

Messungen zur Validierung der Methodik Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsfreileitungen

Bericht

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Bericht Nr. RP/2016/NIS-NF/255-2

Autor: Alfred Bürgi

Datum: 08.12.2016

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU), Abteilung Lärm und NIS,
CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmer: ARIAS, umwelt.forschung.beratung gmbh, Gutenbergstrasse 40B,
3011 Bern

Autor: Alfred Bürgi

Mitarbeit am Projekt: Sanjay Gupta Sagar, Benjamin Struchen, Martin Rösli, Schweizeri-
sches Tropen- und Public Health Institut, Basel und Universität Basel

Begleitung BAFU: Dr. Stefan Joss

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	4
Zusammenfassung.....	5
Résumé.....	5
1 Einleitung.....	7
1.1 Motivation.....	7
1.2 Pilotprojekt	7
1.3 Ziel des Projekts.....	7
1.4 Projektteam.....	8
2 Magnetfeldmessungen.....	9
2.1 Messorte.....	9
2.1.1 Kriterien.....	9
2.1.2 Erster Messort: Iffwil.....	9
2.1.3 Zweiter Messort: Wiler bei Seedorf.....	11
2.2 Messinstrumente.....	13
2.3 Messanordnung und Temperaturkontrolle.....	14
2.3.1 Kältetest.....	15
2.4 Position der Messpunkte.....	16
2.5 Höhe der Leiterseile.....	21
2.6 Durchführung der Messung.....	22
2.7 Auswertung.....	23
3 Rechenmodell.....	24
3.1 Berechnung von Magnetfeldern.....	24
3.1.1 Eingabedaten.....	24
3.1.2 Berechnung von Zeit-Mittelwerten.....	25
3.1.3 Zeitlicher Mittelwert des Durchhangs.....	26
3.1.4 Zeitlicher Mittelwert des Betrags von B.....	26
3.1.5 Zeitlicher RMS-Mittelwert.....	27
3.1.6 Modellannahmen.....	28
3.2 Modell-Software.....	29
3.3 Modellvarianten.....	29
4 Messresultate.....	31
4.1 Messperioden.....	31
4.2 Magnetfelder.....	32
4.2.1 Vergleich der Messresultate am Messpunkt 1.....	36
4.2.2 Histogramm der magnetischen Flussdichten.....	36
4.3 Lastflussdaten.....	37
4.3.1 Graphiken der Scheinströme.....	37
4.3.2 Ströme und Magnetfelder.....	40
4.3.3 RMS-Koeffizienten.....	41
4.4 Modellresultate und Vergleich mit der Messung.....	42
4.4.1 Vergleich für Messungen in Iffwil.....	45
4.4.2 Vergleich für Messungen in Wiler.....	49
4.4.3 Variation der Querprofile.....	53
4.5 Statistischer Vergleich.....	54
4.5.1 Mittelwert des Betrags und RMS-Mittelwert.....	54
4.5.2 Genauigkeit der Modellierung.....	54
4.6 Messprobleme.....	56
4.7 Temperaturmessung.....	58
4.8 Meteorologie und Repräsentativität der Messperioden.....	61
4.9 Höhe der Leiterseile.....	66
4.10 Modellfehler in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.....	70

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	72
Anhang A Technische Daten der Magnetfeld-Messgeräte.....	76
Anhang B Datenblatt PX05.....	77
Anhang C Auswertung der Seilhöhen.....	78
Verdankungen.....	79
Literatur.....	80

Measurements for the validation of the methodology

Exposure map for low-frequency magnetic fields from high-voltage power lines

Abstract

The feasibility and pilot study “Exposure map for low-frequency magnetic fields from high-voltage power lines” has shown in 2010/2011 with what methodology the annual average of the exposure to magnetic fields from large high-voltage power lines can be calculated from the technical and operational data and what work effort this implies. The calculation model based on this methodology inevitably uses some simplifying assumptions. This concerns e.g., temperature-induced variations of the line sag, the neglect of currents induced in the shield wires or deviations from ideal-symmetrically loaded phases.

The methodology derived in the feasibility and pilot study was validated with a sample survey of measurements. These measurements were carried out at two different measurement sites under two different high-voltage power lines. In order to capture the daily and seasonal variations, each measurement was taken continually during 48 hours and the measurements were carried out six times at each site, at intervals of approximately two months, from January to December 2015. During each measurement, a lateral profile of the magnetic flux density was determined in the middle of a span from nine measurement points in the range of ± 80 m.

The technical data of both lines as well as the load flow data during the measurement periods were provided by the grid operators (Swissgrid and BKW). From these data, a temporal average of the absolute value of the magnetic flux density was calculated using the model for each measurement period and each measurement point, and these values were then compared to the measured temporal averages.

The comparison of calculated and measured temporal averages of the magnetic flux density showed a very good agreement, and the deviations were of the order that had been predicted in the pilot study.

Messungen zur Validierung der Methodik

Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsfreileitungen

Zusammenfassung

Mit der Machbarkeits- und Pilotstudie „Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsleitungen“ wurde 2010/2011 aufgezeigt, mit welcher Methodik der Jahresmittelwert für die Magnetfeldexposition in der Umgebung von grossen Hochspannungsfreileitungen anhand der baulichen und betrieblichen Daten berechnet werden kann und welcher Aufwand dazu erforderlich ist. Das auf dieser Methodik basierende Rechenmodell weist zwangsläufig gewisse vereinfachende Annahmen auf. Dies sind zum Beispiel temperaturbedingte Schwankungen des Leiterdurchhangs, die Vernachlässigung der im Erdseil induzierten Ströme oder Abweichungen von ideal symmetrisch belasteten Phasen.

Die in der Machbarkeits- und Pilotstudie beschriebene Methodik wurde anhand von stichprobenweise durchgeführten Messungen validiert. Dafür wurden Messungen an zwei verschiedenen Messorten unter zwei verschiedenen Hochspannungsleitungen durchgeführt. Um die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen zu erfassen, wurde bei jeder Messung während 48 Stunden kontinuierlich gemessen und die Messung an beiden Messorten je sechsmal im Abstand von je ca. zwei Monaten zwischen Januar und Dezember 2015 durchgeführt. Bei jeder Messung wurde in der Mitte einer Spannweite ein Querprofil der magnetischen Flussdichte an neun Messpunkten im Bereich von ± 80 m gemessen.

Die technischen Daten der beiden Leitungen und die Lastflussdaten während der Messperioden wurden von den Netzbetreibern (Swissgrid und BKW) zur Verfügung gestellt. Daraus wurde mit dem Rechenmodell ein zeitlicher Mittelwert des Betrags der magnetischen Flussdichte für jede Messperiode und jeden Messpunkt berechnet und mit dem dort gemessenen zeitlichen Mittelwert verglichen.

Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Mittelwerten der magnetischen Flussdichte ergab eine sehr gute Übereinstimmung und auch die Abweichungen waren von der Grösse wie in der Pilotstudie vorausgesagt.

Mesurages pour la validation de la méthode

Cadastre des immissions pour les champs magnétiques basse fréquence des lignes à haute tension

Résumé

Avec l'étude de faisabilité et l'étude pilote « Cadastre des immissions pour les champs magnétiques basse fréquence produits par des lignes à haute tension », on a démontré en 2010/2011 quelle méthode permet de calculer la moyenne annuelle de l'exposition au champ magnétique dans le voisinage des grandes lignes aériennes à haute tension au moyen des données de construction et d'exploitation et quel travail cela implique. Le modèle de calcul basé sur cette méthode présente forcément certaines simplifications. Ces simplifications concernent par exemple les variations de la flèche des conducteurs dues au changement de leur température, la non-prise en compte des courants induits dans le conducteur de terre ou les déviations par rapport à la symétrie idéale de la charge dans les phases.

La méthode décrite dans l'étude de faisabilité et l'étude pilote a été validée par des mesurages. Ces mesurages ont été effectués en deux endroits différents sous deux lignes à haute tension aériennes distinctes. Pour prendre en compte les variations journalières et saisonnières, les mesurages ont été effectués en continu pendant 48 heures, six fois dans l'année à un intervalle d'environ deux mois, entre janvier et décembre 2015. Lors de chaque mesurage, on a mesuré au milieu de la portée un profil transversal de la densité de flux magnétique à l'aide de neuf points de mesure dans une zone de ± 80 m.

Les données techniques des deux lignes et les données des flux de charge pendant les périodes de mesurages ont été mises à disposition par les exploitants des réseaux (Swissgrid et BKW). Ces données ont été utilisées pour calculer la moyenne temporelle de la valeur absolue de la densité de flux magnétique pour chaque période de mesurage et chaque point de mesure au moyen du modèle de calcul. On a ensuite comparé le résultat à la moyenne temporelle mesurée.

La comparaison des moyennes de la densité de flux magnétique calculées avec les moyennes mesurées a démontré une très bonne équivalence et les déviations étaient de la grandeur prédite par l'étude pilote.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Dieser Bericht behandelt die Modellierung und Messung der Immissionen von niederfrequenten Magnetfeldern von Hochspannungsfreileitungen. Niederfrequente Magnetfelder werden unter anderem von elektrischen Apparaten und Leitungen der Stromversorgung erzeugt. Starke magnetische Felder können im menschlichen Körper Ströme induzieren, und bei sehr hohen Feldstärken können diese zu Fehlfunktionen von Muskel- und Nervenzellen führen. Diese akuten Wirkungen von starken Feldern sind wissenschaftlich gut erforscht und unbestritten, sie bilden die Grundlage der schweizerischen und internationalen Immissionsgrenzwerte bezüglich solcher Felder. Die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte bietet Gewähr, dass solche akute Auswirkungen im Alltag nicht auftreten können.

Im Gegensatz dazu gibt es aber nur wenig klare und unbestrittene Aussagen über mögliche Gesundheitsfolgen einer lang andauernden Exposition mit schwachen Magnetfeldern unterhalb der geltenden Immissionsgrenzwerte. Es ist unklar, inwiefern und unter welchen Umständen diese schwachen Felder eine Gesundheitsgefährdung darstellen könnten. Epidemiologische Studien haben gezeigt, dass niederfrequente Magnetfelder von mehr als $0.4 \mu\text{T}$ möglicherweise zu einem erhöhten Risiko für Leukämie bei Kindern führen, und die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) der WHO hat niederfrequente Magnetfelder deshalb als „*möglicherweise für den Menschen Krebs erregend*“ eingestuft.

In einer Studie von Huss et al. 2008 wurde ein Zusammenhang zwischen Alzheimer-Erkrankungen und dem Abstand der Wohnung der erkrankten Person von Höchstspannungsleitungen festgestellt. Eine Hypothese ist, dass das von den Leitungen erzeugte Magnetfeld für diesen Zusammenhang ursächlich verantwortlich sein könnte. Um dieser Hypothese weiter nachzugehen, ist die Kenntnis der magnetischen Flussdichte am Aufenthaltsort der Patienten Voraussetzung. Eine solche Expositionsabschätzung fehlt derzeit.

In einem Pilotprojekt *Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsfreileitungen – Machbarkeits- und Pilotstudie* wurde deshalb 2010/2011 untersucht, wie sich solche Magnetfelder modellieren lassen.

1.2 Pilotprojekt

Im Sinne einer Machbarkeitsstudie wurde im *Pilotprojekt Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsfreileitungen* abgeklärt, welche technischen und betrieblichen Parameter der Leitungen für eine Abschätzung der im Langzeitmittel tatsächlich vorhandenen magnetischen Flussdichte notwendig sind, und wo und mit welchem Aufwand diese Daten beschafft werden können. Die Machbarkeit der Datenbeschaffung und Expositionsabschätzung wurde exemplarisch anhand eines ausgewählten Teilstücks einer Leitung geprüft. Dieses ausgewählte Teilstück war ein Abschnitt der 220 kV-Leitung Mühleberg-Bickigen der BKW. Ziel der Expositionsberechnung war dabei die Bestimmung der im Langzeitmittel tatsächlich vorhandenen Immissionen von niederfrequenten Magnetfeldern. Die Ergebnisse sollten auch als Grundlage für das sich beim BAFU in Vorbereitung befindende NIS-Monitoring dienen. Der Bericht über das Pilotprojekt kann von der Homepage des BAFU heruntergeladen werden [Bürgi, 2011].

1.3 Ziel des Projekts

Ziel des Projekts war, die in der Machbarkeits- und Pilotstudie entwickelte Methodik anhand von stichprobenweise durchgeführten Messungen zu validieren. Dazu sollten an zwei Messorten unter zwei verschiedenen Freileitungen des Übertragungsnetzes Messungen durchgeführt werden. Um die jahres- und tageszeitlichen Schwankungen der Lastflüsse und des Magnetfeldes zu erfassen, sollte bei jeder Messung während mindestens 48 Stunden gemes-

sen, und die Messungen an beiden Messorten je sechs Mal, im Abstand von jeweils etwa zwei Monaten, durchgeführt werden.

Das Projekt sollte Modell und Messung im realen Betrieb vergleichen. Nicht Ziel des Projekts war hingegen eine Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte gemäss NISV, dafür gilt eine andere Messmethodik.

1.4 Projektteam

Das Projekt wurde von ARIAS gemeinsam mit dem Schweizerischen Tropen- und Public Health Institut (Swiss TPH) durchgeführt.

Die beteiligten Personen waren

von ARIAS:

- Alfred Bürgi, Dr. Phil.-nat, Physiker

von Swiss TPH

- Martin Röösl, Prof. Dr., Umweltepidemiologe, Leiter der Abteilung Umwelt und Gesundheit am Swiss TPH.
- Sanjay Gupta Sagar, MSc in Public Health (Missouri State University, USA) Doktorand am Swiss TPH.
- Benjamin Struchen, MSc in Umweltnaturwissenschaften (ETH), Doktorand am Swiss TPH.

Die Rollenverteilung im Projektteam war die folgende:

- Alfred Bürgi (ABü) war zuständig für die Bereiche Projektleitung, Planung, Modellierung, Auswertung und Berichterstellung.
- Sanjay Gupta Sagar (SGS) war zuständig für die Suche nach Messstandorten, die Durchführung der Messungen, die Datenaufbereitung und Mithilfe bei der Auswertung.
- Benjamin Struchen (BS) war aufgrund seiner Erfahrung mit den EMDEX Messgeräten zuständig für die Unterstützung der Messung und Wissenstransfer in der Anfangsperiode und hat die Suche nach Messstandorten unterstützt.
- Martin Röösl (MR) war wissenschaftlicher Betreuer der beiden Doktoranden.

2 Magnetfeldmessungen

2.1 Messorte

2.1.1 Kriterien

Die Kriterien für die Auswahl der Messorte waren die folgenden:

- Ein Messort unter einer 220-kV oder 380-kV-Freileitung, deren Leitungsstränge möglichst unabhängig voneinander betrieben werden.
- Ein (Feld-)Weg möglichst rechtwinklig zur Leitungsachse, möglichst in der Mitte zwischen zwei Masten.
- Der Weg muss zugänglich sein, sollte aber nur von wenig Passanten begangen werden, um Störungen der Messung zu vermeiden und die Sicherheit der während zwei Tagen unbeaufsichtigten Messgeräte nicht zu kompromittieren.
- Der erste Messort soll an der im Pilotprojekt betrachteten Leitung Mühleberg-Bickigen / Mühleberg-Lindenholz liegen.
- Der zweite Messort soll ebenfalls in der Region Bern liegen, damit die Distanzen für den Transport der Messausrüstung nicht zu gross sind.

In einer ersten Phase wurden mögliche Messorte an verschiedenen Leitungen, gemäss den oben definierten Kriterien auf der Karte gesucht. Anschliessend wurden sie vor Ort inspiziert und schliesslich wurden unter den geeigneten Kandidaten zwei Messorte ausgewählt. Die Auswahl war einfacher für die Leitung Mühleberg-Bickigen/Lindenholz, weil sie über weite Strecken durch flaches Landwirtschaftsland führt. Für die anderen Leitungen in der Region Bern war die Auswahl etwas schwieriger, weil sie oft durch stärker gegliedertes, oft hügeliges Gelände führen.

2.1.2 Erster Messort: Iffwil

Der erste Messort liegt an der 220-kV-Leitung Mühleberg-Bickigen bei Iffwil (nordwestlich von Jegenstorf, ca. 13 km Nord-Nord-Ost von Bern). Die Leitung hat zwei 220-kV-Leitungsstränge, von Mühleberg-Ost (MUO) nach Bickigen (BIK) und Lindenholz (LIN). Während dem Pilotprojekt war die Leitung noch im Besitz der Bernischen Kraftwerke (BKW), seit 2013 gehört sie, wie das ganze 380-kV/220-kV-Übertragungsnetz, der Netzbetreiberin Swissgrid.

Gemessen wird auf einem Feldweg, der fast genau in der Mitte zwischen den Masten 58 und 59 ungefähr rechtwinklig zur Leitungsachse verläuft. Die Messpunkte liegen ca. 50 cm neben dem Rand des Feldwegs, in Abständen von

0 m, ± 10 m, ± 20 m, ± 40 m, ± 80 m

von der Leitungsachse. Der Messpunkt 4 bei +40 m wurde nachträglich verschoben zu +35 m, weil er zu nahe bei einem Schachtdeckel aus Eisen lag. Der Messpunkt 5 liegt etwas ausserhalb der Achse der anderen Punkte, weil dort der Feldweg eine Kurve macht.

Die Lage der Messpunkte ist in Abbildung 1 gezeigt. Die Leitungsachse hat Azimut 41.9° (von Nord), der Feldweg hat Azimut 126.5° . Der exakte Winkel dazwischen beträgt also 84.6° .

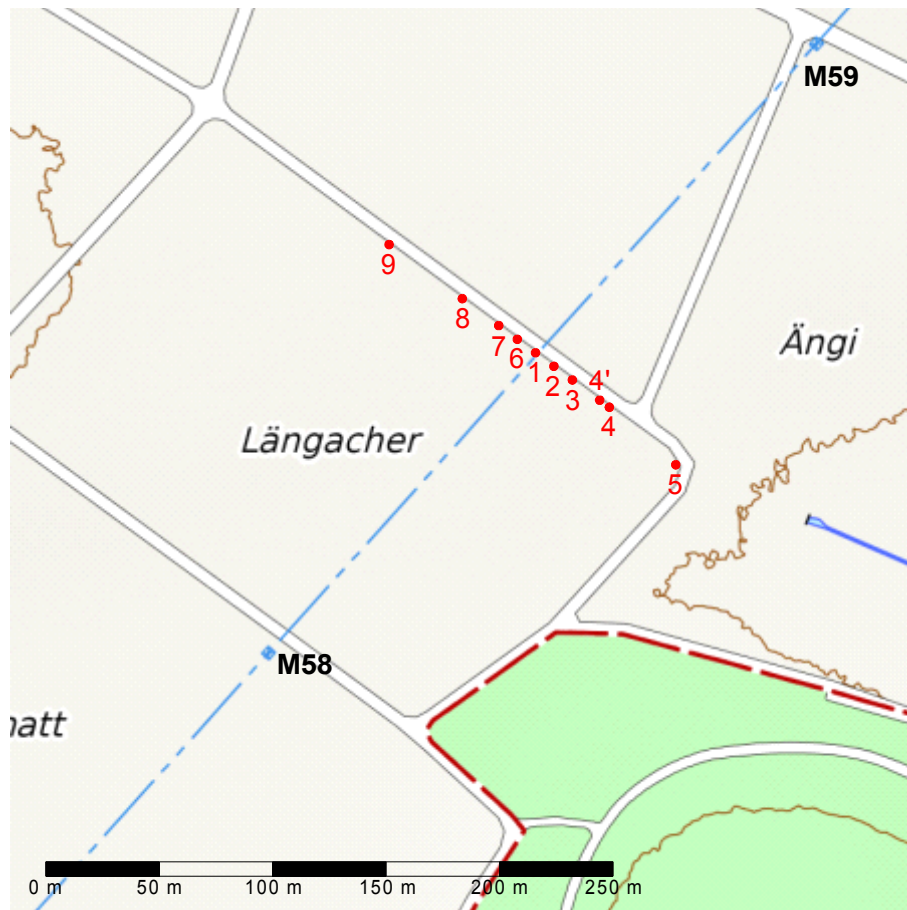


Abbildung 1: Rote Punkte: Lage der Messpunkte für die Messung in Iffwil; blaue strichpunktierte Linie: Leitungssachse (die rote gestrichelte Linie ist eine Gemeindegrenze). Eingezeichnet sind auch die beiden Masten M58 und M59. Hintergrundkarte Daten AV, © Swisstopo

Die nächste weitere elektrische Leitung (Niederspannung) führt entlang der Strasse, gegenüber Mast 59, in ca. 190 m Entfernung.

Unter und neben dem Feldweg liegen mehrere Wasserleitungen, darunter der Dorfbach, eine Drainageleitung, Abwasser- und Frischwasserleitungen. Dorfbach, Drainage und Abwasser sind in Betonrohren, Frischwasser in Kunststoffrohren. Alle diese Leitungen verlaufen mehr oder weniger rechtwinklig zur Leitungssachse. Der Dorfbach tritt ca. 50 m südöstlich der Messstrecke wieder ins Freie (Abbildungen 1 und 2).

Eine Gasleitung (Gasleitung Mittelland) quert die Hochspannungsleitung bei Mast 56, in ca. 900 m Entfernung vom Messort.

Auf dem direkt anschliessenden Feld im Südosten der Messstrecke war Raps angebaut, welcher im Juli geerntet wurde, anschliessend wurde dort Weizen angesät. Auf der anderen Seite des Feldwegs war eine Graswiese. Diese wurde gemäht, nicht beweidet, es waren also keine Viehzäune in der Nähe der Messgeräte.



Abbildung 2: Austritt des Dorfbachs und der Drainageleitung aus der unterirdischen Leitung in Iffwil. Im Hintergrund rechts der Feldweg mit der Messstrecke.

2.1.3 Zweiter Messort: Wiler bei Seedorf

Es wurden mehrere Messorte an verschiedenen Leitungen in Betracht gezogen:

- In Wangen an der Aare (380-kV-Leitung Bickigen-Bassecourt/Laufenburg).
- In Bundtels bei Düringen (220-kV-Leitung Mühleberg-Hauterive).
- Bei Frieswil (220/132kV-Leitung Mühleberg-Pieterlen).
- In Wiler bei Seedorf (220/132kV-Leitung Mühleberg-Pieterlen).

Der Standort Bundtels musste verworfen werden, weil dort auch noch eine 150-kV-Kabelleitung im Boden ist, der Standort Frieswil, weil er bei Schnee nicht zugänglich war (die Standortsuche erfolgte Ende Januar). Auch bei Wangen wäre der Zugang bei Schnee schwierig gewesen, verworfen wurde er aber vor allem, weil dort nach Auskunft der Bäuerin, die das angrenzende Land bebaut, relativ viele Fussgänger verkehren (beliebter Hundespazierweg). Eine weitere Leitung (Bickigen-Chippis, Gemmileitung) verläuft ebenfalls durch die Region Bern, wurde aber nicht betrachtet, weil ihre beiden 220-kV-Stränge parallel betrieben werden.

Die Wahl fiel schliesslich auf Wiler bei Seedorf.

Der Messort Wiler bei Seedorf liegt unter der 220-kV/132-kV-Leitung Mühleberg-Pieterlen/Kappelen (MUO-PIE/MUO-KAP), südöstlich von Aarberg, ca. 15 km nordwestlich von Bern.

Der offensichtliche Vorteil ist, dass dort sehr wenig Personen verkehren. Ein Nachteil ist, dass die beiden Leitungsstränge verschiedene Betreiber haben (220 kV: Swissgrid, 132 kV: BKW), was die Datenbeschaffung etwas aufwändiger machte. Der Messort liegt zwischen den Masten Nr. 25 und 26.

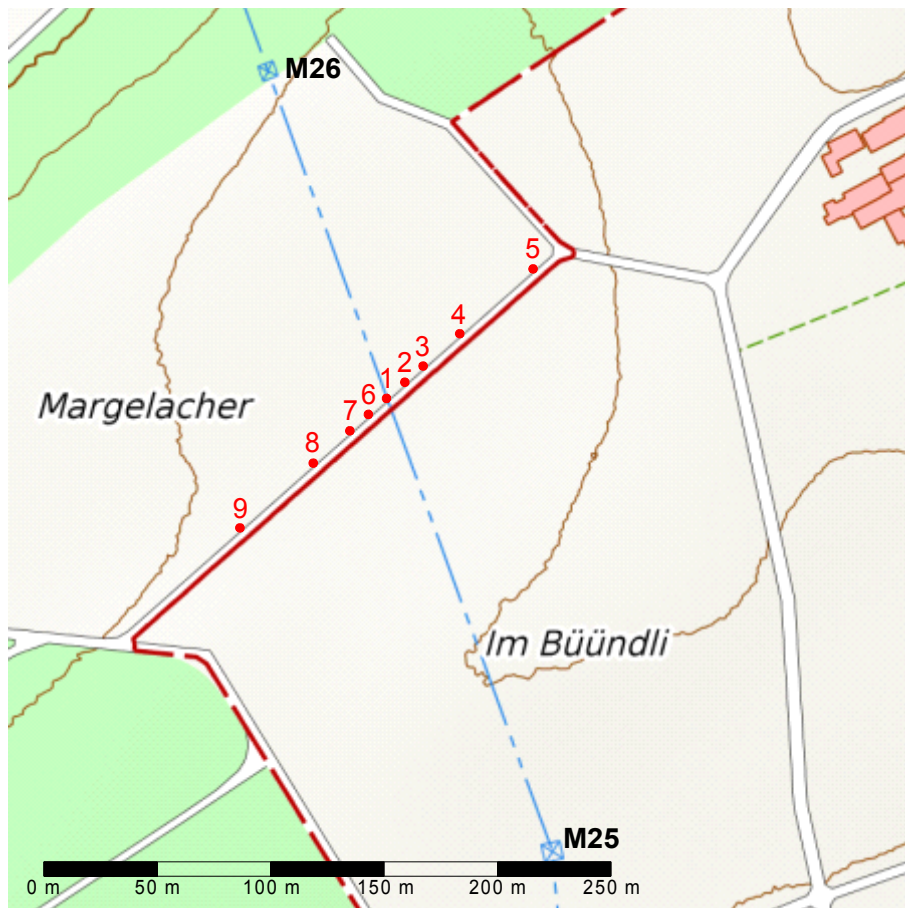


Abbildung 3: Rote Punkte: Lage der Messpunkte für die Messung in Wiler bei Seedorf; blaue strichpunktierte Linie: Leitungsachse (die rote gestrichelte Linie ist eine Gemeindegrenze). Eingezeichnet sind auch die beiden Masten M25 und M26. Hintergrundkarte Daten AV, © Swisstopo

Abbildung 3 zeigt die Lage der Messpunkte am Messort Wiler. In der Nähe der Messpunkte gibt es keine weiteren elektrischen Leitungen und keine Wasserleitungen. Auf dem Mast 26 befindet sich eine Mobilfunkanlage, die Leitungen zu dieser führen aber entlang dem Waldrand nach Osten, also in genügendem Abstand von den Messpunkten.

Der Mast 26 steht am Waldrand und ist deshalb relativ hoch (46.2 m zum untersten Ausleger). Entsprechend hoch ist deshalb auch die Leitung über dem Weg (ca. 18 m, im Vergleich zu ca. 12 m in Iffwil), der kleinste Bodenabstand liegt südlich der Messstrecke, zwischen dem Messort und dem niedrigeren Mast 25. Die Leitungsachse hat Azimut 340° , der Feldweg ca. 48.5° , er verläuft also in einem Winkel von 68.5° zur Leitungsachse.

In Wiler ist das Gelände deutlich mehr geformt als im fast ebenen Iffwil, der Einfluss der Dimension Höhe ist in Wiler ausgeprägter.

Die Geometrie der Masten der Leitung entspricht einer 2 x 380-kV-Leitung. Isoliert sind die Leitungen für 380 kV (Strang MUO-PIE) bzw. 220 kV (Strang MUO-KAP), betrieben werden sie als Viererbündel mit 220 kV (MUO-PIE) und als Zweierbündel mit 132 kV (MUO-KAP).

In Abbildung 3 sieht man auch den Verlauf der Gemeindegrenze Seedorf/Aarberg. Die Messstrecke auf der Nordwestseite des Feldwegs befindet sich eigentlich schon auf dem Boden von Aarberg. Weil aber die Zufahrt von Wiler bei Seedorf her erfolgt und alle umliegenden Häuser in Wiler liegen, wird in diesem Bericht durchgehend die Bezeichnung „Messort Wiler“ verwendet.

Auf der Nordwestseite der Messstrecke befand sich während des ganzen Jahres eine Graswiese. Diese wurde gemäht, nicht beweidet. Auf der anderen Seite des Feldwegs wurden Zuckerrüben angebaut.

2.2 Messinstrumente

Folgende Magnetfeld-Messgeräte standen für die Messungen zur Verfügung:

- 9 Emdex II
- 2 Estec DL-MW 10s
- 2 Estec EMLog 2e

Für die Messung wurden 7 Emdex II (an den Punkten 1 – 4 und 6 – 8) eingesetzt. Die höher empfindlichen EMLog befanden sich an den am weitesten entfernten Punkten 5 und 9. Am Punkt 1 kam zusätzlich ein DL-MW 10s zum Einsatz, und das zweite DL-MW 10s wurde für Spotmessungen verwendet.

Die Messgeräte wurden vom BAFU zur Verfügung gestellt.

Die Messgeräte sind im Folgenden nach ihrem Typ und Messpunkt bezeichnet als

- Emdex 1 bis Emdex 4, Emdex 6 bis Emdex 8
- Estec 1, Estec 5, Estec 9.

Die charakteristischen Eigenschaften der Messinstrumente sind in Anhang A beschrieben.

Die Emdex wurden mit einer Zeitauflösung von 15 s betrieben, die Estec mit der fest vorgegebenen Auflösung von 1 s. Die Emdex Geräte registrieren sowohl ein *Breitbandsignal* (BB , $f=40..800$ Hz) als auch den Beitrag der *Harmonischen* (H , $f=100..800$ Hz). Die Effektivwerte der Raumkomponenten ($i=x, y, z$) der Grund- oder Fundamentalfrequenz (F , $f=50$ Hz) und der Harmonischen addieren sich quadratisch zum Breitbandsignal,

$$B_{BB,i}^2 = B_{F,i}^2 + B_{H,i}^2 \quad (1)$$

Entsprechend verwenden wir für die Komponenten die Werte

$$B_i^2 = \begin{cases} B_{BB,i}^2 - B_{H,i}^2 & , \quad B_{BB,i} \geq B_{H,i} \\ 0 & , \quad B_{BB,i} < B_{H,i} \end{cases} \quad (2)$$

und für den Betrag des Vektors

$$B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \quad (3)$$

Im Übertragungsnetz ist der Beitrag der Harmonischen klein, für die Messung M1 betrug er ca. 2.4 % im Vergleich zur Grundfrequenz. Entsprechend ist auch die Korrektur gemäss den Gleichungen (2) und (3) vernachlässigbar klein (ca. 0.3 ‰). Da die Korrektur jedoch im Programm für die Verdichtung der Daten ab Beginn implementiert war und keinen grossen Aufwand benötigte, wurde sie für alle Auswertungen verwendet.

Die Estec-Geräte wurden im Frequenzband 37 – 2000 Hz betrieben, die Harmonischen werden mit den ESTEC nicht separat gemessen.

2.3 Messanordnung und Temperaturkontrolle

Sowohl die Emdex- als auch die ESTEC -Messgeräte sind nur für den Betrieb bei positiven Temperaturen spezifiziert. Die Messgeräte wurden deshalb in thermisch gut isolierten Kisten aus EPS (expandiertes Polystyrol) gepackt und mit einem Wärmepuffer (PX05 der Firma Rubitherm) vor Kälte geschützt. Das *Phase-Change-Material* (PCM) von PX05 besteht aus einem Gemisch von Paraffin und Wasser, mit einem Phasenübergang fest-flüssig bei 5°C. Das PCM ist in einer Matrix aus Siliziumdioxid eingebettet, diese bildet ein kristallines weisses Pulver. Es hat eine latente Wärme von nur etwa einem Drittel derjenigen von Wasser, aber den Vorteil, dass keine Flüssigkeit austreten kann. PX05 ist nicht-leitend und nicht-magnetisch. Das PX05 wurde in herkömmliche verschliessbare Tiefkühlbeutel abgefüllt (1 Liter, ca. 650 g pro Beutel, 5 Beutel pro Kiste). Die EPS-Kisten hatten ein Innenvolumen von 12 Liter.

Die Messkisten wurden zusätzlich mit einem Plastiküberzug vor Niederschlag geschützt; und sie wurden mit Kunststoffheringen und Gummizügen (ohne metallene Haken) am Boden fixiert.

An zwei Messpunkten (2 und 3) befinden sich in der Kiste ausserdem Temperaturlogger, ein weiterer zeichnet die Aussentemperatur bei der Kiste 2 auf. Es wurden zwei Temperaturlogger der Firma Rotronic vom Typ TL-1D und einer vom Typ HL-1D (registriert zusätzlich die Luftfeuchtigkeit) verwendet. Um zu prüfen, ob die Temperaturlogger einen Einfluss auf die Magnetfeldmessung haben, wurde am TPH ein Test durchgeführt, bei dem die Emdex-Geräte mehrmals ohne und dann mit einem direkt darauf gelegten Temperaturlogger während längerer Zeit betrieben wurden. Es konnte keine Beeinflussung der Magnetfeldmessung durch den Temperaturlogger festgestellt werden.

Zum Schutz vor Feuchtigkeit enthielten die Kisten je einige Gramm Silikagel.

Die Emdex-Messgeräte wurden mit ihrer Längsachse orthogonal zur Leitungsachse ausgerichtet (Abbildung 5). Bei den Estec-Geräten war die Längsachse parallel zur Leitungsachse. Für beide Gerätetypen war auf diese Weise die X-Achse parallel zur Leitungsachse.

Weil die Geräte in einem „Sandwich“ zwischen Beuteln mit PX05 gelagert wurden, war die Ausrichtung der z-Achse allerdings nicht immer vertikal, vor allem für die schmalen Emdex-Geräte. Zudem standen die Kisten kaum je wirklich waagrecht, zum einen weil der Boden am Wegrand zum Weg hin geneigt war und zum anderen, weil er auch nicht wirklich eben war. Die Unebenheiten durch Grasbüschel, Schnee und Löcher im Boden betrugen ca. ± 10 cm.



Abbildung 4: Fixieren der Messkiste am Boden

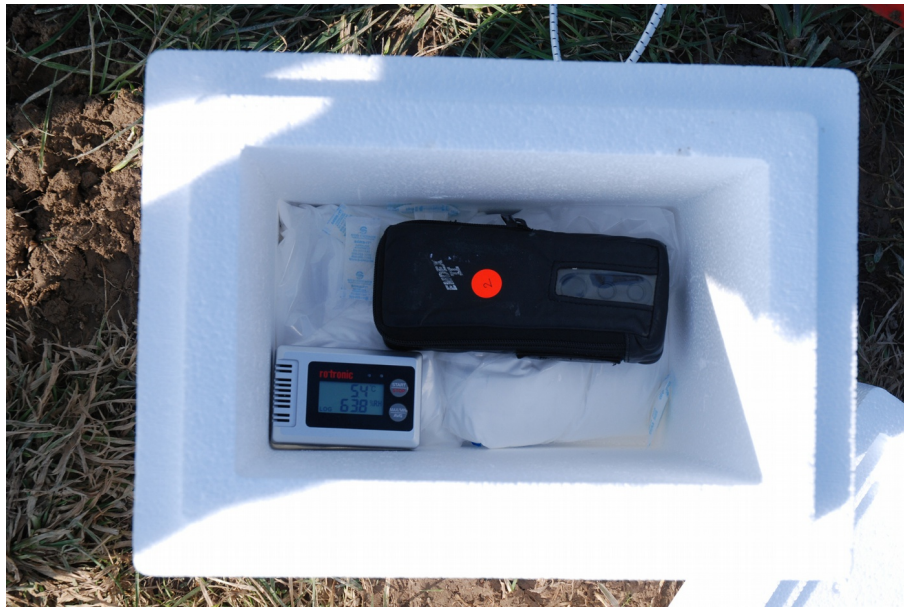


Abbildung 5: Geöffnete EPS-Messkiste mit Emdex II (im schwarzen Lederetui mit dem roten Punkt) und Temperaturlogger (links unten). Darunter die (grossen) Beutel mit PX05 und (kleine) Beutel mit Silicagel. Das ganze wird noch zugedeckt mit weiteren Beuteln von PX05 und dem Deckel der Kiste.

Die für die Auswertung der Messungen verwendete Grösse war der Betrag der magnetischen Flussdichte, diese Grösse ist unabhängig von der Ausrichtung der Achsen. Für die Messung befanden sich die Messgeräte ca. 10 cm über Boden (Wandstärke der EPS-Kiste plus eine Lage PX05). Für Immissionsmessungen ist normalerweise eine Höhe von 1 m über Boden empfohlen [BAFU, 2007; Zaffanella, 2005, Abschnitt 7.6.2). Da der Einfluss des Erdbodens auf das Magnetfeld vernachlässigbar klein ist, ist die Höhe von 10 cm für die Validierungsmessung besser geeignet, weil für eine stabile Positionierung der Messkisten auf 1 m Höhe ein viel grösserer Aufwand nötig gewesen wäre.

2.3.1 Kältetest

Ursprünglich war vorgesehen, das Verhalten der Messgeräte bei Minustemperaturen in einer Kältekammer am Physikalischen Institut der Universität Bern zu testen. Auf diesen Test wurde aber schliesslich verzichtet, und die dafür vorgesehenen Ressourcen wurden eingesetzt, um die Messgeräte mit isolierten Kisten und PX05 vor kalten Temperaturen zu schützen.

Um den Schutz vor kalten Temperaturen zu prüfen, wurde ein einfacher Test in einem Tiefkühler am Swiss TPH durchgeführt. Eine Messkiste wurde, in der bei der Messung verwendeten Konfiguration mit 5 Einliter-Paketen PX05 und einem Temperaturlogger, aber ohne Messgerät, für 48 Stunden in den Tiefkühler gesteckt und der Temperaturverlauf aufgezeichnet. Der Tiefkühler war auf eine Temperatur von -20°C eingestellt.

Der Temperaturverlauf ist in in Abbildung 6 dargestellt. Der Effekt des PX05 ist gut sichtbar, die Temperatur wird über lange Zeit zwischen etwa 7°C und 3°C fast stabilisiert. Danach fällt sie dann aber schnell weiter ab und liegt nach 48 h bei ca. -17°C . Wenn der Phasenübergang einmal stattgefunden hat, ist die Wärmepufferung nicht mehr wirksam. Im Test blieb die Innentemperatur in der Kiste wähen etwa 32 Stunden über Null Grad. Für länger andauernde sehr tiefe Temperaturen müsste demnach die thermische Isolation der Messgeräte noch verbessert werden. Allerdings sind Temperaturen von -20°C im Mittelland sehr selten, und während der Messung traten auch keine solchen Extreme auf.

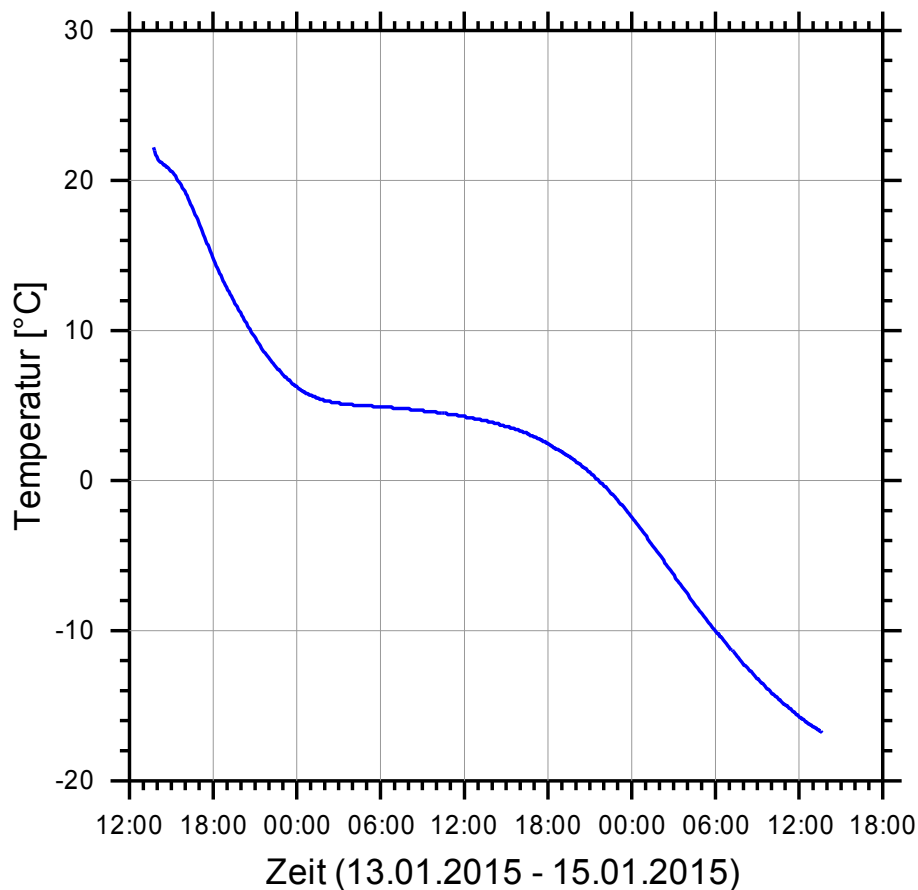


Abbildung 6: Temperaturverlauf im Kältetest am Swiss TPH.

2.4 Position der Messpunkte

Für die Positionierung der Messpunkte wurde zuerst ein Punkt P0 am Rand des Feldwegs direkt unter der Leitungsachse bestimmt. Dies geschah durch Ausrichten eines Lots am Erdseil. Der Messpunkt P1 liegt dann nominell 50 cm in Richtung der Leitungsachse vom Wegrand und von P0 weg verschoben. Ein Marker (Holzpflock) wurde jeweils 30 cm vom Wegrand entfernt in den Boden gesetzt, die Messkisten wurden dann ca. 10 cm von diesem Marker entfernt positioniert. Die Mitte der Kiste ist also ca. 50 cm vom Wegrand entfernt. In analoger Weise wurden die Punkte A und B unter den untersten Leiterseilen durch Ausrichten mit dem Lot bestimmt. Die Korrektheit dieser Methode hängt allerdings davon ab, dass die Leiterseile nicht durch Wind seitlich ausgelenkt sind. Während der ersten Messungen war dies an beiden Messorten der Fall, wie sich auch durch Winddaten von nahegelegenen Stationen von MeteoSchweiz bestätigen liess.

Ein alternatives Verfahren für die Bestimmung der Position unter einem Leiterseil ist die visuelle Ausrichtung des Leiterseils an einem Hängeisolator (Abbildung 7, links). Dies funktioniert dort, wo mehrere Masten in gerader Linie stehen und dann, wenn die Seile nicht durch Seitenwind ausgelenkt sind. Ein Vergleich mit Fotos von verschiedenen Positionen (Abbildung 7) zeigte, dass diese Methode auf ca. ± 10 cm genau ist.

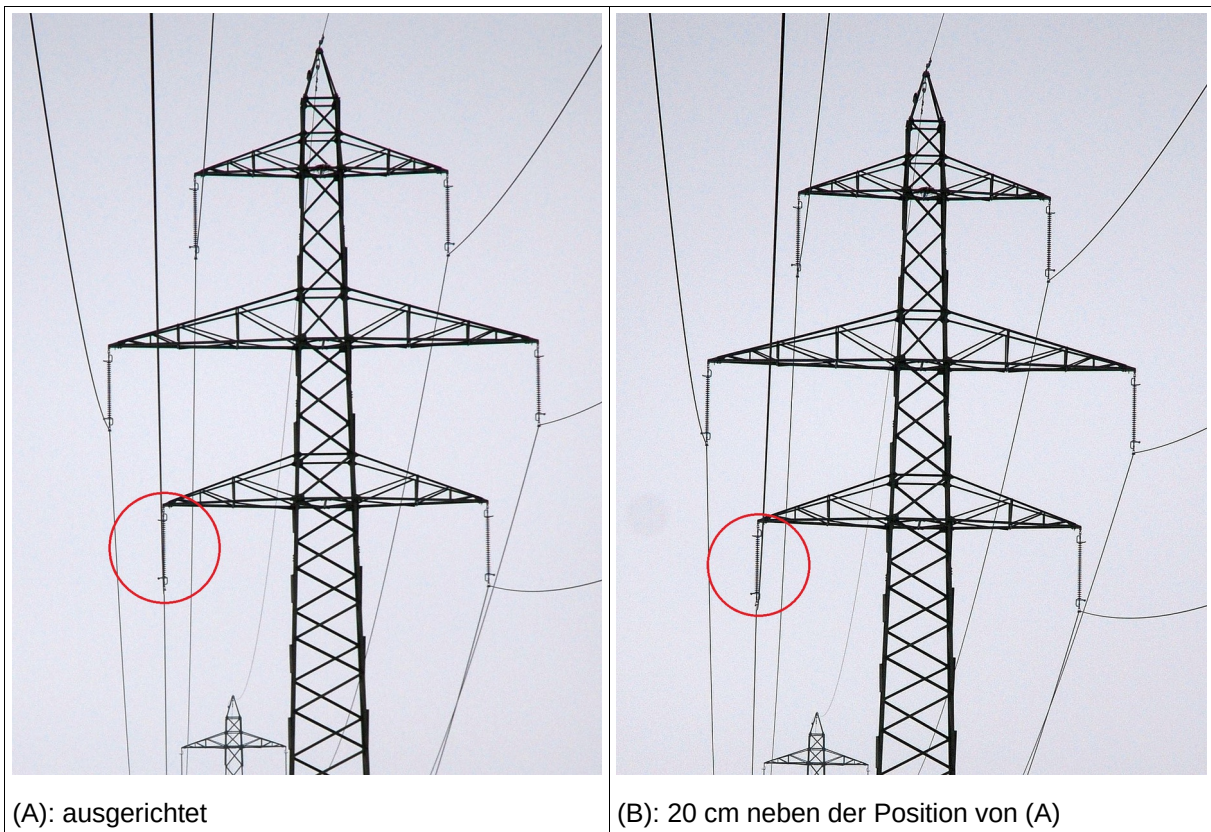


Abbildung 7: Visuelle Ausrichtung des untersten linken Leiterseils am Hängeisolator, Mast M58 in Iffwil. Links: Gut ausgerichtet, von der Position direkt unter dem Leiterseil (Marker A). Rechts: Position zwanzig cm weiter entfernt von der Leitungsachse als Marker A. Der Unterschied ist bereits deutlich sichtbar.

Die Genauigkeit der Methode (ca. ± 10 cm) konnte ausserdem durch die Messung des aus dem Mastbild bekannten Abstandes der untersten Leiterseile der beiden Stränge verifiziert werden.



Für die Bestimmung der Leitungsachse konnte in Iffwil auch noch eine bessere Methode verwendet werden, da dort die Masten mehrerer Spannweiten in gerader Linie stehen. Mit dieser exakteren Methode konnte die Position der Leitungsachse noch um ca. 10 cm verbessert werden.

Die Position der übrigen Messpunkte wurde dann mit einem Laser-Distanzmesser DISTO D510 bestimmt. Ein Laserziel mit Fadenkreuz wurde in P0 positioniert. Mit dem D510 wurden dann die weiteren Messpunkte P2 bis P9 bestimmt. Die Positionen der Messpunkte 30 cm vom Wegrand wurden jeweils mit einem Marker (kleiner Holzpflöck) bestimmt, damit sie bei späteren Messungen nicht jedesmal neu bestimmt werden mussten (Abbildung 9).

Abbildung 8: Bestimmen der Leitungsachse in Iffwil aus Masten in gerader Linie.



Abbildung 9: Messkiste am Wegrand in Wiler, davor ein roter Marker zum Wiederauffinden des Messpunkts.

In Wiler wurden zuerst die Punkte A und B unter den untersten Leiterseilen durch visuelles Ausrichten der Leiterseile an den Hängeisolatoren von Mast M26 bestimmt, anschliessend die Leitungsachse in der Mitte zwischen A und B. Die Methode mit dem visuellen Ausrichten mehrerer Masten war in Wiler nicht möglich, da der südliche Mast M25 ein Abspannmast mit einem Knick in der Leitungsrichtung ist, und nach Norden nur der einzige Mast M26, welcher auf einer Krete am Waldrand steht, sichtbar ist.



Abbildung 10: Masten M25 (links) und M26 (rechts) in Wiler. Aufnahmestandort ist der Feldweg, bei dem die Messung stattfand.

Während der Vegetationsperiode im Frühjahr war das Gras auf dem Streifen zwischen Feldweg und Feld zeitweilig sehr hoch, und die Marker waren zum Teil nur durch Neu-Ausmessen mit dem Laser-Distanzmesser wieder aufzufinden. In Iffwil wurden die Punkte deshalb zusätzlich mit Zaunstecken markiert (Abbildung 11). Damit waren die Marker dann wieder einfach aufzufinden. Die Zaunstecken waren aus Plastik, hatten aber eine eiserne Spitze von ca. 15 cm Länge und 4 mm Durchmesser. Eine einfache Abschätzung nach [Kaden, 2006] für Wirbelströme in Drähten ergab, dass bereits bei Distanzen ab 12.5 cm das Störfeld auf kleiner als 0.1 % des äusseren Feldes abgefallen ist. Im Prinzip bieten also bereits die EPS-Kisten genügend Störabstand, wenn der Aufnehmer des Messgerätes in der Mitte der Kiste platziert ist. Zur Sicherheit wurden die Zaunstecken während der Messung um 1 bis 2 m von den Kisten entfernt. In Wiler wurden zusätzliche, doppelte Marker näher am Wegrand gesetzt.



Abbildung 11: Hohes Gras während der Messung M5 Ende Mai in Iffwil. Die weissen Zaunstecken wurden als zusätzliche Markierungen der Messpunkte zwischen den Messperioden gesetzt.



Abbildung 12: Verlauf des Feldwegs in Iffwil (links) und Wiler (rechts).

In Iffwil ist der Weg befestigt, verläuft gradlinig und der Wegrand ist gut definiert (Abbildung 12, links). Die Messgeräte lassen sich deshalb gut in einer geraden Linie aufstellen (mit Ausnahme von Punkt 5, wo der Weg eine Kurve macht). In Wiler hingegen ist der Weg ein wirklicher Feldweg. Er verläuft nicht exakt gradlinig und der Wegrand ist nicht scharf definiert (Abbildung 12, rechts). Die Messkisten, die nicht zu nahe am Weg, aber auch nicht im landwirtschaftlich genutzten Feld stehen dürfen, stehen deshalb nicht in gerader Linie, sondern sind seitlich etwas davon versetzt. Für die Messung hat dies aber kaum Konsequenzen: Die Verschiebung aus der geraden Linie ist annähernd parallel zur Leitungsachse und in dieser Richtung sind die Gradienten der Magnetfeldes viel kleiner als rechtwinklig dazu (vgl. die Abbildungen 25 und 26 und auf Seite 43f). Weil der grasbewachsene Boden uneben ist und der Wegrand meist zum Weg hin geneigt, standen die Messkisten auch nicht exakt waagrecht, sondern meistens etwas geneigt. Auf die Bestimmung des Betrags der magnetischen Flussdichte hat dies keinen Einfluss. Hingegen sind die Achsenrichtungen der Messgeräte und damit die Vektorkomponenten des Magnetfeldes nicht genau definiert. Diese waren aber auch nicht Ziel der Messung.

Die numerischen Koordinaten der Messpunkte wurden durch Georeferenzierung des Punktes unter der Leitungsachse auf einer grossmassstäblichen Karte, der Richtung des Weges und den bekannten Abständen der Messpunkte bestimmt. Die Höhen der Messpunkte ebenso wie die der Fusspunkte der Masten wurden in einem ersten Schritt aus dem numerischen Höhenmodell DHM25 interpoliert und später für höhere Genauigkeit auch noch mit dem DHM5. Während das Höhenmodell DHM25 gemäss Swisstopo eine Ungenauigkeit von ca. 1.5 m aufweist, wird diese auch für das genauere DHM5 und DHM2 mit immer noch ± 0.5 m (bezüglich aller drei Koordinaten x , y , z) angegeben. Auch mit dem DHM5 sind also noch Ungenauigkeiten in den interpolierten Höhen von dieser Grössenordnung zu erwarten. Die Genauigkeit der horizontalen Koordinaten in der Positionierung der Messgeräte beträgt ca. ± 10 bis ± 20 cm in der Richtung orthogonal zur Leitungsachse und bis etwa ± 40 cm parallel dazu.

2.5 Höhe der Leiterseile

Bei jeder Messung wurden zu Beginn und am Ende die Höhen der untersten Leiterseile über Boden für beide Leitungsstränge mit einem Laser-Distanzmesser DISTO D510 bestimmt. Im Prinzip könnte man mit dem Laser die Leiterseile direkt anvisieren und die Distanz so messen. Dies funktioniert aber nur unter den günstigsten Bedingungen und ist in den meisten Fällen nicht möglich. Der D510 verfügt aber neben dem eigentlichen Laser-Distanzmesser auch über eine Kamera mit Zoom und optischem Display, wie auch über einen Neigungsmesser. Er wurde auf einem Stativ und Adapter montiert, mit dem sich die Winkel exakt einstellen lassen.

Es wurde deshalb folgendes Verfahren verwendet (vgl. Abbildung 13):

Eine Laser-Zieltafel (Abbildung 14) mit einem Fadenkreuz wurde direkt unter dem untersten Leiter auf einem Stativ positioniert (je im Punkt A und B). Von einem entfernten Punkt wurden Distanz d und Elevationswinkel α zur Zieltafel gemessen. Anschliessend wurde das unterste Leiterseil mit dem Laser optisch anvisiert und die Elevation β gemessen. Aus diesen Werten wurde dann die Höhe h trigonometrisch berechnet (automatisch durch den D510). Die Messung wurde von beiden Seiten durchgeführt (und für beide Leitungsstränge).

Wenn die Zieltafel nicht genau unter dem Leiter positioniert ist, sondern in einem seitlichen Abstand δ_x (wie in Abbildung 13 für den Punkt A), so ergeben die Messungen von beiden Seiten unterschiedliche Resultate h_1 und h_2 . Dies ist unter anderem dann der Fall, wenn der Punkt A (oder B) falsch bestimmt wurde, aber auch, wenn der Leiter durch Wind seitlich ausgelenkt ist, was ja oft der Fall ist. In diesem Fall lässt sich die Höhe h wie auch die Auslenkung δ_x aus zwei Messungen trigonometrisch bestimmen, gemäss

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} - \frac{1}{2} \frac{\tan \beta_1 - \tan \beta_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2} \quad (4)$$

$$\delta_x = \frac{h_1 - h_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2} \quad (5)$$

(vgl. Anhang C) und aus einer dritten Messung auch die Genauigkeit abschätzen.

Die Höhenmessung zu Beginn wurde meist während der laufenden Messung durchgeführt und manchmal auch diejenige am Ende der Messung. Um die Messung nicht durch die Präsenz von leitendem oder magnetischem Material zu stören, bestand die Zieltafel aus Holz (Abbildung 14). Der Einfluss von Wirbelströmen in den Stäben der Stative (aus Aluminium) wurde theoretisch abgeschätzt. Sogar unter der Annahme von massiven Alustäben (was nicht zutrifft) ist der Einfluss der Wirbelströme auf das Magnetfeld ab ca. 30 cm Distanz vernachlässigbar. Es wurde deshalb darauf geachtet, dass während der laufenden Messung die Alu-Stativ immer mindestens 1 bis 2 m von den Messgeräten entfernt blieben.

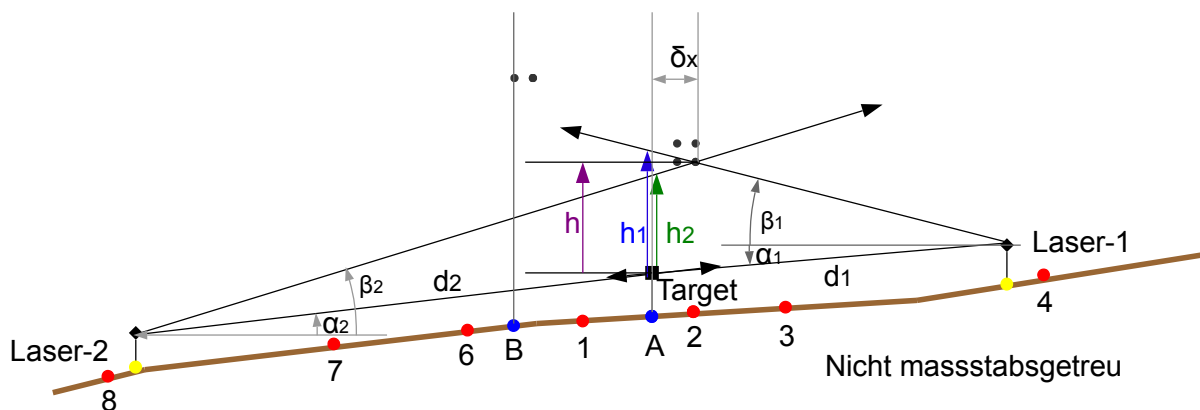


Abbildung 13: Schema zur Messung der Höhe der untersten Leiterseile. Blaue Punkte markieren die Zieltafel unter dem untersten Leiterseil. Bei A ist diese etwas seitlich versetzt angenommen. Gelbe Punkte markieren die Positionen, von denen aus mit dem Laser gemessen wird (Laser-1 und Laser-2). Rote Punkte sind die Messpunkte für die Magnetfeldmessung (am Beispiel von Wiler). Der Punkt 1 liegt auf der Leitungsachse.

2.6 Durchführung der Messung

Für das Messverfahren wurde eine detaillierte Messanleitung erstellt und daraus eine Checkliste für die Vorbereitung, Durchführung und Protokollierung der Messung und das Herunterladen der Daten.

Jeweils am Vortag vor der Messung erfolgte meist eine kurze Inspektion am Messort, anschliessend wurden die Messgeräte und Messboxen vorbereitet. Am Tag des Beginns der Messung wurde alles Material zum Messort transportiert, die Messboxen aufgestellt und die Messgeräte in Betrieb gesetzt. Als Startzeit der Messdaten galt der Zeitpunkt, wo alle Messgeräte liefen und das Auto genügend weit weggestellt war. Nach dem Ende der Messung der Höhe der Leiterseile wurde der Messort verlassen. Die Messgeräte blieben während ca. 48 h sich selbst überlassen.

Nach zwei Tagen wurde der Messort wieder aufgesucht. Das Auto musste solange in genügender Distanz bleiben, bis seit der Startzeit mindestens 48 h vergangen waren. Anschliessend wurde die Aufzeichnung der Messgeräte gestoppt, alles Material verladen und zurück nach Bern transportiert, wo die Daten der Messgeräte auf einen PC transferiert wurden.



Abbildung 14: Links die anvisierte Laser-Zieltafel, rechts das Anvisieren des Leiterseils mit dem DISTO D510.

2.7 Auswertung

In einem ersten Schritt wurden aus den Daten diejenigen für die 48-Stunden Messperiode ausgewählt. In einem nächsten Schritt wurden diese auf eine Auflösung von 5 Minuten verdichtet (von 1 s auf den ESTEC und 15 s auf den Emdex Geräten). Im gleichen Schritt erfolgte auch die Umrechnung der Messzeit der ESTEC-Geräte aus einem internen Format auf MEZ/MESZ. Diese Verdichtung erfolgte mit einer speziell dafür programmierten eigenen Software. Die weitere Auswertung und Mittelwertbildung über Messperioden erfolgte dann im Wesentlichen mit MS Excel.

3 Rechenmodell

3.1 Berechnung von Magnetfeldern

Magnetfelder entstehen durch bewegte Ladungen. Überall, wo elektrischer Strom fliesst, entsteht deshalb auch ein Magnetfeld. Mathematisch-physikalisch lässt sich ein Magnetfeld darstellen durch ein Vektorpotenzial $\vec{A}$, die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ ist dann gegeben durch den Differentialoperator der „Rotation“

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

(„B ist die Rotation von A“). Das Vektorpotenzial in einem Punkt P_1 lässt sich berechnen aus einem Integral [Feynman, Leighton, Sands, 1964]

$$\vec{A}(P_1) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{j}(P_2)}{r_{12}} dV_2 \quad (7)$$

$\vec{j}(P_2)$ ist die Stromdichte in einem Punkt P_2 , r_{12} ist der Abstand zwischen den Punkten P_1 und P_2 , und $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$ ist die magnetische Feldkonstante. Integriert wird über den ganzen Raum. Die Gleichung (7) gilt für statische und niederfrequente Felder. Rotation und Integration sind lineare Operatoren, und aus den beiden Gleichungen lässt sich eine einfache Beziehung herauslesen: Das Vektorpotenzial und damit auch $\vec{B}$ ist proportional zum erzeugenden Strom und indirekt proportional zum Abstand vom Ort, wo ein Strom fliesst.

Mit den Gleichungen (6) und (7) lässt sich die magnetische Flussdichte in jedem Punkt berechnen, wenn die Ströme bekannt sind. Neben der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ (auch: magnetische Induktion) verwendet man ebenfalls die magnetische Feldstärke $\vec{H}$:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (8)$$

Die Einheit von $\vec{B}$ ist Tesla (T, $1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$), die Einheit von $\vec{H}$ ist das Ampere/Meter (A/m). In Luft ist $\mu = \mu_0$.

Das Integral in Gleichung (7) kann für verschiedene einfache Konfigurationen analytisch gelöst werden. Im Modell wird eine solche Lösung für endlich lange, gerade Leiterstücke verwendet. Die durchhängenden Leiterseile werden dann durch eine Anzahl von geraden Leiterstücken approximiert und die entsprechenden Beiträge zum Magnetfeld aufsummiert. Das Berechnungsverfahren ist im Detail im Bericht zum Pilotprojekt [Bürgi, 2011] beschrieben.

Die Ströme sind Wechselstromgrössen mit Betrag und Phase, für die Berechnung verwendet man zweckmässigerweise komplexe Zahlen. Das Magnetfeld ist ein dreidimensionaler Vektor, dessen Komponenten ebenfalls durch Betrag und Phase gegeben sind, zweckmässigerweise wird es durch komplexwertige Vektoren dargestellt.

3.1.1 Eingabedaten

Die notwendigen Eingabedaten sind ebenfalls im Bericht zum Pilotprojekt [Bürgi 2011] beschrieben. Es sind dies

1. Die Position der Masten in x, y, z.
2. Die Anordnung der Leiter auf den Masten, gegeben durch das Mastbild, die Höhe der Ausleger über Grund und die Länge der Hängeisolatoren.
3. Das Phasenschema der Leitung.
4. Der Durchhang der Leiterseile.
5. Die Ströme der einzelnen Stromkreise, abgeleitet aus den Lastflussdaten.

Die dafür notwendigen Daten wurden von Swissgrid für die Leitung MUO-BIK/MUO-LIN am Messort Iffwil und für den 220-kV-Strang MUO-PIE am Messort Wiler zur Verfügung gestellt.

Für den 132-kV-Strang MUP-KAP in Wiler wurden die Lastflussdaten von den Bernischen Kraftwerken (BKW) zur Verfügung gestellt.

Für die Leitung MUO-BIK/MUO-LIN wurden die gleichen 31 km modelliert wie im Pilotprojekt, für die Leitung MUO-PIE/MUO-KAP wurden lediglich sechs Spannweiten (Mast 23 bis 28) im Modell verwendet.

Die geometrischen Daten (Punkte 1. bis 3. der obigen Tabellen) müssen einmal ins Modell eingegeben werden, anders als die Ströme, welche zeitlich variabel sind. Die von Swissgrid und BKW erhaltenen Lastflussdaten waren Tabellen mit Zeit t (5 min bzw. 15 min Mittelwerte), Spannung U (in kV), Wirkleistung P (in MW) und Blindleistung Q (in MVar), je für beide Enden jeder Leitung.

Unter Annahme eines symmetrischen Stromsystems (Ströme auf allen Leitern eines Dreiphasen-Stromkreises betragsmässig gleich und um exakt 120° phasenverschoben) lassen sich aus U, P, Q die Stromstärken für Wirkstrom I_w und Blindstrom I_B berechnen:

$$I_w = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{P}{U} \quad (9)$$

(Wirkstrom) und

$$I_B = -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{Q}{U} \quad (10)$$

(Blindstrom). Der Scheinstrom I_s ist dann

$$I_s = \sqrt{I_w^2 + I_B^2} \quad (11)$$

Gemäss der gängigen Konvention haben Blindleistung und Blindstrom gerade umgekehrtes Vorzeichen.

Für die Modellierung wurden jeweils Mittelwerte aus den Werten an beiden Enden der Leitung gebildet.

Für den Vergleich mit der Messung wurden für die erste Messung 5-Minuten-Mittelwerte der Lastflussdaten verwendet. Diese waren insofern problematisch, als die Messzeiten nicht ganz regelmässig verteilt waren: Verschiedentlich enthielten die Daten weitere Messzeiten zwischen den 5-min-Werten und im Gegenzug fehlten gewisse Zeiten. Dies machte die (manuell notwendige) Synchronisation der verschiedenen Datensätze etwas aufwendig und fehleranfällig, weshalb ab der zweiten Messung 15-min-Mittelwerte verwendet wurden, bei welchen diese Probleme nicht auftraten.

Zusätzlich zu den 15-Minuten Mittelwerten jeweils für die Tage während der Messung wurden von Swissgrid und BKW auch noch Stundenmittelwerte für das ganze Jahr 2015 zur Verfügung gestellt. Diese wurden für die Berechnung eines Jahresmittelwerts verwendet.

Bei Eingabe der Lastflüsse und Ströme ist es wichtig, dass für alle Leitungsstränge die gleichen Vorzeichenkonventionen verwendet werden. Ausserdem musste für die Daten von MUO-KAP die Zeit angepasst werden, weil Swissgrid und BKW in den Daten nicht die gleiche Konvention für den Zeitstempel verwendeten (Swissgrid: Ende des Intervalls, BKW: Anfang des Intervalls).

3.1.2 Berechnung von Zeit-Mittelwerten

Für einen einzelnen Leitungsstrang j ist die dadurch in einem Punkt P erzeugte magnetische Flussdichte proportional zum fliessenden Strom I_j :

$$\vec{B}_j(P) = I_j \vec{c}_j(P) \quad (12)$$

In dieser Beziehung bezeichnen $\vec{B}_j(P)$ und $\vec{c}_j(P)$ komplexwertige Vektoren, I_j ist ein komplexer Skalar. Den Koeffizienten $\vec{c}_j(P)$ erhält man aus einer Berechnung der magnetischen

Flussdichte für einen Strom von 1 Ampère (bzw. einer Einheit der Stromstärke). Bei zwei Leitungssträngen ($j=1,2$) ist die resultierende Flussdichte die Vektorsumme von 2 Beiträgen

$$\vec{B}(P) = \vec{B}_1(P) + \vec{B}_2(P) = I_1 \vec{c}_1(P) + I_2 \vec{c}_2(P) \quad (13)$$

Wenn $\vec{c}_1(P)$ und $\vec{c}_2(P)$ annähernd parallel (oder antiparallel) sind, addieren (oder subtrahieren) sich die Beiträge der beiden Stränge, je nach Richtung der Vektoren und Vorzeichen der Ströme, und auch bei anderer Orientierung der beiden Vektoren können sich die einzelnen Beiträge zum Magnetfeld gegenseitig verstärken oder abschwächen. Die Koeffizienten $\vec{c}_j(P)$ sind abhängig von der Geometrie und der Phasenordnung der Leiter.

Der Betrag $\|\vec{B}\|$ des Vektors $\vec{B}(P)$ ist gegeben durch die Wurzel aus dem Skalarprodukt des Vektors mit sich selber

$$\|\vec{B}\|^2 = \langle \vec{B}, \vec{B} \rangle \quad (14)$$

Das Skalarprodukt zweier (komplexer) Vektoren $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)$ und $\vec{b} = (b_x, b_y, b_z)$ ist gegeben durch

$$\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = a_x \tilde{b}_x + a_y \tilde{b}_y + a_z \tilde{b}_z \quad (15)$$

wo die Tilde „ $\sim$ “ die komplex konjugierte Zahl bedeutet. Für das Betragsquadrat von $\vec{B}$ hat man deshalb

$$B^2 = \|\vec{B}\|^2 = \langle \vec{B}, \vec{B} \rangle = B_x \tilde{B}_x + B_y \tilde{B}_y + B_z \tilde{B}_z = \|B_x\|^2 + \|B_y\|^2 + \|B_z\|^2 \quad (16)$$

3.1.3 Zeitlicher Mittelwert des Durchhangs

Die Koeffizienten $\vec{c}_j(P)$ in (12) und (13) sind nicht unabhängig von der Zeit, da sich mit der zeitlichen Änderung des Stroms und der meteorologischen Bedingungen auch die Leitertemperatur und damit der Durchhang ändert. Im Pilotprojekt wurde aber gezeigt, dass bei einer normalen Auslastung einer Leitung die Leitertemperatur meist nur wenig über der Umgebungstemperatur liegt. Im Mittel würde dann der Durchhang dem Wert bei der mittleren Jahrestemperatur (oder etwas darüber) entsprechen. Im schweizerischen Mittelland liegt das Jahresmittel der Temperatur bei ca. 9°C [MeteoSchweiz, 2016]. Im Modell wird deshalb für den Durchhang ein zeitlich konstanter Wert, nämlich der Wert für Temperatur 10°C verwendet. Damit werden der Durchhang und die Koeffizienten $\vec{c}_j(P)$ unabhängig vom Zeitintervall.

Die hier dargelegte Näherung für den Durchhang gilt aber nicht für sehr stark belastete Leitungen (Strom nahe dem thermischen Grenzstrom) und sie gilt auch nicht für Leitungen mit sogenannten Hochtemperaturseilen mit Grenztemperaturen von 150°C oder mehr. Solche Leitungen müssten allenfalls gesondert betrachtet werden.

3.1.4 Zeitlicher Mittelwert des Betrags von B

Ziel der Berechnung ist, einen zeitlichen Mittelwert für die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ zu erhalten. Im Pilotprojekt wurde dazu ein über die Zeitintervalle gemittelter Wert des Betrags

$$\bar{B} = \|\vec{B}\| = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \|\vec{B}_m\| \quad (17)$$

gebildet. Die Summe in (17) erstreckt sich über alle Zeitintervalle (Index m). Dazu werden zuerst für jeden Punkt die Koeffizienten $\vec{c}_j(P)$ bestimmt. Im Prinzip muss man dann für jedes Zeitintervall die Ströme bestimmen, daraus $\vec{B}$ für dieses Zeitintervall gemäss (13) berechnen und dann den Mittelwert über alle Zeitintervalle bilden. Das Ganze lässt sich beschleunigen, wenn man die Ströme in Gruppen (Cluster) von ähnlichen Werten (bezüglich Wirk- und Blindstrom der Leitungsstränge) gruppiert. Dies lässt sich automatisch durchführen mit einer Methode namens K-Means-Clustering, welche in das Berechnungsmodell integriert wurde.

Im Pilotprojekt wurde bei einer zweisträngigen Leitung gezeigt, dass bereits mit 16 Clustern der so berechnete Wert kaum noch von dem als Mittel über alle Stundenwerten berechneten „wahren“ Wert abweicht.

Für die Auswertung wurden ebenfalls K-Means-Cluster über die Ströme gebildet (Viertelstundenwerte während der Messperioden) und daraus Mittelwerte von B für die Messperioden berechnet. Diese wurden dann mit gemessenen Mittelwerten von $\bar{B}$ verglichen.

3.1.5 Zeitlicher RMS-Mittelwert

Die Methode mit den K-Means-Clustern ist effizient, solange nur 2 oder 3 Leitungsstränge zu betrachten sind. Für eine grössere Anzahl von Leitungssträngen benötigt man aber schnell sehr viele Cluster. Eine Alternative ist dann die Berechnung eines RMS-Mittelwerts B_{RMS} von $\vec{B}$ (RMS: *root mean square*: Wurzel aus dem Mittel der Quadrate):

$$B_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \|\vec{B}_m\|^2} . \quad (18)$$

Wie in (17) erstreckt sich die Summierung über alle Zeitintervalle.

Im Prinzip ist bei Wechselstromgrössen der RMS-Mittelwert eigentlich immer die angebrachte Methode der Mittelwertbildung, da die Effektivwerte, durch welche Wechselstromgrössen ausgedrückt werden, ebenfalls RMS-Mittelwerte sind.

Für den RMS-Mittelwert lässt sich, unter Annahme eines zeitlich konstanten Durchhangs, die Summierung über die Leitungsstränge und die Zeitintervalle separieren, die zeitliche Mittelung über die Stromstärken lässt sich durch drei Koeffizienten I_1, I_2, I_{12} ausdrücken und es ist

$$B_{\text{RMS}} = \left(c_{11} \bar{I}_1^2 + c_{22} \bar{I}_2^2 + c_{12} \bar{I}_{12} + \tilde{c}_{12} \widetilde{I}_{12} \right)^{1/2} \quad (19)$$

mit den Stromkoeffizienten

$$\bar{I}_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |I_{1,m}|^2 \quad (20)$$

$$\bar{I}_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n |I_{2,m}|^2 \quad (21)$$

$$\bar{I}_{12} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n I_{1,m} \tilde{I}_{2,m} \quad (22)$$

wo $I_{j,m}$ der Strom im Strang j während des Zeitintervalls m ist. Die Ortskoeffizienten c_{ij} sind gegeben durch die Koeffizienten $\tilde{c}_j$, ($j=1, 2$) gemäss Gleichung (12):

$$c_{11} := \|\vec{c}_1\|^2, \quad c_{22} := \|\vec{c}_2\|^2, \quad c_{12} := \langle \vec{c}_1, \vec{c}_2 \rangle \quad (23)$$

Die Herleitung für die Gleichungen (19) bis (23) befindet sich im Bericht zum Pilotprojekt. Die Berechnung der RMS-Mittelwerte lässt sich in sehr einfacher und effizienter Weise erweitern auf mehr als zwei Leitungsstränge. Für jeden zusätzliche Strang i erhält man dann die weiteren Koeffizienten c_{ii} und $\bar{I}_i^2$ und für jedes Paar von Strängen (i,j) je ein Paar von Koeffizienten c_{ij} und $\bar{I}_{ij}$.

Aus den Koeffizienten (20) bis (22) lassen sich ausserdem die Grössen

$$I_{\text{RMS},j} = \sqrt{\bar{I}_j^2} \quad (24)$$

(RMS-Mittelwerte der Ströme) und der Koeffizient

$$k' = \frac{\bar{I}_{12}}{I_{\text{RMS},1} I_{\text{RMS},2}} \quad (25)$$

bestimmen. Der Koeffizient k' ist ein komplexer Wert mit Betrag $|k'| \leq 1$. Sein Realteil entspricht dem Korrelationskoeffizienten der Lastflussrichtungen k gemäss Abschnitt 8.6.2 von [BAFU 2007], anhand dessen die Lastflussrichtungen in *gleichläufig*, *gegenläufig* und *ungekoppelt* kategorisiert werden, vgl. [Bürgi, 2010]. Allerdings unterscheiden sich $\text{Re}(k')$ und k insofern, als k' anhand der komplexen Ströme und k aus den (reellwertigen) Scheinströmen berechnet wird.

Zwischen dem RMS- und dem arithmetischen Mittelwert existiert ein einfacher Zusammenhang. Für eine beliebige Datenreihe $x_i, i=1..n$ folgt die Beziehung zwischen dem RMS-Mittelwert x_{RMS} und dem arithmetischen Mittelwert $\bar{x}$ direkt aus der Definition der Varianz:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) = \frac{n}{n-1} (x_{\text{RMS}}^2 - \bar{x}^2) \quad (26)$$

Es gilt also

$$x_{\text{RMS}}^2 = \bar{x}^2 + \frac{n-1}{n} \sigma_x^2 \quad (27)$$

Die Beziehung (27) gilt für beliebige Datenreihen x_i , unabhängig von deren Verteilungsfunktion. Es gilt ausserdem

$$\bar{x} \leq x_{\text{RMS}} \leq \sqrt{n} \bar{x} \quad (28)$$

Das linke Gleichheitszeichen in (28) gilt, wenn alle x_i gleich sind (Varianz Null), das rechte Gleichheitszeichen, wenn alle x_i bis auf eines Null sind.

3.1.6 Modellannahmen

Das Modell enthält folgende Annahmen, die sich auf die Resultate auswirken können:

1. Das Stromsystem in jedem Stromkreis wird als symmetrisch betrachtet, d.h., mit gleichen Stromstärken auf allen drei Phasen und exakt 120° Phasenverschiebung. Oberwellen werden nicht berücksichtigt.
2. Im Erdseil und Boden induzierte Ströme und induzierte asymmetrische Ströme in den Stromkreisen werden nicht berücksichtigt.
3. Temperaturbedingte Schwankungen im Leiterdurchhang werden vernachlässigt und es wird der Durchhang für Temperatur 10°C entsprechend der mittleren Umgebungstemperatur (oder für einen anderen geeigneten Wert) verwendet.

Die Ströme im Erdseil und die asymmetrischen Ströme sind von der Grössenordnung von einigen Prozent der symmetrischen Ströme [vgl. EMFs Info, Balance within circuits]. Nahe an der Leitung ist ihr Beitrag zum Magnetfeld sehr klein. Weil er aber zu grossen Distanzen hin langsamer abfällt als für die symmetrischen Ströme, ist er dort unter Umständen nicht mehr vernachlässigbar. Diese induzierten Ströme lassen sich im Prinzip aus den symmetrischen Strömen, der Geometrie der Leitung und Daten zu Material und Querschnitt der Leiterseile berechnen. Für das vorliegende einfache Modell wurde aber darauf verzichtet.

Die Annahme eines zeitlich konstanten Leiterdurchhangs führt zu Fehlern in der Berechnung des Abstands von den Leitern und somit zu Fehlern im berechneten Magnetfeld. Bei einer Erhöhung/Erniedrigung der Umgebungstemperatur um 10°C ändert der Durchhang für die in der Messung relevanten Spannweiten um ca. 35 cm (Iffwil) bzw. 30 cm (Wiler), bei Extremtemperaturen von -20°C oder +40°C ist die Höhe der Leiterseile über Grund also um ca. 1 m verschieden von der im Modell verwendeten mittleren Höhe.

Weitere Vereinfachungen, wie die Verwendung von K-Means-Clustern für die Ströme, die Verwendung einer Parabel (anstelle der Kettenlinie) für die Seilkurve und die Zerlegung der Seilkurve in gerade Teilstücke bilden ebenfalls Modellannahmen, ihr Einfluss auf die Modellresultate ist aber vernachlässigbar klein, wie im Bericht zum Pilotprojekt dargelegt.

3.2 Modell-Software

Für die Berechnungen wurde wie bereits für das Pilotprojekt eine spezielle, für niederfrequente Magnetfelder modifizierte Version der NISMap-Software verwendet (NISMap_ELF). Damit verfügt man bereits über ein Gerüst, welches die Integration von GIS-Daten in ein Berechnungsmodell für Eingabedaten (Leitungsstränge, Karten, digitales Höhenmodell) erlaubt und die Resultate auch in GIS-kompatibler Form ausgeben kann. Weil der Sourcecode der Software für die Modellierung zur Verfügung stand, war es auch einfach, die Analyse der Lastflussdaten, die Klassenbildung mit k-Means-Clustering oder RMS-Koeffizienten, die Berechnung der magnetischen Flussdichten und die Ein- und Ausgabe der Daten in einer Software flexibel zu kombinieren.

Für die Auswertung der Validierungsmessung wurde die Software so modifiziert, dass sie als Option auch RMS-Mittelwerte berechnet und die dafür notwendigen Koeffizienten (Gleichungen 19 bis 23) aus den Lastflussdaten bestimmt.

Diese Programmierung der NISMap_ELF-Software war nicht Teil des Pilotprojekts und auch nicht des vorliegenden Projekts, sondern erfolgte zum Teil schon seit 2006, beziehungsweise parallel dazu.

3.3 Modellvarianten

Es wurden insgesamt vier Modellvarianten berechnet und miteinander bzw. den Messresultaten verglichen:

- *Modell A:* Dies ist das im Pilotprojekt beschriebene Rechenmodell. Es verwendet das Digitale Terrainmodell DHM25 für die Geländehöhen. Berechnet wird der Mittelwert des Betrags der magnetischen Flussdichte $\bar{B}$ unter Verwendung von K-Means-Clustering mit $k=16$ Clustern.
- *Modell B:* Wie Modell A mit dem DHM25. Gerechnet wird aber nicht mit K-Means-Clustering, sondern es wird der RMS-Mittelwert B_{RMS} gemäss Gleichung (18) bestimmt.
- *Modell C:* Berechnet wird $\bar{B}$ mit K-Means-Clustering und $k=16$. Anders als in Modell A werden aber genauere Höhen verwendet. Für die Geländehöhen am Fusspunkt der Masten sind dies präzise Werte, welche von Swissgrid zur Verfügung gestellt wurden, alle übrigen Höhen wurden aus dem DHM5 der Swisstopo (Gitter mit Auflösung 5 m) interpoliert.
- *Modell D:* Verwendet ebenfalls die präziseren Höhendaten wie in Modell C. Berechnet wird der RMS-Mittelwert B_{RMS} wie in *Modell B*.

Jede der vier Modellvarianten wurde je für die beiden Modellgebiete Iffwil und Wiler verwendet.

Der Grund, dass neben dem Höhenmodell DHM25 auch noch das präzisere DHM5 verwendet wurde, ergab sich unter anderem daraus, dass in Wiler die gemessenen und berechneten Höhen der untersten Leiterseile schlecht übereinstimmten (gemessen ca. 19.1 m für MUO-PIE für Messung M1, mit DHM25 berechnet 17.2 m). Weil während der ersten Messperioden in Wiler die Durchhangstabellen noch nicht vorhanden waren, wurde dort anfänglich der aus der Messung bestimmte Wert für den Durchhang verwendet. Als dann später die Durchhangstabellen verfügbar waren, wurden die Auswertungen mit den „richtigen“ Werten für den Durchhang wiederholt, wodurch dann aber die Übereinstimmung von Modell und Messung schlechter wurde als mit den zuvor bestimmten Werten. Der Grund dafür lag aber nicht in einem falsch gewählten Tabellenwert, sondern in den verwendeten Höhendaten. Man braucht für die Berechnung unter anderem die Geländehöhe an beiden Mastfüssen und am Punkt unter der Leitung. Diese Werte wurden anfänglich nur aus dem digitalen Höhenmodell DHM25 (Maschenweite 25 m) bestimmt. Wie schon im Pilotprojekt (Abschnitt 4.2.2,

S.31 in [Bürgi 2011]) dargelegt, beträgt die mittlere Abweichung der Höhen im DHM25 ca. 1.5 m. Sie ist insbesondere da gross, wo das Gelände uneben ist oder Diskontinuitäten aufweist. Dies ist unter anderem der Fall beim Mast 26: südlich davon ist das Terrain leicht gewellt und nach Süden geneigt, nördlich davon fällt es ziemlich steil gegen Norden ab. Vergleicht man die aus dem DHM25 interpolierten Geländehöhen bei den beiden Masten und am Messpunkt 1 (direkt unter der Leitung) mit genaueren Werten, so erhält man folgendes (Tabelle 1):

Punkt	Höhe über Meer, gemäss		Differenz
	DHM25	Swissgrid (Masten) und DHM5	
Fusspunkt M25	524.6	523.75	0.85 m
Fusspunkt M26	516.0	518.3	-2.3 m
Messpunkt 1	524.1	523.3	0.8 m

Tabelle 1: Differenzen in der Höhenbestimmung zwischen DHM25 und genauen Werten von Swissgrid für die Masten und DHM5 für den Messpunkt 1

Daraus lässt sich abschätzen, dass die Höhe der Leiterseile über Grund mit dem DHM25 in Wiler um ca. zwei Meter unterschätzt wird, womit dann die modellierten Feldstärken unter der Leitung entsprechend überschätzt werden. Mit dem genaueren DHM5 sollte sich also die Berechnung deutlich verbessern lassen.

Neben dem DHM25 und DHM5 stand auch noch das DHM2 (Auflösung 2 m) zur Verfügung. Auf die Verwendung des DHM2 wurde aber verzichtet, weil die Differenzen der für die Messpunkte berechneten Höhen zum DHM5 klein waren (ca. ± 10 cm), jedoch mit dem DHM2 die Dateigrössen ca. sechs mal grösser sind als mit dem DHM5, was pro Kartenblatt der Landeskarte 1:25'000 Dateigrössen des DHM2 von über 400 MB ergibt.

4 Messresultate

4.1 Messperioden

Ziel war, an jedem Messort ungefähr alle zwei Monate eine Messung durchzuführen, mit insgesamt sechs Messungen pro Messort. Die Messungen in Iffwil begannen Ende Januar 2015, diejenigen in Wiler Ende Februar. Die letzte Messung erfolgte Anfang Dezember 2015 in Wiler. Die Abstände zwischen den Messungen waren nicht ganz gleichmässig verteilt, bedingt durch Terminprobleme und aus Rücksicht auf landwirtschaftliche Arbeiten (Rapsernte im Juli auf dem angrenzenden Feld in Iffwil). Die Messungen erfolgten jeweils von Dienstag bis Donnerstag, mit einer Ausnahme (Messung M4: Mittwoch bis Freitag in der Woche nach Ostern).

Die Messzeiten der zwölf Messperioden sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Messung Nr.	Messort	Beginn	Ende
M1	Iffwil	20.01.2015 13:30	22.01.2015 13:30
M2	Wiler	17.02.2015 14:00	19.02.2015 14:00
M3	Iffwil	24.03.2015 12:30	26.03.2015 12:30
M4	Wiler	08.04.2015 12:30	10.04.2015 12:30
M5	Iffwil	26.05.2015 14:00	28.05.2015 14:00
M6	Wiler	02.06.2015 14:00	04.06.2015 14:00
M7	Iffwil	07.07.2015 10:30	09.07.2015 10:30
M8	Wiler	28.07.2015 11:00	30.07.2015 11:00
M9	Iffwil	08.09.2015 12:30	10.09.2015 12:30
M10	Wiler	15.09.2015 13:00	17.09.2015 13:00
M11	Iffwil	27.10.2015 13:15	29.10.2015 13:15
M12	Wiler	08.12.2015 14:00	10.12.2015 14:00

Tabelle 2: Messperioden. „Beginn“ und „Ende“ sind die Zeiten der verwendeten 48-Stunden der Messdaten.

Beginn und Ende der Messungen waren typischerweise um die Mittagszeit, im Hochsommer wegen der Nachmittagshitze etwas früher, bei Nebel im Herbst und Winter eher etwas später.

4.2 Magnetfelder

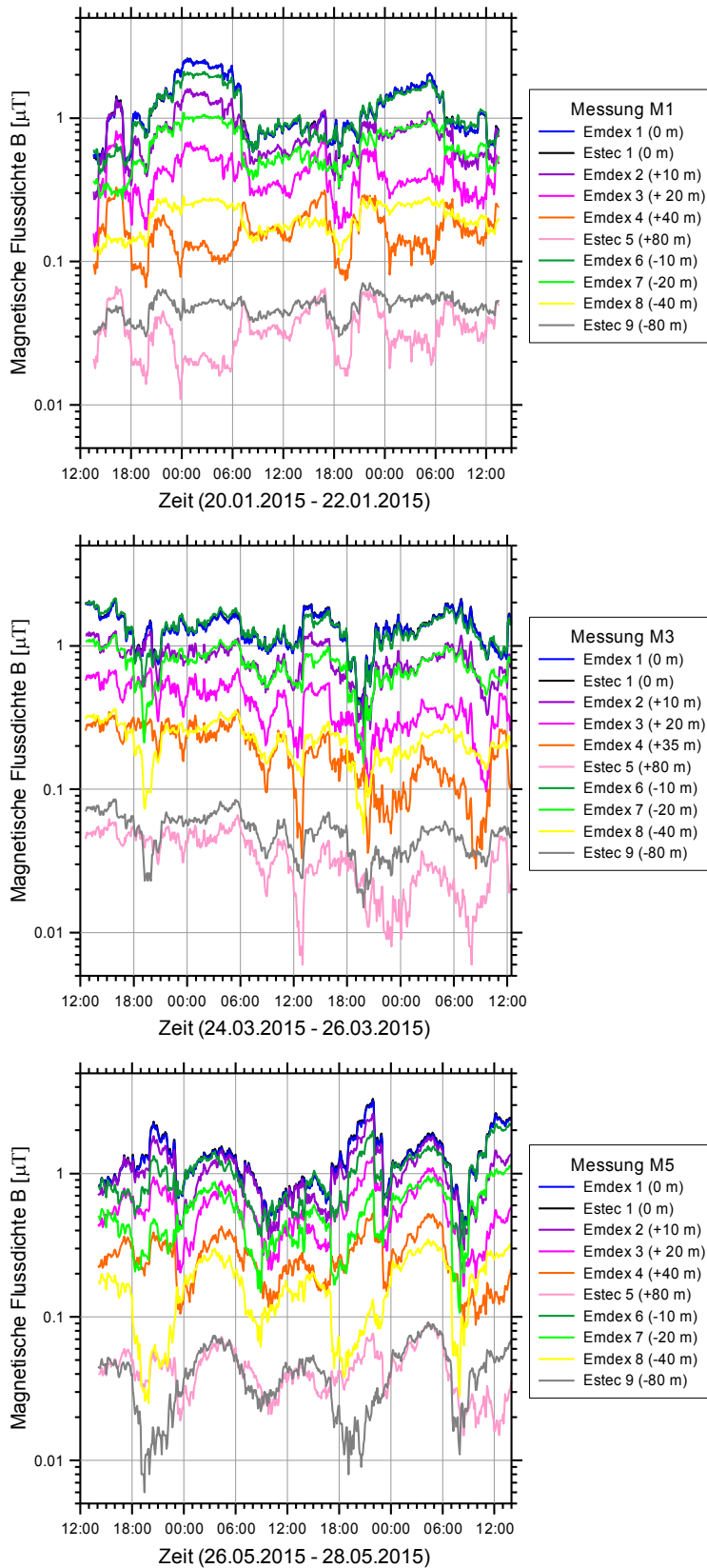


Abbildung 15: Gemessene magnetische Flussdichten während der ersten drei Messperioden in Iffwil, alle Messgeräte. Die Kurven für Emdex 1 und Estec 1 sind praktisch identisch.

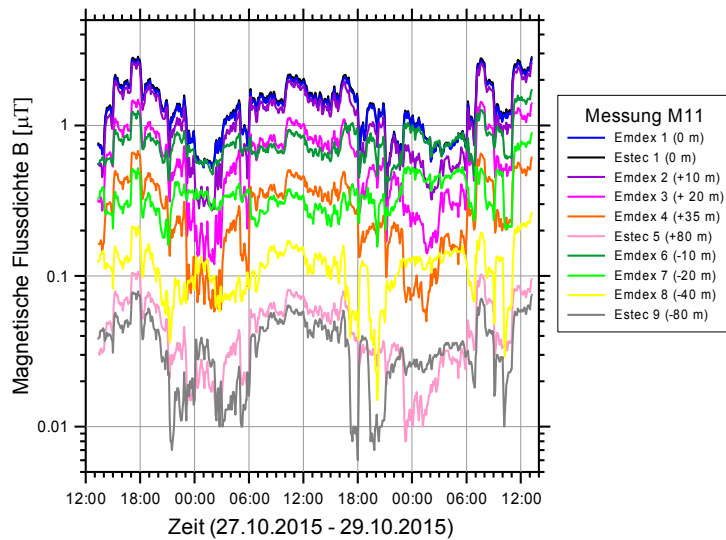
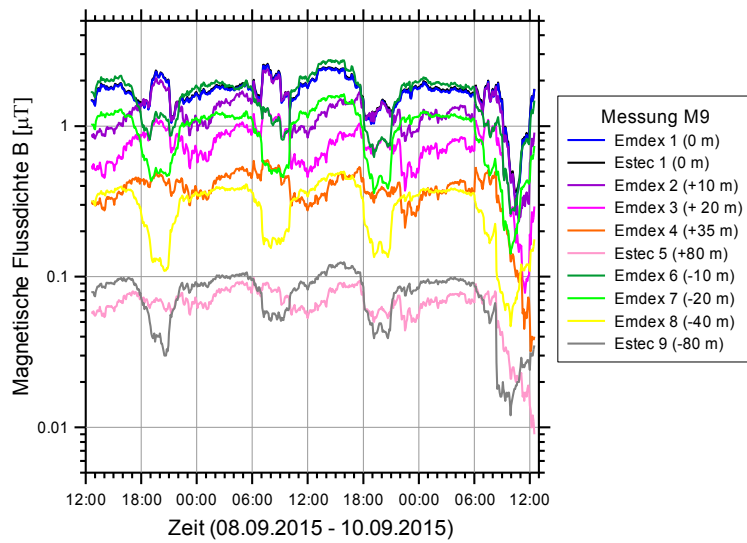
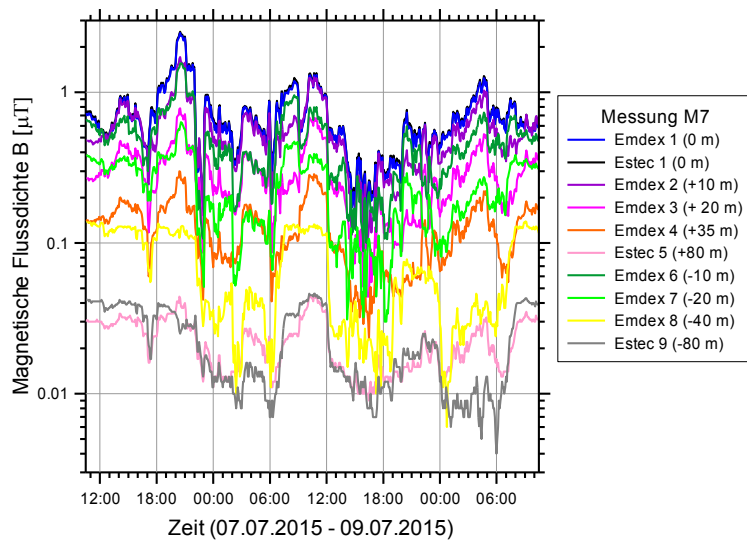


Abbildung 16: Gemessene magnetische Flussdichten während der zweiten drei Messperioden in Iffwil, alle Messgeräte. Die Kurven für Emdex 1 und Estec 1 sind praktisch identisch.

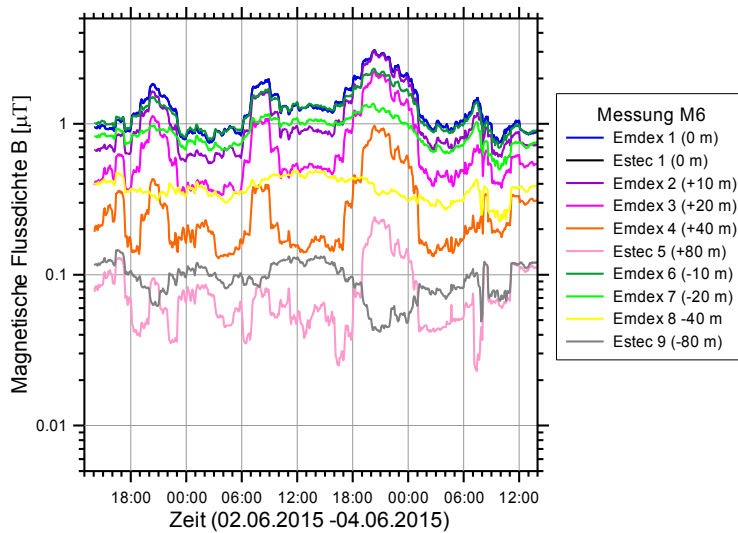
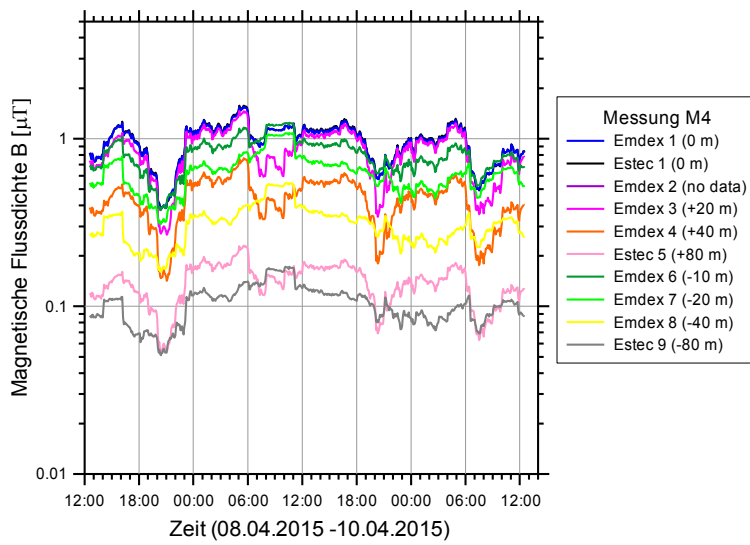
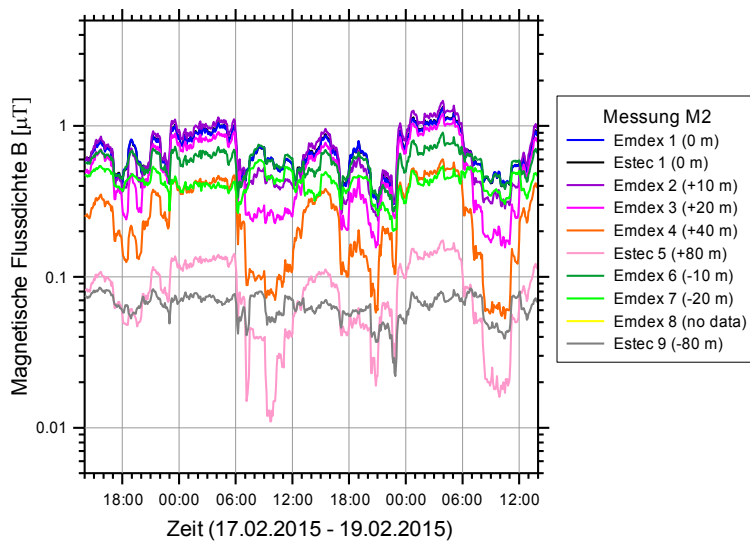


Abbildung 17: Gemessene magnetische Flussdichten während der ersten drei Messperioden in Wiler, alle Messgeräte. Die Kurven für Emdex 1 und Estec 1 sind praktisch identisch.

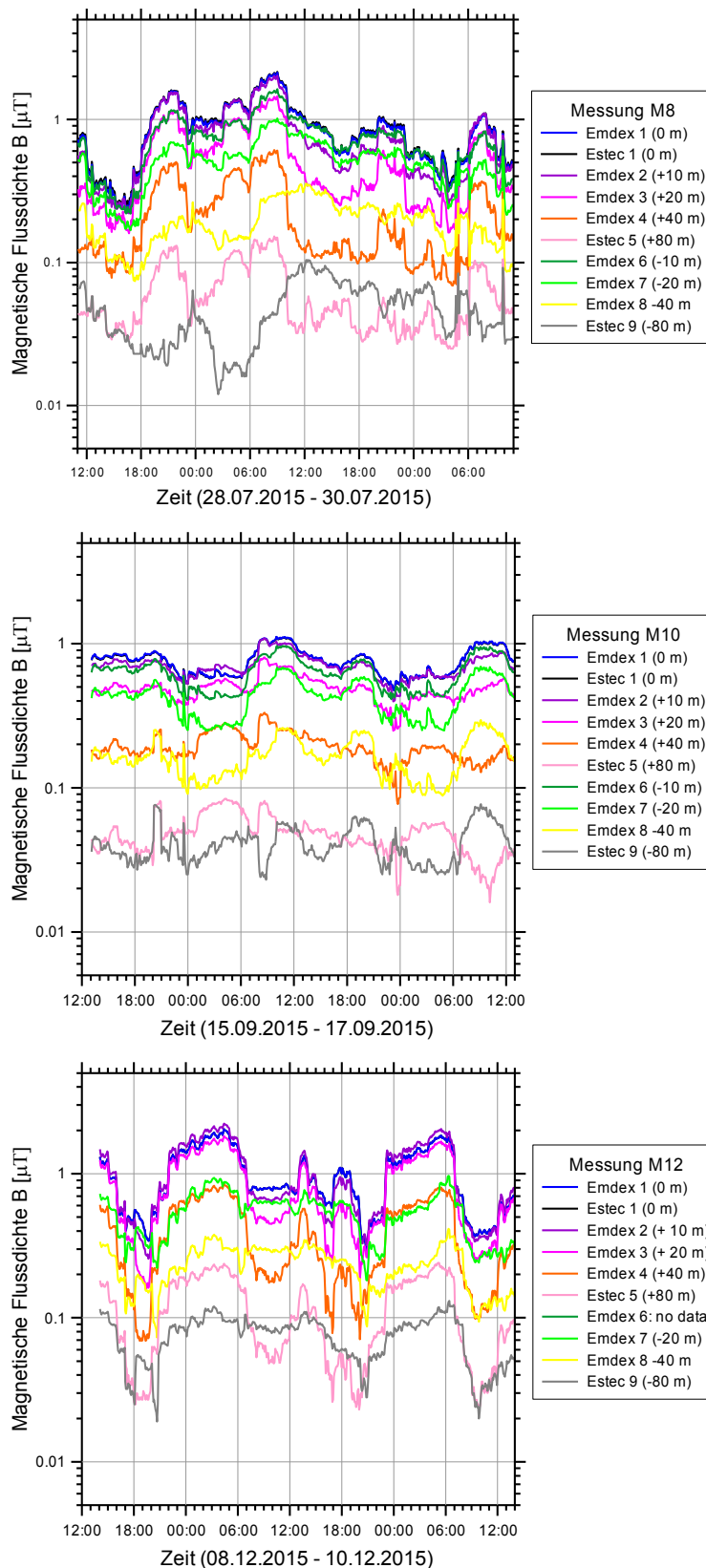


Abbildung 18: Gemessene magnetische Flussdichten während der zweiten drei Messperioden in Wiler, alle Messgeräte. Die Kurven für Emdex 1 und Estec 1 sind praktisch identisch.

Die Abbildungen 15 bis 18 zeigen den zeitlichen Verlauf der gemessenen magnetischen Flussdichten während der je sechs Messperioden in Iffwil und Wiler. Dargestellt sind auf 5-Minuten-Mittel verdichtete Messwerte. Deutlich sichtbar sind die tageszeitlich bedingten Schwankungen, aber auch der starke Unterschied zwischen Messpunkten nahe der Lei-

tungsachse und solchen fern davon. Während mehreren Messperioden sieht man auch eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Asymmetrie bezüglich der Leitungsachse.

4.2.1 Vergleich der Messresultate am Messpunkt 1

Am Messpunkt 1, dem Punkt unter der Leitungsachse, wurde mit zwei verschiedenen Messgeräten gemessen, nämlich mit je einem Emdex II (*Emdex 1*) und einem ESTEC DL-MW 10s (*Estec 1*). In den Abbildungen 15 bis 18 lassen sich die Resultate der beiden Messgeräte nicht unterscheiden, weil die jeweiligen Kurven fast perfekt übereinstimmen.

Definiert man die relative Abweichung

$$\delta = \frac{B(\text{Estec 1}) - B(\text{Emdex 1})}{\text{Mittelwert}(B(\text{Emdex 1}))}, \quad (29)$$

so erhält man

$$\bar{\delta} = \begin{cases} 0.02, & (\text{Iffwil}) \\ 0.005, & (\text{Wiler}) \end{cases} \quad (30)$$

als Mittel über die Messungen in Iffwil und Wiler. Die Standardabweichungen betragen

$$\sigma(\delta) = \begin{cases} 0.005, & (\text{Iffwil}) \\ 0.003, & (\text{Wiler}) \end{cases} \quad (31)$$

Verglichen mit der spezifizierten Genauigkeit der Messgeräte (vgl. Anhang A) von $\pm 10\%$ für das Emdex- und $\pm 3\%$ für das Estec-Messgerät ist also der gemessene Unterschied sehr klein.

4.2.2 Histogramm der magnetischen Flussdichten

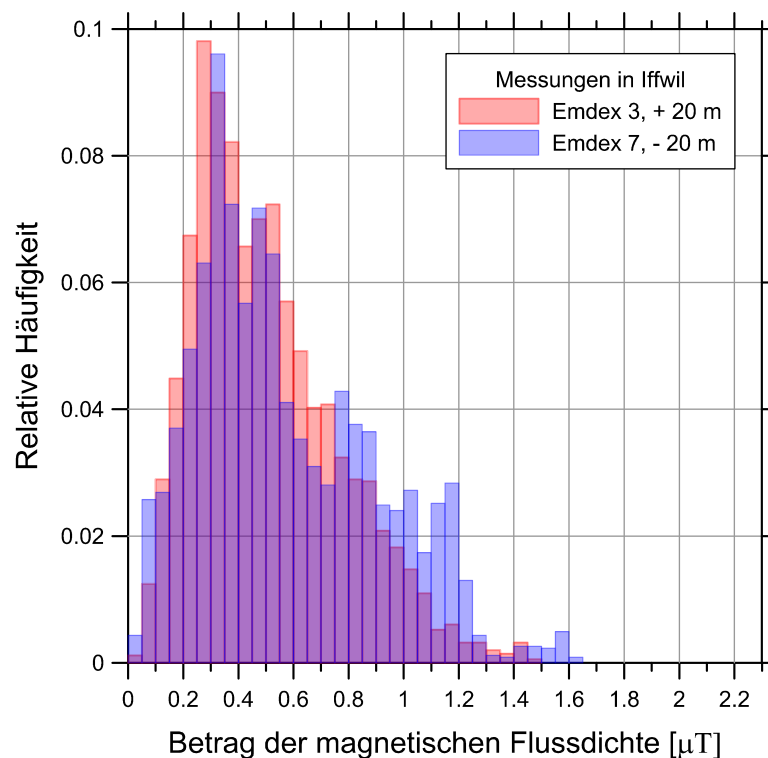


Abbildung 19: Histogramm der gemessenen magnetischen Flussdichte (5-min-Mittelwerte) für alle Messperioden in Iffwil. In rot und blau: Histogramme für die Messpunkte bei ± 20 m, im violetten Bereich überlagern sich die beiden Histogramme.

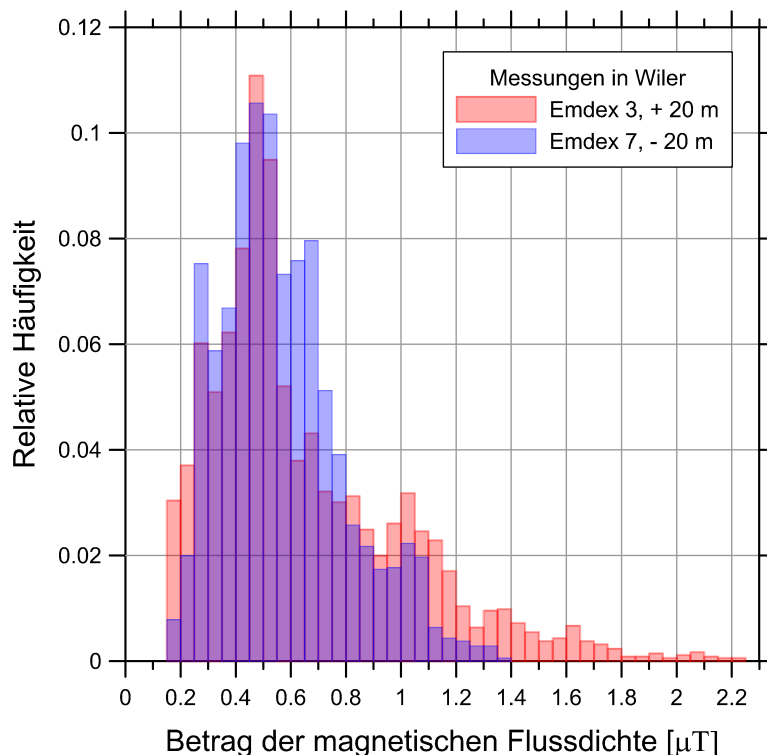


Abbildung 20: Histogramm der gemessenen magnetischen Flussdichte (5-min-Mittelwerte) für alle Messperioden in Wiler. In rot und blau: Histogramme für die Messpunkte bei ± 20 m, im violetten Bereich überlagern sich die beiden Histogramme.

Die Abbildungen 19 und 20 zeigen die Histogramme der 5-min-Mittelwerte der magnetischen Flussdichte für alle Messperioden für die Messungen in Iffwil und Wiler. Gezeichnet sind die Verteilungen für die Messpunkte bei ± 20 m. Diese Messpunkte sind nicht mehr direkt unter der Leitung, zeigen aber immer noch Magnetfelder, die in der Stärke mit den Punkten unter der Leitung vergleichbar sind. Auch gab es bei ± 20 m keine Datenverluste (anders als bei ± 10 m).

Die Verteilungen sind alle asymmetrisch, mit einem langen Schwanz hin zu hohen Feldstärken. Die Maxima der Verteilungen liegen in Iffwil zwischen 0.3 und $0.4 \mu\text{T}$, in Wiler bei ca. $0.5 \mu\text{T}$. In Iffwil sind die Histogramme auf beiden Seiten der Leitung sehr ähnlich, während in Wiler deutlich mehr hohe Werte für das Histogramm bei $+20$ m (auf der Seite des 220-kV-Viererbündels) zu sehen sind.

4.3 Lastflussdaten

4.3.1 Graphiken der Scheinströme

Die aus den Lastflussdaten bestimmten Scheinströme sind in den Abbildungen 21 und 22 graphisch dargestellt. Mit Ausnahme der ersten Messung (M1: 5-Minuten-Mittelwerte) handelt es sich um 15-Minutenwerte, wie in Abschnitt 3.1.1 erläutert. In den meisten Fällen sind die Scheinströme der beiden Leitungsstränge gut korreliert. Sie zeigen ausgeprägte Tagesgänge, und man sieht wechselnde Lastflussrichtungen und auch Wechsel zwischen gleichläufigen und gegenläufigen Lastflussrichtungen (z.B. für M9 in Iffwil oder M4 in Wiler).

Der thermische Grenzstrom beträgt je 900 A für beide Stromkreise von MUO-BIK/MUO-LIN. Für die Leitung MUO-PIE/MUO-KAP beträgt er 760 A pro Leiterstrang, d.h. 3040 A für das Vierer-Bündel von MUP-PIE und 1520 A für das Zweier-Bündel von MUO-KAP.

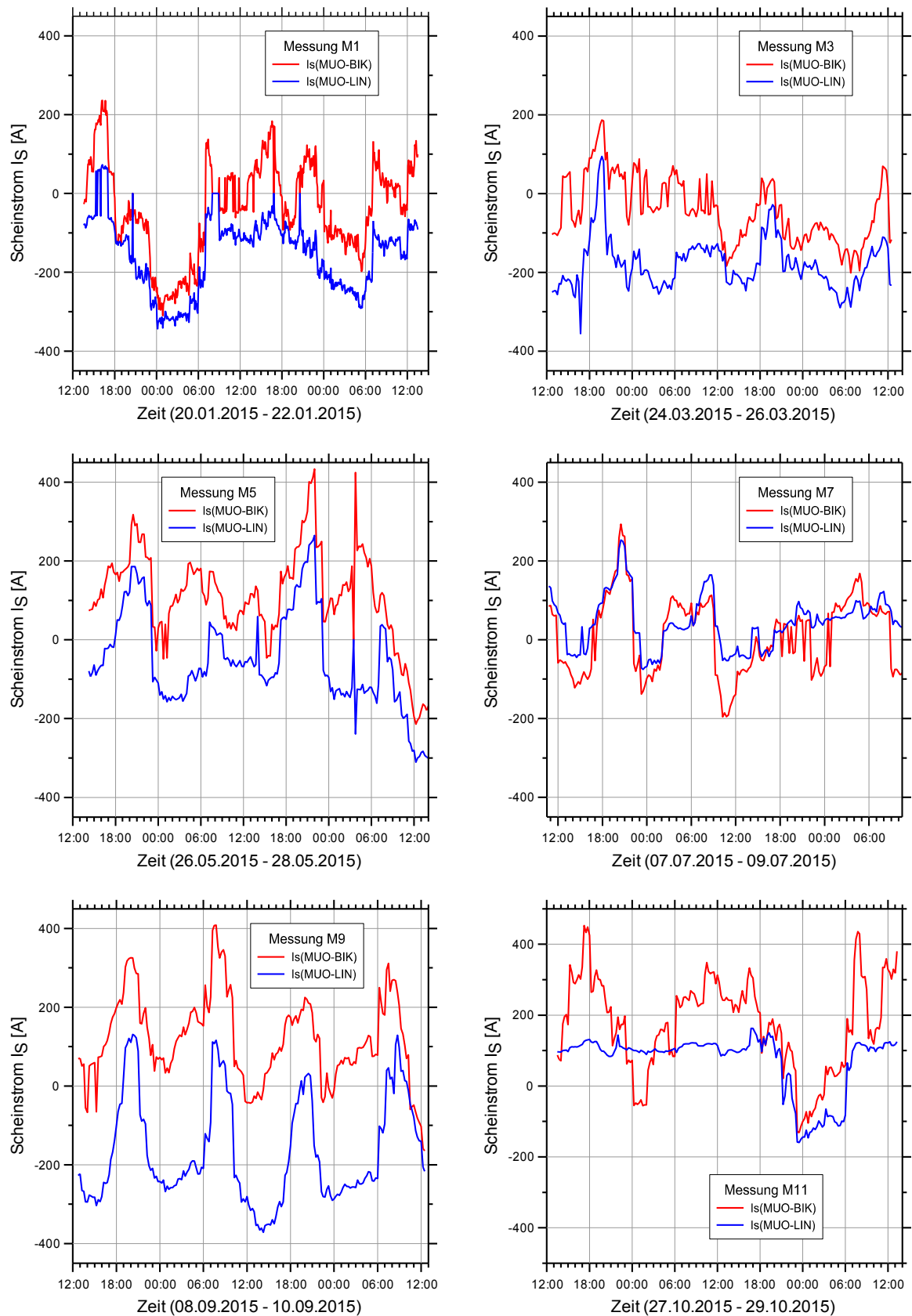


Abbildung 21: Scheinströme in den zwei Leitungssträngen während der Messperioden in Ifwil.

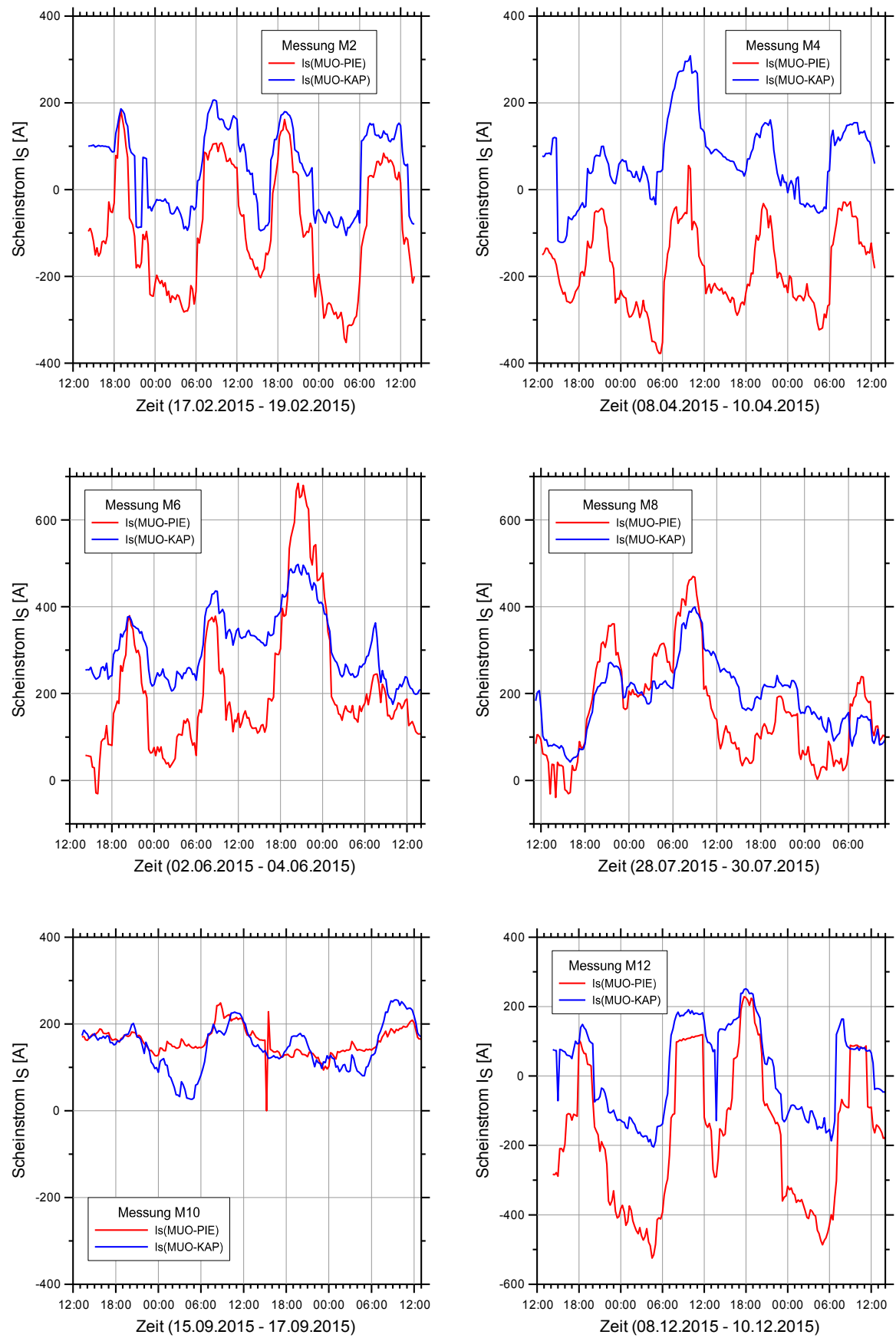


Abbildung 22: Scheinstrome in den zwei Leitungssträngen während der Messperioden in Wiler. Zu beachten: Für M6 und M8 ist die Y-Achse verschoben.

4.3.2 Ströme und Magnetfelder

Bei Leitungen mit zwei (oder mehr) Stromkreisen summieren sich die Beiträge der Stromkreise an die Magnetfelder vektoriell, je nach Phasenlage und Lastflussrichtungen wird dadurch das Summenfeld verstärkt oder abgeschwächt. Der Beitrag der Stromkreise ist proportional zum Strom und indirekt proportional zum Abstand. Am stärksten ist also der Einfluss eines nahen, starken Stroms. Die Abbildung 23 zeigt die bei ± 10 m gemessenen Magnetfelder und die Scheinströme in den beiden Stromkreisen für die Messung M9 in Iffwil. Wenn ein Strom dominiert, so korreliert er sehr stark mit dem auf der gleichen Seite gemessenen Magnetfeld.

Bei ± 10 m sind die Abstände zu den beiden Stromkreisen relativ gesehen am unterschiedlichsten, für grössere Abstände ist dies immer weniger der Fall. Bei ± 80 m ist das Verhältnis der Abstände nahe bei Eins (in Iffwil ca. $85:75=1.13$), und das Magnetfeld wird von beiden Strömen ähnlich beeinflusst. Entsprechend sind dann die Magnetfelder dort auch stärker korreliert und weniger stark nur vom näheren Stromkreis abhängig, wie in Abbildung 24 gezeigt.

Abbildungen wie 23 und 24 sind im Übrigen auch nützlich, um die Synchronisation der einzelnen Datensätze zu überprüfen.

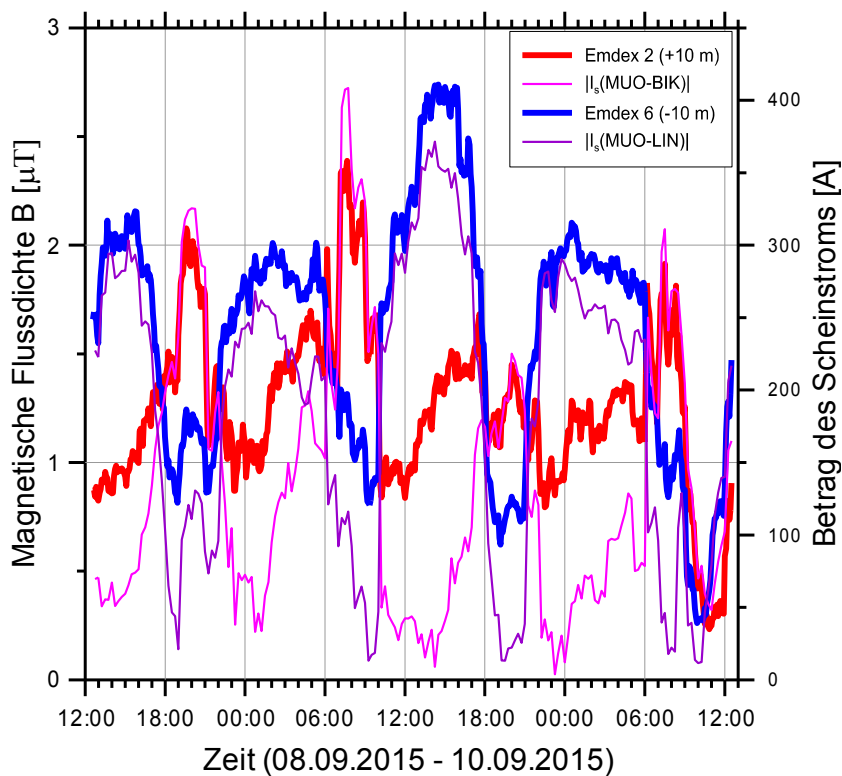


Abbildung 23: Gemessene Magnetfelder bei ± 10 m (dicke Linien) und Scheinströme in beiden Stromkreisen (dünne Linien) für Messung M9 in Iffwil. Emdex 2 misst auf der Seite des Strangs MUO-BIK, Emdex 6 auf der Seite von MUO-LIN.

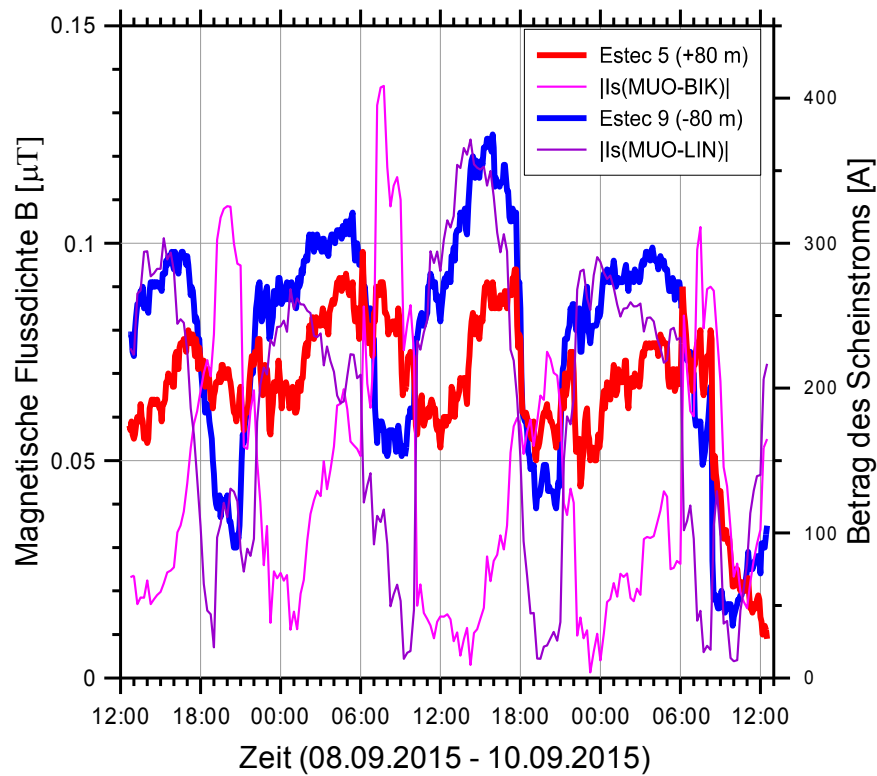


Abbildung 24: Gemessene Magnetfelder bei ± 80 m (dicke Linien) und Scheinstrome in beiden Stromkreisen (dünne Linien) für Messung M9 in Iffwil. Emdex 2 misst auf der Seite des Strangs MUO-BIK, Emdex 6 auf der Seite von MUO-LIN.

4.3.3 RMS-Koeffizienten

Die Tabelle 3 zeigt die RMS-Koeffizienten der Ströme in beiden Stromkreisen der betrachteten Leitungen für alle Messperioden und zusätzlich für das ganze Jahr 2015. Die RMS-Stromstärken variieren in einem recht grossen Bereich, es gibt Messperioden, während denen der eine Stromkreis dominiert (aber nicht immer derselbe) und andere, während denen die Ströme im Mittel etwa gleich sind. An beiden Messorten sind die Lastflussrichtungen überwiegend gleichläufig ($\text{Re}(k') > 0.2$), aber für je eine Messperiode sind sie auch gegenläufig (M4 und M9), und für zwei weitere Messperioden ist die Korrelation eher schwach (M2 und M5). In Wiler ist die Korrelation während drei der Messperioden sehr hoch (M6, M8, M10).

Messperiode	System(1)	System(2)	$I_{\text{RMS},1}$	$I_{\text{RMS},2}$	$\text{Re}(k')$	$\text{Im}(k')$
M1	MUO-LIN	MUO-BIK	179.3	124.2	0.679	-0.079
M3	MUO-LIN	MUO-BIK	190.7	92.0	0.618	-0.240
M5	MUO-LIN	MUO-BIK	132.6	163.5	0.405	-0.279
M7	MUO-LIN	MUO-BIK	79.9	98.6	0.621	0.260
M9	MUO-LIN	MUO-BIK	214.1	162.0	-0.216	-0.040
M11	MUO-LIN	MUO-BIK	109.0	218.8	0.693	0.257
2015	MUO-LIN	MUO-BIK	189.7	199.4	0.643	-0.005
M2	MUO-KAP	MUO-PIE	105.3	169.0	0.449	0.055
M4	MUO-KAP	MUO-PIE	113.9	205.1	-0.297	0.247
M6	MUO-KAP	MUO-PIE	319.4	264.7	0.843	-0.216
M8	MUO-KAP	MUO-PIE	205.3	198.4	0.875	-0.197
M10	MUO-KAP	MUO-PIE	157.0	162.8	0.886	-0.124
M12	MUO-KAP	MUO-PIE	130.8	267.4	0.634	0.160
2015	MUO-KAP	MUO-PIE	111.9	213.6	0.373	0.080

Tabelle 3: RMS-Koeffizienten der Ströme, für beide Messorte und je alle Messperioden und für das ganze Jahr 2015.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Messperioden ein recht grosser Bereich bezüglich Stromstärken und relativen Lastflussrichtungen abgedeckt wurde. In Iffwil ist der Durchschnitt über alle Messperioden ähnlich dem für das ganze Jahr 2015, während in Wiler die Lastflussrichtungen während der Messungen im Mittel deutlich ausgeprägter gleichläufig waren als für das ganze Jahr.

4.4 Modellresultate und Vergleich mit der Messung

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen berechnete Feldstärkekarten für den Jahresmittelwert des Betrags $\bar{B}$ der magnetischen Flussdichte, berechnet mit *Modell C* (mit dem DHM5). Dargestellt sind die Werte für 1 m über Boden. Die Bilder sind ähnlich, die Maximalwerte liegen bei ca. 2 μT . In der logarithmischen Darstellung der beiden Abbildungen entspricht die unterste hellblaue Abstufung einer magnetischen Flussdichte von ca. 50 nT, was in etwa dem Median der Belastung der Schweizer Bevölkerung entspricht [Stratmann et al., 1995]. Nur in einem engen Korridor sind die Magnetfelder stärker als dieser Wert, in Wiler ist dieser Korridor etwas breiter als in Iffwil.

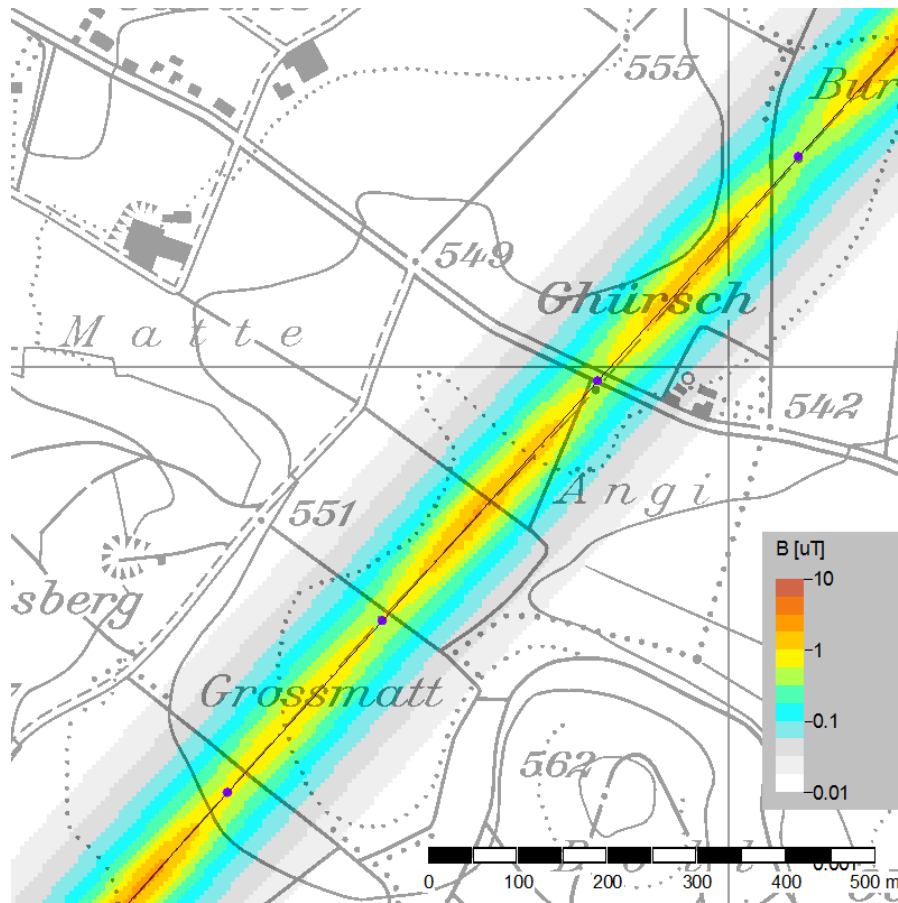


Abbildung 25: Feldstärkekarte für die magnetische Flussdichte $\bar{B}$ als Jahresmittelwert für 2015, berechnet mit Modell C (Betrag der magnetischen Flussdichte, DHM5) für den Messort Iffwil, für Höhe 1 m über Grund. Hintergrundkarte PK25 © Swisstopo.

Für den Vergleich von Modell und Messung wurde für jede Messperiode ein zeitlicher Mittelwert mit dem Modell berechnet, entweder $\bar{B}$ mit K-Means-Clustering oder B_{RMS} aus den RMS-Koeffizienten, welche aus den Lastflussdaten für diese Messperiode bestimmt wurden. Mit dem Modell wurden Werte für Höhe 10 cm über Boden berechnet. Diese wurden dann mit den entsprechenden Mittelwerten der Messung für diese Messperiode verglichen.

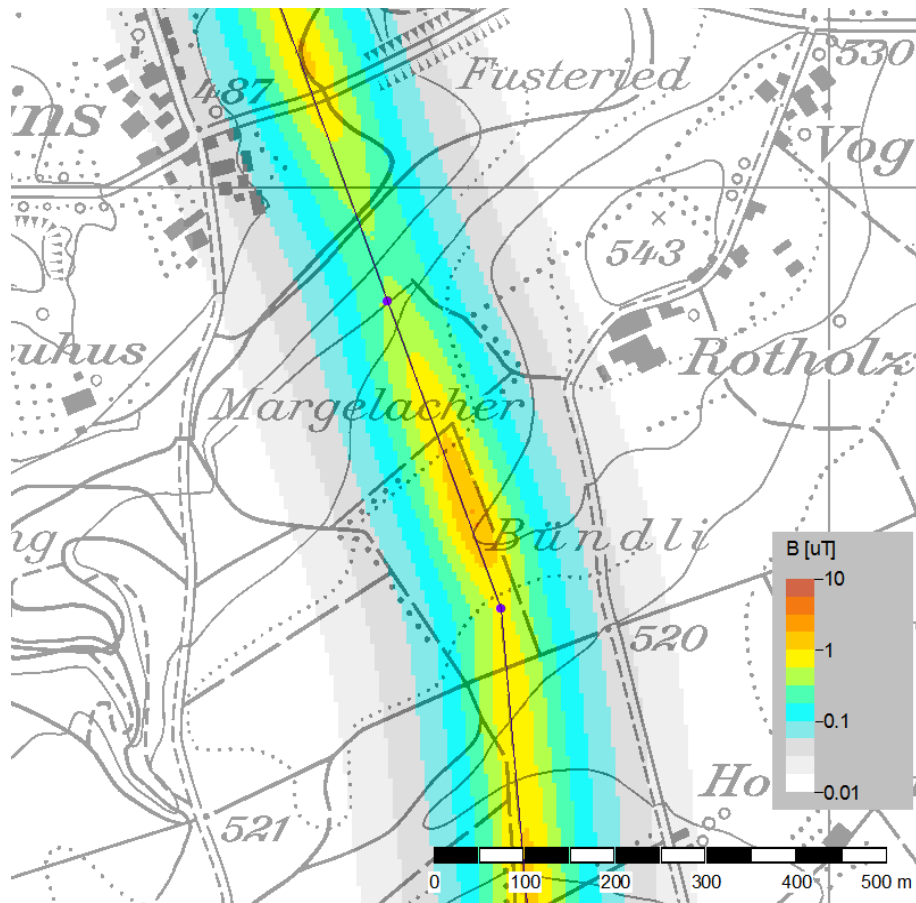


Abbildung 26: Feldstärkekarte für die magnetische Flussdichte $\bar{B}$ als Jahresmittelwert für 2015, berechnet mit Modell C (Betrag der magnetischen Flussdichte, DHM5) für den Messort Wiler, für Höhe 1 m über Grund. Hintergrundkarte PK25 © Swisstopo.

4.4.1 Vergleich für Messungen in Iffwil

Die Tabellen 4 bis 9 zeigen die Resultate von Messung und Modell für die Messungen in Iffwil. Die folgenden Grössen sind aufgelistet:

- Emdex 1, etc: Bezeichnung des Messgeräts
- D : Orthogonaldistanz des Messpunkts von der Leitungsachse (die Horizontalabstand, gemessen in der Richtung rechtwinklig zur Leitungsachse), in Meter
- $\bar{B}$: Mittelwert des Betrags der magnetischen Flussdichte (je für Messung und Modell A und C), in Mikrottesla (μT), gemittelt über die Messperiode.
- B_{RMS} : RMS-Mittelwert der magnetischen Flussdichte (je für Messung und Modell B und D), in Mikrottesla (μT), gemittelt über die Messperiode.
- Δ : die relative Abweichung des Modells von der Messung, ausgedrückt in % oder als dimensionslose Zahl,

Weil die Messwerte zwischen den Punkten um Grössenordnungen variieren, ist es sinnvoll, für die Statistik nicht die Absolutwerte der Abweichung, sondern die relative Abweichung Δ zu verwenden. Δ definieren wir als

$$\Delta = \frac{B(\text{Modell}) - B(\text{Messung})}{B(\text{Messung})} \quad (32)$$

dabei ist B je nach Modell entweder der Mittelwert des Betrags ($\bar{B}$, für Modell A und C) oder der RMS-Mittelwert (B_{RMS} , für Modell B und D).

Die Resultate des Vergleichs für Iffwil sind in den Tabellen 4 bis 9 zusammengestellt. Für die Modelle A und B (mit DHM25) findet man nahe der Leitungsachse typischerweise Abweichungen im Bereich von ca. -10 % bis -15 %, das Modell unterschätzt dort die Magnetfelder. Die Unterschätzung ist aber nicht symmetrisch bezüglich der Leitungsachse, auf der Seite $D < 0$ ist sie meist kleiner als auf der Seite $D > 0$. Diese Unterschätzung verschwindet oder wird zumindest deutlich kleiner, wenn eines der Modelle mit dem besseren Höhenmodell verwendet wird (Modell C oder D).

Für die Messung M1 findet man am Messpunkt 4 (Emdex 4) bei $D = +40\text{ m}$ eine sehr grosse relative Abweichung $\Delta = -28\%$ für Modell A und ähnliche Werte für die anderen Modellvarianten. Grund dafür ist eine Erhöhung der Magnetfeldmesswerte durch einem Schachtdeckel aus Gusseisen und Beton, der sehr nahe am Punkt 4 liegt, und der bei Beginn der ersten Messung im Schnee zugedeckt war (vgl. Abschnitt 4.6 und Abbildung 31 auf S. 57). Für die folgenden Messungen wurde deshalb der Messpunkt 4 in Iffwil verschoben zu $D = +35\text{ m}$. Die Messwerte von Messpunkt 4 von M1 wurden trotzdem in allen Grafiken, Tabellen und Auswertungen mitberücksichtigt.

Die Abbildung 27 zeigt den Vergleich der gemessenen und berechneten Querprofile von $\bar{B}$ für die Messperioden in Iffwil (Für B_{RMS} wären die Resultate analog und sehr ähnlich). Die Querprofile für Modell A und C unterscheiden sich meist nur für Punkte nahe der Leitungsachse, und Modell C zeigt dort kleinere Abweichungen von der Messung als Modell A. Einzig für die Messperiode M3 findet man auch für $|D| > 10\text{ m}$ noch nennenswerte Unterschiede zwischen den Modellvarianten.

Abbildung 27 zeigt, dass die Übereinstimmung zwischen Modell und Messung für alle Messperioden in Iffwil qualitativ gleich gut ist. Das Modell ist also gut imstande, die verschiedenen tageszeitlichen und saisonalen Unterschiede zu berücksichtigen.

Messung M1		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Jan 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	1.220	1.338	1.030	-16%	1.140	-15%	1.187	-3%	1.325	-1%
Emdex 2	10	0.795	0.849	0.664	-16%	0.719	-15%	0.735	-7%	0.801	-6%
Emdex 3	20	0.406	0.427	0.349	-14%	0.372	-13%	0.366	-10%	0.391	-8%
Emdex 4	40	0.166	0.175	0.120	-28%	0.129	-26%	0.121	-27%	0.130	-26%
Estec 5	80	0.034	0.036	0.034	0%	0.037	2%	0.034	-1%	0.037	2%
Emdex 6	-10	1.129	1.218	1.020	-10%	1.113	-9%	1.169	4%	1.282	5%
Emdex 7	-20	0.650	0.686	0.622	-4%	0.664	-3%	0.674	4%	0.720	5%
Emdex 8	-40	0.204	0.209	0.203	0%	0.211	1%	0.207	1%	0.215	3%
Estec 9	-80	0.049	0.049	0.049	0%	0.051	3%	0.049	0%	0.051	3%

Tabelle 4: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M1 in Iffwil (Einheiten: *D* in m, *B* in μT).

Messung M3		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Mär 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	1.303	1.348	1.148	-12%	1.181	-12%	1.326	2%	1.367	1%
Emdex 2	10	0.802	0.830	0.716	-11%	0.737	-11%	0.791	-1%	0.814	-2%
Emdex 3	20	0.398	0.421	0.364	-8%	0.382	-9%	0.381	-4%	0.401	-5%
Emdex 4	35	0.186	0.203	0.158	-15%	0.171	-16%	0.159	-14%	0.172	-15%
Estec 5	80	0.034	0.036	0.037	10%	0.041	11%	0.037	10%	0.041	11%
Emdex 6	-10	1.294	1.342	1.126	-13%	1.160	-14%	1.294	0%	1.334	-1%
Emdex 7	-20	0.732	0.760	0.667	-9%	0.688	-9%	0.718	-2%	0.741	-3%
Emdex 8	-40	0.221	0.230	0.221	0%	0.229	0%	0.225	2%	0.233	1%
Estec 9	-80	0.050	0.053	0.054	7%	0.056	7%	0.054	7%	0.057	8%

Tabelle 5: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M3 in Iffwil (Einheiten: *D* in m, *B* in μT).

Messung M5		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Mai 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	1.254	1.364	1.122	-11%	1.206	-12%	1.283	2%	1.389	2%
Emdex 2	10	1.018	1.100	0.912	-10%	0.982	-11%	1.024	1%	1.107	1%
Emdex 3	20	0.564	0.609	0.523	-7%	0.564	-7%	0.556	-1%	0.600	-1%
Emdex 4	35	0.261	0.280	0.234	-10%	0.252	-10%	0.236	-10%	0.255	-9%
Estec 5	80	0.044	0.046	0.049	12%	0.053	15%	0.049	13%	0.053	14%
Emdex 6	-10	1.000	1.084	0.916	-8%	0.972	-10%	1.032	3%	1.099	1%
Emdex 7	-20	0.529	0.579	0.521	-2%	0.555	-4%	0.555	5%	0.591	2%
Emdex 8	-40	0.165	0.185	0.176	6%	0.190	3%	0.178	8%	0.193	4%
Estec 9	-80	0.041	0.046	0.047	14%	0.051	11%	0.047	14%	0.051	11%

Tabelle 6: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M5 in Iffwil (Einheiten: *D* in m, *B* in μT).

Messung M7		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Jul 2015	D	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	0.694	0.785	0.580	-16%	0.644	-18%	0.682	-2%	0.758	-3%
Emdex 2	10	0.554	0.616	0.452	-18%	0.504	-18%	0.515	-7%	0.574	-7%
Emdex 3	20	0.283	0.315	0.250	-12%	0.281	-11%	0.267	-6%	0.300	-5%
Emdex 4	35	0.124	0.137	0.111	-11%	0.125	-9%	0.112	-9%	0.127	-8%
Estec 5	80	0.022	0.024	0.023	3%	0.026	10%	0.023	4%	0.026	10%
Emdex 6	-10	0.475	0.538	0.431	-9%	0.482	-10%	0.491	3%	0.551	2%
Emdex 7	-20	0.231	0.263	0.227	-2%	0.258	-2%	0.243	5%	0.276	5%
Emdex 8	-40	0.071	0.083	0.075	6%	0.088	6%	0.077	9%	0.090	8%
Estec 9	-80	0.022	0.026	0.020	-11%	0.024	-7%	0.021	-9%	0.024	-6%

Tabelle 7: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M7 in Iffwil (Einheiten: D in m, B in μT).

Messung M9		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Sep 2015	D	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	1.663	1.711	1.518	-9%	1.552	-9%	1.708	3%	1.749	2%
Emdex 2	10	1.255	1.311	1.179	-6%	1.216	-7%	1.300	4%	1.345	3%
Emdex 3	20	0.740	0.774	0.726	-2%	0.747	-3%	0.766	4%	0.789	2%
Emdex 4	35	0.380	0.394	0.358	-6%	0.365	-7%	0.362	-5%	0.369	-6%
Estec 5	80	0.067	0.069	0.085	27%	0.086	25%	0.085	27%	0.086	25%
Emdex 6	-10	1.584	1.683	1.433	-10%	1.495	-11%	1.616	2%	1.691	0%
Emdex 7	-20	0.938	1.006	0.900	-4%	0.948	-6%	0.961	2%	1.014	1%
Emdex 8	-40	0.298	0.319	0.334	12%	0.350	10%	0.340	14%	0.356	12%
Estec 9	-80	0.077	0.082	0.092	19%	0.095	16%	0.092	19%	0.095	17%

Tabelle 8: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M9 in Iffwil (Einheiten: D in m, B in μT).

Messung M11		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Okt 2015	D	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	1.334	1.439	1.174	-12%	1.263	-12%	1.377	3%	1.482	3%
Emdex 2	10	1.149	1.287	0.995	-13%	1.110	-14%	1.134	-1%	1.267	-2%
Emdex 3	20	0.629	0.712	0.565	-10%	0.639	-10%	0.604	-4%	0.685	-4%
Emdex 4	35	0.283	0.320	0.250	-12%	0.286	-11%	0.253	-11%	0.290	-10%
Estec 5	80	0.045	0.051	0.051	12%	0.059	15%	0.051	12%	0.058	15%
Emdex 6	-10	0.783	0.813	0.763	-3%	0.792	-3%	0.857	9%	0.887	9%
Emdex 7	-20	0.358	0.377	0.373	4%	0.387	3%	0.392	9%	0.407	8%
Emdex 8	-40	0.116	0.123	0.133	15%	0.141	14%	0.135	16%	0.142	16%
Estec 9	-80	0.035	0.039	0.040	11%	0.043	11%	0.040	12%	0.043	11%

Tabelle 9: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M11 in Iffwil (Einheiten: D in m, B in μT).

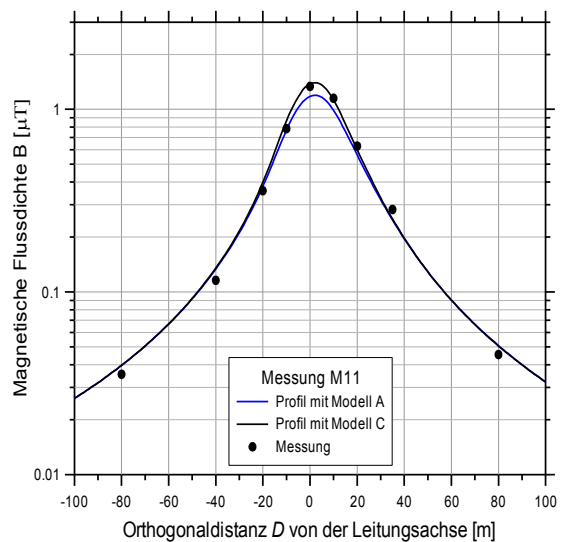
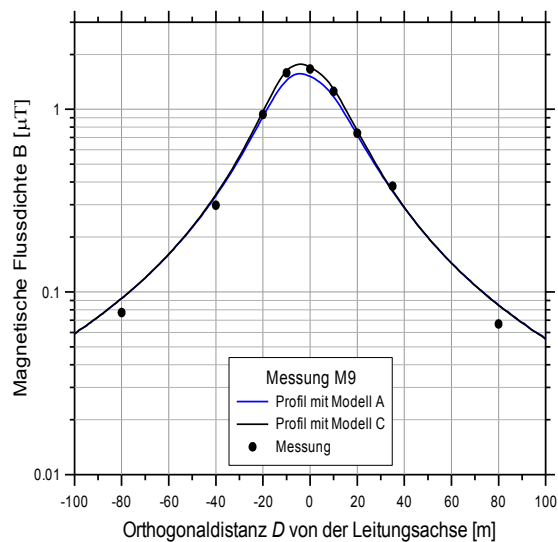
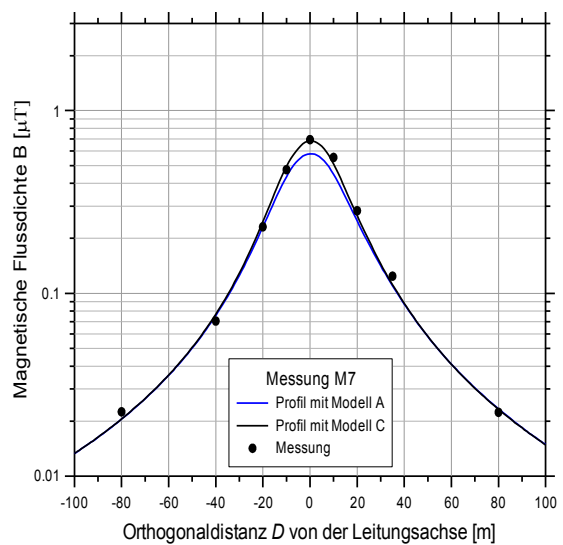
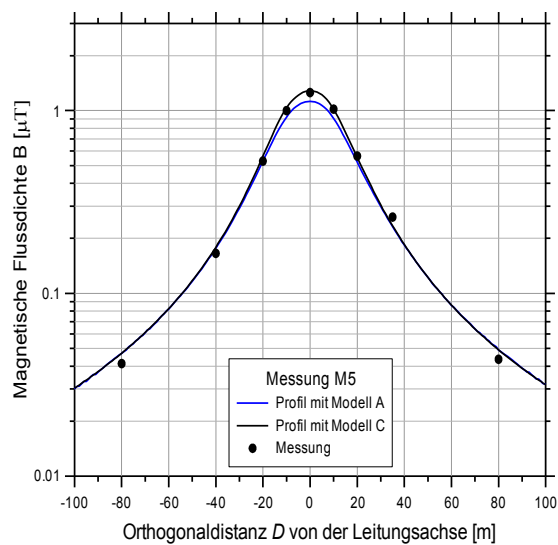
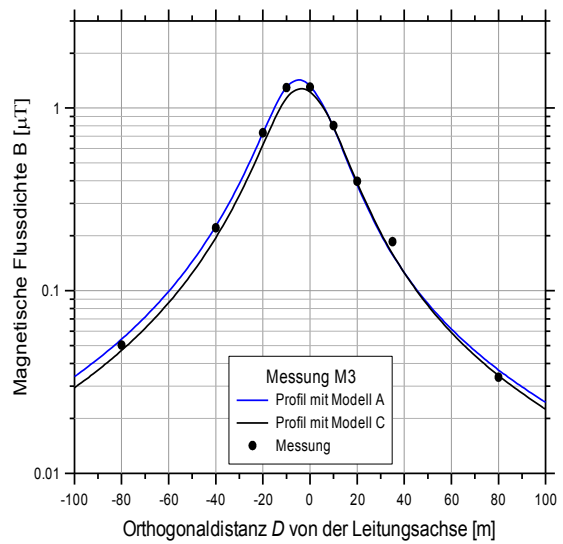
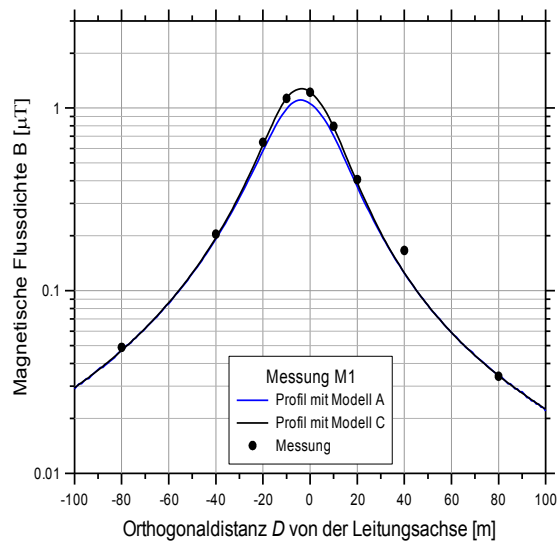


Abbildung 27: Vergleich der gemessenen und modellierten Querprofile für die Messperioden in Iffwil. Punkte: Messwerte für $\bar{B}$; blaue Linien: Modell A mit Höhen aus DHM25; schwarze Linien: Modell C mit Höhen gemäss DHM5.

4.4.2 Vergleich für Messungen in Wiler

Die Tabellen 10 bis 15 enthalten die Resultate der Messungen und den Vergleich mit dem Modell für die Messungen in Wiler, im gleichen Format und mit den gleichen Bezeichnungen wie im vorherigen Abschnitt für Iffwil. Fehlende Messdaten, für je eines der Emdex-Geräte während der Messperioden M2, M4 und M12 sind in den Tabellen mit „---“ markiert.

Die Abbildung 28 zeigt den Vergleich der gemessenen und berechneten Querprofile für die Messperioden in Wiler.

Die Modelle mit dem „besseren“ Höhenmodell (C und D) zeigen für die achsennahen Punkte kleinere Abweichungen Δ , allerdings ist die Übereinstimmung nicht für alle Messperioden gleich gut. Für die Messperioden M2, M4 und M12 sind die Resultate von C und D (für die achsennahen Punkte) deutlich besser, für M6, M8 und M12 ist die modellierte Feldstärke für Modell A und B überschätzt, für Modell C und D aber unterschätzt. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen von Messperioden ist wohl durch die Temperatur zu erklären, die Messperioden M2, M4 und M12 (im Februar, Anfang April und Anfang Dezember) fanden unter eher winterlichen Bedingungen mit Nachttemperaturen um die Null Grad statt (vgl. Abschnitt 4.7), umgekehrt herrschten während der Messperioden M6, M8 und M10 (im Juni, Juli und September) sommerliche Temperaturen. Es ist also gut zu erklären, dass während der warmen Perioden (M6, M8, M10) der Leiterdurchhang grösser war als für die im Modell angenommene Jahresmitteltemperatur, die Distanz zu den achsennahen Messpunkten folglich unterschätzt und als Folge die Feldstärke überschätzt wurde. Ein weiterer Unterschied zwischen [M2, M4, M12] und [M6, M8, M10] ist allerdings auch, dass für die erste Gruppe der Strom im 220-kV-Strang deutlich höher war als im 132-kV-Strang, während für die zweite Gruppe die Ströme in beiden Strängen etwa gleich hoch waren und auch deutlich stärker richtungskorreliert (vgl. Tabelle 3 auf S. 42). Inwieweit dies die Modellierung auch beeinflusst hat, ist schwierig zu interpretieren.

Die grössten Abweichungen Δ sieht man in Wiler an den am weitesten von der Leitungsachse entfernten Punkten (vor allem Punkt 9 bei $D=-80$ m), mit dem Extremwert Δ zwischen +25 % und +29 %, je nach Modellvariante, für die Messperiode M8. Von diesem einen Punkt abgesehen, unterscheidet sich aber auch die Messperiode M8 qualitativ nicht von den übrigen. Auch für Wiler gilt, wie schon für Iffwil, dass das Modell die verschiedenen tages- und jahreszeitlichen Bedingungen gut berücksichtigt.

Messung M2		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Jan 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	0.687	0.719	0.812	18%	0.851	18%	0.705	3%	0.741	3%
Emdex 2	10	0.688	0.747	0.776	13%	0.851	14%	0.691	0%	0.758	1%
Emdex 3	20	0.538	0.600	0.569	6%	0.650	8%	0.526	-2%	0.601	0%
Emdex 4	40	0.266	0.302	0.251	-6%	0.300	-1%	0.244	-8%	0.291	-4%
Estec 5	80	0.082	0.092	0.075	-9%	0.089	-3%	0.074	-10%	0.089	-4%
Emdex 6	-10	0.577	0.588	0.671	16%	0.686	17%	0.587	2%	0.603	2%
Emdex 7	-20	0.421	0.427	0.467	11%	0.479	12%	0.421	0%	0.432	1%
Emdex 8	-40	---	---	0.208		0.216		0.199		0.207	
Estec 9	-80	0.064	0.065	0.066	3%	0.070	7%	0.065	2%	0.069	6%

Tabelle 10: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M2 in Wiler (*D* in m, *B* in μT).

Messung M4		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Apr 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	0.955	0.984	1.084	14%	1.112	13%	0.970	2%	0.994	1%
Emdex 2	10	---	---	1.113		1.155		1.005		1.040	
Emdex 3	20	0.845	0.883	0.892	6%	0.925	5%	0.830	-2%	0.859	-3%
Emdex 4	40	0.434	0.456	0.439	1%	0.452	-1%	0.427	-2%	0.439	-4%
Estec 5	80	0.139	0.144	0.138	-1%	0.141	-2%	0.137	-1%	0.140	-3%
Emdex 6	-10	0.814	0.835	0.927	14%	0.945	13%	0.833	2%	0.847	1%
Emdex 7	-20	0.632	0.653	0.710	12%	0.725	11%	0.647	2%	0.659	1%
Emdex 8	-40	0.314	0.325	0.354	13%	0.361	11%	0.339	8%	0.346	7%
Estec 9	-80	0.104	0.108	0.119	14%	0.121	12%	0.118	13%	0.120	11%

Tabelle 11: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M4 in Wiler (*D* in m, *B* in μT).

Messung M6		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Jun 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	1.328	1.432	1.450	9%	1.562	9%	1.228	-8%	1.320	-8%
Emdex 2	10	1.085	1.225	1.121	3%	1.267	3%	0.993	-8%	1.116	-9%
Emdex 3	20	0.701	0.821	0.689	-2%	0.809	-1%	0.639	-9%	0.746	-9%
Emdex 4	40	0.280	0.335	0.268	-4%	0.315	-6%	0.260	-7%	0.306	-9%
Estec 5	80	0.077	0.089	0.081	5%	0.089	1%	0.080	3%	0.089	0%
Emdex 6	-10	1.219	1.272	1.367	12%	1.424	12%	1.154	-5%	1.202	-6%
Emdex 7	-20	0.885	0.905	0.980	11%	1.004	11%	0.854	-4%	0.874	-3%
Emdex 8	-40	0.373	0.378	0.411	10%	0.417	10%	0.386	4%	0.392	4%
Estec 9	-80	0.094	0.097	0.112	19%	0.115	18%	0.111	17%	0.113	16%

Tabelle 12: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M6 in Wiler (*D* in m, *B* in μT).

Messung M8		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Jul 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	0.870	0.967	0.962	11%	1.076	11%	0.812	-7%	0.906	-6%
Emdex 2	10	0.774	0.883	0.786	2%	0.914	3%	0.693	-10%	0.801	-9%
Emdex 3	20	0.527	0.619	0.502	-5%	0.601	-3%	0.463	-12%	0.552	-11%
Emdex 4	40	0.219	0.260	0.198	-9%	0.236	-9%	0.192	-12%	0.228	-12%
Estec 5	80	0.061	0.069	0.057	-6%	0.063	-9%	0.056	-8%	0.063	-9%
Emdex 6	-10	0.736	0.795	0.856	16%	0.932	17%	0.723	-2%	0.786	-1%
Emdex 7	-20	0.515	0.548	0.585	14%	0.628	15%	0.510	-1%	0.548	0%
Emdex 8	-40	0.194	0.206	0.231	19%	0.247	20%	0.217	12%	0.233	13%
Estec 9	-80	0.047	0.052	0.061	29%	0.066	27%	0.060	28%	0.065	25%

Tabelle 13: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M8 in Wiler (*D* in m, *B* in μT).

Messung M10		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Sep 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	0.767	0.783	0.839	9%	0.862	10%	0.707	-8%	0.727	-7%
Emdex 2	10	0.708	0.719	0.735	4%	0.751	4%	0.644	-9%	0.659	-8%
Emdex 3	20	0.492	0.501	0.493	0%	0.504	1%	0.452	-8%	0.462	-8%
Emdex 4	40	0.195	0.200	0.194	0%	0.199	0%	0.187	-4%	0.193	-4%
Estec 5	80	0.049	0.051	0.050	3%	0.052	2%	0.050	2%	0.052	1%
Emdex 6	-10	0.638	0.658	0.702	10%	0.732	11%	0.594	-7%	0.619	-6%
Emdex 7	-20	0.433	0.451	0.459	6%	0.486	8%	0.402	-7%	0.424	-6%
Emdex 8	-40	0.167	0.175	0.175	5%	0.186	6%	0.165	-1%	0.175	0%
Estec 9	-80	0.041	0.043	0.046	11%	0.048	11%	0.045	9%	0.048	10%

Tabelle 14: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M10 in Wiler (*D* in m, *B* in μT).

Messung M12		Messung		Modell A		Modell B		Modell C		Modell D	
Dez 2015	<i>D</i>	$\bar{B}$	B_{RMS}	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ	$\bar{B}$	Δ	B_{RMS}	Δ
Emdex 1	0	0.977	1.082	1.158	18%	1.273	18%	1.006	3%	1.105	2%
Emdex 2	10	1.021	1.162	1.158	13%	1.306	12%	1.029	1%	1.158	0%
Emdex 3	20	0.822	0.949	0.874	6%	0.999	5%	0.806	-2%	0.920	-3%
Emdex 4	40	0.385	0.450	0.392	2%	0.454	1%	0.380	-1%	0.440	-2%
Estec 5	80	0.114	0.133	0.113	-1%	0.131	-1%	0.112	-2%	0.130	-2%
Emdex 6	-10	---	---	0.906		0.966		0.796		0.851	
Emdex 7	-20	0.536	0.568	0.602	12%	0.634	12%	0.546	2%	0.575	1%
Emdex 8	-40	0.235	0.247	0.257	10%	0.270	9%	0.247	5%	0.260	5%
Estec 9	-80	0.075	0.080	0.082	9%	0.087	9%	0.081	8%	0.086	8%

Tabelle 15: Vergleich von Messung und Modell für die Messung M12 in Wiler (*D* in m, *B* in μT).

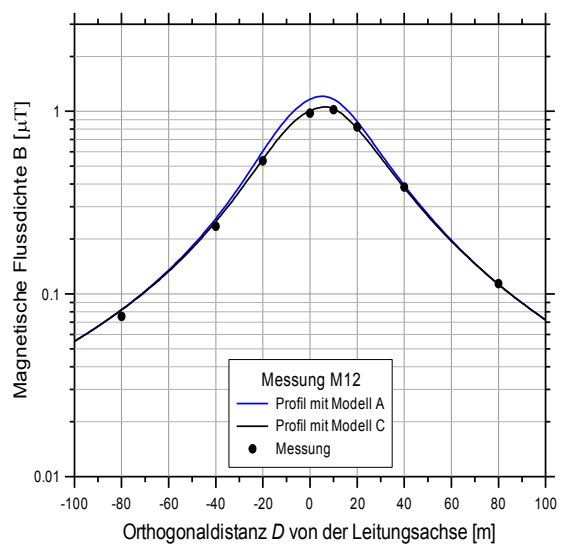
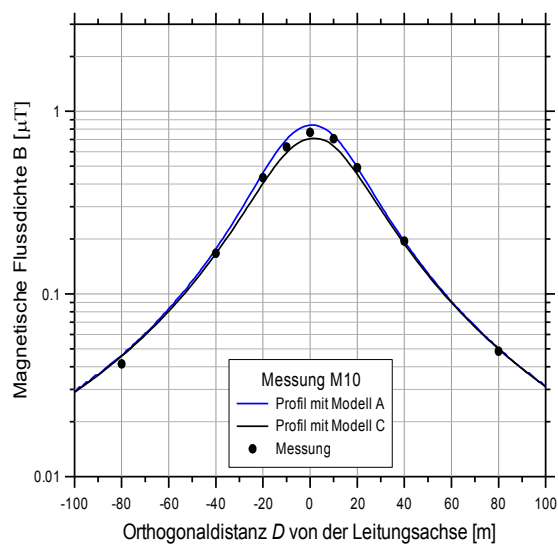
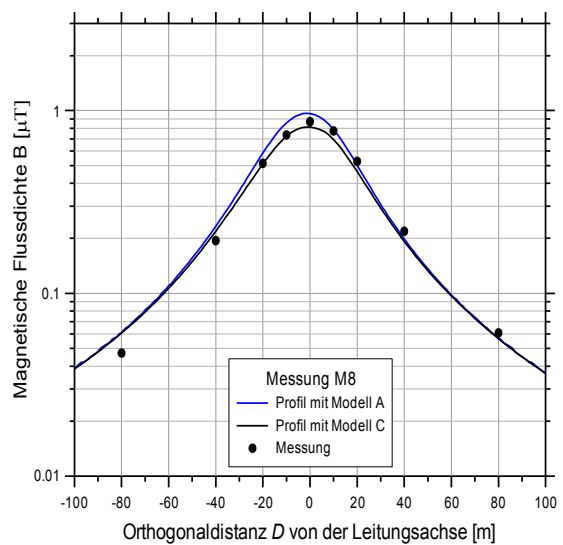
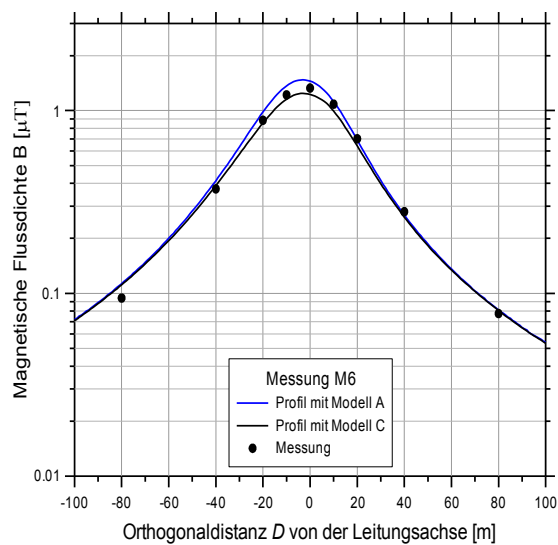
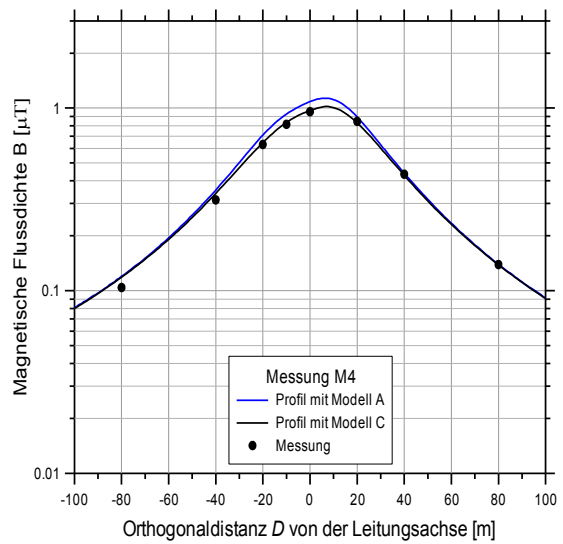
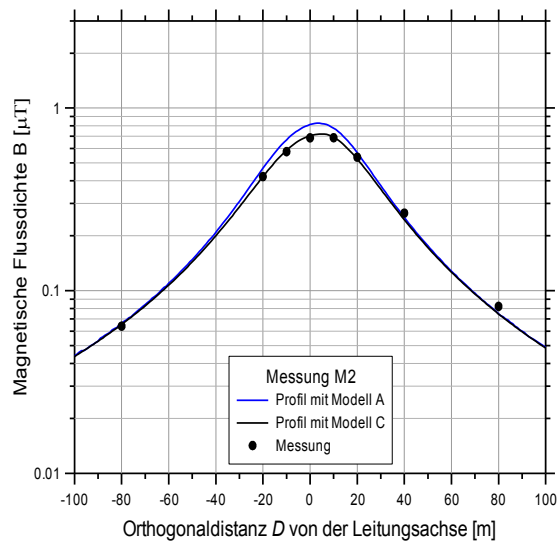


Abbildung 28: Vergleich der gemessenen und modellierten Querprofile für die Messperioden in Wiler. Punkte: Messwerte für B ; blaue Linien: Modell A mit Höhen aus DHM25; schwarze Linien: Modell C mit Höhen gemäss DHM5.

4.4.3 Variation der Querprofile

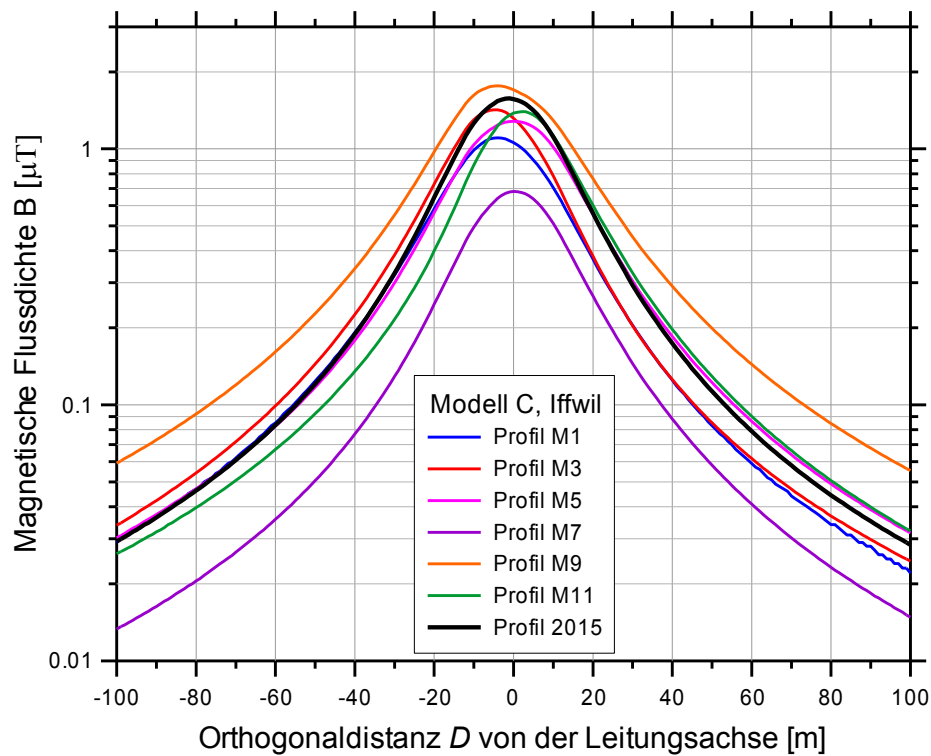


Abbildung 29: Vergleich der berechneten Querprofile von $\bar{B}$ für die sechs Messperioden am Messort Iffwil. Ebenfalls eingezeichnet ist ein Profil für das Jahresmittel 2015. Berechnet für 0.1 m über Grund.

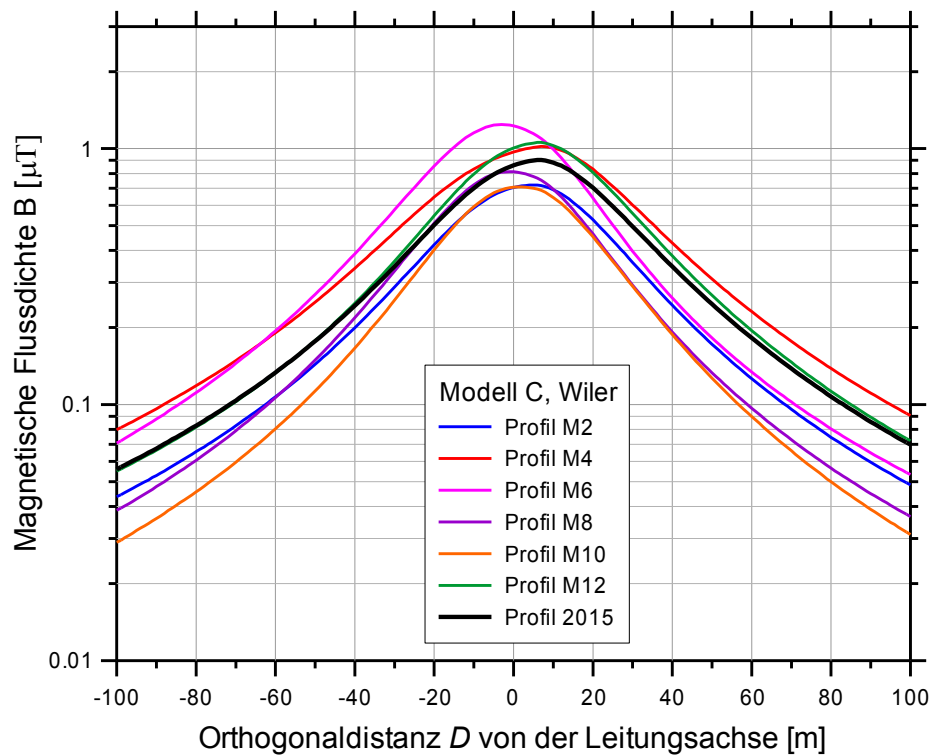


Abbildung 30: Vergleich der berechneten Querprofile von $\bar{B}$ für die sechs Messperioden am Messort Wiler. Ebenfalls eingezeichnet ist ein Profil für das Jahresmittel 2015. Berechnet für 0.1 m über Grund.

Die Abbildungen 29 und 30 zeigen den Vergleich der berechneten Querprofile für alle Messperioden und für den Jahresmittelwert 2015 für die beiden Messorte. Die Profile variieren nicht nur bezüglich der mittleren magnetischen Flussdichte, sondern sie haben auch verschiedene links-rechts-Symmetrien und die Maxima der Profile befinden sich einmal auf der einen oder anderen Seite der Leitungsachse. Für die Jahresmittelwerte findet man das Maximum im Profil für Iffwil auf der Seite $D < 0$ (Strang MUO-LIN), für Wiler auf der Seite $D > 0$ (Strang MUP-PIE), entsprechend der dort höheren Stromstärken. Auch diese Abbildungen zeigen die Variation der Bedingungen für die verschiedenen Messperioden.

4.5 Statistischer Vergleich

4.5.1 Mittelwert des Betrags und RMS-Mittelwert

Ziel des Pilotprojekts war die Berechnung eines Mittelwerts für den Betrag der magnetischen Flussdichte, $\bar{B}$. Bereits dort wurde aber auch festgehalten, dass ein RMS-Mittelwert B_{RMS} unter Umständen einfacher zu berechnen ist. Für die Auswertung der Messungen wurden beide Typen von Mittelwerten berechnet. Der RMS-Mittelwert ist meist etwas höher als der Mittelwert des Betrages, die Beziehung zwischen den beiden ist durch die Gleichung (27) gegeben.

Berechnet man den Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Typen von Mittelwerten für die gemessenen Daten, so findet man einen Korrelationskoeffizienten

$$\rho = 0.999 \quad (33)$$

für die gemessenen Magnetfeld-Daten für die Messperioden in Iffwil und einen solchen von

$$\rho = 0.997 \quad (34)$$

für die Messperioden in Wiler. Der Mittelwert des Betrags und der RMS-Mittelwert sind also extrem stark korrelierte Grössen.

Eine lineare Regression (für eine Gerade durch den Ursprung) ergab

$$B_{\text{RMS}} = 1.067 \bar{B}$$

für die Messdaten in Iffwil und

$$B_{\text{RMS}} = 1.078 \bar{B} \quad (35)$$

für die Messdaten in Wiler.

Auch wenn also $\bar{B}$ unter Umständen für epidemiologische Untersuchungen die relevantere Grösse ist, ist B_{RMS} aufgrund der extrem starken Korrelation genauso gut geeignet.

4.5.2 Genauigkeit der Modellierung

Als Mass für die Genauigkeit des Modells berechnen wir die statistischen Grössen $M(\Delta)$ (Offset) als Mittelwert und die Streuung $\sigma(\Delta)$ als Standardabweichung der relativen Differenz Δ nach Gleichung (32), jeweils für alle Messpunkte an einem Messort und für ein bestimmtes Modell.

Für die Modelle mit den Höhen aus dem DHM25 erhält man die Werte in Tabelle 16:

Messort	Modell A (für $\bar{B}$)		Modell B (für B_{RMS})	
	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$
Iffwil	-0.04	0.11	-0.04	0.11
Wiler	0.07	0.08	0.08	0.08

Tabelle 16: Statistik der Abweichung von Modell und Messung für die Modelle mit Höhen aus dem DHM25.

Das Modell mit dem DHM25 unterschätzt also die Feldstärken in Iffwil im Mittel um 4 % und überschätzt sie in Wiler um 7 % bis 8 %. In Wiler hat sich aber auch gezeigt, dass sich die

mit dem DHM25 berechneten Höhen der Leiterseile über Grund stark von den gemessenen Höhen unterschieden (vgl. Abschnitt 3.3) und dass die aus dem DHM25 interpolierten Höhen relativ ungenau sind.

Die Auswertung wurde deshalb mit den Modellen mit den präziseren Höhenangaben (von Swissgrid für die Masten, DHM5 für übrige Geländehöhen, Modell C und D) wiederholt.

Für die Modelle mit den Höhen aus dem DHM5 erhält man dann die Werte in Tabelle 17:

	Modell C (für $\bar{B}$)		Modell D (für B_{RMS})	
Messort	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$
Iffwil	0.02	0.09	0.02	0.09
Wiler	-0.01	0.08	-0.01	0.07

Tabelle 17: Statistik der Abweichung von Modell und Messung für die Modelle mit präzisen Höhen gemäss Swissgrid und DHM5

Mit dem präziseren Höhenmodell erhält man deutlich kleinere mittlere Fehler von nur noch 2 % in Iffwil und sogar nur noch 1 % in Wiler. Ausserdem ist die Streuung ebenfalls etwas kleiner geworden.

Unabhängig vom verwendeten Höhenmodell sind die Resultate der relativen Abweichung Δ für $\bar{B}$ und B_{RMS} sehr ähnlich.

Als nächstes wurde untersucht, wie sich die Abweichungen von Modell und Messung mit der Distanz von der Leitungsachse verändern. Dazu wurden zwei Gruppen gebildet: Nahe Messpunkte sind die innersten drei mit Orthogonaldistanz $D=0, \pm 10\text{ m}$, ferne Messpunkte sind die äusseren vier bei Distanzen von 35 m bis 80 m.

	Nahe Messpunkte, $ D \leq 10\text{ m}$				Ferne Messpunkte, $ D \geq 35\text{ m}$			
	Modell A (für $\bar{B}$)		Modell B (für B_{RMS})		Modell A (für $\bar{B}$)		Modell B (für B_{RMS})	
Messort	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$
Iffwil	-0.11	0.08	-0.12	0.07	0.03	0.13	0.03	0.12
Wiler	0.11	0.05	0.12	0.05	0.05	0.10	0.05	0.09

Tabelle 18: Statistik der Abweichung von Modell und Messung für die Modelle mit Höhen aus dem DHM25, separat für nahe und ferne Messpunkte.

Die Tabelle 18 zeigt den Vergleich von nahen und fernen Messpunkten für die Modelle mit dem DHM25. Der Offset $M(\Delta)$ ist für achsennahe Punkte an beiden Messorten deutlich grösser als für achsenferne Punkte, hingegen ist die Streuung $\sigma(\Delta)$ für ferne Punkte grösser als für nahe. Zwischen den Resultaten für $\bar{B}$ und B_{RMS} sind die Unterschiede sehr gering.

Der analoge Vergleich für die Modelle C und D mit präzisen Höhen ergibt die Resultate in Tabelle 19:

	Nahe Messpunkte, $ D \leq 10\text{ m}$				Ferne Messpunkte, $ D \geq 35\text{ m}$			
	Modell C (für $\bar{B}$)		Modell D (für B_{RMS})		Modell C (für $\bar{B}$)		Modell D (für B_{RMS})	
Messort	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$	$M(\Delta)$	$\sigma(\Delta)$
Iffwil	0.01	0.04	0.01	0.04	0.03	0.12	0.04	0.12
Wiler	-0.03	0.05	-0.03	0.05	0.02	0.09	0.02	0.09

Tabelle 19: Statistik der Abweichung von Modell und Messung für die Modelle mit präzisen Höhen aus dem DHM5, separat für nahe und ferne Messpunkte.

Mit dem präziseren Höhenmodell wird der mittlere Fehler $M(\Delta)$ für achsennahe Punkte an beiden Messorten markant kleiner, für achsenferne Punkte bleibt er in Iffwil etwa gleich und in Wiler halbiert er sich ungefähr (verglichen mit den Modellen A und B mit dem DHM25).

Die Streuung bleibt für alle Punkte in etwa gleich, ausser für achsennahe Punkte in Wiler, wo sie sich ebenfalls etwa halbiert.

Mit dem präziseren Höhenmodell sind die mittleren Abweichungen $M(\Delta)$ für achsennahe und -ferne Punkte von ähnlicher Grösse, aber die Streuung ist für nahe Punkte deutlich kleiner als für ferne.

Dass der Unterschied in $M(\Delta)$ zwischen dem groben und feinen Höhenmodell für achsennahe Punkte am deutlichsten ausfällt, ist natürlich keine Überraschung, denn dort ist die Distanz zu den Leitern wesentlich durch die Höhen bestimmt, und Fehler in den Höhen wirken sich proportional (oder noch stärker) auf die berechneten Felder aus, während für weiter entfernte Punkte der Abstand weitgehend durch die Horizontalabstand bestimmt ist und der Einfluss der Höhe zunehmend unwichtiger wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, ein gutes Höhenmodell vorausgesetzt, das Modell die Magnetfelder im Mittel gut wiedergibt (mit einem Offset von wenigen Prozent) und dass die erweiterte Modellunsicherheit (2σ) von ca. 10 % bis 25 % ziemlich genau dem entspricht, was im Pilotprojekt abgeschätzt worden ist.

4.6 Messprobleme

Ein Problem, das während der Messung mehrmals auftrat, betraf die Spannungsversorgung der Emdex-Geräte. Diese benötigen eine 9V-Batterie. Insgesamt viermal versagte die Spannungsversorgung eines Emdex vorzeitig, obschon kurz zuvor noch genügend Batteriespannung angezeigt worden war (die Batterie wurde für jede Messung vorgängig ersetzt). Dies betraf:

- Emdex 8 in Messung 2. Am Ende der Messung reagierte das Gerät nicht mehr. Nach dem Rücktransport zeigte es auch am PC keine Reaktion, es konnten keine Daten ausgelesen werden. Nach dem Aus- und wieder Einschalten zeigte die Batterie dann 0 % an. Die Messdaten gingen beim Ausschalten verloren. Für die folgenden Messungen wurde ein Ersatzgerät verwendet.
- Emdex 4 bei Messung 3. Beim Einschalten zu Beginn der Messung zeigte die Batterie schon nur noch 85 % an, obwohl sie am Vortag neu eingesetzt worden war, volle Spannung angezeigt hatte und das Gerät danach ausgeschaltet worden war. Die Batterie wurde ersetzt und die Messung war dann normal.
- Emdex 2 bei Messung 4: Am Ende der Messung zeigte die Batterie noch einen Stand von 44 %, wie nach 48 Stunden etwa zu erwarten. Das Gerät wurde in Standby versetzt, damit sollte es eigentlich nur noch minimal Strom verbrauchen. Beim Versuch, das Gerät nach dem Rücktransport am PC auszulesen, zeigte dieses keine Reaktion mehr. Nach dem Aus- und wieder Einschalten zeigte die Batterie dann noch 12 % an. Die Messdaten waren ebenfalls verloren.
- Emdex 6 bei Messung 12: Am Ende der Messung zeigte das Gerät keine Anzeige mehr und reagierte nicht mehr auf Eingaben. Die Batterie zeigte (in einem anderen Gerät eingesetzt) noch einen Stand von 33 %. Die Daten waren verloren.

Die Emdex Geräte scheinen Probleme mit Wackelkontakten oder Kurzschlüssen in der Batteriestromversorgung zu haben. Dies ist problematisch, weil bei einem Unterbruch der Stromversorgung auch der Inhalt des Datenspeichers verloren geht. Insgesamt war dies bei drei von 84 Messreihen mit den Emdex-Geräten der Fall. Mit den ESTEC-Geräten traten keine Probleme auf.

Ein möglicher Grund für die Probleme könnte die Temperatur sein. In allen vier der oben beschriebenen Fälle lag die tiefste Aussentemperatur während der Messung bei Null Grad oder etwas darunter (vgl. Abschnitt 4.7).

Bei der Auswertung der ersten Messung in Iffwil zeigte sich beim Punkt 4 eine deutlich grössere Diskrepanz zwischen Modell und Messung als an allen anderen Messpunkten. Am

Ende der Messung war erkennbar, dass der Messpunkt 4 sehr nahe an einem metallenen Schachtdeckel lag (Abbildung 31 und 32). Beim Aufstellen der Messgeräte zu Beginn der Messung war dieser Deckel im Schnee nicht sichtbar gewesen, und bei der ersten Begehung des Messorts war er übersehen worden.

Der Deckel hat einen Durchmesser von 84 cm und eine Dicke von ca. 4 cm und besteht aus Gusseisen und Beton. Er gehört entweder zum Dorfbach oder zur Wasserleitung, die beide unter dem Weg liegen (in Beton- bzw. Kunststoffrohren). Der Punkt 4 liegt 2.8 m vom Zentrum des Deckels. In der Folge wurde der Messpunkt um 5 m Richtung Leitungsachse verschoben, zum Punkt 4' bei +35 m ab der Messung M3, damit er genügend weit von diesem Deckel entfernt ist.



Abbildung 31: Der Schachtdeckel (links unten) beim ursprünglichen Messpunkt 4 (rechts die Messbox 4) bei der Messung M1 in Iffwil. Photo am Ende der Messung M1, als der Schnee auf dem Weg geschmolzen war.



Abbildung 32: Der Schachtdeckel ohne Schnee.

4.7 Temperaturmessung

Während den Messungen wurde auch die Temperatur in zwei Messboxen (Nr. 2 und 3) aufgezeichnet. Ein weiterer Temperaturlogger wurde für die Messung der Aussentemperatur verwendet. Er befand sich anfangs oben auf der Box M2 (unter der Plastik-Abdeckung), später dann in einer etwas besser durchlüfteten, weiss gestrichenen kleinen Holzbox neben der Messbox Nr. 2 (ab Messung M4). Ziel der Temperaturmessung war, zu zeigen dass die Temperatur der Magnetfeld-Messgeräte im spezifizierten Bereich (insbesondere $>0^{\circ}\text{C}$) blieben, die Aussenmessung diente als Kontrolle, wie gut die thermische Isolation funktioniert hat.

Die von den Temperaturloggern aufgezeichneten Daten sind in den Abbildungen 33 und 34 dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist dort die an der Station Zollikofen von MeteoSchweiz gemessene Lufttemperatur (Messung auf 2 m über Boden).

Die Figuren zeigen, dass die Wärmepufferung der Messboxen funktioniert hat, auch in kalten Winternächten blieben die Messgeräte immer im positiven Temperaturbereich. Dabei war allerdings auch etwas Glück, insofern als während keiner der Messperioden wirklich extrem kalte Temperaturen vorkamen. Insgesamt gab es im ganzen Jahr 2015 nur an zwei Tagen Anfang Januar und an 7 Tagen Anfangs Februar Temperaturen unter -5°C (Stundenmittelwerte von Zollikofen), und nur ein Stundenmittelwert war kleiner als -10°C (-10.2°C). Die Messung der Aussentemperatur neben Box 2 hat gut funktioniert, solange der Temperaturlogger nicht direktem Sonnenlicht ausgesetzt war und genügend frei stand, so dass die Durchlüftung funktionierte, was allerdings nicht immer der Fall war, wie der Vergleich mit der von MeteoSchweiz gemessenen Temperatur zeigt.

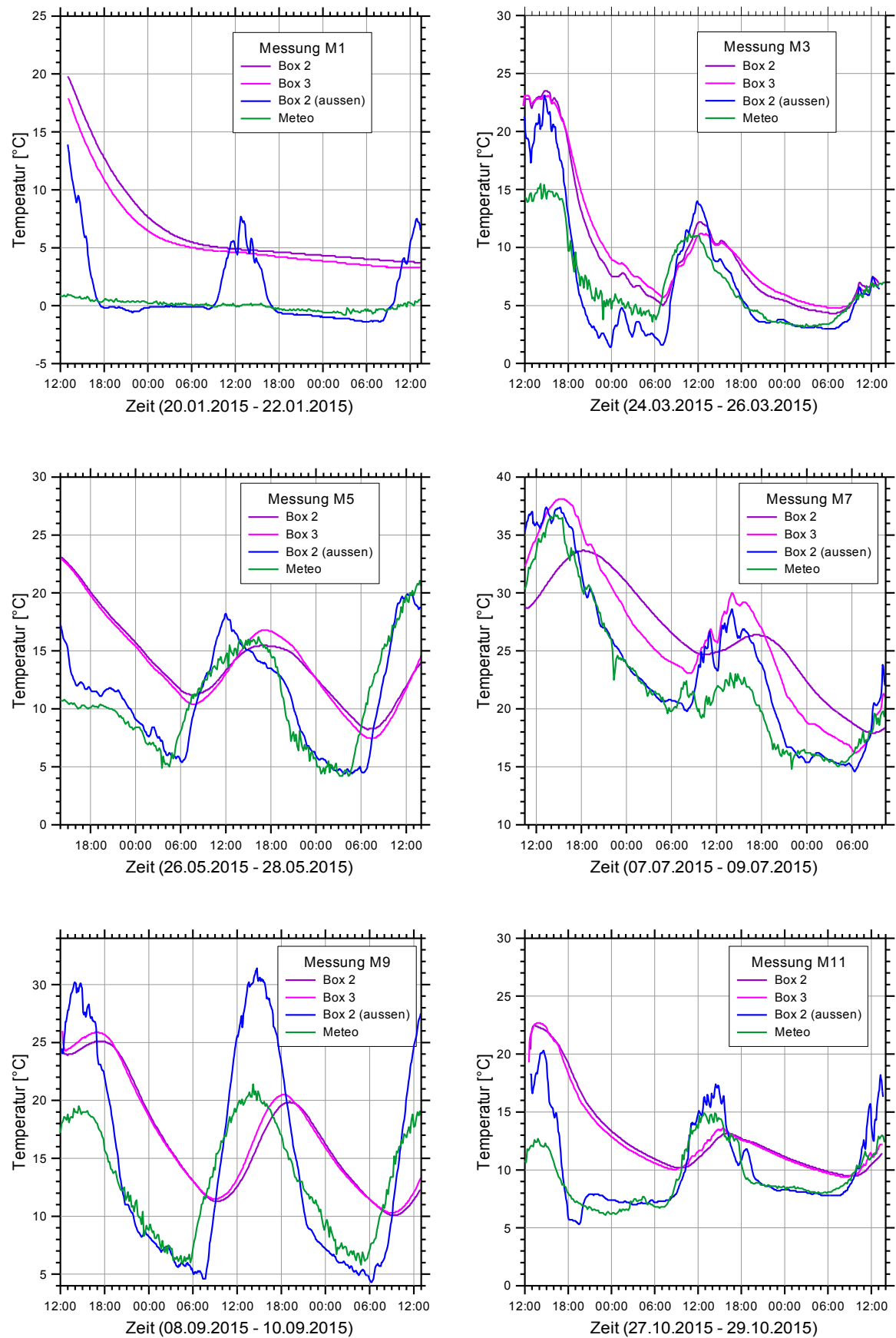


Abbildung 33: Temperaturmessung während der Messungen in Iffwil. „Meteo“ bezeichnet die 10-min-Werte der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz.

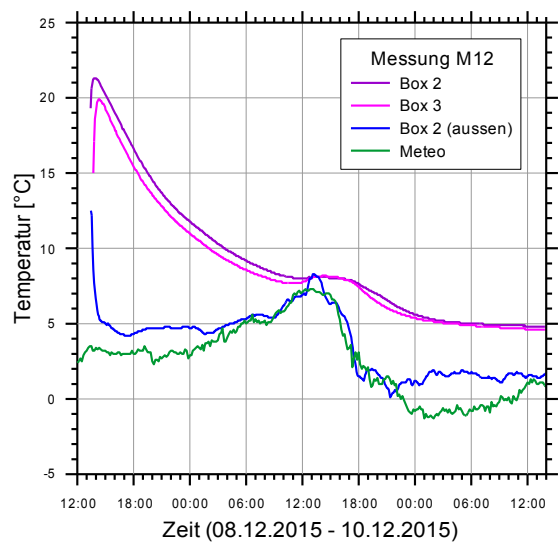
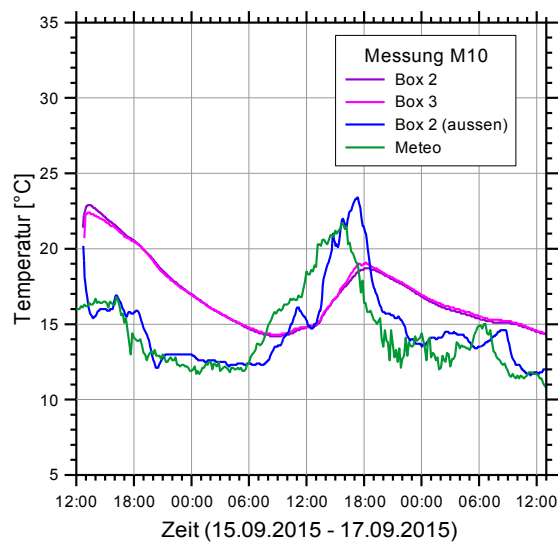
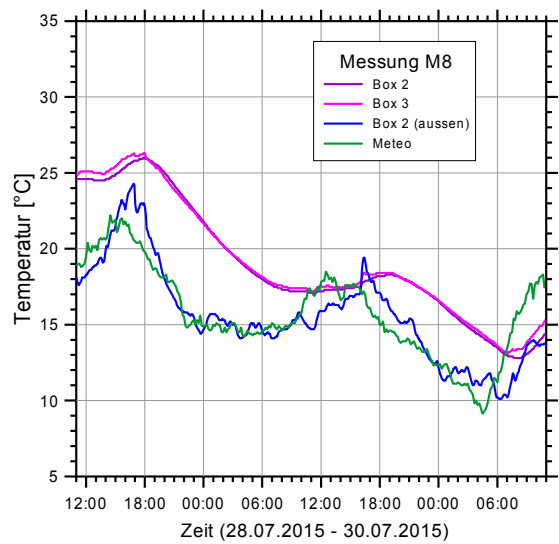
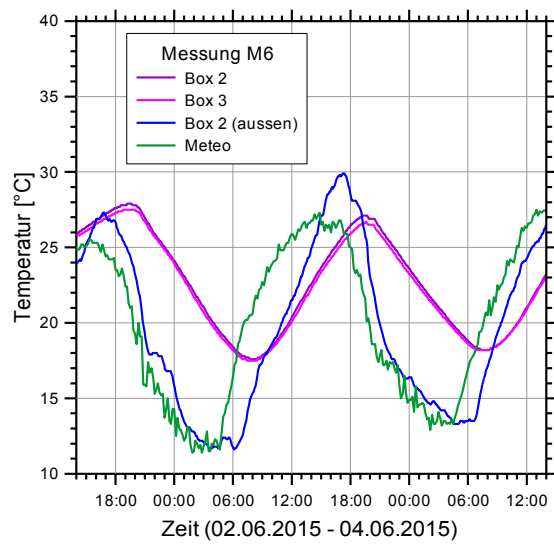
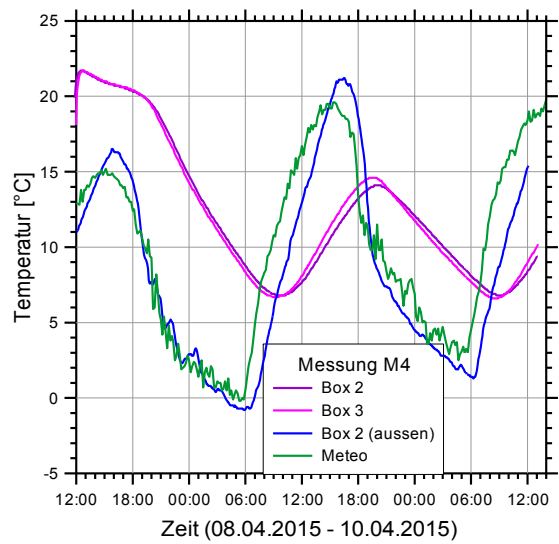
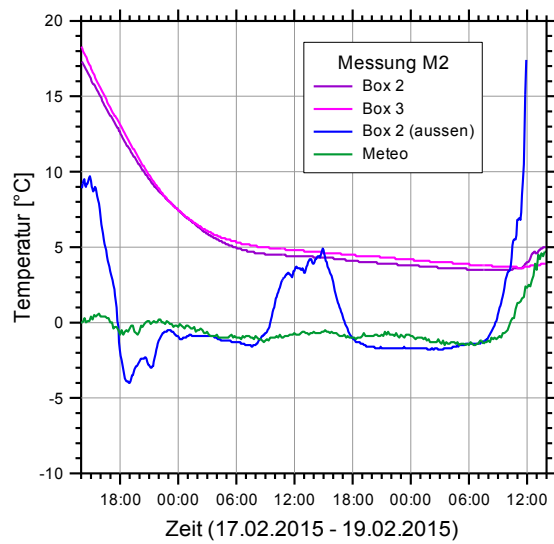


Abbildung 34: Temperaturmessung während der Messungen in Wiler. „Meteo“ bezeichnet die 10-min-Werte der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz.

4.8 Meteorologie und Repräsentativität der Messperioden

Für den Durchhang der Leiterseile spielen neben dem Strom auch die meteorologischen Parameter, welche zur Erwärmung oder Kühlung der Leiterseile beitragen, eine wichtige Rolle, namentlich die Lufttemperatur, die Sonneneinstrahlung und der Wind, vgl. [Kießling et al., 2001]. Für die Repräsentativität der Messperioden ist es deshalb wichtig, dass auch die meteorologischen Bedingungen in etwa die im Jahresverlauf zu erwarteten Variationen abdecken. Aus diesem Grund wurden von MeteoSchweiz noch die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit für die nächstgelegenen Meteostationen beschafft. Für diese Parameter wurden dann die Werte während der Messperioden mit denen für das ganze Jahr 2015 verglichen.

Die zu den Messorten nächstgelegenen Stationen von MeteoSchweiz sind in Zollikofen, Mühleberg, Grenchen und Koppigen. Sie sind auf der Karte in Abbildung 35 eingezeichnet. Zollikofen ist die nächste Station zum Messort Iffwil, Mühleberg die nächste zu Wiler. Allerdings liegt Mühleberg in einem relativ engen Einschnitt des Aaretals und ist für das relativ offene Gelände in Iffwil und Wiler nicht unbedingt repräsentativ. Für die Temperatur wurden deshalb die Werte von Zollikofen für beide Messorte verwendet. Weil auch Zollikofen stark durch die Topographie der Umgebung (Bantiger) beeinflusst ist, wurden für die Winddaten die Werte der Stationen Koppigen und Grenchen verwendet, welche sich wie die Messorte in relativ offenem Gelände befinden.

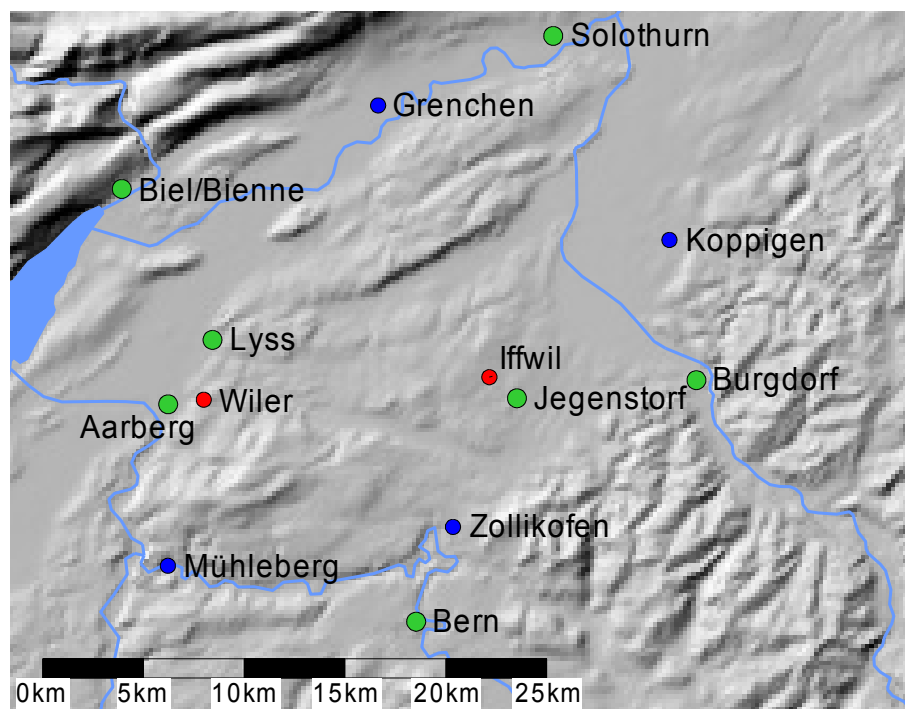


Abbildung 35: Nächstgelegene Messstationen von MeteoSchweiz (blaue Punkte). In Rot die beiden Messorte, in grün eine Reihe von Städten und Ortschaften zur Orientierung. Relief modelliert aus DHM25/200 © Swisstopo, Gewässer aus BFS/Themakart.

Die Abbildung 36 zeigt die Histogramme der in Zollikofen gemessenen Lufttemperatur sowohl für das ganze Jahr 2015 wie auch für die Messperioden. Die Histogramme sind normiert auf relative Häufigkeiten. Die zwei Histogramme sind sehr ähnlich. Einzige Ausnahme ist, dass während der Messperioden keine Temperaturen unter -2°C auftraten, während für das ganze Jahr doch etliche Werte bis zu -12°C zu sehen sind. Umgekehrt ist der Bereich -2°C bis 0°C während der Messperioden übervertreten. Es gab also durchaus kalte Temperaturen während der Messungen, sie waren aber nicht ganz so kalt wie an den kältesten Tagen. Insgesamt lässt sich sagen, dass während der Messungen praktisch der ganze auftretende Temperaturbereich abgedeckt wurde und somit die Messungen bezüglich Temperatur repräsentativ sind.

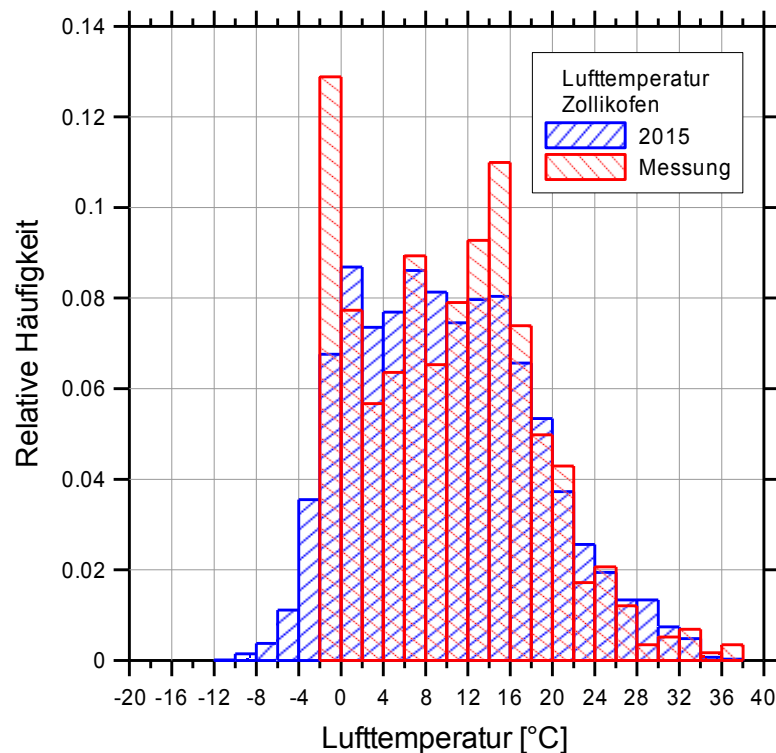


Abbildung 36: Vergleich der Lufttemperatur während der Messperioden und dem ganzen Jahr 2015, Histogramme für Daten der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz.

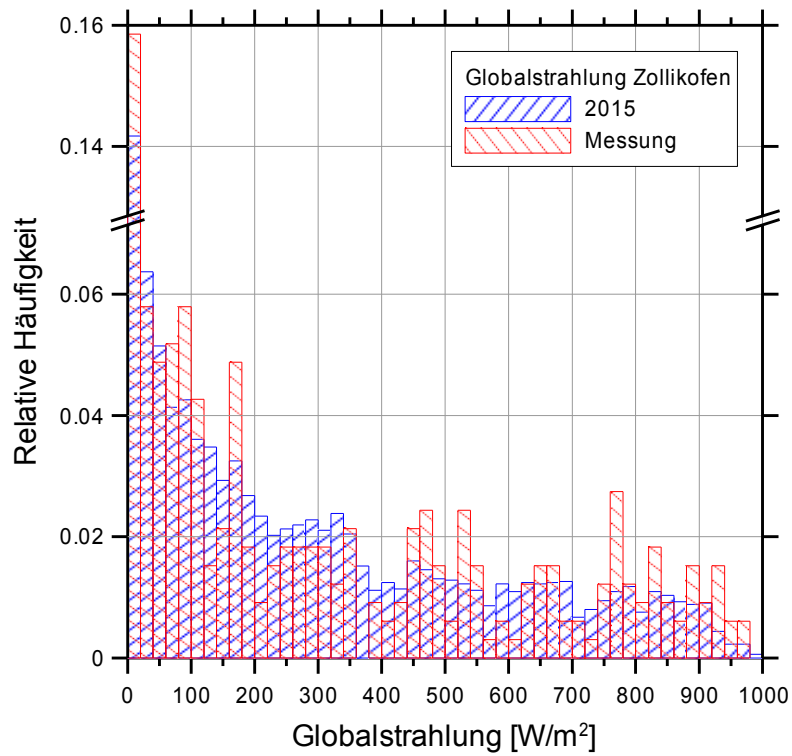
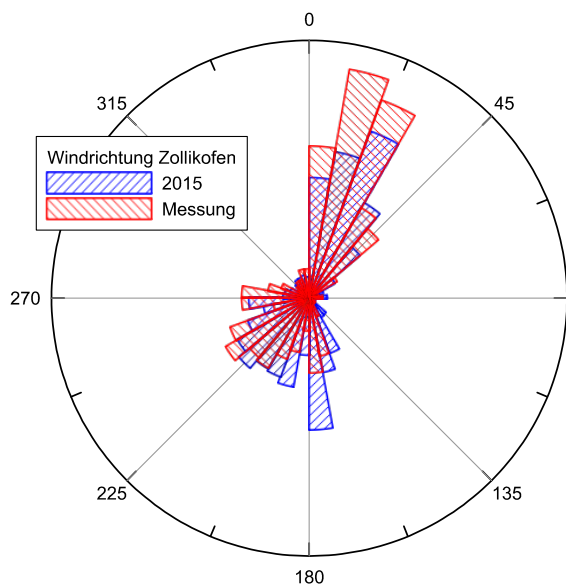
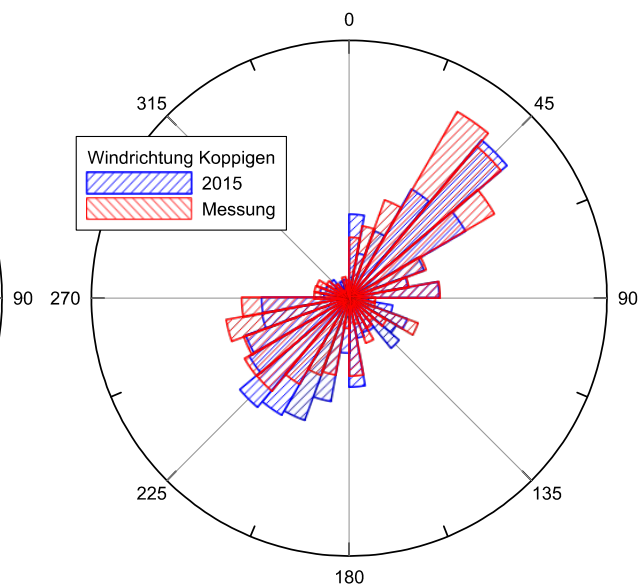


Abbildung 37: Vergleich der Globalstrahlung während der Messperioden und dem ganzen Jahr 2015, Histogramme für Daten der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz. Die Histogramme zeigen nur die positiven Werte (Globalstrahlung >0).

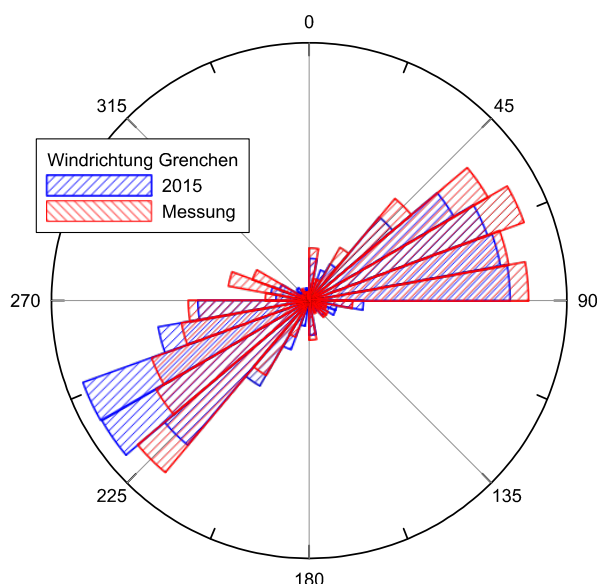
Die Abbildung 37 zeigt die Histogramme für die Globalstrahlung an der Messtation Zollikofen. Die beiden Verteilungen stimmen gut überein, bezüglich Sonnenstrahlung haben die Messperioden den möglichen Bereich abgedeckt und sind repräsentativ.



A: Zollikofen



B: Koppigen



C: Grenchen

Abbildung 38: Vergleich der Windrosen für die drei Stationen Zollikofen, Koppigen und Grenchen. In rot: Daten während der Messperioden, in blau: Daten für das ganze Jahr 2015.

Die Abbildung 38 zeigt den Vergleich zwischen den Windrosen für 2015 und denen für die Messperioden (Histogramme der Windrichtung in Polarkoordinaten). Die Grafiken für Koppigen und Grenchen sind ähnlich, mit Hauptwindrichtungen von Nordost und Südwest. In Zollikofen tendiert die Verteilung mehr Richtung Nord-Süd, wohl bedingt durch den Einfluss des Bantigers und des Aaretals. Für Koppigen und Grenchen sind die Windrosen für die Messperioden und für das ganze 2015 jeweils sehr ähnlich.

Die Abbildung 39 zeigt die Windrosen, mit den Daten aufgeschlüsselt nach den Messperioden in Iffwil und Wiler. Während der Messungen in Iffwil war sehr häufig Nordostwind, in Wiler auch häufig West- bis Südwestwind. Insgesamt sind die Messperioden auch bezüglich der Hauptwindrichtungen repräsentativ.

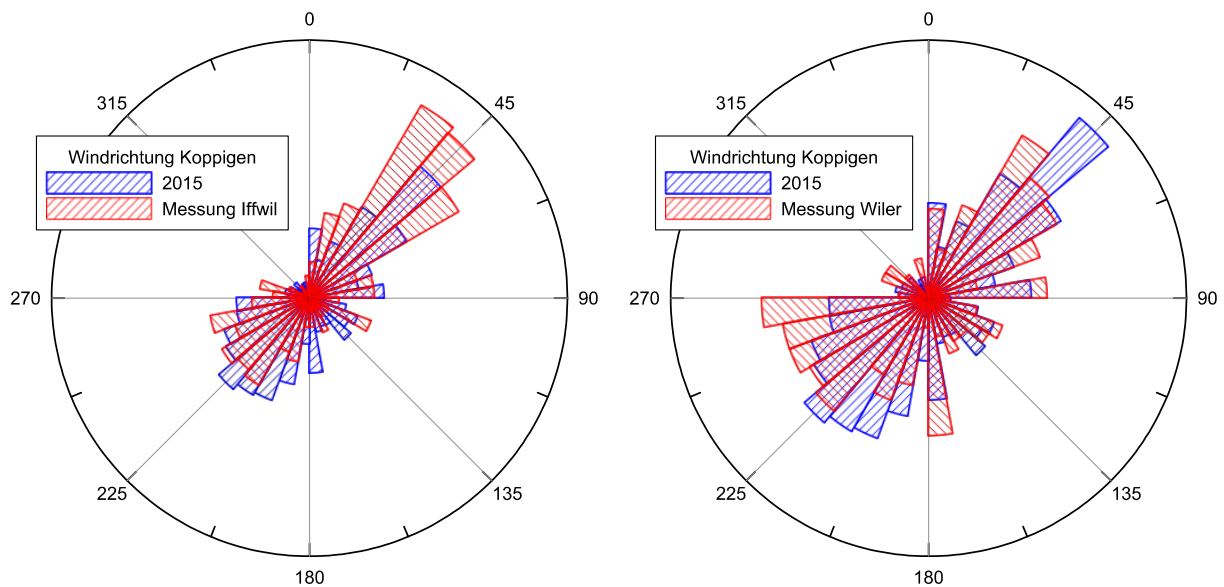


Abbildung 39: Vergleich der Windrosen während der Messungen in Iffwil (links) und Wiler (rechts). Daten der Messstation Koppigen. Die Skalen der beiden Windrosen sind unterschiedlich.

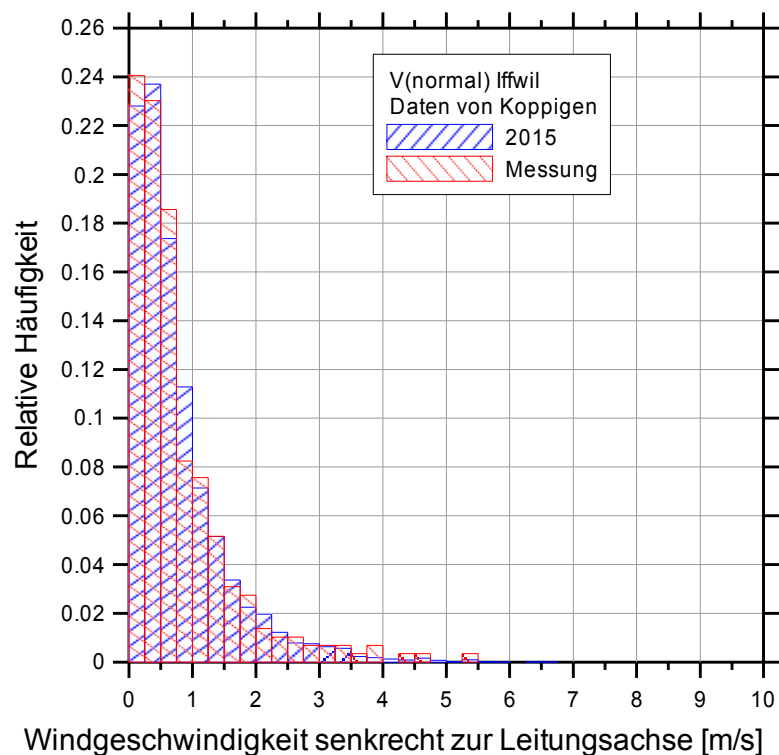


Abbildung 40: Histogramm der Windkomponente rechtwinklig zur Leitungsachse in Iffwil. Rot: Daten während der Messperioden in Iffwil, blau: ganzes Jahr 2015. Daten der Station Koppigen von MeteoSchweiz.

Die Abbildungen 40 (für Iffwil) und 41 (für Wiler) zeigen schliesslich noch die Histogramme der Windkomponente rechtwinklig zur Leitungsachse. Diese Komponente ist verantwortlich für die seitliche Auslenkung der Leiterseile und auch wesentlich für deren Kühlung. Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt deutlich, dass Querwinde in Iffwil deutlich schwächer sind als in Wiler. Grund ist natürlich die jeweilige Ausrichtung der Leitung relativ zu den Hauptwindrichtungen (parallel in Iffwil, rechtwinklig in Wiler). An beiden Messorten sind die Verteilungen für die Windkomponente rechtwinklig zur Leitung für die Messperioden und das ganze Jahr jeweils sehr ähnlich. In Wiler sieht man noch einen langen Ausläufer der Vertei-

lung zu Werten > 6 m/s mit kleinen Häufigkeiten, aber insgesamt sind die Messperioden auch bezüglich der Windgeschwindigkeiten repräsentativ.

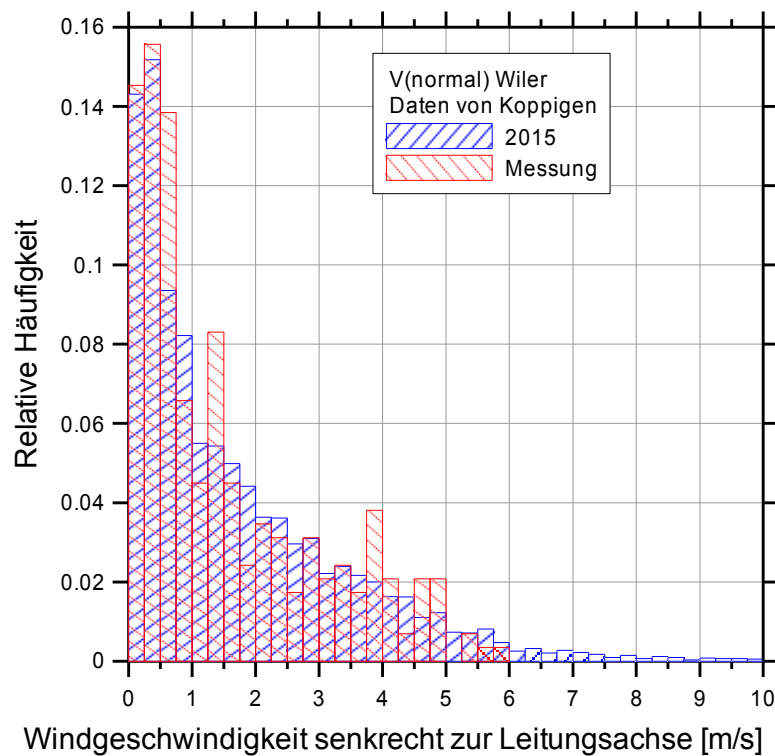


Abbildung 41: Histogramm der Windkomponente rechtwinklig zur Leitungsachse in Wiler. Rot: Daten während der Messperioden in Wiler, blau: ganzes Jahr 2015. Daten der Station Koppigen von MeteoSchweiz.

4.9 Höhe der Leiterseile

Für jede Messperiode wurden zu Beginn und am Ende der Messung die Höhen der untersten Leiterseile mit dem Laser-Distanzmesser bestimmt, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben. Dabei wurden aus drei Messungen sowohl die Höhe h als auch die seitliche Auslenkung δ_x bestimmt und deren Fehler abgeschätzt (ausgenommen bei den Messperioden M1 und M2, wo nur zwei Messungen gemacht wurden, was keine Fehlerabschätzung erlaubt).

In den Tabellen und Grafiken dieses Abschnitts ist (A) der Punkt unter dem untersten Leiter von MUO-BIK und (B) derjenige unter dem untersten Leiter von MUO-LIN für die Messung in Iffwil, für Wiler ist (A) der Punkt unter dem untersten, äusseren Leiter des untersten Viererbündels für MUO-PIE und (B) der analoge Punkt für MUO-KAP. An beiden Messorten ist (A) auf der Seite mit $D > 0$ und (B) auf der Seite $D < 0$. Die Grössen $h(A)$ und $h(B)$ bezeichnen die Höhe des entsprechenden Leiterseils über diesen Punkten, $\delta_x(A)$ und $\delta_x(B)$ in analoger Weise die seitliche Auslenkung der entsprechenden Leiter gegenüber der nominellen Position (direkt über A bzw. B). Die Resultate der Höhenmessungen sind in den Tabellen 20 (für Iffwil) und 21 (für Wiler) angegeben. Ebenfalls angegeben ist die aus dem Durchhang bei 10°C berechnete nominelle Höhe. Diese ist abhängig vom Höhenmodell, für die Werte in den beiden Tabellen wurde das DHM5 verwendet. Auch für das symmetrische Mastbild der Leitung in Iffwil sind die nominellen Höhen über (A) und (B) um 40 cm verschieden, weil das Gelände leicht geneigt ist, in Wiler beträgt der Unterschied sogar 1.30 m, weil dort auch die Isolatoren (für den 220 kV- bzw. 132 kV-Strang) ungleich lang sind.

Ebenfalls in den Tabellen enthalten ist die Umgebungstemperatur. Der angegebene Wert ist der Stundenmittelwert an der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz für die Zeit der Hö-

henmessung. Eine weitere Spalte gibt an, ob die Leiterseile sich während der Messung merklich bewegten (diese Angabe ist aber möglicherweise nicht ganz vollständig).

Die angegebenen Fehlerspannen sind die aus den je drei Laser-Messungen bestimmten Fehler gem. Anhang C. Ein allfälliger systematischer Fehler ist darin nicht berücksichtigt. Ein solcher tritt sicher dann auf, wenn die Leiterseile sich während der Messung bewegten. In den beiden ersten Messperioden wurde nur von je zwei Punkten aus gemessen, so dass keine Unsicherheit angegeben werden kann. Für die entsprechenden Werte ist ein „?“ eingesetzt.

Die Unterschiede zwischen $h(A)$ und $h(B)$ betrugen in Iffwil im Mittel etwa 65 cm und in Wiler 1.80 m. Das ist an beiden Messorten etwas höher als gemäss den nominellen Höhen, entspricht aber den Unsicherheiten aus dem numerischen Höhenmodell und aus der Rauigkeit des Bodens. In Iffwil sind die beobachteten seitlichen Auslenkungen klein (bis ca. 10 cm). Eine Ausnahme bildet die Messung am Ende von M5 mit 66 cm, dies ist aber möglicherweise auf einen Messfehler zurückzuführen, weil nur bei einem der beiden Stränge beobachtet. Für diese Messung ist auch der Höhenunterschied zwischen A und B (1 m) deutlich höher als für alle anderen.

In Wiler sind die beobachteten seitlichen Auslenkungen mit typisch 40 cm bis 80 cm deutlich grösser als in Iffwil. Sie sind auch konsistent mit visuellen Beobachtungen (Ausrichtung von Leiterseil und Isolator). Der Unterschied zwischen den beiden Messorten erklärt sich aus dem unterschiedlichen Verlauf der Leitungen relativ zu den Hauptwindrichtungen (Südost und Nordwest, vgl. Abschnitt 4.8): In Iffwil weht der Wind vorwiegend parallel zur Leitung, in Wiler vorwiegend rechtwinklig dazu.

Für die Näherungen im Modell wurde argumentiert, dass der Durchhang mit Ausnahme von extrem hohen Lastflüssen in etwa dem Durchhang bei Umgebungstemperatur entspricht. In den Abbildungen 42 (für Iffwil) und 43 (für Wiler) sind die gemessenen Seilhöhen als Funktion der Lufttemperatur aufgetragen. Man sieht deutlich, dass die Lufttemperatur ein guter Ordnungsparameter für die Seilhöhe (bzw. den Durchhang) ist. Ebenfalls eingezeichnet ist die aus den Tabellen berechnete Seilhöhe als Funktion der Leitertemperatur. Die Änderung der Seilhöhe bei geänderter Temperatur (für die betrachteten Spannweiten ca. 1 m pro 30° Temperaturänderung) stimmt gut mit den gemäss den Tabellen erwarteten Werten überein. Die Kurven der beobachteten Werte weichen um etwa 20 - 50 cm von den Nominalwerten ab (am stärksten für das Vierer-Bündel in Wiler), was sich durch Modell- und Messfehler, Ungenauigkeiten des Terrainmodells und Bodenrauigkeit leicht erklären lässt, und allenfalls auch durch Alterung der Leiterseile.

Messung	$h(A) [m]$	$h(B) [m]$	$\delta_x(A) [m]$	$\delta_x(B) [m]$	$T [^{\circ}C]$	bewegt
Nominell, bei 10°C	12.2	11.8			10	
M1, Start	12.53 ± ?	11.94 ± ?	0.00 ± ?	-0.24 ± ?	0.7	
M1, Ende	12.72 ± ?	12.10 ± ?	-0.10 ± ?	-0.01 ± ?	0.7	
M3, Start	11.95 ± 0.02	11.21 ± 0.01	-0.14 ± 0.04	-0.09 ± 0.02	14.4	
M3, Ende	12.37 ± 0.03	11.76 ± 0.03	-0.06 ± 0.06	0.06 ± 0.06	6.8	
M5, Start	12.12 ± 0.06	11.53 ± 0.04	-0.05 ± 0.11	0.13 ± 0.07	10.5	
M5, Ende	11.83 ± 0.00	10.82 ± 0.13	0.01 ± 0.01	-0.66 ± 0.28	21.5	
M7, Start	11.47 ± 0.02	10.91 ± 0.02	0.10 ± 0.04	-0.01 ± 0.03	32.3	
M7, Ende	12.09 ± 0.02	11.32 ± 0.06	-0.11 ± 0.04	-0.07 ± 0.06	21.1	ja
M9, Start	12.03 ± 0.14	11.46 ± 0.01	-0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.02	18.5	
M9, Ende	11.86 ± 0.04	11.31 ± 0.03	-0.01 ± 0.08	-0.06 ± 0.06	19.2	
M11, Start	12.04 ± 0.04	11.50 ± 0.02	-0.08 ± 0.07	-0.10 ± 0.04	12.2	
M11, Ende	11.99 ± 0.03	11.47 ± 0.02	-0.04 ± 0.06	0.02 ± 0.03	12.5	

Tabelle 20: Messung der Höhe und der seitlichen Auslenkung der untersten Leiterseile für die Messperioden in Iffwil. Punkt A ist unter dem Leitungsstrang MUO-BIK, Punkt B unter dem Leitungsstrang MUO-LIN. T ist die Temperatur an der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz. Ein Eintrag unter „bewegt“ bedeutet, dass die Leiterseile sich während der Messung merkbar bewegten.

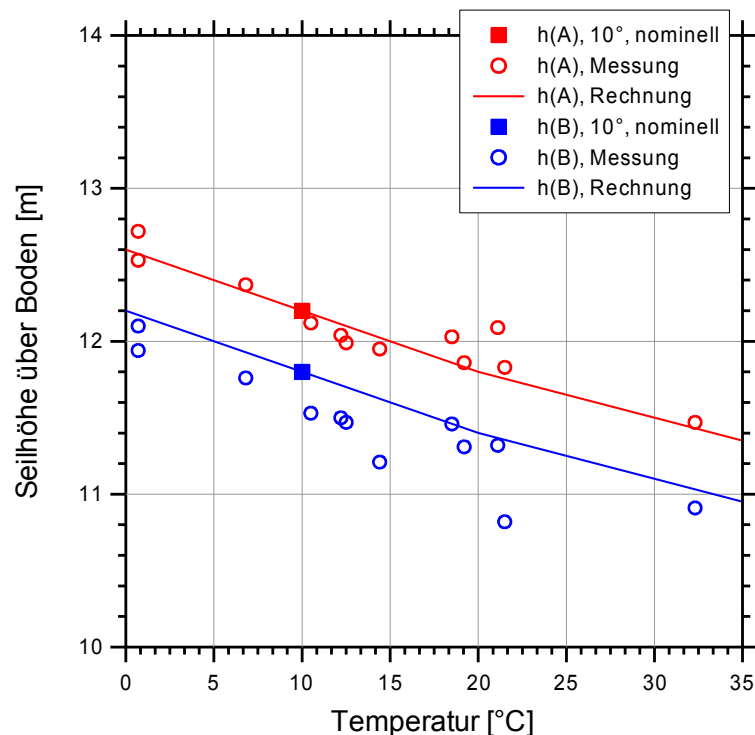


Abbildung 42: Höhe der untersten Leiterseile während der Messungen in Iffwil, aufgetragen als Funktion der Lufttemperatur (MeteoSchweiz-Station in Zollikofen). Quadrate bezeichnen die aus dem Durchhang und Höhenmodell berechneten Nominalhöhen bei 10°C, Messwerte sind als Kreise eingezeichnet. Die durchgezogenen Linien sind die gemäss den Durchhangstabellen berechneten Seilhöhen als Funktion der Leitertemperatur.

Messung	$h(A) [m]$	$h(B) [m]$	$\delta_x(A) [m]$	$\delta_x(B) [m]$	$T [^{\circ}C]$	bewegt
Nominell, bei 10°C	19.50	20.80			10	
M2, Start	$19.09 \pm ?$	$21.00 \pm ?$	$-0.23 \pm ?$	$-0.22 \pm ?$	0.4	
M2, Ende	$19.15 \pm ?$	$20.88 \pm ?$	$0.40 \pm ?$	$-0.43 \pm ?$	5.8	
M4, Start	18.96 ± 0.03	20.73 ± 0.27	-0.07 ± 0.07	0.13 ± 0.56	14.1	ja
M4, Ende	18.89 ± 0.22	20.58 ± 0.02	0.39 ± 0.49	0.71 ± 0.04	18.9	
M6, Start	18.58 ± 0.10	20.32 ± 0.06	0.82 ± 0.24	0.68 ± 0.14	25.3	ja
M6, Ende	18.41 ± 0.07	20.33 ± 0.07	-0.02 ± 0.16	0.04 ± 0.14	28	
M8, Start	18.99 ± 0.15	20.45 ± 0.37	0.43 ± 0.33	0.44 ± 0.77	19.8	
M8, Ende	18.66 ± 0.00	20.39 ± 0.12	0.45 ± 0.01	0.63 ± 0.24	19.5	
M10, Start	18.92 ± 0.03	20.84 ± 0.01	0.35 ± 0.06	0.71 ± 0.03	16.5	
M10, Ende	19.15 ± 0.30	20.97 ± 0.09	0.49 ± 0.67	0.41 ± 0.18	12.2	
M12, Start	19.36 ± 0.21	21.27 ± 0.06	0.36 ± 0.47	0.62 ± 0.13	3.1	
M12, Ende	19.24 ± 0.33	21.15 ± 0.00	0.57 ± 0.74	0.45 ± 0.00	1.3	

Tabelle 21: Messung der Höhe und der seitlichen Auslenkung der untersten Leiterseile für die Messperioden in Wiler. Punkt A ist unter dem Leitungsstrang MUO-PIE, Punkt B unter dem Leitungsstrang MUO-KAP. T ist die Temperatur an der Messstation Zollikofen von MeteoSchweiz. Ein Eintrag unter „bewegt“ bedeutet, dass die Leiterseile sich während der Messung merkbar bewegten.

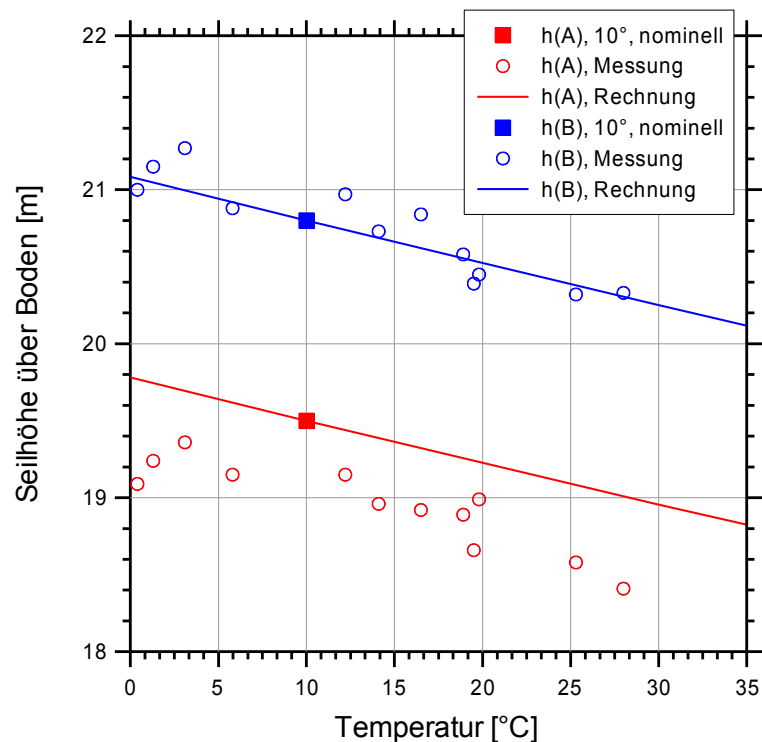


Abbildung 43: Höhe der untersten Leiterseile während der Messungen in Wiler, aufgetragen als Funktion der Lufttemperatur (MeteoSchweiz-Station in Zollikofen). Quadrate bezeichnen die aus dem Durchhang und Höhenmodell berechneten Nominalhöhen bei 10°C, Messwerte sind als Kreise eingezeichnet. Die durchgezogenen Linien sind die gemäss den Durchhangstabellen berechneten Seilhöhen als Funktion der Leitertemperatur.

4.10 Modellfehler in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

Wenn, wie in Abschnitt 4.9 gezeigt, der Durchhang und die Höhe der Leiterseile über Boden wesentlich von der Umgebungstemperatur abhängen, dann ist es naheliegend zu erwarten, dass auch die Abweichung von Modell und Messung sich als Funktion der Umgebungstemperatur ändert. Mit zunehmender Lufttemperatur hängen die Leiterseile tendenziell tiefer und das Magnetfeld am Boden nimmt tendenziell zu. Da das Modell mit einem konstanten Durchhang rechnet, sind die modellierten Magnetfelder unabhängig von der Umgebungstemperatur. Es wäre deshalb zu erwarten, dass Δ , die relative Abweichung des Modells von der Messung, mit zunehmender Temperatur kleiner wird. Diese Abhängigkeit müsste am stärksten sein für Messpunkte nahe der Leitungsachse, aber nur schwach oder nicht vorhanden für Punkte fern davon.

Die Abbildungen 44 und 45 zeigen die relative Abweichung Δ als Funktion der mittleren Lufttemperatur während der Messung. Für die Lufttemperatur verwendet wurde der Mittelwert aus den 10-Minutenwerten der Station Zollikofen von MeteoSchweiz, ausgewertet für die 48 Stunden der jeweiligen Messung. Für das Modell wurden die Werte von *Modell C* (Betrag von B und Geländemodell DHM5) verwendet. Die Werte für Punkte nahe der Leitungsachse sind rot eingezeichnet, die für die übrigen Messpunkte in schwarz. In Iffwil sieht man auch für die achsennahen Messpunkte keine Korrelation zwischen Modellfehler und Lufttemperatur. Anders für die Messungen in Wiler, dort nimmt die relative Abweichung des Modells für die achsennahen Punkte mit zunehmender Temperatur ab, so wie man es erwarten würde.

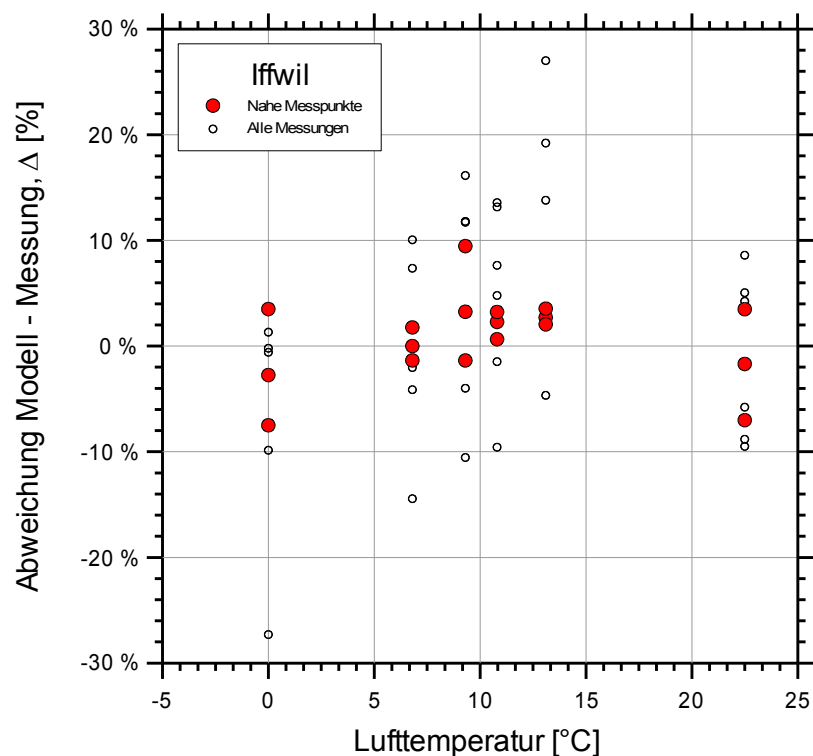


Abbildung 44: Abhängigkeit des Modellfehlers Δ von der Umgebungstemperatur, für die Messungen in Iffwil. In rot: Messpunkte nahe der Leitungsachse ($d=0, \pm 10$ m), kleine schwarze Symbole: Messungen für alle Distanzen. Die Lufttemperatur ist die Durchschnittstemperatur während der 48 h der Messung, bestimmt aus den 10-Minutenwerten der Station Zollikofen.

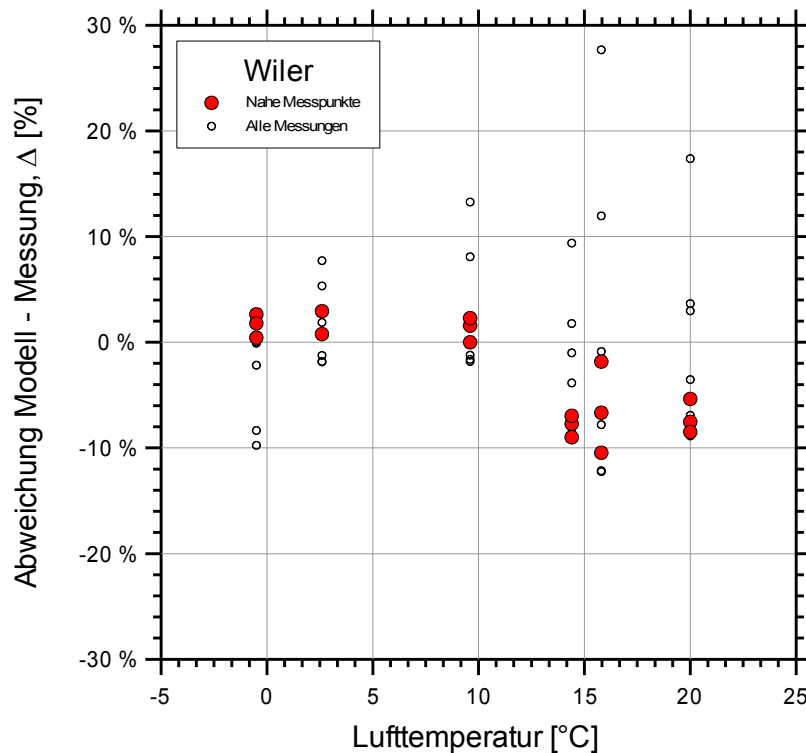


Abbildung 45: Abhängigkeit des Modellfehlers Δ von der Umgebungstemperatur, für die Messungen in Wiler. In rot: Messpunkte nahe der Leitungsachse ($d=0, \pm 10$ m), kleine schwarze Symbole: Messungen für alle Distanzen. Die Lufttemperatur ist die Durchschnittstemperatur während der 48 h der Messung, bestimmt aus den 10-Minutenwerten der Station Zollikofen.

Tabelle 22: Korrelation zwischen der relativen Abweichung Modell-Messung mit der Umgebungstemperatur für Modell C.

Die Tabelle 22 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen dem Modellfehler Δ und der Umgebungstemperatur, unterschieden zwischen den beiden Messorten und jeweils für alle Messpunkte oder nur für die achsennahen Punkte ($|d| \leq 10$ m). Für die nahen Messpunkte sieht man eine deutliche Antikorrelation in Wiler ($\kappa = -0.81$), aber nicht in Iffwil. Für die Gesamtheit der Messpunkte ist jeweils keine Korrelation zu erkennen, eine solche ist auch kaum zu erwarten.

Das Beispiel der nahen Messpunkte für Wiler zeigt, dass die im Modell vernachlässigte Abhängigkeit der Höhe der Leiterseile von der Temperatur einen guten Teil des Modellfehlers erklären kann, aber umgekehrt zeigt die fehlende Korrelation in Iffwil, dass die Modellfehler offensichtlich auch noch andere Ursachen haben.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Pilotprojekt von 2010/2011 wurde gezeigt, dass die Modellierung von Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen für einen Immissionskataster möglich ist. Es wurde eine Methodik entwickelt, mit der Jahresmittelwerte der magnetischen Flussdichte berechnet werden können. Diese Methodik weist zwangsweise gewisse vereinfachende Annahmen auf. Dies sind zum Beispiel Vernachlässigungen von temperaturbedingten Schwankungen im Durchhang der Leiterseile, von im Erdseil induzierten Strömen, von Abweichungen von ideal symmetrisch belasteten Phasen und Ungenauigkeiten in den Koordinaten, insbesondere der aus einem digitalen Terrainmodell interpolierten Höhen. Im hier vorgestellten Projekt wurde diese Methodik anhand von stichprobenweise durchgeführten Messungen validiert, und es wurde gezeigt, dass Modell und Messung sehr gut übereinstimmen.

Die Messungen wurden an zwei verschiedenen Leitungen an zwei verschiedenen Messorten durchgeführt, zum einen an der 2x220-kV-Leitung Mühleberg-Bickingen/Lindenholz in Iffwil und zum andern an der 220-kV/132-kV-Leitung Mühleberg-Pieterlen/Kappelen in Wiler bei Seedorf.

Um die jahreszeitlichen Schwankungen zu erfassen, wurde pro Messort während sechs Messperioden im Abstand von ca. zwei Monaten gemessen, und um die tageszeitlichen Schwankungen zu erfassen, wurde in jeder Messperiode während 48 Stunden kontinuierlich gemessen. Die Messperioden dauerten jeweils von Dienstag bis Donnerstag (mit einer Ausnahme: Mittwoch bis Freitag in der Woche nach Ostern). Insgesamt umfassen die Messperioden die Zeit von Januar bis Dezember 2015.

An beiden Messorten wurde pro Messung ein Querprofil der magnetischen Flussdichte gemessen, mit neun Messpunkten entlang einer Linie ungefähr rechtwinklig¹ zur Leitungsachse in der Mitte einer Spannweite an denen zeitsynchron gemessen wurde. Die Messgeräte wurden bei

$$D=0, \pm 10 \text{ m}, \pm 20 \text{ m}, \pm 40 \text{ m}, \pm 80 \text{ m} \quad (36)$$

aufgestellt (D : Orthogonaldistanz von der Leitungsachse). Ausgewertet wurde der Betrag des Vektors der magnetischen Flussdichte. Die Messgeräte befanden sich ca. 10 cm über Boden.

Die Abbildung 46 zeigt nochmals die beiden Messorte und die Messpunkte auf den Feldwegen, entlang derer das Querprofil bestimmt wurde.

Die benötigten technischen und Betriebsdaten der Leitungen wurden von Swissgrid (für die 220-kV-Leitungen) und von den BKW (für die 132-kV-Leitung in Wiler) zur Verfügung gestellt. Die Leitung Mühleberg-Bickingen/Lindenholz wurde analog wie bereits im Pilotprojekt modelliert, für die Leitung Mühleberg-Pieterlen/Kappelen wurden sechs Spannweiten modelliert. Es wurden insgesamt vier Modellvarianten berechnet: Je zwei mit Höhen aus dem DHM25 (A und B) und zwei mit dem genaueren Höhenmodell DHM5 (C und D); für A und C wurde der Zeitmittelwert des Betrags der magnetischen Flussdichte $\bar{B}$ berechnet, für B und D der RMS-Mittelwert. Für den Vergleich wurden die magnetischen Flussdichten ebenfalls für 10 cm über Grund berechnet.

Die relativen Abweichungen von Modell und Messung (Δ , Gl. 32) betrugen zwischen 4 % (Iffwil) und 8 % (Wiler) für Modell A und B, mit Schwankungsbreite (1σ) von maximal 11 %. Mit dem genaueren Höhenmodell für Modell C und D verringerten sich die relativen Abweichungen auf 2 % und besser, mit Schwankungsbreiten $\sigma \leq 9$ %.

Mit einem präzisen Höhenmodell lassen sich also die Feldstärken auf wenige Prozent genau modellieren, und auch die Ungenauigkeiten sind in dem Bereich, der im Pilotprojekt vorausgesagt wurde (Pilotprojekt: 11 % bis 25 %, aus der Validierung: erweiterte Ungenauigkeit $2\sigma = 16$ % bis 22 %).

1 Der Winkel zwischen Leitungsachse und Querprofil beträgt 84.6° in Iffwil und 68.5° in Wiler.

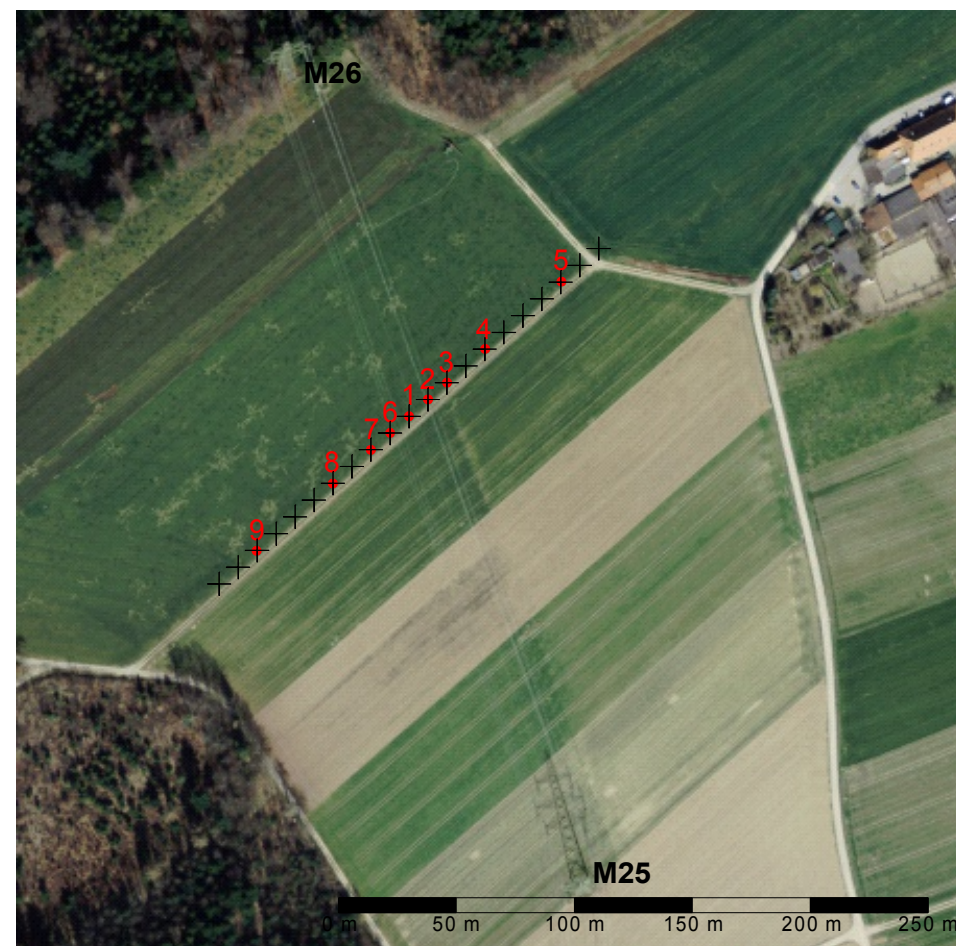
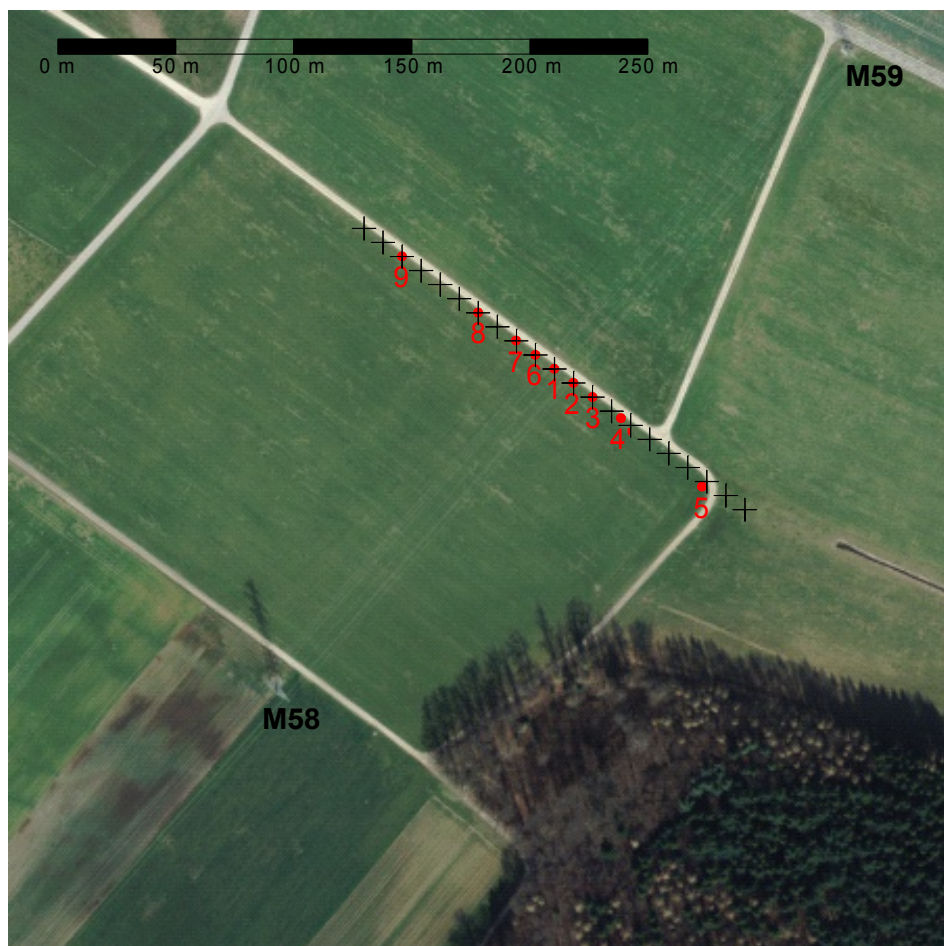


Abbildung 46: Orthophotos der Messorte in Iffwil (links) und Wiler (rechts). Die roten, nummerierten Punkte sind die Messpunkte, die schwarzen Kreuze zeigen den Verlauf des berechneten Profils (jeder 10. Punkt).

Neben dem zeitlichen Mittel des Betrags der magnetischen Flussdichte $\bar{B}$ wurde auch der RMS-Mittelwert B_{RMS} für die Auswertung verwendet. $\bar{B}$ und B_{RMS} sind extrem stark korreliert ($\rho > 0.995$ für die Messdaten). B_{RMS} ist gegenüber $\bar{B}$ um einige Prozent höher. Weil der RMS-Mittelwert für Situationen mit vielen Leitungssträngen einfacher zu modellieren ist als $\bar{B}$, ist er für einen grossflächigen Kataster eher besser geeignet.

Das Modell ist für Punkte nahe der Leitungsachse präziser als für Punkte fern der Achse, jedenfalls dann, wenn die Höhen der Leiterseile über Grund aus einem präzisen Höhenmodell bestimmt werden. Mit ungenauen Höhen werden dann vor allem die achsennahen Punkte falsch, da dort die Distanz zu den Leitern massgebend von deren Höhe bestimmt wird. Diese Punkte werden auch am meisten durch die Näherung für den Durchhang beeinflusst.

Die grössten Fehler traten meist bei grossen Distanzen von der Leitungsachse auf. Diese Punkte sind von der Näherung für den Durchhang und der Höhe der Leiterseile kaum beeinflusst. Ein möglicher Grund für die Abweichungen wäre hingegen die Vernachlässigung von im Erdseil induzierten Strömen und von in den Leiterseilen induzierten Summenströmen. Diese Ströme betragen typischerweise bis zu einigen Prozent der symmetrischen Ströme. Nahe der Leitungsachse ist ihr Beitrag klein. Da die Magnetfelder dieser „unbalancierten“ Ströme aber mit der Distanz weniger schnell abfallen als für die symmetrischen Ströme, wird ihr Einfluss mit zunehmender Distanz grösser. Es ist also möglich, dass mit der Berücksichtigung von induzierten Strömen das Modell noch verbessert werden könnte.

Die grösste Abweichung zwischen Modell und Messung trat auf beim Messpunkt 9 (Distanz -80 m) in Messung M8 und betrug 29 % (für Modell A). Der Grund ist, wie oben beschrieben, wahrscheinlich die Vernachlässigung von induzierten Strömen.

Eine weitere grosse Abweichung von -28 % ergab sich bei der ersten Messung beim Punkt 4 (Distanz 40 m). Grund dafür war ein eiserner Schachtdeckel, welcher im Schnee zugedeckt und deshalb übersehen worden war. Gerade dieses Versehen führt aber zu einer wichtigen Schlussfolgerung: Die Magnetfelder resultieren nicht nur aus den Strömen in der Hochspannungsleitung allein, sondern werden auch beeinflusst durch induzierte Ströme in leitenden und/oder magnetischen Gegenständen, welche in der realen Welt die Magnetfelder der Leitung verformen und verstärken oder abschwächen.

In Wiler war die Anordnung von Leitung, Weg und Gelände viel unregelmässiger als in Iffwil. Der Feldweg kreuzt zwar die Leitung ungefähr in der Mitte der Spannweite. Weil aber der eine Mast viel höher ist als der andere, ist die Leitung dort viel höher über dem Weg als in Iffwil, und der bodennächste Punkt befindet sich zwischen dem Feldweg und dem Mast südlich davon. Auch kreuzt der Feldweg die Leitung in einem etwas schiefen Winkel. Die Situation in Wiler ist also geometrisch komplizierter und insbesondere die Dimension Höhe ist dort wichtiger als im relativ ebenen Iffwil. Entsprechend war es dann auch bei der Auswertung der Daten von Wiler, dass die Fehler bei der Verwendung des DHM25 augenfällig wurden.

Da die Messgeräte (Emdex und ESTEC) nur für Temperaturen $>0^\circ\text{C}$ spezifiziert sind, wurden sie in thermisch isolierten Kisten aufgestellt und mit einem „Phase-Change-Material“ thermisch gepuffert. Diese Warmhaltung der Messgeräte hat sehr gut funktioniert, sie blieben immer im spezifizierten Bereich. Nur bei sehr viel kälteren Temperaturen, als während der Messperioden aufgetreten sind, müsste die thermische Pufferung allenfalls noch verstärkt werden. Eine zuerst vorgesehene Messung des Temperaturverhaltens der Messgeräte in einer Kältekammer wurde hingegen nicht durchgeführt.

Bei den Emdex-Geräten sind mehrmals Batterieprobleme aufgetreten, wodurch während drei Messperioden die Daten für je einen Messpunkt verloren gingen. Es scheint, als ob diese Geräte Probleme mit Kurzschlüssen oder Entladungen haben können. Unklar ist, ob diese Batterieprobleme etwas mit kalten Temperaturen zu tun haben, denn die drei Datenverluste traten alle bei Messungen mit winterlichen Nachttemperaturen auf. Umgekehrt gab es aber auch ein Batterieproblem, das bereits zu Beginn der Messung festgestellt wurde, als

das Messgerät noch auf Zimmertemperatur war. Auf jeden Fall ist es sehr wichtig, die Batteriekontakte sehr sorgfältig zu befestigen.

Bewährt hat sich die Suche nach schwach frequentierten Messorten. Sie hat das Risiko von Diebstahl oder Beschädigung der unbeaufsichtigten Messgeräte erheblich gesenkt, und die Messeinrichtung blieb während allen Messperioden unbehelligt.

Mit den Messperioden wurde sowohl bezüglich der Lastflüsse wie auch bezüglich der Meteorologie ein weiterer Bereich abgedeckt, der die über das Jahr wechselnden Bedingungen gut repräsentiert.

Während jeder Messperiode wurden zu Beginn und am Ende die Bodenabstände der Leiterseile mit einem Laser-Distanzmesser bestimmt. Die Verwendung eines Lasers mit eingebauter Zoom-Kamera mit Display und einem Neigungsmesser war für diese Messungen sehr hilfreich. Die dabei erreichte Präzision war in etlichen Fällen mit ca. 2 % etwas grösser als die im Pflichtenheft geforderte Präzision von 1 %. Die Differenz kann gut durch die Unsicherheit des Geländemodells erklärt werden, und zu einem guten Teil kam sie auch dadurch zustande, dass der grasbewachsene Boden am Wegrand ziemlich uneben ist und nur schon die „Bodenhöhe“ zwischen Grasbüscheln und Mäuselöchern eine Unsicherheit von mindestens 10 cm aufweist, was die Differenz in der Präzision schon gut erklärt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Validierungsmessungen die Gültigkeit der im Pilotprojekt entwickelten Methodik zur Bestimmung von Jahresmittelwerten der Magnetfelder von Hochspannungsfreileitungen bestätigt haben. Die modellierten und gemessenen Werte stimmen gut überein, und die Abweichungen waren von der Grösse wie im Pilotprojekt vorausgesagt.

Anhang A Technische Daten der Magnetfeld-Messgeräte

	<i>Emdex II</i>	<i>ESTEC DL-MW 10s</i>	<i>ESTEC EMLog 2e</i>
Hersteller	EPRI	ESTEC (www.estec.de)	
Messbereich	300 μ T	130 μ T	10 μ T
Auflösung	10 nT	10 nT	1 nT
Genauigkeit	± 10 % (overall)	± 3 %, ± 10 nT (eine Achse)	± 3 %, ± 1 nT (eine Achse)
Achsenrichtungen	Y-Achse parallel zur langen Seite des Gerätes	X-Achse parallel zur langen Seite des Gerätes	
Frequenzbänder	Breitband: 40 – 800 Hz Harmonische: 100 – 800 Hz	5 – 30 Hz 37 – 2000 Hz	
Datenrate	1.5 s – 327 s	1 s	
Batterie-Kapazität ¹	ca. 90 h	7 Tage	
Anzahl Datenpunkte, Aufzeichnungsdauer ¹	15'000 < 62 h	5'500'000 7 Tage	
Stromquelle	9V Alkali Batterie	Li-Ionen, aufladbar über USB-Kabel, Batterie als Backup	
Datenspeicherung	Daten bei Power-Off gelöscht	Permanent-Speicher	
Betriebs-Temperaturbereich	0 - 60°C	0 - 40°C	

Angaben gemäss Datenblättern der Hersteller

¹⁾ im bei den Messungen verwendeten Betriebsmodus

Anhang B Datenblatt PX05

Technisches Datenblatt



PX5



RUBITHERM® PX ist ein auslaufsicheres Wärmespeicherpulver und nutzt den Schmelzvorgang fest/flüssig, um bei nahezu konstanter Temperatur große Wärmemengen zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. So kann man Wärme und sogar Kälte sehr viel effektiver speichern, als mit herkömmlichen Speichermaterialien.

Ein patentierter Mechanismus sorgt dafür, dass unser Speichermaterial PX während des Phasenwechsels nicht aus der Stützstruktur austreten kann und somit seine Rieselfähigkeit erhalten bleibt.

Damit sind für verschiedene Anwendungen selbst bei wenig Raum und kleinen Temperaturdifferenzen große Wärmemengen effektiv nutzbar.

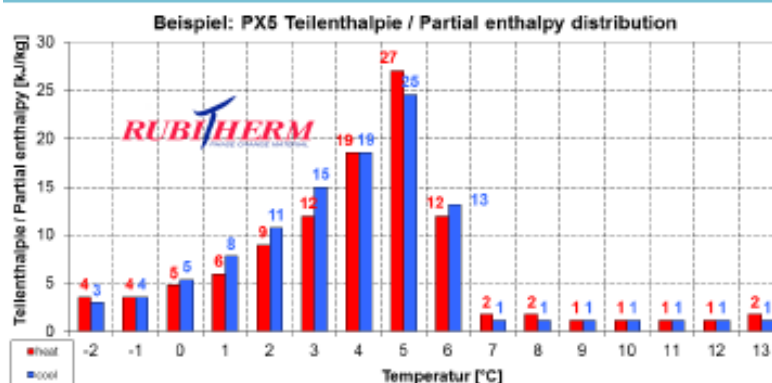
Wir freuen uns auf Ihre Fragen, Bedürfnisse und Interessen einzugehen.

Merkmale:

- hohe Kristallinität
- ein- und ausspeichern der Wärme erfolgt bei nahezu der gleichen Temperatur
- praktisch keine Volumenausdehnung
- keine Unterkühlung, langlebig, zyklenstabil
- praktisch chemisch inert
- für sehr viele Temperaturen stehen die optimalen Speichermaterialien zur Verfügung (-4°C bis 100°C).

Daten im Überblick:

Schmelzbereich	1-6	°C
Erstarrungsbereich	6-1	°C
Wärmespeicherkapazität ± 7,5%	105	[kJ/kg]*
Kombination aus latenter und sensibler Wärme im Temperaturbereich von -2 °C bis 13 °C.	30	[Wh/kg]*
Spezifische Wärmekapazität	2	[kJ/kg·K]
Schüttdichte	0,65	[kg/l]
Wärmeleitfähigkeit	0,2	[W/(m·K)]
Flammpunkt	113	°C
PCM Anteil	60	[%]
Max. Arbeitstemperatur	35	°C



Rubitherm Technologies GmbH
 Sperenberger Str. 5a
 D-12277 Berlin
 Tel: (030) 720004-62
 Fax: (030) 720004-99
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

Die Datenblätter sind unverbindliche
 Planungshilfen, Technische Änderungen
 vorbehalten. Stand:
 Montag, 4. August 2014

*Ermittelt mittels 3-Schicht-Kalorimeter.

Anhang C Auswertung der Seilhöhen

Ein Laser-Ziel wird in bekannter Höhe unter dem untersten Leiterseil positioniert. von beiden Seiten wird die Distanz zum Ziel d , die Elevation zum Ziel α und die Elevation β zum Leiterseil gemessen, mit den Werten d_1, α_1, β_1 von der einen Seite und d_2, α_2, β_2 von der anderen Seite. Daraus lässt sich je ein Wert für die Höhe bestimmen:

$$h_1 = d_1 \cos \alpha_1 (\tan \beta_1 - \tan \alpha_1) \quad (37)$$

$$h_2 = d_2 \cos \alpha_2 (\tan \beta_2 - \tan \alpha_2) \quad (38)$$

Wenn der Leiter sich nicht genau über der Zieltafel befindet, sondern um eine Distanz δ_x seitlich ausgelenkt, unterscheiden sich die Werte h_1 und h_2 untereinander und vom wahren Wert h , und es gilt (vgl. Abbildung 13 auf S. 22)

$$h_1 = h + \delta_x \tan \beta_1 \quad (39)$$

$$h_2 = h - \delta_x \tan \beta_2 \quad (40)$$

Durch Addition bzw. Subtraktion von (39) und (40) lassen sich δ_x und h bestimmen zu

$$\delta_x = \frac{h_1 - h_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2} \quad (41)$$

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} - \frac{1}{2} \frac{\tan \beta_1 - \tan \beta_2}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2} \quad (42)$$

Durch Messung von einem dritten Punkt nahe unter der Leitung (d_3, α_3, β_3) lässt sich auch noch die Genauigkeit in der Bestimmung von δ_x aus der Differenz zwischen der ersten und dritten Messung bestimmen und daraus auch diejenige von h .

Verdankungen

Diese Studie wäre nicht möglich gewesen ohne die Daten der Leitungen, welche von Swissgrid und BKW zur Verfügung gestellt wurden. Dafür möchte ich mich bei den Herren Andreas Fischer, Walter Stocker und Ralf Heinen von Swissgrid und Thomas Gränicher, Thomas Loser und Richard Käsermann von den BKW herzlich bedanken und auch dafür, dass sie stets geduldig meine Fragen beantwortet haben.

Ein grosses Dankeschön geht an die beiden Landwirte, die Herren Marc Junker in Iffwil und Fritz Fankhauser in Wiler bei Seedorf, dafür, dass wir auf ihrem Land die Messungen durchführen durften und für ihre freundliche Hilfe bei vielen Gelegenheiten.

Bei Sanjay Sagar, Benjamin Struchen und Martin Rösli bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit während dem Projekt.

Schliesslich bedanke ich mich beim BAFU, welches dieses Projekt finanziert hat und vor allem bei Stefan Joss, der wichtige Anstösse gab und mich immer wieder mit seinem Fachwissen unterstützt hat.

Literatur

- BAFU, 2007: **Hochspannungsleitungen. Vollzugshilfe zur NISV**. Entwurf zur Erprobung vom Juni 2007, herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Bürgi A., 2011, *Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsleitungen – Machbarkeits- und Pilotstudie*. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, 83 S.
http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog/14379/16028/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,Inp6lONTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJC Gent6gWym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--
- Bürgi A., 2010. *Lastflusskorrelation von Leitungssträngen unter Berücksichtigung des Lastwinkels mittels komplexer Stromwerte*. 29 pp. Bericht für das Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- EMFs info: Balance within circuits, Website des National Grid (UK),
<http://www.emfs.info/sources/overhead/factors/balance-within/>
- Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M., 1964 **The Feynman lectures on physics**. Vol. II., Addison-Wesley, Reading Mass..
- Huss A., Spoerri A., Egger M., Rösli M. for the Swiss National Cohort Study, 2009, *Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: Longitudinal study of the Swiss population*. **Am. J. Epidemiol. (2009) 169 (2):** 167-175.
doi: 10.1093/aje/kwn297
- Kaden H. 2006. **Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik**. Nachdruck nach der 2. Aufl. 1959. Springer, Berlin.
- Kießling F., Nefzger P., Kaintzyk U., 2001. **Freileitungen. Planung, Berechnung, Ausführung**. 5. Aufl., Springer, Berlin.
- MeteoSchweiz, 2016. *Normwerte 1981-2010: Lufttemperatur 2m*, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich.
http://www.meteoschweiz.admin.ch/product/input/climate-data/normwerte-pro-messgroesse/np8110/nvrep_np8110_tre200m0_d.pdf
- Stratmann M., Wernli Ch., Kreuter U., Joss S.: 1995. *Messung der Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder*. PSI Bericht Nr. 95-09, Paul-Scherrer-Institut, Würenlingen.
- Zaffanella, L., 2005, *Electric and Magnetic Fields*, Chapter 7 in **EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above**, (“Red Book”), 3rd edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA,.