

Bericht zur Bestandsmessung der Änderungen des magnetischen Gleichfeldes am Campus Lichtwiese

Dr.-Ing. Mathias Magdowski, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

15.01.2013

Inhaltsverzeichnis

1	Messsystem	4
1.1	Messsonde	4
1.2	Messsoftware	5
2	Bestandsmessungen am Campus Lichtwiese	6
2.1	Bewertungskriterien	6
2.2	Innenmessungen	7
2.2.1	Gebäude L2/04 (F-Turm)	8
2.2.1.1	Raum F204 - Röntgenfotoelektronenspektrometer	8
2.2.1.2	Raum F206 - Röntgenfotoelektronenspektrometer	10
2.2.2	Gebäude L2/02 (B-Turm)	12
2.2.2.1	Raum 239 - Kernspinresonanzspektrometer	12
2.2.2.2	Raum 235 - Kernspinresonanzspektrometer	14
2.2.2.3	Raum 241 - Kernspinresonanzspektrometer	16
2.2.3	Gebäude L2/06	18
2.2.3.1	Raum R14 - Rasterkraftmikroskope	18
2.2.4	Gebäude L2/01	20
2.2.4.1	Raum 067 - Transmissionselektronenmikroskop	20
2.2.4.2	Raum 061 - Transmissionselektronenmikroskop	22
2.2.4.3	Raum 20 - Rasterelektronenmikroskop	24
2.2.4.4	Raum 062 - Rasterelektronenmikroskop	26
2.2.4.5	Raum 068 - Transmissionselektronenmikroskop mit akti- vierter Magnetfeldkompensationsanlage	28
2.2.4.6	Raum 068 - Transmissionselektronenmikroskop mit deak- tiverter Magnetfeldkompensationsanlage	30
2.2.4.7	Raum 9 - hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop	32
2.3	Außenmessungen	34
2.3.1	Messpunkt 1	34
2.3.2	Messpunkt 2	36
A	Zertifikat über die Kalibrierung der Magnetfeldsonde	40

1 Messsystem

1.1 Messsonde

Zur Messung der niederfrequenten Magnetfelder wurde eine Messsonde des Typs DM-060 der Systemtechnik Ludwig GmbH verwendet. Diese Sonde besteht aus drei orthogonal zueinander angeordneten Förster-Sonden (auch Fluxgate-Magnetometer oder Saturationskern-Magnetometer) zur Messung aller drei Komponenten der magnetischen Flussdichte. Die Sonde wird über ein Notebook ausgelesen und mit Energie versorgt. Die Messsonde wird intern digital kalibriert, wodurch eine große Dynamik bei gleichzeitig hoher Stabilität erreicht wird. Durch die digitale Signalverarbeitung durchlaufen alle Signale die gleiche Transferfunktion und erlauben so eine sehr genaue Auswertung der Messdaten. Aus allen drei orthogonalen Komponenten kann auch die gesamte Flussdichte bestimmt werden.

Die Eigenschaften der Sonde sind in der folgende Aufstellung zusammengefasst:

Messbereich	$\pm 1 \text{ mT}$
Auflösung	2 pT
Rauschen	$< 60 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 Hz
Abtastrate	$0,1 \text{ Hz}$ bis 10 kHz
Bandbreite	maximal 4 kHz
Winkelfehler	$< 0,01^\circ$
Offset-Fehler (bei 25°C)	$< 5 \text{ nT}$
Offset-Drift (bei 25°C)	$< 0,5 \frac{\text{nT}}{\text{K}}$
Skalierungs-Fehler (bei 25°C)	$< 0,05 \%$
Skalierungs-Drift (bei 25°C)	$< 5 \text{ ppm/K}$

Das gesamte Messsystem ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die verwendete Sonde mit der Seriennummer 200A094901114 wurde am 08. März 2010 überprüft und kalibriert. Eine Kopie des Zertifikats ist im Anhang A zu finden.



Abbildung 1.1: Magnetometer DM-060 mit Notebook

1.2 Messsoftware

Zur Steuerung der Messung wurde die GradMag-Software der Systemtechnik Ludwig GmbH verwendet. Diese Software erlaubt eine grafische Auswertung der augenblicklichen Messdaten als Zeitfunktion (alle drei orthogonalen Komponenten und der Betrag) sowie als Spektrum (entweder eine Komponente oder der Betrag). Dadurch kann direkt während der Messung der Einfluss gewisser Ereignisse auf die magnetische Flussdichte untersucht werden.

Gleichzeitig werden alle Messdaten komprimiert gespeichert und können nachträglich als Rohdaten exportiert werden. Damit ist eine nachträgliche Auswertung in Programmen wie Microsoft Excel oder Mathworks MATLAB möglich.

2 Bestandsmessungen am Campus Lichtwiese

Die Bestandsmessungen am Campus Lichtwiese der Technischen Universität Darmstadt wurden am 28. und 29. November 2012 durchgeführt. Ziel war die Bestimmung der derzeitigen typischen Schwankungen der magnetischen Flussdichte an ausgewählten Standorten am Campus Lichtwiese.

2.1 Bewertungskriterien

In den wissenschaftlichen Einrichtungen am Campus Lichtwiese gibt es eine Vielzahl an empfindlichen Mess- und Untersuchungsgeräten, die empfindlich auf niederfrequente Störungen des Magnetfeldes oder langsame Änderungen des Gleichmagnetfeldes reagieren. Dazu gehören unter anderem:

- Röntgenfotoelektronenspektrometer (XPS)
- Kernspinresonanzspektrometer (NMR)
- Transmissionselektronenmikroskope (TEM)
- Rasterelektronenmikroskope (REM)

Solche Geräte sind unter anderem in folgenden Einrichtungen der Technischen Universität Darmstadt installiert:

- Fachbereich für Physikalische Chemie
- Fachbereich für Organische Chemie
- Fachbereich Material- und Geowissenschaften
- Center of Smart Interfaces (CSI)

Um eine rechnerunterstützte Auswertung der Vielzahl von gemessenen Zeitverläufen zu ermöglichen, sind Kriterien nötig, die automatisch aus den Zeitverläufen ausgewertet werden können. Da es vor allem um die Änderungen des Magnetfeldes und dessen Komponenten geht, wurden zuerst aus den Zeitverläufen die numerischen Ableitungen nach der Zeit bestimmt. Um schnelle und höherfrequente Schwankungen zu unterdrücken wurde auf die numerischen Ableitungen ein Filter angewendet, der den gleitenden Mittelwert berechnet. Für die Breite dieses Filters können unterschiedliche Werte gewählt werden, z. B. 1 s, 5 s, 20 s und 100 s. Diese Zeitlängen entsprechen den kritischen Störzeiten bei unterschiedlichen Messverfahren. So sind bei einem TEM-Gerät eher die schnelleren Änderungen störend, und die langsamen Änderungen können herausgefiltert werden. Bei anderen Untersuchungsverfahren wie XPS oder NMR sind dafür eher die langsamen Drifts störend und schnelle Änderungen können teilweise eher unterdrückt werden.

Die Messungen im Innenbereich wurden am 28. und 29. November 2012 durchgeführt. Eine Übersicht über die 12 Messpunkte ist in Abbildung 2.1 gezeigt.



7

2.2.1 Gebäude L2/04 (F-Turm)

2.2.1.1 Raum F204 - Röntgenfotoelektronenspektrometer

Die Messung am Röntgenfotoelektronenspektrometer (XPS) in Raum F204 in Gebäude L2/04 (F-Turm) wurde am 28. November 2012 von 13.30 Uhr bis 13.45 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.2 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

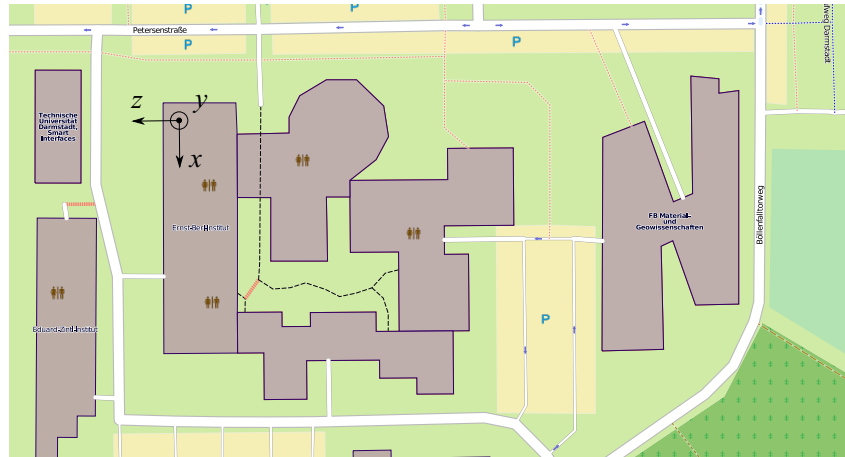


Abbildung 2.2: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum F204 in Gebäude L2/04 (F-Turm)

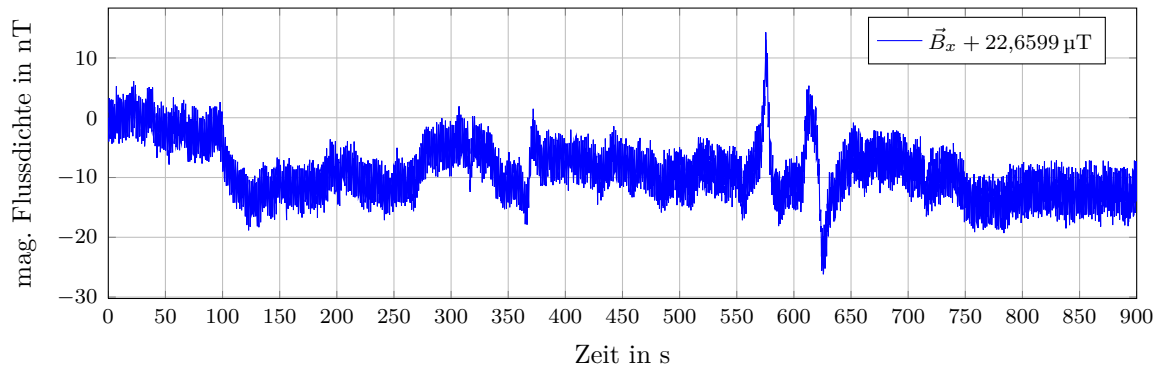
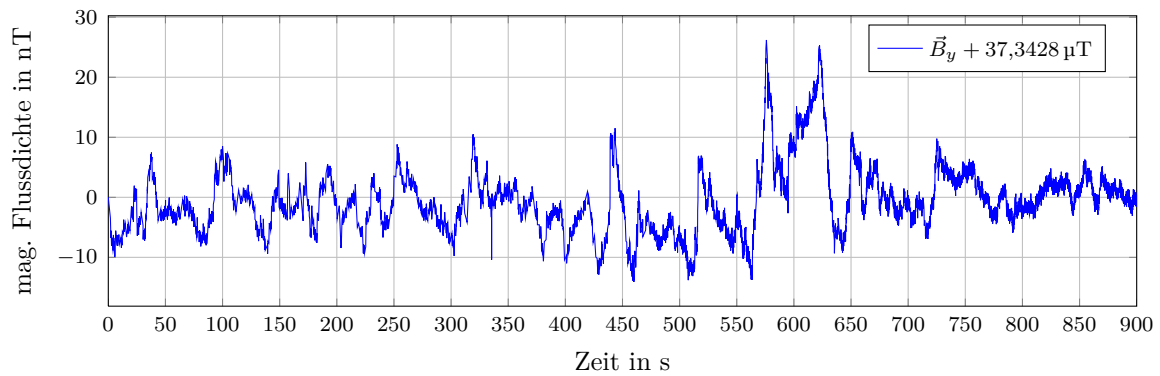
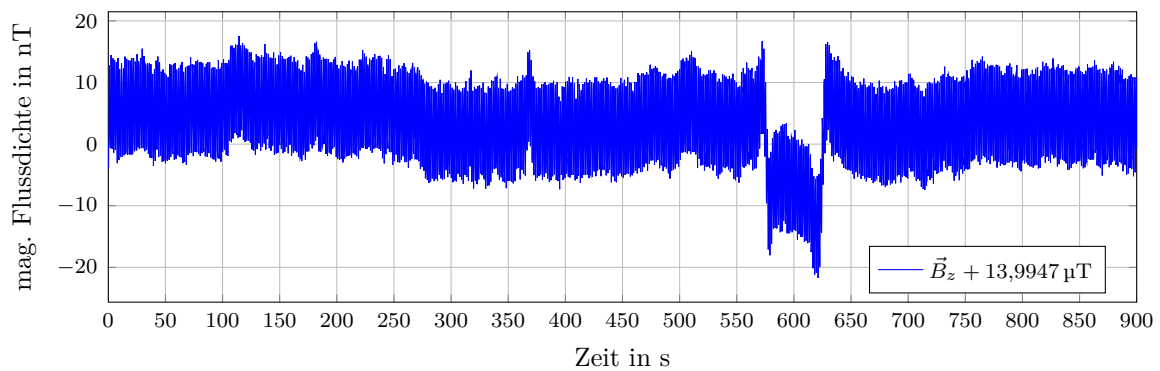
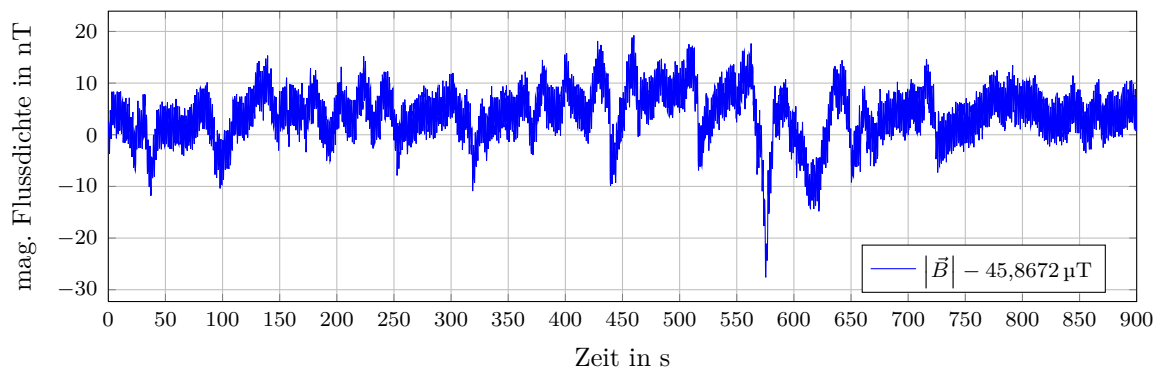
In Abbildung 2.3 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Die Verläufe zeigen kaum und wenn dann nur sehr geringe Schwankungen. Es stechen nur zwei größere Störungen bei etwa 575 s und 620 s hervor, deren maximale Amplitudenänderung aber nur bei etwa 30 nT liegt. Die Ursache dieser Störungen konnte nicht ermittelt werden. Auffällig ist, dass die horizontale x - und z -Komponenten durch periodische Störungen mit geringer Amplitude im Hz-Bereich überlagert sind, die vertikale y -Komponente dagegen kaum. Diese periodischen Störungen können z. B. durch mechanische Schwingungen an benachbarten Kryostaten verursacht werden.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.1 angegeben. An dieser Position sind nur geringe Schwankungen zu verzeichnen. Für die einzelnen Komponenten und den Betrag liegen die zeitlich gewichteten Änderungen alle unterhalb von 50 nT.

Tabelle 2.1: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum F204 in Gebäude L2/04 (F-Turm) in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	11,99	24,66	29,29	25,67
\vec{B}_y	14,43	25,15	35,34	31,65
\vec{B}_z	18,03	34,17	31,81	33,04
$ \vec{B} $	18,6	28,39	41,68	37,82

Die zeitlich gewichteten Flussdichteänderungen nehmen über größere Zeiten tendenziell zu. Da aber aufgrund des oben beschriebenen Bewertungskriteriums nicht nur die reinen Pegeländerungen, sondern auch deren Geschwindigkeiten in die Bewertung einfließen,

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.3: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum F204 in Gebäude L2/04 (F-Turm)

kann die mittlere Änderung über 100s durchaus auch kleiner sein, als die Änderung innerhalb von 20s, wie z.B. bei der x -Komponente. Aufgrund des als Hintergrundfeld überlagerten Erdmagnetfeldes ist die Änderung des Flussdichtebetrages nicht zwangsweise größer, als die Änderung einzelner Komponenten.

2.2.1.2 Raum F206 - Röntgenfotoelektronenspektrometer

Die Messung am Röntgenfotoelektronenspektrometer (XPS) in Raum F206 in Gebäude L2/04 (F-Turm) wurde am 28. November 2012 von 13.50 Uhr bis 14.05 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.4 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

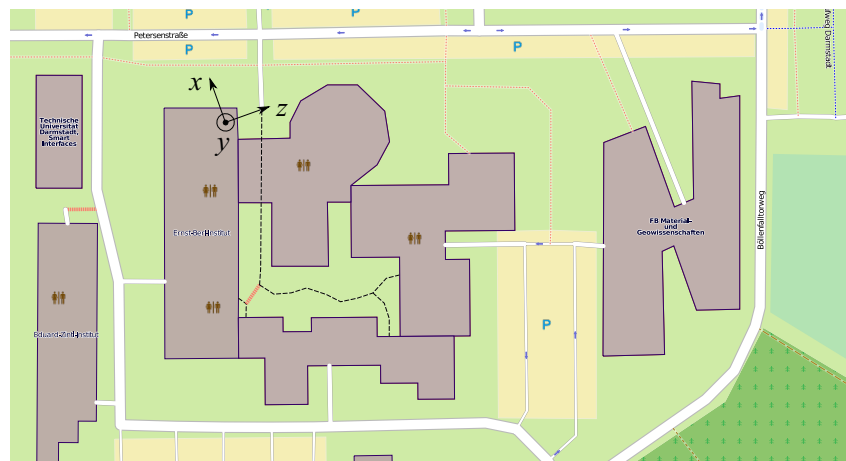


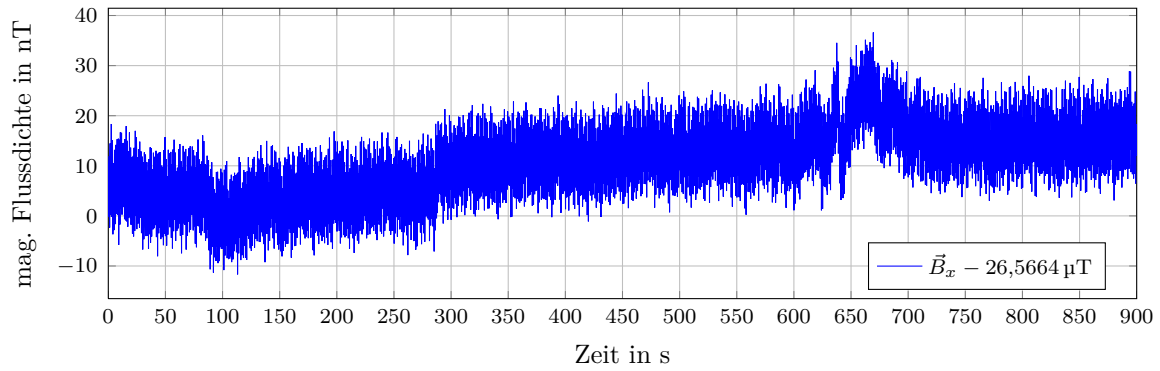
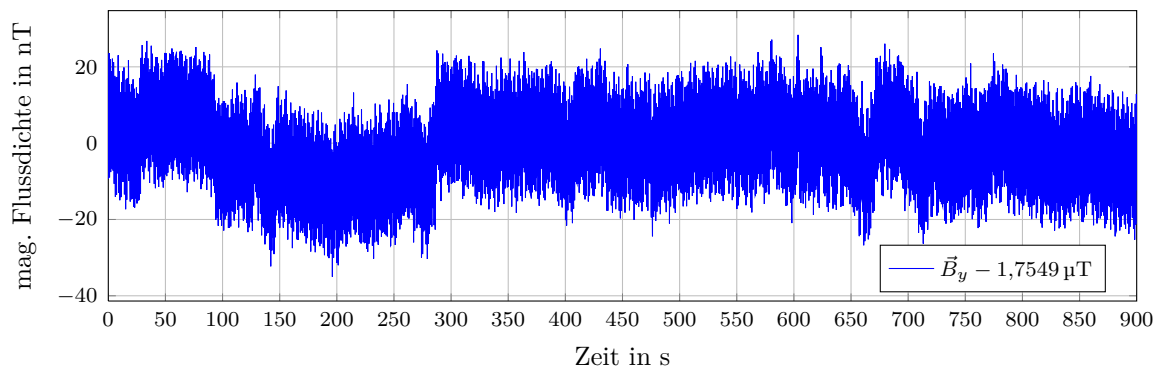
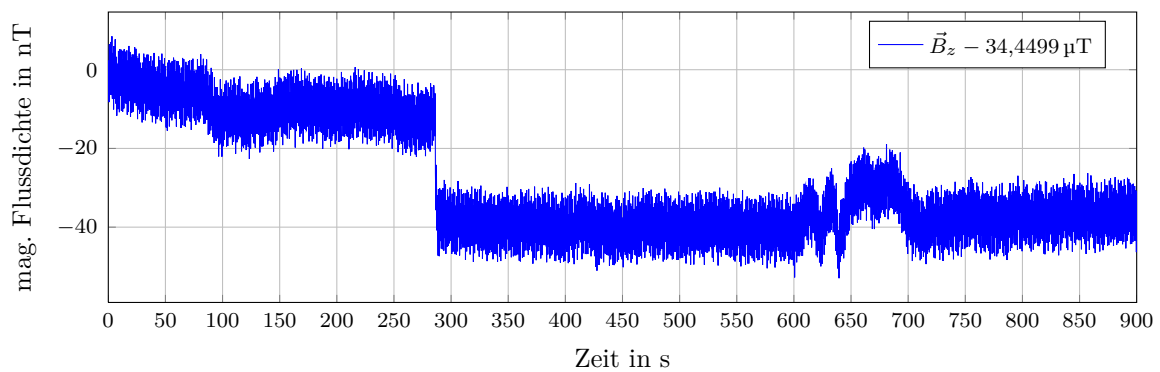
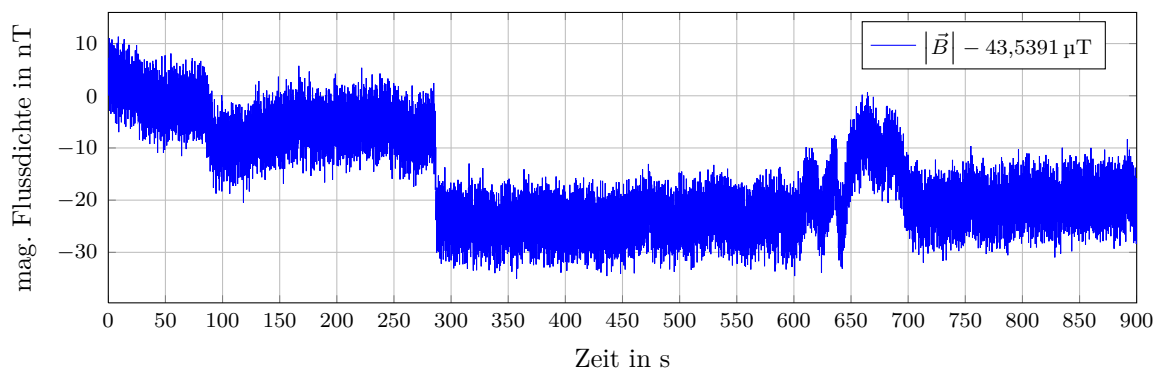
Abbildung 2.4: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum F206 in Gebäude L2/04 (F-Turm)

In Abbildung 2.5 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Auffällig sind hier ein stärkerer Sprung der Werte bei etwa 290s und eine längere Störung von etwa 620s bis 700s. Auch hier ist die Ursache dieser Störungen nicht geklärt. Ansonsten sind die Schwankungen der magnetischen Flussdichte sehr gering, wobei hier aber alle Komponenten mit periodischen Störungen von geringer Amplitude im Hz-Bereich überlagert sind.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.2 angegeben. An dieser Position sind ebenfalls nur geringe Schwankungen zu verzeichnen. Für die einzelnen Komponenten und den Betrag liegen die zeitlich gewichteten Änderungen alle unterhalb von 50 nT.

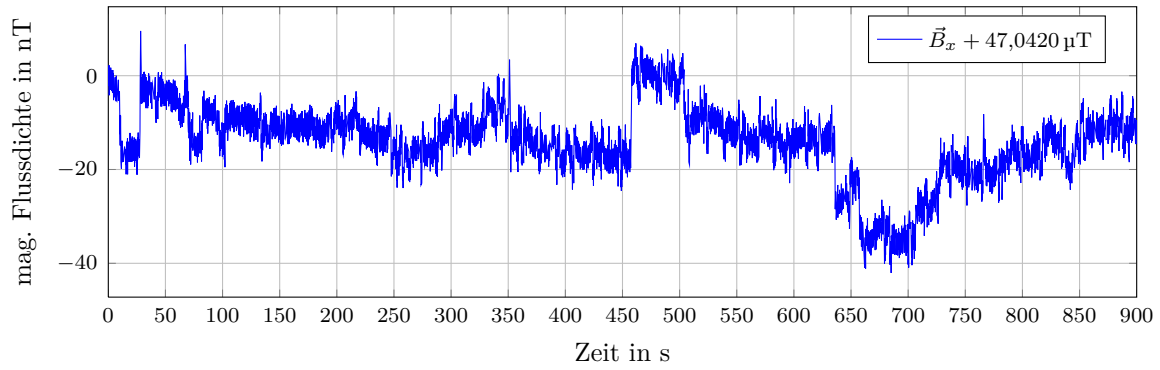
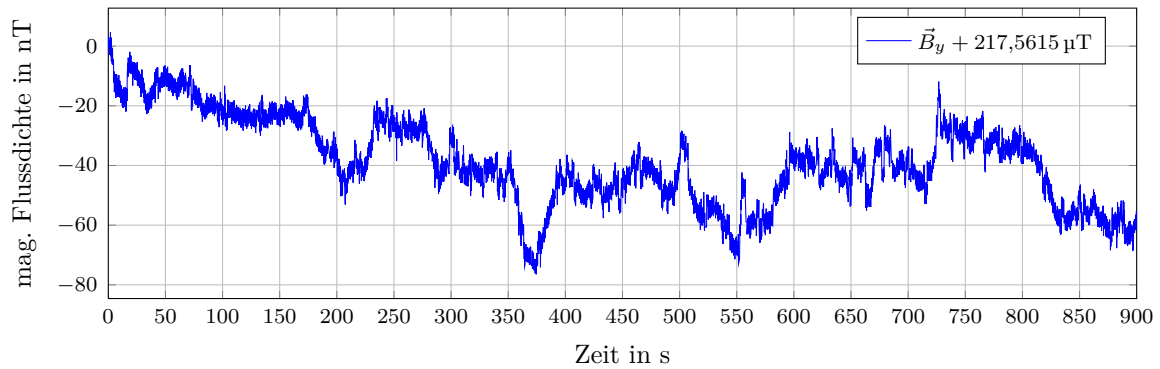
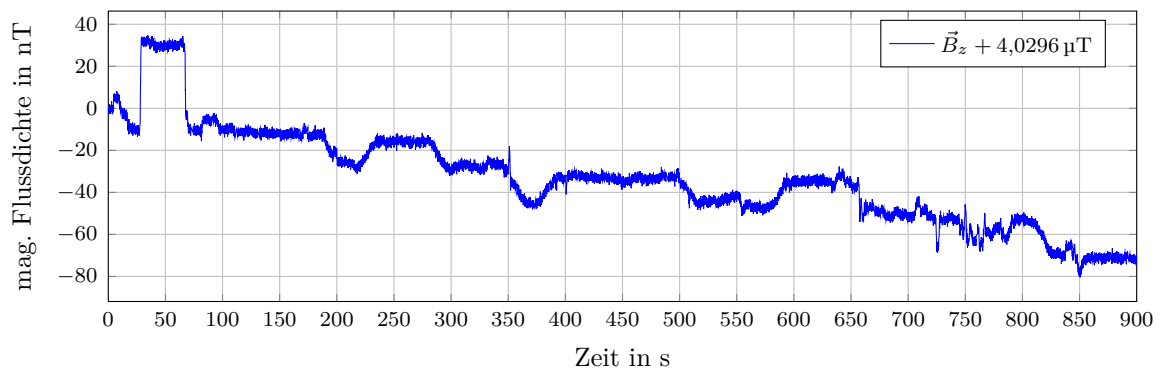
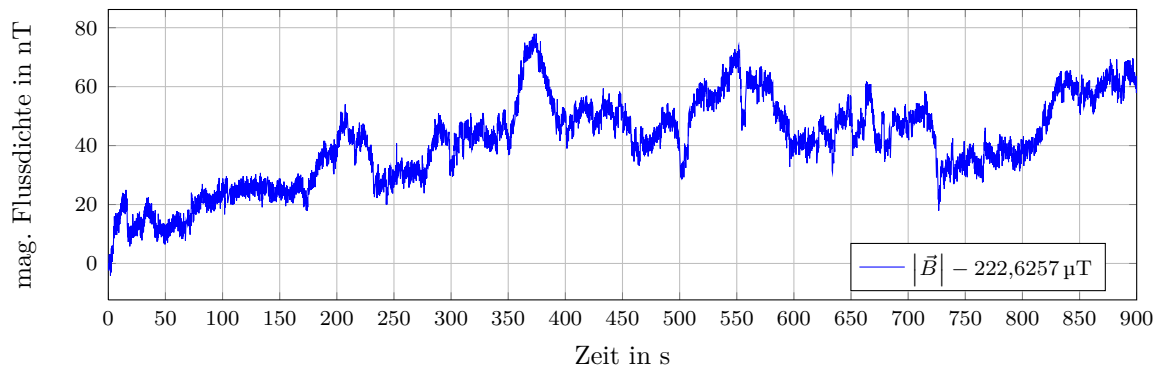
Tabelle 2.2: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum F206 in Gebäude L2/04 (F-Turm) in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	12,68	18,87	19,19	22,81
\vec{B}_y	23,61	26,08	23,61	34,11
\vec{B}_z	23,46	34,36	31,3	41,48
$ \vec{B} $	18,08	23,93	23,86	36,03

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.5: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum F206 in Gebäude L2/04 (F-Turm)

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.7: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 239 in Gebäude L2/02 (B-Turm)

2.2.2.2 Raum 235 - Kernspinresonanzspektrometer

Die Messung am Kernspinresonanzspektrometer (NMR) in Raum 235 in Gebäude L2/02 (B-Turm) wurde am 28. November 2012 von 15.00 Uhr bis 15.15 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.6 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

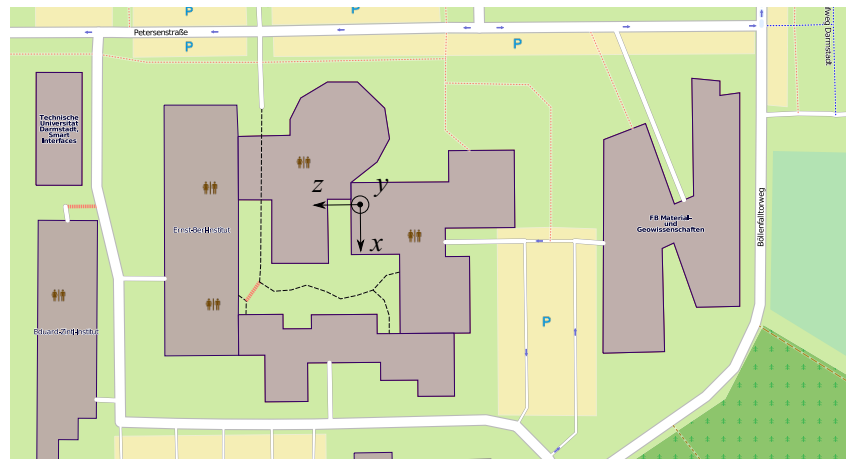


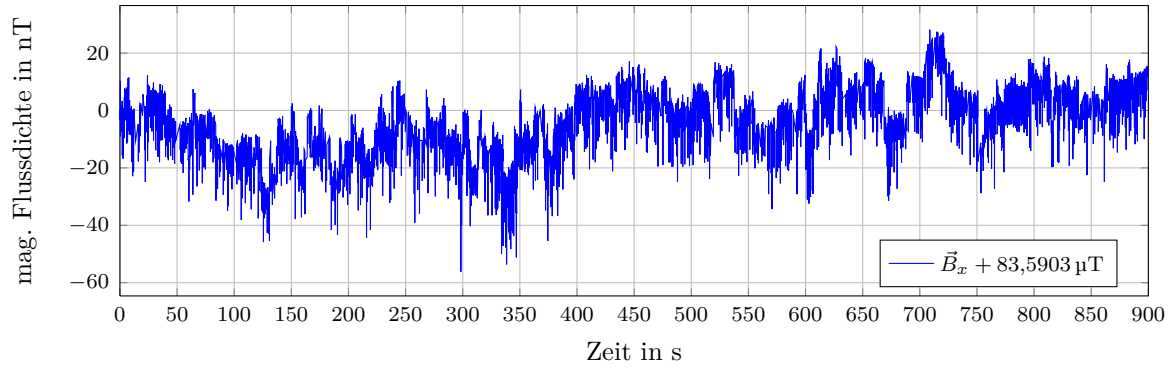
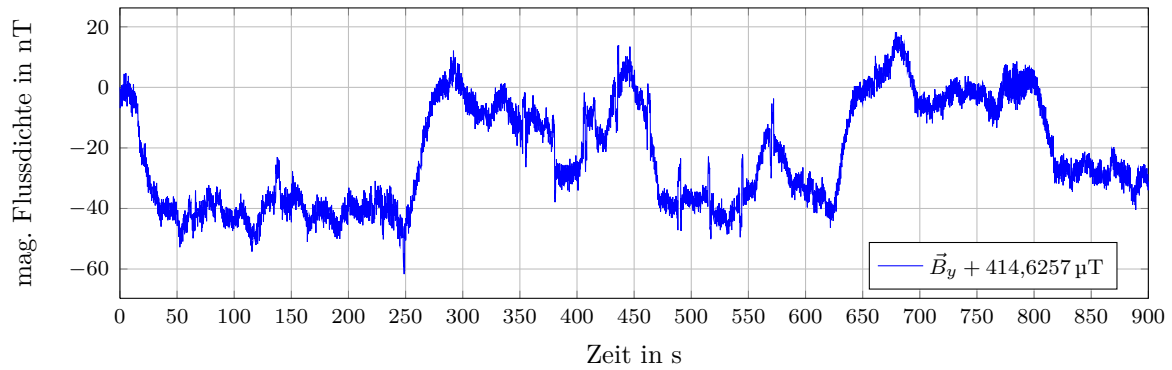
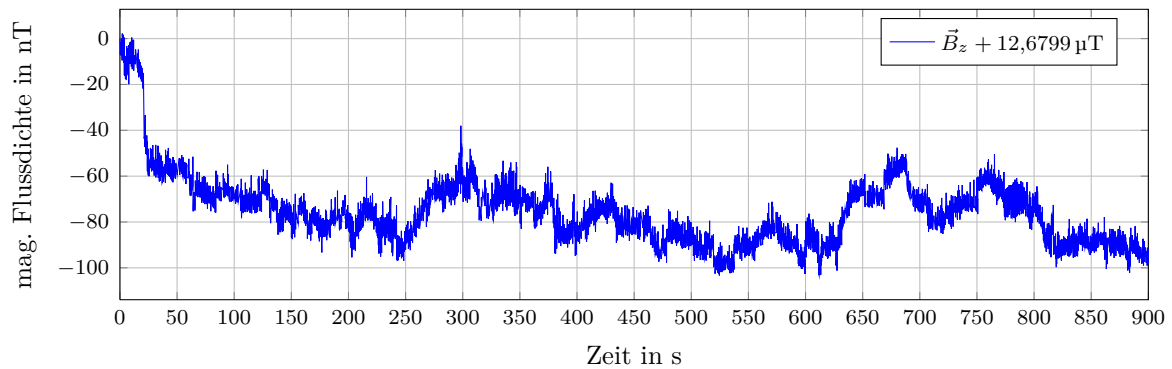
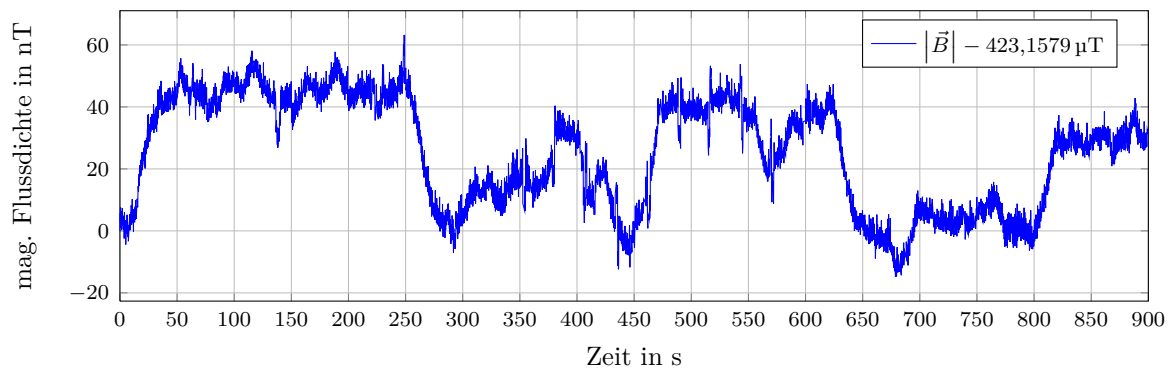
Abbildung 2.8: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 235 in Gebäude L2/02 (B-Turm)

In Abbildung 2.9 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Die y -Komponente weist erneut einen starken Gleichanteil auf, der durch die räumliche Nähe zum vertikal ausgerichteten Magnetfeld des 12 T-NMR-Geräts verursacht wird. Durch das stärkere Magnetfeld des NMR-Geräts bei etwa gleichem Abstand der Messsonde wird hier ein Betrag der Flussdichte von $425 \mu\text{T}$ gemessen, der ungefähr dem 11-fachen Flussdichtebetrags des Erdmagnetfeldes entspricht. Alle Verläufe sind über den gesamten Zeitraum geringen Schwankungen unterworfen, wobei kein Ereignis besonders heraus sticht. Besonders die horizontale x -Komponente ist erneut mit periodischen Störungen von geringer Amplitude im Hz-Bereich überlagert.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.4 angegeben. Die Störungen entsprechen den Werten, die auch im Nebenraum 239 aufgetreten sind. Die maximalen zeitlich gewichteten Änderungen liegen im Bereich von etwa 50 nT .

Tabelle 2.4: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 235 in Gebäude L2/02 (B-Turm) in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	45,14	47,95	49,21	62,15
\vec{B}_y	26,95	25,48	47,7	57,96
\vec{B}_z	30,46	42,33	57,14	75,84
$ \vec{B} $	25,35	24,91	47,3	59,06

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.9: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 235 in Gebäude L2/02 (B-Turm)

2.2.2.3 Raum 241 - Kernspinresonanzspektrometer

Die Messung am Kernspinresonanzspektrometer (NMR) in Raum 241 in Gebäude L2/02 (B-Turm) wurde am 28. November 2012 von 15.20 Uhr bis 15.35 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.10 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

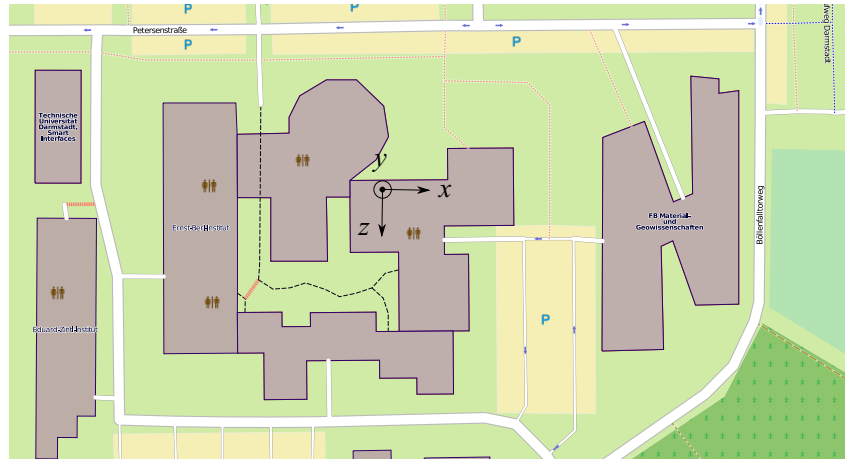


Abbildung 2.10: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 241 in Gebäude L2/02 (B-Turm)

In Abbildung 2.11 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Da an dieser Messposition Störungen durch Personenverkehr in zu geringem Abstand zur Messsonde, wurden diese Störungen für die numerische Auswertung nicht berücksichtigt. Dazu wurden die Messwerte in den entsprechenden Zeitfenstern ignoriert und durch linear interpolierte Werte ersetzt. Gleichzeitig existierten aber Störungen, die durch einen Laserdrucker aufgetreten sind. Die tatsächlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte sind in Abbildung 2.11 trotzdem als eine weitere Kurve dargestellt. Auffällig ist auch hier der hohe Gleichanteil der y -Komponente hervorgerufen durch das vertikale Magnetfeld des 7 T-NMR-Geräts. Bis auf die Störungen durch Personenverkehr und Drucker treten hier nur ein längere Störung gleich zum Beginn der Messung und zwei längere Schwankungen bei etwa 220 s und 300 s auf.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.5 angegeben. Die Störungen entsprechen den Werten, die auch in den Nebenräumen 239 und 241 aufgetreten sind. Die maximalen zeitlich gewichteten Änderungen liegen im Bereich von etwa 50 nT.

Tabelle 2.5: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 241 in Gebäude L2/02 (B-Turm) in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	9,584	17,79	34,07	37,06
\vec{B}_y	14,74	27,48	56,69	62,03
\vec{B}_z	13,27	18,28	29,88	21,55
$ \vec{B} $	14,33	25,12	48,84	57,06

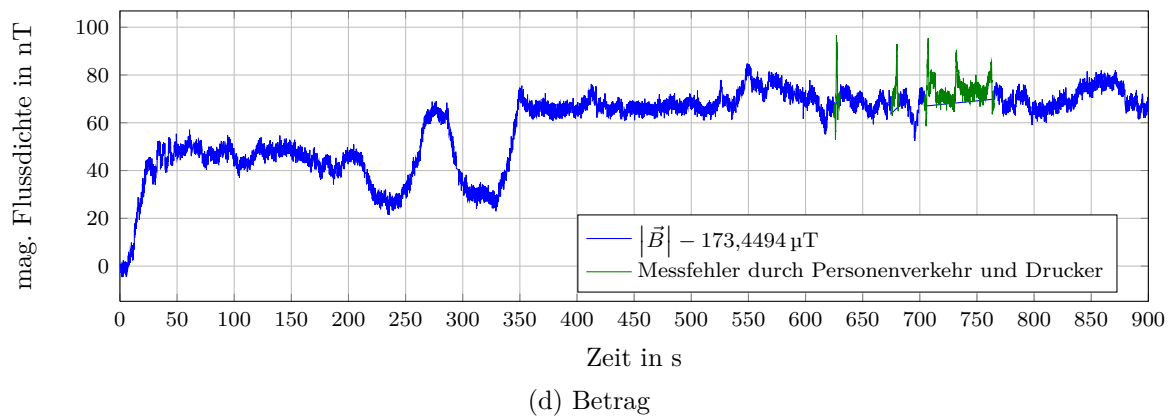
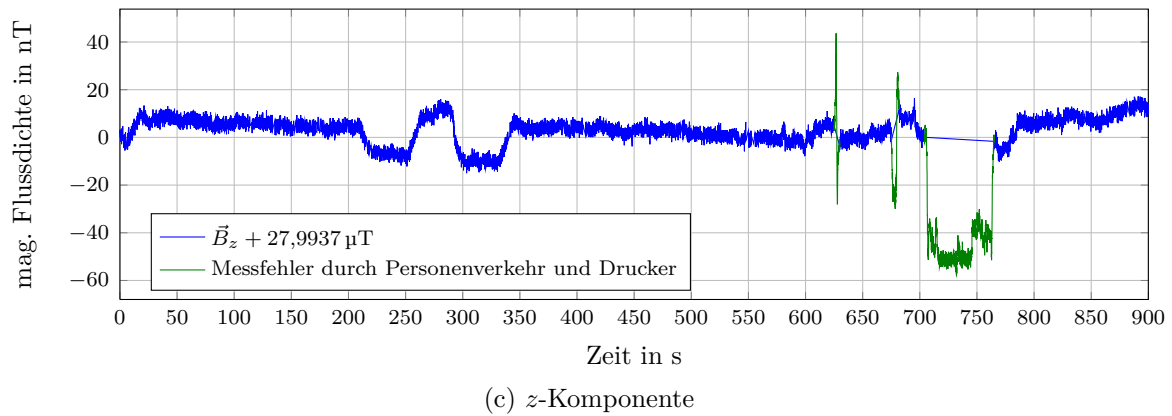
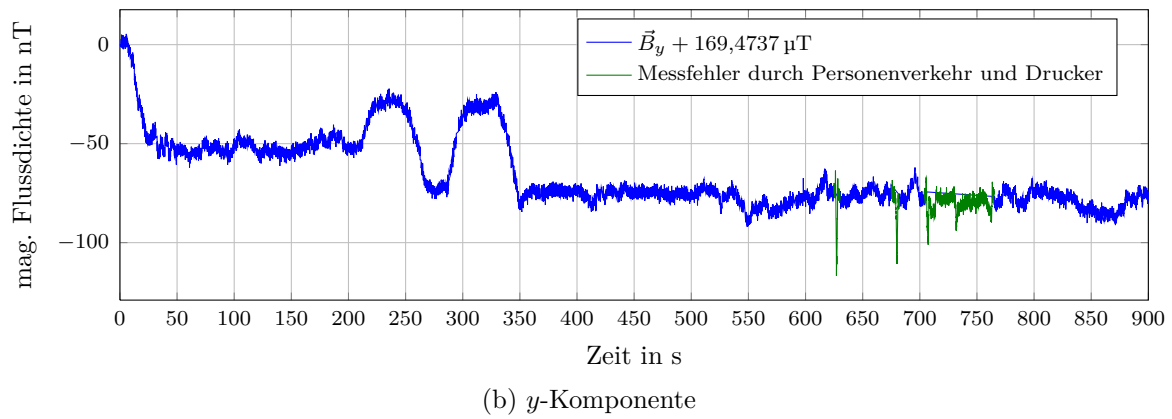
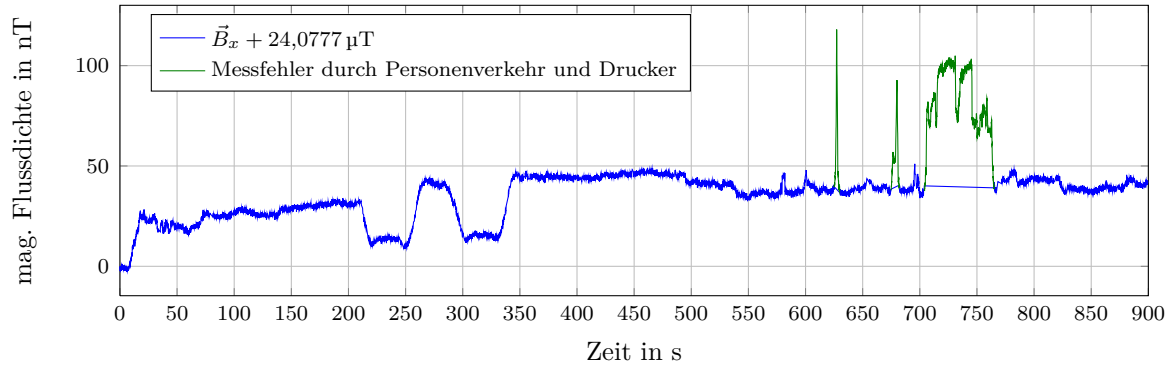


Abbildung 2.11: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 241 in Gebäude L2/02 (B-Turm)

2.2.3 Gebäude L2/06

2.2.3.1 Raum R14 - Rasterkraftmikroskope

Die Messung an den Rasterkraftmikroskopen (AFM) in Raum R14 in Gebäude L2/06 wurde am 28. November 2012 von 16.10 Uhr bis 16.25 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.12 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

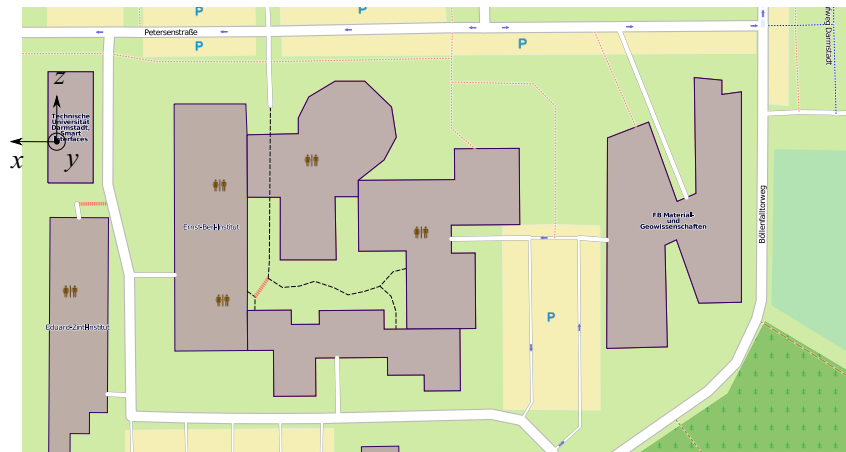


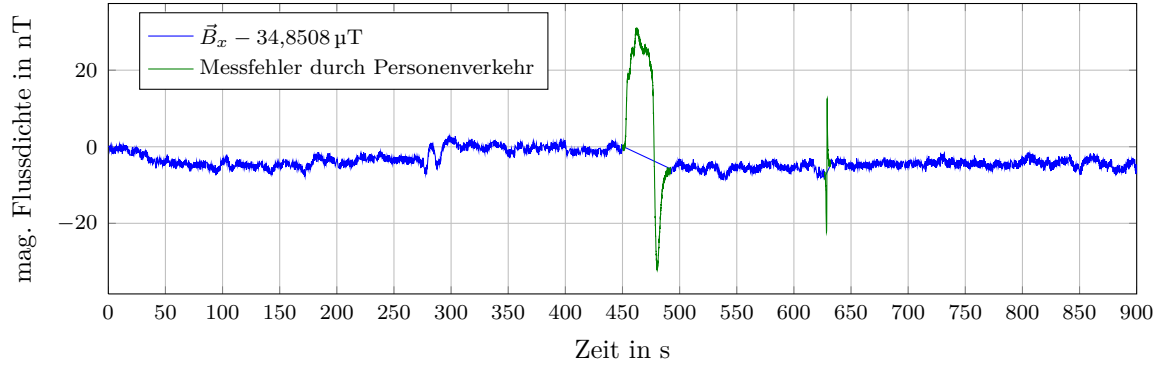
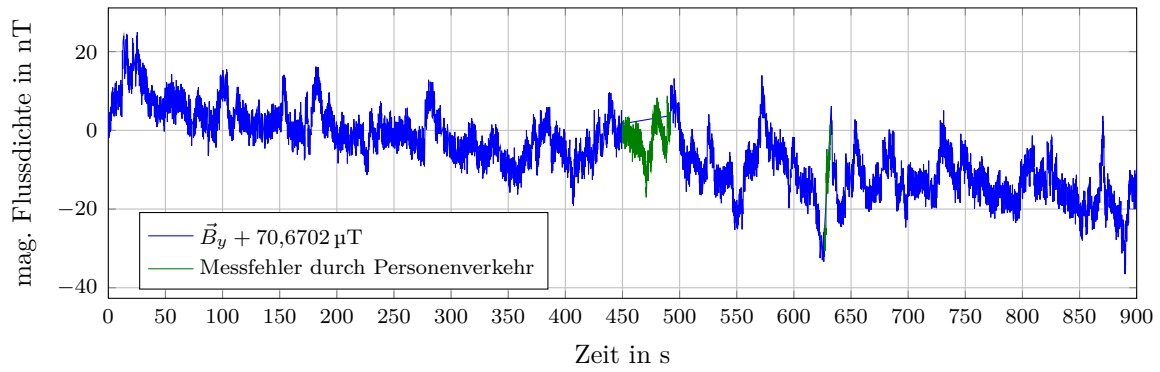
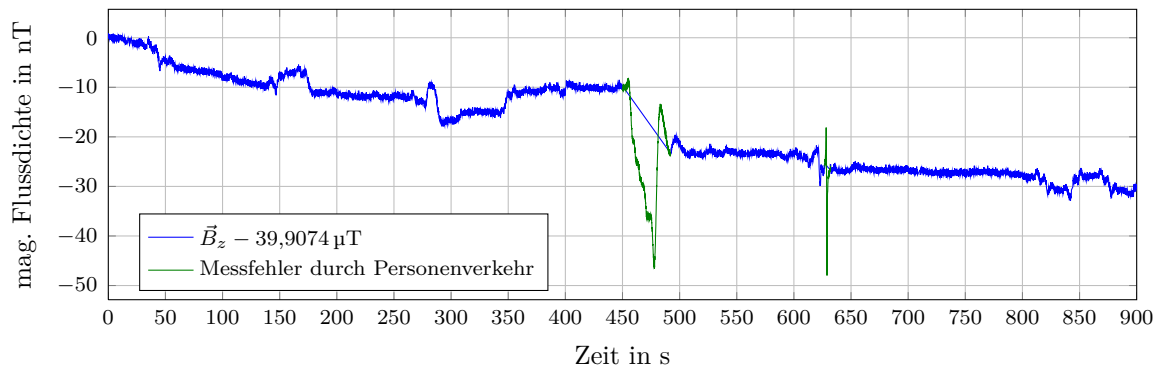
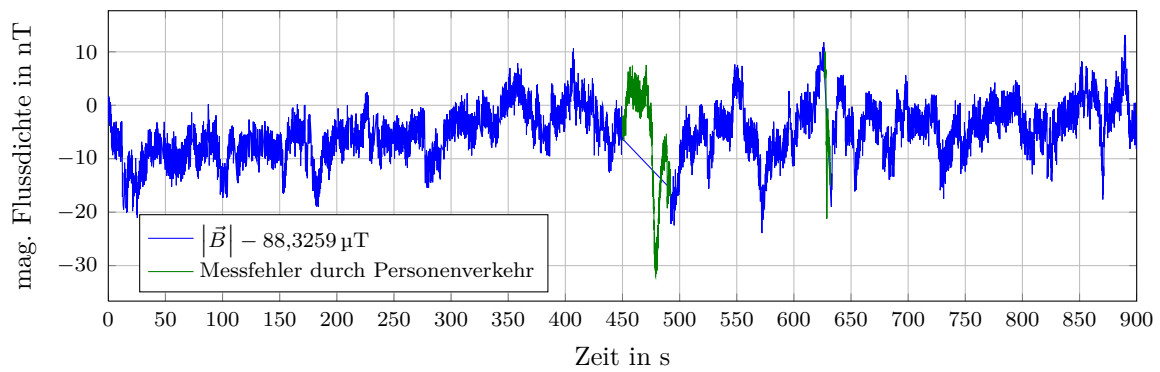
Abbildung 2.12: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum R14 in Gebäude L2/06

In Abbildung 2.13 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Auch diese Messung wurde durch Personenverkehr in unmittelbarer Nähe der Messsonde verfälscht. Die entsprechenden Zeitabschnitte wurden für die numerische Auswertung wie schon bei der vorherigen Messung ausgeblendet und durch linear interpolierte Werte ersetzt. Die tatsächlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte sind in Abbildung 2.11 trotzdem als eine weitere Kurve dargestellt. Über den gesamten Zeitraum treten bei allen drei Komponenten nur sehr geringe Schwankungen auf. Die y -Komponente ist zusätzlich mit periodischen Schwankungen geringer Amplitude im Hz-Bereich überlagert.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.6 angegeben. An dieser Messposition sind nur sehr geringe Schwankungen zu verzeichnen. Diese liegen für die horizontale x - und z -Komponente sogar unterhalb von 20 nT. Nur die vertikale y -Komponente und damit auch der Betrag weisen größere Schwankungen im Bereich von etwa 20 nT bis 30 nT auf.

Tabelle 2.6: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum R14 in Gebäude L2/06 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	3,903	7,577	9,527	9,984
\vec{B}_y	19,7	29,93	35,27	34,5
\vec{B}_z	6,173	6,714	7,735	14,78
$ \vec{B} $	15,3	23,23	28,15	24,75

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.13: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum R14 in Gebäude L2/06

2.2.4 Gebäude L2/01

2.2.4.1 Raum 067 - Transmissionselektronenmikroskop

Die Messung am Transmissionselektronenmikroskop (TEM) in Raum 067 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 09.15 Uhr bis 09.30 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.14 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

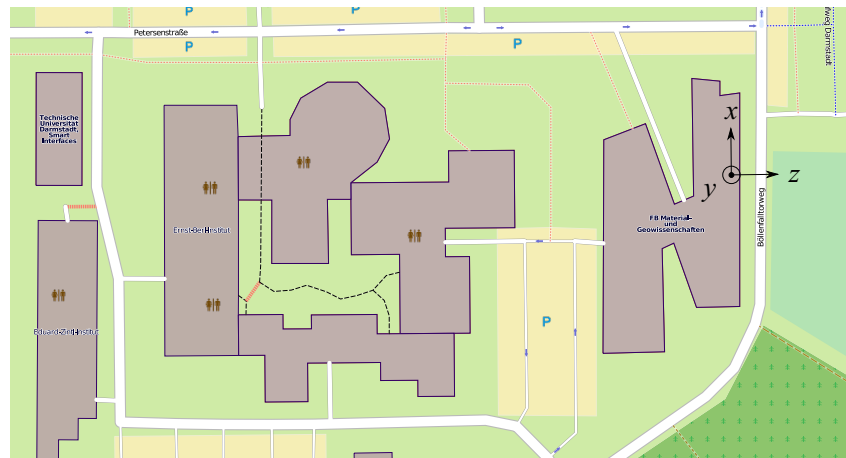


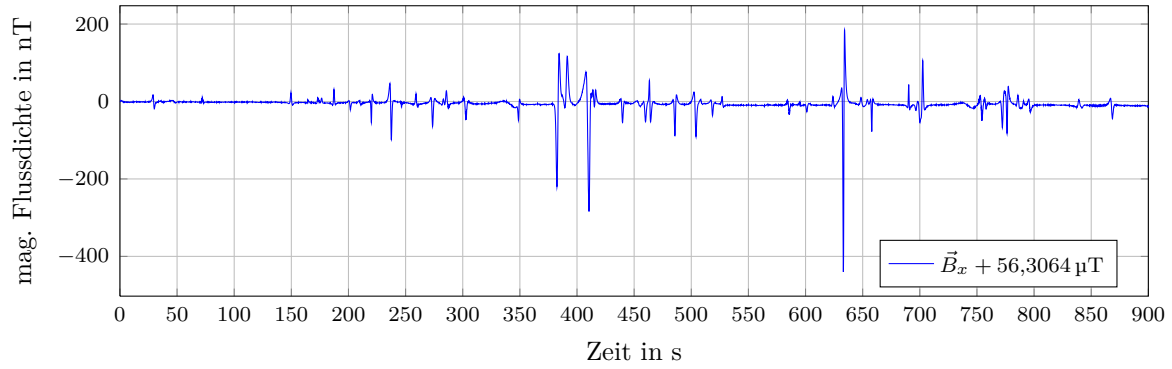
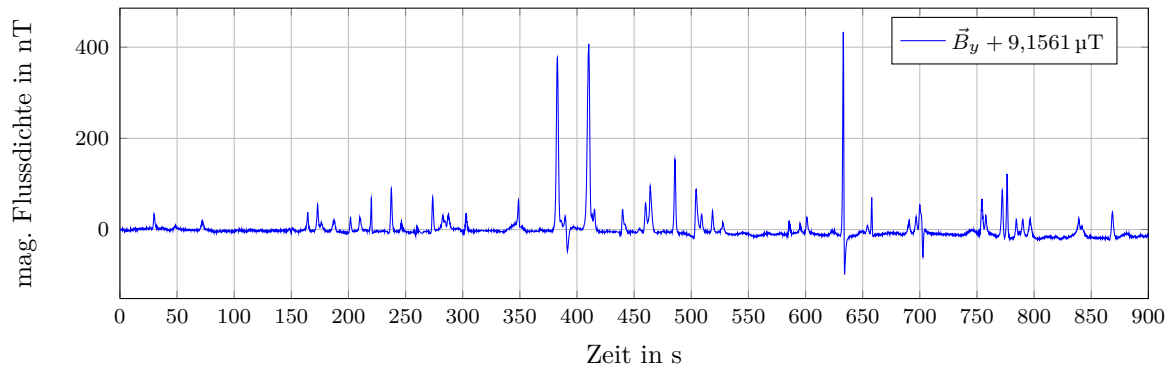
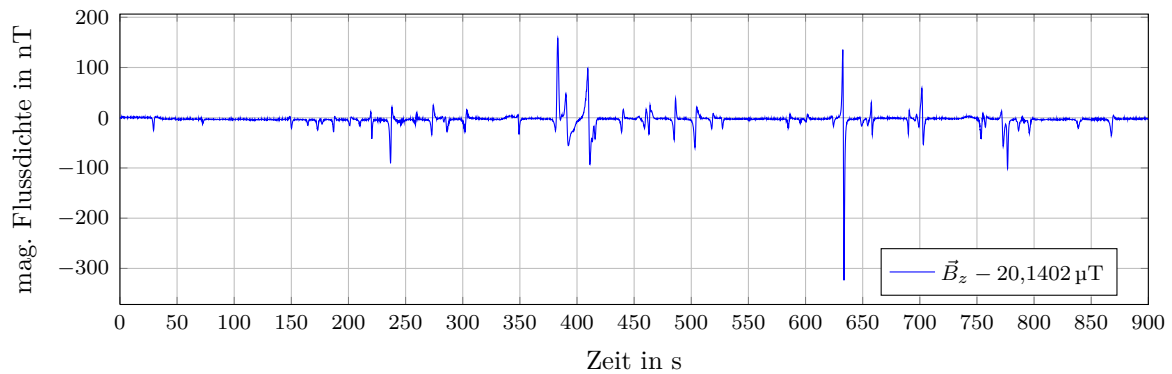
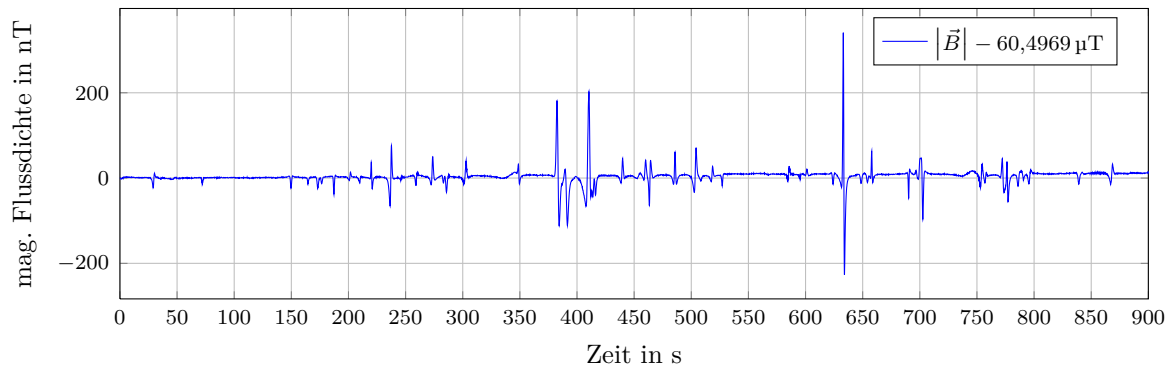
Abbildung 2.14: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 067 in Gebäude L2/01

In Abbildung 2.15 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Die Verläufe der einzelnen Komponenten und des Betrages weisen zahlreiche kurzzeitige Schwankungen und Störungen auf. Die genaue Ursache dieser Störungen konnte nicht ermittelt werden. Sie könnten durch den Verkehr auf dem direkt anliegenden Böllentorweg (ca. 10 m Abstand) verursacht worden sein. Besonders hervorstechen kurzzeitige Schwankungen bei etwa 380 s, 410 s und 635 s, die wahrscheinlich durch Fahrzeuge verursacht wurden. Die Störungen sind alle sehr kurzzeitig. Langfristige Drifts oder Sprünge treten dagegen nicht auf.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.7 angegeben. An dieser Position sind starke Schwankungen zu verzeichnen. Für die einzelnen Komponenten und den Betrag sind Störungen von mehreren 100 nT aufgetreten.

Tabelle 2.7: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 067 in Gebäude L2/01 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	624,3	435	433,6	434,7
\vec{B}_y	524,2	446,7	444,9	443,3
\vec{B}_z	457,4	320,8	321,2	321
$ \vec{B} $	567,5	336,1	334,6	335

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.15: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 067 in Gebäude L2/01

2.2.4.2 Raum 061 - Transmissionselektronenmikroskop

Die Messung am Transmissionselektronenmikroskop (TEM) in Raum 061 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 09.45 Uhr bis 10.00 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.16 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

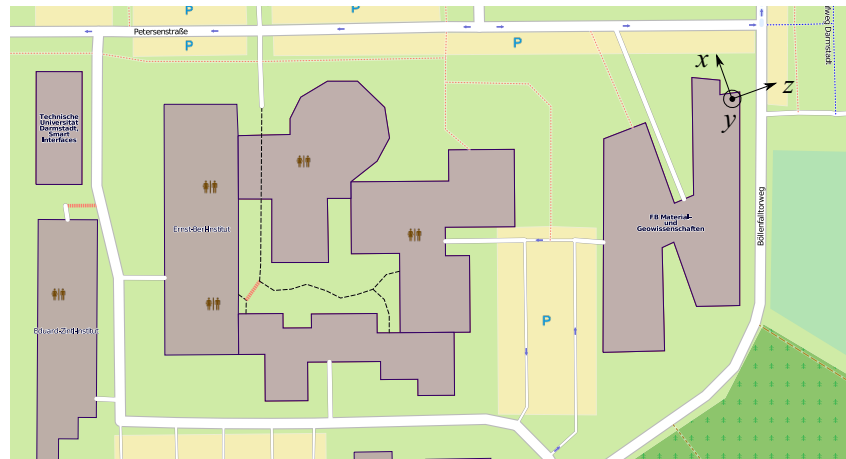


Abbildung 2.16: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 061 in Gebäude L2/01

In Abbildung 2.17 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Auch hier treten über den gesamten Zeitraum relativ viele kurzzeitige Störungen auf, von denen besonders eine bei etwa 250 s hervorsticht. Hier sind schnelle Änderungen einzelner Komponenten in der Größenordnung von 1 μ T aufgetreten. Die genaue Ursache dieser Störung konnte nicht ermittelt werden. Wahrscheinlich wurde diese Störungen durch ein Fahrzeug auf dem direkt angrenzenden Böllenfalltorweg verursacht.

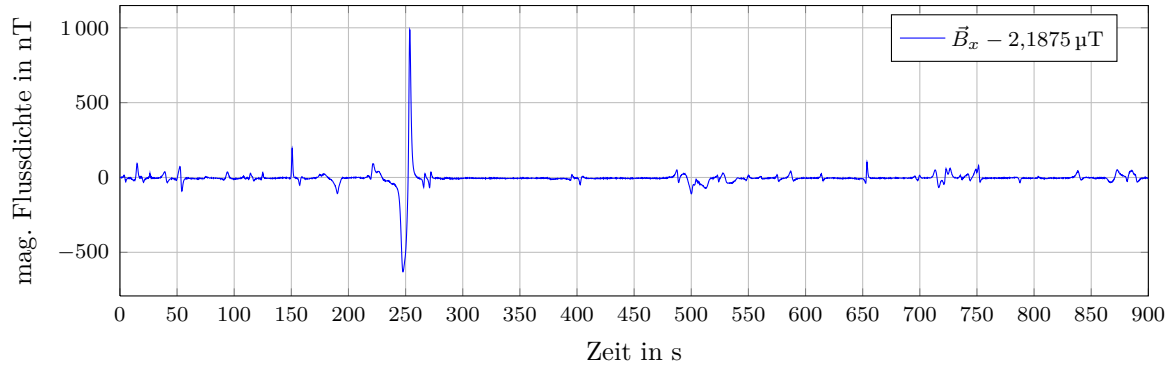
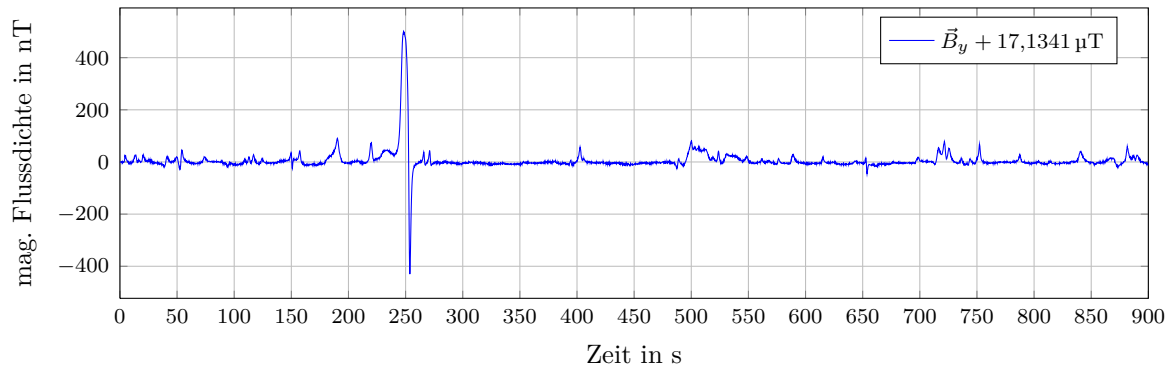
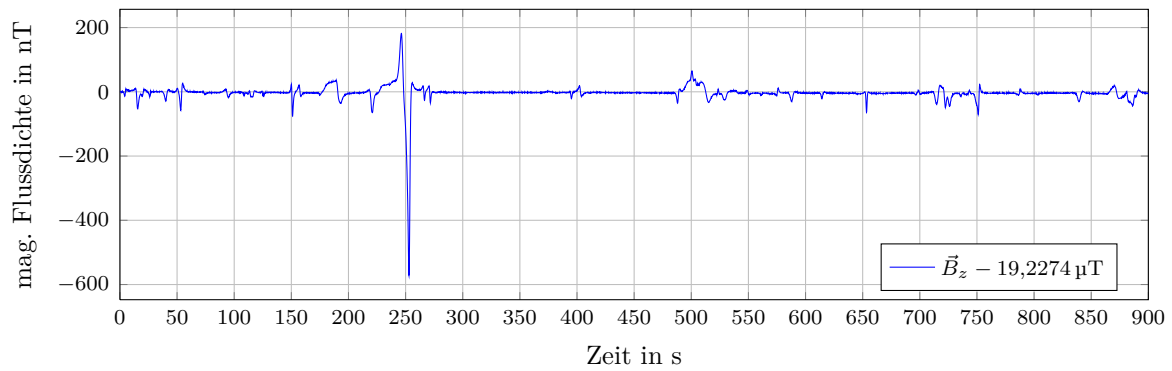
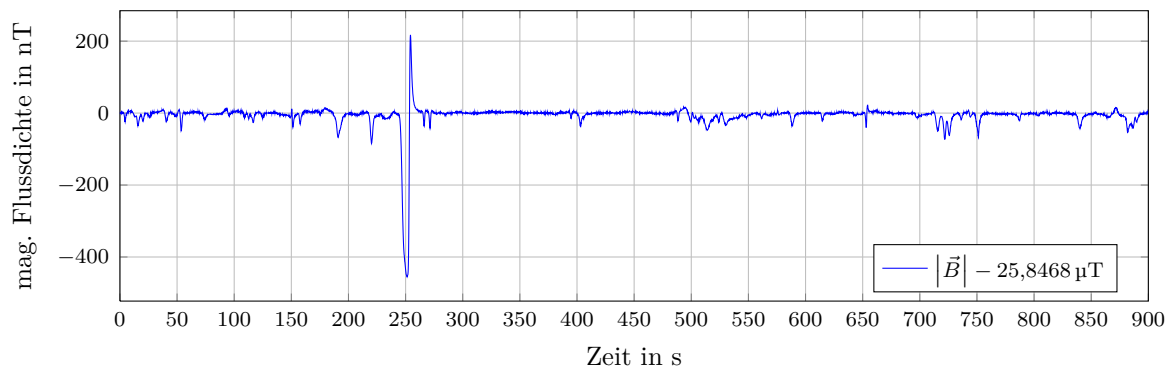
Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.8 angegeben. An dieser Position sind ebenfalls starke Schwankungen zu verzeichnen. Für die einzelnen Komponenten und den Betrag sind Störungen von mehreren 100 nT aufgetreten. Da die starke Störung (bei 250 s) nur einmal im Messzeitraum auftrat, sind die Werte mit denen von Raum 067 im gleichen Gebäude vergleichbar.

Tabelle 2.8: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 061 in Gebäude L2/01 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	808,4	1565	1010	991,9
\vec{B}_y	504,2	914,5	503,9	505,6
\vec{B}_z	411,9	615,7	593,3	569,8
$ \vec{B} $	488,6	623,2	442,2	458,8

2.2.4.3 Raum 20 - Rasterelektronenmikroskop

Die Messung am Rasterelektronenmikroskop (REM) in Raum 20 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 10.10 Uhr bis 10.25 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.18 ist

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.17: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 061 in Gebäude L2/01

die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

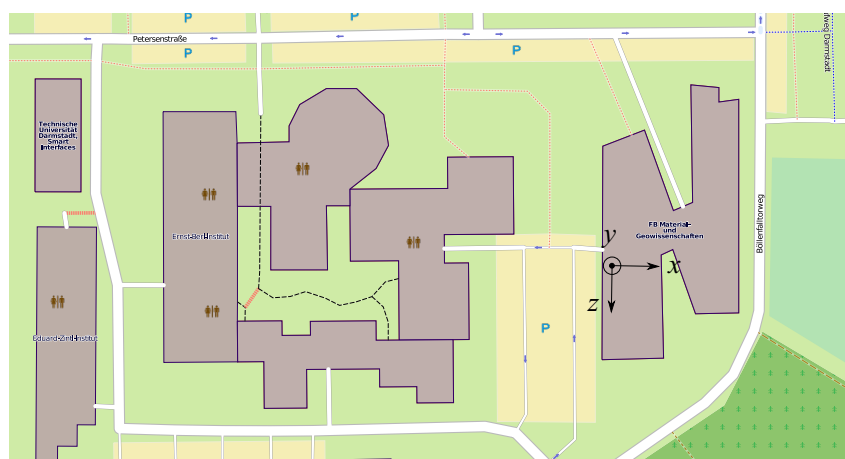


Abbildung 2.18: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 20 in Gebäude L2/01

In Abbildung 2.19 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Auffällig sind ein Sprung bei etwa 50 s sowie langsamere Schwankungen mit größerer Amplitude bei 300 s und 450 s. Ansonsten sind die Schwankungen über den gesamten Zeitraum relativ gering. Allerdings sind alle Komponenten und damit auch der Betrag von periodischen Schwankungen sehr geringer Amplitude im Hz-Bereich überlagert.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.9 angegeben. An dieser Position sind mittlere Schwankungen zu verzeichnen. Für die horizontale x - und z -Komponente liegen die Schwankungen im Bereich unterhalb von 100 nT, für die vertikale y -Komponente und den Betrag auch leicht darüber. Die stärksten Schwankungen sind über ein zeitlich gewichtetes Fenster von 20 s aufgetreten.

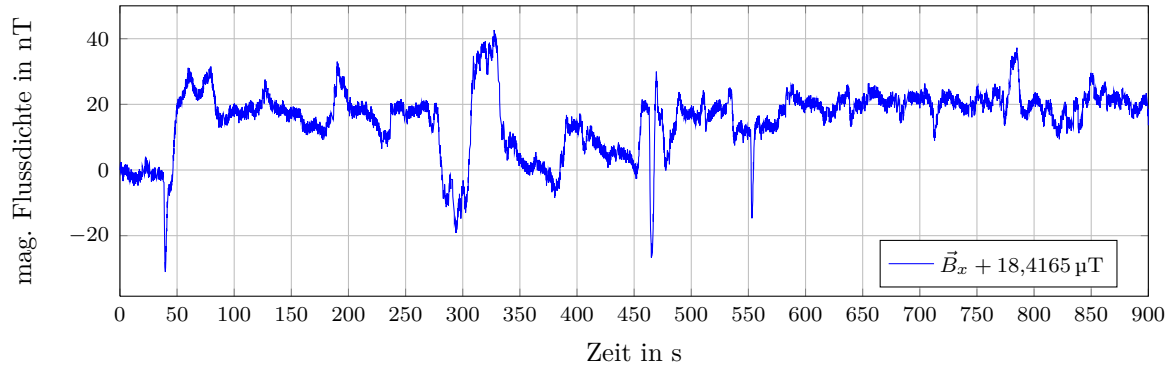
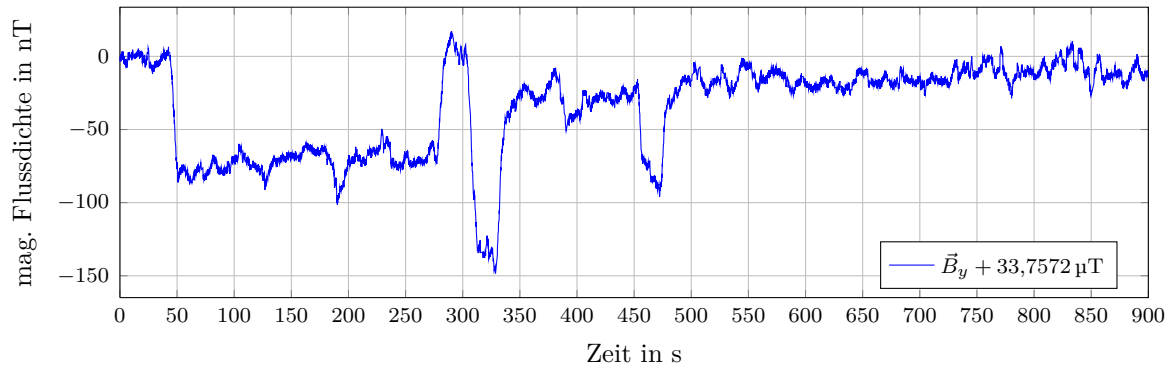
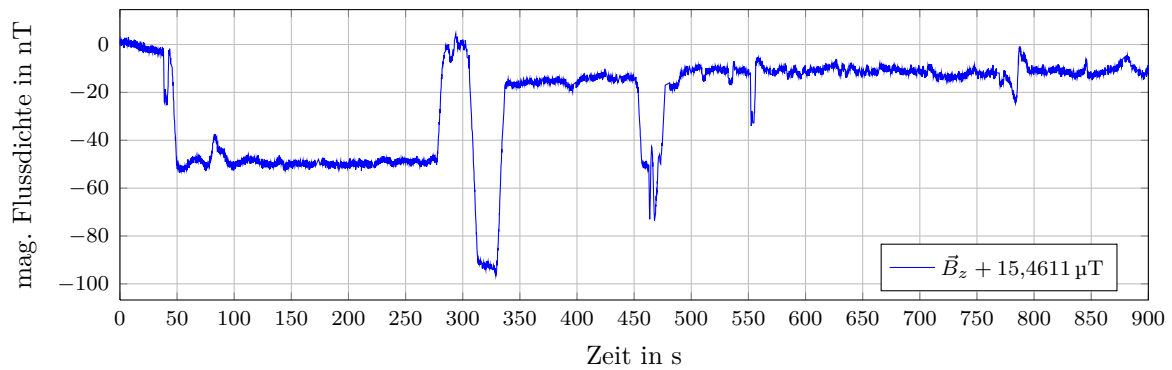
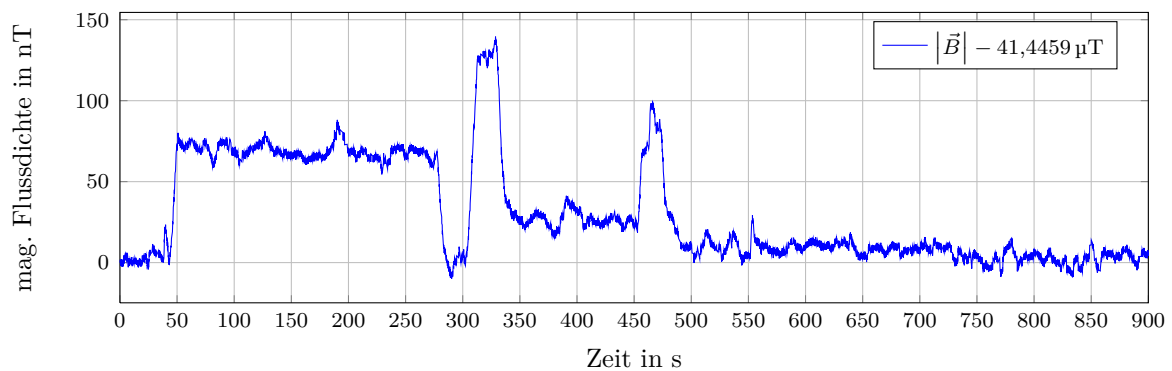
Tabelle 2.9: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 20 in Gebäude L2/01 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	32,84	52,05	62,21	48,34
\vec{B}_y	27,84	89,79	143,9	122,1
\vec{B}_z	24,02	58,45	95,54	82,96
$ \vec{B} $	24,25	75,1	130,6	114,2

2.2.4.4 Raum 062 - Rasterelektronenmikroskop

Die Messung am Rasterelektronenmikroskop (REM) in Raum 062 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 10.35 Uhr bis 10.50 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.20 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

In Abbildung 2.21 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Die Verläufe zeigen zahlreiche kurze Störungen, die aber meist nicht über Amplitudenänderungen von 150 nT hinausgehen. Dabei sticht keine Störung besonders hervor. Die genaue

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.19: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 20 in Gebäude L2/01

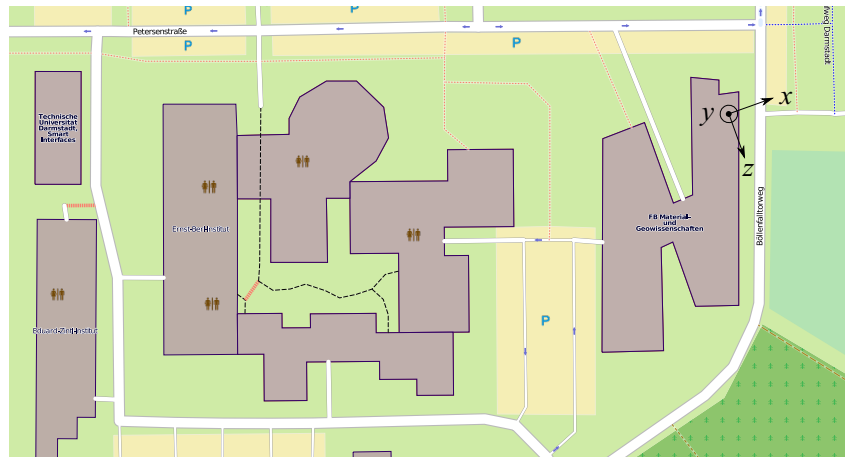


Abbildung 2.20: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 062 in Gebäude L2/01

Ursache dieser Störungen konnte nicht ermittelt werden. Auffällig sind ein kleiner Sprung der Messwerte bei 50 s und eine darauf folgende Drift der Messwerte über den gesamten Zeitraum der Messung. Die horizontale x -Komponente wird dabei betragsmäßig größer, die vertikale y -Komponente und die horizontale z -Komponente werden dabei betragsmäßig kleiner, so dass auch der Gesamtbetrag der Flussdichte über den Messzeitraum leicht absinkt. Die langsame Drift kann also nicht durch eine langsame Drehung der Sonde auf einer zu weichen Unterlage verursacht worden sein, sondern muss externe Gründe haben. Die aktive Magnetfeldkompensationsanlage in Raum 068 im gleichen Gebäude ist dafür eine mögliche Ursache.

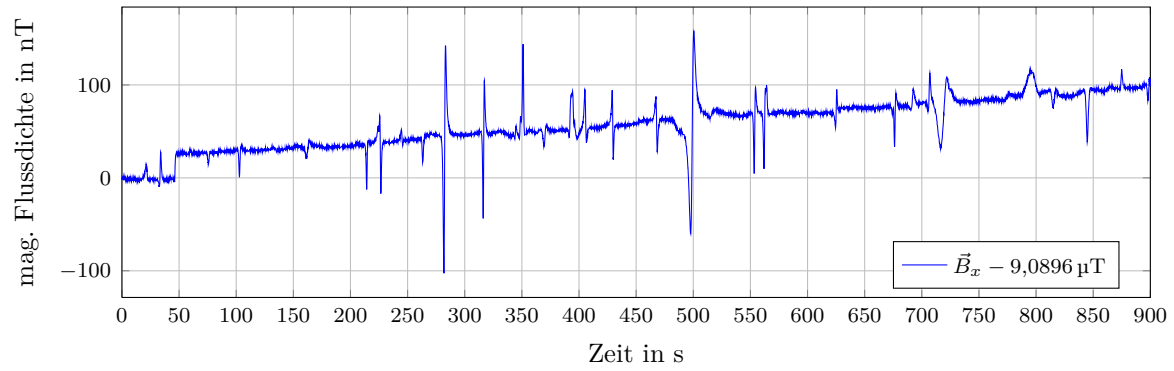
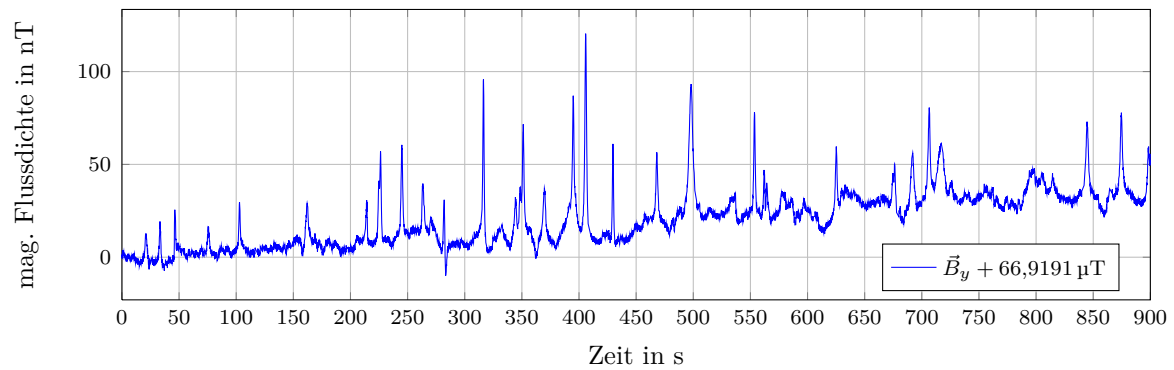
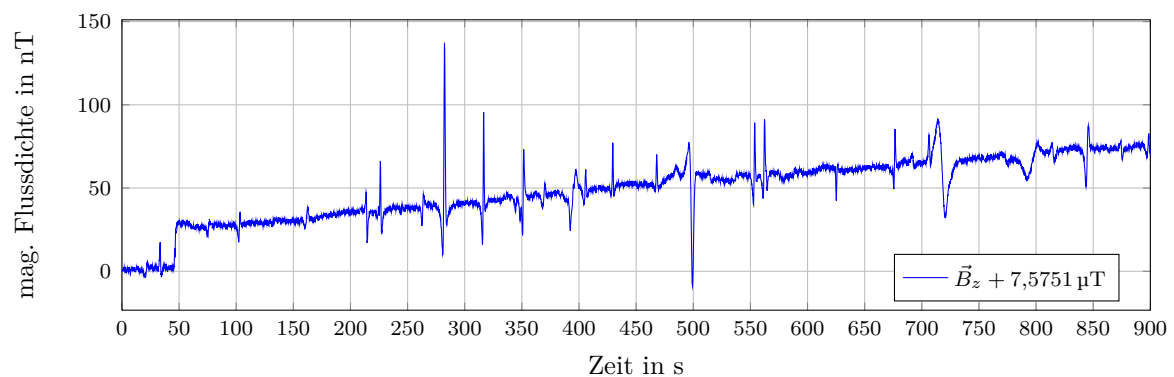
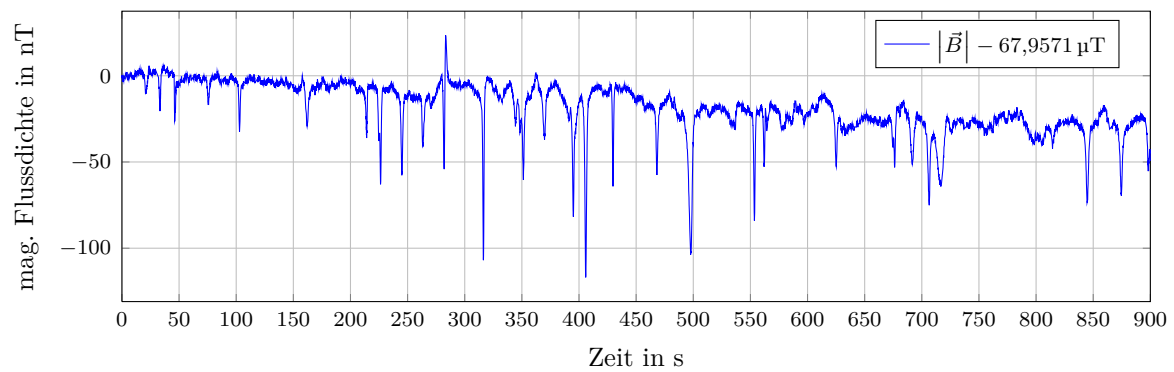
Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.10 angegeben. An dieser Position sind mittlere Schwankungen zu verzeichnen. Für die einzelnen Komponenten und den Betrag ist mit Störungen von 100 nT bis 150 nT zu rechnen.

Tabelle 2.10: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 062 in Gebäude L2/01 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	225,4	162,7	149,4	153,3
\vec{B}_y	72,22	107,2	107,8	113,7
\vec{B}_z	114	98,95	107,4	102,8
$ \vec{B} $	90,52	106,1	106,5	112

2.2.4.5 Raum 068 - Transmissionselektronenmikroskop mit aktivierter Magnetfeldkompensationsanlage

Die Messung am Transmissionselektronenmikroskop (TEM) in Raum 068 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 11.00 Uhr bis 11.15 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.22 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt. Da in diesem Raum schon früher Probleme aufgetaucht sind, wurde der Raum mit einer aktiven Magnetfeldkompensationsanlage ausgestattet. Die Messung wurde einmal mit aktivierter

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.21: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 062 in Gebäude L2/01

Magnetfeldkompensationsanlage durchgeführt und später mit deaktivierter Kompensation wiederholt.

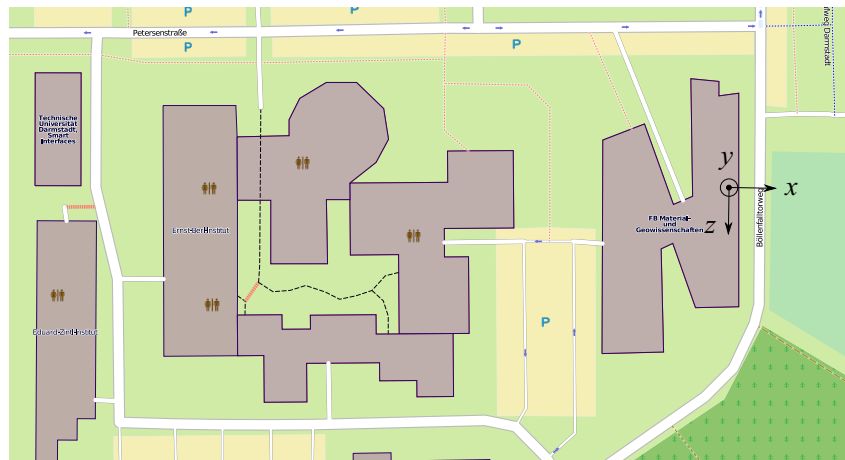


Abbildung 2.22: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 068 in Gebäude L2/01

In Abbildung 2.23 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Trotz der Kompensationsanlage sind zahlreiche kurzzeitige Störungen zu erkennen, deren genaue Ursache nicht ermittelt werden konnte. Die Ursache könnte die direkte Nähe zum Verkehr auf dem Böllentorweg sein. Von diesen Störungen sticht besonders ein Ereignis bei 525 s hervor, dessen Ursache wahrscheinlich ein Fahrzeug ist.

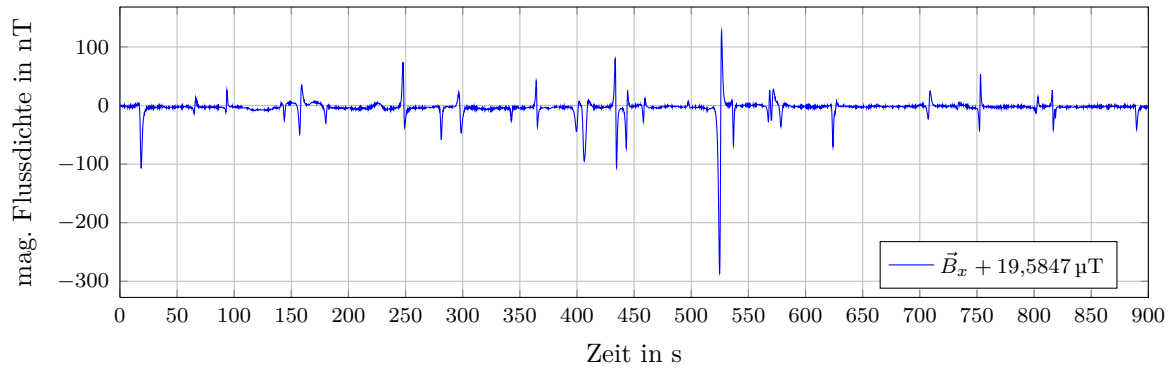
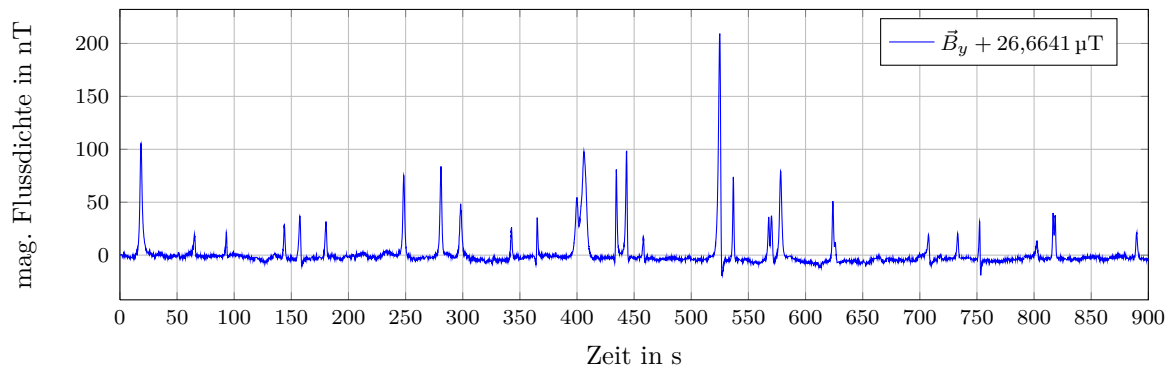
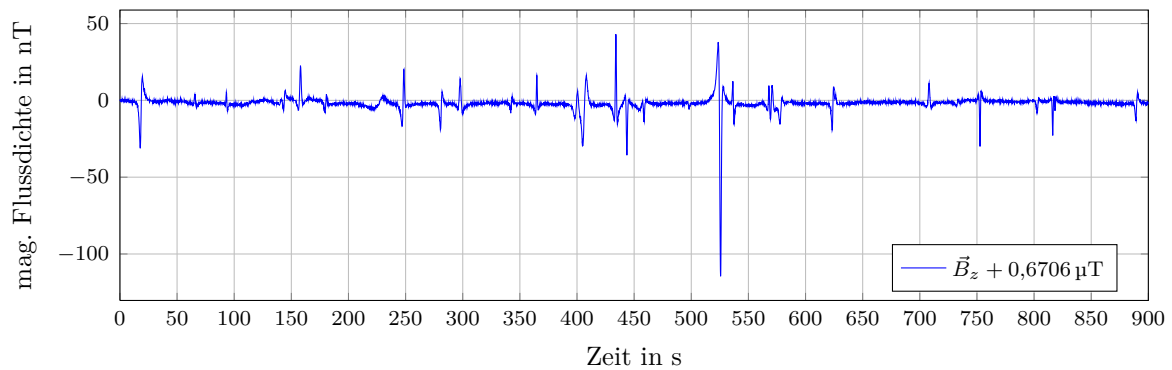
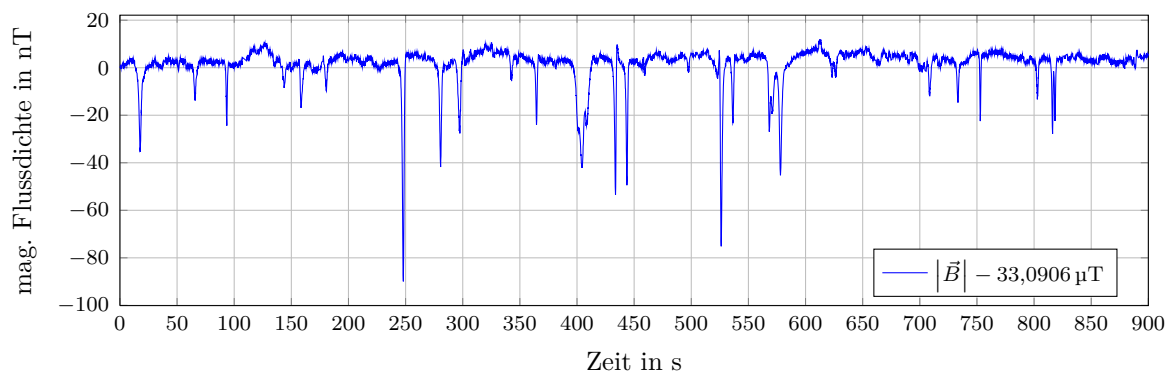
Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.11 angegeben. An dieser Position sind trotz der Kompensationsanlage relativ starke Schwankungen zu verzeichnen. Für die einzelnen Komponenten mit Störungen von einigen 100 nT zu rechnen, der Gesamtbetrag der Flussdichte schwankt dagegen um weniger als 100 nT.

Tabelle 2.11: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 068 in Gebäude L2/01 mit aktivierter Magnetfeldkompensationsanlage in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	346,9	287,8	285,1	283,6
\vec{B}_y	179,9	211,6	214,7	211
\vec{B}_z	116,7	121,5	112,3	115,5
$ \vec{B} $	72,21	94,2	92,92	93,21

2.2.4.6 Raum 068 - Transmissionselektronenmikroskop mit deaktivierter Magnetfeldkompensationsanlage

Die Messung am Transmissionselektronenmikroskop (TEM) in Raum 068 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 11.45 Uhr bis 12.00 Uhr durchgeführt. Für diese Messung wurde die gleiche Position und Ausrichtung der Messsonde verwendet, die schon in Abbildung 2.22 auf Seite 28 gezeigt wurde.

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.23: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 068 in Gebäude L2/01 mit aktivierter Magnetfeldkompensationsanlage

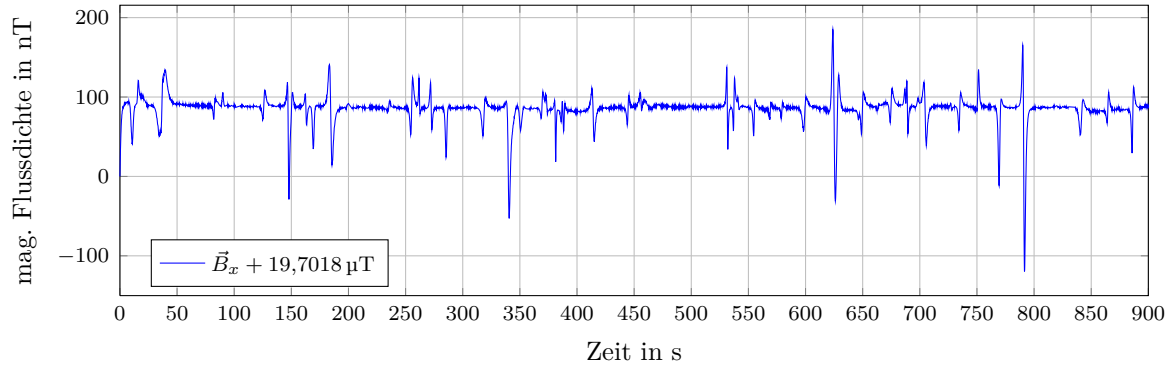
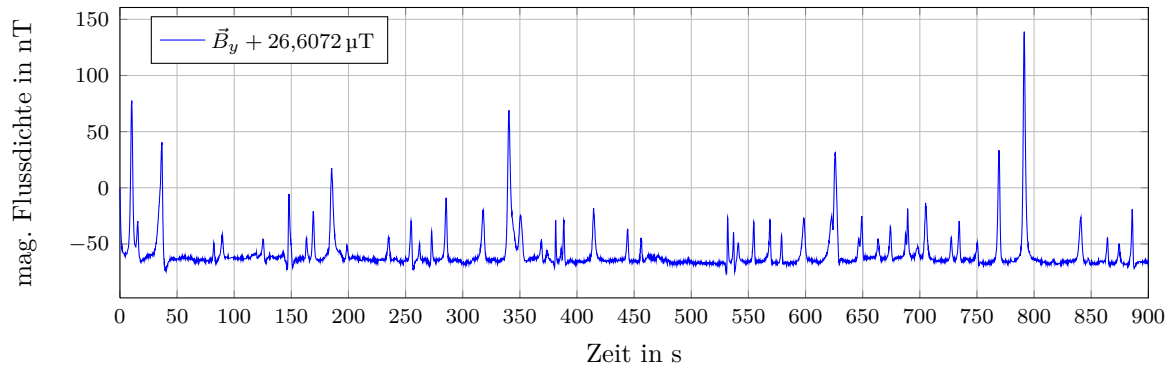
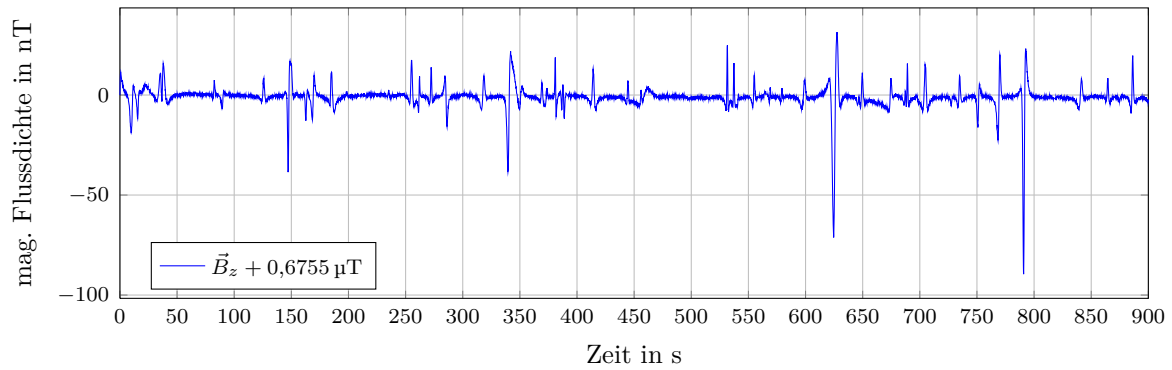
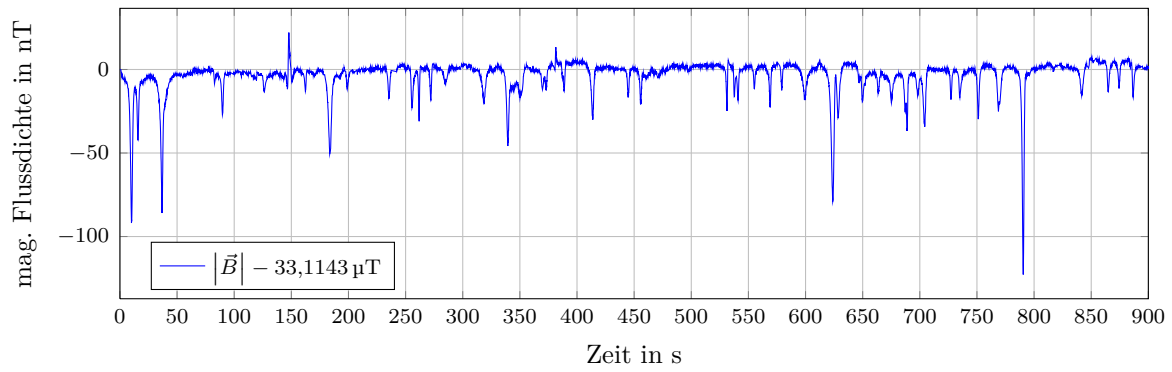
In Abbildung 2.24 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Gegenüber der Messung mit aktivierter Kompensationsanlage ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Erneut sind zahlreiche kurzzeitige Störungen zu verzeichnen, die wahrscheinlich durch den anliegenden Verkehr verursacht wurden.

Die Wirkung der Kompensationsanlage ist in diesen Vergleichsmessungen nicht direkt sichtbar, da die Messsonde nicht exakt im Zentrum des aktiv kompensierten Bereichs, sondern etwas darunter angeordnet war.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.11 angegeben. An dieser Position sind auch ohne die aktive Kompensationsanlage Schwankungen der Komponenten von etwa 200 nT zu verzeichnen.

Tabelle 2.12: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 068 in Gebäude L2/01 mit deaktivierter Magnetfeldkompensationsanlage in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	249	205,9	216,2	206,4
\vec{B}_y	123,9	198,7	206,8	205,7
\vec{B}_z	91,39	90,92	98,26	87,43
$ \vec{B} $	90	120	125,4	123,6

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.24: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 068 in Gebäude L2/01 mit deaktivierter Magnetfeldkompensationsanlage

2.2.4.7 Raum 9 - hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop

Die Messung am hochauflösenden Rasterelektronenmikroskop (REM) in Raum 9 in Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von 12.25 Uhr bis 12.40 Uhr durchgeführt. In Abbildung 2.25 ist die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsonde gezeigt.

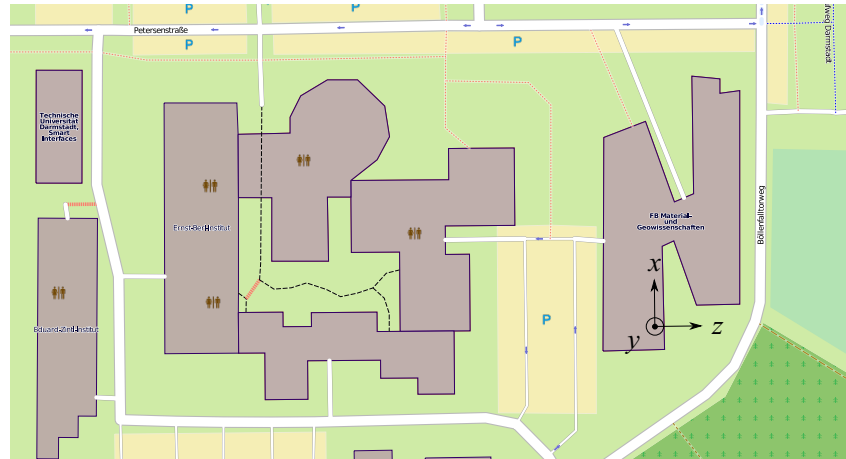


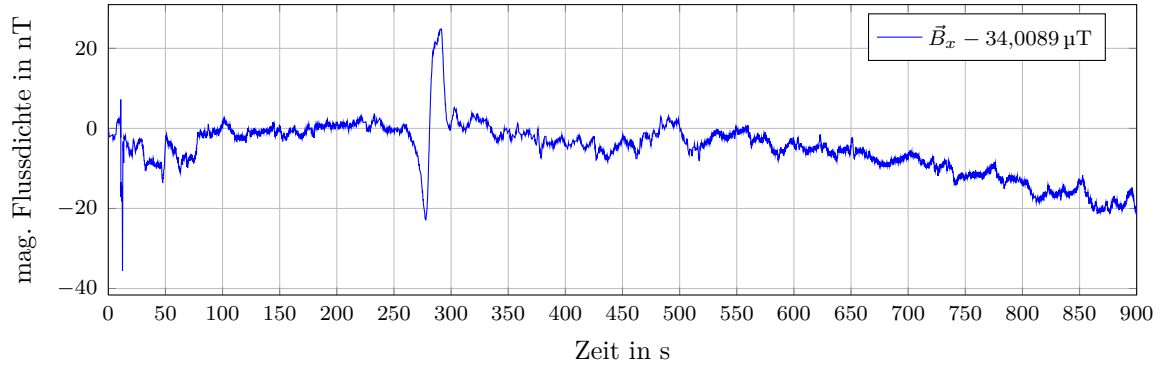
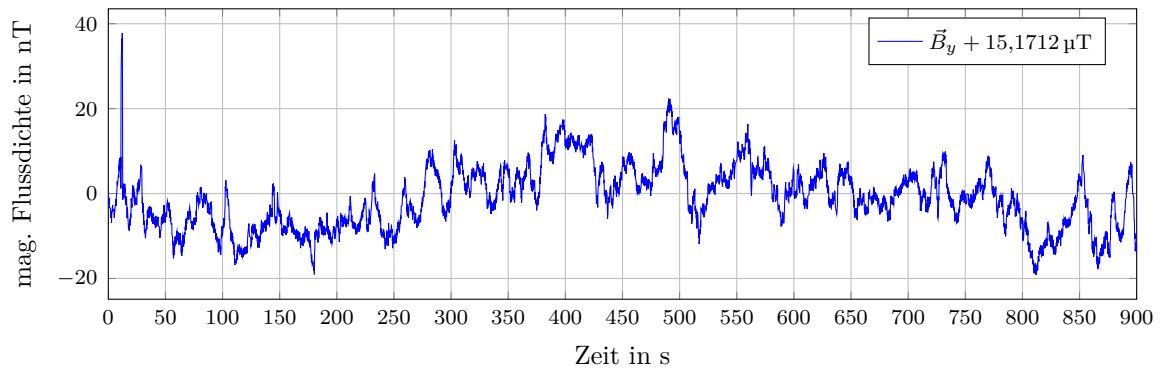
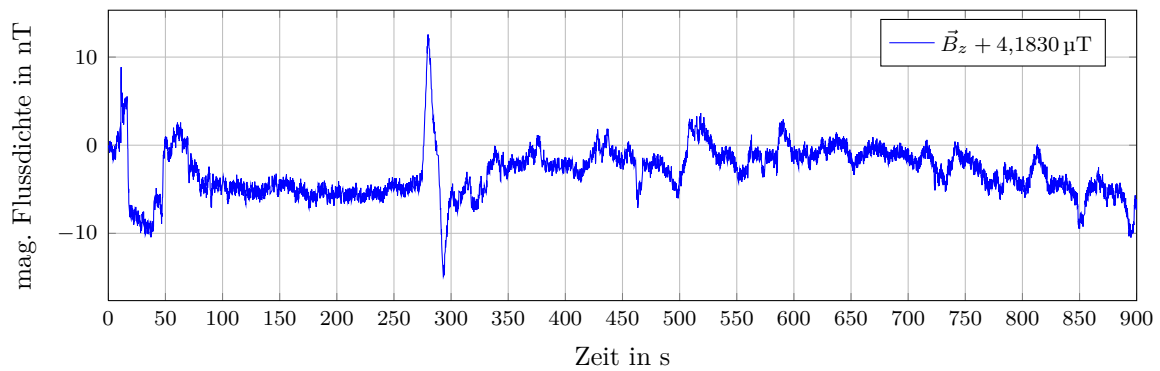
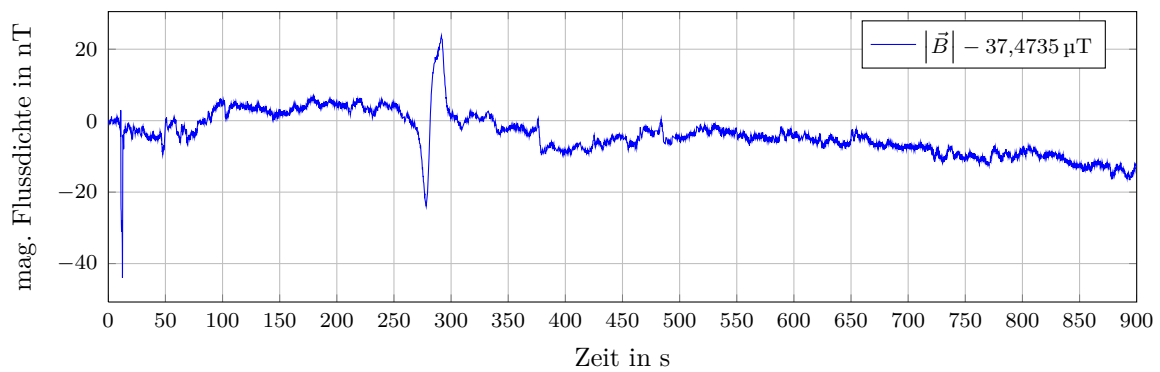
Abbildung 2.25: Position und Ausrichtung der Sonde am Messpunkt in Raum 9 in Gebäude L2/01

In Abbildung 2.26 sind die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte gezeigt. Die Verläufe weisen nur geringe Schwankungen auf. Es stechen nur eine sehr kurzzeitige Störung nach etwa 10 s und eine längere Störungen zwischen 270 s bis 300 s hervor. Wie schon in Raum 20 im gleichen Gebäudeteil sind alle Komponenten und damit auch der Betrag von periodischen Schwankungen sehr geringer Amplitude im Hz-Bereich überlagert.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.13 angegeben. Wie schon in Raum 20 um gleichen Gebäudeteil sind die Schwankungen nur gering und liegen fast ausnahmslos unterhalb von 50 nT.

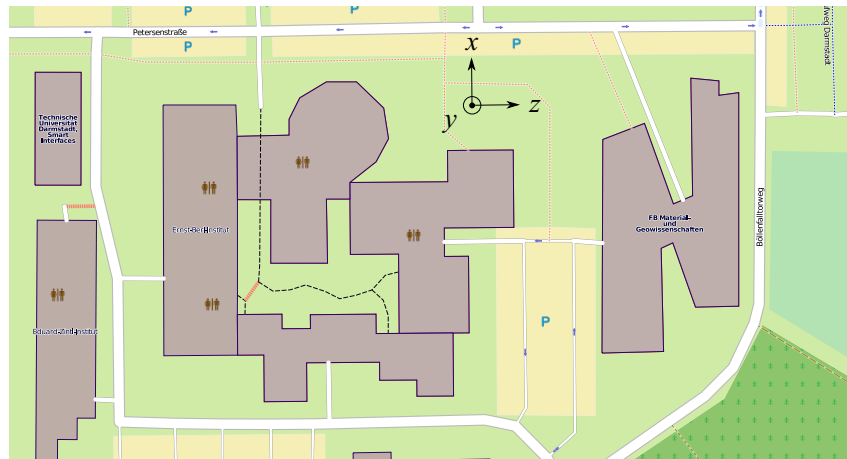
Tabelle 2.13: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt in Raum 9 in Gebäude L2/01 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	27,04	38,81	35,58	35,56
\vec{B}_y	37,46	43,54	47,4	52,87
\vec{B}_z	9,327	15,71	18,85	18,52
$ \vec{B} $	36,46	44,42	43,98	48,18

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.26: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte am Messpunkt in Raum 9 in Gebäude L2/01



(a) Kartendarstellung



(b) Foto

Abbildung 2.28: Position der Sonde und Richtung der Komponenten am Messpunkt 1

sich über den gesamten Zeitraum kaum und werden nur durch wenige kurzzeitige Ereignisse gestört. Die vertikale y -Komponente ist dagegen über den gesamten Zeitraum der Messung stärkeren Schwankungen unterworfen. Ein Ereignis bei 615 s sticht besonders hervor, dass einem vorbeifahrenden LkW zugeordnet werden konnte. Die kleineren Störungen bei 20 s, 445 s und 555 s wurden dagegen durch Busse verursacht.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.14 zusammengefasst. Aufgrund des Abstands zur Petersenstraße liegen die Schwankungen fast ausnahmslos unterhalb von 100 nT.

Tabelle 2.14: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt 1 in nT

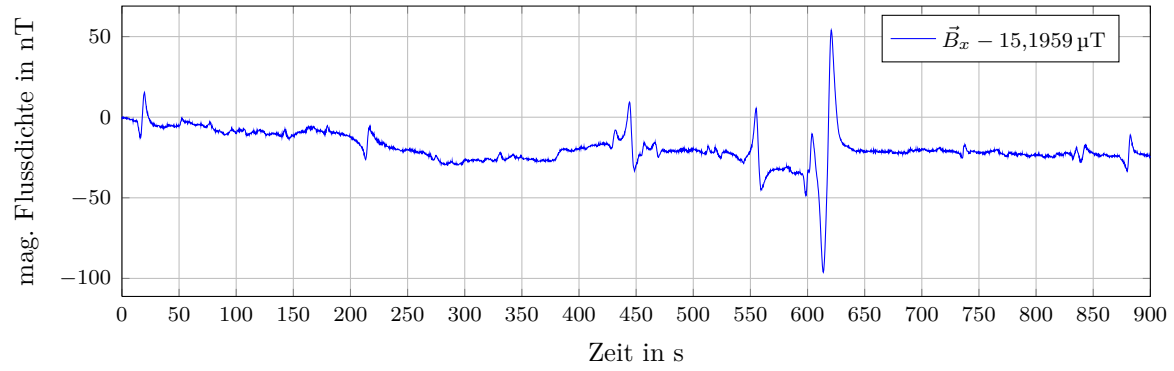
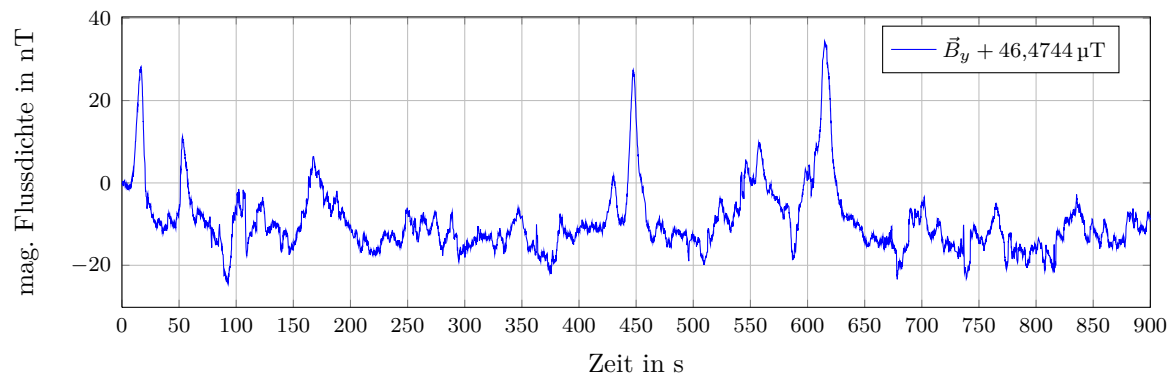
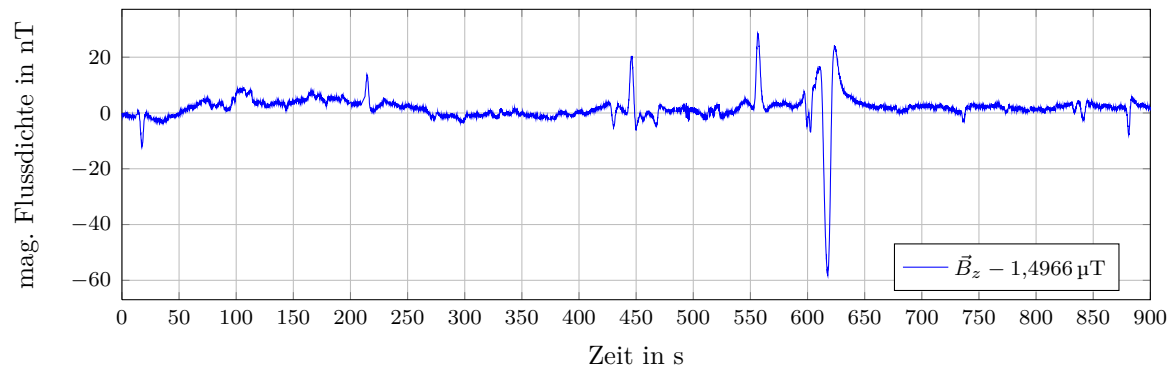
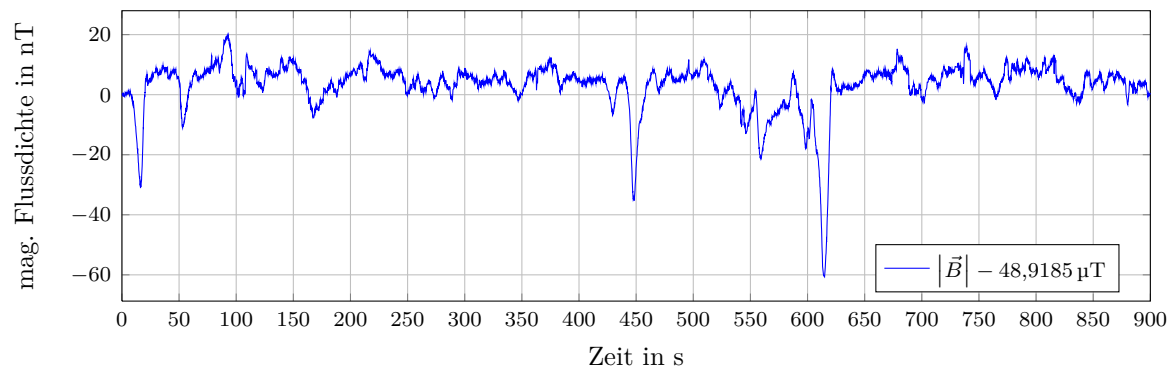
Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	35,58	132,1	86,9	77,42
\vec{B}_y	13,69	33,47	43,46	49,07
\vec{B}_z	26,54	79,63	65,25	60,31
$ \vec{B} $	15,36	59,93	63,4	67,92

2.3.2 Messpunkt 2

Der Messpunkt 2 vor dem Gebäude L2/01 wurde am 29. November 2012 von ca. 14.00 Uhr bis 14.15 Uhr untersucht. Die exakte Position der Sonde und die Richtung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 2.28 festgehalten.

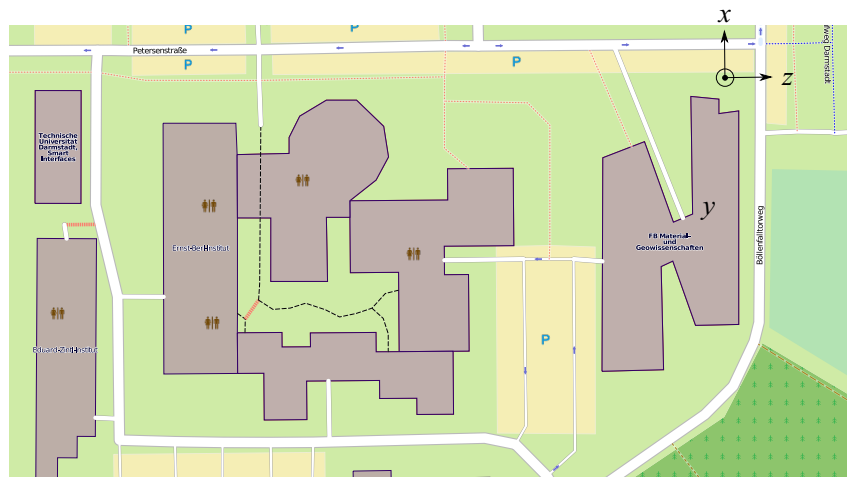
Die zeitlichen Verläufe der drei Komponenten und des Betrages der magnetischen Flussdichte sind in Abbildung 2.29 dargestellt. Aufgrund einer eingeschränkten Energieversorgung des Messsystems wurden nicht 15 min sondern nur knapp 13 min aufgezeichnet. Da sich diese Messposition 2 gegenüber dem Messpunkt 1 dichter an der Petersenstraße befand, fallen hier die Schwankungen durch vorbeifahrende Busse auch deutlich stärker aus. Die starken und kurzzeitigen Störungen bei 205 s, 245 s, 290 s und 410 s konnten ganz eindeutig vorbeifahrenden Bussen zugeordnet werden. Interessant ist auch, dass der Gleichanteil des Gesamtbetrags der magnetischen Flussdichte etwa 20 % über dem Erdmagnetfeld liegt, was durch den Eisendeckel des Abflussschachts verursacht wurde, auf dem die Messsonde platziert war.

Die numerische Auswertung ist in Tabelle 2.15 zusammengefasst. Über die gewichteten Zeiträume größer als 5 s treten hier Schwankungen im Bereich von 200 nT bis 300 nT auf.

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.29: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte an der Messposition 1



(a) Kartendarstellung

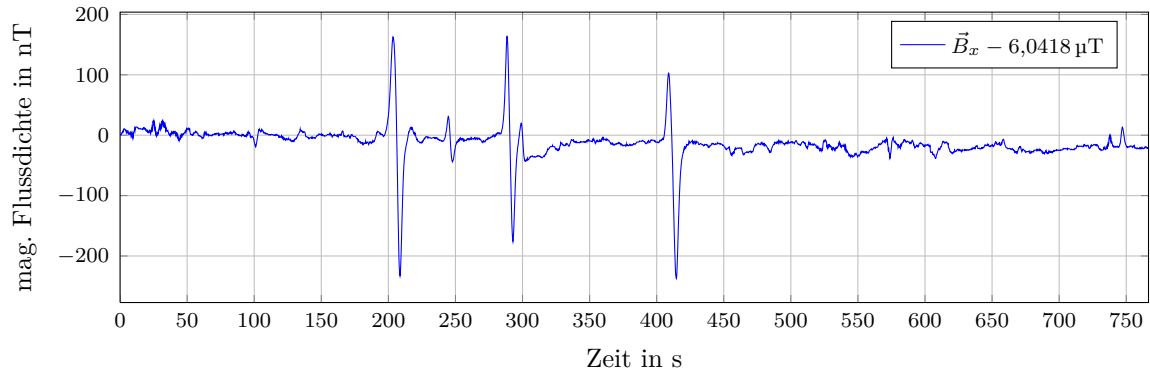
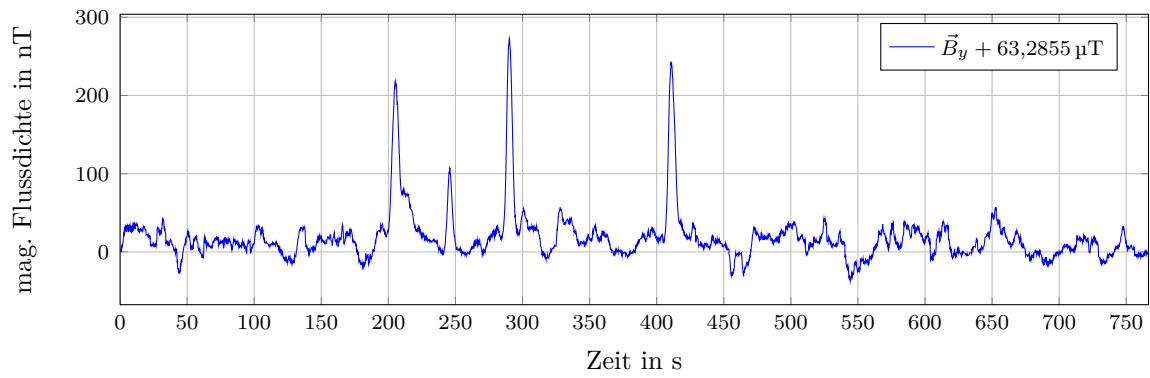
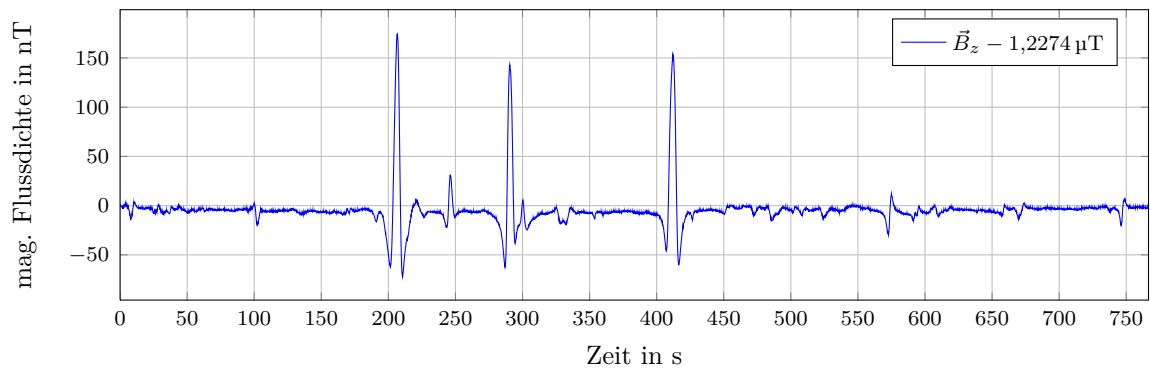
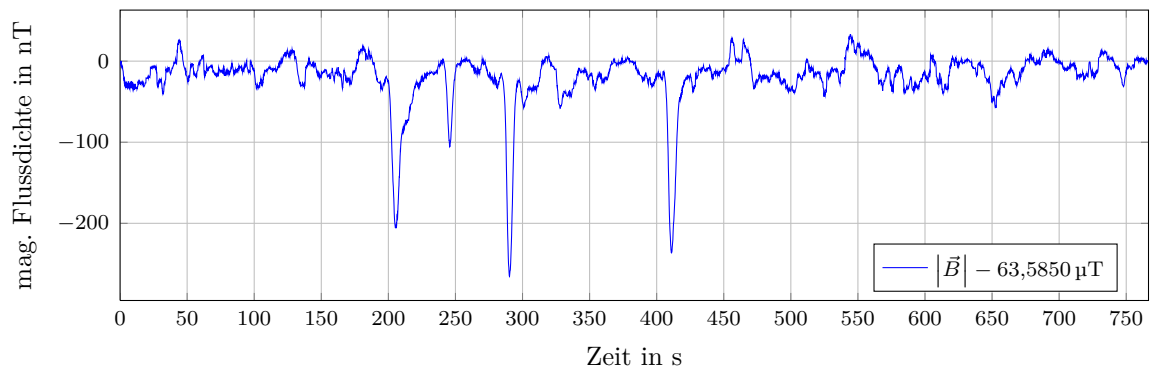


(b) Foto

Abbildung 2.30: Position der Sonde und Richtung der Komponenten am Messpunkt 2

Tabelle 2.15: gewichtete Änderungen der magnetischen Flussdichte innerhalb bestimmter Zeitfenster am Messpunkt 2 in nT

Komponente	innerhalb von 1 s	5 s	20 s	100 s
\vec{B}_x	129	391,1	230,1	235,6
\vec{B}_y	97,83	248,1	274,3	262,8
\vec{B}_z	105,4	233,5	186,3	189,8
$ \vec{B} $	92,71	240,9	265,2	253,9

(a) x -Komponente(b) y -Komponente(c) z -Komponente

(d) Betrag

Abbildung 2.31: zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte an der Messposition 2

A Zertifikat über die Kalibrierung der Magnetfeldsonde

STL
Systemtechnik Ludwig GmbH

DM-060 Digital Magnetometer
Certificate of Conformity

CERTIFICATE OF CONFORMITY

DM-060 Digital Magnetometer

COC-DM060-H-020 ISSUE 2

SERIAL NUMBERS OF EQUIPMENT UNDER TEST

- ☐ DM-Digital Magnetometer Serial Number: 2004094901114
- ☐ Power Pigtail Serial Number: 40A0913055 PHX
- ☐ PCMCIA Serial Number: 11500.F04.CB2
- ☐ FEB Serial Number: 45A.10.020.115
- ☐ Purchase/Order number:

REFERENCES

The measurements are performed according to procedures described in *COP-DM060-H-020 ISSUE2.doc*.

DM FUNCTIONALITY

- 1. Initialisation ✓OK
- 2. Data Communication ✓OK
- 3. Scaling Error ✓OK
- 4. Offset Error ✓OK
- 5. Magnetic Adjustment ✓OK
- 6. Noise ✓OK
- 7. Scan rate ✓OK
- 8. Angular alignment ✓OK

Date: 08.03.2010

Name: Babuel