



Hochschule für angewandte Wissenschaften Regensburg
Fakultät Maschinenbau

Bachelorarbeit

Bestimmung der Kräfte auf Weicheisenabschirmungen im magnetischen Feld des ASDEX Upgrade

vorgelegt von:
Stefan Kammerl
Matrikel-Nr.: 2540094

am
29.02.2012

Prüfer: Prof.Dr.-Ing. Marcus Wagner

Betreut am Max-Planck Institut für Plasmaphysik durch
Dr. Herrmann Albrecht

Kurzbeschreibung

Beim ASDEX Upgrade handelt es sich um ein Fusionsexperiment mit magnetischem Plasmaeinschluss. Die dabei entstehenden magnetischen und elektrischen Felder im Außenbereich der Versuchsanlage nehmen Einfluss auf Diagnostiken und andere Komponenten. Um Störungen an Diagnostiken zu minimieren und um die Funktion elektrischer Komponenten zu gewährleisten, werden teilweise Abschirmungen aus hochpermeablen Eisenwerkstoffen verwendet (Weicheisen). Die ferromagnetischen Eigenschaften dieses Werkstoffes führen dazu, dass auf die Weicheisenabschirmungen eine Kraft wirkt. Diese Kräfte können im Außenbereich des ASDEX Upgrade, je nach Rahmenbedingungen, das Dreifache des Eigengewichtes erreichen. Bei der Auslegung der Abschirmungen müssen diese Kräfte berücksichtigt werden.

Bisher werden die entstehenden Kräfte auf die Weicheisenabschirmung im magnetischen Feld des ASDEX Upgrade mit einer zweidimensionalen FEM-Berechnungen ermittelt. Eine experimentelle Verifizierung dieser FEM-Berechnungen wurde noch nicht durchgeführt. Dies soll Gegenstand dieser Arbeit sein.

Dazu soll erst mit einer mathematischen Analyse die physikalischen Zusammenhänge beschrieben werden. Anschließend werden die Kräfte auf exemplarische Weicheisenkörper im Magnetfeld des ASDEX Upgrade mit dem 2D FEM Programm Quickfield berechnet. Für die Messung der Kräfte im Außenbereich des ASDEX Upgrade soll ein Messsystem ausgewählt, installiert und bei Bedarf entwickelt werden. Abschließend soll ein Vergleich der ermittelten Kräfte auf die Weicheisenabschirmungen aus FEM Berechnung, mathematischer Analyse und Messung, Auskunft über den Wahrheitsgehalt der 2D FEM Berechnungen geben.

Abstract

The ASDEX Upgrade is a fusion experiment with magnetic plasma control. The thereby created magnetic and electrical fields are influencing diagnostic systems and other electrical components. In order to minimize interferences on the diagnostic systems and to assure the functionality of electrical components, shields, made of a high permeable material, are used (soft iron). The ferromagnetic characteristic of this material causes forces which are acting on the shields. In the exterior area of the ASDEX Upgrade where the shields are located these forces can reach a three times higher value than the dead load of the shields. To assure a proper design of the shields, these forces must be considered.

Until now the induced forces, which are acting on the shields within the magnetic field of the ASDEX Upgrade, are calculated with a two-dimensional FEM-software. An experimental validation of the theoretical FEM calculations has not been done yet. This validation is the central task of this thesis.

For this matter the physical implications will be explained within a mathematical analysis of the problem. The second step is to calculate the forces on the shielding with the 2D FEM-software called Quickfield. In order to measure the forces on the shields in the exterior area of the ASDEX Upgrade, a measurement system is required. The choosing, installation and -if necessary- the design of a qualified measurement system are tasks for this thesis. The target is, to make a statement about the accuracy of the 2D FEM calculation. Therefore there will be a comparison of the forces resulting from the mathematical analysis, the 2D FEM calculation and the measurement.

Inhaltsangabe

Kurzbeschreibung	I
Abstract	I
Inhaltsangabe	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Verwendete Formelzeichen	IV
Glossar	V
1. Einleitung	V
1.1. Was ist der ASDEX Upgrade	1
1.2. Kurzbeschreibung der Kernfusion	1
1.3. Das Magnetfeld des ASDEX Upgrade.....	2
1.4. Inhalt der Arbeit	3
1.4.1. Beschreibung der Arbeit	3
1.4.2. Eingrenzung der Arbeit.....	4
1.4.3. Arbeitsschritte.....	4
2. Mathematische Analyse	5
2.1. Allgemeine Betrachtung einer Kugel	5
2.2. Anwendung auf den ASDEX Upgrade.....	7
3. Berechnung mit FEM	8
3.1. Das Programm Quickfield	8
3.2. Preprocessing und Postprocessing in Quickfield.....	9
3.3. Materialparameter	9
3.4. Das Toroidalfeld des ASDEX Upgrade.....	11
3.5. Das Poloidalfeld	14
3.5.1. Einzelne Spule als Magnetfeldquelle	15
3.5.2. Reales Poloidal magnetsystem des ASDEX Upgrade.....	17
4. Wahl des Messsystems	20
4.1. Laservibrometer	20
4.2. Federkreuz.....	22
4.3. Piezoelektrische Aufnehmer	24
4.4. DMS.....	26
4.5. Fazit zur Auswahl des Messsystems.....	29
5. Messsystem	31
5.1. Auslegungsberechnung für den Federkörper	31
5.2. Konstruktion des Sensors	33
5.3. Applizierung der DMS	35
5.3.1. Vorbereiten der Messstelle	35
5.3.2. Ankleben des DMS.....	36
5.3.3. Verlöten der Zuleitungen	36
5.4. Messsignalverarbeitung und Kalibrierung	37
5.4.1. Messsignalverarbeitung.....	37

5.4.2. Kalibrierung.....	39
5.4.2.1. Vergleichsmessung.....	42
5.4.2.2. Aktive Kalibrierung.....	44
5.4.2.3. Querempfindlichkeit.....	48
5.4.3. Kennwerte des Messsystems.....	50
6. Gegenüberstellung	52
6.1. FEM-Berechnung Sondentestschuss	52
6.2. Messung beim Sondentestschuss	54
7. Diskussion.....	56
7.1. Ausblick.....	57
8. Quellen	i
9. Selbstständigkeitserklärung	iii
10. Danksagung	iii
11. Anhang	iv

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schnitt des ASDEX Upgrade [1]	1
Abb. 2: Darstellung der Fusionsreaktion [2]	2
Abb. 3: Magnetfeldsystem [3].....	2
Abb. 4: Vorgehensweise zur Lösungsfindung bei FEM-Programmen.....	8
Abb. 5: Magnetische Kennlinie des Armco Weicheisens.....	11
Abb. 6: Toroidalfeldspulen im Schnitt ohne (links) und mit Netz (rechts)	11
Abb. 7: Veränderung der Flussdichte bei verschiedenen Netzen im Toroidalfeld	13
Abb. 8: Verteilung durch die Toroidalfeldspulen generierte magnetische Flussdichte	14
Abb. 9: Veränderung der Flussdichte bei verschiedenen Netzen im Poloidalfeld	15
Abb. 10: Vergleich FEM-Berechnung mit der mathematischen Analyse.....	17
Abb. 11: Vergleich der Magnetfelder in pfeld und Quickfield	18
Abb. 12: Kraft auf Weicheisen bei verschiedenen Berechnungsmethoden.....	18
Abb. 13: Magnete des Poloidialfeldes im Vertikalschnitt	19
Abb. 14: Schema eines Laservibrometers [8].....	21
Abb. 15: Verschiebung der Zugfedern in 3 Achsrichtungen.....	22
Abb. 16: Schematische Darstellung eines geführten Systems	23
Abb. 17: vereinfachte Struktur eines Quarzkristalles [9].....	24
Abb. 18: Direkter longitudinaler Piezoeffekt und schematische Anordnung [10].....	25
Abb. 19: Direkter transversale Piezoeffekt und schematische Nutzung [10].....	25
Abb. 20: Federkörper mit DMS und Vollbrückenschaltung	27
Abb. 21: Magnetfeldbereinigter DMS im Schnitt.....	29
Abb. 22: Federkörper	31
Abb. 23: Zusammenbauzeichnung Messgerät	33
Abb. 24: Schaltplan und DMS Vollbrückenschaltung	36
Abb. 25: Masse- und Schwerpunktsberechnung des Federkörpers	39
Abb. 26: Masse- und Schwerpunktsberechnung des Winkels.....	41
Abb. 27: Vergleichsmessung	44

Abb. 28: Verlauf der Hauptbelastungsrichtung der r-Achse	46
Abb. 29: Verlauf der Hauptbelastungsrichtung der z-Achse.....	47
Abb. 30: Signal der Querempfindlichkeit in der r-Vollbrücke	49
Abb. 31: Signal der Querempfindlichkeit in der z-Vollbrücke	50
Abb. 32: Darstellung des absoluten Fehlers bei der Kalibration.....	51
Abb. 33: Ströme während eines Sondentestschusses in den unterschiedlichen Spulen ..	52
Abb. 34: Kraftmessung während eines Sondentestschusses bei $r = 4$ m.....	54
Abb. 35: Kraftmessung während eines Sondentestschusses bei $r = 3,64$ m.....	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnungen der Kraft auf Eisenkugel.....	7
Tabelle 2: Parameter für die Magnetspulen	10
Tabelle 3: Magnetsiche Flussdichte bei unterschiedlichen Netzfeinheiten	12
Tabelle 4: Ergebnisse der FEM-Berechnung mit einer Spule als Magnetfeldquelle	16
Tabelle 5: Vor- und Nachteile des Laservibrometers	22
Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Federsystems	23
Tabelle 7: Vor- und Nachteile von Piezoaufnehmern.....	26
Tabelle 8: Vor- und Nachteile eines DMS-Messsystems	29
Tabelle 9: Rahmenbedingungen für die Auslegungsberechnung.....	33
Tabelle 10: Spannungen bei verschiedenen Kräften	33
Tabelle 11: Stückliste Messgerät.....	34
Tabelle 12: Reale Spannungen in den Messbereichen des Federkörpers	35
Tabelle 13: Signalpfad.....	37
Tabelle 14: Referenzmessungen zur Verstärkungsbestimmung	38
Tabelle 15: Masse- und Schwerpunktsberechnung Federkörper in der z-Achse	40
Tabelle 16: Masse- und Schwerpunktsberechnung Federkörper in der r-Achse	41
Tabelle 17: Masse- und Schwerpunktsberechnung des Winkels	41
Tabelle 18: Berechnungen zur Vergleichsmessung z-Achse	42
Tabelle 19: Berechnungen zur Vergleichsmessung r-Achse.....	43
Tabelle 20: Kalibrierung der r-Achse	46
Tabelle 21: Kalibrierung der z-Achse.....	47
Tabelle 22: Querempfindlichkeit der r-Vollbrücke	49
Tabelle 23: Querempfindlichkeit der z-Vollbrücke.....	50
Tabelle 24: Kennwerte des Messsystems.....	51
Tabelle 25: Kraft auf Weicheisen während eines Sondentestschusses	53

Verwendete Formelzeichen

a	y-Achsenabschnitt
$b_{r/z}$	Breite des jeweiligen Messbereiches
B_{EK}	magnetische Flussdichte in einer Eisenkugel
B_{S0}	magnetische Flussdichte im Vakuum
B_W	magnetische Flussdichte im Armco-Stahl
c	Konstante
c_F	Federkonstante
d_{11}	piezoelektrischer Koeffizient
E	Elastizitätsmodul

ΔE	Energiedifferenz
ε	Dehnung
f_e	Eigenfrequenz Laser
f_r	resultierende Frequenz Laserstrahl
$f_{d/b}$	Frequenz des Messobjektes und verschobene Braggzellenfrequenz
$F_{g/r/z}$	Gesamtkraft, Kraft in der r-Achse und z-Achse
H	magnetische Feldstärke
$h_{r/z}$	Höhe des jeweiligen Messbereiches
I_P	Plasmastrom
I_S	Speisestrom
k	Materialkoeffizient des Dehnungsmessstreifens
l_H	Hebellänge
m	Steigung
$M_{g/r/z}$	Gesamt-, r-Achsen und z-Achsenmoment
Q	Ladung
r	Abstand zum Zentrum des ASDEX Upgrade
R	elektrischer Widerstand
R_S	Spulenradius bei der Betrachtung einer einzelnen Magnetfeldquelle
μ_0	Permeabilität von Vakuum
μ_r	Permeabilität von Weicheisen
μ_W	Permeabilität von Armco-Stahl
U_m	Messspannung
U_s	Speisespannung
V	Volumen
v_d	Geschwindigkeit des Messobjektes
$W_{r/z}$	Widerstandsmoment in der r-Achse und z-Achse
σ	Materialspannung
\bar{x}	Mittelwert der x-Werte
\bar{y}	Mittelwert der y-Werte
z	Schwerpunktskoordinate

Glossar

Torus	Lange Spule zu einem Ring gebogen
toroidal	Richtung entlang der Torusachse
poloidal	Drehwinkel in der Torusquerschnittsfläche
FEM	Finite Elemente Methode/ numerische Berechnung
Permeabilität	Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder
DMS	Dehnungsmessstreifen
Plasmaentladung	Erzeugung von Plasma mit magnetischem Einschluss
Schussnummer	Fortlaufende Bezifferung der Plasmaentladungen
magnetische Flussdichte	Flächendichte des magnetischen Flusses
Feldstärke	Kraftwirkung auf einen Probenkörper im Magnetfeld
Ferromagnetisch	Fähigkeit von Materialien, sich zu magnetisieren
Preprocessing	Beschreibung eines Problems vor der FEM
Postprocessing	Analyse eines numerisch berechneten Ergebnisses
Sondentestschuss	Ansteuerung der verschiedenen Magnetspulen mit definierten Strömen zur Magnetsondenprüfung ohne Plasma

1. Einleitung

Um das Entstehen und das Wirken des Magnetfeldes, in dem die Kräfte auf die Weicheisenabschirmungen ermittelt werden sollen, besser zu verstehen, werden hier die Grundlagen der Fusionsmaschine und der Kernfusion beschrieben. Dadurch soll das Problem, woraus die Aufgabenstellung entsteht, erläutert werden. Weiterhin soll auf die Aufgaben und die Inhalte der Arbeit näher eingegangen werden.

1.1. Was ist der ASDEX Upgrade

Der ASDEX Upgrade ist ein Kernfusionsexperiment in Garching bei München, welches vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik betrieben wird. ASDEX Upgrade steht für "Axialsymmetrisches Divertor Experiment" wobei der Zusatz "Upgrade" darauf hinweist, dass es sich bereits um die zweite Generation dieses Experimentes handelt. Der ASDEX Upgrade soll Plasmaeigenschaften unter kraftwerksähnlichen Bedingungen untersuchen. Dazu sind der technische Aufbau und die Art des Plasmaeinschlusses an einem späteren Kraftwerk orientiert. Seit der Betriebsaufnahme wurden zahlreiche Modifikationen vorgenommen, um verschiedene Einflüsse untersuchen zu können. Des Weiteren dient dieses Experiment zur Vorbereitung des in weltweiter Zusammenarbeit geplanten Testreaktors ITER, welcher erstmals ein energielieferndes Plasma erzeugen soll. [1]

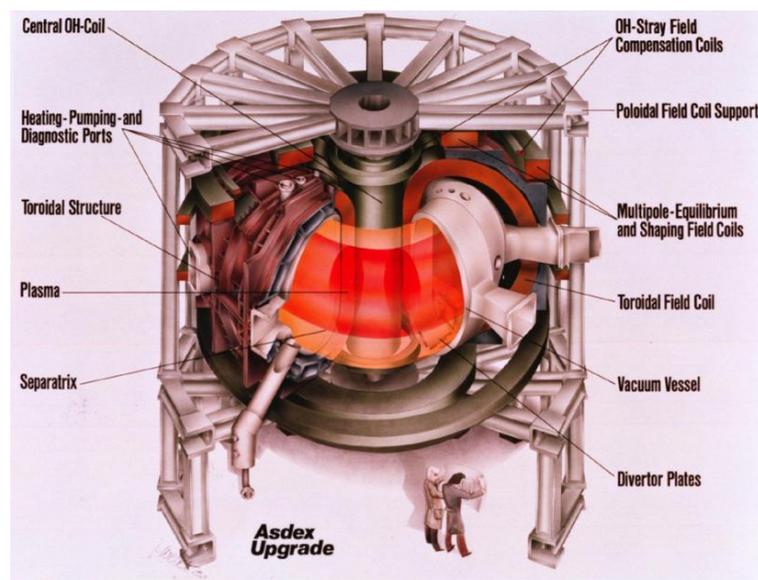


Abb. 1: Schnitt des ASDEX Upgrade [1]

1.2. Kurzbeschreibung der Kernfusion

Es gibt zwei Möglichkeiten, aus Kernumwandlung Energie zu gewinnen. Entweder spaltet man schwere Kerne wie Uran mit einer Massenzahl von 235, oder man fusioniert leichte Kerne wie Wasserstoff und dessen Isotope, welche eine Massenzahl zwischen 1 und 3 besitzen. Die verschiedenen Massenzahlen sind auf die unterschiedliche Menge an Protonen und Neutronen im Atomkern zurückzuführen. Da sich positiv geladenen Atomkerne abstoßen, ist für eine Kernfusion eine sehr hohe Geschwindigkeit notwendig. Diese Geschwindigkeiten entstehen durch sehr hohe Temperaturen (größer 10 Millionen Grad Celsius). Bei diesen Temperaturen trennen sich die Atome eines Gases in dessen Bestandteile, Elektronen und Kerne, auf. Durch diesen Vorgang erhält das "Gas" wesentliche, neue Eigenschaften und wird als Plasma bezeichnet. Eine zentrale Eigenschaft eines Plasmas ist dessen elektrische Leitfähigkeit. Seine Bewegung lässt

sich somit durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen. Diese Eigenschaft macht man sich bei der Kernfusion zu Nutze, um das Plasma in einem Magnetfeldkäfig zu stabilisieren. Unter anderem ist dies notwendig, da der Kontakt mit der materiellen Außenhülle des Gefäßes das Plasma sofort abkühlen und somit die Fusionsreaktion im Plasma beenden würde.

Die größte Energieausbeute bei relativ geringer Plasmatemperatur liefern die zwei schweren Wasserstoffvarianten Tritium und Deuterium (Abb. 2). Bei dieser Fusion entsteht ein Heliumatom und es wird gleichzeitig ein schnelles Neutron frei. Dieses Neutron trägt 80% der gewonnenen Energie mit sich. [2]

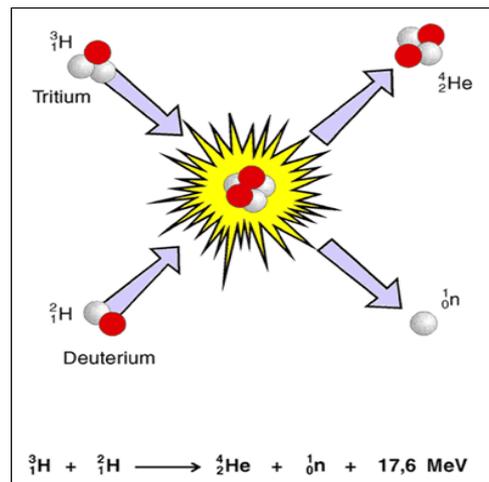


Abb. 2: Darstellung der Fusionsreaktion [2]

1.3. Das Magnetfeld des ASDEX Upgrade

Der ASDEX Upgrade hat ein ringförmiges (toroidales) Plasma. Diese Bauweise für einen ringförmigen Plasmaeinschluss wird als Tokamak bezeichnet. Das für den Einschluss des Plasmas nötige Magnetfeld wird von 16 Spulen erzeugt, die den Plasmaring umschließen. Allerdings ist das so erzeugte Magnetfeld (Toroidalfeld) außen schwächer als innen. Daher würde das Plasma ohne Korrekturen nach außen gegen die Gefäßwand driften.

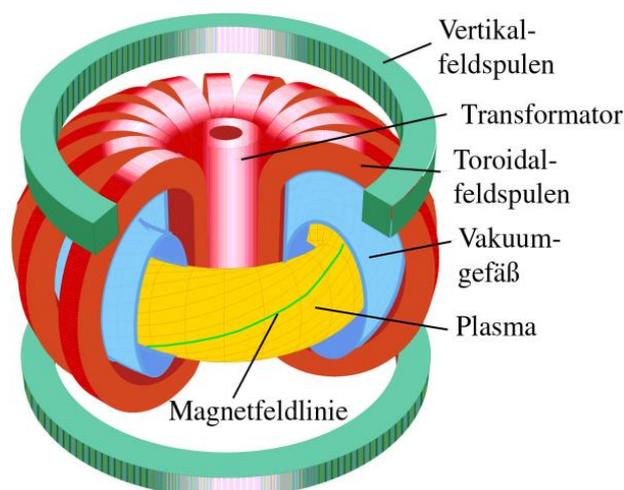


Abb. 3: Magnetfeldsystem [3]

Zur Korrektur wird eine Transformatorspule eingesetzt (Abb. 3). Ein ansteigender Strom in dem Transformator treibt einen Sekundärstrom im Plasma. Das hierdurch erzeugte und ergänzende poloidale Magnetfeld überlagert sich mit dem toroidalem Feld und erzwingt einen helikalen Magnetlinienverlauf, der den Plasmaeinschluss darstellt. Allerdings kann

der Strom in dem Transformator nicht beliebig hoch und damit auch nicht beliebig lange ansteigen. Dies ist der Grund, warum Tokamak-Plasmen ihrer Natur nach gepulst sind, d. h. sie brennen diskontinuierlich. Beim ASDEX Upgrade sind Pulslängen von max. 10 Sekunden möglich. Ein solcher Zeitraum wird als Plasmaentladung bezeichnet. Die Poloidal­feldspulen (Vertikal­feldspulen) dienen zur Plasmaformung und zur Plasmaregelung. [3]

Da das Toroidal­feld nach außen sehr stark und schnell abfällt, kann davon ausgegangen werden, dass im Außenbereich des Gefäßes keine Störungen durch diese Magnetfelder entstehen. Jedoch können die Poloidal­felder starken Einfluss auf Diagnostiken, Konstruktionskomponenten oder Regler haben, da diese Magnetfelder auch im Außenbereich stark ausgeprägt sind.

1.4. Inhalt der Arbeit

Um den Einfluss des Magnetfeldes auf elektronische oder andere empfindliche Bauteile im Außenbereich des Plasmagefäßes zu minimieren oder gar auszuschließen, werden Weicheisenabschirmungen verwendet, welche das Magnetfeld weitestgehend von den Bauteilen isolieren. Weicheisen ist ein hochpermeables Metall und leitet die Magnetfeldlinien um den Hohlraum der Abschirmungen herum. Da ein hochpermeables Metall die Magnetfeldlinien aus dem Umfeld sammelt und in sich konzentriert, wirken erhöhte Magnetkräfte auf das Metall. Obwohl die Bestimmung dieser Kräfte zur Auslegung der Befestigung notwendig ist, wurden diese noch nicht experimentell ermittelt.

1.4.1. Beschreibung der Arbeit

Die wirkenden Kräfte auf Weicheisen werden bisher mit dem 2D FEM-Programm Quickfield ermittelt. Bei der numerischen Betrachtung mit diesem Programm wird von keinen magnetischen Störungen oder Schwankungen ausgegangen, welche aber in der Realität auftreten. Es wird eine statische Maximalbetrachtung für die Abschirmungen getroffen. Aufgrund der Zweidimensionalität dieser Software werden auch Einflüsse aus einer dritten Wirkrichtung vernachlässigt. Aus diesen Gründen bringt die Berechnung der Kräfte auf Weicheisen im magnetischen Feld des ASDEX Upgrade mit diesem Programm Unsicherheiten mit sich. Darum sind die mit Quickfield ermittelten Kräfte als Näherung zu betrachten.

Um die Ergebnisse dieser FEM-Analysen besser einordnen zu können, soll ein Vergleich mit einer mathematischen Analyse und einer experimentellen Messung stattfinden. Dazu werden von exemplarischen Körpern, zum Beispiel von einer Kugel oder einer rechteckigen Box, die jeweiligen Ergebnisse aus mathematischer Analyse, FEM-Analyse und Messung miteinander verglichen.

Mit Hilfe dieses Vergleiches kann in Zukunft der Wahrheitsgehalt der FEM-Analyse besser bewertet werden und eine entsprechende Auslegung für die Weicheisenabschirmungen mit Quickfield stattfinden.

Mit der Messung werden die während eines Sondentestschusses im ASDEX Upgrade entstehenden Kräfte auf einen Weicheisenkörper mit einem geeignetem Messmittel ermittelt. Die Wahl des Messmittels ist ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit. Um die theoretische Annahme zu bestätigen, dass es sich um ein zweidimensionales Problem handelt, da das Toroidal­feld keinen Krafteinfluss auf die Abschirmungen ausübt, wird eine Messung in allen drei Raumrichtungen angestrebt.

1.4.2. Eingrenzung der Arbeit

Schwerpunkt der Arbeit ist die Auswahl, Installation und bei Bedarf Entwicklung des Messsystems, welches für die Messung der Kräfte auf Weicheisen im Magnetfeld des ASDEX Upgrade notwendig ist. Es wird eine dreidimensionale Messung angestrebt, da das Magnetfeld bei einer Plasmaentladung nie exakt reproduzierbar ist. Um die Zusammenhänge der Kraftkomponenten deutlich machen zu können, ist daher eine gleichzeitige Messung der Kraftkomponenten erstrebenswert. Bei Bedarf kann aber auch auf eine zweidimensionale Messung zurückgegriffen werden, da die dritte Kraftkomponente nur als Theoriebestätigung dient. Der Einfluss des Toroidalfeldes kann dann in einer separaten Messung ermittelt werden.

Des Weiteren werden entstehende Momente an Abschirmungen sowie Temperatureinflüsse, welche aufgrund des dynamischen Magnetfeldes entstehen, nicht betrachtet und müssen bei Bedarf in einer Fortführung der Arbeit behandelt werden.

Bei der FEM-Analyse ist eine zweidimensionale Betrachtung ausreichend. Dazu wird das Magnetsystem des ASDEX Upgrade in einem horizontalen und einem vertikalen Schnitt jeweils unabhängig voneinander analysiert.

Bei diesem Vorgehen teilt sich das Magnetsystem in das Toroidalfeld im Horizontalschnitt und das Poloidalfeld im Vertikalschnitt. Dies ermöglicht eine separate Betrachtung der beiden Magnetfamilien.

Eine präzisere FEM-Analyse mittels dreidimensionalen Programmen ist bei Notwendigkeit erst in einer Fortführung zu behandeln und daher nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die mathematische Analyse soll die grundlegenden Berechnungsformeln des Magnetismus vermitteln und eine grobe Abschätzung liefern. Eine genaue mathematische Herleitung der Kräfte auf Weicheisen im Magnetfeld des ASDEX Upgrade ist für diese Arbeit nicht vorgesehen und muss, falls notwendig, in einer Fortführung bearbeitet werden.

1.4.3. Arbeitsschritte

Am Anfang wird die mathematische Analyse für das Poloidalfeldsystem durchgeführt. Durch die Ergebnisse dieser Analyse können in einer ersten Näherung die Dimensionen der Kräfte abgeschätzt werden. Dabei wird von einer einzelnen, kreisförmigen Magnetfeldquelle des Poloidalfeldes ausgegangen.

Anschließend soll die Berechnung mit dem FEM-Programm Quickfield stattfinden. Diese wird in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird das Toroidalfeld betrachtet. Dabei soll die theoretische Annahme bestätigt werden, dass das durch die Toroidalfeldspulen erzeugte Magnetfeld im Außenbereich so stark abfällt, dass es für die Kraftbetrachtung dieser Arbeit vernachlässigbar ist. Da die mathematische Analyse von einer einzelnen Magnetfeldquelle ausgeht, soll auch in der FEM-Berechnung diese Anordnung untersucht und mit der mathematischen Analyse verglichen werden. Im dritten Teil der FEM-Betrachtungen wird das reale Poloidalfeldspulensystem untersucht und die Kräfte auf Weicheisen durch dieses Magnetfeldsystem numerisch berechnet.

Im nächsten Arbeitsschritt werden verschiedene Messsysteme und Sensoren betrachtet und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die vorgegebene Messaufgabe im Magnetfeld untersucht. Ist eine Konstruktion eines Sensors oder ein Aufbau eines Messsystems notwendig, ist dieser zu beschreiben. Abschließend werden die Messungen während eines Sondentestschusses durchgeführt. Die Messergebnisse werden dann mit einer FEM-Berechnung und der mathematischen Analyse verglichen und bewertet.

2. Mathematische Analyse

Nachfolgend soll eine mathematische Analyse des Problems eine Abschätzung der Kräfte auf Weicheisenkörper im Magnetfeld liefern. Dazu soll das Poloidalfeldsystem des ASDEX Upgrade, welches aus einer Vielzahl von verschiedenen Magneten gebildet wird, auf eine einzelne theoretische Magnetfeldquelle konzentriert werden. Betrachtet wird dann ein kreisförmiger Leiter mit dem Radius der äußersten Magnetfeldspule des ASDEX Upgrade, welcher von einem Strom I_P durchflossen wird. Diese Näherung lehnt sich dabei an die Erläuterungen von Herrn Köppendorfer aus dem Jahre 1991 am Max-Planck-Institut. [4]

2.1. Allgemeine Betrachtung einer Kugel

Die magnetische Flussdichte B_{SO} im Vakuum wird beschrieben durch [5]

$$B_{SO} = \mu_0 \cdot H. \quad (1)$$

Ist bei einem kreisförmigen Leiter der Abstand r zu dem untersuchten Punkt im Vergleich zum Radius R_S groß, so gilt für die magnetische Feldstärke H der nachstehende, vereinfachte Zusammenhang. Der Gültigkeitsbereich dieses Zusammenhanges wird für den ASDEX Upgrade für den Bereich $r > 5 m$ angenommen.

$$H = I_P \cdot \frac{R_S^2}{2 \cdot r^3}. \quad (2)$$

Wird nun (2) in (1) eingesetzt ergibt sich

$$B_{SO} = \frac{\mu_0 \cdot I_P \cdot R_S^2}{2} \cdot \frac{1}{r^3} = \frac{c}{r^3} \quad (3)$$

mit

$$c = \frac{\mu_0 \cdot I_P \cdot R_S^2}{2}. \quad (4)$$

Die Energiedifferenz eines magnetischen Feldes mit und ohne magnetischen Körper lässt sich bei gleichbleibender Magnetfelderregung ausdrücken durch [6]

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \int_{V_1} (H_0 \cdot B - B_0 \cdot H) dV = \frac{1}{2} \cdot \int_{V_1} \left(\frac{B_0 \cdot B}{\mu_0} - \frac{B_0 \cdot B}{\mu_r} \right) dV, \quad (5)$$

wobei Größen mit Index 0 das Feld ohne magnetischen Körper beschreiben. Das Feld mit magnetischem Körper wird beschrieben durch die Größen ohne Index. Da für die Permeabilität $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ und bei hochpermeablen Körpern wie Weicheisen $\mu_r \gg 1$ gilt, kann (5) vereinfacht werden zu

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \int_{V_1} \left(\frac{B_0 \cdot B}{\mu_0} \right) dV. \quad (6)$$

Wird angenommen, dass im Bereich von V_1 eine sehr geringe Variation der magnetischen Felder stattfindet und setzt man anschließend B_{S0} für B_0 ein, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{B_0 \cdot B}{\mu_0} \right) \cdot V, \quad (7)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} B \frac{c}{\mu_0 \cdot r^3} \cdot V. \quad (8)$$

Die magnetische Flussdichte B_{EK} in einem homogenen Magnetfeld kann für eine Eisenkugel analytisch berechnet werden. Die magnetische Flussdichte im Eisen wird als Funktion der Permeabilität μ_r , des Radiusverhältnisses des Innen- und Außenradius $\rho = r_i / r_a$ und der magnetischen Flussdichte im homogenen Vakuumfeld B_{S0} dargestellt als [7]

$$B_{EK} = B_{S0} \cdot \frac{3}{\mu_r + 2 - \frac{(\mu_r - 1)^2}{2\mu_0 + 1} \cdot 2 \cdot \rho^3}. \quad (9)$$

Für $\mu_r \gg 1$ ergibt sich:

$$B_{EK} = \frac{3 \cdot B_{S0}}{1 - \rho^3}. \quad (10)$$

Daraus folgt, dass die eingefangene magnetische Flussdichte in einer Volleisenkugel ohne Hohlraum ($r_i \rightarrow 0$), das Dreifache des Vakuumflusses beträgt. Für $B_{EK} = B$ und das Dreifache von (3) in (8) eingesetzt gilt also somit:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \frac{3 \cdot c^2}{\mu_0 \cdot r^6} \cdot V. \quad (11)$$

Die Kraft auf die Eisenkugel ergibt sich dann mit der Differentiation der Energiedifferenz des Magnetischen Feldes, mit und ohne Eisenkugel, nach dem Radius r , welcher die Entfernung des betrachteten Punktes zu der Magnetfeldquelle beschreibt, mit

$$F = \frac{d\Delta E}{dr} = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{3c^2}{\mu_0 r^6} \right), \quad (12)$$

$$F = - \frac{9 \cdot c^2 \cdot V}{\mu_0 \cdot r^7}. \quad (13)$$

Setzt man nun c aus (4) in (13) ein, so ergibt sich für die Kraft auf eine Eisenkugel im Magnetfeld:

$$F = - \frac{9}{4} \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_P^2 \cdot R_S^4}{r^7} \cdot V. \quad (14)$$

Bei dieser mathematischen Analyse wurde ein möglicher Sättigungseffekt nicht berücksichtigt. Unter Sättigung wird der Zustand bezeichnet, ab dem eine Erhöhung der

äußeren Feldstärke H keine Erhöhung der Magnetisierung des Weicheisenkörpers mehr bewirkt. Eine Sättigung tritt zum Beispiel im Falle einer Hohlkugel auf, wenn die Wandstärke einen Grenzwert unterschreitet. Dann kann der Weicheisenkörper im verbildlichten Sinn keine Magnetfeldlinien mehr aufnehmen. Im Falle eines solchen Sättigungseffektes ist von geringeren Kräften auszugehen.

Das Ergebnis, welches aussagt, dass in einer Kugel eine dreimal höhere Flussdichte herrscht als im Vakuum, trifft auf Körper anderer Gestalt nicht zu. Wird die Formel aus (14) auf andere geometrische Formen angewendet, muss ein größerer Fehler mit berücksichtigt werden.

Des Weiteren ist die Beziehung aus (14) nur für den Bereich $r > 5 m$ gültig, da in geringerem Abstand die Näherung des Dipolfeldes nicht mehr gültig ist. Auch benachbarte Eisenkörper können Wechselwirkungen verursachen und führen zu komplizierteren Zusammenhängen.

2.2. Anwendung auf den ASDEX Upgrade

Mit der Formel (14) soll nun eine erste Berechnung der Kräfte auf eine Weicheisenkugel im Magnetfeld des ASDEX Upgrade stattfinden. Für diese Berechnungen der Kräfte wurden für einen theoretischen Spulenradius, sowie für den Strom, welcher die theoretische Spule durchfließt, Maximalabschätzungen getroffen. Der vereinfachte kreisförmige Leiter, von welchem hier ausgegangen wird, hat jedoch nur geringfügige Ähnlichkeit mit dem komplexen Poloidalfeldspulensystem, welches tatsächlich am ASDEX Upgrade wirkt. Die angenommenen Rahmenbedingungen und die Kraftberechnung für verschiedene Abstandsradien r werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt und sind aufgrund der vielen Unsicherheiten und Vereinfachungen in der mathematischen Analyse nur als grobe Näherung zu betrachten.

Rahmenbedingungen	Formelzeichen	Wert	Dimension
Spulenradius	R_S	3.7403	m
Stromstärke Plasma	I_P	1.60E+06	A
permeabilität im Vakuum	μ_0	1.257E-06	H/m
Innenradius Kugel	r_i	0.000	m
Außenradius Kugel	r_a	0.050	m
Volumen Kugel	V	5.23E-04	m^3

Kraftberechnung	Entfernung r in m	Kraft F in N	Gewicht m in kg
	5.0	-9.49	-0.97
	5.2	-7.21	-0.74
	5.4	-5.54	-0.56
	5.6	-4.29	-0.44
	5.8	-3.36	-0.34
	6.0	-2.65	-0.27
	6.2	-2.11	-0.21
	6.4	-1.69	-0.17
	6.6	-1.36	-0.14
	6.8	-1.10	-0.11
	7.0	-0.90	-0.09

Tabelle 1: Berechnungen der Kraft auf Eisenkugel

3. Berechnung mit FEM

Die Ergebnisse aus der mathematischen Analyse sollen hier mit den Ergebnissen aus dem FEM-Programm Quickfield verglichen werden. Dies soll in zwei Teilen geschehen. Erst soll auch bei der numerischen Rechnung mit Quickfield eine einzelne, theoretische und kreisförmige Spule wie bei der mathematischen Analyse angenommen werden. Anschließend wird das Poloidalfeldsystem des ASDEX Upgrade maßstabsgetreu berechnet.

Wie in der Einleitung schon erwähnt, wird von einem schnellen Abnehmen des Toroidalfeldes ausgegangen. Dies soll bei einer Berechnung mit Quickfield überprüft und gezeigt werden.

3.1. Das Programm Quickfield

Quickfield ist ein zweidimensionales Analyseprogramm, welches mit der Finiten Elemente Methode arbeitet. Entwickelt und vertrieben wird es von der Firma "Tera Analysis Ltd". Dem Benutzer steht mit der Verwendung von Quickfield ein Programm zur Verfügung, welches für verschiedene Probleme Berechnungsmethoden anbietet. Für die Analyse bietet Quickfield folgende Module an:

- instationäre Magnetik
- Gleichstrommagnetik
- Wechselstrommagnetik
- Magnetostatik
- Elektrostatik
- Gleichstromleitung
- Wechselstromleitung
- instationäre Elektrik
- Wärmeleitung
- Festigkeitsanalyse

Die allgemeine Vorgehensweise zur Lösungsfindung mit einem FEM-Programm wird in der nachstehenden Abbildung erläutert.

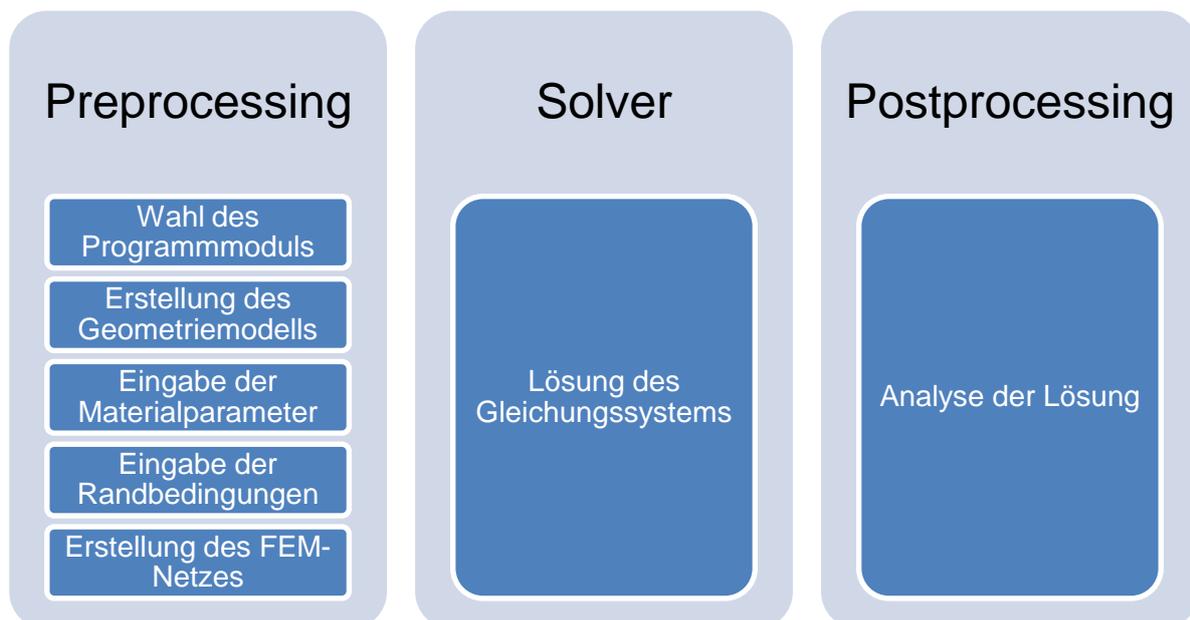


Abb. 4: Vorgehensweise zur Lösungsfindung bei FEM-Programmen

3.2. Preprocessing und Postprocessing in Quickfield

Quickfield bietet für eine Analyse ein Gesamtpaket an, welches alle notwendigen Werkzeuge für das Preprocessing beinhaltet. Der Hersteller unterteilt dabei die Eingabemethoden für das Preprocessing in einen Modell Editor und einen Daten Editor. Im Vorfeld zu den Editoren wird das Programmmodul gewählt. Dieses ist während dieser Arbeit stets die Magnetostatik, da mit dem Programm nur Maximalbetrachtungen analysiert werden.

Der Modell Editor ermöglicht eine einfache Eingabe eines zweidimensionalen Problems und stellt dazu grundlegende Zeichenwerkzeuge zur Verfügung. Zu dem Modell Editor gehört auch die Netzgenerierung, welche bei Quickfield automatisch erfolgt. In den Daten Editor werden Randbedingungen und Materialparameter angelegt. Diese werden mit dem Modell verknüpft und können unabhängig bearbeitet werden.

Die Netzbildung basiert auf Dreieckselementen. Die Feinheit des Netzes kann über den Abstand von 2 Punkten zueinander definiert werden. Dies geschieht an Eckpunkten und Kreuzungen von Linien und Objekten. So ist es möglich an verschiedenen Ecken oder Abschnitten unterschiedliche Elementgrößen zu definieren. Anschließend wird das Netz von Quickfield automatisch erstellt. Bei Bedarf bietet Quickfield die Option, in Regionen mit hoher Varianz der Ergebnisse eine automatische Verfeinerung des Netzes durchzuführen. Dazu berechnet Quickfield das Ergebnis im Solver und passt das Netz anschließend automatisch in besagten Regionen an. Die Anzahl dieser Durchgänge kann im Vorfeld festgelegt werden und bis zu 10 Mal betragen. Die Berechnungszeit erhöht sich jedoch mit jedem Durchgang signifikant, da die Anzahl der Elemente im Netz deutlich ansteigt und mehrere Berechnungsdurchläufe stattfinden.

Für die Berechnung des Magnetfeldes mit Quickfield muss der Betrachtungsraum definiert werden. Dazu wird in der zweidimensionalen Skizze der Bereich mit Linien eingegrenzt, welcher betrachtet werden soll. Dies ist notwendig, um den Berechnungsumfang im Rahmen zu halten. Die Abmessungen der Begrenzungen in der Zeichnung richten sich nach dem Ort, welcher betrachtet werden soll. Das magnetische Potenzial dieser Begrenzung wird im Daten Editor mit Null belegt, so dass kein Einfluss auf die Verteilung der Magnetfeldlinien durch die Begrenzung stattfindet. Anders ausgedrückt geht das Programm von einer Ausbreitung des Magnetfeldes bis ins Unendliche aus, berechnet jedoch nur Punkte, welche innerhalb dieser Begrenzung liegen.

Auch für das Postprocessing stellt Quickfield eine Vielzahl an Analysewerkzeugen zur Verfügung. Mit einer Linie kann ein Verlauf bestimmt werden. Entlang dieses Verlaufes können die Ergebnisse in Tabellen und Graphen ausgegeben werden. Die Abstände der Ausgabewerte können vom Benutzer definiert werden.

Mit dem erwähnten Linienwerkzeug lassen sich auch Flächen festlegen, für welche anschließend verschiedenste technische Größen berechnet und ausgegeben werden können. Auch ein Export der Daten aus den Tabellen in andere Datenformate ist möglich.

3.3. Materialparameter

Für eine korrekte Berechnung müssen beim Preprocessing Materialparameter angegeben werden. Diese Parameter werden dann in Quickfield einer Fläche zugewiesen. Für die Magnete muss nur der Gesamtstrom und die Wicklungszahl definiert werden. [8] Dieser ist je nach Magnet unterschiedlich. Obwohl der Realstrom, welcher bei einer Plasmaentladung durch die Magnetspulen fließt, nicht konstant ist, wird für die

Betrachtung in FEM ein konstanter Maximalstrom angenommen. Die relative Permeabilität der Magnete ist mit 1 angegeben. Auch auf die Fließrichtung des Stromes ist zu achten (Tabelle 2).

Parameter-bezeichnung	Wicklungs-zahl n	Maximalstrom I in A	Ampere-windungen I in A	relative Permeapilität μ
Armco_Stahl	0	0	0	nichtlinear
Luft	0	0	0	1
Plasma	1	2,00E+06	2,00E+06	1
Col_o	5	3,83E+02	1,92E+03	1
Col_u	5	0,00E+00	0,00E+00	1
OH1	510	-2,62E+04	-1,34E+07	1
OH2_o	81	-4,63E+03	-3,75E+05	1
OH2_u	81	-4,63E+03	-3,75E+05	1
OH3_o	5	-2,62E+04	-1,31E+05	1
OH3_u	5	-2,62E+04	-1,31E+05	1
PSL_o	1	3,50E+03	3,50E+03	1
PSL_u	1	5,40E+03	5,40E+03	1
V1_o	93	1,50E+04	1,40E+06	1
V1_u	93	3,13E+04	2,91E+06	1
V2_o	86	-1,08E+04	-9,29E+05	1
V2_u	86	-1,66E+04	-1,43E+06	1
V3_o	28	34	9,52E+02	1
V3_u	28	-1,73E+04	-4,84E+05	1

Tabelle 2: Parameter für die Magnetspulen

Die Permeabilität des zu untersuchenden Weicheisens aus Armco-Stahl ist nichtlinear. In diesem Fall fordert Quickfield das Verhalten des Materials tabellarisch als Kurve anzugeben, in welcher die magnetische Flussdichte über die Feldstärke aufgetragen ist. Der Hersteller des Metalls gibt die Permeabilität des Weicheisens im Magnetfeld über die Feldstärke an. Mit der Formel

$$B_w = \mu_w \cdot \mu_0 \cdot H \quad (15)$$

kann dann die magnetische Flussdichte berechnet werden. Daraus ergibt sich eine Verteilungskurve wie sie in Abb. 5 dargestellt ist. Die Daten für H und μ_w wurden dem Datenblatt des Materials entnommen, welches vom Hersteller ausgegeben wurde (siehe Anhang).

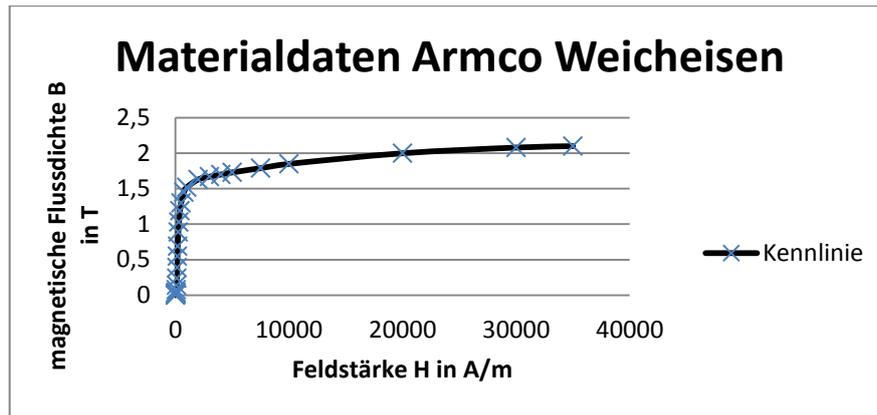


Abb. 5: Magnetische Kennlinie des Armco Weicheisens

3.4. Das Toroidalfeld des ASDEX Upgrade

Das Toroidalfeld des ASDEX Upgrade wird für diese 2D Betrachtung in einem Horizontalschnitt betrachtet. Dabei ergeben sich 16 Magnetpaare, welche sich in einen inneren und einen äußeren Kreis aufteilen. Eines dieser Paare ist in Abb. 6 auf der linken Seite in roter Farbe markiert. Auf der rechten Hälfte der Abb. 6 ist in grüner Farbe das Elementnetz zu erkennen. Für das Netz, das dort zu erkennen ist, wurde eine Elementgröße von 100 mm gewählt. Die Elementgröße ist an den Ecken der Objekte durch die kleinen roten Kreise definiert.

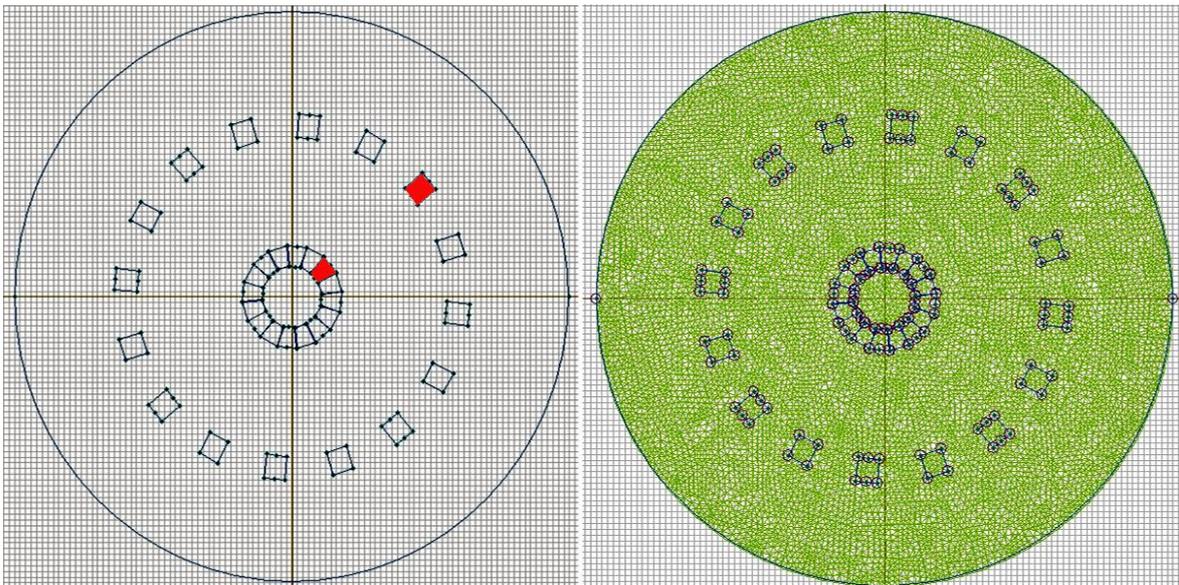


Abb. 6: Toroidalfeldspulen im Schnitt ohne (links) und mit Netz (rechts)

	Netz 0,5 m	Netz 0,1 m	Netz 0,05 m	Netz 0,02 m	Automatische verfeinerung
L (m)	B (T)	B (T)	B (T)	B (T)	B (T)
0,00	0,01808	0,00021	0,00017	0,00017	0,00017
0,25	0,64819	0,00064	0,00022	0,00022	0,00022
0,50	1,94460	0,30868	0,01449	0,01449	0,01449
0,75	2,84945	3,63248	3,38807	3,38807	3,38807
1,00	3,24314	4,80354	4,87778	4,87778	4,87778
1,25	3,37457	3,84645	3,90655	3,90655	3,90655
1,50	3,18653	3,20957	3,24649	3,24649	3,24649
1,75	2,80368	2,75532	2,77962	2,77962	2,77962
2,00	2,35186	2,40924	2,43215	2,43215	2,43215
2,25	2,17009	2,14461	2,15725	2,15725	2,15725
2,50	1,89061	1,92062	1,93859	1,93859	1,93859
2,75	1,31551	1,67557	1,71236	1,71236	1,71236
3,00	0,80108	1,03758	1,08114	1,08114	1,08114
3,25	0,38913	0,38479	0,41527	0,41527	0,41527
3,50	0,14638	0,10656	0,11859	0,11859	0,11859
3,75	0,03387	0,03412	0,03630	0,03630	0,03630
4,00	0,00926	0,01120	0,01201	0,01201	0,01201
4,25	0,00779	0,00404	0,00430	0,00430	0,00430
4,50	0,00273	0,00144	0,00158	0,00158	0,00158
4,75	0,00177	0,00050	0,00053	0,00053	0,00053
5,00	0,00086	0,00003	0,00002	0,00002	0,00002

Tabelle 3: Magnetsiche Flussdichte bei unterschiedlichen Netzfeinheiten

Da die Feinheit des Netzes maßgeblich zur Genauigkeit des Ergebnisses beiträgt, ist es notwendig zu ermitteln, ab welcher Elementgröße keine signifikanten Veränderungen des Ergebnisses mehr stattfinden. Dadurch ist es möglich, zu erkennen, welche Ergebnisse den höchsten Wahrheitsgehalt haben. Des Weiteren würden zu kleine Elementgrößen zu erheblich höheren Bearbeitungszeiten führen.

Dazu werden mehrere Netze berechnet (Tabelle 3). Darunter auch die Option zur automatischen Verfeinerung des Netzes von Quickfield, welche in Regionen mit hoher Varianz das Netz automatisch anpasst. Ist für eine FEM-Berechnung eine weiträumige Betrachtungsgrenze definiert, sind für Bereiche, an denen eine hohe Varianz der Ergebnisse erwartet wird, feinere Elemente zu festzulegen als in Bereichen, an denen eine geringere Varianz erwartet wird. Definiert man für den gesamten Bereich ein gleichgroßes oder gleichfeines Netz, so führt das entweder zu Ungenauigkeiten in der Berechnung oder zu unnötig langer Berechnungszeit, da im Außenbereich eine unnötige feine Elementgröße definiert ist. Da die Betrachtungsgrenze in diesem Fall nicht deutlich größer ist als der Durchmesser der Spulen, wird an allen Eckpunkten die jeweils gleiche Feinheit für das Netz definiert (rote Kreise in der Abb. 6). Die automatische Verfeinerung des Netzes durch Quickfield wird auf zwei Durchgänge beschränkt. Anschließend wird die berechnete magnetische Flussdichte im Verlauf vom Zentrum bis zur Betrachtungsbegrenzung, was hier dem Radius von 5 m entspricht, analysiert.

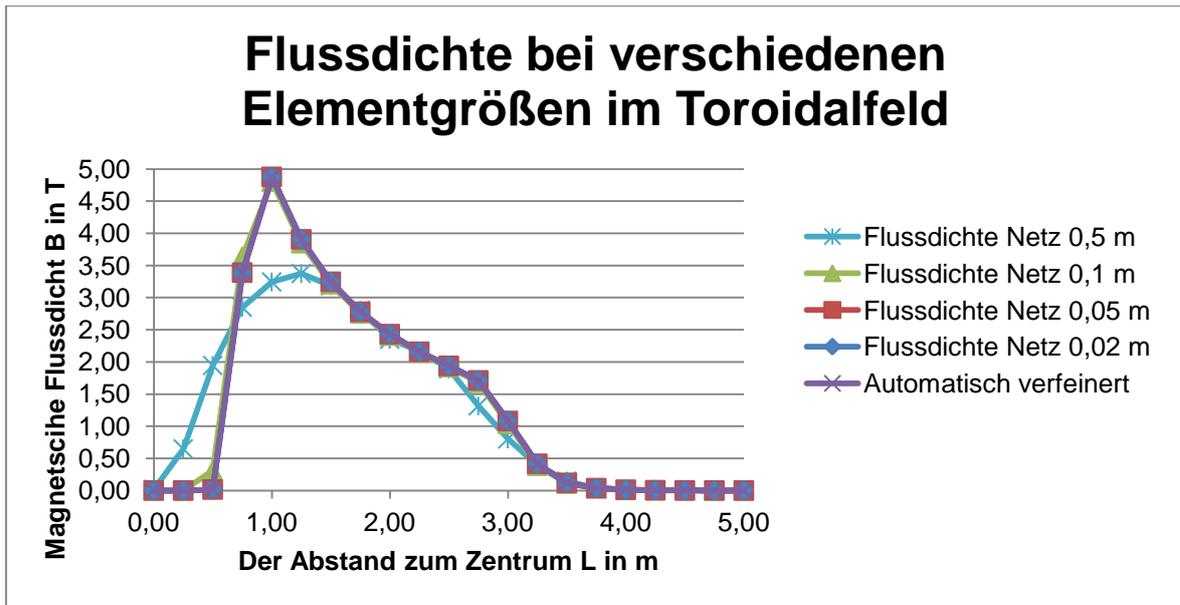


Abb. 7: Veränderung der Flussdichte bei verschiedenen Netzen im Toroidalfeld

Aus den Ergebnissen der Abb. 7 und der Tabelle 3 lassen sich mehrere Schlüsse ziehen. Zum einen zeigt die Grafik anschaulich, dass sich ab einer Elementgröße von 0,1 m und kleiner, keine signifikanten Änderungen mehr ergeben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse, welche Quickfield bei kleineren Elementgrößen als 0,1 m liefert, einer hohen Genauigkeit entsprechen.

Weiter ist die im Vorfeld getroffene Erwartung, dass das Magnetfeld im Außenbereich schnell abfällt, bestätigt. Im Bereich von $L > 3,8 \text{ m}$ ist der Einfluss des Toroidalfeldes auf die Kraftermittlung somit zu vernachlässigen, da es keinen messbaren Einfluss mehr auf Weicheisenabschirmungen ausübt.

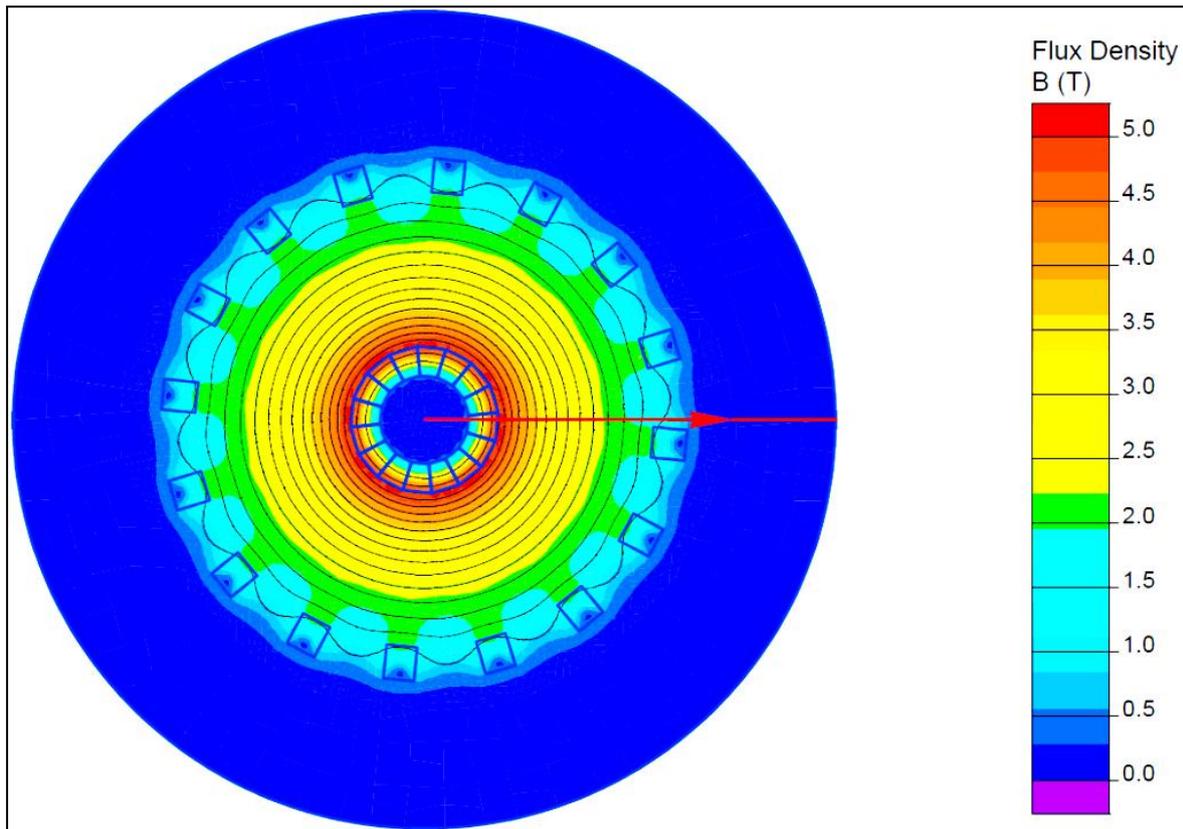


Abb. 8: Verteilung durch die Toroidalfeldspulen generierte magnetische Flussdichte

Die Verteilung der magnetischen Flussdichte zeigt sich auch in der Abb. 8. Hier wird durch farbliche Hervorhebung deutlich, wie die magnetische Flussdichte nach außen schnell abfällt. Die schwarzen Linien stellen das Verhalten der Magnetfeldlinien dar.

Die rote Linie mit Pfeil markiert den untersuchten Verlauf, welcher auch oben in Abb. 7 und Tabelle 3 angewendet wurde. Je nachdem wie beim Postprocessing dieser Verlauf angegeben bzw. eingezeichnet wird, ergeben sich aufgrund der wellenförmigen Verteilung des Magnetfeldes verschiedene Ergebnisse. Bei der obigen Untersuchung der Ergebnisse bei verschiedenen Elementgrößen wird daher dieser Untersuchungsverlauf immer vom Ursprung horizontal auf den Radius von 5 m angegeben. Dadurch werden die Ergebnisse vergleichbar.

3.5. Das Poloidalfeld

Für die Berechnung des Poloidalfeldes in Quickfield wird das Poloidalfeldsystem im Vertikalschnitt betrachtet (Abb. 13). Für eine rotationssymmetrische Problembetrachtung wie diese wird in Quickfield das Magnetsystem im Zeicheneditor mit Bezug zu einer Rotationsachse definiert. Diese Rotationsachse ist in Quickfield die horizontale Achse des kartesischen Koordinatensystems.

Die Abb. 13 wird also um 90° gedreht und in Quickfield übertragen. Des Weiteren wird ein theoretischer Fall untersucht, in dem eine einzige Spule als Magnetfeldquelle dient. Mit diesen Ergebnissen wird ein Vergleich zu den Ergebnissen aus der mathematischen Analyse erstellt.

Um den Außenbereich des ASDEX Upgrade großflächig untersuchen zu können, wird der Betrachtungsraum im Gegensatz zur Untersuchung des Toroidalfeldes deutlich vergrößert. Die Betrachtungsgrenze soll nun einen Radius von 15 m haben. Dies führt jedoch zu einer erheblichen Steigerung der Maschenzahl und somit der Berechnungszeit. Um dem vorzubeugen, werden an der Betrachtungsgrenze die Maschen größer definiert

als im Bereich der Poloidalmagnete. Trotz dieses Vorgehens ist nicht von ungenauen Ergebnissen auszugehen, da sich im Außenbereich die magnetische Flussdichte einer homogenen Verteilung annähert und keine hohen Varianzen der magnetischen Flussdichte auftreten.

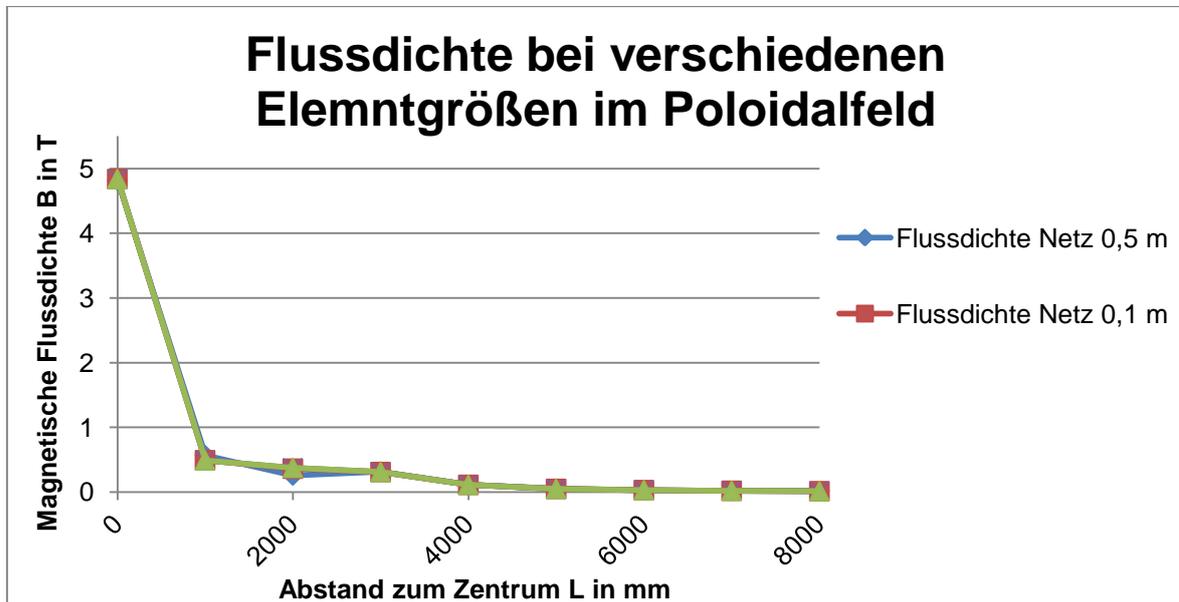


Abb. 9: Veränderung der Flussdichte bei verschiedenen Netzen im Poloidalfeld

Wie schon im vorangegangenen Kapitel erörtert, sind ab einer Maschengröße von 100 mm im Bereich der Magnete keine signifikanten Änderungen der Ergebnisse mehr erkennbar (Abb. 9). Die Elementgrößen an der Betrachtungsgrenze waren jeweils mit 1000 mm festgelegt. Für diese Untersuchung wurden die Ergebnisse aus dem Verlauf vom Ursprung vertikal zur Betrachtungsgrenze bei 15000 mm verwendet.

Die Stromstärken für die Magnete aus Kapitel 3.3., welche für diese Untersuchung herangezogen wurden, sind Maximalabschätzungen. Für eine erste Berechnung können diese Maximalströme herangezogen werden.

3.5.1. Einzelne Spule als Magnetfeldquelle

Für diese Betrachtung wird eine einzelne Spule als Magnetfeldquelle angenommen. Um die Ergebnisse mit der mathematischen Analyse vergleichbar zu machen, werden für die numerische Berechnung der Kräfte auf Weicheisen im Magnetfeld dieselben Rahmenbedingungen angewendet wie sie für die mathematische Analyse vorausgesetzt wurden. Diese Rahmenbedingungen sind in Tabelle 1 nachzulesen.

Es wird im rotationssymmetrischen Modell Editor eine einzelne Spule definiert, welche vom Strom I_p durchflossen wird. Da das Programm Quickfield alle Objekte, welche im Modell Editor erstellt wurden, virtuell um die Rotationsachse dreht, ist eine Betrachtung einer Weicheisenkugel nicht möglich. Ein eingezeichneter Kreis in der Ebene des Modell Editors wird zu einem Torus um die Rotationsachse. Trotzdem wird mit solch einer 2D Zeichnung gearbeitet. Um die Kraft auf eine, im Vergleich zu dem entstehendem Torus kleine, Kugel zu erhalten, muss von dem Volumen des Torus auf das Volumen der Kugel geschlossen werden. Dies geschieht mit der Dreisatzrechnung. Dabei wird das Volumen des Torus, welches in Quickfield beim Postprocessing ausgelesen werden kann, als 100% angenommen und das Volumen der zu betrachtenden Kugel als $V_K = 5.23E -$

04 m³ festgelegt. Mit dem erhaltenen Wert kann die Kraft auf den Torus, welche von Quickfield berechnet wird, auf das Volumen der Kugel ermittelt werden. Ist zum Beispiel das Volumen des in Quickfield berechneten Torus $V_T = 0,2 \text{ m}^3$, dann entspricht das Volumen der Kugel 0,261% des Torusvolumen. Das heißt, dass die tatsächliche Kraft auf eine Kugel mit dem Volumen V_K dem 0,00261-fachen der berechneten Kraft aus Quickfield entspricht. Von Unsicherheiten aufgrund der Geometrieunterschiede ist auszugehen.

Nach den ersten Berechnungen stellte sich heraus, dass die Kraft, welche Quickfield beim Postprocessing für eine definierte Fläche berechnet, nicht korrekt sein kann. Es sollen zum Beispiel die Kräfte in zwei Achsrichtungen ausgegeben werden. Jedoch war stets, unabhängig von der Position des Weicheisenkörpers, die Kraft in der z-Achse 0. Aus diesen Gründen soll die Kraftberechnung mit einer Tabellenkalkulationssoftware manuell berechnet werden. Die numerische Berechnung der Kraft erfolgt über den Maxwelltensor. Dieser ist definiert durch [8]

$$F = \frac{1}{2}(H \cdot (n \cdot B) + B \cdot (n \cdot H) - n \cdot (H \cdot B)). \quad (16)$$

Volumen V_T in m ³	Korrekturwert durch Volumenunterschied	Entfernung r in m	Kraft F_z in N	Kraft F_r in N	Korrigierte Gesamtkraft in N
0.2467	0.2120%	5.00	-107	-4660	9.8813
0.2564	0.2040%	5.20	23	-2877	5.8689
0.2665	0.1963%	5.40	35	-1971	3.8694
0.2763	0.1893%	5.60	71	-1348	2.5549
0.2862	0.1827%	5.80	54	-982	1.7973
0.2961	0.1767%	6.00	20	-687	1.2141
0.3059	0.1710%	6.20	20	-508	0.8691
0.3158	0.1656%	6.40	112	-400	0.6879
0.3257	0.1606%	6.60	118	-309	0.5312
0.3355	0.1559%	6.80	82	-224	0.3718
0.3454	0.1514%	7.00	6	-206	0.3121

Tabelle 4: Ergebnisse der FEM-Berechnung mit einer Spule als Magnetfeldquelle

Nun werden die für die Berechnung benötigten Parameter aus Quickfield ausgelesen und in das Tabellenkalkulationsprogramm integriert. Diese Parameter hat Quickfield für die Elemente, welche innerhalb des markierten Bereichs liegen, berechnet. Auch die Anzahl, für wie viel Elemente die Parameter erwünscht sind, kann angegeben werden. Diese wird auf 4000 beschränkt. Eine Vergleichskalkulation mit nur 1000 Elementparametern hat zum selben Ergebnis geführt. Daher wird angenommen, dass 4000 Elementparameter in jedem Fall ausreichend sind. Für jedes Element werden nun die Kräfte in der r-Achse und in der z-Achse berechnet. Die Summe der Einzelkräfte ergibt dann die Kraft für die beiden Achsrichtungen, welche auf den Weicheisenkörper wirkt. Die wirkende Gesamtkraft muss mit den Teilkräften aus r-Achse und z-Achse mit dem Satz des Pythagoras berechnet werden. Mit dieser Methode ergeben sich die Ergebnisse wie in Tabelle 4 dargestellt.

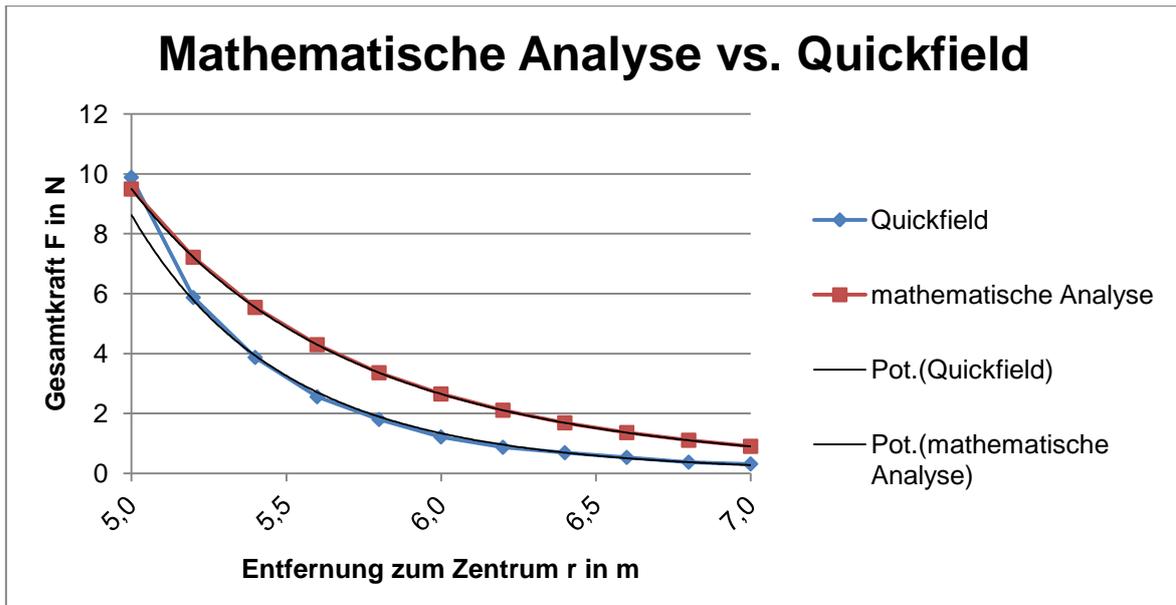


Abb. 10: Vergleich FEM-Berechnung mit der mathematischen Analyse

Die Darstellung der Ergebnisse in der Abb. 10 zeigt, dass diese nicht genau mit der mathematischen Analyse übereinstimmen. Diese Differenz ist auf eine Mehrzahl von Ursachen zurückzuführen. Zum einen handelt es sich bei der mathematischen Analyse nur um eine Näherung, bei der Vereinfachungen der Betrachtung getroffen wurden. Zum Anderen entsteht bei der FEM-Berechnung ein Fehler durch das Umrechnen der Kraft vom Torusvolumen V_T auf das Kugelvolumen V_K . Eine Aussage darüber, welche Ergebnisse den höheren Wahrheitsgehalt besitzen, ist an dieser Stelle nicht möglich.

3.5.2. Reales Poloidal magnetsystem des ASDEX Upgrade

Für eine Validierung des von Quickfield berechneten Magnetfeldes wird das Programm pfeld herangezogen. Dieses Programm ermöglicht es, zu jedem Zeitpunkt einer Plasmaentladung die magnetische Flussdichte zu berechnen. Das Programm zieht dabei die Parameter für die Spulen heran, welche in diesem Moment auftreten. Das Magnetfeld, welches durch den Strom im Plasma entsteht, wird ebenfalls einberechnet. Bei den von pfeld ausgegebenen Daten handelt es sich also um eine sehr präzise Magnetfeldberechnung. Lediglich Störfelder durch ferromagnetische Stoffe sind in der Berechnung nicht enthalten.

Für die Validierung von Quickfield werden nun die Daten aus einer optimalen Plasmaentladung mit der Schussnummer 18074 herangezogen. Anschließend wird ein Zeitpunkt festgelegt, für welchen die magnetischen Flussdichten berechnet werden sollen. Dieser Zeitpunkt ist mit $t = 5,2 \text{ s}$ bestimmt. Für diesen Zeitpunkt werden die Ströme der einzelnen Spulen ermittelt und in Quickfield integriert. Dafür wird das Magnetpulensystem des ASDEX Upgrade, so wie es in Abb. 13 zu sehen ist, in Quickfield übernommen. Die Ströme werden dann im Daten Editor festgelegt. Dadurch lässt sich mit Quickfield das magnetische Feld zu dem festgelegten Zeitpunkt der Plasmaentladung berechnen. Im nächsten Schritt wird das magnetische Feld zum selben Zeitpunkt der gleichen Plasmaentladung mit dem Programm pfeld berechnet. Der direkte Vergleich der Ergebnisse aus Quickfield und pfeld sind in Abb. 11 dargestellt.

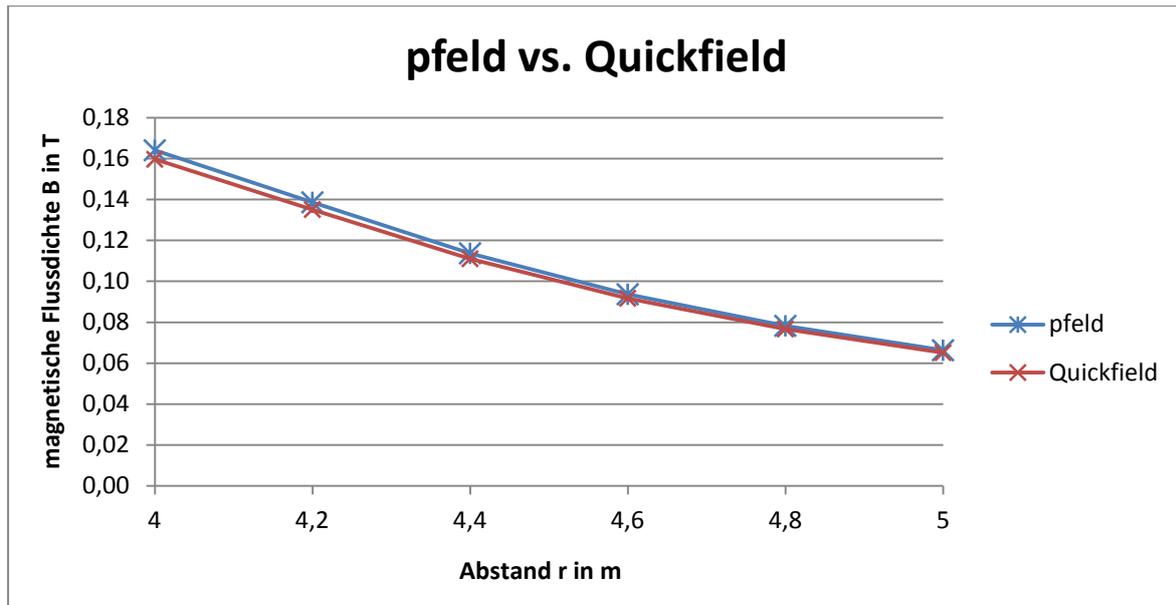


Abb. 11: Vergleich der Magnetfelder in pfeld und Quickfield

Da nur sehr geringe Differenzen bei der Berechnung des Magnetfeldes durch die beiden unterschiedlichen Programme auftreten, ist davon auszugehen, dass diese Ergebnisse einen hohen Wahrheitsgehalt besitzen.

Im nächsten Schritt sollen die Kräfte auf Weicheisen im realen Magnetfeld des ASDEX Upgrade mit Quickfield untersucht werden. Dazu werden für eine erste Maximalbetrachtung die Spulenströme aus Tabelle 2 herangezogen. Für diese Ströme soll nun die Kraft auf eine Weicheisenkugel in denselben Abständen wie bei der mathematischen Analyse berechnet werden. Die Kugel wird dabei stets auf der horizontalen Symmetrieachse liegen (Abb. 13). Es wird dabei auf die gleiche Art und Weise vorgegangen, wie schon in Kapitel 3.5.1. bei der Betrachtung einer einzelnen Spule als Magnetfeldquelle. Die Kraft wird also in einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet und dann um den Volumenunterschied korrigiert.

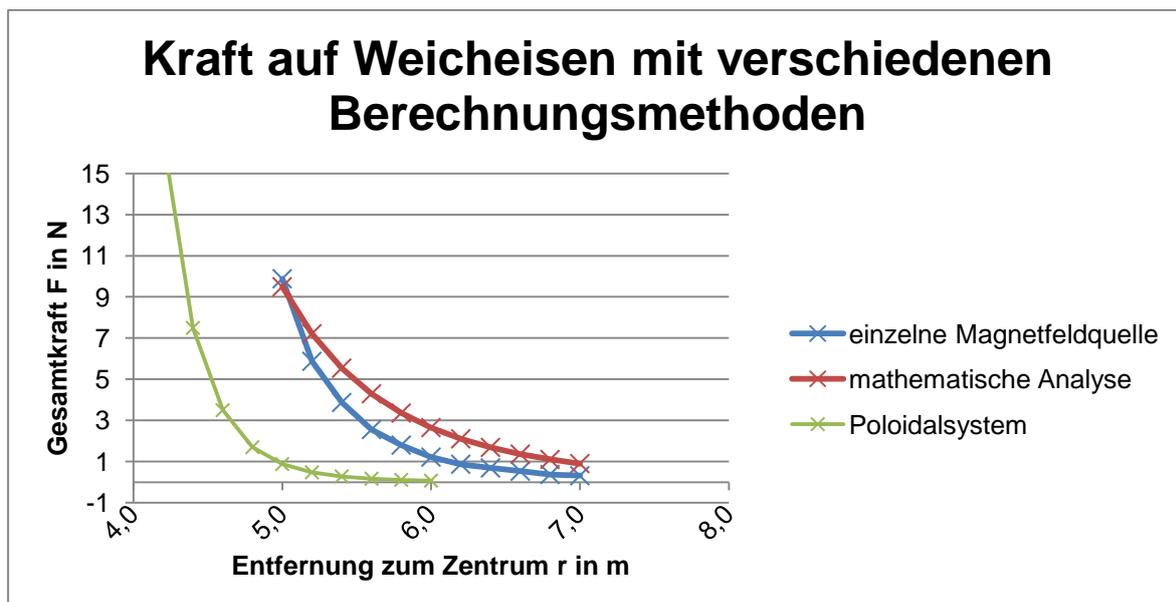


Abb. 12: Kraft auf Weicheisen bei verschiedenen Berechnungsmethoden

Die Abb. 12 zeigt die Kraft auf Weicheisenkörper im realen Magnetspulensystem des ASDEX Upgrade verglichen mit anderen Berechnungsmethoden. Hier wird der Unterschied zu den Ergebnissen aus der mathematischen Analyse und der Betrachtung mit einer einzelnen Magnetfeldquelle deutlich. Jedoch muss beachtet werden, dass beim realen Poloidalfeldsystem Streuungen und Überlagerungen auftreten, welche das Magnetfeld schneller abschwächen lassen können. Eine Beurteilung dieser Ergebnisse muss mit der Messung erfolgen. Jedoch können die mit Quickfield ermittelten Kräfte zur Auslegung des Messsystems dienen. Dazu wird die Maximalkraft bei $r = 3,6\text{ m}$ herangezogen, welche $F = 142\text{ N}$ beträgt.

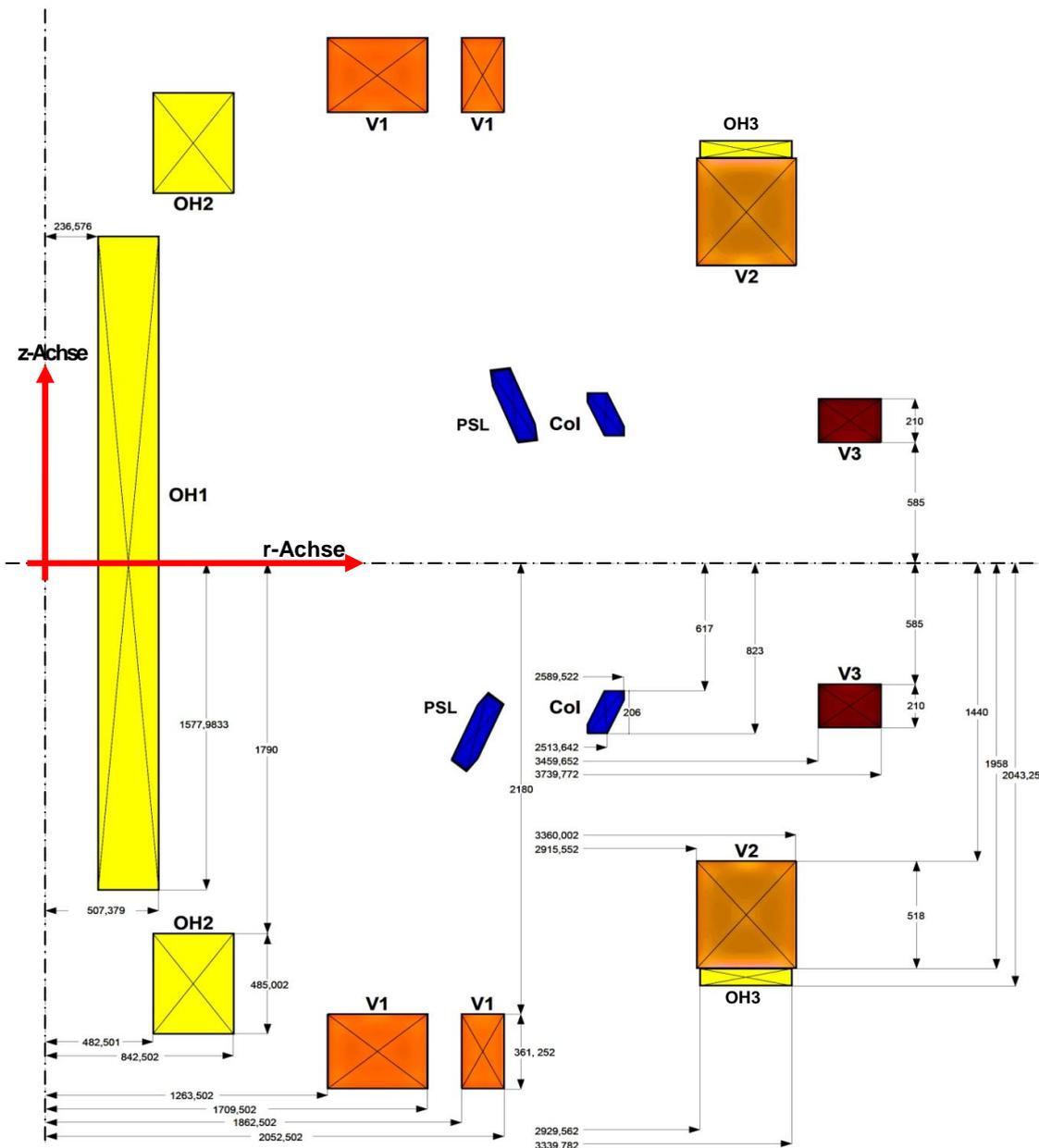


Abb. 13: Magnete des Poloidalfeldes im Vertikalschnitt

Für den Vergleich der FEM-Berechnung mit der Messung muss die FEM-Berechnung für jeden Messvorgang gesondert durchgeführt werden. Dies ist notwendig, da bei jeder Plasmaentladung unterschiedliche Spulenströme auftreten. Aus diesen Gründen müssen für die Kraftberechnung die tatsächlichen Spulenströme, welche während der Messung herrschen, in Quickfield eingebunden werden.

4. Wahl des Messsystems

Die Kräfte auf Eisenkörper, welche durch das Magnetfeld des ASDEX Upgrade erzeugt werden, können mit einer großen Auswahl an verschiedener Sensorik und Messtechnik bestimmt werden. Einige dieser Möglichkeiten zur Messung sollen hier hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Eignung betrachtet werden. Kernpunkte der Betrachtung sind dabei das Verhalten im Magnetfeld, Dynamik der Messung, Auflösung, Genauigkeit sowie die Anzahl der Achsen, welche gleichzeitig vermessen werden können.

Besonders der Einfluss des Magnetfeldes auf die Messung und dadurch entstehende Messfehler, sowie deren Vermeidung sollen Bestandteil dieser Diskussion sein.

Ziel ist eine dynamische Messung mit ca. 100 Hz, eine Auflösung von 0.5 N und eine Genauigkeit von $\pm 1\%$.

4.1. Laservibrometer

Um einen Einfluss des Magnetfeldes auf die Messung komplett ausschließen zu können, muss die Messung in großem Abstand zu der Magnetfeldquelle stattfinden. Die magnetische Flussdichte nimmt bei einem ringförmigen Leiter mit dem Abstand zur Quelle in der dritten Potenz ab.

$$B_{S0} = \frac{\mu_0 \cdot I_p \cdot R_s^2}{2 \cdot r^3} \quad (17)$$

Da im Außenbereich von $r > 15 \text{ m}$, bei einem angenommenen Maximalstrom von $I_p = 2 \text{ MA}$ und einem Spulenradius von $R_s = 3,34 \text{ m}$, für die magnetische Flussdichte $B = 4 \text{ mT}$ gilt, ist der Einfluss des Magnetfeldes auf die Messung in diesem Bereich vernachlässigbar.

Eine Möglichkeit, aus dieser Entfernung eine Messung vor zu nehmen, ist ein Laservibrometer.

Ein Laservibrometer macht sich bei der Messung die Eigenschaften des Dopplereffekts zu nutze. Dabei wird der Lichtstrahl eines HeNe-Lasers mit einer definierten Frequenz f_e durch einen optischen Strahlleiter in einen Mess- und einen Referenzstrahl geteilt (Abb. 14). Der Messstrahl wird auf das Messobjekt fokussiert und von diesem reflektiert. Dabei verändert sich die Frequenz $f_r = f_e + f_d$ in Abhängigkeit von der Oberflächengeschwindigkeit v_d des Messobjektes. Die Frequenz des Messobjektes ergibt sich durch $f_d = 2 \cdot v_d / \lambda$, wobei λ die Wellenlänge des Lichtstrahls ist. Im Laservibrometer wird das reflektierte Licht mit dem in der Braggzelle um eine Frequenz f_b verschobenen Referenzstrahl verglichen. Das Laservibrometer wandelt anschließend das resultierende Licht in ein zur Oberflächengeschwindigkeit des Messobjektes proportionales und elektrisches Signal um, welches anschließend analog demoduliert wird. [9]

Auch Wege können mit einem Laservibrometer gemessen werden. In diesem Fall wird nicht die Dopplerfrequenz in eine Spannung umgewandelt. Da der optische Weg des Referenzstrahles konstant ist, führt eine Verschiebung des Messobjektes zu einem Hell-Dunkel-Muster. Ein Hell-Dunkel-Zyklus entspricht dabei der Verschiebung des Messobjektes um eine halbe Wellenlänge. Bei einem HeNe-Laser entspricht dies einem Weg von 316 nm. Bei der Wegmessung mit einem Laservibrometer werden also die Hell-Dunkel-Übergänge im Detektor gezählt. Je nach Interpolationstechnik kann damit eine Auflösung bis in den nm-Bereich erreicht werden. [9]

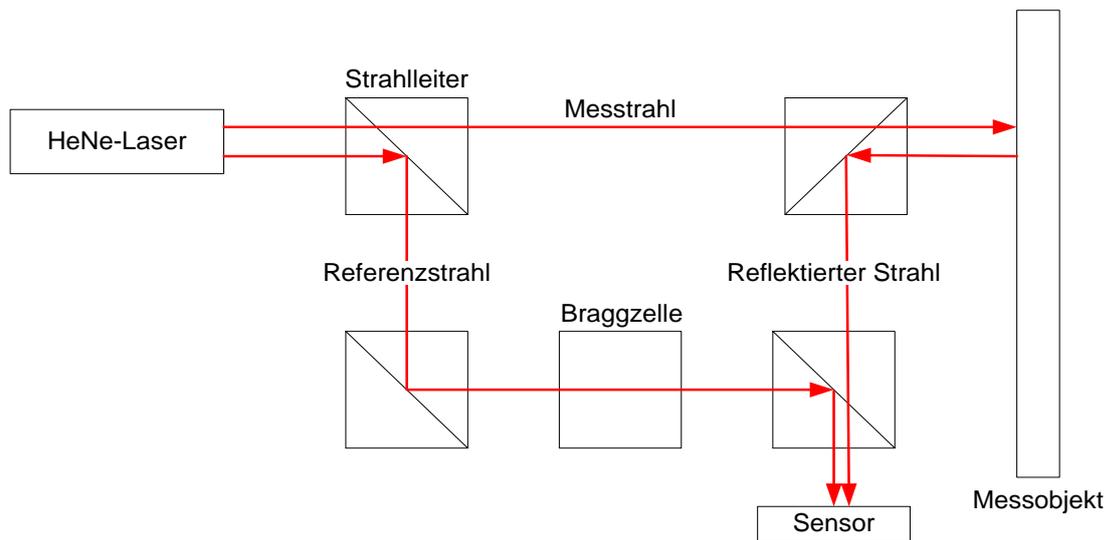


Abb. 14: Schema eines Laservibrometers [8]

Dieses System bietet die Möglichkeit einer sehr präzisen Messung bis in den MHz-Bereich. Durch Verwendung von weichen, unmagnetischen Materialien (z.B. Schaumstoffe oder Kunststoffe) zur Fixierung eines exemplarischen Eisenkörpers im Magnetfeld des ASDEX Upgrade, kann durch die Verschiebung, welche mit einem Laservibrometer gemessen wird, die Kraft ermittelt werden, welche auf den Eisenkörper wirkt. Voraussetzung für dieses Vorgehen sind genaue Materialparameter der Fixierungen. Dazu müssen aufwendige Versuche mit diesen Materialien durchgeführt werden, um deren Materialparameter zu ermitteln und deren Verhalten zu untersuchen. Anschließend können exakte Kraftberechnungen durchgeführt werden können.

Ein Problem dieser Methode stellt die Eindimensionalität dar. Zwar existieren Laservibrometer, welche in 3-Raumachsen die Verschiebung messen können, jedoch sind diesen Messgeräten ein Arbeitsabstand vorgegeben, welcher je nach Optik maximal 310 mm beträgt, was wiederum zu einer Messung im Einflussbereich des starken Magnetfeldes führt. Dies widerspricht der eigentlichen Idee, sich mit diesem Messgerät dem Einfluss des Magnetfeldes zu entziehen.

Da es sich nicht um ein stationäres Magnetfeld handelt, sondern um ein dynamisches, welches sich bei jeder Plasmaentladung des ASDEX Upgrade (ca. 5s - 10s) anders verhält, können auch nicht Einzelmessungen in die 3 Raumachsen mit einem standardmäßigen Laservibrometer durchgeführt werden, da die Kräfte aufgrund der unterschiedlichen Entladungsrahmenbedingung und somit unterschiedlicher Magnetfelder nicht vergleichbar wären.

Eine Lösung dieses Problems könnte die Mehrfachmessung in jeder Achse darstellen. Durch das Vorliegen von Messdaten aus mehreren Plasmaentladungen kann ein Mittelwert in der jeweiligen Raumachse gebildet werden. Anschließend können die Mittelwerte aus den 3 Raumachsen verglichen werden. Dies führt jedoch, abhängig von der Anzahl der durchgeführten Messungen, zu Ungenauigkeiten. Des Weiteren ist von langen und aufwendigen Umrüstzeiten auszugehen, da Laser und Umlenkspiegel an die neue Messachse angepasst werden müssen.

Ein Vorteil dieser Messmethode ist, dass das Verhalten eines sehr kleinen Messobjektes im Magnetfeld untersucht werden kann, da lediglich die Reflektion des Lichtstrahls durch das Messobjekt gewährleistet sein muss. Dies würde dazu führen, dass eine spezifische

magnetische Flussdichte einer punktuellen Kraft zugeordnet werden könnte. Die magnetische Flussdichte kann mit Programmen für eine bestimmte Raumkoordinate für jeden Zeitpunkt eines Versuchsdurchlaufs berechnet werden. Dadurch wären die Ergebnisse der Kraftmessung auf andere Koordinaten einfach und relativ genau zu übertragen.

Zusammenfassung:

Vorteile	Nachteile
Hochpräzise Messung im Nanometerbereich	Eindimensionale Messung
Hochdynamische Messung bis in den MHz-Bereich	Hoher Umrüstaufwand
Messung einer kleinen Punktmasse möglich	Aufwendige Materialparameterermittlung der Fixierung um Kraftberechnung zu ermöglichen
Keine Störeinflüsse durch das Magnetfeld aufgrund des großen Abstandes zur Magnetfeldquelle	Hohe Beschaffungskosten bzw. Leihkosten für das Messinstrument

Tabelle 5: Vor- und Nachteile des Laservibrometers

4.2. Federkreuz

Eine weitere Möglichkeit zur indirekten Kraftbestimmung ist ein Messsystem aus Federwaage und Kamera. Dabei wird ein exemplarischer Eisenkörper mit Federn in alle 6 Raumrichtungen verspannt. Alle Federn haben dabei dieselbe Federkonstante. Drei Kameras werden senkrecht zu den 3 Koordinatenachsen angebracht. Durch Skalen, welche ebenfalls in allen 3 Koordinatenachsen angebracht werden, kann anschließend optisch die Verschiebung unter Einfluss des Magnetfeldes ermittelt werden. Anschließend kann mit

$$F = c_F \cdot x, \quad (18)$$

wobei x die Verschiebungen und c die Federkonstante darstellt, die Kraft F berechnet werden, welche in die jeweilig Achsrichtung wirkt.

Da aber die Annahme gilt, dass die Magnetkräfte des ASDEX Upgrade gleichzeitig in 3 Achsrichtungen wirken, ist eine einfache Federwaage mit 6 Federn ungeeignet. Jede Feder arbeitet der wirkenden Kraft dreidimensional entgegen, so dass die Verschiebungen der einzelnen Federn aufgrund der Winkel, welche gegenüber drei Ebenen entstehen, optisch nicht exakt ermittelt werden können (Abb. 15).

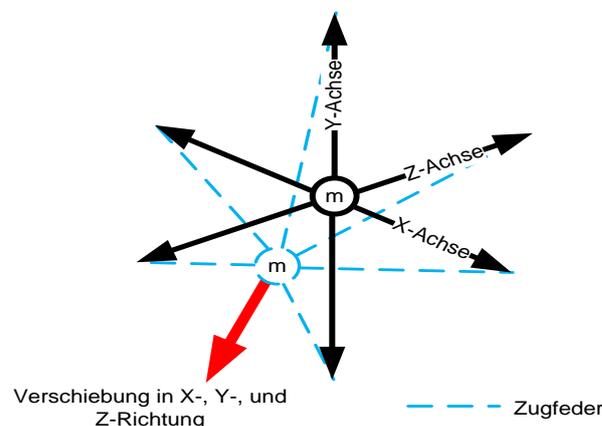


Abb. 15: Verschiebung der Zugfedern in 3 Achsrichtungen

Aus diesem Grund ist ein System aus Führungen notwendig, welches die Beanspruchung einer Feder auf eine Achse beschränkt. Erst dann lässt sich anhand einer Skala die Verschiebung in eine Achsrichtung bestimmen. Ein solches Führungssystem bringt jedoch auch Nachteile mit sich. So verursachen Gleitlager Reibung und verfälschen so das Messergebnis. Um eine Führung in alle Achsrichtungen zu realisieren, müssen die geführten Federn in Reihe geschaltet werden (Abb. 16). Dadurch kann es zu Hebelkräften kommen, welche ebenfalls einen Messfehler oder einen Stick-Slip-Effekt verursachen.

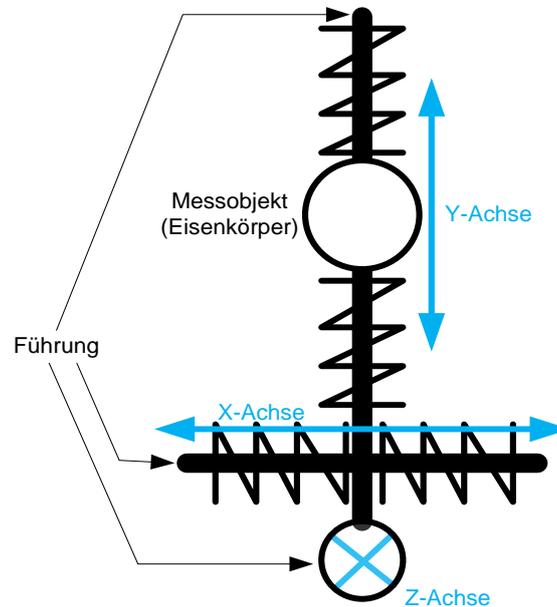


Abb. 16: Schematische Darstellung eines geführten Systems

Ein weiterer Nachteil dieses Messsystems ist, dass die optischen Informationen, welche von der Kamera ausgegeben werden, manuell verarbeitet werden müssen. Das heißt, eine Digitalisierung der Messdaten ist sehr zeitaufwendig und arbeitsintensiv. Des Weiteren ist die Genauigkeit, mit der die Messdaten ermittelt werden können begrenzt. Je nach Kamerasystem und Skaleneinteilung können beim Ablesen große Ungenauigkeiten und Messfehler (z.B. Parallaxefehler) entstehen. Für die Ermittlung von Daten in 3 Achsrichtungen sind 3 Kameras notwendig, deren Installation sehr platzintensiv ist. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Elektronik der Kamerasysteme empfindlich auf das Magnetfeld reagieren und deshalb abgeschirmt werden muss. Diese Abschirmungen erzeugen ein Störfeld und verfälschen damit die Messung an dem Messobjekt.

Zusammenfassung:

Vorteile	Nachteile
Kostengünstig	Dynamische Messung nur bedingt und aufwendig möglich
	Gefahr von vielen Messfehlerquellen durch Reibung und Hebelwirkung an Führungskonstruktion, manuellem Auslesen der Daten und Abschirmung der Kameras
	Ungenau, da großes Messobjekt notwendig um große Auslenkungen zum Auslesen der Verschiebung zu erzeugen
	Platzaufwendig

Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Federsystems

4.3. Piezoelektrische Aufnehmer

Der piezoelektrische Effekt wurde erstmals von den Gebrütern Curie 1880 beobachtet. Dieser Effekt beschreibt das Auftreten von elektrischen Ladungen an bestimmten Oberflächen gewisser Kristalle, wenn diese einer mechanischen Druckkraft ausgesetzt werden. Die dabei entstehende Ladung ist dabei der aufgewendeten Kraft proportional und kann mit Elektroden abgegriffen werden.

Ein häufig verwendetes Material für die piezoelektrische Messung ist der Quarzkristall, welcher durch die chemische Formel SiO_2 (Siliziumdioxid) beschrieben wird. Obwohl der Quarzkristall in der Natur vorkommt, werden heutzutage in der Industrie gezüchtete Quarzkristalle verwendet, um Fehler durch Verunreinigungen im Naturquarz auszuschließen.

Im Gegensatz zu piezoelektrischen Keramikmaterialien erzeugt der Quarzkristall schon als Halbzeug eine elektrische Ladung bei einer äußeren Krafteinwirkung. Dieses Merkmal wird allgemein als der direkte piezoelektrische Effekt bezeichnet. Dabei wird jedoch, je nach Wirkrichtung der Kraft gegenüber dem Kristall, zwischen dem direkten longitudinalen Piezoeffekt und dem direkten transversalen Piezoeffekt unterschieden.

Unbeansprucht sind die Atome in einem Quarzkristall auf drei Symmetrieachsen symmetrisch angeordnet. Die drei Symmetrieachsen sind jeweils um 120° verdreht (Abb. 17). Da jedem Si-Atom vier positive und jedem O-Atom 2 negative Einheitsladungen zugeordnet werden, ist die Zelle in kraftfreiem Zustand nach außen elektrisch neutral.

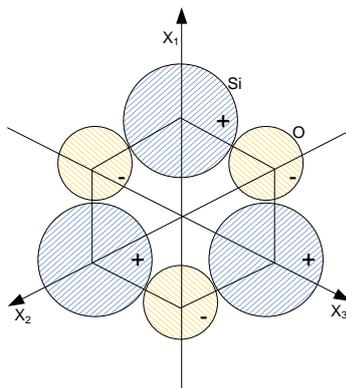


Abb. 17: vereinfachte Struktur eines Quarzkristalles [9]

Je nachdem wie der Kristall beansprucht wird, ergeben sich unterschiedliche Berechnungsformeln für die Kraft. Für die Kraftberechnung ist es ausschlaggebend zu wissen, mit welchem Effekt der verwendete Sensor arbeitet.

Wird eine Strukturzelle in Richtung einer x-Achse mit einer Kraft beansprucht, so wird durch die Verschiebung der Atomlagen an der Fläche A eine positive und auf der Fläche B eine negative Ladung frei (Abb. 18). Dieser Vorgang wird als der direkte longitudinale Piezoeffekt bezeichnet. [10]

Um eine größere Ladung für empfindliche Messanordnungen zu erreichen, ist es beim direktem longitudinalen Piezoeffekt nicht ausreichend mehrere Kristall in Reihe anzuordnen. Die Ladungen im Inneren der Kette heben sich dabei auf und es kommt nur die Ladungserzeugung durch die beiden äußeren Kristalle zum Tragen. Des Weiteren hängt die erzeugte Ladung nicht von der Größe der Kristalle ab, sondern alleine von der Kraft F . Für eine größere Ladungserzeugung ist eine Kombination aus einer mechanischen Reihenschaltung der Kristalle und einer elektrischen Parallelschaltung notwendig (Abb. 18).

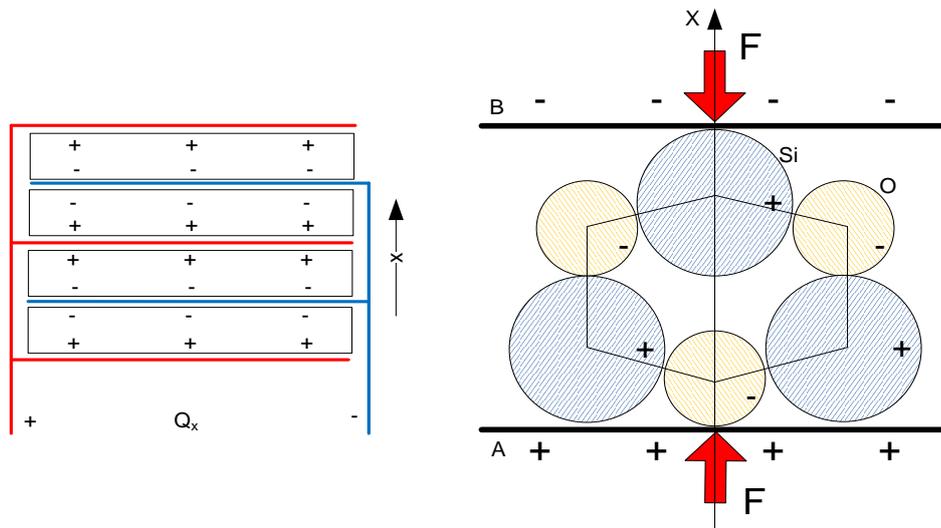


Abb. 18: Direkter longitudinaler Piezoeffekt und schematische Anordnung [10]

Mit der aufgewendeten Kraft F , dem piezoelektrischen Koeffizienten d_{11} und der Anzahl der Kristallscheiben, welche hintereinander angeordnet und parallel elektrisch abgegriffen werden, lässt sich die entstehende Ladung beschreiben durch: [9]

$$Q = d_{11} \cdot F \cdot n. \quad (19)$$

Wirkt jedoch eine Kraft senkrecht zu einer x-Achse, also in Richtung einer y-Achse, ergibt sich für A eine negative und für B eine positive Ladung. Dieser Vorgang beschreibt den direkten transversalen Piezoeffekt. (Abb. 19)

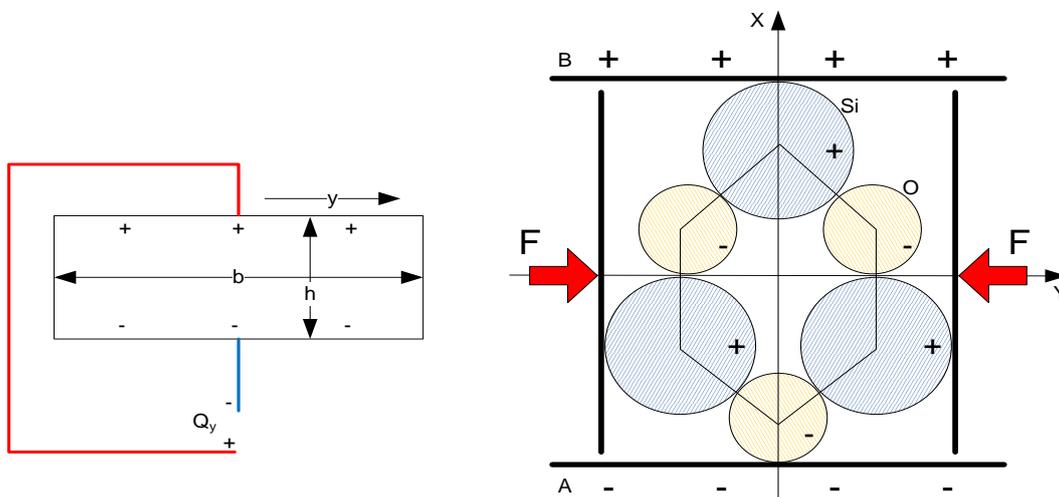


Abb. 19: Direkter transversaler Piezoeffekt und schematische Nutzung [10]

Auch beim direkten transversalen Piezoeffekt wird eine größere Ladung bei Kräfteinwirkung frei, indem die Kristalle mechanisch hintereinander und elektrisch parallel geschaltet werden. Dies hat aber in diesem Fall eine direkte Auswirkung auf die Abmessungen des Quarzes. Je mehr Quarzkristalle parallel (großes b) und je weniger Zellen hintereinander (kleines h) wirken, desto größer die freiwerdende Ladung (Abb. 19). Dadurch entsteht eine Proportionalität zu dem Verhältnis von b/h . Damit lässt sich die Ladung beschreiben durch: [10]

$$Q = -d_{11} \cdot F \cdot \frac{b}{h}. \quad (20)$$

Da die Messung einer elektrischen Ladung schwierig und aufwendig ist, muss das Ladungssignal durch sogenannte Ladungsverstärker in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um eine Verstärkung im eigentlichen Sinn handelt, da das Ein- und Ausgangssignal des Ladungsverstärkers nicht dieselbe Dimension besitzen.

Bedingt durch die Funktionsweise und die Bauart eines solchen Ladungsverstärkers, ist er für eine Umwandlung einer statischen Ladung in eine Spannung ungeeignet. Jedoch können hochwertige Geräte eine quasistatische Messung ermöglichen. Trotzdem ist auf die dadurch entstehende Drift über die Zeit zu achten. Dieser entsteht dadurch, dass im Ladungsverstärker an Isolationswiderständen ein kleiner Teil der Messladung abfließen kann. Dies führt zu einer Abnahme des Messsignals über die Zeit.

Das von piezoelektrischen Sensoren ausgehende Signal beträgt in der Regel nur wenige Piko Coulomb. Verschiebungen kleinster Ladungen auf dem Übertragungsweg, z.B. durch Knicken des Übertragungskabels können dabei schon zu Messfehlern führen. Diese Art der Signalübertragung ist auch sehr anfällig auf elektromagnetische Einflüsse, was auf die Impedanz des Signals zurückzuführen ist.

Diesen Fehlerquellen auf dem Übertragungsweg kann durch sogenannte IEPE Sensoren -Integrated Electronics Piezo-Electric- entgegengewirkt werden. Die integrierte Elektronik wandelt die Ladung noch im Sensor in ein brauchbares Spannungssignal um, so dass die Störeinflüsse auf dem Übertragungsweg ausgeschlossen werden können.

Bei dieser Methode wird der Sensor mit einem Strom versorgt. Diese Stromversorgung kann genau wie die Signalübertragung durch ein einfaches Koaxialkabel erfolgen. Das ausgehende Sensorsignal ist eine Spannung und ist zu der einwirkenden Kraft direkt proportional. [11]

Der Quarzkristall behält seine piezoelektrischen Eigenschaften in einem breiten Temperaturbereich. Der Bereich in dem sich die Sensorempfindlichkeit nur geringfügig ändert wird in der Literatur von -270°C bis 400°C angegeben. [10]

Da die Messung in einem geschlossenen Raum bei Raumtemperatur stattfindet, kann der Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Messung vernachlässigt werden.

Zusammenfassung:

Vorteile	Nachteile
Einfache Kraftmessung	Einfluss des Magnetfeldes auf Messung muss experimentell ermittelt werden
Genaue Kraftmessung	
Kraftmessung in 3 Raumachsen möglich	
Dynamische Messung möglich	
Geringer Platzbedarf	

Tabelle 7: Vor- und Nachteile von Piezoaufnehmern

4.4. DMS

DMS steht für Dehnungsmessstreifen und beschreibt einen passiven Aufnehmer, mit welchem Dehnungen und Stauchungen eines Werkstückes ermittelt werden können. Dazu wird eine Trägerfolie, auf der dünne Leiterbahnen aufgebracht sind, mittels eines Spezialharzes mit dem Werkstück verbunden. Da der Dehnungsmessstreifen bei mechanischen Dehnungen oder Stauchungen den Widerstand ändert, kann so die

Beanspruchung auf das Werkstück ermittelt werden. Daraus lassen sich mit Hilfe der Geometrie des Werkstückes und den Materialparametern des Werkstoffes, aus dem das Werkstück besteht, auf zahlreiche andere Größen schließen und umrechnen. Dabei kann statisch und dynamisch gemessen werden. Typisch sind 50kHz.

Physikalisch ist der höhere Widerstand bei einer Dehnung auf die Vergrößerung der Länge und die Verringerung des Querschnittes an den Leiterbahnen zurückzuführen. Dementsprechend entsteht der geringere Widerstand bei Stauchung durch die Verkleinerung der Länge und der Vergrößerung des Querschnittes an den Leiterbahnen. Dieser Effekt wurde 1856 von William Thomson nachgewiesen.

Bei der Verwendung von nur einem DMS sind die Widerstandsänderungen nur sehr klein. Um brauchbarere Messsignale zu erhalten, wird in der Praxis mit der sogenannten Wheatstonschen Brückenschaltung gearbeitet. Diese Brückenschaltung gibt es in vier verschiedenen Ausführungen:

- Viertelbrücke mit einem DMS
- Halbbrücke mit zwei DMS
- Vollbrücke mit vier DMS

Das Messsignal wird bei einer Biegebeanspruchung und einer Vollbrücke um das 4-Fache verstärkt. Bei einer Zug-Druck Beanspruchung und einer Vollbrücke jedoch nur um das 2,6-Fache. Auf die Viertelbrücke und Halbbrücke sollen hier nicht näher eingegangen werden. Es wird für diese Brückenschaltungen auf die Literatur verwiesen.

Für eine möglichst genaue Messung bietet es sich an, die wirkende Kraft auf den exemplarischen Weicheisenkörper in eine Biegung eines so genannten Federkörpers umzuwandeln. Dazu wird das Messobjekt am Ende des Federkörpers befestigt. Eine DMS Vollbrücke, welche in einem definierten Abstand zum Kräfteinleitungspunkt appliziert ist, nimmt dann die Dehnungen auf der Oberseite und die Stauchungen auf der Unterseite des Federkörpers auf (Abb. 20).

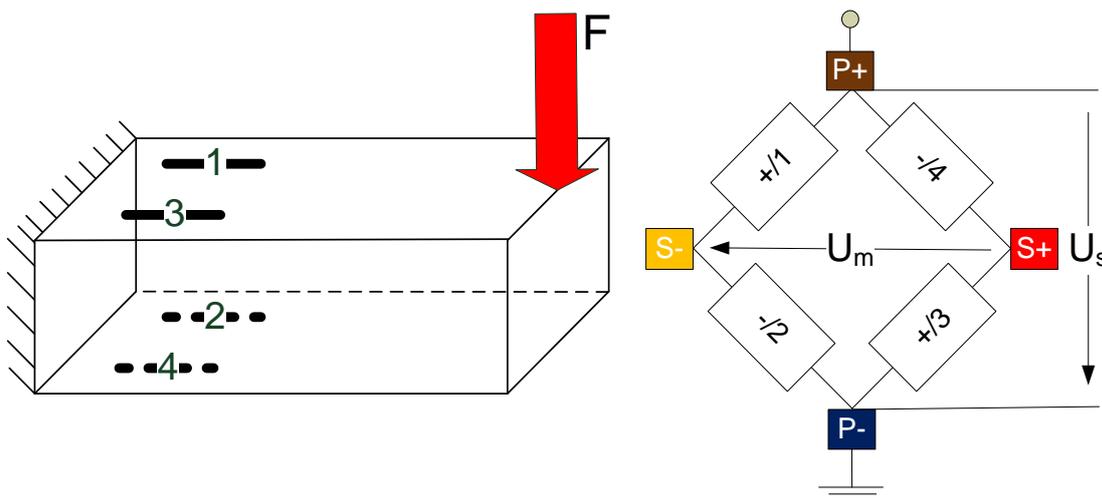


Abb. 20: Federkörper mit DMS und Vollbrückenschaltung

Die vier DMS werden zu einer Vollbrücke, wie sie in Abb. 20 rechts zu sehen ist, mit U_s als Speisespannung und U_m als Messspannung verschaltet. Dabei ergibt sich folgender Zusammenhang: [12]

$$\frac{U_m}{U_s} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (21)$$

Der Faktor k ist die Empfindlichkeitskonstante. Dieser Faktor ist eine Materialkonstante und bezieht sich auf den Werkstoff, welcher für das Messgitter im DMS verwendet wurde. Dieser Faktor wird vom Hersteller angegeben und beträgt in der Regel ~ 2 . Da bei dieser Anordnung der DMS davon ausgegangen werden kann, dass die auftretenden Dehnungen an allen DMS gleich groß sind, nur mit negativem Vorzeichen der Positionen 2 und 3, kann die Formel (21) vereinfacht werden.

$$\frac{U_m}{U_s} = k \cdot \varepsilon \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon = \frac{U_m}{U_s \cdot k} \quad (22)$$

Erhält man nun als Messsignal das Verhältnis von Messspannung zu Speisespannung, kann mit dem k -Faktor, mit bekannter Geometrie des Federkörpers an der Messstelle und dem E-Modul als Materialparameter des Federkörperwerkstoffes die Kraft F folgendermaßen berechnet werden:

$$F = \frac{U_m}{U_s} \cdot \frac{E}{k \cdot l_H \cdot 1000} \cdot W. \quad (23)$$

Der Parameter l_H beschreibt die Hebellänge vom Punkt der DMS Applikation zum Kraftteilungspunkt und E ist der werkstoffspezifische Elastizitätsmodul des Federkörpers. Als W wird das Widerstandsmoment beschrieben. Das Widerstandsmoment ist dabei eine Bezeichnung für das Entgegenwirken des Federkörpers und berechnet sich für einen rechteckigen Körper je nach Richtung der Krafteinleitung unterschiedlich als [14]

$$W_r = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \text{und} \quad W_z = \frac{h \cdot b^2}{6}. \quad (24)$$

Für die Berechnung der Kraftkomponente in der r -Achse wird also W_r eingesetzt und für die Kraftkomponente in z -Richtung W_z . Durch den Satz des Pythagoras kann anschließend die Richtung und die Effektivkraft berechnet werden. Diese Zusammenhänge gelten jedoch nur für eine rechteckige Geometrie und einfache Spannungszustände.

Da sich bei Temperaturänderungen auch der Federkörper ausdehnt bzw. verkürzt, wandelt ein DMS auch diese Längenänderungen in eine Widerstandsänderung um. Jedoch ist ein weiterer Vorteil der Vollbrücke, dass sich die Signale, welche bei Temperaturänderungen auftreten, aufheben, da immer zwei DMS mit unterschiedlichem Vorzeichen in Reihe geschaltet sind. Dies schließt einen temperaturabhängigen Messfehler aus.

Eine weitere Fehlerquelle sind veränderliche Magnetfelder. Diese führen im Messgitter zu Induktionsspannungen, welche zu einem Messfehler oder starkem Rauschen des Messsignals führen. Um diesen Fehler zu kompensieren, gibt es spezielle DMS-Folien für Magnetfelder. Diese bestehen aus zwei Messgittern, welche kongruent übereinander liegen und durch eine Isolierschicht getrennt sind (Abb. 21). Es wird in beiden Messgittern im Einflussbereich eines veränderlichen Magnetfeldes derselbe Strom induziert. Die beiden Messgitter sind noch auf der DMS-Folie in Serie geschaltet, was dazu führt, dass

sich die induzierten Signale aufheben und das Magnetfeld keinen Einfluss auf das Messsignal hat.

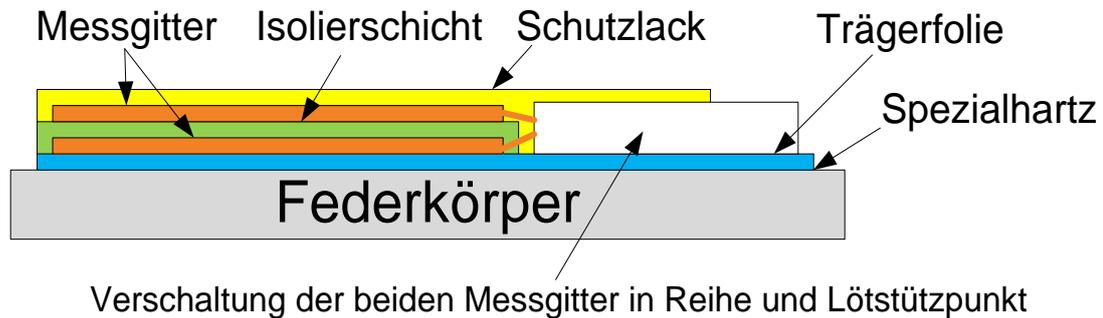


Abb. 21: Magnetfeldbereinigter DMS im Schnitt

Nachteil des Messens mit DMS ist, dass mit einem Biegebalken nur in zwei Achsrichtungen gemessen werden kann. Zwar könnte die dritte Achsrichtung über eine Zug-Druck DMS-Applikation aufgenommen werden, bei welcher jedoch nur eine Verstärkung von 2,6 mit einer Vollbrücke erreicht werden kann. Des Weiteren sind die Auslenkungen bei Zug-Druck um ein Vielfaches geringer als bei Biegung. Dies führt dazu, dass nur sehr kleine Messsignale vorhanden sind, was wiederum eine geringere Genauigkeit der Messung zur Folge hat.

Da aber davon ausgegangen wird, dass am ASDEX Upgrade in x-Richtung ein Symmetrisches Magnetfeld vorhanden ist und keine Kräfte auf Weicheisenkörper wirken, wäre ein zweidimensionales Messgerät ausreichend. Zur Bestätigung der Annahme kann das Messgerät für eine Kontrollmessung in die x-Achse gedreht werden.

Zusammenfassung:

Vorteile	Nachteile
Kostengünstig	Nur zwei Achsen vermessbar
Einfluss des Magnetfeldes auf Messung minimiert	
Hochdynamische Messung möglich	
Federkörper kann selbst erstellt und ausgelegt werden	
Genauere Messungen bis zu $\pm 0,5$ N	

Tabelle 8: Vor- und Nachteile eines DMS-Messsystems

4.5. Fazit zur Auswahl des Messsystems

Aufgrund der Ungenauigkeit, des aufwendigen Messaufbaus und den vielen Störquellen eignet sich eine Kraftmessung mit einem Federsystem, wie er in 4.2. beschrieben wird, für die hier gestellte Aufgabe nicht. Auch das in 4.1. beschriebene Messverfahren mit einem Laservibrometer ist aufgrund der hohen Kosten, welche durch das Messgerät und die Ermittlung der Materialparameter für die Fixierungen anfallen, nicht optimal. Die Dynamik und Präzision, welche mit einem Laservibrometer möglich ist, übersteigt die Anforderungen der Messaufgabe in diesem Fall und entspricht deshalb nicht einem tragbaren Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Auf den ersten Blick bietet sich für eine Messung der Kräfte in einem Magnetfeld ein piezoelektrischer Sensor mit integrierter Elektronik an. Da dieser Sensor das Ladungssignal direkt am Ort der Messung in ein niederimpedantes und somit in ein

gegenüber Magnetfeldern relativ unempfindliches Spannungssignal umwandelt, wäre der Einfluss des Magnetfeldes auf das Messsignal gering.

Jedoch beinhaltet ein IEPE-Sensor Elektronikbauteile, welche einem veränderlichem Magnetfeld gegenüber sehr empfindlich sein können. Das Magnetfeld kann die Elektronik in diesem Messgerät signifikant stören und sogar zu dessen Zerstörung führen.

Aus diesen Gründen ist es günstiger, die signalverarbeitende Elektronik, also den Ladungsverstärker, außerhalb des Einflussbereiches des Magnetfeldes zu platzieren. Für die Messung der Kräfte am ASDEX Upgrade ist deshalb ein konventioneller piezoelektrischer Mehrachsensensor geeigneter. Für die Datenübertragung muss dann ein Kabel mit starker Magnetfeldabschirmung verwendet werden. Des Weiteren müssen die Kabel entsprechend verlegt werden, sodass keine Messfehler durch Ladungen entstehen, welche von den Kabeln erzeugt werden. Um dies auszuschließen, sollten vor der tatsächlichen Messung mehrere Referenzmessungen, zum Beispiel mit Kalibriergewichten, durchgeführt werden.

Am besten für die Messung der Kräfte im Magnetfeld des ASDEX Upgrade eignet sich ein Messsystem, welches sich den Effekt eines Dehnungsmessstreifens zu Nutze macht. Dabei bieten sich die DMS mit Magnetfeldbereinigung an, wie sie im Kapitel 4.4. beschrieben wurden. Durch abgeschirmte Übertragungskabel nimmt das Magnetfeld nahezu keinen Einfluss auf das Spannungssignal, welche das Messsignal darstellt. Weiter lassen sich systematische Messfehler durch den linearen Zusammenhang der Berechnungsparameter sehr leicht korrigieren. Auch der Messbereich kann durch Wahl entsprechender Geometrie des Federkörpers selbst festgelegt werden.

Aus den oben genannten Gründen ist es am geeignetsten, eine zweidimensionale Messung mit einem Biegebalken als Federkörper durchzuführen und dessen Biegebeanspruchungen mit magnetfeldbereinigten DMS aufgenommen werden. Die Auslegung der Geometrie des Federkörpers soll dabei auf den Daten der Simulation für das Poloidalfeld beruhen.

5. Messsystem

Der ASDEX Upgrade ist durch ein Zylinderkoordinatensystem definiert. Der Ursprung liegt dabei im Zentrum des ASDEX Upgrade. Der Abstand zum Zentrum ist mit der Koordinate r belegt und die Höhe mit z . Der Winkelursprung, also 0 Grad, liegt zwischen den Segmenten 1 und 16. Um nun durch eine Biegebeanspruchung die Kräfte in r und z Richtung bestimmen zu können, muss der Federkörper, der einem definierten Biegebalken entspricht, horizontal und tangential zum Radius der Fusionsmaschine orientiert sein. Dies führt dazu, dass eine Aufnahme konstruiert werden muss, die den Federkörper in dieser Position fixiert. Damit keine geometrischen Veränderungen auftreten, welche das Messsignal beeinflussen könnten, muss die Aufnahme möglichst steif ausgeführt werden. Im folgenden wird die Konstruktion und die Auslegung des Messgerätes, sowie die Applizierung der DMS näher beschrieben. Abschließend soll das Messgerät kalibriert werden.

5.1. Auslegungsberechnung für den Federkörper

Die Beanspruchung, welche auf einen Federkörper bei einer Biegebeanspruchung wirkt, ist eine Spannung. Die Spannung σ berechnet sich dabei aus dem Quotienten des eingeleiteten Moments und des Widerstandsmoments W an der Betrachtungsstelle. [14]

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot L_H}{W} \quad (25)$$

Um ein möglichst großes Messsignal mit DMS an den Vollbrücken zu erhalten ist eine hohe Spannung und somit eine hohe Dehnung des Materials in Messrichtung notwendig, da sich dadurch im DMS hohe elektrische Widerstandsänderungen ergeben. Dies lässt sich durch Verringerung des Widerstandsmoments erreichen. Gleichzeitig soll aber senkrecht zur Messrichtung ein sehr hohes Widerstandsmoment entstehen, um bei der Messung Querempfindlichkeiten zu minimieren. Die Verformung soll sich also auf die jeweilige Messrichtung beschränken.

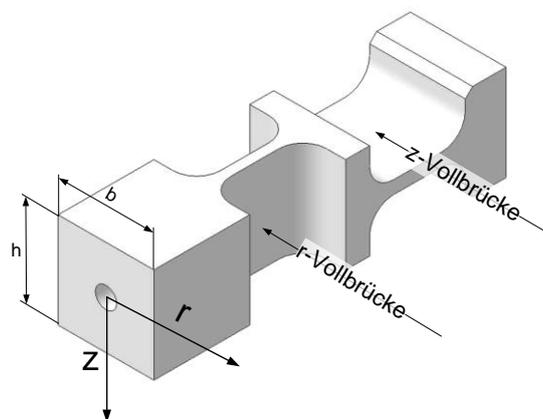


Abb. 22: Federkörper

Nun teilt man einen Körper mit quadratischem Querschnitt auf seiner Länge in einen r -Bereich und einen z -Bereich ein (Abb. 22). Dort werden anschließend die DMS-Vollbrücken appliziert. Gegeben sind dabei die Breite b_r und die Höhe h_r im Bereiche der

r-Vollbrücke und die Höhe h_z und die Breite b_z im Bereich der z-Vollbrücke. Die Indizes beschreiben dabei, um welche Vollbrücke es sich bei der Geometriebeschreibung handelt. Werden nun die Größen b_r und h_z verkleinert, so bleibt in beiden Bereichen das Widerstandsmoment laut Formel (25) senkrecht zur Messrichtung durch die Quadrierung der Geometrieparameter, sehr hoch und in Messrichtung niedrig (Abb. 22).

An das Material aus dem der Federkörper entstehen soll werden mehrere Anforderungen gestellt. Natürlich darf es aufgrund des magnetischen Feldes nicht magnetisierbar sein. Darüber hinaus ist ein niedriger Elastizitätsmodul von Vorteil. Dieser führt dazu, dass bei geringen Kräften eine hohe Materialdehnung entsteht und dadurch große Messsignale verwirklicht werden können. Da Aluminium diese Eigenschaften mit sich bringt, wurde sich für diesen Werkstoff entschieden.

Das Halbzeug ist aus einem quadratischem Vierkantprofil mit einer Kantenlänge von 40 mm und besteht aus der Aluminiumlegierung AlCu4PbMgMn. Diese Aluminiumlegierung hat gegenüber anderen, aufgrund des beigetzten Bleis, bessere Fließeigenschaft. Dies ist bei längeren Messungen, welche an die Elastizitätsgrenze des Materials gehen, zu berücksichtigen, da sich für solche Einsätze diese Legierung nicht eignet. Durch die Fließeigenschaften verformt sich das Bauteil bei hohen, statischen und langandauernden Beanspruchungen dauerhaft und erzeugt eine Grundspannung im DMS, die als Messsignal ausgegeben wird.

Da die Krafteinwirkung bei Messungen im Zuge dieser Arbeit nur maximal 10 s andauern und auch dort nicht der Grenzbereich der Elastizität erreicht werden wird, kann diese Aluminiumlegierung AlCu4PbMgMn trotzdem bedenkenlos verwendet werden. Ein weiterer Grund für das Einsetzen dieses Werkstoffes ist, dass eine geeignetere Aluminiumlegierung in einem akzeptierbaren Zeitrahmen nicht zu organisieren war.

An den beiden Vollbrücken soll bei einer gleichen Krafteinwirkung aus der r- und z-Richtung die gleichen Spannungen entstehen. Um das zu erreichen, müssen die Breite b_r und die Höhe h_z unterschiedlich groß sein. Dies ist auf die unterschiedliche Hebellänge zurückzuführen, welche an den jeweiligen Vollbrücken angreift. Durch diesen Einfluss der Hebellänge muss die Breite b_r kleiner sein als die Höhe h_z , da auch der Hebel der z-Vollbrücke kürzer ist. Um diese beiden Parameter berechnen zu können, sind weitere Angaben notwendig. Die Hebellänge vom Angriffspunkt bis zur Vollbrücke der r-Messung wird mit 102 mm angenommen und die Hebellänge vom Angriffspunkt bis zur Vollbrücke der z-Messung mit 166 mm. Bei der Simulation wurde ersichtlich, dass nicht mit Kräften gerechnet werden muss, welche größer 150 N sind. Mit einer Sicherheit von 1,7 wird für die Auslegung von einer Maximalkraft von 255 N ausgegangen. Laut Herstellerangaben liegt die Elastizitätsgrenze R_p der verwendeten Aluminiumlegierung bei 220 N/mm^2 und die Bruchgrenze bei 340 N/mm^2 . Aus diesem Grund soll die maximal zulässige Spannung bei einer Kraft von 255 N 215 N/mm^2 betragen. Wird dieser Wert überschritten, findet zwar eine dauerhafte Verformung des Federkörpers statt, ist aber noch gegen eine Zerstörung abgesichert. Die Breite b_r und die Höhe h_z können dann mit folgenden Formeln ermittelt werden: [14]

$$b_r = \frac{F_{max} \cdot l_H}{\sigma_{max} \cdot h_z^2}; \quad h_z = \frac{F_{max} \cdot l_H}{\sigma_{max} \cdot b_z^2} \quad (26)$$

Die für die Auslegung verwendeten Rahmenbedingungen werden in der nachstehenden Tabelle nochmal aufgeführt und deren Werte angegeben. Die Parameter h_r und b_z sollen unverändert bleiben und haben deshalb den Wert 40 mm.

Größe	Formelzeichen	Wert	Dimension
Hebellänge r-Bereich	l_r	102	mm
Hebellänge z-Bereich	l_z	166	mm
Elastizitätsmodul	E	70000	N/mm ²
Maximalkraft	F_{\max}	255	N
Maximalspannung	σ_{\max}	215	N/mm ²

Tabelle 9: Rahmenbedingungen für die Auslegungsberechnung

Bei der Anwendung dieser Werte auf die Formeln aus (26) ergeben sich für die Breite b_r 5,41 mm und für die Höhe h_z 4,24 mm. Setzt man diese Geometriemaße nun in die Formel (25) ein, stellen sich die Spannungen bei verschiedenen Kräften wie in der nachfolgenden Tabelle dar. Hier ist zu erkennen, dass auch bei einer Belastung von 200 N die Elastizitätsgrenze von 220 N/mm² nicht erreicht wird.

Kraft F in N	Spannung σ in N/mm ²	Dehnung ϵ in %
255	216,9427	0,309918%
200	170,1511	0,243073%
150	127,6133	0,182305%
100	85,07556	0,121537%
50	42,53778	0,060768%
20	17,01511	0,024307%
10	8,507556	0,012154%
1	0,850756	0,001215%

Tabelle 10: Spannungen bei verschiedenen Kräften

5.2. Konstruktion des Sensors

Um Messungen an verschiedenen Orten und in unterschiedlichen Abständen zum ASDEX Upgrade zu ermöglichen, soll der Sensor möglichst kompakt gestaltet werden. Um in der r-Achse und z-Achse ein Messsignal zu erhalten, muss der Federkörper, so wie er in Abb. 22 zu sehen ist, horizontal und tangential zum ADEX Upgrade positioniert werden. Aus diesem Grund wird eine vertikale Aufnahme notwendig, welche den Federkörper in waagrechter Lage fixiert. Für eine höhere Flexibilität wird diese Aufnahme samt Federkörper auf einer Grundplatte montiert. Für die geometrische Steifigkeit werden Rippen zwischen Aufnahme und Grundplatte angebracht.

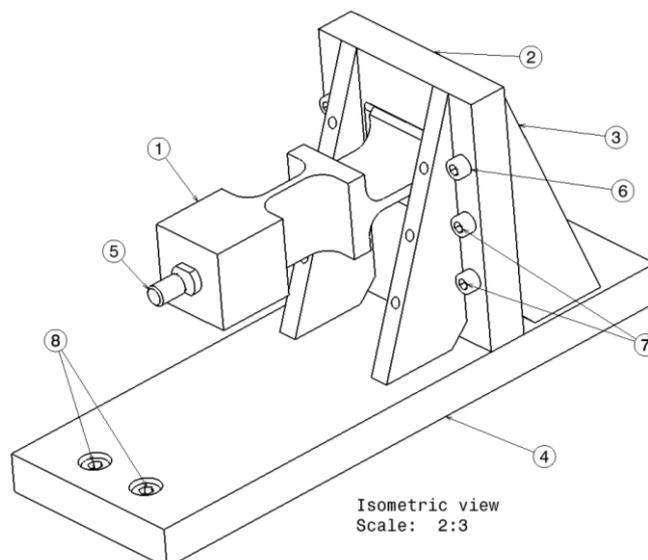


Abb. 23: Zusammenbauzeichnung Messgerät

Stückliste				
Pos	Stück	Bezeichnung	Werkstoff	Norm/Halbzeug
1	1	Federkörper	AlCu4PbMgMn	4kt 40x155 DIN EN 573-1-5
2	1	Aufnahme	AlCu4PbMgMn	FI 20x100x132
3	4	Rippe	AlCu4PbMgMn	FI 10x50x132
4	1	Grundplatte	AlCu4PbMgMn	FI 20x100x302
5	1	Verbindungsschraube	X5CrNi18-10	Rd 15x45 DIN EN 10088-3
6	8	Innensechskantschraube	A4-80	DIN EN ISO 4762 - M6x40
7	12	Innensechskantschraube	A4-80	DIN EN ISO 4762 - M6x30
8	3	Innensechskantschraube	A4-70	DIN EN ISO 4762 - M10x35
9	4	Innensechskantschraube	A4-80	DIN EN ISO 4762 - M8x20

Tabelle 11: Stückliste Messgerät

Für eine hohe Steifigkeit des Sensors und einen optimalen Kraftfluss ist eine Schweißverbindung zwischen den Einzelteilen geeignet. Jedoch ist bei einer Verschweißung von Aluminiumbauteilen aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Aluminium eine starke Temperaturerhöhung des gesamten Bauteils unumgänglich. Diese hohen Temperaturen könnten die DMS-Applikationen schädigen oder zerstören. Eine Anbringung der DMS nach der Verbindung von Aufnahme (Position 2) und Grundplatte (Position 4) ist aufgrund der schlechten Zugänglichkeit der z-Vollbrücke an der Unterseite auch nicht möglich. Aus diesen Gründen werden erst der Federkörper und die Aufnahme verschweißt, anschließend die DMS aufgeklebt und verkabelt. Die restliche Montage findet dann über Schraubverbindungen statt.

Die Aufnahme wird mit einem Durchbruch gefertigt, welcher den Abmaßen des Federkörpers entspricht und angefast ist. Anschließend wird das Ende des Federkörpers, der ebenfalls eine Fase besitzt, in diesen Durchbruch gesetzt und mit der Aufnahme verschweißt. Die Fasen an den beiden Bauteilen erlauben eine Y-Naht. Der Zusammenbau mit den restlichen Bauteilen erfolgt dann über eine Schraublösung. Damit die Rippen an der Aufnahme von beiden Seiten montiert und verschraubt werden können, müssen die gegenüberliegenden Rippen gegeneinander versetzt werden, sodass Platz für die Schrauben geschaffen wird. Außerdem ist jede Rippe von unten durch zwei Schrauben mit der Grundplatte verbunden. Neben der Fixierung der Aufnahme durch die Rippen ist die Aufnahme zusätzlich mit drei M10x30 Schrauben von unten mit der Grundplatte verschraubt. Vier von oben zugängliche Schrauben ermöglichen eine Befestigung der Grundplatte und somit des gesamten Sensors.

In der Simulation wurde von einem kugelförmigen Körper ausgegangen. Um die Ergebnisse aus Simulation und Messung vergleichbar zu machen, soll das Messobjekt ebenfalls eine Kugel sein. Die Kugel aus dem Weicheisenmetall ist mit einem Gewinde versehen und kann somit durch die Verbindungsschraube mit dem Federkörper verbunden werden. Der Krafteinleitungspunkt durch das Magnetfeld kann aufgrund der Geometrie des Messobjektes im Zentrum der Kugel angenommen werden.

Bei der Fertigung kam es durch ein Missverständnis zu einem Fertigungsfehler an dem Federkörper. Dadurch änderten sich für den Federkörper die Hebellängen. Dies führt dazu, dass die in der Auslegungsberechnung ermittelten Spannungswerte (Tabelle 10) nicht mehr gültig sind. Die reale Geometrie des Federkörpers führt bei Einberechnung der Verbindungsschraube und der Kugel zu einem Hebel von 114 mm an der r-Vollbrücke und

einem Hebel von 164 mm an der z-Vollbrücke. Für diese Hebellängen ergeben sich folgende Spannungen im Federkörper an den Messstellen:

Kraft F in N	Spannung σ in N/mm ² an der z-Vollbrücke	Spannung σ in N/mm ² an der r-Vollbrücke
255	214,3289	242,5518
200	168,1011	190,2367
150	126,0758	142,6776
100	84,05055	95,11837
50	42,02528	47,55918
20	16,81011	19,02367
10	8,405055	9,511837
1	0,840506	0,951184

Tabelle 12: Reale Spannungen in den Messbereichen des Federkörpers

Wie aus der Tabelle 12 ersichtlich wird, ergeben sich durch den Fertigungsfehler keine signifikanten Probleme. Der Federkörper ist weiterhin gegen eine Zerstörung bei einer Maximalkraft von 255 N gesichert, da keine der beiden Messbereiche die Marke von 340 N/mm² überschreitet. Weiter wird die Elastizitätsgrenze von 220 N/mm² bis zu einer Kraft von 230 N nicht überschritten.

Betrachtet man nun die zu erwartenden Maximalkräfte von 150 N und nimmt man die Spannung von 220 N/mm² bei einer Kraft von 230 N als maximal an, so ergibt sich für das System eine Sicherheit von 1,53, was als durchaus ausreichend beurteilt wird.

5.3. Applizierung der DMS

Die Anbringung der DMS an den Federkörper ist ein Schlüsselschritt um fehlerfreie Messergebnisse zu erhalten. Für das Verkleben sollten die vom Hersteller der DMS angebotenen oder vorgegebenen Werkzeuge und Materialien verwendet werden.

5.3.1. Vorbereiten der Messstelle

Nachdem die Positionen für die Dehnungsmessstreifen bestimmt sind, müssen die Messbereiche von Rost, Farbe, Oxidationsschichten oder Schmutz befreit werden. Dazu wird die Messstelle mit einem Schleifpapier der Körnung 240 gleichmäßig abgeschliffen. Die geschliffene Fläche muss dabei größer als der Dehnungsmessstreifen sein.

Anschließend muss die Fläche mit einem weißen und sauberen Tuch sowie mit einem Lösungsmittel gereinigt werden. Die Reinigung muss so oft wiederholt werden, bis auf dem Tuch keine Rückstände mehr zu erkennen sind. Da nach der Reinigung die Messstelle wieder verschmutzen oder oxidieren kann, sollt der DMS so schnell wie möglich aufgeklebt werden.

Mit einem Bleistift der Stärke 4H und einem Lineal wird nun die Position des DMS durch ein Fadenkreuz markiert. Die Ausrichtung der DMS ist dabei an beiden Messstellen identisch. Sie wurden jeweils mittig der zwei senkrecht zueinander stehenden Verjüngungen angebracht. Anschließend wurde die Fläche in drei gleiche Bereiche eingeteilt, so dass die zwei inneren Unterteilungsstriche die Position für zwei Dehnungsmessstreifen festlegen.

Anschließend muss der Bereich um den DMS mit Klebeband abgeklebt werden, damit sich der Klebstoff nicht unkontrolliert ausbreiten kann.

5.3.2. Ankleben des DMS

Der DMS sollte nicht mit den Fingern berührt werden. Für das Ankleben wird der DMS vorsichtig mit einer Pinzette ein Stück aus seiner Verpackungsfolie geschoben. Anschließend wird ein Klebestreifen an den Lötstellen des DMS angebracht. Danach kann der DMS an dem Fadenkreuz ausgerichtet werden. Für die Ausrichtung sind am DMS an allen Kanten kleine Pfeile aufgedruckt, welche die Mitte des Messgitters markieren. Nun wird eine Seite des Klebestreifens am Federkörper festgestreift und die andere hochgehalten, so dass die Unterseite des DMS zugänglich ist. Im nächsten Schritt wird der DMS mit dem Klebstoff benetzt und wieder an den Federkörper gedrückt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich der DMS genau in der gewünschten Position befindet, da ein nachträgliches Korrigieren nicht möglich ist. Nachdem der Klebestreifen festgedrückt wurde, kann der DMS mit einem Polyethylenblättchen, welches als Schutz zwischen DMS und Fingern dient, festgestreift werden.

Dieser Vorgang muss für alle acht Dehnungsmessstreifen am Federkörper wiederholt werden. Außerdem müssen die Lötstationen, welche die DMS miteinander verschalten, auf dieselbe Art angebracht werden. Anschließend muss der Kleber in einem Ofen bei 250°C drei Stunden lang aushärten. Für diesen Aushärtevorgang wurden die DMS zusätzlich durch Klammern an den Federkörper gepresst und fixiert. Zum Schutz der DMS sind Gummipfättchen zwischen DMS und Klammer zu legen.

5.3.3. Verlöten der Zuleitungen

Die Verlötung muss dem Schaltplan der Vollbrücke entsprechen. Dazu werden isolierte Spulendrähte wie in Abb. 24 verlegt und verlötet. An die Lötstation wird anschließend ein 4-poliges Kabel gelötet. Beim Löten ist darauf zu achten, dass nicht zu viel Hitze in die DMS und Lötstützpunkte geleitet wird, da sich diese sonst wieder vom Federkörper lösen können. Um Korrosion durch das Flussmittel zu vermeiden, sind die Lötstellen anschließend mit einem Lösungsmittel und einem Pinsel zu reinigen. Zum Schutz der DMS und um die Spulendrähte in ihrer Position zu halten, wird das System noch mit einem speziellen Coating-Lack überzogen.

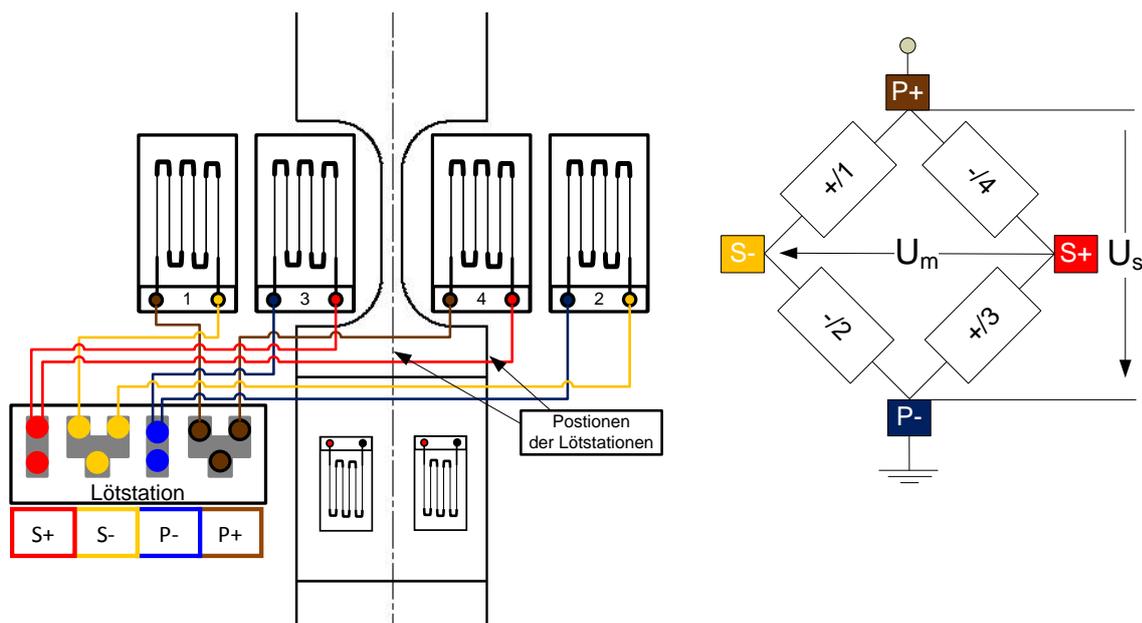


Abb. 24: Schaltplan und DMS Vollbrückenschaltung

Die zwei 4-poligen Zuleitungskabel werden an der Aufnahme durch Klammern fixiert. Da die Kabel schon direkt nach der Klammer abisoliert sind, werden die Adern bis zur

Lötstation verdrillt. Dadurch wird der Einfluss auf die Signale durch das magnetische Feld minimiert. Für die Zugentlastung sind die Adern zwischen Lötstation und Klammer in einer Schleife verlegt. Ab der Isolierung ist das Signal durch den Kabelschirm geschützt. Um mit dem Messgerät möglichst mobil zu sein, sind schon nach 250 mm Stecker an die Kabel montiert. Dadurch kann die Zuleitung unabhängig vom Messgerät verlegt werden und es können eventuell bereits verlegte Leitungen zum Trennverstärker benutzt werden.

5.4. Messsignalverarbeitung und Kalibrierung

Das Messsignal liegt als verstärktes Spannungssignal vor. Für die Auswertung muss dieses Rohsignal noch mehrfach bearbeitet werden, um auf die Kraft schließen zu können. Außerdem ist davon auszugehen, dass aufgrund von Fehlereinflüssen die theoretischen Annahmen aus dem Kapitel 4.4. nicht vollständig zutreffen.

Aus diesen Gründen soll hier der Signalpfad genauer betrachtet werden und Umrechnungen für die Signalverarbeitung betrachtet werden. Um genaue Messdaten zu erhalten sollen mit Referenzgewichten Kräfte erzeugt werden, die anschließend mit den tatsächlichen Messdaten verglichen werden. Bei Ungenauigkeiten muss eine Fehlerkurve mit in das Messergebnis gerechnet werden oder eine aktive Kalibrierung durchgeführt werden.

5.4.1. Messsignalverarbeitung

Das analoge Messsignal wird vom Messgerät zu einem Trennverstärker geleitet. Dort wird das Signal galvanisch getrennt und verstärkt. Vom Trennverstärkerausgang gelangt das Messsignal zu einem CAMAC (Computer Automated Measurement And Control) A/D-Wandler und wird zwischengespeichert. Die CAMAC übergibt die Daten nach Abschluss der Messung weiter an einen Server, welcher die Daten archiviert. Von dort können die Daten zu jedem späteren Zeitpunkt abgerufen werden. Der Signalpfad ist in Tabelle 13 zur Übersicht nochmal dargestellt.

Bezeichnung	Objekt	Position	Leitung	Bezeichnung	Objekt	Position
z-Achse DMS Hr. Kammerl	DMS-Sensor 700Ohm	Seg. 16 (Außen) Unter Co16	KWN025	Vertikal DMS Hr. Kammerl	DMS Trennverstärker	Raum T32, Schrank U9.1
r-Achse DMS Hr. Kammerl	DMS-Sensor 700Ohm	Seg. 16 (Außen) Unter Co16	KWN026	Horizontal DMS Hr. Kammerl	DMS Trennverstärker	Raum T32, Schrank U9.1

>	Leitung	Bezeichnung	Objekt	Position	>	Bezeichnung
>	KWN34	KWN34	KWN A/D- Wandler	Kontrollraum, Schrank D28	>	V2
>	KWN35	KWN35	KWN A/D- Wandler	Kontrollraum, Schrank D28	>	V3

Tabelle 13: Signalpfad

Die Speisung der Vollbrückenschaltungen findet mit einem Konstantstrom von $I_S = 10 \text{ mA}$ statt. Da für die Ermittlung der Kraft aber das Verhältnis der Messspannung zur Speisespannung nötig ist, muss dieser Konstantstrom in eine Speisespannung U_S umgerechnet werden. Dazu wird erst der Gesamtwiderstand der Vollbrücke berechnet (Abb. 24). Dieser ergibt sich zu [14]

$$R_{ges} = \frac{(R_1+R_2) \cdot (R_3+R_4)}{R_1+R_2+R_3+R_4} . \quad (27)$$

Setzt man nun die Einzelwiderstände, welche für alle Dehnungsmessstreifen $R_i = 700\Omega$ beträgt, ein, so ergibt sich ein Gesamtwiderstand von $R_{ges} = 700\Omega$. Durch das ohmsche Gesetz kann nun die Speisespannung berechnet werden. Mit den gegebenen Werten erhält man, bei der Anwendung der nachfolgenden ohmschen Formel, die Speisespannung zu $U_S = 7 V$. [14]

$$U_S = R_{ges} \cdot I_S . \quad (28)$$

Der Verstärkungsfaktor für die hier angewendeten Trennverstärker wird praktisch ermittelt. Dazu wird für eine definierte Ausgangsspannung am Trennverstärker die Eingangsspannung gemessen. Es wird also für die Spannung von $U_{MT} = 1 V$, die am Ausgang des Trennverstärkers anliegt, die entsprechende Eingangsspannung gemessen. Mit den gewonnenen Daten kann anschließend die Steigung bzw. der Verstärkungsfaktor berechnet werden. Für die Ermittlung der Steigung bei statistischen Werten bietet sich die Regressionsanalyse an. Bei der Verstärkung durch den Trennverstärker kann von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden. Daher kann die Steigung einer linearen Regressionsgerade mit nachstehender Formel berechnet werden: [13]

$$m = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} . \quad (29)$$

Dabei sind die Einzelmessungen mit dem Index i versehen. Die Parameter \bar{x} und \bar{y} beschreiben den Mittelwert aller Einzelmessungen der jeweiligen Datenreihe. Für eine korrekte Umrechnung muss der Zusammenhang des Eingangssignals zum Ausgangssignals in folgender Form dargestellt werden:

$$y = m \cdot x + a \quad (30)$$

r-Richtung			z-Richtung		
Eingangssignal U_M in V	Ausgangssignal U_{MT} in V	Verstärkung	Eingangssignal U_M in V	Ausgangssignal U_{MT} in V	Verstärkung
0,00049	0,000	0,00000	0,00060	0,000	0,00000
0,00454	1,000	0,00454	0,00400	1,000	0,00400
0,01268	3,000	0,00423	0,01210	3,000	0,00403
0,02488	6,000	0,00415	0,02430	6,000	0,00405
Steigung m:		0,00407	Steigung m:		0,00398

Tabelle 14: Referenzmessungen zur Verstärkungsbestimmung

Für die Auswertung stehen bei der tatsächlichen Kraftmessung später nur die Spannungen zur Verfügung, welche am Trennverstärkerausgang anliegen. Aus diesem Grund wird das Ausgangssignal als bekannter Parameter x und das Eingangssignal, also die tatsächliche Messspannung U_M , als unbekannter Parameter y bezeichnet. Für die gemessenen Werte, welche in Tabelle 14 dargestellt sind, wurde die Steigung mit der Formel (29) berechnet. Der Verstärkungsfaktor des Trennverstärkers ergibt sich aus dem Kehrwert der jeweiligen Steigung, also $1/m$.

Der y-Achsenabschnitt a , also der Wert, um welchen der Ursprungsdurchgang abweicht, wird folgendermaßen berechnet:

$$a = \bar{y} - m \cdot \bar{x} \quad (31)$$

Mit den Werten aus Tabelle 14 ergeben sich nun folgende Formeln für die Umrechnung:

- r-Richtung: y (Eingangssignal U_M) = $0,004066 \cdot x$ (Ausgangssignal U_{MT}) + $0,0005$
- z-Richtung: y (Eingangssignal U_M) = $0,003981 \cdot x$ (Ausgangssignal U_{MT}) + $0,0003$

Diese Zusammenhänge müssen bei der Analyse und bei der Anwendung der Formel (23) berücksichtigt werden.

5.4.2. Kalibrierung

Für dieses Kapitel werden 10 Referenzgewichte erstellt. Diese Gewichte wiegen jeweils 1 kg mit maximal ± 3 g. Um die Gewichte auflegen zu können, wird ein Aluminiumwinkel erstellt, auf welchem die Gewichte gestapelt werden können. Als erstes sollen in einer Vergleichsmessung theoretisch ermittelte Kräfte mit den Messwerten des Sensors verglichen werden. Dadurch soll ermittelt werden, ob die Formel (23) für die Kraftberechnung anstandslos verwendet werden kann. Anschließend wird das Messgerät im Bereich des ASDEX Upgrade montiert. Die ermittelten Ergebnisse der Kraftmessung werden mit der tatsächlich einwirkenden Kraft durch die Referenzgewichte, welche ja bekannt sind, verglichen. Bei einer nicht vertretbaren Differenz soll eine aktive Kalibrierung stattfinden.

Bei diesen Betrachtungen muss das Eigengewicht des Federkörpers sowie das des Aluminiumwinkels mit berücksichtigt werden. Zum einen führen diese beiden Größen durch ihr Eigengewicht zu einem Messsignal und zum zweiten verschiebt sich durch diese der Schwerpunkt und somit auch die Hebellänge der Krafteinleitung, da die Krafteinleitung im Schwerpunkt angenommen wird.

Um das Eigengewicht und den Krafteinleitungspunkt des Federkörpers zu ermitteln, wird dieser in 8 Bereiche geteilt. Für jeden dieser Bereiche wird das Volumen berechnet und der Schwerpunkt angegeben. Der Ursprung der Schwerpunktskoordinate z_i ist die jeweilige Messstelle. Daher ergeben sich unterschiedliche Schwerpunkte für die Kraftmessung an der r-Vollbrücke und die Kraftmessung an der z-Vollbrücke.

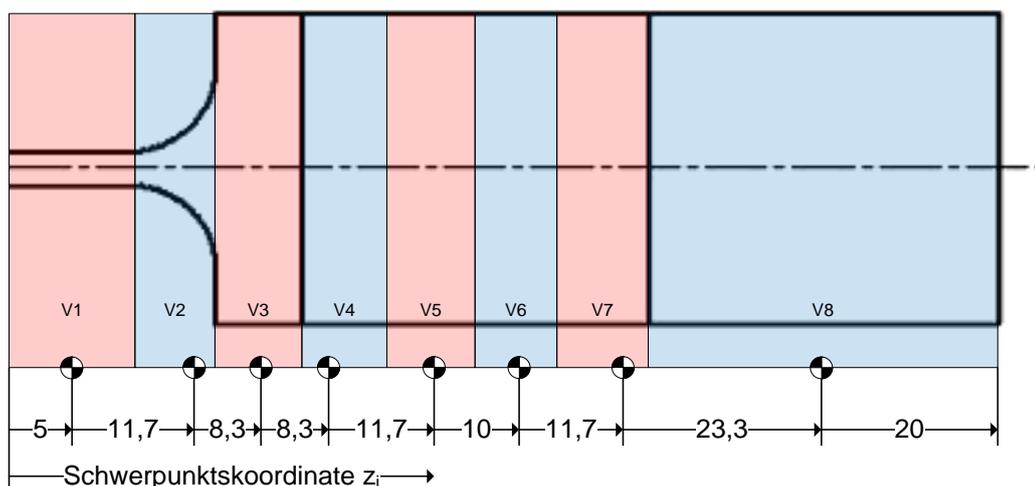


Abb. 25: Masse- und Schwerpunktsberechnung des Federkörpers

Die Dichte des verwendeten Materials für den Federkörper wird vom Hersteller mit $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ angegeben. Mit dieser Angabe kann durch das Volumen die Masse der Einzelabschnitte, sowie die Gesamtmasse ermittelt werden. Der Schwerpunkt derjenigen Abschnitte, welche einen Radius beinhalten, wird bei $1/3$ von der breiteren Seite angenommen (Abb. 25). Die Schwerpunktskoordinate berechnet sich dabei aus folgender Formel: [16]

$$z = \frac{\sum(z_i \cdot m_i)}{\sum m_i} \quad (32)$$

Dabei ist z_i die Schwerpunktskoordinate eines Abschnittes und m_i die dazugehörige Masse. Für die Massenberechnung ergeben sich dann die Ergebnisse wie in Tabelle 15. Das berechnete Moment bezieht sich dabei auf den Ursprung der Schwerpunktskoordinate, also die Messstelle, an der die DMS angebracht sind.

Bezeichnung	Volumen V_i in mm^3	Masse m_i in kg	Schwerpunktskoordinate z_i in mm
beam 1	2164,00	5,84E-03	5
beam 2	3880,81	1,05E-02	16,7
beam 3	4000,00	1,08E-02	25
beam 4	3412,81	9,21E-03	33,3
beam 5	3392,00	9,16E-03	45
beam 6	3392,00	9,16E-03	55
beam 7	3412,81	9,21E-03	66,7
beam 8	64000,00	1,73E-01	90
beam _c	87654,44	0,2367	
Dichte ρ in kg/mm^3		2,70E-06	
Kraft F_b in N		2,32	
Schwerpunkt beam z_b in mm		75,48	
Moment M_b in N/mm^2		175,24	

Tabelle 15: Masse- und Schwerpunktsberechnung Federkörper in der z-Achse

Diese Ergebnisse sind jedoch nur für die z-Vollbrücke gültig, da die Messstelle für die r-Vollbrücke eine andere Hebellänge besitzt. Die Volumen und Massen der Einzelabschnitte verändern sich bei der Betrachtung für die r-Vollbrücke nicht. Jedoch wird als Schwerpunktskoordinatenursprung der Anfang des Abschnittes 6 festgelegt, da dies die Messstelle der DMS ist. Dabei ergeben sich für die Betrachtung der r-Achse die Hebellängen und Eigengewichte wie in Tabelle 16.

Dieselben Berechnungen müssen auch für den Winkel angestellt werden. Der Ursprung der Schwerpunktskoordinate liegt hier an der Montagefläche des Winkels. Diese Fläche liegt direkt am Federkörper an. Da dieser Winkel mit einer M10 Zylinderkopfschraube am Federkörper befestigt wird, muss auch die Schraube in diese Schwerpunktsbetrachtungen mit eingehen. Zur Vereinfachung wird der Schwerpunkt der Schraube mit dem des

Abschnittes V1 aus Abb. 26 als gleich gesetzt. Auch die Masse der Schraube wurde auf den Abschnitt V1 aufgeschlagen.

Bezeichnung	Volumen V_i in mm^3	Masse m_i in kg	Schwerpunktskoordinate Z_i in mm
beam 6	3392,00	9,16E-03	5
beam 7	3412,81	9,21E-03	15
beam 8	64000,00	1,73E-01	40
beam _c	70804,81	0,1912	
Dichte ρ in kg/mm^3		2,70E-06	
Kraft F_b in N		1,88	
Schwerpunkt beam Z_b in mm		37,12	
Moment M_b in N/mm^2		69,61	

Tabelle 16: Masse- und Schwerpunktsberechnung Federkörper in der r-Achse

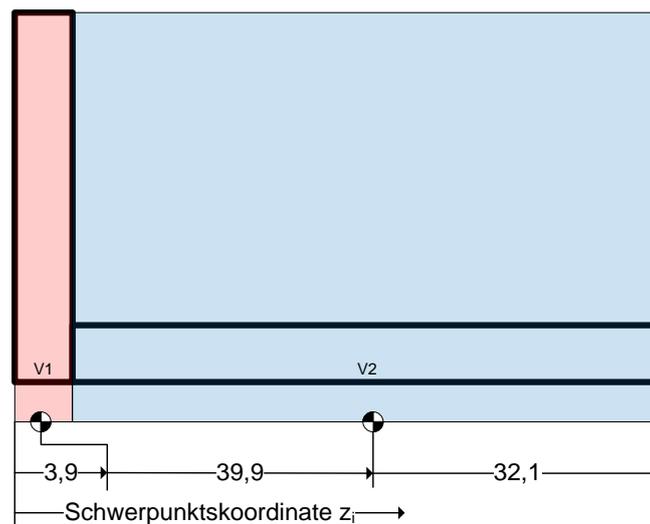


Abb. 26: Masse- und Schwerpunktsberechnung des Winkels

Bezeichnung	Volumen V_i in mm^3	Masse m_i in kg	Schwerpunktskoordinate Z_i in mm
angle 1	30623	0,106	3,9
angle 2	42401	0,115	43,8
angle _c	73024,00	2,21E-01	
Dichte ρ in kg/mm^3		2,70E-06	
Kraft F_a in N		2,17	
Schwerpunkt beam Z_a in mm		24,66	
Moment M_a in N/mm^2		53,47	

Tabelle 17: Masse- und Schwerpunktsberechnung des Winkels

Der Gesamtschwerpunkt kann nun mit der Formel (32) berechnet werden. In diese Berechnung muss jede Masse, auch diejenigen, welche auf den Winkel gelegt werden, mit einbezogen werden. Da die Referenzgewichte alle die gleiche Form haben und übereinander liegen, haben diese dieselbe Schwerpunktskoordinate. Diese beträgt 166 mm für die z-Vollbrücke und 116 mm für die r-Vollbrücke.

Im Gegensatz zum Federkörper bleiben die Daten, wie sie in Tabelle 17 berechnet werden, für die Betrachtung der z-Vollbrücke und der r-Vollbrücke gleich.

5.4.2.1. Vergleichsmessung

Für die Vergleichsmessung werden die Kräfte, welche durch die Gewichte entstehen, mathematisch ermittelt. Dabei wird als erstes das Eigengewicht des Federkörpers ohne Zusatzgewichte betrachtet. Anschließend wird der Winkel montiert und ein Referenzgewicht nach dem Anderen aufgelegt. Nach jedem Schritt werden die Messdaten ermittelt. Das P3-Gerät der Firma Vishay ist eine mobile Auswertestation, an welche der Sensor angeschlossen werden kann. Dieses Gerät gibt als Messwert das Verhältnis von Messspannung U_m zur Speisespannung U_s aus.

z-Achse					
Realparameter		Messung			
Gewicht m in kg	Kraf in N	Spannungs- verhältnis U_m/U_s in mv/V	Hebellänge l_z in mm	Krat F in N	Gewicht m in kg
0,2367	2,3217	0,0000	75,50	0,0000	0
0,4577	4,4897	0,0650	104,00	4,0457	0,4124106
1,4595	14,3174	0,2840	146,56	12,5438	1,2786729
2,4607	24,1391	0,5040	154,47	21,1208	2,1529833
3,4647	33,9884	0,7230	157,81	29,6567	3,0231063
4,4666	43,8170	0,9440	159,65	38,2763	3,9017607
5,4686	53,6466	1,1640	160,81	46,8550	4,7762446
6,4713	63,4831	1,3850	161,62	55,4736	5,654803
7,4738	73,3177	1,6070	162,20	64,1320	6,5374132
8,4772	83,1610	1,8270	162,65	72,7103	7,4118571
9,4788	92,9867	2,0550	163,01	81,6067	8,3187283
10,4808	102,8163	2,2800	163,29	90,3831	9,2133617

Tabelle 18: Berechnungen zur Vergleichsmessung z-Achse

Der Materialkoeffizient der DMS wird vom Hersteller mit $k = 2,11$ angegeben. Der Elastizitätsmodul des Federkörpers beträgt $E = 70000 \text{ N/mm}^2$. Mit den Formeln (23) und (24) kann dann die Kraft in die jeweilige Wirkrichtung aus den Messergebnissen bestimmt werden. Es ist allerdings darauf zu achten, dass durch die Vollbrücke eine Verstärkung von 4 stattfindet. Aus diesem Grund muss das Messergebnis, welches durch das P3-Gerät angegeben wird, durch 4 geteilt werden. Die Hebellängen werden nach jedem Auflegen einer Masse mit der Formel (32) neu berechnet. Führt man dies für die 10 Massen durch, so ergeben sich die Ergebnisse wie in Tabelle 18 und Tabelle 19.

Realparameter		r-Achse			
		Messung			
Gewicht m in kg	Kraf in N	Spannungs- verhältnis U_m/U_s in mv/V	Hebellänge l_r in mm	Krat F in N	Gewicht m in kg
0,2367	2,3217	0,00	37,1	0,0000	0
0,4577	4,4897	0,0550	62,0	3,5272	0,359549
1,4595	14,3174	0,2990	99,07	12,0005	1,2232967
2,4607	24,1391	0,5420	105,96	20,3389	2,0732861
3,4647	33,9884	0,7850	108,87	28,6702	2,922544
4,4666	43,8170	1,0300	110,47	37,0733	3,7791327
5,4686	53,6466	1,2760	111,48	45,5100	4,6391452
6,4713	63,4831	1,5240	112,18	54,0159	5,5062109
7,4738	73,3177	1,7710	112,69	62,4851	6,3695355
8,4772	83,1610	2,0190	113,08	70,9886	7,236353
9,4788	92,9867	2,2670	113,39	79,4918	8,1031423
10,4808	102,8163	2,5000	113,64	87,4696	8,9163746

Tabelle 19: Berechnungen zur Vergleichsmessung r-Achse

Aus diesen Tabellen ist zu lesen, dass in beiden Achsrichtungen ein Messfehler entsteht. Trägt man nun in einer Graphik die Kräfte über das Gewicht an, so wird ersichtlich, dass es sich um einen linearen Fehler handelt. Die Steigung und der y-Achsenabschnitt der gemessenen Kurve kann mit den Formeln (29) und (31) ermittelt werden. Ist die Steigung und der y-Achsenabschnitt ermittelt, kann mit der Geradengleichung der Messwert korrigiert werden.

Der auftretende Fehler der Steigung beträgt in der r-Achse 17,41 % und in der z-Achse 11,87 % (Abb. 27). Dieser Fehler kann eine Vielzahl an Ursachen haben:

- Geometriefehler
- Grundverspannung der DMS
- Fehlerhafte Verklebung der DMS
- Fehlerhafte Kalibrierung des Auswertegerätes
- Fehlertoleranz des Auswertegerätes

Für die Betrachtung des Fehlers wird das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz herangezogen. Diese ist für einen linearen Zusammenhang, wie er in dem vorhandenen System anzutreffen ist, definiert durch [17]

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots \quad (33)$$

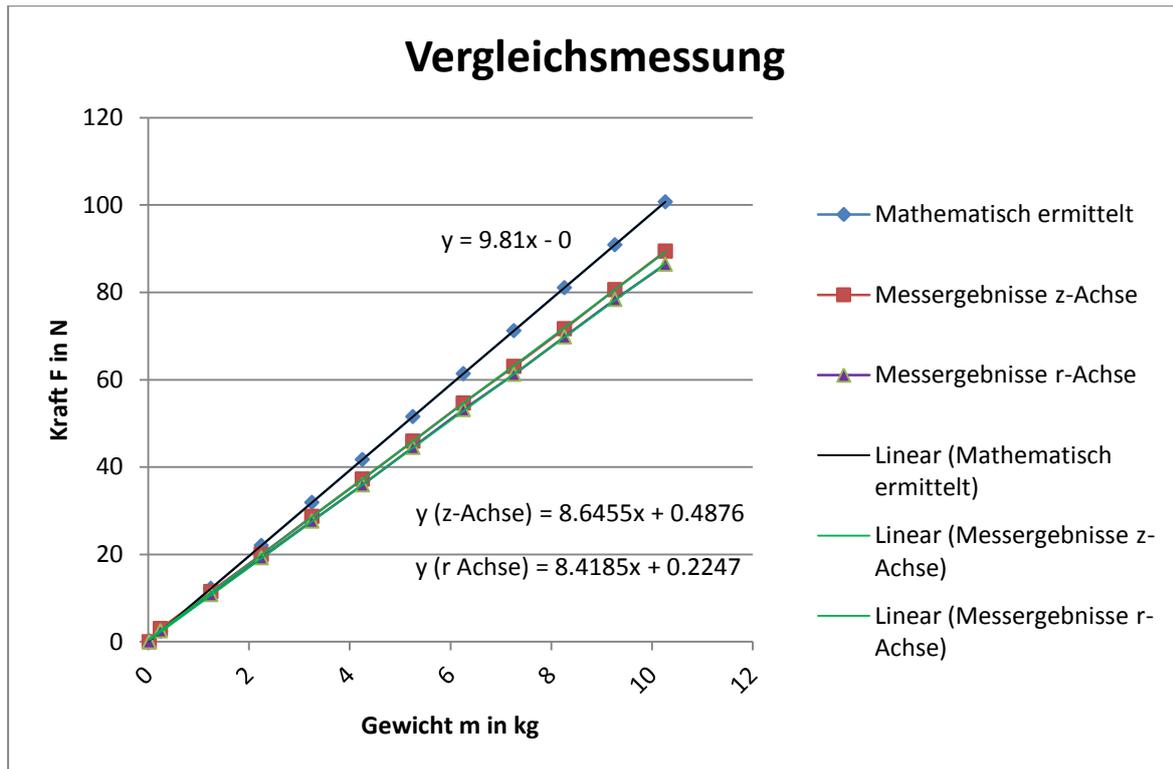


Abb. 27: Vergleichsmessung

Bei der Anwendung der Formel (33) auf die Formel (23) mit eingesetztem Widerstandsmoment, kann eine Gesamtfehlereinschätzung getroffen werden. Um die Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsregel anwenden zu können, müssen die relativen Fehler der Einzelgrößen festgelegt werden. Für die geometrischen Größen wie Länge, Breite und Höhe, wird ein relativer Fehler von max. 1,5% festgelegt. Für den Elastizitätsmodul wird ein relativer Fehler von 1% angenommen. Darüber hinaus wird der Fehler der Messspannung U_m auf einen relativen Fehler von 0,5% geschätzt. Die Konstante k ist vom Hersteller der DMS gegeben und als sehr stabil beschrieben. Aus diesem Grund wird für diese Größe kein Fehler angenommen. Setzt man diese Werte ein, so entsteht der folgende Zusammenhang:

$$\frac{\Delta F}{F} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_m}{U_m}\right)^2}, \quad (34)$$

$$\frac{\Delta F}{F} = \sqrt{(1,5\%)^2 + (1,5\%)^2 + (3\%)^2 + (1\%)^2 + (0,5\%)^2} = 3,84\%. \quad (35)$$

Daraus folgt, dass mehr als 10% des Messfehlers nicht genau zugeordnet werden können. Dieser relative Fehler kann durch ein Zusammenspiel von mehreren der oben genannten Fehlerursachen entstehen. Da diese Fehlerquellen nicht zuzuordnen sind und für einen signifikanten Messfehler führen, muss das Messgerät mit dem zur Messung verwendeten Signalpfad aktiv kalibriert werden.

5.4.2.2. Aktive Kalibrierung

Für die aktive Kalibrierung wird das Messgerät an der Stelle montiert, an der die Kraftmessung stattfinden soll, und an den Signalpfad, wie er in Kapitel 5.4.1. beschrieben ist, angeschlossen. Anschließend werden wieder die Referenzgewichte nacheinander aufgelegt. Dadurch kann eine definierte Kraft einem Messsignal zugeordnet werden. Mit

mehreren Werten wird eine Umrechnungskurve ermittelt, welche für alle wirkenden Kräfte gültig ist. Alle Unsicherheiten und Fehlerquellen, welche am Messgerät und zwischen Messgerät und Datenspeicherung auftreten, werden dadurch ausgeschlossen.

Da der Zwischenspeicher der Signalverarbeitung eine begrenzte Speicherkapazität besitzt, ist die Dauer der Messung von der Speicherfrequenz abhängig. Das heißt, je höher die Datenerfassungsfrequenz, desto mehr Daten müssen gespeichert werden, desto kürzer ist die mögliche Messdauer. Bei der Kalibrationsmessung wird alle 0,0039675 Sekunden ein Wert gespeichert. Diese Speicherfrequenz von 250 Hz lässt eine Messdauer von 64 Sekunden zu. Aus diesem Grund wird die Kalibrationsmessung auf 5 Durchläufe aufgeteilt. Im ersten Durchlauf wird nur das Eigengewicht des Federkörpers gemessen. Im zweiten wird der Winkel befestigt, anschließend ein Gewicht aufgelegt. Nachdem der zweite Durchlauf abgeschlossen ist wird ein weiteres Gewicht hinzugefügt und danach die Messung gestartet. Während die Messung läuft, wird um zwei weitere Gewichte erweitert. Dieses Vorgehen wird noch zweimal wiederholt, bis alle Referenzgewichte aufliegen. Bevor ein Gewicht hinzugefügt wird, soll eine kurze Zeit von ca. 10 Sekunden abgewartet werden, damit das System ausschlagen kann.

Nachdem das CAMAC die Daten in einen Archivierungspool überspielt hat, können diese mit verschiedenen Programmen unter einer vorgegebenen Versuchsnummer ausgelesen werden. Da die Kalibrierungsmessung nicht während des regulären Versuchsbetriebs stattgefunden haben, werden die Daten auf einem Privatlaufwerk unter selbst erstellten Versuchsnummern abgelegt und nicht wie sonst üblich dem Experiment zugeordnet. Das Programm, das zum Auslesen der Daten verwendet wurde, heißt Osiris und ist eine Eigenentwicklung des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik. Nach Eingabe des Laufwerkes und der Versuchsnummer werden die Daten von Osiris als Graph angezeigt und als ASCII - Code in einem gewünschten Ordner abgelegt. Diese ASCII - Code Daten können anschließend in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert und ausgewertet werden.

Nach dem Import in eine Tabellenkalkulationssoftware, werden die Daten in ein Diagramm eingebunden. Hier werden Bereiche, in denen starke Schwankungen des Messsignals auftreten, sichtbar (Abb. 28). Anhand dieser Graphik werden Zeitfenster ausgewählt, in denen nur sehr geringe Schwankungen, bzw. geringes Rauschen des Messsignals auftreten. Aus den Werten, welche innerhalb dieses Zeitfensters liegen, wird ein Mittelwert bestimmt und einer physikalischen Größe zugeordnet. Da die Hebellänge der Krafteinwirkung während der Kalibrierung nicht dieselbe ist, wie während der tatsächlichen Messung mit der Weicheisenkugel, wird das Messsignal einem Moment zugeordnet. Das Messsignal beschreibt somit das Moment, welches an der Messstelle bei einer bestimmten Krafteinleitung auftritt. Für die Ermittlung der Kraft muss anschließend mit dem jeweiligen Hebel umgerechnet werden. Die Hebellängen für die Kalibration ergeben sich genauso wie in Tabelle 18 und Tabelle 19. Für die Messung mit der Weicheisenkugel muss die Hebellänge mit der Formel (31) ermittelt werden. Dabei erhält man für den Hebel in der r-Achse 159,21 mm und in der z-Achse 110,58 mm. Das Eigengewicht des Federkörpers und die Verbindungsschraube sind hier schon mit berücksichtigt.

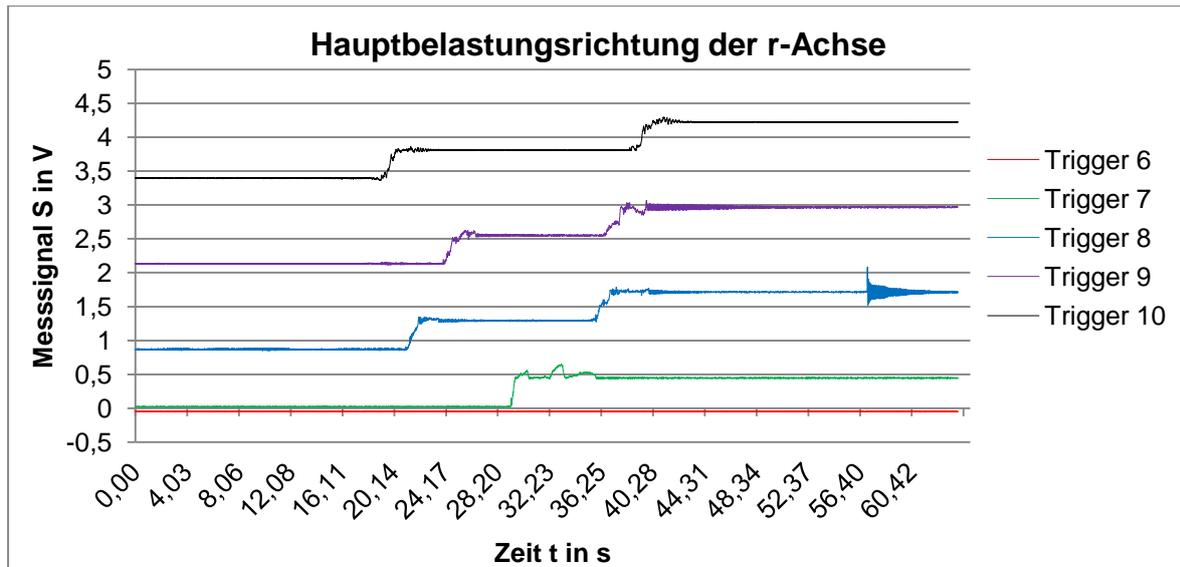


Abb. 28: Verlauf der Hauptbelastungsrichtung der r-Achse

Für die Kalibrierung werden die Referenzgewichte mit ihrem jeweiligen Hebel in ein Moment umgerechnet. Anschließend wird aus den Messsignalen und den Kalibrationsmomenten die Steigung und der y-Achsenabschnitt ermittelt. Dies geschieht wieder mit den Formeln (29) und (31). Dabei wird das Moment dem Parameter y gleichgesetzt und x ist das bekannte Messsignal. Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 und Tabelle 21 dargestellt.

Betrachtung der r-Achse						
Kalibrierparameter			aus Messergebnis			
Kraft F in N	Hebellänge l in mm	Moment in Nmm	Mess-ergebnisse S in V	Berechnetes Moment M in N	Kraft F in N	Differenz der Kräfte F in N
4,0437	62,0	250,7083	0,0205	229,5209	3.8019	0.2417
13,8655	100,2516	1390,0338	0,4464	1385,6344	13.8216	0.0439
23,6941	106,7843	2530,1560	0,8695	2533,8106	23.7283	-0.0342
33,5374	109,4891	3671,9850	1,2933	3683,9984	33.6472	-0.1097
43,3631	110,9644	4811,7658	1,7135	4824,4583	43.4775	-0.1144
53,1928	111,8950	5952,0017	2,1335	5964,1585	53.3014	-0.1086
63,0420	112,5363	7094,5135	2,5510	7097,3506	63.0672	-0.0252
72,8716	113,0035	8234,7494	2,9662	8224,1467	72.7778	0.0938
82,7081	113,3599	9375,7819	3,3947	9387,2538	82.8093	-0.1012
92,5426	113,6405	10516,5868	3,8109	10516,6147	92.5429	-0.0002
102,3703	113,8670	11656,5952	4,2240	11637,9305	102.264	0.1639
Steigung			2713,9942			
y-Achsenabschnitt			173,9811			

Tabelle 20: Kalibrierung der r-Achse

In das berechnete Moment dieser Tabellen sind die Steigung und der y-Achsenabschnitt bereits mit eingeflossen. Aus jedem beliebigen Messsignal lässt sich nun mit dem Zusammenhang

$$y_r(\text{Moment } m) = 2713,9942 \cdot x_r(\text{Messsignal } S_r) + 173,9811 \quad (36)$$

das auftretende Moment an der Messstelle für die r-Vollbrücke bestimmen.

Auf die gleiche Art wird bei der z-Achse vorgegangen (Tabelle 21, Abb. 29). Bei der Kalibrierung wurde die z-Achse als erstes bearbeitet. Aus diesem Grund werden dort die Messdurchgänge durchlaufend als Trigger 1 bis Trigger 5 bezeichnet. Trigger 6 bis Trigger 10 sind die Datenreihen der r-Achsenkalibrierung. Die ASCII - Code Dateien sind auf die gleiche Weise beschriftet.

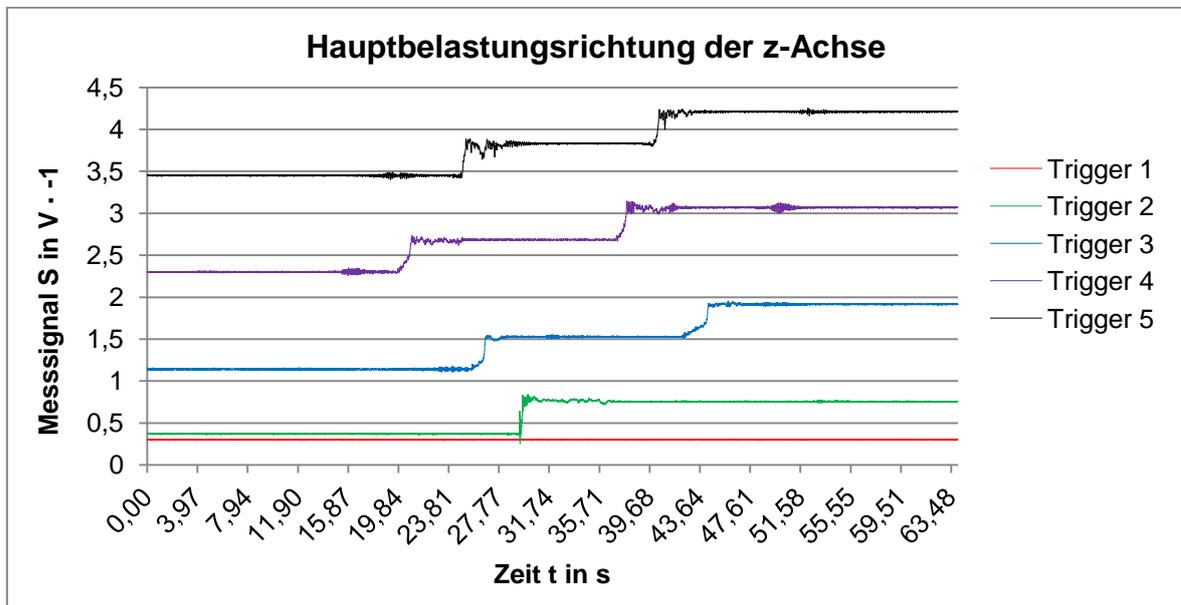


Abb. 29: Verlauf der Hauptbelastungsrichtung der z-Achse

Betrachtung der z-Achse						
Kalibrierparameter			aus Messergebnis			
Kraft F in N	Hebellänge l in mm	Moment in Nmm	Mess-ergebnisse S in V	Berechnetes Moment M in N	Kraft F in N	Differenz der Kräfte F in N
4,4900	104,0000	466,9638	0,3705	450,9586	4.3361	-0.1539
14,3118	146,5488	2097,3780	0,7550	2083,8178	14.2193	-0.0925
24,1404	154,4682	3728,9321	1,1403	3720,3631	24.0850	-0.0555
33,9838	157,8084	5362,9288	1,5279	5366,6981	34.0077	0.0239
43,8095	159,6456	6993,9944	1,9149	7010,2704	43.9114	0.1020
53,6391	160,8101	8625,7113	2,3001	8646,6697	53.7694	0.1303
63,4884	161,6152	10260,6851	2,6850	10281,1672	63.6151	0.1267
73,3180	162,2031	11892,4021	3,0677	11906,8611	73.4071	0.0891
83,1545	162,6522	13525,2589	3,4494	13528,1214	83.1721	0.0176
92,9890	163,0063	15157,7900	3,8314	15150,4091	92.9437	-0.0453
102,8166	163,2924	16789,1813	4,2094	16755,8894	102.6128	-0.2039
Steigung			4247,3447			
y-Achsenabschnitt			-1122,8581			

Tabelle 21: Kalibrierung der z-Achse

Für das Messsignal der z-Achse ergibt sich nun die Berechnung für das Moment aus

$$y_z(\text{Moment } m) = 4247,3447 \cdot x_z(\text{Messsignal } S_z) - 1122,8581. \quad (37)$$

5.4.2.3. Querempfindlichkeit

Bei den Kalibrationsmessungen wurden immer die Daten aus beiden Messrichtungen, also r-Vollbrücke und z-Vollbrücke, gleichzeitig ausgelesen. Dabei hat sich ergeben, dass in beiden Richtungen Querempfindlichkeiten auftreten. So sorgt zum Beispiel eine Krafteinleitung in der r-Achse für ein Messsignal an der z-Vollbrücke und umgekehrt. Dieses Phänomen soll hier noch genauer untersucht werden.

Jeder Messbereich hat eine Hauptbelastungsrichtung. Diese ist an der r-Vollbrücke die r-Achse und an der z-Vollbrücke die z-Achse. Die DMS nehmen in den jeweiligen Messbereichen immer nur Materialdehnungen in dieser Hauptbelastungsrichtung wahr. Dies ist auf die Verschaltung der DMS zurückzuführen. Findet nun zum Beispiel eine Materialspannung an der z-Vollbrücke durch eine Kraft aus der r-Achse statt, wird kein Messsignal von der z-Vollbrücke ausgegeben. Dies liegt daran, dass in diesem Fall die neutrale Biegelinie zwischen zwei DMS liegt. Das heißt dass die DMS-Paare 1-2 und 3-4 aus Abb. 24, jeweils dieselbe Beanspruchung erfahren und sich die Messsignaländerung aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen in der Vollbrücke aufhebt. Voraussetzung dafür ist eine ideale Federkörpergeometrie sowie ein idealer Krafteinleitungspunkt.

Daraus lässt sich schließen, dass die Querempfindlichkeit einen geometrischen Ursprung hat. Fertigungsfehler oder Ungenauigkeiten bei der Montage können dazu führen, dass die Messflächen leicht schräg stehen, das heißt, sie liegen nicht genau senkrecht zur Krafteinleitung. Auch ein unebener Untergrund, auf welchem das Messgerät befestigt ist, kann zu solchen Querbeanspruchungen führen. Dadurch teilt sich das Gesamtmoment auf zwei Achsen auf. In Kapitel 5.4.2.2. wurde von einer idealen Geometrie ausgegangen. Es wurde also für das Gesamtmoment, beschrieben durch

$$M_g^2 = M_z^2 + M_r^2, \quad (38)$$

das Moment in der z-Vollbrücke $M_r = 0$, und in der r-Vollbrücke $M_z = 0$ angenommen. Durch die Querbeanspruchung gilt nun $M_r = 0$ bzw $M_z = 0$ nicht mehr. Um den dadurch entstehenden Fehler abschätzen zu können, muss der jeweilige Queranteil berechnet werden. Dabei wird in den folgenden Erläuterungen von einer Kraft aus der z-Achse ausgegangen. Für eine Beanspruchung in der r-Achse sind die Schritte dementsprechend zu wiederholen.

Als erstes müssen die Messsignale (Abb. 30; Abb. 31) ausgewertet werden, welche durch die Querempfindlichkeit entstehen. Da davon auszugehen ist, dass für die Signale der Querempfindlichkeit die geringsten Schwankungen in den Zeitfenster herrschen, welche für die Vergleichsmessung definiert wurden, sind diese Zeitfenster aus Kapitel 5.4.2.1. wieder zu verwenden. Die Mittelwerte dieser Signale müssen nun in ein Moment umgerechnet werden. Dies geschieht mit den Formeln (36) und (37) aus der aktiven Kalibrierung. Da die Querbeanspruchung an der r-Vollbrücke bei einer Kraft aus der z-Achse untersucht werden soll, muss auch die entsprechende Formel ausgewählt werden. Diese ist hier die Formel (36), da das Querbeanspruchungssignal auf der r-Vollbrücke zustande kommt. Dabei ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Kraft, welche in der z-Achse eingeleitet wird, und dem an der r-Vollbrücke entstehendem Moment durch die Querempfindlichkeit. Von diesen Daten lässt sich eine Geradengleichung, welche wieder mit den Formeln (29) und (31) ermittelt wird, mit einem definierten y-Achsenabschnitt ableiten. Jedoch ist davon auszugehen ist, dass keine Querbeanspruchung auftritt, wenn keine Kraft in der Hauptbelastungsrichtung, in diesem

Fall auf der z-Achse, anliegt. Der y-Achsenabschnitt der Geradengleichung wird also so verändert, dass bei $F_z = 0$ auch $M_{zr} = 0$ gilt. Durch die angepasste Geradengleichung ergibt sich das Quermoment M_{zr} für die r-Vollbrücke. Das tatsächliche Gesamtmoment M_{gr} , welches an der r-Vollbrücke durch eine bekannte Kraft in der r-Achse auftritt, lässt sich mit dem entsprechendem Hebel berechnen. Die Formel (38) wird nun zu $M_{rr} = \sqrt{M_{gr}^2 - M_{zr}^2}$ umgestellt und berechnet. Der erste Index beschreibt dabei jeweils in welche Richtung das Moment wirkt und der zweite Index gibt an, in welcher Vollbrücke dieses Moment auftritt. Vergleicht man nun das errechnete Moment M_{rr} mit dem tatsächlich gemessenem Moment an der r-Vollbrücke, welches in Tabelle 20 nachzulesen ist, so ergibt sich der Fehler, welcher durch die Querempfindlichkeit entsteht. Die Berechnungen sind in der Tabelle 23 und Tabelle 22 für beide Querempfindlichkeiten der r-Vollbrücke und der z-Vollbrücke dargestellt.

Gewicht m in der z-Achse in kg	Messsignale Querempfindlichkeit	Moment durch Querempfindlichkeit M_{zr} in Nmm	berechnetes Gesamtmoment M_{gr} in Nmm	gemessenes Moment M_r in Nmm	resultierendes Moment M_{rr} in Nmm	Differenz in %
1.4134	0.0698	-18.1141	1390.0338	1343.9142	1389.8816	0.0146
2.4153	0.0639	-34.1687	2529.8909	2492.0905	2529.8909	-0.3148
3.4187	0.0586	-48.5858	3671.6302	3642.2783	3671.6302	-0.4470
4.4203	0.0532	-63.2557	4811.3170	4782.7382	4811.3170	-0.3572
5.4223	0.0478	-78.0189	5951.4575	5922.4383	5951.4575	-0.2814
6.4263	0.0424	-92.4898	7093.8780	7055.6305	7093.8780	-0.1060
7.4283	0.0371	-107.0708	8234.0209	8182.4266	8234.0209	0.0708
8.4310	0.0318	-121.4144	9374.9634	9345.5336	9374.9634	-0.1742
9.4335	0.0264	-136.1261	10515.6735	10474.8945	10515.6735	-0.0474
10.4353	0.0207	-151.3794	11655.5798	11596.2103	11655.5798	0.1167
					Min	-0.4470
					Max	0.1167
					Delta	0.5637

Tabelle 22: Querempfindlichkeit der r-Vollbrücke

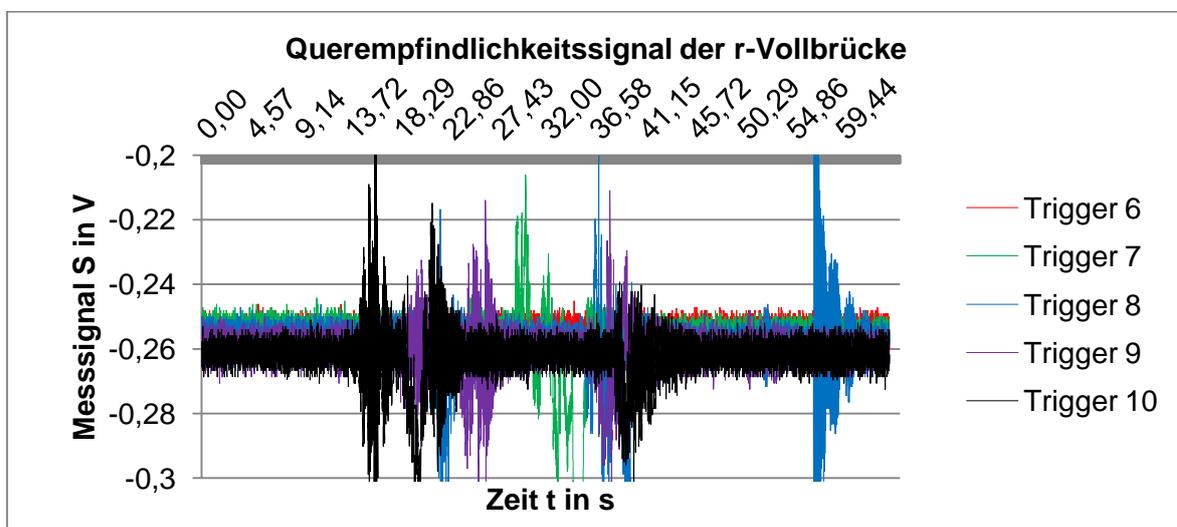


Abb. 30: Signal der Querempfindlichkeit in der r-Vollbrücke

Gewicht m in der r-Achse in kg	Messsignal Querempfindlichkeit	Moment durch Querempfindlichkeit M_{rz} in Nmm	berechnetes Gesamtmoment M_{gz} in Nmm	gemessenes Moment M_z in Nmm	resultierendes Moment M_{zz} in Nmm	Differenz in %
1.4589	-0.2557	204.0421	2097.3780	2083.8178	2087.4294	0.1730
2.4608	-0.2568	199.6327	3723.5845	3720.3631	3723.5845	0.0865
3.4642	-0.2582	193.4229	5359.4396	5366.6981	5359.4396	-0.1354
4.4658	-0.2587	191.2612	6991.3787	7010.2704	6991.3787	-0.2702
5.4678	-0.2599	186.4227	8623.6965	8646.6697	8623.6965	-0.2664
6.4718	-0.2605	183.7871	10259.0390	10281.1672	10259.0390	-0.2157
7.4738	-0.2609	182.0870	11891.0080	11906.8611	11891.0080	-0.1333
8.4765	-0.2614	179.8356	13524.0633	13528.1214	13524.0633	-0.0300
9.4790	-0.2617	178.7109	15156.7365	15150.4091	15156.7365	0.0417
10.4808	-0.2618	178.0972	16788.2366	16755.8894	16788.2366	0.1927
					Min	-0.2702
					Max	0.1927
					Delta	0.4629

Tabelle 23: Querempfindlichkeit der z-Vollbrücke

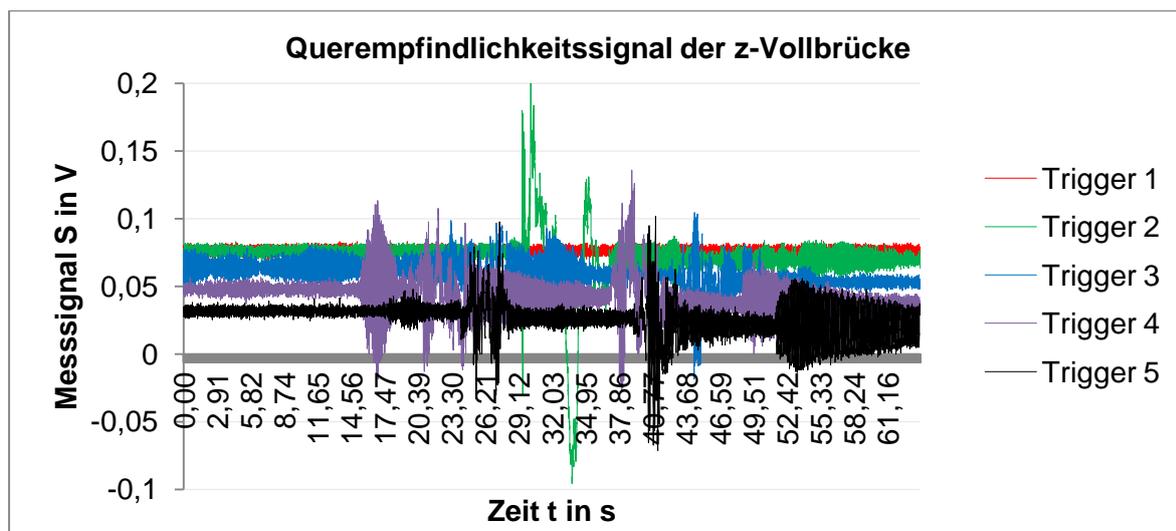


Abb. 31: Signal der Querempfindlichkeit in der z-Vollbrücke

Aus den Ergebnissen von Tabelle 23 und Tabelle 22 ergibt sich schließlich, dass der gemittelte relative Fehler durch die Querempfindlichkeit nicht mehr als ca. $\pm 0,3\%$ beträgt. Zur Sicherheit wird der relative Fehler mit $\pm 0,5\%$ angegeben. Dabei ist darauf zu achten, dass dieser Fehler an der r-Vollbrücke durch die Kraft an der z-Achse und umgekehrt zu berechnen ist.

5.4.3. Kennwerte des Messsystems

Durch die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel lassen sich nun Aussagen über die Kennwerte des Messsystems machen. Betrachtet man die Differenzen der gemessenen Kräfte und der tatsächlichen Kräfte bei der Kalibrierung (Tabelle 20, Tabelle 21), lässt sich erkennen, dass bei allen Messungen ein absoluter Fehler auftritt. Dieser Fehler lässt sich aber bei der Betrachtung der Abb. 32 auf den Bereich $\pm 0,25\text{ N}$ eingrenzen. Dieser absolute Fehler muss bei jeder Messung mit berücksichtigt werden. Des Weiteren

entsteht, wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt, durch die Querbeanspruchung ein relativer Fehler. Dieser beträgt in beiden Messrichtungen $\pm 0,5\%$.

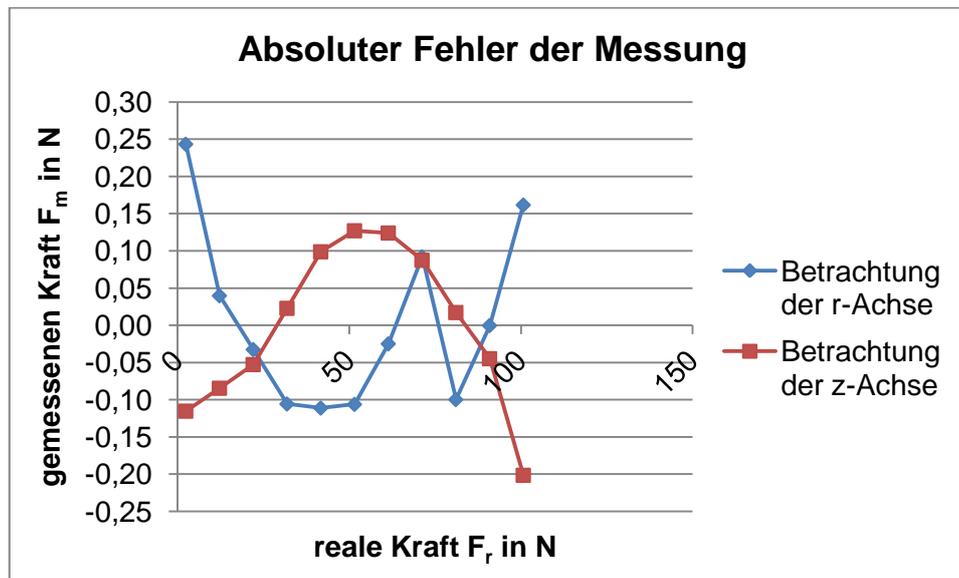


Abb. 32: Darstellung des absoluten Fehlers bei der Kalibration

Durch die Formeln (36) und (37) ergeben sich für die Kräfte folgende Zusammenhänge:

$$F_r = \frac{2713,9942 \cdot x_r + 173,9811}{l_r} \pm (0,25 \text{ N} + 0,5\% \cdot F_z) \quad (38)$$

und

$$F_z = \frac{4247,3447 \cdot x_z - 1122,8581}{l_z} \pm (0,25 \text{ N} + 0,5\% \cdot F_r). \quad (39)$$

Die Parameter x_r und x_z sind dabei die jeweiligen Messsignale. In der nachfolgenden Tabelle sind die Kennwerte des Messsystems noch einmal zusammengefasst dargestellt.

Kenndaten Messsystem	
Bauart	Biegebalken
Messart	Biegung
Nennkraft (F_r , F_z)	$\pm 150 \text{ N}$
Max. zul. Kraft	$\pm 230 \text{ N}$
Absoluter Fehler	$\pm 0,25 \text{ N}$
Relativer Fehler	$\pm 0,5\%$ vom Messwert
Material	AlCu4PbMgMn
Gewicht Sensor	Ca. 3,8 kg
Brückenwiderstand	700 Ω

Tabelle 24: Kennwerte des Messsystems

Bei der Auswertung der Messergebnisse ist darauf zu achten, dass das Eigengewicht des Federbalkens und des Messobjektes auch ein Messsignal erzeugen. Für die Betrachtung der einwirkenden Kraft auf das Messobjekt müssen die Eigengewichte abgezogen werden. Diese können anhand einer Referenzmessung, also ohne Magnetfeldeinwirkung, ermittelt werden.

6. Gegenüberstellung

In diesem Kapitel sollen die Berechnungen von Quickfield mit den Messergebnissen verglichen werden. Die Messungen werden während eines Sondentestschusses stattfinden. Während Sondentestschüssen findet keine Plasmaentladung statt, wodurch auch kein Plasmastrom, welcher ein Magnetfeld erzeugen würde, fließen kann. Sondentestschuss beschreibt eine Testsequenz, in welcher am ASDEX Upgrade einzelne Spulen zu unterschiedlichen Zeitpunkten von einem definierten Strom durchflossen werden. Diese definierten Ströme sind bekannt und können in die FEM-Berechnung übertragen werden.

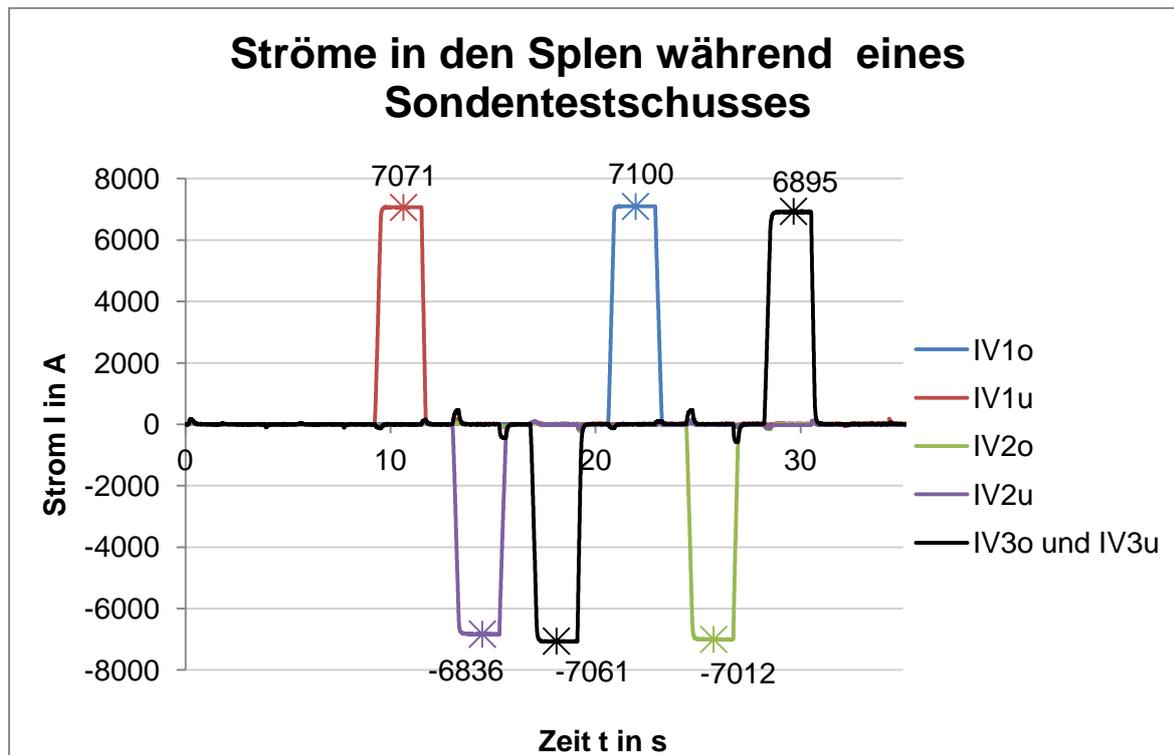


Abb. 33: Ströme während eines Sondentestschusses in den unterschiedlichen Spulen

Für die 6 Fälle, wie sie in Abb. 33 dargestellt sind, sollen nun die Kräfte auf einen Weicheisenkörper, welcher sich in einer definierten Position befindet, mit Quickfield berechnet werden. Anschließend finden die Messung für dieselben 6 Fälle statt.

Das Messobjekt ist eine runde Weicheisenkugel aus Armco-Stahl mit einem Durchmesser von 100 mm. Der Ort des Messobjektes ist ebenfalls festgelegt. Dieser befindet sich bei $r = 4,0 \text{ m}$ und $z = 0,96 \text{ m}$. Die Position für z muss dabei ermittelt werden. Dazu wird zu der z -Koordinate der Montageplattform, welche $z = 1,01 \text{ m}$ beträgt, die Höhe der Montageschienen mit $z = 0,04 \text{ m}$ und die Höhe des Sensors mit $z = 0,09 \text{ m}$ berücksichtigt. Bei der Höhe des Sensors handelt es sich um den Abstand der Unterseite von der Grundplatte zur Messebene. Für diesen Ort, an welchem sich das Messobjekt befindet, findet auch die FEM-Berechnung statt.

6.1. FEM-Berechnung Sondentestschuss

Bei der Einbindung der Ströme aus Abb. 33 in Quickfield ist erneut die Anzahl der Amperewindungen zu beachten. Diese sind notwendig, damit Quickfield das Magnetfeld korrekt berechnen kann. Die anliegenden Ströme an den Spulen müssen dafür mit der

Wicklungszahl multipliziert werden. Die Wicklungszahlen sind in Tabelle 2 bereits aufgelistet und so wiederzuverwenden.

Die Berechnung der Kraft findet auf dieselbe Art statt wie in Kapitel 3. beschrieben. Die von Quickfield berechneten Parameter werden in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportiert. Anschließend wird die Kraft mit dem Maxwelltensor berechnet. Wie auch im dritten Kapitel wird der eingezeichnete Kreis, welcher das Messobjekt darstellt, in der 2D-Skizze virtuell von Quickfield um die Rotationsachse gedreht. Daher muss von dem entstehenden Torusvolumen V_T auf das Kugelvolumen V_K gerechnet werden. Mit dem Verhältnis der beiden Volumina zueinander kann auch die Kraft auf das Kugelvolumen bestimmt werden (3.5.1. Einzelne Spule als Magnetfeldquelle).

Spule	Spulenstrom I in A	Amperewindungen I in A	Korrekturwert durch Volumenunterschied	Kraft F_z in N in Quickfield	Kraft F_r in N in Quickfield	Korrigierte Gesamtkraft in N
Abstand r = 4 m						
IV1o	7100	660300	0,002649711	0,0149	-0,0530	0,0550
IV1u	7071	657603		-0,0098	-0,0108	0,0145
IV2o	-7012	-603032		1,8343	-3,6092	4,0486
IV2u	-6836	-587896		-0,2340	-0,1653	0,2864
IV3o	-7061	-197708		-3,4698	-10,0436	10,6261
IV3u				6895	193060	-3,3086
IV3o						
IV3u						
Abstand r = 3.64 m						
IV1o	7100	660300	0,002903781	0,0317	-0,0971	0,1021
IV1u	7071	657603		0,0038	-0,0022	0,0044
IV2o	-7012	-603032		6,8527	-8,2461	10,7218
IV2u	-6836	-587896		-0,3485	-0,1907	0,3973
IV3o	-7061	-197708		-68,6063	-22,8829	72,3218
IV3u				6895	193060	-65,4170
IV3o						
IV3u						

Tabelle 25: Kraft auf Weicheisen während eines Sondentestschusses

Aus den Berechnungen in Tabelle 25 ist zu erkennen, dass der Einfluss mancher Spulen nur sehr gering ist. Dies ist auf die unterschiedlichen Entfernungen der Spulen zum Messobjekt zurückzuführen.

Die Spulen IV3o und IV3u werden gleichzeitig von einem identischen Strom durchflossen. Dabei ist der Strom einmal positiv und einmal negativ. Aus der Tabelle 25 kann man jedoch lesen, dass die Kräfte trotzdem in beiden Fällen negativ und fast identisch sind. Dies ist darauf zurückzuführen dass die Kraft immer entlang des Gradienten wirkt. Der Gradient der Magnetfeldlinien wirkt unabhängig von der Stromrichtung senkrecht zu den Magnetfeldlinien. Daraus lässt sich folgern, dass die Kraftwirkung des Magnetfeldes nur auf den Betrag der Spulenströme zurückzuführen ist und nicht auf deren Richtung.

6.2. Messung beim Sondentestschuss

Für diese Messung wird der Sensor, mit der Kugel aus Armco-Stahl als Messobjekt, an dem vorher definierten Ort positioniert. Für die Auswertung der Messergebnisse müssen die Eigengewichte der Kugel und des Federkörpers berücksichtigt werden, da diese auch ein Messsignal verursachen.

Die Messergebnisse werden dann in die Formeln (38) und (39) eingesetzt. Die Hebellänge ergibt sich wie schon zuvor ermittelt (5.4.2.2. Aktive Kalibrierung) zu $l_H = 159,21 \text{ mm}$ für die z-Achse und zu $l_H = 110,58 \text{ mm}$ für die r-Achse.

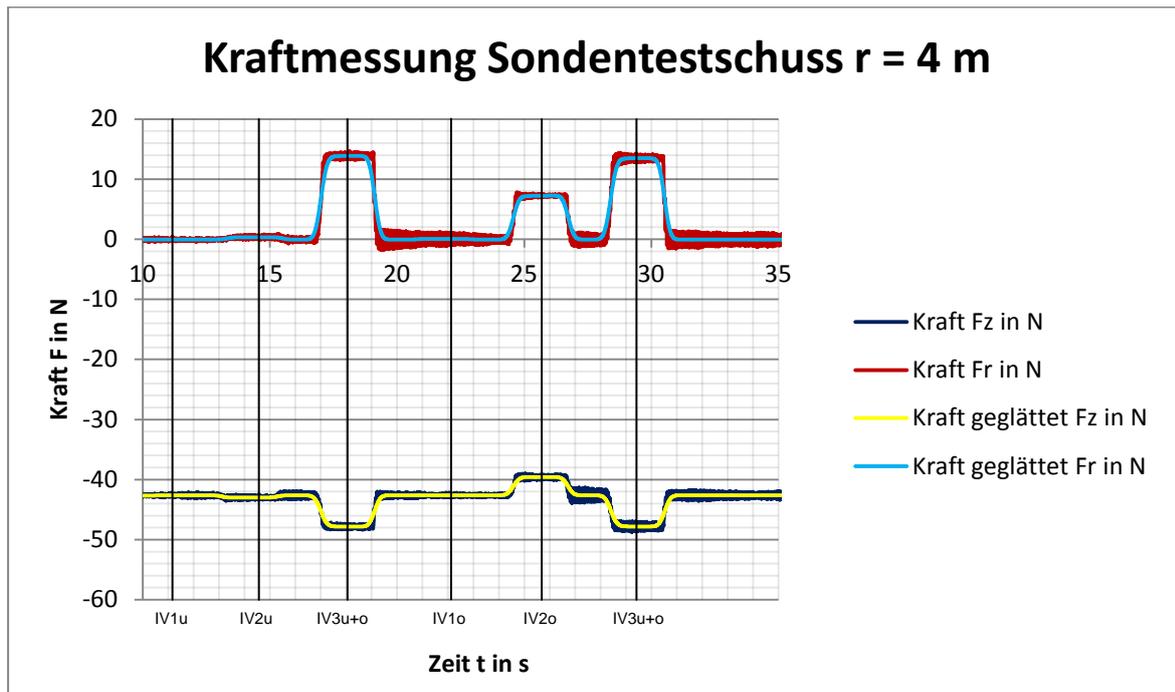


Abb. 34: Kraftmessung während eines Sondentestschusses bei $r = 4 \text{ m}$

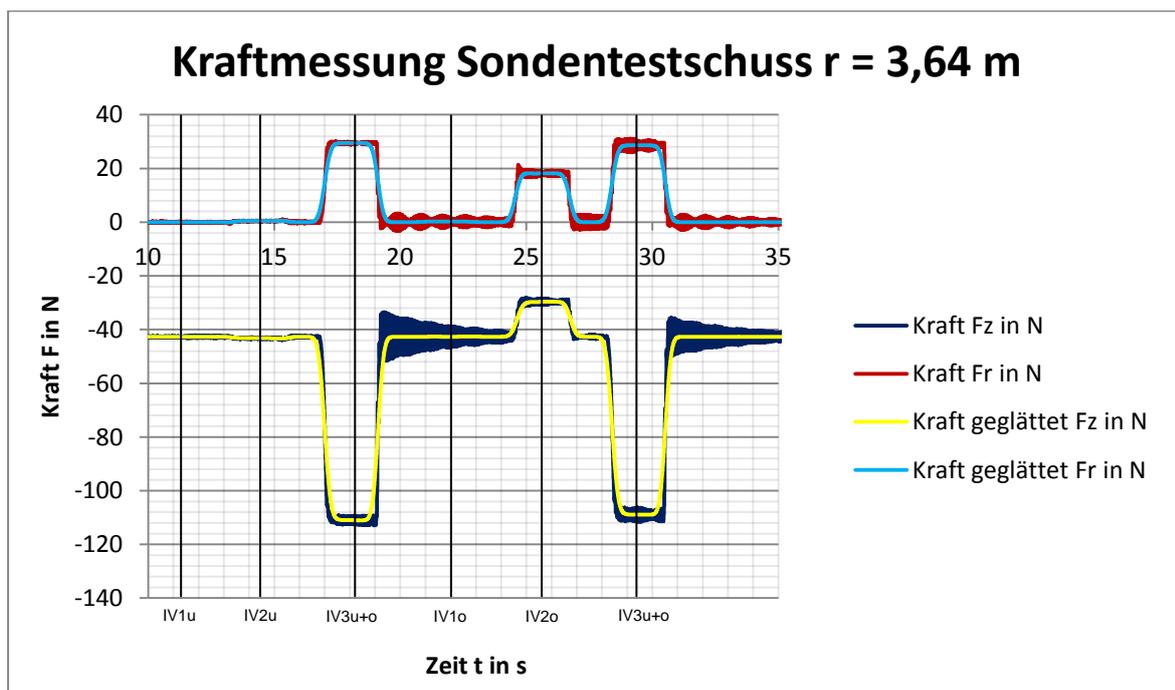


Abb. 35: Kraftmessung während eines Sondentestschusses bei $r = 3,64 \text{ m}$

Die Messsignale werden wie schon im Kapitel 5 mit dem Programm Osiris aus dem Speicherarchiv ausgelesen. Diese Software zeigt sodann den Verlauf der Messsignale über die Zeit aufgetragen. Anschließend speichert Osiris die Messdaten als ASCII-Code auf dem gewünschten Laufwerk ab. Von dort aus können die Daten dann in einem beliebigen Programm weiterverarbeitet werden.

Wie an Abb. 34 und Abb. 35 zu erkennen ist, liegt an den Messsignalen ein Grundrauschen an. Außerdem findet ein Einschwingvorgang des Systems statt, sobald die Kraftwirkung aufgehoben ist. Da diese Störsignale für die Auswertung uninteressant sind, sollen die Messsignale geglättet werden. Dazu bietet Osiris ein Glättungstool an, die sich die Gaußglättung zu Nutze macht. Die Daten, welchen den Graphen als geglättetes Messsignal darstellen werden von Osiris zusammen mit den Originaldaten als ASCII-Code gespeichert. Diese geglätteten Messsignale sind in Abb. 34 und Abb. 35 zu sehen. Dabei wird auch ersichtlich, dass die geglätteten Messwerte einen guten Mittelwert der Originaldaten darstellen.

Wie auch bei der FEM-Berechnung üben nicht alle Magnetfeldspulen eine Kraft auf die Weicheisenkugel aus. Dies ist, wie schon erwähnt, auf die unterschiedlichen Abstände der Spulen zu dem Messobjekt zurückzuführen. Bei der zweiten Messung ist die Auslenkung der z-Komponente deutlich höher als bei der ersten Messung. Dies ist deshalb der Fall, da die Position des Sensors bei der zweiten Messung direkt über dem IV3o Magneten lag. Darum stiegen nicht alle Kräfte proportional zueinander.

7. Diskussion

Die Ausschläge der Messsignale während der Messungen sind immer für die Zeiträume in denen ein Strom an einer Spule anliegt konstant. Daraus lässt sich schließen, dass es sich auf jeden Fall um ein Messsignal durch Verformung des Federkörpers handelt. Würde es sich um ein in den Messgittern der DMS induziertes Messsignal handeln, so würde das Messsignal nur so lange ansteigen, wie auch der Strom ansteigt. In dem Moment in dem sich der anliegende Strom nicht mehr verändert, würde auch das induzierte Messsignal verschwinden.

Da dies aber nicht der Fall ist und solch ein Verhalten in den Messsignalen auch nicht zu erkennen ist, ist davon auszugehen dass das Magnetfeld keinen Einfluss auf das elektronische Messsignal hat. Die gewünschte Funktion der magnetfeldbereinigten Dehnungsmessstreifen wurde somit bestätigt.

Für einen Vergleich der FEM-Berechnung und der Messung muss bei der Messung das Eigengewicht von Kugel, Verbindungsschraube und Federkörper berücksichtigt werden. Diese Eigengewichte sind in den Abb. 34 und Abb. 35 an den Signalen am Anfang und am Ende der Messreihen zu erkennen. Mit der Kugel von 4,1 kg, der Verbindungsschraube von 0,01 kg und dem Federkörper von 0,23 kg entsteht ein Gesamtgewicht von 4,34 kg, also eine Kraft von 42,58 N. Diese Kraft trifft auf das Messsignal zu und bestätigt damit die korrekte Funktion des Kraftsensors.

Zieht man nun diese Kraft von dem Messsignal in der z-Achse ab, so ergibt sich die Kraftdifferenz, welche durch das Magnetfeld erzeugt wurde. Dabei sind die Ergebnisse aus FEM-Berechnung und Messung weitestgehend vergleichbar. Ein Unterschied von max. ± 10 N sind erkennbar. Die Vorzeichenunterschiede sind lediglich auf die unterschiedliche Anordnung des Koordinatensystems in Quickfield und Messung zurückzuführen.

Generell lässt sich feststellen, dass bei der Berechnung mit dem Programm Quickfield alle Kräfte zu klein sind. Daher sind diese Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten. Für eine erste Berechnung der Kräfte auf Weicheisenabschirmung und für eine grobe Abschätzung der Dimensionen der Kräfte kann diese Programm jedoch ohne Einschränkungen empfohlen werden.

Generell müssen die Kräfte auf Weicheisenabschirmungen, die durch das Magnetfeld des ASDEX Upgrade verursacht werden, bei der Auslegung der Abschirmungen berücksichtigt werden. Dabei ist der Abstand der Abschirmung zum Zentrum des ASDEX Upgrade ausschlaggebend. Es ist sowohl in der FEM-Berechnung als auch in der Messung ein signifikanter Anstieg der Kräfte sichtbar, wenn sich dem Zentrum angenähert wird. Dabei führen schon kleine Wegunterschiede von nur 300 mm zu einer deutlichen Kraftsteigerung. Auf der anderen Seite führt ein schneller Abfall der Magnetkräfte auch zu sehr geringen Kräften auf die Weicheisenabschirmung im weiten Außenbereich von $r > 6$ m. Da die Kraft auf die Abschirmungen vom Stoffvolumen abhängig ist, kann auf große Abschirmung trotzdem auch in diesen Außengebieten eine große Kraft wirken.

Wenn die Ergebnisse aus der FEM-Berechnung verwendet werden, ist eine Sicherheit von 2 empfehlenswert. Die Berechnung sollte auch für die Maximalströme stattfinden.

Die Betrachtungen mit der mathematischen Analyse und der FEM-Berechnung einer einzelnen Spule als Magnetfeldquelle sind jedoch absolut überproportioniert. Diese Ergebnisse stehen nicht im Verhältnis zu der tatsächlich wirkenden Kraft am ASDEX Upgrade.

7.1. Ausblick

Nachdem die Kräfte auf einen exemplarischen Weicheisenkörper während eines Sondentestschusses ermittelt wurden, könnten in Zukunft auch Messungen während regulären Plasmaentladungen stattfinden. Durch das Zusammenspiel aller Magnetspulen und durch das Auftreten des Plasmastroms, entstehen eventuell andere Ergebnisse als bei den Sensortestschüssen. Auch das dynamische Verhalten während einer Plasmaentladung wurde noch nicht untersucht. So könnten zum Beispiel Schwingungen durch dieses dynamische Verhalten auftreten, welche die Beanspruchungen auf die Abschirmungen noch einmal erhöhen.

Da das Magnetfeld des ASDEX Upgrade einer kontinuierlichen Regelung unterliegt, verändert sich dieses auch ständig. Solche veränderlichen Magnetfelder erzeugen in ferromagnetischen Körpern Energie. Kann nun diese Energie, die zum Beispiel in Weicheisenabschirmungen erzeugt wird, nicht abfließen, so erwärmen sich diese. Um welchen Betrag die Erwärmungen stattfinden wurde bisher noch nicht ermittelt. Bei einer zu großen Temperaturerhöhung kann es unter Umständen zu Beschädigungen an Sensorik kommen.

Zwar ist bei kurzen Plasmaentladungen von 10 Sekunden, wie sie am ASDEX Upgrade der Fall sind, nicht von solchen Temperatursteigerungen in den Abschirmung auszugehen. Jedoch kann an zukünftigen Großanlagen eine deutlich längere Brenndauer des Plasmas erreicht werden, wodurch sich wiederum die Abschirmungen um einen größeren Betrag erwärmen würden.

Der Einfluss eines Moments, welches durch das Magnetfeld auf Weicheisenabschirmungen wirkt, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Längliche, ferromagnetische Stoffe versuchen sich immer entlang der Feldlinien auszurichten. Dadurch entstehen Momente an länglichen Weicheisenabschirmung. Solche längliche Abschirmboxen befinden sich im Außenbereich des ASDEX Upgrade und somit in dem Einflussbereich dessen Magnetfeld. Da diese Abschirmung teilweise sehr große Abmessungen besitzen (1000 x 500 x 500 mm), können die auftretenden Momente eine große Auswirkung auf diese Abschirmungen haben. Für eine präzise Auslegung der Abschirmboxen müssen diese Momente bekannt sein. Die Ermittlung dieser Momente mit einer eventuell praktischen Messung könnte in Zukunft notwendig werden.

8. Quellen

- [1]. **Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.** Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. [Online] 17. August 2011. [Zitat vom: 12. Dezember 2011.] <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/asdex/ziele/index.html>.
- [2]. —. *Berichte aus der Forschung Teil 2.* Garching und Greifswald : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2002.
- [3]. **Bundesministerium für Bildung und Forschung.** Bundesministerium für Bildung und Forschung. [Online] 01. 03 2011. [Zitat vom: 07. 11 2011.] <http://www.bmbf.de/de/2270.php>.
- [4]. **Köppendorfer.** *Abschätzung über Kräfte auf Eisenkörper im Streufeld des Poloidalfeldes.* Garching bei München : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 1991.
- [5]. **Nethe, Arnim und Stahlmann, Hans-Dietrich.** *Einführung in die Feldtheorie.* Berlin : Dr. Köster, 2003.
- [6]. **Stratton, Julius Adams.** *Electromagnetic Theory.* New York and London : McGraw-Hill Book Company, 1941.
- [7]. **Rikitake, Tsuneji.** *Magnetic and electromagnetic shielding.* Tokyo : Terra Scientific Publishing Company, 1921.
- [8]. **Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.** *Ringbuch.* Garching bei München : s.n., 2000.
- [9]. **Becker, Richard und Sauter, Fritz.** *Theorie der Elektrizität.* Stuttgart : Teubner, 1969.
- [10]. **Polytec GmbH Waldbronn.** Polytec. [Online] 2011. [Zitat vom: 24. Oktober 2011.] <http://www.polytec.com/de/loesungen/schwingungen-messen/grundlagen-der-vibrometrie/>.
- [11]. **Gohlke, Werner.** *Einführung in die piezoelektrische Messtechnik.* Leipzig : Geest & Portig K.-G., 1959.
- [12]. **Bonfig, Karl Walter.** *Technische Druck- und Kraftmessung.* Renningen-Malmsheim : expert-Verlag, 1995.
- [13]. **Weber, Manfred.** Metra Mess- und Frequenztechnik. [Online] Mai 2011. [Zitat vom: November. 2011 2011.] mmf.de/pdf/an6-messverstaerker.pdf.
- [14]. **Giesecke, Peter.** *Dehnungsmeßstreifentechnik.* Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 1994.
- [15]. **Schaeffler KG.** *Technisches Taschenbuch.* Herzogenaurach : Schaeffler KG, 2002.

[16]. **Urban, Dieter und Mayerl, Jochen.** *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung.* Wiesbaden : VS, 2006.

[17]. **Rill, Georg.** *Technische Mechanik I.* Regensburg : s.n., 2010.

[18]. **Lämmlein, Stephan.** *Messtechnik.* Regensburg : s.n., 2009.

[19]. **Hoffmann, Jörg.** *Taschenbuch der Messtechnik.* Leipzig : Carl Hanser, 2011.

[20]. **Kiencke, Uwe, Eger, Ralf und Kronmüller, Heinz.** *Messtechnik.* Berlin : Springer, 2001.

9. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Stefan Kammerl, dass ich die Grundsätze wissenschaftlichen Arbeitens nach bestem Wissen und Gewissen eingehalten und die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel „Bestimmung der Kräfte auf Weicheisenabschirmungen im magnetischen Feld des ASDEX Upgrade“ selbstständig verfasst habe. Zur Erstellung wurden keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt.

Ort, Datum:

Unterschrift:

10. Danksagung

Ich möchte mich bei allen Kollegen des ASDEX Upgrade für deren Unterstützung bedanken. Besonderer Dank gilt dabei Herrn A. Herrmann für die gute Betreuung, Herrn M. Rott für die Einführung in Quickfield und die zur Verfügung gestellten Beispielprogramme, Herrn M. Ebner, A. Wölz und S. Eder für die Unterstützung bei der Installation des Messsensors, Herrn M. Wolf, Herrn Lindner für die Applizierung der Dehnungsmessstreifen und nicht zuletzt der Werkstatt für die Fertigung der Komponenten für den Sensor.

11. Anhang

Anhang 1:	Datenblatt Armco-Stahl
Anhang 2:	Konstruktionszeichnung Federkörper
Anhang 3:	Konstruktionszeichnung Aufnahme
Anhang 4:	Konstruktionszeichnung Grundplatte
Anhang 5:	Konstruktionszeichnung Rippe
Anhang 6:	Konstruktionszeichnung Verbindungsschraube
Anhang 7:	Konstruktionszeichnung Zusammenbauzeichnung
Anhang 8:	Datenblatt magnetfeldbereinigte Dehnungsmessstreifen
Anhang 9:	Schaltplan DMS
Anhang 10:	Schnitt des ASDEX Upgrade mit Plasma
Anhang 11:	Poloidalpulensystem Datenblatt
Anhang 12:	Ohmheizung (OH-Spule) Datenblatt
Anhang 13:	Aluminium Werkstoff Datenblatt
Anhang 14:	Datenträger