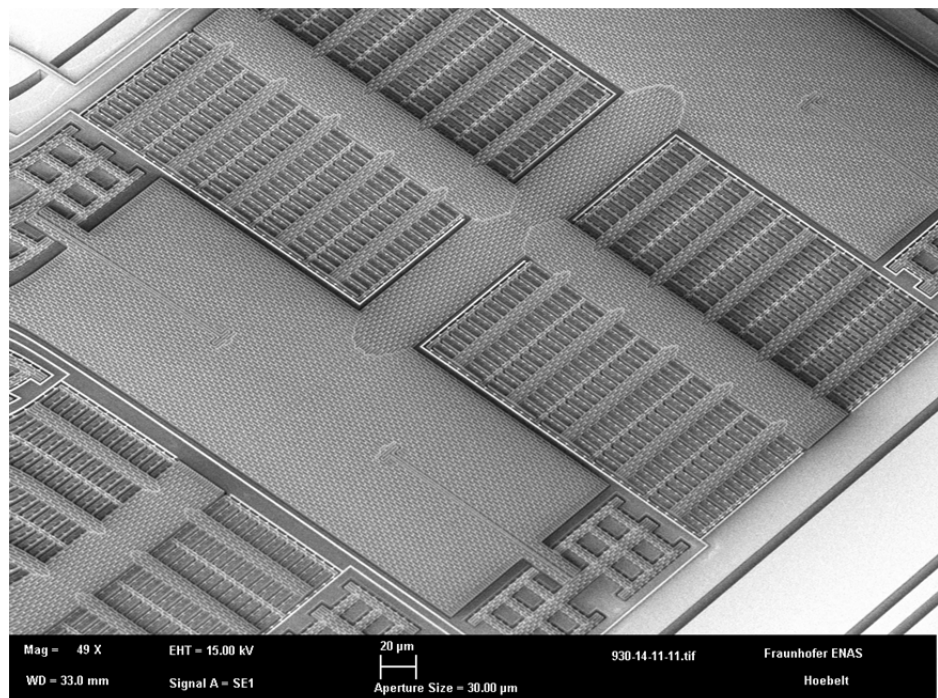
Tabelle 2.6.3: Spezifikationen der Einzelsensoren bzw. primäre Eigenschaften der kapazitiven Sensorstrukturen

Typ / Parameter	Ast 0,35g	Ast 0,45g	Ast 0,75g	Ast 1,00g
	X-Achse	X-Achse	Y-Achse	Y-Achse
Messbereich [\pm°]	20	25	50	90
Auflösung [mg]	0,18	0,22	0,37	0,49
Kapazitive Empfindlichkeit [fF/mg]	2,0	1,6	1,0	0,7
Eigenfrequenz [Hz]	300	370	470	550
3dB-Grenze [Hz]	70	85	150	200
Mechanische Rauschen [$\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$]	3,7	3,7	3,7	3,7

Die kapazitiven Sensorstrukturen wurden in der im Projektantrag beschriebenen AIM-Technologie (**A**irgap **I**nsulated **M**icrostructure) umgesetzt. Auf Grund der sehr großen Sensitivität der Primärachse und unter Einbeziehung aller Randbedingungen (Maße des Chips, maximale Federlängen, maximale Differenzkapazität des ASIC's etc.) konnte das Design jedoch nicht als AIM-Standard Entwurf durchgeführt werden. Um die Sensorspezifikation dennoch zu erreichen, war es notwendig, die bisherige Strukturhöhe eines in AIM-Technologie realisierten kapazitiven Sensorelementes von 50 μm auf 70 μm zu vergrößern. Daraus ergaben sich sowohl technologische als auch entwurfsspezifische Herausforderungen, welche anhand von Testlosen untersucht und einer Lösung zugeführt wurden (siehe Zwischenbericht 2009).

Abbildung 2.6.2 zeigt einen Teil eines ASTROSE-Neigungssensors in einer Übersichtsaufnahme mittels Rasterelektronenmikroskop (REM).

Abbildung 2.6.2:
 REM-Aufnahme
 eines ASTROSE-
 Neigungssensors
 (Übersicht)



Nachfolgend werden die Messwerte nach Sensorintegration mit dem ELMOS-Auswerte-IC exemplarisch für einen Sensorwafer dargestellt.

Tabelle 6.2.4: Parameteridentifikation aus Wafer-Level-Test (Wafer 72-03-07)

Typ / Parameter	Ast 0,35g	Ast 0,45g	Ast 0,75g	Ast 1,00g
	X-Achse	X-Achse	Y-Achse	Y-Achse
Messbereich [±°]	18	22	38	55
Federsteifigkeit [N]	0,15	0,18	0,30	0,40
Kapazitive Empfindlichkeit [fF/mg]	2,12	1,69	1,02	0,77
Eigenfrequenz [Hz]	295	330	420	490
3dB-Grenze [Hz]	60	70	120	165
Mechanische Rauschen [µg/Hz ^½]	4,0	4,0	4,0	4,0

Dabei fällt vor allem bei der y-Achse jeweils die geringere Federsteifigkeit auf, als geplant war. Deshalb wurden in einer Layoutüberarbeitung und einem zweiten Durchlauf noch erfolgreich Korrekturen vorgenommen. Da sich aber im Feldeinsatz zeigte, dass die erwartete Verdrehung der Leiterseite (y-Achse) offenbar geringer ausfällt als ursprünglich angenommen, konnten bereits die Sensoren der ersten Serie uneingeschränkt für die Feldtests eingesetzt werden. Die Kennlinie für die unterschiedlichen Sensortypen dieses Wafers zeigt Abbildung 2.6.3.

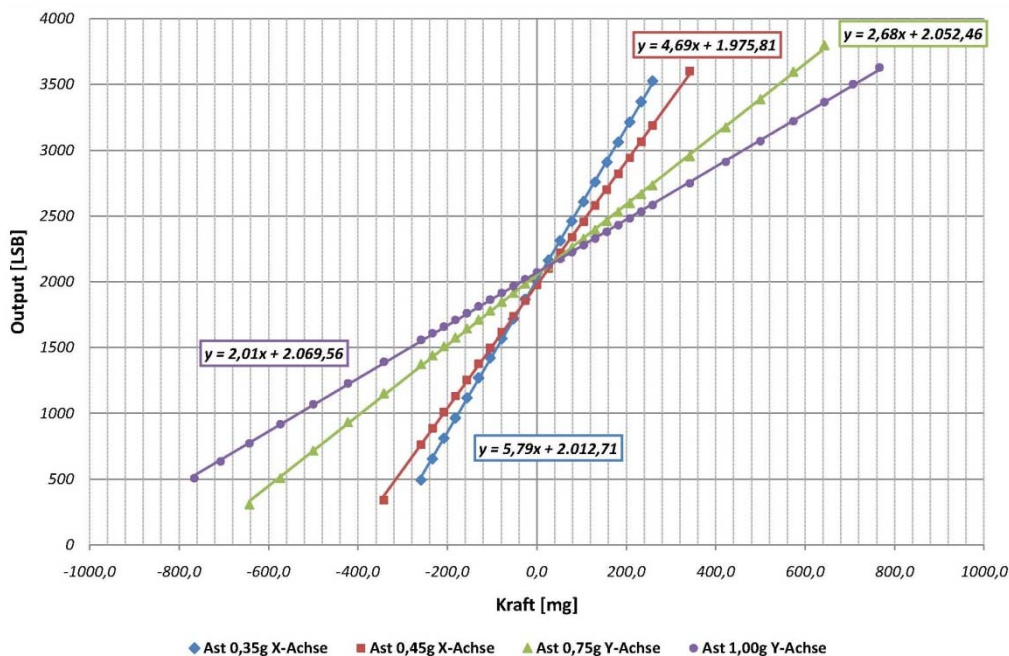


Abbildung 2.6.3: Kennlinien (Wafer 72-03-07)

Ein wesentlicher Parameter der Sensorsysteme ist jedoch die zu erreichende Auflösung. Der ELMOS-ASIC stellt 16 verschiedene Filtereinstellungen bereit. Damit wird das Rauschen des Ausgangssignales minimiert. Es wurden deshalb sowohl die Mittelwerte des RMS- als auch des peak-to-peak-Rauschens in Abhängigkeit der gewählten Filtereinstellung bestimmt (Zwischenbericht 2010). Der minimale Median des RMS-Rauschens beträgt 0,5 LSB, was einer Auflösung von 13 Bit entspricht. Für das peak-to-peak Rauschen konnte ein Median von 1,0 LSB bestimmt werden, was einer Auflösung von 12 Bit entspricht. Die ermittelten Werte bestätigen, dass die Primärachse des Sensorsystems die Lageänderung der Leiterseite mit einer Auflösung von 0,01° detektieren kann.

Der Einsatz dieser speziellen Neigungssensoren fand seinen Höhepunkt in den Feldtests, die sich vom Jahr 2011 bis in das Jahr 2012 erstreckten (siehe auch 1.5). Als Beispiel sind in Abbildung 2.6.4 die Neigungswerte (X-Achse) im Vergleich mit dem Temperaturverlauf dargestellt. Dabei zeigte sich, dass - wie erwartet - die Neigung und die Leiterseittemperatur miteinander korrelieren. Der Neigungssensor löst zudem gegenüber dem Temperatursensor (intern Leiterseil)

das Verhalten viel genauer auf.

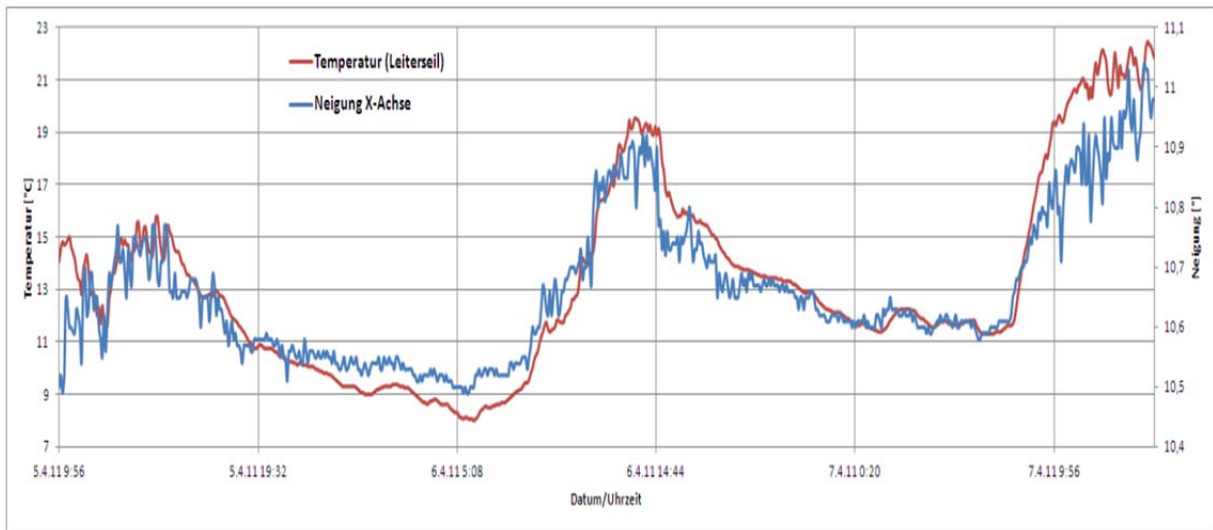


Abbildung 2.6.4: Vergleich Temperatur- und Neigungsmessung

B Stromsensor

Der Stromsensor sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Messung des Betriebsstromes im Bereich von 70 A bis 1000 A mit einer Genauigkeit von < 5%
- Messung des Kurzschlussstromes und der kurzschlussbelasteten Leiter im Bereich bis 50 kA, in der Höchstspannung bis 63 kA, mit einer Genauigkeit von < 5%
- spannungsfest bis 420 kV
- geringer Stromverbrauch (< 500 μ A)
- Betriebsspannung maximal 3,3 V
- digital oder analog auswertbar über μ C
- abschaltbar zur weiteren Energieeinsparung

Kritisch waren dabei vor allem die geforderte Spannungsfestigkeit und die benötigte Betriebsspannung. Da keiner der kommerziell verfügbaren Stromsensoren den gestellten Anforderungen gerecht werden konnte, wurde ein eigener Sensor entwickelt (Abb. 2.6.5 und 2.6.6).

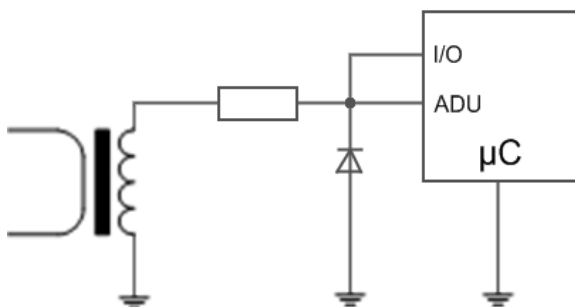


Abbildung 2.6.5: Prinzipschaltbild der Strommessung und Kurzschlussdetektion mit Mikrocontroller

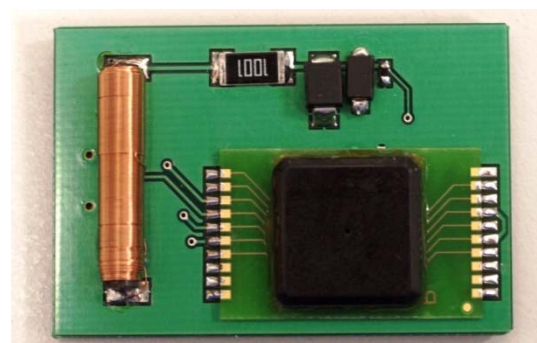


Abbildung 2.6.6: Sensorplatine mit Stromsensor (oben/links) und Neigungssensor (unten rechts)

Dabei wurde ein Konzept zur Strommessung mittels Induktionsspule umgesetzt und im Starkstromlabor an einem Transformator, welcher Ausgangsströme bis zu 400 A ermöglicht, getestet. Hierbei wurde im Abstand von 9 mm, 12 mm und 19 mm zwischen Induktionsspule und Leiterseil die Induktionsspannung (Spitzenwert) in Abhängigkeit vom Strom durch das Leiterseil gemessen. Wie erwartet, zeigte sich ein proportionales Verhalten zwischen dem Strom im Leiterseil und der Induktionsspannung. Anhand der Kennlinien konnte die Empfindlichkeit des Sensors für den jeweiligen Abstand ermittelt werden. Diese liegt zwischen 1,3 und 0,7 mV/A. Somit konnte der Stromsensor ebenfalls in einem Feldversuch (Umspannwerk Zwönitz) getestet werden. Der Stromverlauf ist mit den aufgenommenen Werten vom Sensorknoten im Vergleich zum Strom, gemessen im Umspannwerk, in Abbildung 2.6.7 dargestellt. Die Abweichung zwischen den beiden Verläufen ist ausreichend gering und liegt zwischen 2 A und 5 A.

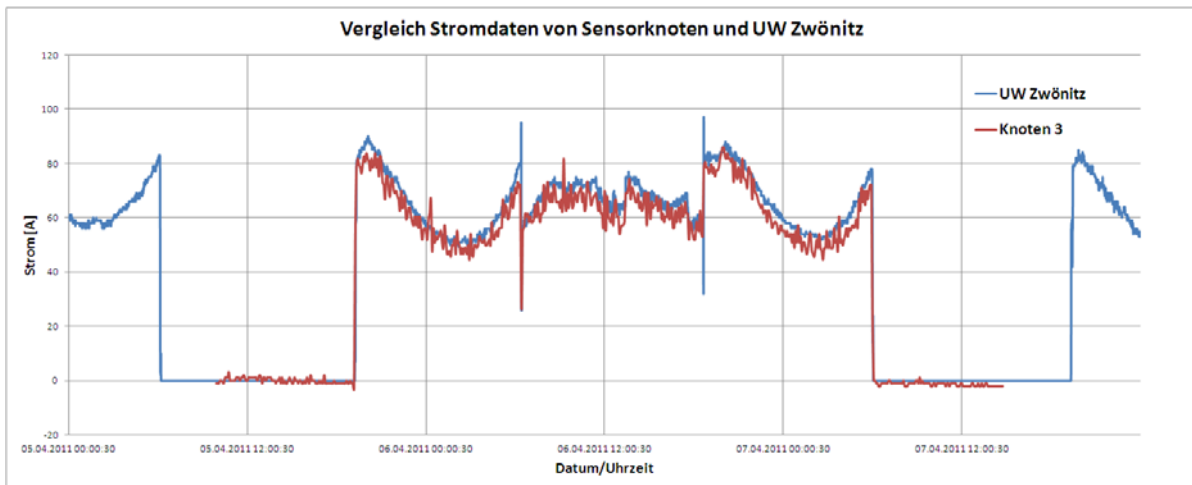


Abbildung 2.6.7: Vergleich der Stromwerte vom Sensorknoten und Umspannwerk Zwönitz

C Temperatursensor

Anhand einer umfangreichen Recherche wurde der Temperatursensor TMP275 von Texas-Instruments ausgewählt. Des Weiteren erfolgte die Überprüfung der relevanten Parameter. Der Stromverbrauch im aktiven Modus liegt bei 48,1 μ A und im Stand-by-Betrieb bei 0,1 μ A. Für die Messung der Temperatur mit einer Auflösung von 12 Bit (0,5 K) benötigt der Sensor 220 ms. Im gewählten Messintervall von 900 s fällt somit eine Durchschnittsleistung von 0,34 μ W pro Temperatursensor an. Im Astrose-eGrain sind zwei Temperatursensoren integriert. Einer dieser Sensoren befindet sich auf der Elektronikplatine, die mehrere Zentimeter vom Leiterseil entfernt ist, der andere Sensor befindet sich, nur über eine kurze Metallschraube getrennt, direkt am Leiterseil. Zusätzlich wurde ein weiterer Temperatursensor extern am Leiterseil angebracht, um den Einfluss des Sensorknotens festzustellen.

Der Temperaturtagesverlauf der drei Sensoren am Einsatzort ist in Abbildung 2.6.8 dargestellt. In der Nacht (zwischen 23 Uhr und 6 Uhr) weisen alle Sensoren nahezu den gleichen Temperaturwert auf, starke Unterschiede sind dagegen am Tag ersichtlich. So zeigt sich wieder, dass der interne Sensor auf dem Mikrocontrollerboard den Verlauf stark glättet und mit großer zeitlicher Verzögerung darstellt. Aber auch der an der Metallschraube befindliche Temperatursensor wirkt im Vergleich zu dem externen träge und zeitverzögert. Es wird davon ausgegangen, dass die zeitlich kurzen Ausschläge am externen Sensor proportional zu den Windböen verlaufen (Kühlwirkung). Auch ist der Temperaturwert des externen Sensors meist geringer (außer nachts) als bei den restlichen Sensoren. Ursache ist hier mit hoher Wahrscheinlichkeit die Sonneneinstrahlung, die das schwarze Gehäuse des Sensorknotens

tagsüber zusätzlich erhitzt.

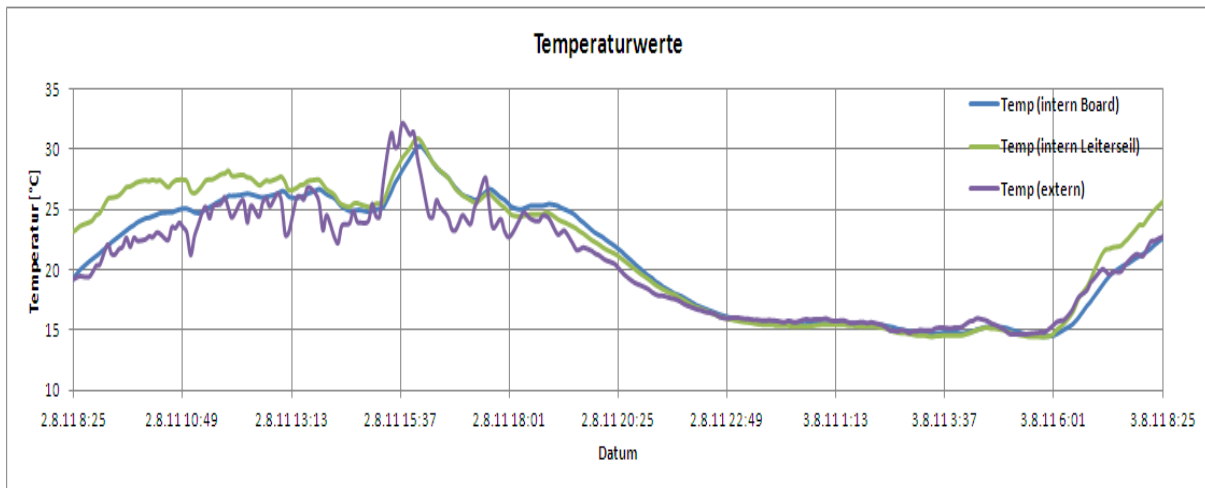


Abbildung 2.6.8: Tagestemperaturverlauf

Vergleicht man die externe Temperaturmessung am Leiterseil mit den Werten des Neigungssensors, erhält man eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 2.6.9). Es kann allenfalls eine geringe zeitliche Verzögerung bei der Temperaturmessung ausgemacht werden.

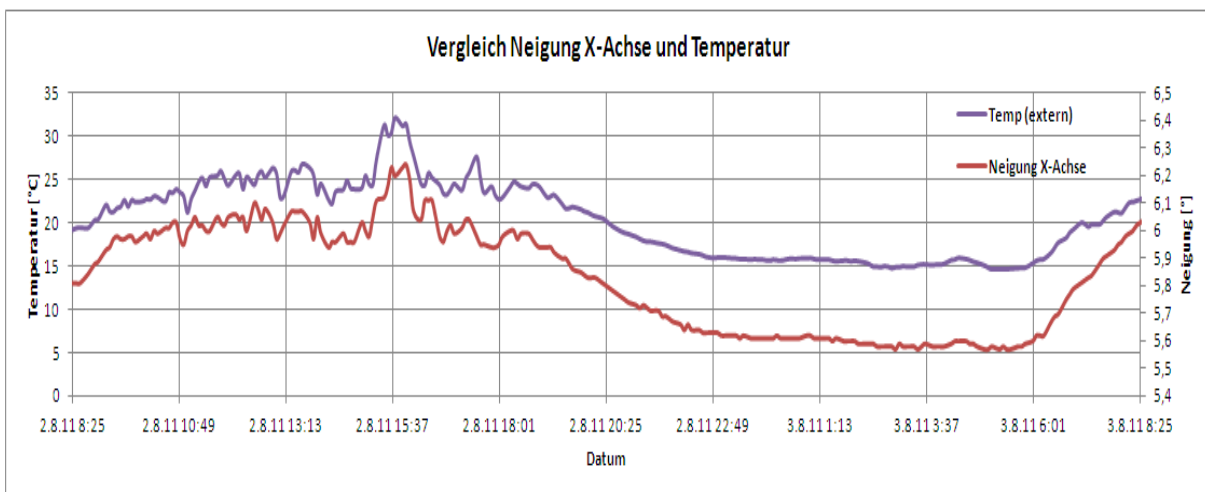


Abbildung 2.6.9: Vergleich Temperatur- und Neigungsmessung

Insgesamt wird eingeschätzt, dass eine Neigungsmessung auf Basis des entwickelten Sensorsystems für den vorliegenden Anwendungsfall die geeignetere Methode ist, da die am Temperatursensor herrschende Temperatur signifikant von der mittleren Leiterseiltemperatur abweichen kann. Dabei spielen vor allem Wind, Sonne, Adsorption und Desorption von Wasser und die Rückwirkung des Sensorsystems auf die Messgröße eine entscheidende Rolle. Der Einfluss des Systems zur Neigungsmessung auf die Leiterseildurchhängung und der Temperatureinfluss auf die Neigungsmessung sind hingegen vernachlässigbar.

D Energieversorgung für den Sensorknoten

Aus Sicht der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit wurde von den prinzipiell möglichen Varianten zur Energiegewinnung das elektrische Feld favorisiert, ausgehend von der Spannungsebene des Leiters, wie es in Abbildung 2.6.10 exemplarisch dargestellt ist.

Wohingegen beim Stromfluss im Leiterseil sowie beim Tageslicht (solare Nutzung) mit starken Fluktuationen zu rechnen ist, liegt in den meisten Betriebszuständen eine konstante Spannungshöhe vor.

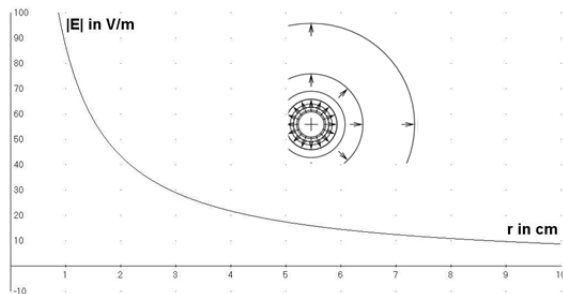


Abbildung 2.6.10: E-Feldgradient am Leiterseil

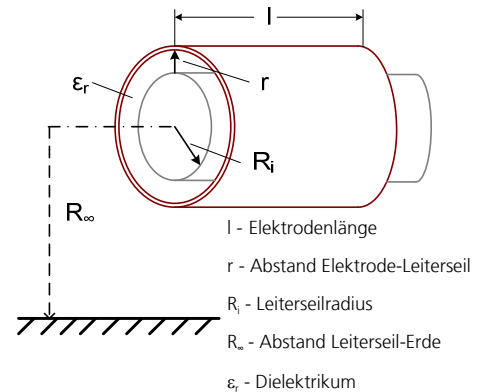


Abbildung 2.6.11: Struktur der Harvester-Elektrode um die Hochspannungsleitung

Für den ASTROSE-Sensorknoten erwies sich eine zylinderförmige Elektrodenanordnung, wie in Abbildung 2.6.11 dargestellt, als besonders geeignet. Diese Struktur bietet eine ausreichend große aktive Elektrodenoberfläche und eine günstige Geometrie hinsichtlich Teilentladungen. Die Elektrode dient einerseits als Harvester-Elektrode und andererseits als Gehäuse für alle übrigen Komponenten des Sensorknotens, um diese elektromagnetisch abzuschirmen.

Für die Quantifizierung der Energieverfügbarkeit wurde das elektrische Verhalten dieser Anordnung theoretisch untersucht und modelliert (Abb. 2.6.12). Damit ist es möglich die Energieversorgung des Sensorknotens für verschiedene Einsatzfälle und Szenarien zu dimensionieren. Im Hochspannungslabor der TU-Chemnitz konnten weitgehende experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, so dass die Modelle überprüft und evaluiert wurden.

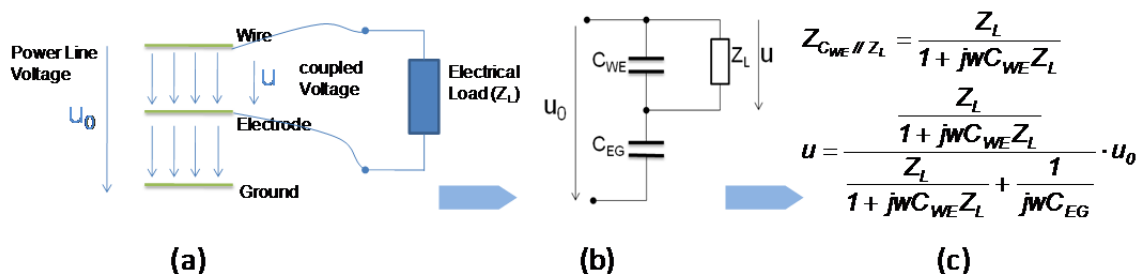


Abbildung 2.6.12: Physikalisches Modell: (a) Wirkprinzip, (b) Ersatzschaltbild, (c) elektrisches Modell

Dafür wurde eine drahtlose Messanordnung entwickelt, die es ermöglicht, unter Hochspannung die verfügbare Energie direkt zu messen und zu übermitteln. Die Spannung an einem Speicherkondensator dient als Maß für die verfügbare und spannungsabhängige Ladungsmenge. In der Spezifizierungsphase wurden ein maximaler Durchmesser des Gehäuses von $D = 2 \cdot (r + R_i) = 10$ cm und eine maximale Länge des Gehäuses von $l = 20$ cm sowie ein mittlerer Energieverbrauch der Sensorknotenelektronik von ca. $P_m = 5$ mW definiert. Nun konnten zielgerichtet Komponenten des Energieversorgungsmoduls optimiert und angepasst werden. Bereits aus dem elektrischen Modell wird ersichtlich, das durch eine geeignete Impedanzanpassung mehr Energie aus der Elektrodenanordnung zu beziehen ist (Abbildung 2.6.13). Praktisch umgesetzt wurde dies durch den Einsatz einer speziellen

Transformatoranordnung. Mit einem erweiterten Messaufbau, wie in Abbildung 2.6.14 dargestellt, kann die verfügbare Energie direkt durch den Spannungsabfall über einen Mess-Shunt erfasst und wiederum drahtlos übermittelt werden.

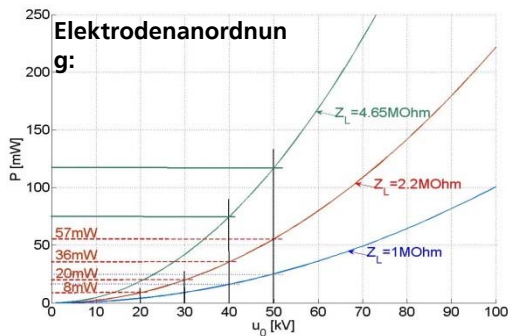


Abbildung 2.6.13: Lastabhängige Energieverfügbarkeit eines Experimentalzylinders

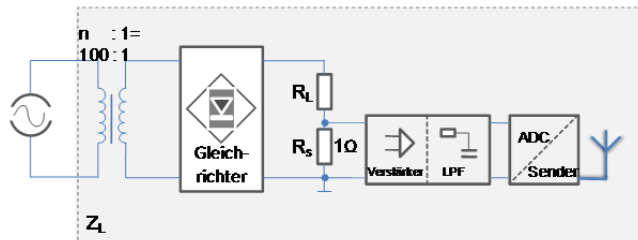


Abbildung 2.6.14: Erweiterter Messaufbau - Kopplung der Harvestingelektrode durch einen Spezialtransformator

Die wesentlichen Komponenten der realisierten Energieversorgung sind in Abbildung 2.6.15 dargestellt. Neben der Harvester-Elektrode, die sich elektrisch als hochohmige Stromquelle darstellt, ist ein Transformator zur Impedanz- und Spannungsanpassung integriert. Nach der Gleichrichtung wird die Energie zunächst auf einem Speicherkondensator gesammelt. Ausgangsseitig wird mit einer DC/DC-Wandlerstufe die von der Sensorknotenelektronik geforderte Spannungshöhe zur Verfügung gestellt. Kommunikationsschnittstellen sind bereits spezifiziert. Neben dem HV on Signal, das die Leiterseilspannung detektiert, sind weitere Signale zum Speicherzustand erforderlich.

Durch die Spezifizierung von Messintervallen mit einer Zyklendauer von 15 Minuten ist es möglich, für die energetisch aufwendigen Kommunikationsereignisse über einen längeren Zeitraum Energie in dem Speicherkondensator zu sammeln.

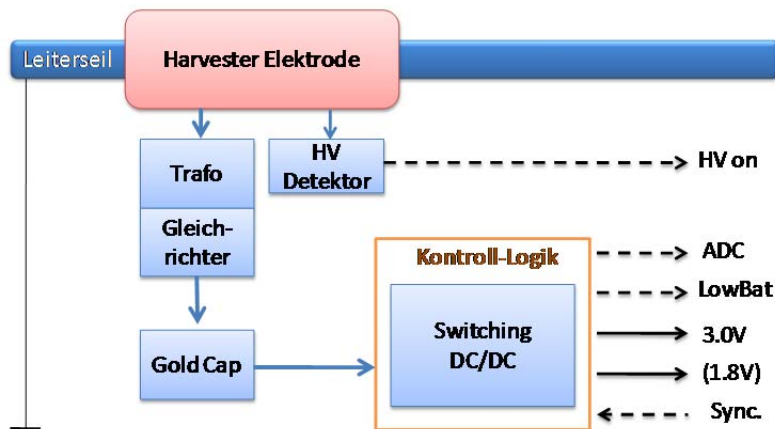


Abbildung 2.6.15: Blockschema der Energieversorgung des ASTROSE-eGrain

Im Rahmen der Systemzusammenführung wurde ein Emulator bereitgestellt, der die wesentlichen Funktionen des Energiemoduls ohne die Gegenwart einer Hochspannungsleitung nachbildet.

Für den praktischen Einsatz des Aufbaus sind die möglichen Betriebszustände im Einsatzfall von

Bedeutung. Diese lassen sich wie folgt klassifizieren:

- Fertigung/Applikation
- Normalbetrieb
- Netzstörungen

Ein spezielles Speicherkonzept, bestehend aus Primärbatterien und Doppelschichtkondensatoren (DSK), wurde ausschließlich für die ersten Prototypen entwickelt. Dies war erforderlich um den Sensorknoten bereits am Boden, für die Fertigungs- und Applikationsphase, in Betrieb nehmen zu können, sowie um eine Initialisierungsphase des Sensornetzwerks mit erhöhtem Energieverbrauch bis hin zum Normalbetrieb zu überbrücken. Während des Normalbetriebes wird der Sensorknoten ausschließlich durch die vom Harvester eingekoppelte und in den DSK gespeicherte Energie versorgt. Bei möglichen Netzunterbrechungen steuert ein Energiemanagement den Energiefluss aus den DSK beziehungsweise, wenn diese entladen sind, aus den Primärbatterien. Die DSK wurden so dimensioniert um für einen kompletten Messzyklus die Funktion des Sensorknotens sicher zu stellen. Abbildung 2.6.16 zeigt hierzu spezifizierte Spannungszustände, die den Ladezustand des Energieversorgungsmoduls beschreiben.

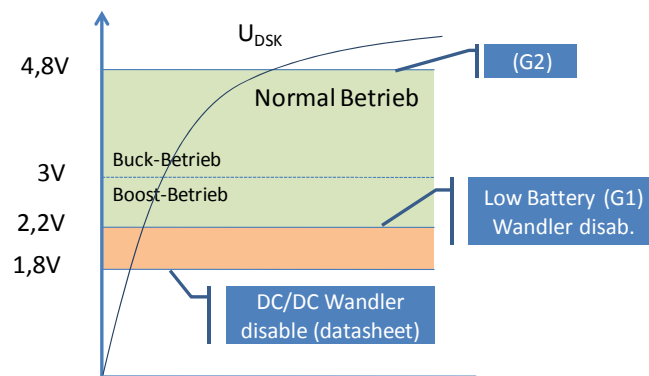


Abbildung 2.6.16: Spezifizierte Spannungslevel des Energieversorgungsmoduls

Die untere Grenze wird von dem Arbeitsbereich des ausgangsseitigen DC/DC Wandlers bestimmt, der ab einer Spannung von 1,8 V arbeitet. Bedingt durch den schlechten Wirkungsgrads des DC/DC Wandlers in diesem Arbeitsbereich wurde die untere Grenze (G1) auf 2,2V angehoben. Die obere Grenzspannung (G2) wurde auf 4,8 V spezifiziert, um die Doppelschichtkondensatoren nicht im Grenzbereich und somit lebensdauerverkürzend betreiben zu müssen. Bei einer Speicherspannung von 3 V wechselt der DC/DC Wandler zwischen dem buck- bzw. dem boost-Betrieb, um am Ausgang 3V für die Sensorelektronik bereitstellen zu können.

Im Falle einer totalen Entladung aller Speicher, nach einem sehr langen Netzausfall, ist das Energieversorgungsmodul in der Lage selbstständig den Normalbetrieb wieder auf zu nehmen. Die Doppelschichtkondensatoren laden sich zunächst bis auf das Spannungslevel G2 auf. Damit ist ausreichend Energie gespeichert, um eine komplette Neuinitialisierungsphase durchführen zu können. Der Ladezustand sowie die tatsächliche Spannung der DSK werden als Ausgangssignal der Sensorknotenelektronik zur Verfügung gestellt. In späteren Konfigurationen soll dann auf die Primärbatterie verzichtet werden, womit sich dann auch bisherige Betriebsmodi verändern werden.

Eine besondere Herausforderung resultierte aus der Platzierung der Transformatoranordnung. Hierbei muss sichergestellt werden, dass es zu keinen elektromagnetischen Einkopplungen durch das Magnetfeld, resultierend vom Strom des Leiterseils, kommt. Dies war durch den konstruktiven Aufbau und die Anordnung der Windungen auszuschließen. Außerdem mussten die Primärbatterien geeignet platziert werden. Abbildung 2.6.17a zeigt die Abmessungen sowie

die resultierende Struktur des Energieversorgungsmoduls. U-förmig sind die Elektronikkomponenten und die Primärbatterien um den Transformator angeordnet. Ein Überspannungsschutz für Blitz- und Schaltüberspannungen wurde als Zusatzplatine in das Elektronikkonzept implementiert. Hierbei sind Überspannungsableiter und Strom begrenzende Induktivitäten vorgesehen, wie in Abbildung 2.6.17b dargestellt.

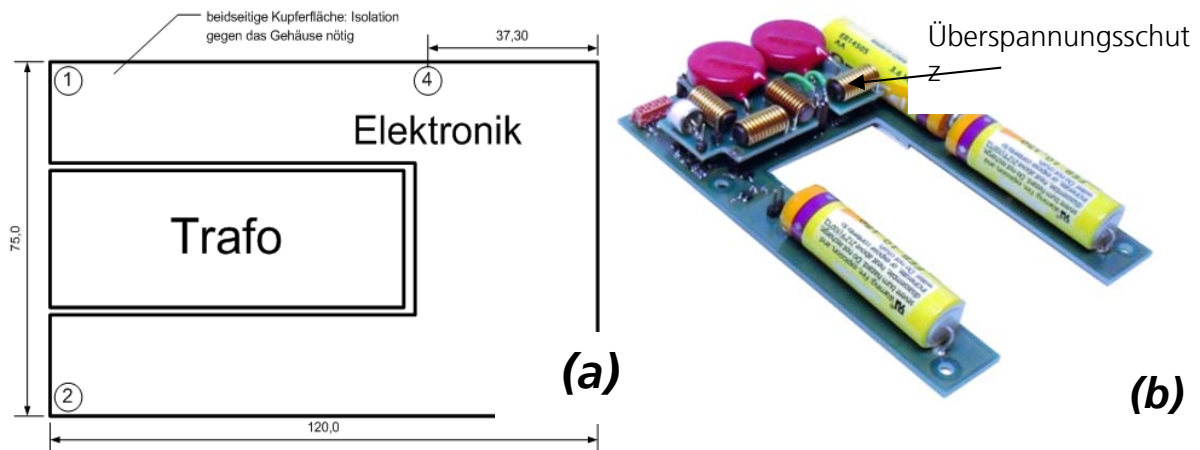


Abbildung 2.6.17: Energieversorgungsmodul (a) Abmessungen (b) Prototyp mit Überspannungsschutz, ohne Transformator

Die Zuverlässigkeit sowie der Eigenenergieverbrauch der Bauelemente waren hinsichtlich des konkreten Elektronikentwurfs zu berücksichtigen. Hierbei ist es gelungen, den Eigenenergiebedarf im Normalbetrieb unter 400 μW zu halten. Schrittweise wurden einzelne Funktionsgruppen aufgebaut und unmittelbar im Hochspannungslabor getestet. Abschließend wurden alle Baugruppen zusammengeführt. In Abbildung 2.6.18 ist ein komplettes Blockschema des Energieversorgungsmoduls dargestellt.

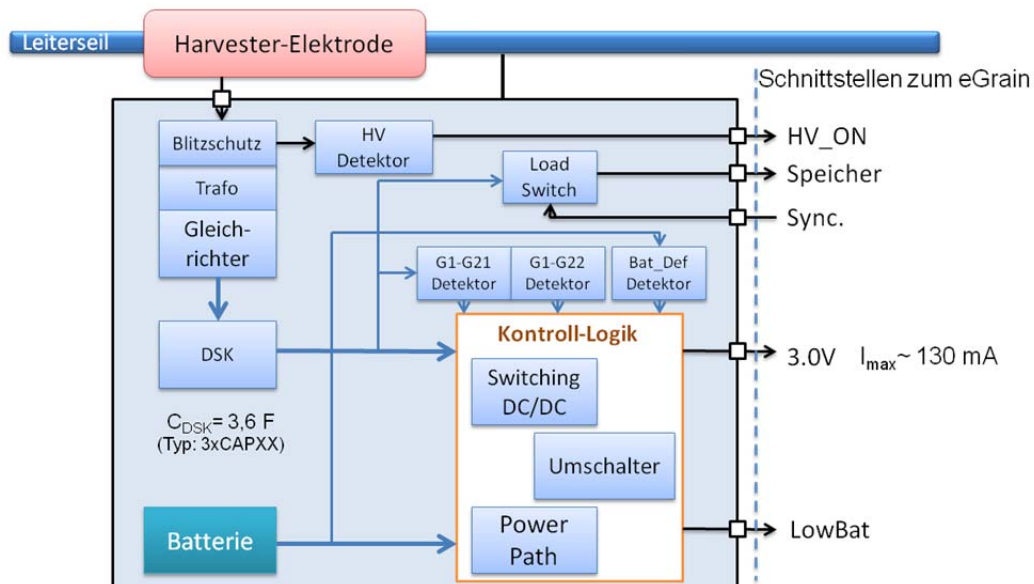


Abbildung 2.6.18: Blockschema des Energieversorgungsmoduls mit Schnittstellen zur Sensorelektronik

Im Anschluss an die Harvester-Elektrode ist die Schutzschaltung (für mögliche Schalt- und Blitzüberspannungen) angeordnet. Der Transformator realisiert die notwendige Impedanzanpassung und wandelt das Potentialniveau. Dieser zeichnet sich durch eine sehr hohe primärseitige Windungszahl aus. Die parasitäre kapazitive Kopplung der Windungen wirkt sich

dabei begünstigend aus, als Ableiter von hochfrequenten Störsignalen, die einseitig eingekoppelt werden können. Ein Gleichrichter erzeugt anschließend die Gleichspannung, welche die Aufladung der DSK ermöglicht.

Nach der Blitzschutzelektronik wird ein HV_ON Signal generiert, um der Sensorknotenelektronik zu signalisieren, dass die Netzspannung am Leiterseil aktiviert ist. Dieses Signal dient im Weiteren dazu, die Sensorknoten untereinander zu synchronisieren.

Mit einem buck-boost Wandler wird ausgangsseitig aus einem variablen Spannungslevel, abhängig vom Ladezustand der DSK, die spezifizierte Ausgangsspannung von 3,0 V bereitgestellt. Bezüglich der Zuverlässigkeit wurden als Schwachpunkt die DSK identifiziert. Technologiebedingt weisen diese eine überdurchschnittliche Degradation hinsichtlich hoher Temperaturen auf, die sich in einer Verringerung der nominellen Kapazität äußert. Mittels einer gesonderten Betrachtung und einer konservativen Dimensionierung der Bauelemente wurde eine Verringerung der Speicherkapazität berücksichtigt. Gleichfalls ist zu bemerken, dass die Speicherelemente, wie in Abbildung 2.6.19 dargestellt, ab einer Kapazität von 80% als „end of life time“ klassifiziert werden, obwohl diese noch voll funktionstüchtig sind.

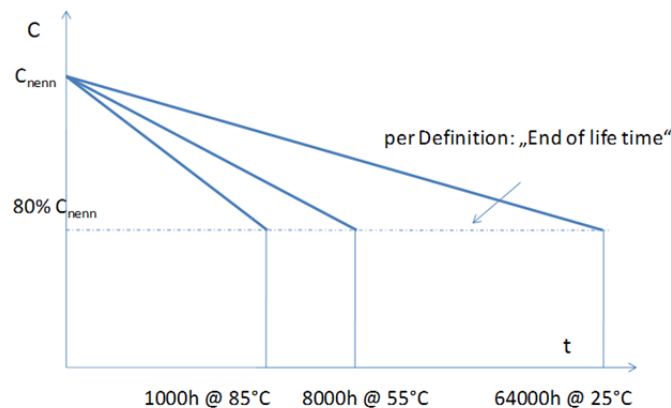


Abbildung 2.6.19: Degradation der DSK in Abhängigkeit der Betriebstemperatur



Abbildung 2.6.20:
 Sensorknoten im
 Hochspannungslabor

Fünf Energieversorgungsmodulare wurden für einen ersten Feldtest aufgebaut und erfolgreich im Hochspannungslabor getestet. Abbildung 2.6.20 zeigt den kompletten Sensorknoten auf einem Leiterabschnitt im Hochspannungslabor. Der Sensorknoten wurde zunächst im Labor in Betrieb genommen und anschließend am Leiterseil befestigt. Über die Funkkommunikation konnte die Funktion des Energieversorgungsmoduls sowie der restlichen Sensorelemente bis zu einer maximalen Spannung von 100 kV nachgewiesen werden. In Abbildung 2.6.21 ist die ermittelte Leistung in Abhängigkeit der anliegenden Spannungshöhe dargestellt. Hierzu wurde der gemessene Ladezustand der

Doppelschichtkondensatoren UDSK1,2 unter Berücksichtigung des Messintervalls Δt nach folgender Gleichung ausgewertet.

$$P = \frac{W_{e-2} - W_{e-1}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C U_{DSK-2}^2 - \frac{1}{2} \cdot C U_{DSK-1}^2}{t_2 - t_1}$$

Da im Hochspannungslabor bessere Bedingungen für die kapazitive Energieeinkopplung vorliegen, weil laborbedingt allseitig Massepotential vorliegt und der Abstand zur Masse geringer ausfällt, sind diese Messwerte nicht repräsentativ für die tatsächliche Energieverfügbarkeit im Feld. Aus diesem Grund wurde für den Feldtest nachträglich eine

Zusatzfunktion in die Elektronik implementiert.

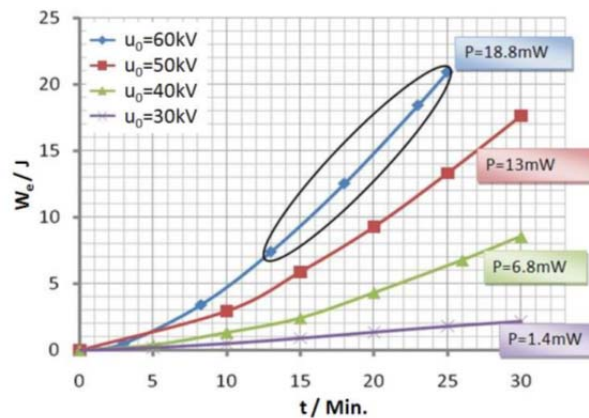


Abbildung 2.6.21: Verfügbare Energie/Leistung in Abhängigkeit der Leiterseilspannung

Um empirisch die tatsächlich verfügbare Energie zu bestimmen, wurde für den ersten Feldtest die Spannungsversorgung durch die Primärbatterien fest eingeplant. Die Spannungsmessung der DSK wurde nun ergänzt mit einer Funktion den Speicher aktiv über das Steuersignal *SYNCH* zu entladen. Damit besteht die Möglichkeit zyklisch die gespeicherte Energie und damit die Leistung der Harvester-Elektrode zu bestimmen, ohne mögliche Verbraucher durch den Sensorknoten berücksichtigen zu müssen. Abbildung 2.6.22 zeigt das Funktionsprinzip dieser Zusatzfunktion, wobei auf die bereits vorhandenen Interface-Signale zurückgegriffen werden konnte.

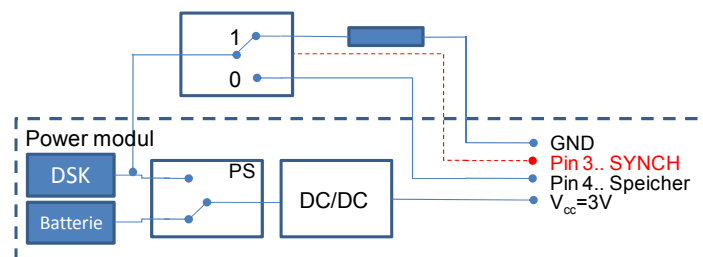


Abbildung 2.6.22: Funktionsprinzip der Zusatzplatine zur empirischen Leistungsbestimmung

Für den Feldversuch wurden Sensorknoten in verschiedenen Konfigurationen präpariert und für mehrere Tage auf eine 110kV Freileitung im Großraum Chemnitz installiert.

Dazu wurde eine Zusatzplatine für das Powermodul integriert, um die Energiebereitstellung von sämtlichen Energieverbrauchern zu entkoppeln und so auf die absolute Leistung der Harvester-Einheit zu schließen. Die Schaltung mit den enthaltenen Funktionsblöcken ist in Abbildung 2.6.23 dargestellt. Wie es in Abbildung 2.6.24 nochmals schematisch dargestellt ist, wird die Energieversorgung des Sensorknoten durch Batterien sichergestellt. Die Ladung der Doppelschichtkondensatoren wird separat abgegriffen und dem ADC des μ Kontrollers zugeführt, so dass in regelmäßigen Abständen die Ladung und damit die absolute Leistung der Harvester-Struktur ermittelt werden kann. Abbildung 2.6.25 zeigt noch einmal ein Lade- und Entladeintervall. Bei Erreichen einer Schwellenspannung aktiviert die Zusatzplatine einen Entladewiderstand, damit diese Messung mehrfach wiederholt werden kann.

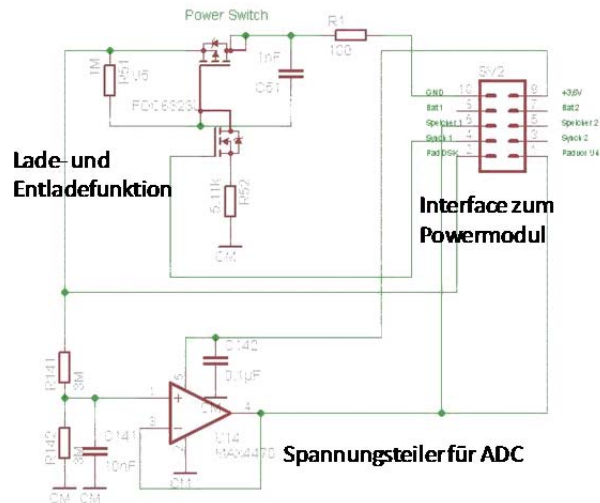


Abbildung 2.6.23: Schaltung – Zusatzplatine zur empirischen Leistungsbestimmung

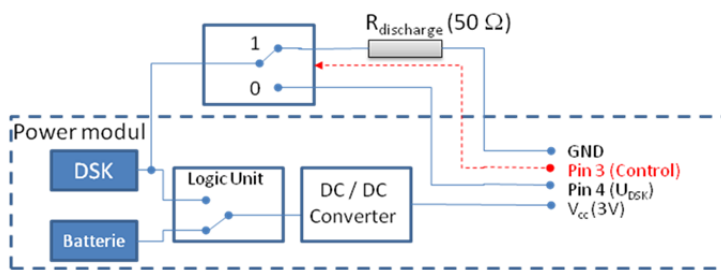


Abbildung 2.6.24: Funktionsprinzip der Zusatzplatine zur empirischen Leistungsbestimmung

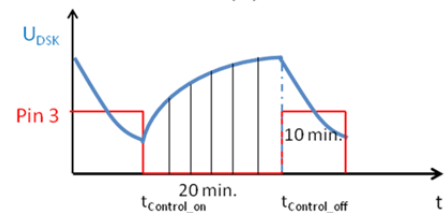


Abbildung 2.6.25: Ladezyklus

Nachdem bei dem ersten Feldtest die Kommunikation zwischen Sensorknoten am Leiterseil und der Basisstation am Boden ausgefallen war und somit keine Information zum Ladezustand übermittelt werden konnte, ist für einen zweiten Feldtest ein zusätzlicher Datenlogger aufgebaut worden, der im Sensorgehäuse explizit den Ladezustand der Doppelschichtkondensatoren auswertet.

Seit diesem zweiten Feldtest haben die Systeme zuverlässig gearbeitet. Sowohl der Datenlogger als auch die Funkübertragung liefen fehlerfrei. In Abbildung 2.6.26 sind exemplarisch zwei Ladezyklen dargestellt. Es konnte eine durchschnittliche Leistung von 16,3mW mit verschiedenen Konfigurationen ermittelt werden.

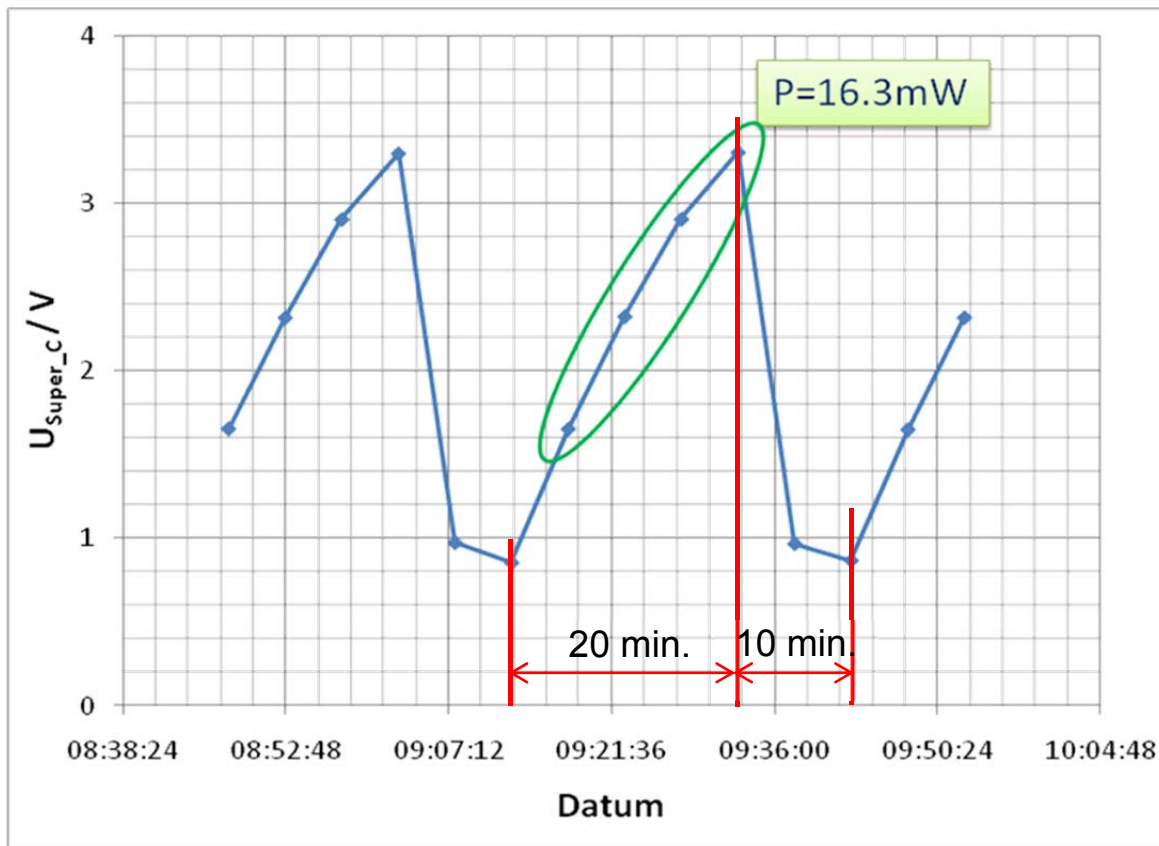


Abbildung 2.6.26: Feldtest – Messdaten Ladezyklus

Damit wurde es nun möglich eine äquivalente Spannung für die Versuche im Hochspannungslabor zu ermitteln. Durch den geringeren Abstand zum nächstgelegenen Massepotential herrschen im Hochspannungslabor bei ca. $U_0=65kV$ vergleichbare elektrische Bedingungen, wie an einer 110kV Freileitung.

Somit konnte auch experimentell das Erreichen des Projektziels erfolgreich nachgewiesen werden. Dies beinhaltete die Bereitstellung einer Elektronik zur Energieversorgung des Astrose-Sensorknotens, unter Nutzung des elektrostatischen Randfeldes, das durch das metallisierte Sensorgehäuse eingekoppelt wird. Ziel war eine minimale kontinuierliche Leistung von $P_{min}=5mW$ bereit zu stellen. Dieser Wert ist um den Faktor 3 übertroffen worden. Damit ist es nun möglich, in der Controller-Software weitere Sicherheitsfunktionen zu implementieren, die im Vorfeld reduziert wurden, um Energie zu sparen.

E Labor und Feldtests

Bevor der abschließende Feldtest durchgeführt wurde, erfolgte ein Redesign des ASTROSE-Sensorknotens. Vor allem um die Funktion im Feldtest zu gewähren, wurde der überarbeitete Sensorknoten mehreren Labortests unterzogen. Die Funktion des Neigungssensors wurde im zusammengebauten Knoten an Hand seiner End- sowie Nullpositionen bestimmt. Der Test des Stromsensors erfolgte ebenfalls am komplett fertiggestellten Knoten. Hierfür wurde im Labor ein definierter Wechselstrom mit einem Effektivwert von 80 A angelegt.

Der endgültige Funktionstest fand im Hochspannungslabor der TU Chemnitz statt. Dazu wurden die Knoten, montiert auf einen Leiterseil (Abb. 2.6.27), an einen Hochspannungsgenerator angeschlossen. Es wurden mit MST (TUC) sowie dem Fraunhofer ENAS die Spannungsfestigkeit, die Funkkomm-

munikation sowie die Harvesterfunktion aller Sensorknoten überprüft.



Abbildung 2.6.27: Test des überarbeiteten Sensorknotens im Hochspannungslabor

Der abschließende Feldtest wurde am 16.07.2012 begonnen. Zunächst wurden in Zusammenarbeit mit enviaM (MITNETZ Strom) und Fraunhofer ENAS und IZM im Umspannwerk eine Basisstation, die die Messwerte der Sensorknoten aufzeichnet, in Betrieb genommen. Anschließend wurden mehrere Sensorknoten auf einer freigeschalteten 110 kV-Hochspannungsleitung in der Nähe des Umspannwerkes in Zwönitz montiert (Abb. 2.6.28). Nach Abschluss der Montage erfolgte das Zuschalten der Spannung. Die aufgespannte Kette (Knoten 1 bis 4) ist ca. 900 m lang. In Abbildung 2.6.29 sind die Temperatur- und Neigungswerte vom Sensorknoten mit der Nummer 4 dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber wurde nur ein halber Monat aufgezeigt. Wie schon bei den letzten Feldversuchen, zeigt sich auch hier der erwartete Zusammenhang von Neigung und Leiterseiltemperatur. Ersichtlich ist ebenfalls die höhere Auflösung des Verhaltens durch den Neigungssensor gegen über dem Temperatursensor. In Abbildung 2.6.30 sind die aufgenommenen Werte des Stromsensors dargestellt. Der prinzipielle Tagesverlauf der Last ist in dieser Abbildung gut erkennbar. Der beschriebene Feldtest wurde noch nicht beendet. Dieser wird voraussichtlich noch einige Monate weiter laufen. Interessant werden vor allem die Wintermonate mit möglichen Eis- und Schneelasten sein. Diese Gegebenheiten können einzig mit dem Neigungssensor detektiert werden.



Abbildung 2.6.28: Montage der Sensorknoten auf 110-kV-Leitung

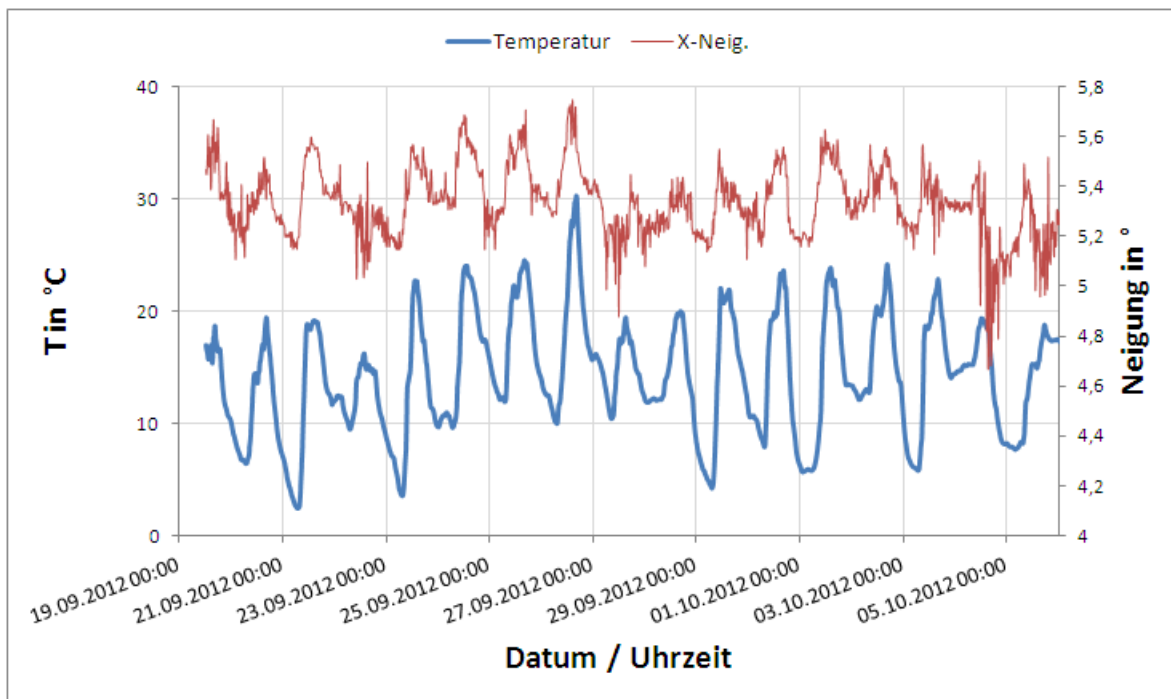


Abbildung 2.6.29: Aufgenommene Temperatur- und Neigungswerte von Sensorknoten
 4

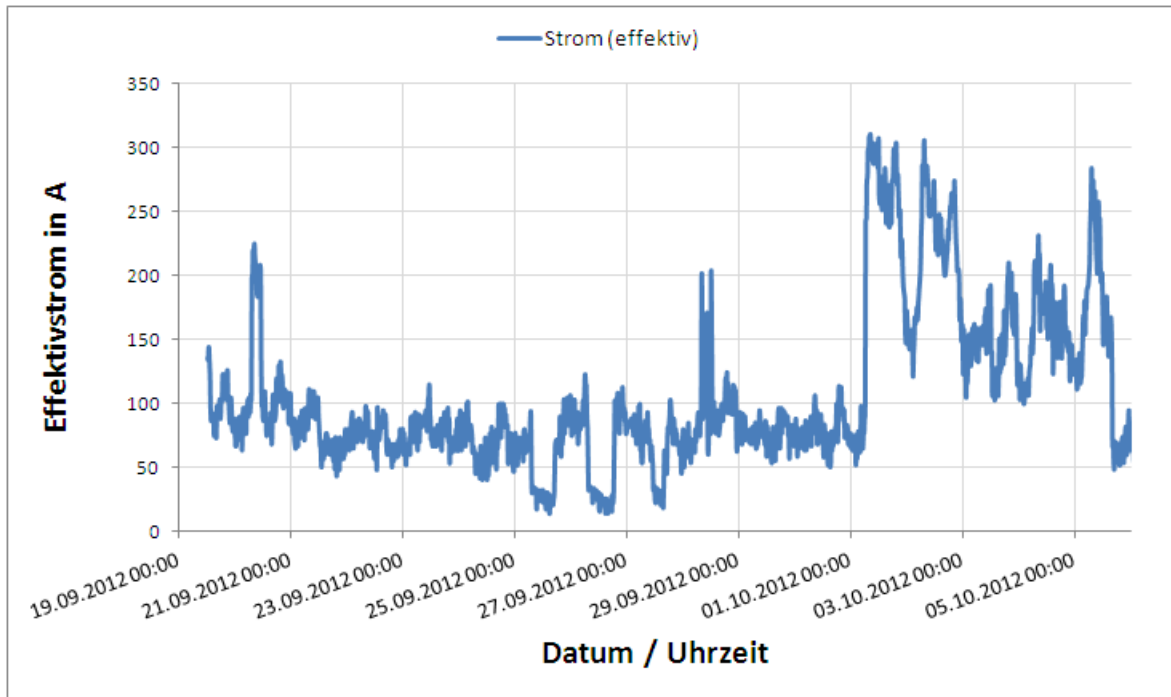


Abbildung 2.6.30: Aufgenommene Stromwerte von Sensorknoten 4

Aufgrund des Ausfalls der KE Automation wurde ein Großteil dieses Arbeitspaketes durch das Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz bearbeitet. Die Arbeiten beinhalteten die Vorbereitung sowie die umfangreiche Begleitung des abschließenden Feldtestes, welcher bereits beschrieben wurde. Neben diesen Aufgaben, die sich als äußerst zeitintensiv gestalteten, wurde in Zusammenarbeit mit der enviaM (MITNETZ Strom) eine Kalibrierungs- sowie Berechnungsmethode für die Beschreibung des Durchhangs entwickelt.

Der mathematische Zusammenhang von Neigung und Temperatur wird mit Hilfe der sogenannten Kettenlinie und der thermischen Ausdehnung des Leiterseils beschrieben. Anhand zusätzlicher geometrischer Faktoren wie Länge des Spannungsfeldes, Höhe der Masten und Aufhängepunkt des Sensors kann anschließend mit der Kettenlinie die Neigung bzw. der Durchhang bei einer bestimmten Leiterseiltemperatur ermittelt werden (Abb. 2.6.31). Zur Verifizierung des entwickelten mathematischen Modells sind die von einem Sensorknoten im Feldversuch gewonnenen Messdaten von Temperatur und Neigung des Leiterseils in Beziehung gesetzt (Abb. 2.6.31; rote Kennlinie + Trendlinie). Ebenso ist die anhand des mathematischen Modells ermittelte Kennlinie (schwarz) dargestellt. Wie erwartet, sind die beiden Geraden nahezu deckungsgleich. Mit Hilfe des entwickelten Modells kann nun der Durchhang sowohl aus den Temperatur- als auch aus den Neigungswerten bestimmt werden. Aufgrund der höheren Auflösung des Neigungssensors und der recht hohen Trägheit der Temperaturmessung wird die Bestimmung des Durchhangs mittels der Neigung bevorzugt. Die Bestimmung des Durchhangs einzig anhand der Neigung bedarf jedoch einer Anfangskalibrierung. Dafür muss einmalig ein wahrer (nicht verzögerter) Temperaturwert (Referenzwert) bei einem Neigungswert aufgenommen werden. Für diese Kalibrierung empfiehlt sich ein Zeitpunkt zu wählen, bei dem sich das System Leiterseil-Sensorknoten im thermischen Gleichgewicht befindet, so dass die thermische Trägheit der Temperaturmessung keine Rolle spielt. Anhand der Auswertung der bisher gesammelten Daten bietet sich der Zeitraum von 0:00 Uhr bis 4:00 Uhr an. In diesem Abschnitt waren Temperatur- und Neigungsänderungen extrem niedrig.

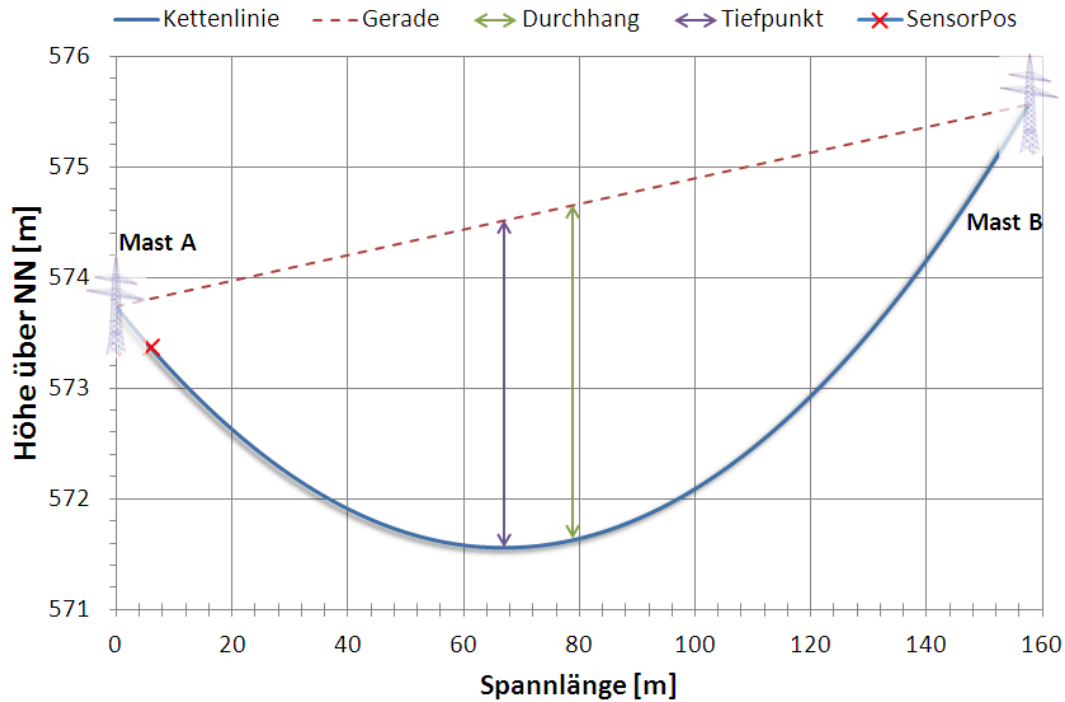


Abbildung 2.6.31: Ermittelte Kettenlinie eines Spannfeldes zur Bestimmung des Durchhangs

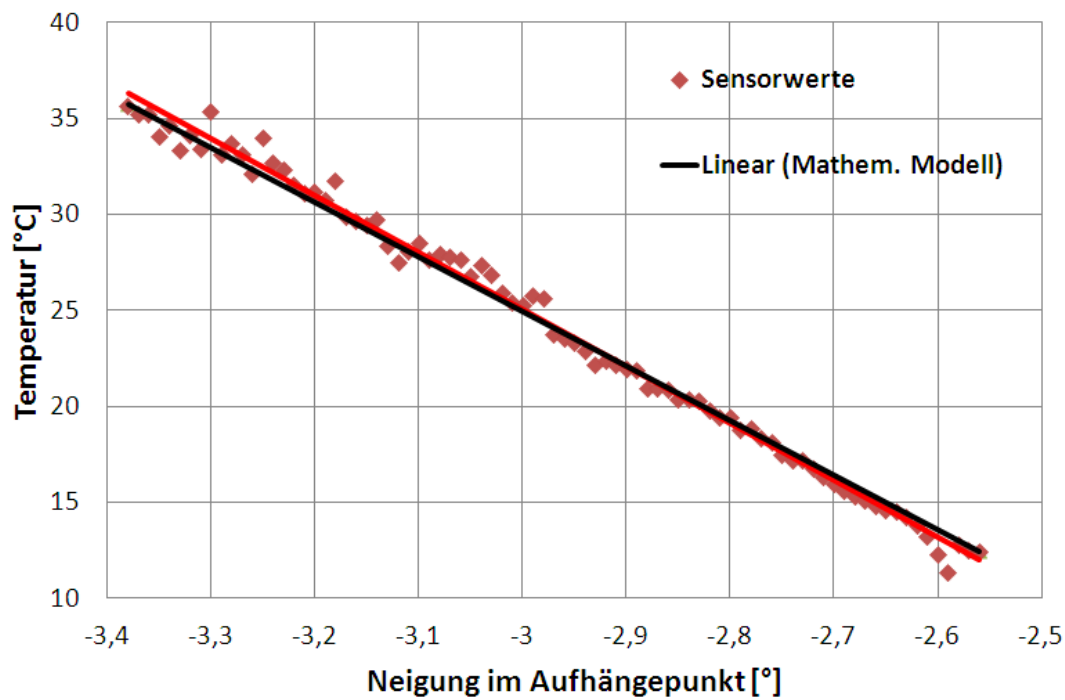


Abbildung 2.6.32: Beziehung Temperatur und Neigung des Leiterseils (Vergleich Sensorwerte und mathematisches Modell)

2.6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Entsprechend der Antragstellung waren von der TU Chemnitz im Rahmen des Verbundprojektes sowohl die Sensorik als auch eine Lösung zur Bereitstellung der für die Sensorknoten erforderlichen Energie zu entwickeln. Alle diese Komponenten konnten erfolgreich in eine Vielzahl von Sensorknoten integriert werden und haben ihren Einsatz bei Feldtests vollumfänglich bestanden. Die geforderten Spezifikationen konnten erreicht werden. Während bezüglich Sensorik bereits auf eigene (auch praktischen) Erfahrungen zurückgegriffen werden konnte, musste bezüglich Energiebereitstellung mehr eigenes, auch theoretisches, know-how erarbeitet werden. Dass dies gelang, ist nicht zuletzt mit den erfolgreichen Feldtests nachgewiesen worden.

Die wesentliche Ergebnisse bzw. Erkenntnisse des Vorhabens sind:

- Nachweis der Sensorfunktion und Eigenschaften aller Sensortypen (Strom, Temperatur, Neigung), selbst für den empfindlichsten Neigungssensor mit einem Messbereich von +/- 20 °.
- Erreichen einer sehr guten Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Sensorprinzipien mit plausiblen Erklärungen für partiell unterschiedliches Verhalten, vor allem bei den Temperatursensoren durch Sonnstrahlung (Tag-Nachtunterschied), Wind, Wärmekapazität des Sensorknotens (Trägheit) usw.
- Erfolgreiche Entwicklung eines Energieversorgungsmoduls für den Sensorknoten mit einer deutlich höheren erreichten Energie als ursprünglich geplant

2.7 Ergebnisdarstellung von ELMOS Semiconductor AG

Die Aufgabe von ELMOS im Projekt bestand in der Bereitstellung eines auf die Spezifikation des ASTROSE-Systems und der dabei zum Einsatz kommenden Sensoren ASIC's. Dieser ASIC-Wafer wurde zur Verfügung gestellt und die ASICs kamen in allen Stufen der Systementwicklung und Varianten der Demonstration zum Einsatz.

2.8 Ergebnisdarstellung von KE-Automation

2.8.1 Problem- und Zielstellung

Als Ziel stand die Ankopplung des e-Grain-Funknetzes und die informationstechnische Transformation in die unternehmenseigenen Informationssysteme der Netzbetreiber der Energieversorger.

Im speziellen geht es um die Kommunikation des e-Grain-Funknetzes über Kommunikationsanlagen, im speziellen fernwirktechnische und IP-basierte Datenübertragungen, im weitesten Sinne bis hin zu ERP-Anlagen, hier im speziellen die Netzleittechnik und Diagnose-Systeme für das Monitoring auf Hochspannungsfreileitungen.

Dabei sind neben den technischen Zielparametern des Monitorings die enormen Informationsmengen zu strukturieren und in Form einer Informationspyramide derart zu verdichten, damit für die Netzleitstelle sowohl die aktuellen Parameter der Freileitungen als auch aggregierte Werte einschließlich deren zeitlicher Verlauf grafisch abgebildet werden können.

Dabei sind sowohl die neuesten Verfahren der Kommunikations- und Informationstechnik für diesen Anwendungsfall zu adaptieren als auch traditionelle und im breiten Einsatz bei den Übertragungs- und Verteilnetz-Betreibern in der Energieversorgung befindliche Verfahren zu integrieren.

Die diese Ergebnisse anwendenden Netzbetreiber der Hochspannungsnetze arbeiten mit etwas unterschiedlichen Strategien bezüglich ihrer Hard- und Software-Systeme, deshalb wurde eine stark strukturierte Hard-, Software- und Systemstruktur mit einem sehr vielgestaltigen Schnittstellenkonzept als Arbeitsgrundlage konzipiert.

2.8.2 Lösungskonzept

Im Normalbetrieb geht es um die Umsetzung der Aufgaben:

- Empfang und syntaktische Prüfung der Messwerte der ASTROSE - eGrains
- Umrechnung der Sensormesswerte in anwenderbezogene Größen
- Verdichtung der redundanten Messwerte und der Diagnosewerte wie z.B. Stand des Energiehaushaltes und der Funkfeldstärke
- Wahlweise Verdichtung der Messwerte pro Sensornetz auf:
 - Min, Max. und Mittelwert der Temperaturen 1, 2 und 3
 - max. prozentuale Änderung der Neigung der Leitung am Ort des Sensors
- Zwischenspeicherung aller ASTROSE-eGrain-Messwerte über mehrere Tage
- Bereitstellung der Daten auf einer grafische Benutzeroberfläche (Trendmonitoring)
- Diagnose-Funktionen zum e-Grain-Sensornetzwerk
- Initialisierung des e-Grain-Sensornetzwerkes
- Ankopplung an die „Unternehmenszentrale“ (Leittechnik)

Als Schnittstellen in Richtung zur Unternehmenszentrale werden konzipiert:

- Bereitstellung der Messwerte für die Fernwirktechnik in den 3 Varianten:

1. 3 x Analogwerte 4 ... 20 mA (Auflösung: 11 Bit)
8 x Binärwerte: Status / Fehler (als potentialfreier Kontakt)
über eine SIEMENS S7-ET200-Prozess-Schnittstelle
2. Profibus DP
3. Ethernet (ProfiNET)

Dieses Konzept auf Basis des Pflichtenheftes wurde während des Entwicklungsprozesses nach präzisierenden Anforderungen des Verteilnetzbetreibers nicht implementiert.

- Bereitstellung einer Struktur und eines Interfaces für die serielle Übertragung (z.B. nach IEC60870-5-101/104, IEC 61850) zur Fernwirktechnik, dabei sind die zwischen den Netzbetreibern unterschiedlichen Kompatibilitätsbedingungen gemäß einem Auszug aus dem Abschnitt 8 der Norm IEC 60870-5-101 als Definition der Fernwirkchnittstelle zum Netzleitsystem zu beachten, und in einem Postprozess geringe Variabilitäten noch zu ermöglichen. Dazu soll ein proprietärer Konverter entsprechend den Anforderungen des Netzbetreibers Enviam entwickelt werden.
- Des Weiteren ist eine Ergebnisausgabe als csv-Datei geplant.

Auf Grund der robusten Einsatzbedingungen für die Basisstation, bevorzugt in Umspannwerken (UW) der Netzbetreiber eingesetzt zu werden, wurde auf eine den industriellen Umgebungsbedingungen gerecht werdende Systemstruktur gesetzt. Dabei werden primär Komponenten aus der Automatisierungstechnik berücksichtigt, wie z.B. Prozessankopplung der e-Grains mit dem Peripheriesystem, der Einsatz von Industrie-PC in Form eines SoC mit einer Hutschiene.

Von den beiden im Konsortium mitarbeitenden Netzbetreibern wurden für das Funktionsmuster und die Feldtests ausschließlich auf eine PC-gestützte Basisstation mit einer seriellen Ankopplung sowohl an das eGrain-Sensornetzwerk als auch an die Unternehmenskommunikation über Fernwirktechnik und Netzleitstelle gesetzt.

Dabei wird der Einsatz des IZM-Funk-Empfangsmodul als abgeschlossene Baugruppe, im folgenden als „e-Grain Basis“ bezeichnet, für die Basisstation konzipiert, womit durch die einheitliche Nutzung der Hard- und Firmware eine einheitliche Kommunikation zu den in der Funkreichweite liegenden e-Grains sowie ein einheitliches Herstellungs- und Service-Konzept ermöglicht wird. Die „e-Grain Basis“ realisiert primär die Funk-Kommunikation zu den benachbarten e-Grain-Knoten.

Damit ist die einheitliche Systematik bezüglich Hard- und Firmware, der Fertigung und der Diagnose- und Service-Funktionalität zu den e-Grains auf den Freileitungen gewährleistet. Bezüglich der Energiebereitstellung für diese „e-Grain Basis“ wird nicht die Energie-Harvesting und das Energiemanagement des e-Grains benutzt, sondern eine netzteilgetriebene Lösung (DC-DC-Wandler an einer vorhandenen USV im UW) mit handelsüblichen Bauelementen benutzt. Ebenso wird die „e-Grain Basis“ von einer handelsüblichen 2,4 MHz-Richtantenne gespeist.

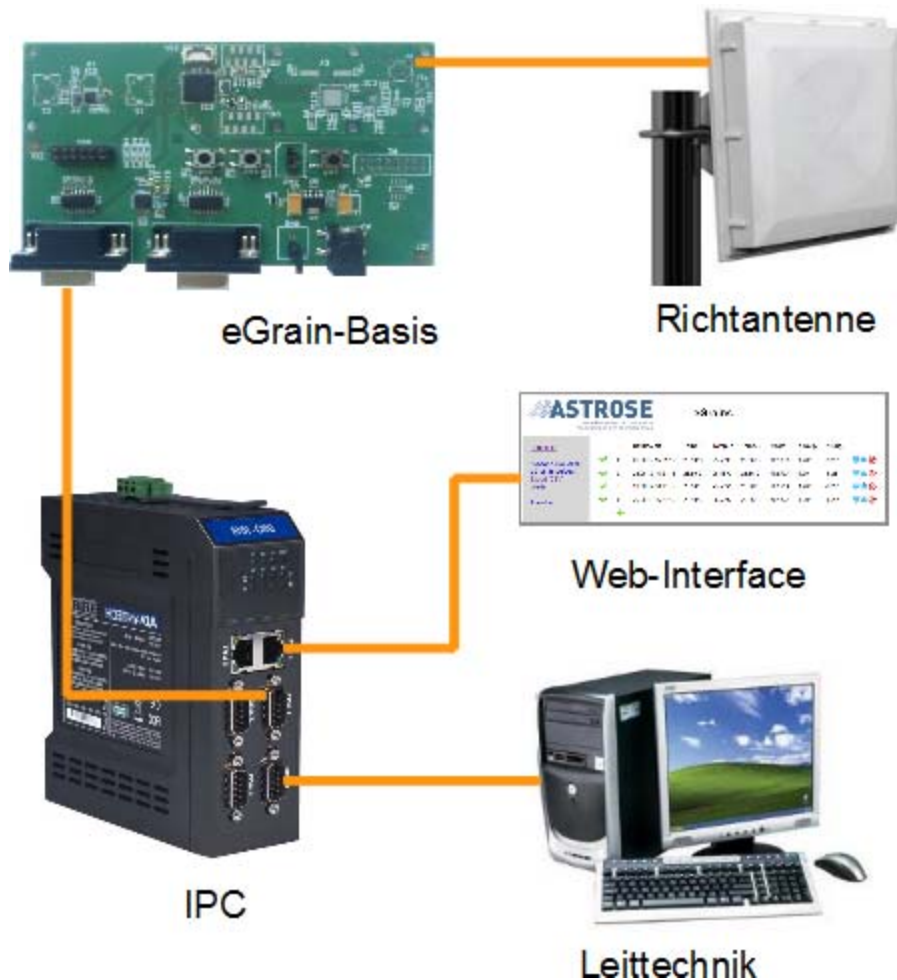


Abbildung 2.8.1: Schema des Informationsflusses

Zur Entlastung der Informationsflut für die Netzleitstelle und zum gelegentlich interessierenden Monitoring im UW sowie zur Absicherung der Diagnoseanforderungen an das e-Grain-Netzwerk hat die Basisstation eine PC-basierte Datenbanklösung und ein entsprechendes webbasiertes USER-Interface erhalten.

2.8.3 Ergebnisse zur Basisstation

Dazu wurden umfangreiche Abstimmungen mit dem Projektpartner Fraunhofer IZM Berlin innerhalb der AG Hardware durchgeführt und auf Basis neuester Erkenntnisse der Prozess-Informatik konkrete Strukturen Hard- und Softwareseitig in den Entwurf und deren Schnittstellen eingebracht. Dazu wurde der Aufbau des Telegramms zur bidirektionalen Kommunikation zwischen der „e-Grain Basis“ und der Basisstation konzipiert und implementiert.

Das Telegramm umfasst die Messwerte Temperatur 1, 2 und 3 sowie Strom und Neigung X und Y sowie Diagnosewerte zum Füllstand des Harvester und der Funkempfangsfeldstärke und weiterer binärer (Alarm-)Zustände.

Die „e-Grain Basis“ wurde in die Basisstation integriert und in den Feldests 1, 2 und 3 erfolgreich getestet.

Die Kopplung der Basisstation mittels des Fernwirkprotokolls nach IEC 60870-5-101(RS232) und -104(TCP/IP) erfolgte über den Fernwirkknoten Chemnitz-Chemnitztalstrasse zur Netzleitstelle der Enviam in Taucha erfolgreich.

Die webbasierte Darstellung der Informationen des e-Grain-Netzwerkes wurde in der Basisstation implementiert und vom Verteilnetzbetreiber EnviaM innerhalb mehrerer Monate genutzt.

Die Ausgabemöglichkeit der Messwerte des Sensornetzwerkes in Form der MS-Office-Strukturen wurde genutzt, ua. für die Untersuchungen des Netzbetreibers zum Korrelation zwischen der Leiterzugstemperatur und des Neigungswinkels.

Zusätzlich zur Aufgabenstellung im Forschungsprojekt wurden auf Anregung des Endnutzers konzeptionelle Arbeiten aufgenommen, um die Berechnung des Durchhanges der Leiterzugsseile innerhalb eines Abspannfeldes auf Grund der Erwärmung der Leiterzugsseile auf Basis der gemessenen Neigungswinkel aus den e-Grains zu ermöglichen.

Die Initialisierung des e-Grain-Netzwerkes ist während der Einrichtung der über das WEB für den Nutzer möglich.

2.9.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach Erarbeitung eines Pflichtenheftes, deren Fortschreibung in mehreren Versionen während der Entwicklung und der Abstimmungen zwischen den Projektpartnern kam es innerhalb des Entwicklungsprozesses und nach Einbeziehung der Endnutzer (Netzbetreiber) zu umfangreichen funktionellen Erweiterungen. Diese wurden in das Projekt integriert

Die sichere Kommunikation des e-Grain-Netzwerkes zur Leittechnik konnte in einem mehrwöchigen Versuch nachgewiesen werden. Dabei hat sich das gesamte System in Form der vergegenständlichen Anlage als geeignet und robust genug für die harten Umgebungsbedingungen erwiesen.

Damit sind die ursprünglichen Zielstellungen des Projektes erfüllt worden und in einzelnen Punkten auf Anforderungen der Endnutzer stark erweitert worden.

2.9 Ergebnisdarstellung von unilab

2.9.1 Middleware-Detailspezifikation & Kommunikationskonzept

In diesem Teil wurde eine Feinspezifikation für die Hardwarekonzeption und Softwareentwicklung erstellt. Diese beinhaltet ein Hardware- und Softwarekonzept, Test- und Simulationsverfahren, sowie ein Kommunikationskonzept.

Die Basisstation enthält einen Funk-Transceiver zur bidirektionalen Kommunikation (Empfang von Daten bzw. Parametrisierung der Sensorknoten via Funk) und einen Anschluss für eine externe Antenne. Die Basisstation ist netzbetrieben und mit einem leistungsfähigen Mikrocontroller ausgerüstet. Zur Ausfallsicherung wurde diese weitgehend redundant ausgelegt (integrierte USV, Hot-Swap fähige Komponenten). Zur Kommunikation mit zentralen Anwendungen wurden gängige Schnittstellen (z. B. Ethernet, USB, seriell) und alternative Übertragungswege (IP) implementiert, um ohne großen Aufwand in vorhandene Netzwerke eingebunden werden zu können. Obwohl bei der Basisstation eine hochverfügbare Rechenleistung im Vordergrund steht, konnte dennoch auf die Verbauung energieeffizienter Komponenten geachtet werden.

Die Software stellt auf der Basisstation die Speicherungs-, Verarbeitungs-, und Präsentationslogik, sowie das Hardwaremanagement (Maschinendiagnose) bereit.

2.9.2 Entwicklung und Konstruktion der Hardware

Die Entwicklung und Konstruktion der Hardware lässt sich in drei Baugruppen unterteilen.

- a) Baugruppe Gehäuse mit den Bestandteilen Gehäuse, Stromversorgung (Akku, Netzteil) mit der Umsetzung von Kühlkonzept und adäquater Abschirmung;
- b) Baugruppe Mainboard mit der Bestückung der Basisstation mit Festplatten und Chipsatz für die Bereitstellung leistungsgerechter Speicher- und Rechenleistung sowie
- c) der Baugruppe Hardware-Management mit der Abstimmung und Intergration der einzelnen Hardwarekomponenten (Treibern, Clusterung, Backup, Funkanbindung).

Die Entwicklung erfolgte in drei Zyklen mit hohen Interdependenzen zwischen den Baugruppen mit einer Feststellung des Reifegrades zum jeweiligen Meilenstein.

Für die ersten Basisstations-Prototypen wurde folgende HW-Spezifikation umgesetzt:

Performerter und energieeffizienter 1-HE-Rackserver. Der Energieverbrauch im Leerlauf beträgt ca. 43 Watt und unter Volllast ca. 98 Watt. Das System ist ausbaubar mit bis zu 8 GB RAM und unterstützt eine Hardware-Remoteverwaltung und den Festplattenwechsel im laufenden Betrieb.

Ausgestattet ist der Server mit einem Intel Q45 Express-Chipsatz. Der Prozessor ist ein Intel Celeron Conroe-L 440 2,0 GHz Prozessor, der aus unserer Sicht sehr energieeffizient arbeitet. Die Basisstation verfügt über einen Single-Core-Prozessor in 65nm Fertigung, einem FSB von 800 MHz und einem L2-Cache von 512kB. Er unterstützt MMX, SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, Intel 64, XD bit, Enhanced Halt State sowie Thermal Monitor 2. Verbaut sind 2x1 GB DDR2 RAM (800 MHz).

Auf dem Mainboard ist ein Intel GMA 4500 Grafikchipsatz verbaut, ein Intel Gigabit LAN Controller sowie ein ADI AD 1882 Audio Chipsatz 5.1. An Anschlüssen bietet es 2x DVI-Adapter, einen eSATA-Anschluss und 8 USB-Anschlüsse. Das Mainboard unterstützt die vPRO Hardware Remoteverwaltung zur Überwachung der Hardwarekomponenten.

Der Server besitzt einen 4-fach 2,5" Wechselrahmen, welcher mit dem 3Ware 2-fach RAID-Controller Hot-Swap fähig ist und den Austausch der 30 GB OCZ SSDs im laufenden Betrieb ermöglicht. Der RAID-Controller unterstützt die RAID-Formate RAID 0 und 1. Zum Einsatz

kommen aus Redundanzgründen zwei 32 GB SATA 2,5"SSDs im RAID 1 Verbund, welche eine MTBF von 1,5 Mio. Stunden haben und eine Geschwindigkeit von 155 MB/s lesend/90 MB/s/schreibend, mittlere Zugriffszeit <0.2-0.3 ms. Die Arbeitstemperatur der SSDs wird mit -10°C bis +70°C vom Hersteller angegeben und reicht für die örtlichen Gegebenheiten aus. Ebenso besitzt die Basisstation ein redundantes Netzteil.



Abbildung 2.9.1: eGrain-Basisstation Frontansicht



Abbildung 2.9.2: eGrain-Basisstation Rückansicht

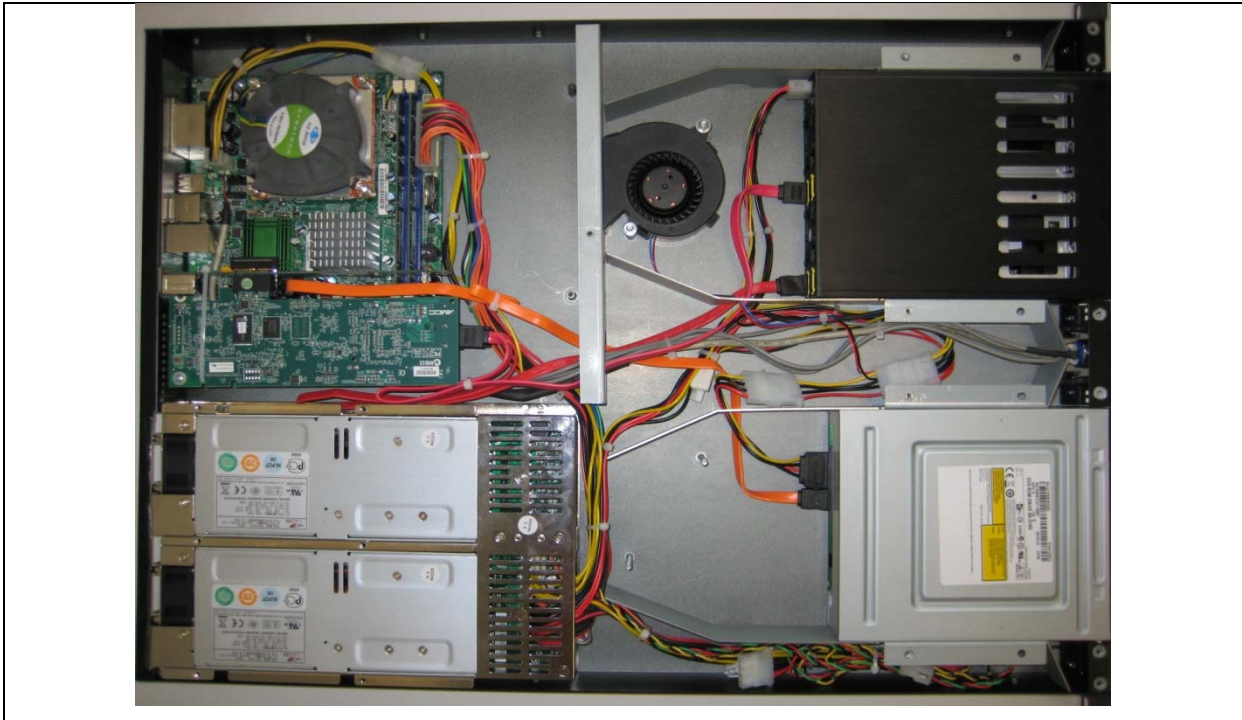


Abbildung 2.9.3: eGrain Basisstation Innenansicht

In 2010 wurde bei der Detailentwicklung festgestellt, dass für die im Lastenheft spezifizierten Anschlussmöglichkeiten für den gleichzeitigen Betrieb von 5 eGrain Ketten bereitgestellt werden müssen. Die Vorgabe der Projektpartner war eine serielle Schnittstelle.

Die geforderte Bauhöhe von einem 1 HE war für die Verwendung von Standardkomponenten zu niedrig. Ein 1HE Gehäuse konnte mit der damaligen Konstruktion keine PCI Erweiterungskarte aufnehmen, da diese eine Bauhöhe des Gehäuses von 2 HE benötigte (siehe Abb. 2.9.4)

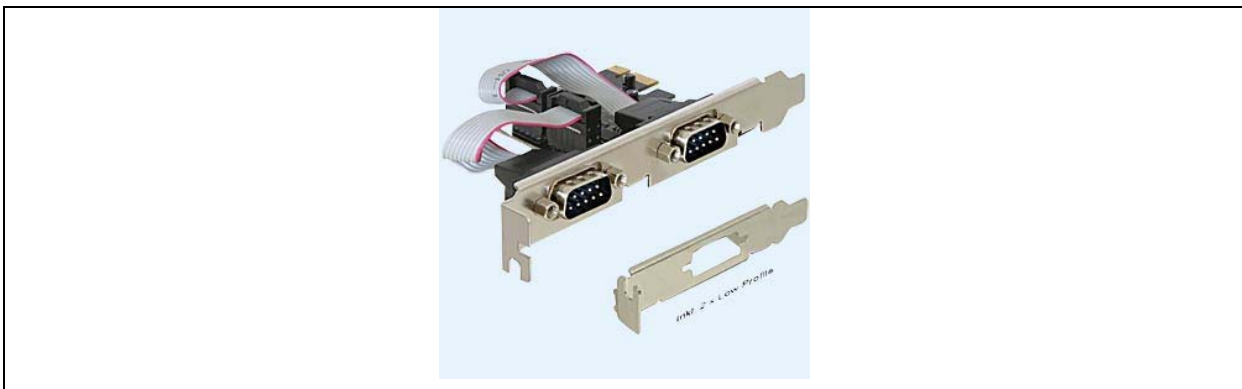


Abbildung 2.9.4: DELOCK 89220 für 2 HE Gehäuse mit PCI Erweiterungskarten

Alternativ wurde die Gehäusekonstruktion noch einmal überarbeitet, um einen seriellen Adapter im Gerät zu verbauen. Beide Varianten wurden erfolgreich getestet und stehen als Varianten für die spätere Verwertung zur Verfügung.



Abbildung 2.9.5: DELOCK 61519 USB > 8 x seriell Adapter

Für den Einbau der Basiseinheit in einem Unterwerk des Energienetzbetreibers wurde 2011 zusammen mit dem Fraunhofer IZM erarbeitet, mit welcher Hardwareerweiterung die Basisstation für die eigene Funkanbindung (Antennen, WLAN-Chips) ausgestattet werden muss. Da eine zielgerichtete Funkübertragung aufgrund der Topographie in der Regel nicht möglich war, musste das Empfangsgerät am Gebäude des Unterwerks derart angebracht sein, dass eine optimale Ausnutzung der eGrain Funknebenkeulen erfolgen konnte. Bei der Anbindung des Empfangsgerätes an die Basisstation war die Verträglichkeit mit der Umgebungsspannung zu prüfen, um ungewollte und gefährdende Entladungen zu vermeiden. Im Rahmen der EVU Installationsstandards und Vorschriften wurde die Verwendung von Lichtwellenleitern geprüft, da diese nicht metallisch sind.

2.9.3 Software für eGrain Basisstation und autarken Zielsystemen

Im Rahmen der Softwareentwicklung wurde ein Applikationsframework, bestehend aus eGrain Connector zu Decodierung und einer SQL-Datenbank, Webserver sowie Schnittstellen umgesetzt. Die Entwicklung erfolgt in enger Abstimmung mit dem datenliefernden Partner IZM.

Die Unilab-"Basisstation" arbeitet als "Black Box" mit zwei Schnittstellen, der "eGrain-Basisstation" Schnittstelle (1) und der "Basisstation-EVU" Schnittstelle (2)

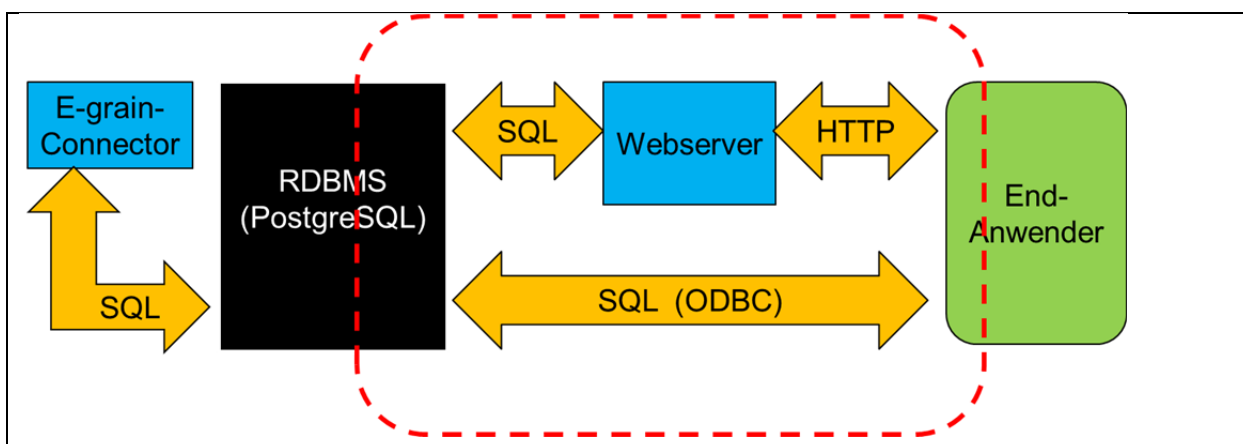


Abbildung 2.9.6: Building Block Software

(1) Schnittstelle eGrain-Basisstation

Die Anbindung zur eGrain Kette erfolgt am "letzte eGrain der Kette" über eine serielle Schnittstelle mit der das "letzte eGrain" mit der Basisstation verbunden ist. Die eGrain-Kette arbeitet als reiner Datengeber, der in seinem Datenstrom die Messwerte der eGrains übergibt.

Übertragungsprotokoll: Die Codierung der Messwerte liegen mit Projektabschluss in einer Version "Spec 5.2" des IZM vor, welcher als Connector implementiert wurde. Unilab führte eine Überprüfung der Spezifikation durch, indem alle bereitgestellten und geforderten Werte gegen die die Anforderungen der "Basisstation-EVU"-Schnittstelle abgeglichen wurden (2).

eGrain Protokolladapter: Der direkte Decoder wurde in C geschrieben und stellte seine Funktionalität den höheren Softwareschichten über ein Per-XS Interface bereit. Der Protokolladapter übergibt die Messwerte an die Basisstation-interne Datenbank.

(2) Schnittstelle Basisstation-EVU

Die Schnittstelle der Basisstation zu existierenden Informationssystemen der EVU (Amprion, Envia.) wurde TCP/IP-basiert gewählt, da bereits ein Betriebs-LAN in den Schaltstellen existierte.

Eine Bereitstellung der Daten erfolgte in zwei Varianten

- a) direkt per Web Frontend der Basisstation, so dass die Messwerte einer einzigen Station direkt per Webbrowser ohne Zusatzsoftware genutzt werden konnten. Diese Variante war notwendig, um unabhängig von der IT-Infrastruktur des EVU für die spätere Verwertung zu ermöglichen;
- b) per Konsolidierungsschnittstelle, mit der die IT des EVU die Daten von N Basisstationen innerhalb ihrer IT-Umgebung konsolidieren und mit ergänzenden Informationen (z. B. Wetterdaten) angereichert werden konnten. Als erster Entwurf wurde eine Schnittstelle als SOAP-basierender Webservice gewählt. Für die Einpassung der Auswerteschnittstellen in die EVU-IT wurde mit Amprion ein Plan skizziert, um den EVU eine nahtlose Einbindung in die existierende IT bieten zu können. Diese Schnittstelle wurde aus Gründen der IT-Compliance nicht umgesetzt.

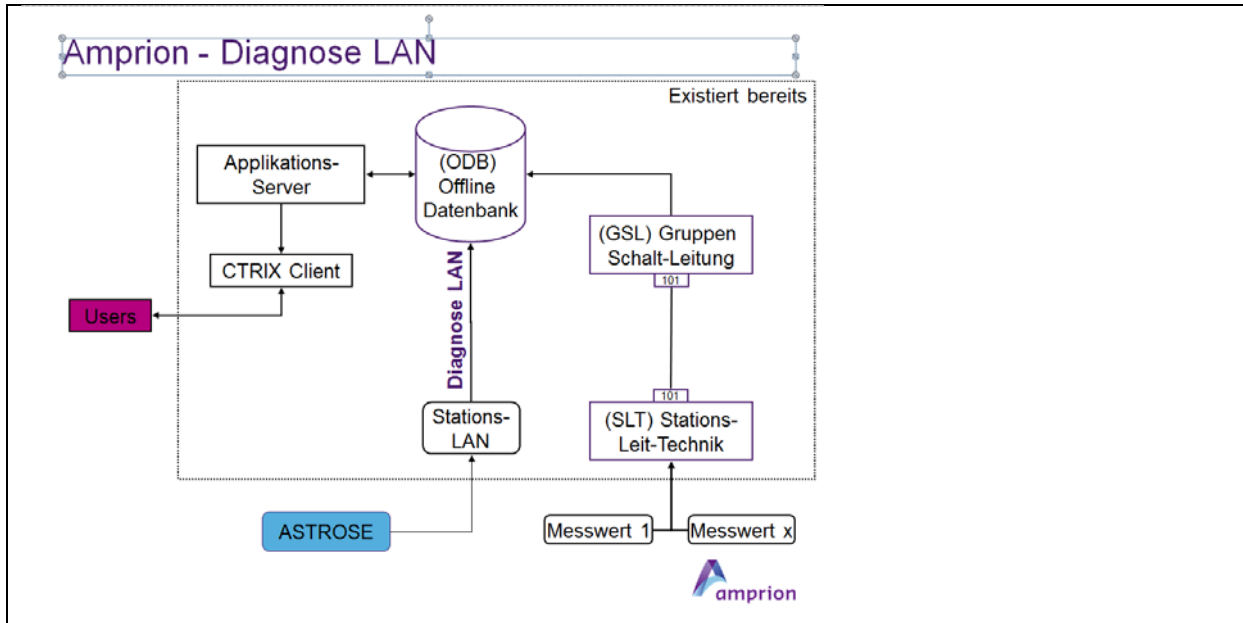


Abbildung 2.9.7: Anbindung an das Amprion Diagnose LAN

2.9.4 Entwicklung einer Präsentationslogik

In Abgrenzung zu AP 4.1 bei der eine Integration in die vorhandene Leit- und Fernwirktechnik angestrebt wurde, beinhaltet dieses Arbeitspaket eine anwendungssystemunabhängige Darstellung der aufbereiteten Sensorinformationen. Als Entwicklungsplattform dieses Presentation Layer wurden gängige Open Source Standards ausgewählt, die eine spätere Weiterentwicklung auch durch Dritte ermöglichen. Der Informationsstrom der verteilten Basisstationen wird zentral zusammengeführt, z. B. an ein Rechenzentrum mit verfügbarem Web-Server. Als Alternative zur Leittechnik sind die Informationen dann auch dezentral in verteilten IT-Umgebungen verfügbar.

Für die Datenrepräsentation innerhalb der Basisstation wurde eine Standard-SQL Datenbank gewählt (PostgreSQL auf Linux-Basis). Zur Aufnahmen Messwerte des eGrain-Protokolls wurde folgendes Datenbankschemata erstellt.

Datentabellen

ASTROSE

ID des E-GRAINS	Mess-Zeitpunkt UCTE	Mess-Zeitpunkt Lokalzeit	Seil-Temperatur	Neigung Horizontal	Neigung Vertikal	Stromwert
xxxxxxx						

Amprion Interne Stammdaten -> Zuordnung des E-Grains zu einem Ort

Stromkreis-Nummer	Stromkreis-Abschnitt	Bauleit-Nummer	Spannfeld-Nummer	Zulässige Seiltemperatur	ID des E-GRAINS
4511	01	4511	0028	40-60-80	xxxxxxx

Tabelle 2.9.1: beispielhafter Datenaufbau

Für die Aufbereitung der Daten wurden einige Darstellungsvarianten spezifiziert, die in der Präsentationslogik abgebildet wurden.

Grenztemperatur des Seils	Grün	Gelb	Rot
40	Bis 35	35-39	40
60	Bis 50	50-59	60
80	Bis 65	65-79	80

Tabelle 2.9.2: Beispiel für Temperaturmesswerte und Darstellung

Tabelle 2 zeigt ein Beispiel für die Temperaturmesswerte, die eine kritische Temperatur nicht übersteigen dürfen. Alternativ zur Ampel-Darstellung kann auch kritische Temperatur des Leiterseils als Null-Linie dargestellt werden. Der Messwert kann neben dem Absolutwert auch als Differenzwert bzw. als Abweichung von der Trassierungstemperatur ausgegeben werden, wenn dieser an die Basisstation übertragen wird.

Weiterhin wurden mit den Anwendungspartnern weitere Auswertungsmerkmale spezifiziert, die in der Präsentationslogik abgebildet sind. Bei der Diskussion über die grafischen Benutzeroberfläche (GUI) kam die Arbeitsgruppe zu dem Schluss, dass auf eine grafische Abbildung des Versorgungsnetzes bzw. des Netzabschnittes verzichtet werden. Abbildung 2.9.8 zeigt die Auswertungsbeispiele des EVU.

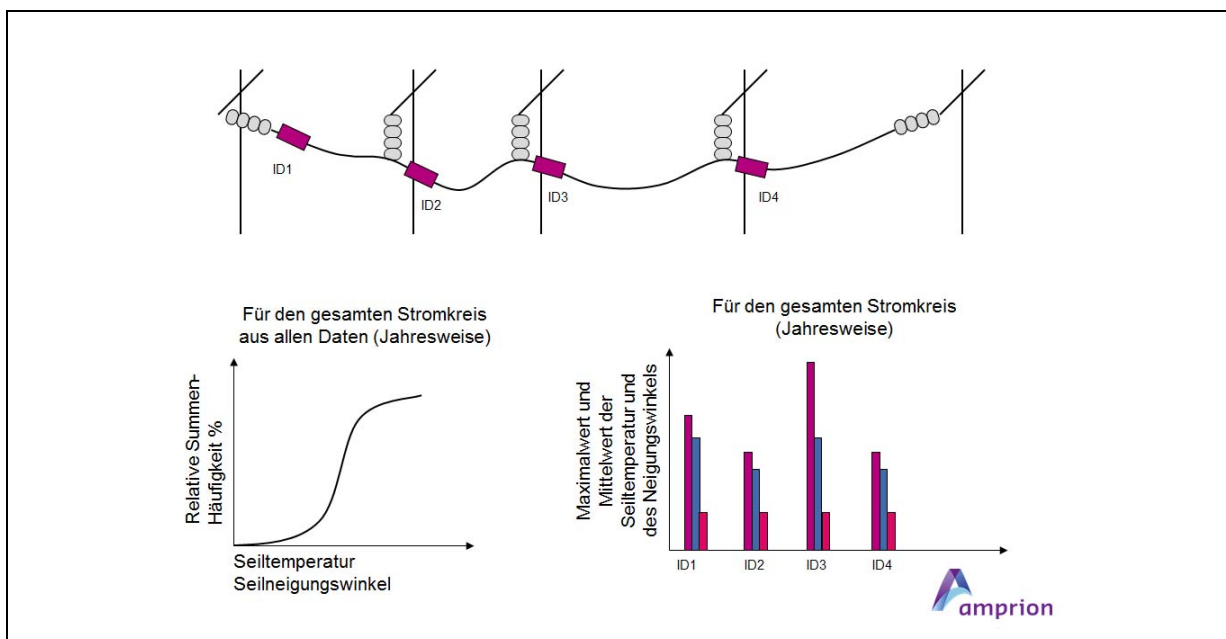


Abbildung 2.9.8.: Auswertungsvarianten

Auch der Neigungswinkel des Leiterseils wird von jedem eGrain an die Basisstation übertragen. Für die prototypische Umsetzung wurde die Grenzwertüberwachung modelliert, d.h. der Basisstation wurden als Dateninput pro eGrain die jeweils erlaubten Maximalen Tangentenwinkel des eGrains zum Leiterseil übergeben („Kritischer Winkel“). Dieser kritische Winkel Korrespondiert mit dem „maximal erlaubten Durchhang“ des jeweiligen Leiterseils.

eGrain ID	Kritischer Winkel
001	70°
002	68°
003	72°

Tabelle 2.9.3. - Beispieldatenstruktur zur Hinterlegung des "kritischen Winkels"

Hierbei ist die Festlegung des Wertes des „kritischen Winkels“ selber kein Teil der Basisstation sondern wird von einem externen mathematischen Modell geliefert. Für den EVU stellt sich hier das praktische Problem, dass der Durchhang bisher aus einer Simulation berechnet wird. Eine Umrechnung des Durchhangs auf den kritischen Winkel an der Position des eGrains erfolgt derzeit nicht und bei einer Serienentwicklung als weitere Funktionalität entwickelt werden.

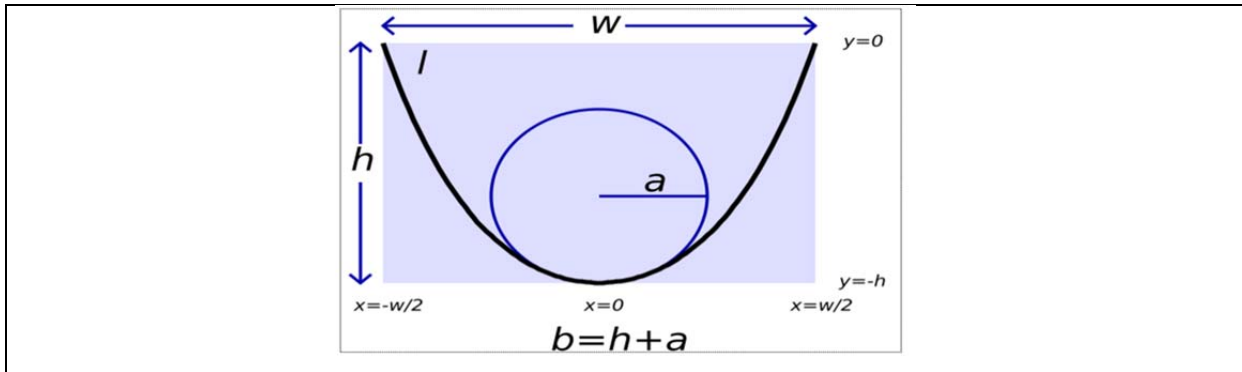


Abbildung 2.9.9: Zusammenhang Durchhang und kritischer Winkel

Als Backend für die „on the fly“-Diagrammgenerierung wurde gnuplot gewählt. In der Implementierung wird gnuplot gesteuert über CPAN-Modul Chart: Gnuplot.

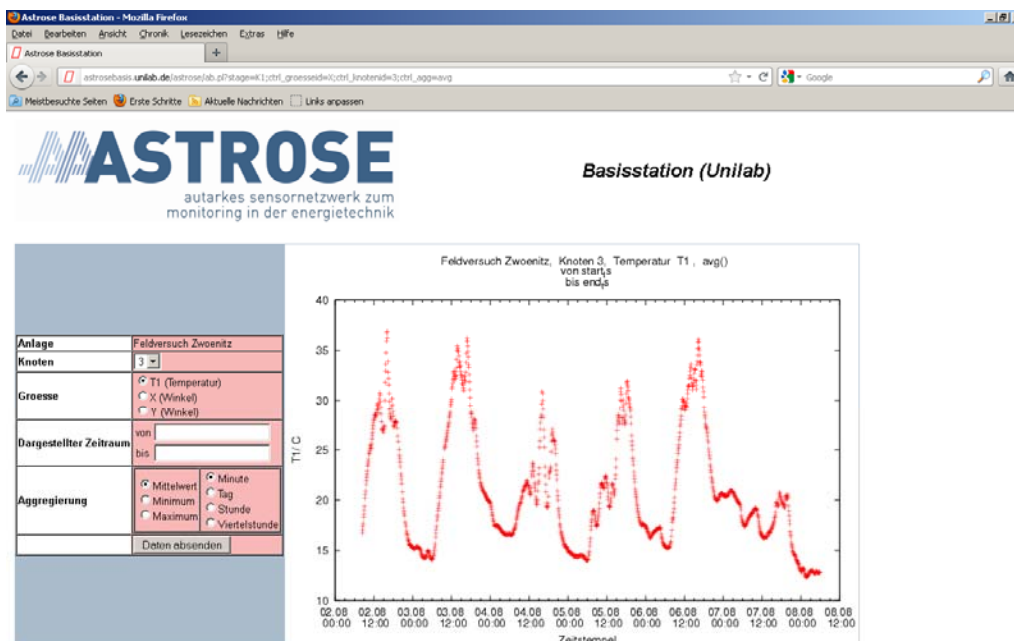


Abbildung 2.9.10: Screenshot "Webfrontend stellt Temperatur dar über die Zeit"

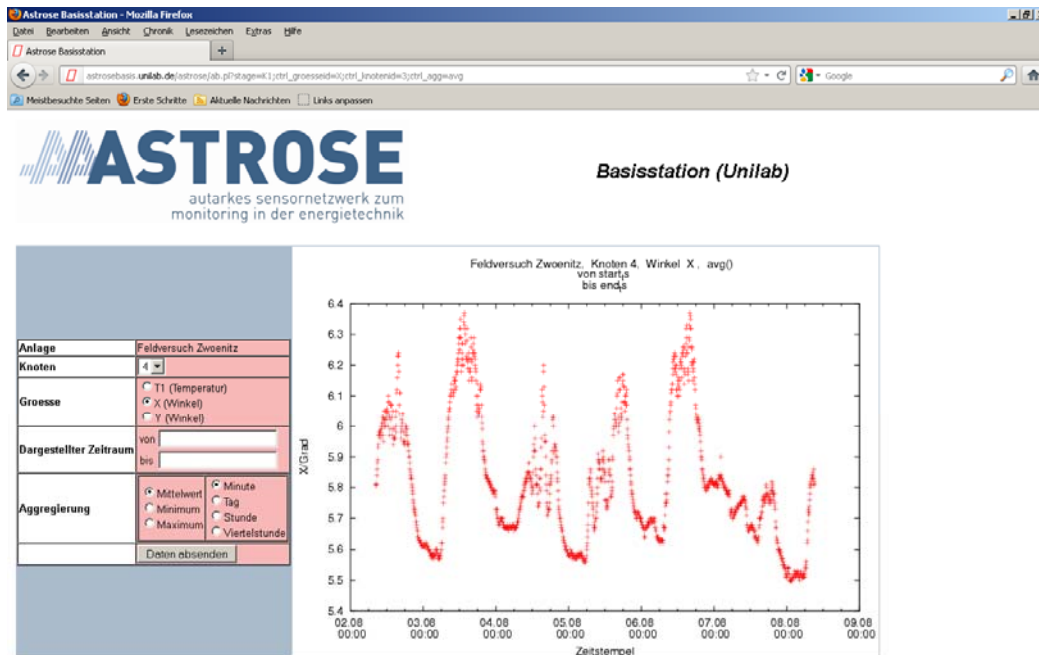


Abbildung 2.9.11: Screenshot "Webfrontend stellt Winkel dar über die Zeit"

2.9.5 Qualitätssicherung, Testung und Erprobung

Der jeweilige Entwicklungstand der Basisstation wurde zu den Meilenstein Funktions- und Lastüberprüfungen unterzogen. Verbesserungen der Bauform bei der Hardware, sowie Bugfixing und Funktionserweiterungen bei Software sind in dem jeweiligen Arbeitspaket dargestellt. Diese Phase stellte insgesamt die Funktionsfähigkeit der entwickelten Prototypen sicher.

Zur Simulation des Verhaltens der Datenbank bei Zuführung von Messdaten und deren Auswertung wurde eine Testplattform entwickelt. Als Basis für die Simulation vieler Basisstationen wurde ein Fujitsu-Notebook mit Windows7 und VMware ESXi als Virtualisierungssoftware aufgesetzt. Die Test-Basisstationen waren in diesem Szenario virtuelle Maschinen auf einem angepassten Debian-Linux Betriebssystem.

Der Aufbau der Testszenarien erfolgte in zwei Schritten. In Versuchsaufbau A (Abb. 2.9.10) wurden zunächst 5 virtuelle eGrain Ketten simuliert, die „Last“ auf die unilab Basisstation brachten. Die Messwerte wurden mit einem Algorithmus erzeugt. Der Versuchsaufbau zeigte, wie die einzelne unilab Basisstation die Messwerte las, verarbeitete und ausgab.

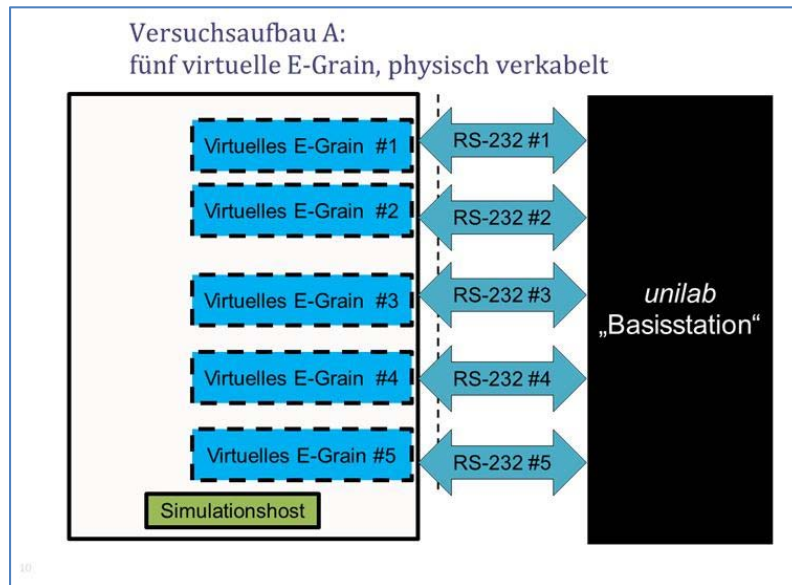


Abbildung 2.9.12: Versuchsaufbau A - fünf virtuelle eGrain

In einem zweiten Schritt wurde die Verdichtung der Messwerte von n Basisstationen in einem zentralen System in der IT-Landschaft des EVU simuliert (Versuchsaufbau B, Abb. 2.9.11)

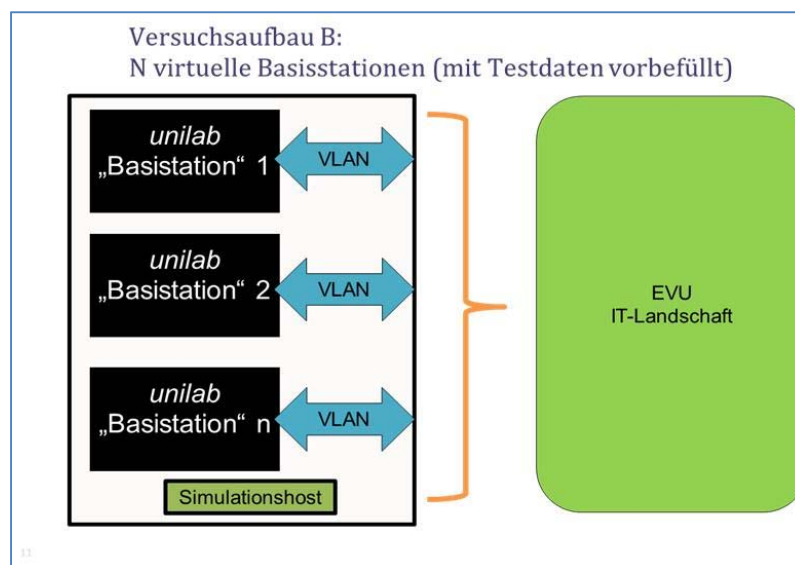


Abbildung 2.9.13: Versuchsaufbau B - n Basisstationen

Beide Tests waren unter den gegebenen Laborbedingungen erfolgreich. Die Basisstationen skalieren und können auch große Informationsflüsse verarbeiten.

Aufgrund dieser guten Ergebnisse konnte auf die Integration der Basisstationen im Rahmen des abschließenden Feldtests verzichtet werden.

3 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse für KMU

3.1 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von MITNETZ STROM

Die im ASTROSE-Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen ein Potential, die vorhandenen Übertragungskapazitäten von 110-kV-Freileitungen besser auszunutzen. Im Netzgebiet der MITNETZ STROM existiert auf Grund der Vielzahl von regenerativen Einspeiseranlagen ein erhöhtes Risiko von Netzengpässen. Mit dem Einsatz von ASTROSE könnten somit diese unzulässigen Netzbelastungen lokalisiert werden und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Einspeisebedingte Abschaltungen von Erzeugungsanlagen könnten damit zu einem Teil vermieden werden.

Zur weiteren Untersuchung des Sensornetzwerkes, vor allem in den Bereichen Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit im Netzbetrieb, sind Pilotprojekte zum Einsatz einer größeren Anzahl von Sensorenversuch geplant. Dabei ist die Erprobung von bis zu 60 Sensorknoten in einem Leitungszug geplant. Diese Pilotprojekte sollen Erkenntnisse zu einem dauerhaften Einsatz des Freileitungsmonitorings im Netzgebiet der MITNETZ STROM liefern. Darüber hinaus sollen die Möglichkeiten der Erkennung von Netzengpässen und der damit erhergehenden Umsetzung von Entlastungsmaßnahmen untersucht werden. Dazu ist die Einbindung der ASTROSE-Daten in das Netzführungssystem zu untersuchen.

3.2 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von Amprion

Im Laufe des Projektes sind von der Systemführung neue Anforderungen an solche Überwachungssysteme gestellt worden. Dazu gehören vor allem die 2-Tage-Prognose der Übertragungskapazität einer Freileitung und die begrenzte Freischaltdauer der Freileitung für die Montage des Systems.

- Die ASTROSE liefert die aktuelle Temperatur, bzw. Neigung aus deren der Durchhang und die momentane Übertragungskapazität berechnet werden kann. Da die zur Verfügung stehende Kapazität der Freileitung witterungsabhängig ist, ist für die Prognose der Übertragungskapazität eine lokale Wettervorhersage notwendig. Dies kann das System nicht liefern.
- Der Einbau des Überwachungssystems an einer 220-kV- und 380-kV-Freileitung hat sich als sehr komplex erwiesen. Zum einen ist es schwierig eine Freischaltung des Stromkreises zu erhalten. Zum Anderen ist die Montage des Sensors sehr aufwendig. Aufgrund der Höhe der Leiterseile ist die Montage ohne einen speziellen Hubwagen nicht möglich. Die Kosten für einen speziellen Hubwagen und Vorbereitung dessen Arbeitsplatzes übertrifft mehrfach die Herstellungskosten des Sensors. Weitere Alternative „manuelle Montage“ nimmt sehr viel Zeit in Anspruch. Der Monteur muss nämlich den Mast hochklettern, dann über den Isolator den Arbeitsplatz an dem Seil einrichten und erst dann den Sensor anbringen. Eine derartige Maßnahme dauert ca. halben Tag pro Sensor. Für die Bestückung von 100 km der Freileitung werden ca. 200 Sensoren notwendig. Dies entspricht der Freischaltdauer von ca. 50 Tagen (mit zwei Teams). Bei der heutigen Auslastungssituation sind solche Zeiträume kaum denkbar. Der Montageaufwand übertrifft auch in diesem Fall mehrmals die Herstellungskosten des Überwachungssystems. Aus o.g. Gründen ist der Einsatz von ASTROSE nur eine Option für die neugebaute Freileitung.

Gemäß dem heutigen Entwicklungsstand hat ASTROSE noch nicht die geforderten Eigenschaften der Genauigkeit und der elektromagnetischen Verträglichkeit erfüllt.

Aus den oben genannten Gründen sieht Amprion zunächst keine Anwendungsmöglichkeit von ASTROSE.

3.3 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von Fraunhofer ENAS und IZM

Die im Konsortium erarbeiteten Forschungsergebnisse konnten in einem Systemdemonstrator gebündelt werden, der im Feldtest erfolgreich überprüft werden konnte. Damit ergibt sich für die beiden Fraunhofer Institute ENAS und IZM die Situation, den Projektdemonstrator direkt in eine Pilotanwendung überführen zu können.

Gemeinsam mit weiteren Partnern des ASTROSE-Konsortiums hat Fraunhofer die Planung für eine Pilotanwendung bei MITNETZ STROM begonnen.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden publiziert um weitere Anwendungspotenziale erschließen zu können.

3.4 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von MPD

Das Projekt diente dem Ziel, technologische Grundlagen auf breiter Basis zu erarbeiten und erste Lösungen für ein Pilot-Einsatz vorzubereiten. Diese Ergebnisse sind Voraussetzungen für die Entwicklung eines autarken Sensor-knotens. Es wurden komplexe Lösungen für MEMS-Sensor-Systeme, mechanischen Komponenten und einer speziellen Häusung erarbeitet, die in dieser Form neu für die MPD sind, entwickelt. Die Entwicklungsergebnisse für eine speziellen Packaging- und Housing-Varianten für derartige Sensorsysteme unter extrem klimatischen und elektrischen Bedingungen werden von der MPD genutzt, um auf dem Gebiet der MEMS Sensoren mit erweitertem Messbereich und erhöhter Genauigkeit zur direkten Messung und spezifische ASIC's auf Laminat als auch auf Keramik mit entsprechender AVT in Zukunft fertigen zu können. In der interdisziplinären Zusammenarbeit mit verschiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen und Industriepartnern zeigten sich auch für das Microelectronic Packaging vielfältige Ansatz-Punkte für neue Anwendungen in den kommenden Jahren.

3.5 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse der TU Chemnitz

Auf Basis der erreichten Ergebnisse wird eingeschätzt, dass die Entwicklung und Erprobung der energieautarken Sensorik durch die überregionale Kooperation mit spezialisierten Firmen und Forschungs-einrichtungen im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik, der Sensortechnologie, der Integrati-onskonzepte, der Energieversorgung sowie der Ansteuer- und Auswerteelektronik zu weiteren For-suchungsvorhaben (öffentlich gefördert oder direkte Industrieforschung) führen wird.

So ist ein prinzipieller Bedarf für die Energieversorgung von autarker Sensorik im Bereich hoher Spannungen und Feldstärken für verschiedenste Anwendungsszenarien festzustellen. Das entwickelte Energieversorgungskonzept kann für weitere Funktionalitäten in der Energiewirtschaft sowohl am Leiterseil als auch in weiteren Bereichen, z. B. Transformatorstationen, umgesetzt werden. Neben dem Energiewandler und einer energiesparenden Anwendung zählt das Energiemanagement zu den Schlüsselkomponenten eines jeden energieautarken Systems.

Auch konnte durch die unterschiedlich angebrachten Temperatursensoren, den Stromsensor und vor allem durch die Neigungssensorik die Leistungsfähigkeit der entwickelten bzw. angepassten Sensorlösungen in einem extremen Umfeld nachgewiesen werden. Es ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach Sensorlösungen für „Harsh Environment“ für die beteiligten Partner zu weiteren Anwendungs-möglichkeiten führt.

3.6 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von KE-Automation

Die Basisstation im Zusammenhang mit dem e-Grain-Netzwerk hat ein großes Nutzungspotential über das Monitoring an Hochspannungsfreileitungen hinaus bei den unterschiedlichsten Anwendungen im Umweltbereich oder in der Logistik. Dies immer dann, wenn Informationen über

größere Flächenausdehnungen mit einer „Zentrale“ (auch in bidirektionaler Richtung) auszutauschen sind.

3.7 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse von unilab AG

Der ASTROSE-Basisknoten kann bereits in der vorliegenden, prototypischen Umsetzung als Teil eines Sensornetzes verwendet werden. Die Inbetriebnahme ist im Wesentlichen abhängig von den notwendigen, kundenindividuellen Anpassungen in Bezug auf Netztopologie, Integration in die IT-Infrastruktur und den Rahmenbedingungen der IT-Compliance, z. B. Verschlüsselung der Datenübertragung und Datensicherung. Eine selbständige Verwertung der Basisstation unabhängig vom Sensornetz ist sehr schwierig, da Übertragungsprotokolle und Schnittstellen speziell auf das ASTROSE eGrain ausgerichtet wurden.

Die zukünftige Verwertbarkeit des Teilprojektes ist also abhängig von der Serienreife und Marktdurchdringung der eGrain-Knoten am Leiterseil. Daher sind aus Sicht der unilab für die erfolgreiche Verwertung noch folgende Herausforderungen zu lösen:

- Der ASTROSE – eGrain braucht eine Serienreife, die eine Produktion in großen Stückzahlen mit entsprechenden Skaleneffekten für Produktionskosten und dem Vermarktungspreis
- Die Endanwender müssen, unabhängig davon, ob eine Integration in die Leitechnik gewünscht wird oder nicht, die erhobenen Daten des eGrain-Netzwerkes mit der Netztopografie exakt verbinden, um aussagekräftige Referenzdaten für die Analyse zu bekommen. Für den EVU stellt sich hier das praktische Problem, dass der Durchhang bisher aus einer Simulation berechnet wird. Eine Umrechnung des Durchhangs auf den kritischen Winkel an der Position des eGrains erfolgt derzeit nicht und bei einer Serienentwicklung als weitere Funktionalität entwickelt werden.
- Individuelle IT-Compliance Anforderungen der Anwender müssen als Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

In Anbetracht der in Abschnitt 3.3 angestrebten Weiterentwicklung des eGrain-Sensornetzwerkes besteht durchaus die Erwartung, dass in den nächsten Jahren die Marktreife und anschließende Verwertung gelingen kann.

4 Angebot von Dienstleistungen mit Adressliste

4.1 Angebot von Dienstleistungen – envia und MITNETZ STROM GmbH

Ansprechpartner: Dr. Sebastian Lissek / Kay Lehmann
MITNETZ STROM GmbH
Magdeburger Str. 36
06112 Halle (Saale)
Tel.: +49 345 216-2294 / -3600
Fax: +49 345 216-2495
E-Mail: Sebastian.Lissek@envia-netz.de / Kay.Lehmann@mitnetz-strom.de

4.2 Angebot von Dienstleistungen – Amprion

Ansprechpartner: Dr. Bartosz Rusek
Amprion GmbH
Abteilung Assetmanagement
Rheinlanddamm 24, 44143 Dortmund
Tel.: +49 (0)231 5849 13405
Fax: +49 (0)231 5849 15502
E-Mail: bartosz.rusek@amprion.net

4.3 Angebot von Dienstleistungen - ENAS

Ansprechpartner: Dr. Steffen Kurth
Fraunhofer ENAS
Abteilung Multi Device Integration
Technologie-Campus 3
09126 Chemnitz
Tel.: +49 (0)371 45001 255
Fax: +49 (0) 371 45001 355
E-Mail: steffen.kurth@enas.fraunhofer.de

4.4 Angebot von Dienstleistungen - IZM

Ansprechpartner: Dr. Volker Großer
Fraunhofer IZM
Abteilung System Design & Integration
Gustav-Meyer-Allee 25,
1355 Berlin
Tel.: +49 (0)30 46403 250
Fax: +49 (0)30 46403 158
E-Mail: volker.grosser@izm.fraunhofer.de

4.5 Angebot von Dienstleistungen - MPD

Ansprechpartner: Gregor Woldt
MPD GmbH
Leiter Entwicklung
Grenzstraße 22,
01109 Dresden
Fon: 0351/21 36 011
Fax: 0351/21 36 109
E-Mail: woldt@mpd.de

4.6 Angebot von Dienstleistungen – TU Chemnitz

Nutzung von Prototypen der Sensordemonstratoren auch für andere Anwendungen im Bereich sehr hoher Präzision. Umfangreiche Angebotspalette für Zulieferung von hochgenauen Inertialsensoren als Demonstratoren verfügbar.

Ansprechpartner: Dr. Andreas Bertz
Technische Universität Chemnitz
Zentrum für Mikrotechnologien
09107 Chemnitz
Tel.: +49 371 531 33129
Fax.: +49 371 531 24069
E-Mail: andreas.bertz@zfm.tu-chemnitz.de

Ansprechpartner: Dr. Thomas Keutel
Technische Universität Chemnitz
Professur für Mess- und Sensortechnik
09107 Chemnitz
Tel.: +49 371 531 36523
Fax.: +49 371 531 836523

E-Mail: thomas.keutel@etit.tu-chemnitz.de

4.7 Angebot von Dienstleistungen – KE-Automation

Ansprechpartner: Dipl.Inf.Holger Neubert / Dr. Claus Fleischer
KE-Automation GmbH
Chemnitzer Str. 77
09212 Limbach-Oberfrohna
Tel.: +49 (0)3722 40887 26 / 24
Fax: +49 (0)3722 40887 21
E-Mail: h.neubert@KE-Automation.de
c.fleischer@KE-Automation.de

Neben der vorgenannten Entwicklungsleistung bis hin zur Umsetzung als einsetzbare Anlage unter Industriebedingungen bietet Ihnen KE-Automation GmbH folgendes Portfolio an:

Neben individuellen IT-Entwicklungen (Projekte) und fertigen IT-Anwendungen (Produkte) bieten wir Ihnen maßgeschneiderte Softwarelösungen und

- Prozessleit- und Automatisierungstechnik
- Energiemanagement- und Prognosesysteme
- GPS- und Datenfunklösungen
- Datenbankanwendungen
- Lagerverwaltungssysteme
- Prozessvisualisierung und Produktionsdatenerfassung
- Anbindung von Prozessteuerungen an ERP-Systeme
- Systemintegration

Mit unseren Ingenieuren, Technikern und spezialisierten Facharbeitern bieten wir alle Leistungen der Automatisierung für verschiedene Anwendungsgebiete

- Planung und Entwicklung von Automatisierungsprojekten
- Elektrokonstruktion mit EPLAN und anderen Systemen
- Online- und Offline- Programmierung von Robotern
- Softwareentwicklung, SPS/PLC-Programmierung
- Schaltschrank- und Verteilerbau
- Maschineninstallation und Inbetriebsetzung von Produktionslinien
- Prozess- und Taktzeitoptimierung

Im Anlagenbau kombinieren unsere Ingenieure und Techniker ausgewählte Robotertechnik, Prozessgeräte und Einzelkomponenten mit Steuerungstechnik und eigenen mechanischen Teilen zu völlig neuen Produkten und Anlagen.

4.8 Angebot von Dienstleistungen – unilab

Ansprechpartner: Dr. Lars Kemper
Unilab AG
Technologiepark 34
33100 Paderborn
Tel.: +49 5251 1656 0
Fax.: +49 5251 1656 56
E-mail: Kemper@unilab.de

Seit über 25 Jahren erbringt unilab AG Dienstleistungen in der Informationstechnologie. Die Kernkompetenzen liegen in der ganzheitlichen Betrachtung von Technologieanforderungen für mittelständische IT und TK Strukturen sowie der unterstützenden Dienstleistung für mittlere und große Industriekunden. Fundierte Beratungsleistungen nach neuesten Standards sowie die Begleitung innovativer Forschungsprojekte runden den optimalen Kundennutzen ab.

Im Geschäftsfeld ITK Systemhaus erbringt unilab IT Infrastrukturdienstleistungen, d. h. Betrieb, Wartung, Migration und Dokumentation der Systeme, sowohl „on-site“, als auch „remote“. Unilab ist Partner der führenden IT-Hersteller für Server, Storage, Betriebssysteme, Desktop- und Servervirtualisierung, Backup and Recovery, VoIP und IT-Sicherheitslösungen.

Im Geschäftsfeld Software entwickelt unilab individuelle Datenbank-, Geschäftsprozess- und Qualitätsmanagementlösungen.

Die Geschäftsbereich Consulting mit den Schwerpunkten IT Strategie, IT Sicherheit und IT Asset Management runden das Leistungsportfolio ab.

5 Abbildungsverzeichnis

Abschnitt 1.2

Abbildung 1.2.1: Anwendungsszenario mit Datenfluss und redundanten Sensorknoten für hohe Zuverlässigkeit

Abschnitt 2.3

Abbildung 2.3.1: Satellitenkarte des Versuchsgebiets mit Messpunkten

Abbildung 2.3.2: Versuchsaufbau im Hochspannungslabor (Funkknoten neben der Hochspannungsleitung)

Abbildung 2.3.3: Foto vom Blitzstoßversuch mit zwei auf dem Leiterseil montierten Sensorknoten

Abbildung 2.3.4: Elektrische Schaltung der Blitzstoßanlage

Abbildung 2.3.5: WLAN-Außenantenne und integrierter Empfangselektronik an Warte im Umspannwerk

Abbildung 2.3.6: Sensorknoten nach der Montage auf einem 110 kV-Leiterseil beim Feldversuch in Niederwiesa

Abbildung 2.3.7: Schlitzantenne, a) Abmessungen, b) Foto der Antenne mit Kunststoffkapsel am Sensorknoten befestigt

Abbildung 2.3.8: S11-Parameter (Reflexion) der Antenne, Vergleich zwischen Messwert (blaue Kurve) und Simulationsergebnisse (schwarze gestrichelte Kurve)

Abbildung 2.3.9: Ergebnis einer Simulation des elektromagnetischen Feldes der Antenne zur Ermittlung der Richtcharakteristik und des Antennengewinns.

Abbildung 2.3.10: Richtdiagramm der Antenne, Vergleich zwischen Messwert (blaue Kurve) und Simulationsergebnisse (schwarze Kurve)

Abbildung 2.3.11: Foto des Antennenfilters ohne Gehäuse

Abbildung 2.3.12: Anpassung eines Filters (Filter 01 exemplarisch)

Abbildung 2.3.13: Durchgangsdämpfung des Filters mit Splitter (Filter 01 exemplarisch)

Abbildung 2.3.14: Durchlassdämpfung des Antennenfilters im Frequenzbereich ab 1 MHz

Abbildung 2.3.15: Ansicht des Messplatzes zur Kalibrierung der Neigungssensoren

Abbildung 2.3.16: Screenshot der Software zur Messung und Kalibrierung

Abbildung 2.3.17: Lageplan des Versuchsortes, Sensorknoten am Mast 1a bzw. Mast 1.

Abbildung 2.3.18: Satellitenaufnahme des Versuchsortes

Abbildung 2.3.19: Sensorknoten mit externem Temperatursensor, a) Gesamtansicht, b) Detail: externer Temperatursensor

Abbildung 2.3.20: Ladekurven des Doppelschichtkondensators nach dem Einschalten der Hochspannung am 27.7.2011 um ca. 19:00 Uhr.

Abbildung 2.3.21: Aufgenommener Stromfluss im Hochspannungsleiterseil

Abbildung 2.3.22: Messwerte von Temperatur und Neigung.

Abbildung 2.3.23: Satellitenaufnahme des Versuchsortes mit eingetragenen Standorten der Sensorknoten

Abbildung 2.3.24: Foto von der Basisstation am Gebäude der Warte im Umspannwerk

Niederwiesa

Abbildung 2.3.25: Foto vom Sensorknoten 1 im Umspannwerk Niederwiesa

Abbildung 2.3.26: Foto vom Sensorknoten 2 (hinten) und Sensorknoten 3 (vorn) mit Blickrichtung zum Umspannwerk Niederwiesa

Abbildung 2.3.27: Foto vom Sensorknoten 4 mit Blickrichtung zum Umspannwerk Niederwiesa (im Bild hinter der Anhöhe mit dem Baumbestand rechts verborgen)

Abbildung 2.3.28: Messdaten vom Feldversuch mit der Sensorkette

Abschnitt 2.4

Abbildung 2.4.1: schematische Darstellung des Elektronikkonzepts

Abbildung 2.4.2: Stromaufnahme bei verschiedenen Betriebszuständen

Abbildung 2.4.3: Version des ASTROSE-eGrain-Evaluierungsboards zu Testzwecken

Abbildung 2.4.4: Version des ASTROSE eGrains inklusive Schnittstellen und Aufnahmen für Sensorik

Abbildung 2.4.5: Layout für die Sensorknoten-Baugruppe

Abbildung 2.4.6: Layout Sensorträger

Abbildung 2.4.7: Platine Sensorträger

Abbildung 2.4.8: Oberseite Sensorplatine

Abbildung 2.4.9: Unterseite Sensorplatine

Abbildung 2.4.10: Blick auf die komplette ASTROSE eGrain Baugruppe

Abbildung 2.4.11: Layoutsimulation und Realisierung der optimierten ASTROSE eGrain Sensorleiterplatte

Abbildung 2.4.12: optimierte Konstruktion des Zentralgehäuses innerhalb des neuen Außengehäuses (Entwurf)

Abbildung 2.4.13: Konstruktion des inneren Zentralgehäuses zur Aufnahme der kompletten Elektronikbaugruppe

Abbildung 2.4.14: Lagenaufbau der Elektronik innerhalb des Zentralgehäuses

Abbildung 2.4.15: ASTROSE-Basisstation

Abbildung 2.4.16: Testbox zur Protokollimplementierung

Abbildung 2.4.17: Telegrammstruktur des Kommunikationsprotokolls zwischen Basisstation und Infrastruktur

Abbildung 2.4.18: erste Version der Visualisierungssoftware

Abbildung 2.4.19: Software zur Steuerung der Basisstation und Anzeige der Sensorwerte

Abbildung 2.4.20: Unterstützung bei der Testung eines ASTROSE eGrains im Hochspannungslabor in der TU Chemnitz

Abbildung 2.4.21: Funktionstest der Vernetzung der Sensorknoten

Abschnitt 2.5:

Abbildung 2.5.1: Erster Entwurf des ASTROSE-eGrains, am Leiterseil eingespannt

Abbildung 2.5.2: ASTROSE-eGrain als Zylinder in Voll- (A) und Schnittdarstellung (B)

Abbildung 2.5.3: Entwurf einer Rohrschlitzantenne (ENAS FhG)

- Abbildung 2.5.4: A Schnittdarstellung längs, B quer zum Leiterseil.
- Abbildung 2.5.5: ASTROSE-Modul aus Kupferblech gefertigt
- Abbildung 2.5.6: Gehäuse mit Längsschlitz für die Seilmontage
- Abbildung 2.5.7: Leiterseilbefestigung und -kontakt über eine Kugeldruckschraube, die bei Befestigung das Leiterseil berührt
- Abbildung 2.5.8: Gehäuseinnere mit Elektronik und stirnseitig angeordneten Antennen. Auf der Elektronik befindet sich die komplette Elektronik und Steuerung. Sie beinhaltet ebenfalls den Neigungssensor und den Stromsensor.
- Abbildung 2.5.9: Außenansicht ASTROSE-Sensorknoten
- Abbildung 2.5.10: Elektronikhalterung und Antennen
- Abbildung 2.5.11: Montage des ASTROSE-Sensorknotens
- Abbildung 2.5.12: modifizierte Reparaturspirale
- Abbildung 2.5.13: 3D-CAD-Darstellung ASTROSE-Sensorknoten
- Abbildung 2.5.14: ASIC (links) und MEMS-Neigungssensor (rechts) auf Laminatträger gebondet.
- Abbildung 2.5.15: Neigungssensorik zum Schutz mit Kunststoffkappe abgedeckt. Unter ihr befinden sich MEMS und ASIC.
- Abbildung 2.5.16: Neigungssensorik im finalen Zustand. Unter der weißlichen Kunststoffkappe befinden sich MEMS und ASIC.

Abschnitt 2.6

- Abbildung 2.6.1: Schematische Darstellung der Winkeländerung der Leiterseile und des Arbeitsbereiches der Sensorstruktur
- Abbildung 2.6.2: REM-Aufnahme eines ASTROSE-Neigungssensors (Übersicht)
- Abbildung 2.6.3: Kennlinien (Wafer 72-03-07)
- Abbildung 2.6.4: Vergleich Temperatur- und Neigungsmessung
- Abbildung 2.6.5: Prinzipschaltbild der Strommessung und Kurzschlussdetektion mit Mikrocontroller
- Abbildung 2.6.6: Sensorplatine mit Stromsensor (oben/links) und Neigungssensor (unten rechts)
- Abbildung 2.6.7: Vergleich der Stromwerte vom Sensorknoten und Umspannwerk Zwönitz
- Abbildung 2.6.8: Tagestemperaturverlauf
- Abbildung 2.6.9: Vergleich Temperatur- und Neigungsmessung
- Abbildung 2.6.10: E-Feldgradient am Leiterseil
- Abbildung 2.6.11: Struktur der Harvester-Elektrode um die Hochspannungsleitung
- Abbildung 2.6.12: Physikalisches Modell: (a) Wirkprinzip, (b) Ersatzschaltbild, (c) elektrisches Modell
- Abbildung 2.6.13: Lastabhängige Energieverfügbarkeit eines Experimentalzylinders
- Abbildung 2.6.14: Erweiterter Messaufbau - Kopplung der Harvestingelektrode durch einen Spezialtransformator
- Abbildung 2.6.15: Blockschema der Energieversorgung des ASTROSE-eGrain

- Abbildung 2.6.16: Spezifizierte Spannungslevel des Energieversorgungsmoduls
- Abbildung 2.6.17: Energieversorgungsmodul (a) Abmessungen (b) Prototyp mit Überspannungsschutz, ohne Transformator
- Abbildung 2.6.18: Blockschema des Energieversorgungsmoduls mit Schnittstellen zur Sensorelektronik
- Abbildung 2.6.19: Degradation der DSK in Abhängigkeit der Betriebstemperatur
- Abbildung 2.6.20: Sensorknoten im Hochspannungslabor
- Abbildung 2.6.21: Verfügbare Energie/Leistung in Abhängigkeit der Leiterseilspannung
- Abbildung 2.6.22: Funktionsprinzip der Zusatzplatine zur empirischen Leistungsbestimmung
- Abbildung 2.6.23: Schaltung – Zusatzplatine zur empirischen Leistungsbestimmung
- Abbildung 2.6.24: Funktionsprinzip der Zusatzplatine zur empirischen Leistungsbestimmung
- Abbildung 2.6.25: Ladezyklus
- Abbildung 2.6.26: Feldtest – Messdaten Ladezyklus
- Abbildung 2.6.27: Test des überarbeiteten Sensorknotens im Hochspannungslabor
- Abbildung 2.6.28: Montage der Sensorknoten auf 110-kV-Leitung
- Abbildung 2.6.29: Aufgenommene Temperatur- und Neigungswerte von Sensorknoten 4
- Abbildung 2.6.30: Aufgenommene Stromwerte von Sensorknoten 4
- Abbildung 2.6.31: Ermittelte Kettenlinie eines Spannungsfeldes zur Bestimmung des Durchhangs
- Abbildung 2.6.32: Beziehung Temperatur und Neigung des Leiterseils (Vergleich Sensorwerte und mathematisches Modell)

Abschnitt 2.8:

- Abbildung 2.8.1: Schema des Informationsflusses

Abschnitt 2.9

- Abbildung 2.9.1: eGrain-Basisstation Frontansicht
- Abbildung 2.9.2: eGrain-Basisstation Rückansicht
- Abbildung 2.9.3: eGrain Basisstation Innenansicht
- Abbildung 2.9.4: DELOCK 89220 für 2 HE Gehäuse mit PCI Erweiterungskarten
- Abbildung 2.9.5: DELOCK 61519 USB > 8 x seriell Adapter
- Abbildung 2.9.6: Building Block Software
- Abbildung 2.9.7: Anbindung an das Amprion Diagnose LAN
- Abbildung 2.9.8.: Auswertungsvarianten
- Abbildung 2.9.9: Zusammenhang Durchhang und kritischer Winkel
- Abbildung 2.9.10: Screenshot "Webfrontend stellt Temperatur dar über die Zeit"
- Abbildung 2.9.11: Screenshot "Webfrontend stellt Winkel dar über die Zeit"
- Abbildung 2.9.12: Versuchsaufbau A - fünf virtuelle eGrain
- Abbildung 2.9.13: Versuchsaufbau B - n Basisstationen

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.3.1:	Anpassung und Durchgangsdämpfung der Filter mit Splitter (Filterdeckel geschlossen).
Tabelle 2.3.2:	Messdaten vor der Kalibrierung und Kalibrierdaten der Neigungssensoren, x- und y- Achse getrennt aufgelistet
Tabelle 2.3.3:	Offset und Skalenfaktor vor und nach der Kalibrierung, x- und y-Achse getrennt aufgelistet
Tabelle 2.3.4:	Theoretische und gemessene Empfangsleistung
Tabelle 2.3.5:	Störungssituation ohne Sprühentladungen
Tabelle 2.3.6:	Störungssituation mit Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne Am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, Hochspannung 30 kV (leichtes Knistern)
Tabelle 2.3.7:	Störungssituation mit Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, Hochspannung 50 kV (starkes Knistern)
Tabelle 2.3.8:	Störungssituation mit Sprühentladung gemessen mit einfacher Antenne am Spektrumanalysator, Frequenzband: 1 MHz...4 GHz, Hochspannung 100 kV (sehr starkes Knistern)
Tabelle 2.4.1:	Energieverbräuche bezogen auf verschiedene Betriebszustände
Tabelle 2.6.1:	Berechnung der Winkeländerung in Abhängigkeit der Längenänderung des Leiterseiles (Spannweite 500 m, Niveauunterschied 0 m)
Tabelle 2.6.2:	Berechnung der Winkeländerung in Abhängigkeit der Längenänderung des Leiterseiles (Spannweite 500 m, <u>Niveauunterschied 20 m</u>)
Tabelle 2.6.3:	Spezifikationen der Einzelsensoren bzw. primäre Eigenschaften der kapazitiven Sensorstrukturen
Tabelle 2.6.4:	Parameteridentifikation aus Wafer-Level-Test (Wafer 72-03-07)
Tabelle 2.9.1:	beispielhafter Datenaufbau
Tabelle 2.9.2:	Beispiel für Temperaturmesswerte und Darstellung
Tabelle 2.9.3:	Beispieldatenstruktur zur Hinterlegung des "kritischen Winkels"

7 Veröffentlichen/Literatur

Nachfolgend sind wichtige Veröffentlichungen der Partner des Projektkonsortiums gelistet. Ergänzend sind Beiträge in der Tagespresse zu nennen.

In der Regel waren bei den Veröffentlichung Autoren mehrerer Projektpartner beteiligt. Aus diesem Grund wurde eine Aufschlüsselung nach Projektpartner nicht vorgenommen.

7.1 Fachartikel

S. Kurth, H. During, S. Lissek, V. Großer, Hochspannungsleitungen mit verteilten Sensornetzen, *Energiewirtschaft*, Jg. 110 (2011), Heft 22, S. 42-46

S. Voigt, S. Kurth, T. Gessner, Autonomous sensor network for power line monitoring, SSI - Smart System Integration Conference, Zürich, März 2012

S. Voigt, M. Pfeiffer, A. Grolms, S. Kurth, T. Gessner, T. Keutel, C. Brockmann, M. Braunschweig: Autarkes Sensornetzwerk zum Monitoring von Hochspannungsleitungen, 11. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik – Mikromechanik & Mikroelektronik, Chemnitz, Oktober 2012

S. Voigt, S. Kurth, C. Brockmann, S. Lissek: Autarkes Sensornetzwerk zum Monitoring von Hochspannungsleitungen, *Fachzeitschrift PLUS*, Ausgabe 3, März 2012

S. Voigt, J. Wolfrum, M. Pfeiffer, T. Keutel, C. Brockmann, V. Großer, S. Lissek, H. During, B. Rusek, M. Braunschweig, S. Kurth, T. Gessner, Sensornetzwerk zum Monitoring von Hochspannungsleitungen, VDE-Kongress 2012: Smart Grid – Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, 5.-6.11.2012

S. Leidich, S. Voigt, A. Gratiás, T. Keutel, S. Kurth, T. Gessner, Slot-antenna for autonomous sensor systems mounted on overhead power lines, *Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2011 IEEE MTT-S International Issue Date: 5-10 June 2011, Baltimore, MD, USA, pp. 1ff

Voigt,S.; Leidich,S.; Gratiás,A.; Kurth,S.; Keutel,T.; Gessner,T.: Radio transmission system for power line monitoring. *Smart System Integration*, Dresden, 2011 March 22-23; Proceedings, Paper 53 (ISBN978-3-8007-3324-8)

Voigt,S.; Nowack,M.; Bertz,A.; Leidich,S.; Meinig,M.; Kurth,S.; Gessner,T.; Grosser,V.; Braunschweig,M.; Krumm,R.: Autarkes Sensornetzwerk zur Überwachung von Hochspannungsleitungen. *Mikrosystemtechnik Kongress 2011*, Darmstadt, 2011 Oct 10-12; Proceedings, pp 354-357(ISBN978-3-8007-3367-5)

X. Zhao, T. Keutel, M. Baldauf, O. Kanoun: "Energy Harvesting for Overhead Power Line Monitoring", *IEEE 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, ISBN: 9783981476644, 20.-23. März 2012, Chemnitz.

"Energy Harvesting for a Wireless Monitoring System of Overhead High Voltage Power Lines" *IEEE wiss. Zeitschrift IET Generation, Transmission & Distribution*", ISSN 1751-8687

7.2 Vorträge

Nowack,M.; Leidich,S.; Reuter,D.; Kurth,S.; Kuechler,M.; Bertz,A.; Gessner,T.: Novel Post-Process Gap Reduction Technology of High Aspect Ratio Microstructures Utilizing Micro Welding. Transducers 11, Beijing (China), 2011 Jun 5-9; Proceedings, pp 1352-1355 (ISBN 978-1-4577-0156-6)

Nowack,M.; Leidich,S.; Reuter,D.; Kurth,S.; Kuechler,M.; Bertz,A.; Gessner,T.: Lokales Mikroschweißen als post-process Technologie zur permanenten Reduzierung des Elektrodenabstandes von HARMS. Mikrosystemtechnik Kongress 2011, Darmstadt, 2011 Oct 10-12; Proceedings, pp 610-613 (ISBN 978-3-8007-3367-5)

Voigt,S.; Leidich,S.; Gratiyas,A.; Kurth,S.; Keutel,T.; Gessner,T.: Radio transmission system for power line monitoring. Smart System Integration, Dresden, 2011 March 22-23; Proceedings, p Paper 53 (ISBN 978-3-8007-3324-8)

S. Voigt, M. Nowack, A. Bertz, S. Leidich, M. Meinig, S. Kurth, T. Gessner, T. Keutel, X. Zhao, O. Kanoun, S. Lissek, H. During, B. Rusek, C. Brockmann, V. Grosser, M. Braunschweig, R. Krumm: Autarkes Sensornetzwerk zur Überwachung von Hochspannungsleitungen, Mikrosystemtechnik Kongress 2011, Darmstadt, Oktober 2011, Proceedings, pp 354-357 (ISBN 978-3-8007-3367-5)

S. Voigt, S. Kurth, T. Gessner: Sensornetzwerk zum Monitoring von Hochspannungsleitungen, 3. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, Landshut, März 2012

S. Voigt, M. Pfeiffer, A. Grolms, S. Kurth, T. Gessner, T. Keutel, C. Brockmann, M. Braunschweig: Autarkes Sensornetzwerk zum Monitoring von Hochspannungsleitungen, 11. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik – Mikromechanik & Mikroelektronik, Chemnitz, Oktober 2012

S. Voigt, J. Wolfrum, M. Pfeiffer, T. Keutel, C. Brockmann, V. Großer, S. Lissek, H. During, B. Rusek, M. Braunschweig, S. Kurth, T. Gessner: Sensornetzwerk zum Monitoring von Hochspannungsleitungen, VDE-Kongress Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft, Stuttgart, November 2012

S. Voigt, S. Kurth, T. Gessner: Autonomous sensor network for power line monitoring. SSI - Smart System Integration Conference, Zürich (Schweiz), März 2012.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel ASTROSE – Autarkes Sensornetzwerk zum Monitoring in der Energietechnik	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bertz, Andreas Braunschweig, Markus Brockmann, Carsten Fleischer, Claus Großer, Volker Hefer, Jan Kanoun, Olfa Kemper, Lars Keutel, Thomas Kurth, Steffen Lehmann, Kay Lissek, Sebastian Mathar, Fabian Neubert, Holger Nowack, Markus Rusek, Bartosz Schnelle, Tobias Voigt, Sven Woldt, Gregor Zhao, Xingming	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.06.2012
	6. Veröffentlichungsdatum 17. Januar 2013
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MITNETZ STROM GmbH, Magdeburger Str. 36, 06112 Halle (Saale), Amprion GmbH Rheinlanddamm 24, 44143 Dortmund, Fraunhofer ENAS Technologie-Campus 3, 09126 Chemnitz Fraunhofer IZM Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin MPD GmbH Grenzstraße 22, 01109 Dresden Technische Universität Chemnitz 09107 Chemnitz KE-Automation GmbH Chemnitzer Str. 77, 09212 Limbach-Oberfrohna Unilab AG Technologiepark 34, 33100 Paderborn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution --
	10. Förderkennzeichen 16SV3771
	11. Seitenzahl 119 Seiten
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 2Literaturangaben
	14. Tabellen 16 Tabellen
	15. Abbildungen 112 Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TIB Hannover und BMBF Bibliothek Bonn, 21 Januar 2013	
18. Kurzfassung Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung eines autarken, sich selbst konfigurierenden Sensornetzes als Messdatenbasis für eine zeitnahe Anpassung der Stromübertragungsnetze an dezentrale Einspeisungen und an extreme Wetterbedingungen. Die Datenbasis für vor Ort erfasste Messdaten wird durch die ASTROSE-eGrains (ASTROSE-Sensorknoten) geschaffen. Die praktische Gestaltung des Kommunikationsnetzwerkes vom ASTROSE-eGrain zur "Stromschaltzentrale" bildet den zweiten Arbeitsschwerpunkt des Projektes. Im Projekt wurden Lösungen für ein solches Sensornetzwerk erarbeitet, realisiert und im Feldtest auf Praxistauglichkeit geprüft.	
19. Schlagwörter Mikrosystemtechnik, Freileitungsmonitoring, Autakre Sensorsysteme	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title ASTROSE – Autonomous Sensor network for condition monitoring of power lines	
4. author(s) (family name, first name(s))	5. end of project 31.06.2012
Bertz, Andreas Brockmann, Carsten Großer, Volker Kanoun, Olfa Keutel, Thomas Lehmann, Kay Mathar, Fabian Nowack, Markus Schnelle, Tobias Woldt, Gregor	Braunschweig, Markus Fleischer, Claus Hefer, Jan Kemper, Lars Kurth, Steffen Lissek, Sebastian Neubert, Holger Rusek, Bartosz Voigt, Sven Zhao, Xingming
6. publication date 17.01.2013	7. form of publication final report
8. performing organization(s) (name, address) MITNETZ STROM GmbH, Magdeburger Str. 36, 06112 Halle (Saale), Amprion GmbH Rheinlanddamm 24, 44143 Dortmund, Fraunhofer ENAS Technologie-Campus 3, 09126 Chemnitz Fraunhofer IZM Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin MPD GmbH Grenzstraße 22, 01109 Dresden Technische Universität Chemnitz 09107 Chemnitz KE-Automation GmbH Chemnitzer Str. 77, 09212 Limbach-Oberfrohna Unilab AG Technologiepark 34, 33100 Paderborn	9. originator's report no. --
10. reference no. 16SV3771	11. no. of pages 119
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 2
	14. no. of tables 16
	15. no. of figures 112
16. supplementary notes ---	
17. presented at (title, place, date) TIB Hannover und BMBF Bibliothek Bonn, 11. Juni 2012	
18. abstract The condition monitoring of power lines aims at the optimization of the capacity utilization of energy transport while guarantee hazard free operation. The ASTROSE system allows a decentralized monitoring of high-voltage transmission networks using autonomously working sensors. The ASTROSE sensor networking was developed, realized and field tests were started at the end of project.	
19. keywords micro systems, sensor network, power line monitoring, robotics, optical analytics	
20. publisher	21. price