

Forschungszentrum Jülich GmbH					
Berechnungsbericht		E06001-1			
Titel					
Abschätzung der Detektierbarkeit von Defekten in Brennstoffzellen-Stacks mittels Messung der Änderung der magnetischen Flussdichte					
Verteiler					
H. Soltner/ZAT					
Verfasser/Organisationseinheit		Telefon	Fax	E-Mail	Datum
U. Pabst/ZAT		4721	6816	u.pabst@fz-juelich.de	27.11.2006
Zusammenfassung:					
<p>Für die Defektdetektion wird die gesamte Oberfläche des Stacks in einem Abstand von 10 mm mit einem Flussdichtesensor abgetastet. Mit einem einfachen Modell sollte untersucht werden, welche Größe ein Defekt an welcher Position im Stack haben darf, um eine mit dem Sensor messbare Flussdichteänderung von 120 nT (zehnfache Sensorauflösung) zu erzeugen.</p> <p>Bei einem Stack in Form eines Quaders der Größe 300 mm x 300 mm x 500 mm, das in Längsrichtung von einem Strom von 300 A durchflossen wird, muss ein sphärischer Defekt im Bereich der Stack-Mitte einen Radius größer als 20 mm besitzen, um erkannt zu werden. Liegt der Defektmittelpunkt ca. 30 mm unter der Stack-Oberfläche, so ist schon ein Defekt mit Radius größer ca. 6 mm detektierbar.</p>					

1 Aufgabenstellung

Der Querschnitt eines Referenz-Brennstoffzellen-Stacks beträgt 300 mm x 300 mm bei einer Länge von 500 mm. Durch diesen Querschnitt fließt ein im störungsfreien Fall als homogen angenommener Strom von 300 A

Mit diesem Modell soll der Magnetfeld verzerrende Effekt kugelförmiger Defekte im Innern des Brennstoffzellen-Stacks simuliert werden. Dabei werden die Defekte als elektrisch nicht leitend angenommen.

Es ist rechnerisch abzuschätzen, wie groß ein Defekt mindestens sein muss, damit er in der Messfläche noch sicher durch die Magnetfeldsensoren nachgewiesen werden kann. Die Messfläche ist hier die Hüllfläche, die überall einen Abstand von 10 mm von der Stackoberfläche einhält.

Die Nachweisbarkeit gilt als gegeben, wenn ein Defekt zu einer Feldverzerrung vom Zehnfachen der Sensor-Auflösung an irgendeinem Punkt auf der Messfläche führt. Für den gegebenen Sensor bedeutet dies eine Feldverzerrung von mindestens 120 nT (= $1,2 \cdot 10^{-7}$ Tesla).

2 Finite-Elemente-Modell

Für die Geometrie des Brennstoffzellen-Stacks wird ein homogener Quader modelliert. Da für die Berechnung des Magnetfelds außerhalb der Brennstoffzelle auch die Umgebung in einem weiten Bereich mit finiten Elementen vernetzt werden muss, entsteht bei einer geeigneten Elementgröße ein Rechenmodell mit sehr vielen Freiheitsgraden. Zur Verringerung der Modellgröße werden die je nach Lage der untersuchten Defekte innerhalb des Stacks vorliegenden Symmetrien ausgenutzt.

Abbildung 1 zeigt die Stack-Geometrie sowie die drei verschiedenen verwendeten Symmetriemodelle. In Abbildung 2 ist exemplarisch das gesamte Elementnetz des Symmetriemodells für Defekte in Stack-Mitte dargestellt. Innerhalb des Stacks sowie in der näheren Umgebung werden Hexaeder-Elemente mit einer Kantenlänge von 10 mm eingesetzt. Elemente mit größerem Abstand zur Zelle werden zunehmend größer, da hier auch nur sehr geringe Gradienten des Magnetfelds abzubilden sind.

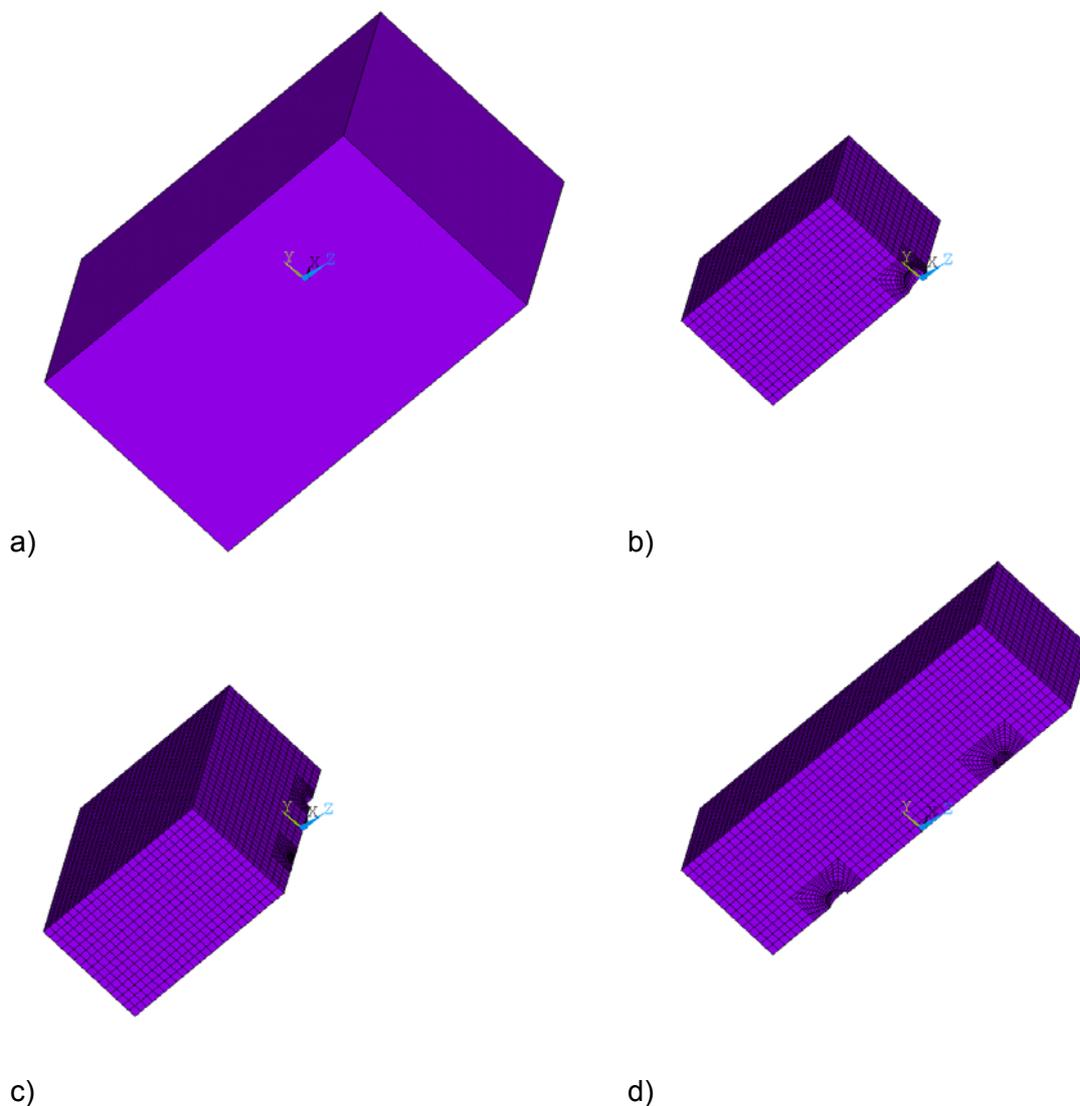


Abbildung 1: Geometrie und Symmetriemodelle der Brennstoffzelle für verschiedene Defektpositionen. a) Brennstoffzelle als Quader 300 mm x 300 mm x 500 mm, b) Elementnetz des Achtelmodells für Defekte in Zellenmitte, c) Elementnetz des Viertelmodells für entlang der x-Achse verschobene Defekte, d) Elementnetz des Viertelmodells für entlang der z-Achse verschobene Defekte.

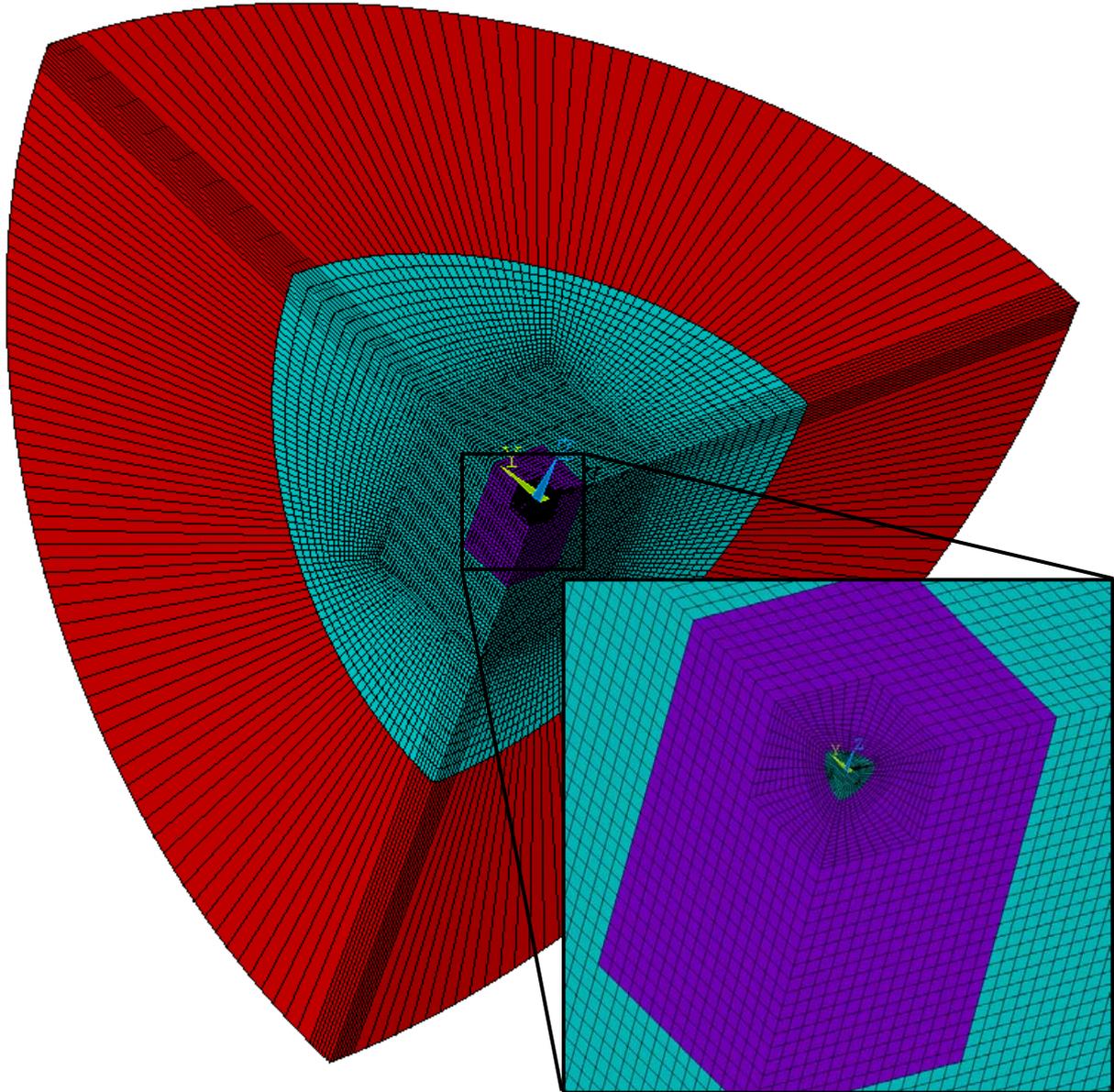


Abbildung 2: Gesamtes Finite-Elemente-Modell für das Achtel-Symmetrie-Modell (Defekt in Stack-Mitte). Violett: Brennstoffzelle, hellblau: umgebende Luft, rot: „Infinity“-Elemente für Übergang des zu berechnenden Magnetfeldes gegen unendlich. (Die Element-Netze für die beiden Viertelmodelle aus Abbildungen 1 c) und 1 d) ergeben sich daraus durch Hinzufügen von an den entsprechenden Symmetrieebenen gespiegelten Netzen.)

3 Berechnungsweg

3.1 Berechnung der Differenzflussdichte

Für die Berechnung der durch einen Defekt erzeugten Änderung der Verteilung der magnetischen Flussdichte wird die Stromdichteverteilung zunächst für den defektfreien Zustand und anschließend für die Brennstoffzelle mit Defekt berechnet. Hierzu werden innerhalb des Brennstoffzellenkörpers finite Elemente für die Berechnung elektrischer Potentiale mit linearer Ansatzfunktion verwendet.

Dazu wird jeweils auf den im jeweiligen Symmetriemodell senkrecht zur Längsachse liegenden Außenflächen auf allen Knoten das Potential gekoppelt, so dass sie ein konstantes Potential erhalten. Auf einer der beiden Flächen (hier bei $z = -250$ mm) wird dann

ein Strom von $I = 300 \text{ A}$ aufgegeben und auf der anderen Fläche das Potential auf Null gesetzt.

Aus den Stromdichteverteilungen für die die beiden Fälle mit und ohne Defekt wird die Verteilung der Differenzstromdichte $\Delta j(x, y, z) = j_{\text{mit Defekt}}(x, y, z) - j_{\text{ohne Defekt}}(x, y, z)$ bestimmt.

Abbildungen 3 und 4 zeigen die Verteilungen der Stromdichte mit Defekt und der Differenzstromdichte in der Querschnittsfläche $y = 0$.

Anschließend wird der Typ der finiten Elemente innerhalb des Brennstoffzellenmodells auf den elektromagnetischen Elementtyp – ebenfalls mit linearer Ansatzfunktion – geändert. Die umgebende Luft wird mit demselben Elementtyp vernetzt; außen herum wird eine Lage von Elementen für die Simulation des Übergangs in die unbegrenzte weitere Umgebung gelegt (siehe Abbildung 2). Mit diesem Elementnetz und der Differenzstromdichte als Eingangsgröße wird die Verteilung der Änderung der magnetischen Flussdichte aufgrund des Defekts berechnet.

3.2 Flussdichtedifferenz

Alternativ wird die Differenz der Flussdichtebeträge mit und ohne Defekt berechnet, indem zuerst die Stromdichteverteilungen mit und ohne Defekt und daraus die zugehörigen Verteilungen der magnetischen Flussdichte ermittelt werden. Anschließend wird die Verteilung der Differenz der Flussdichtebeträge mit und ohne Defekt bestimmt.

Dies entspricht dem Fall, dass in der Messfläche nur die Beträge der Flussdichten gemessen werden und nicht die drei Komponenten des lokalen Flussdichtevektors.

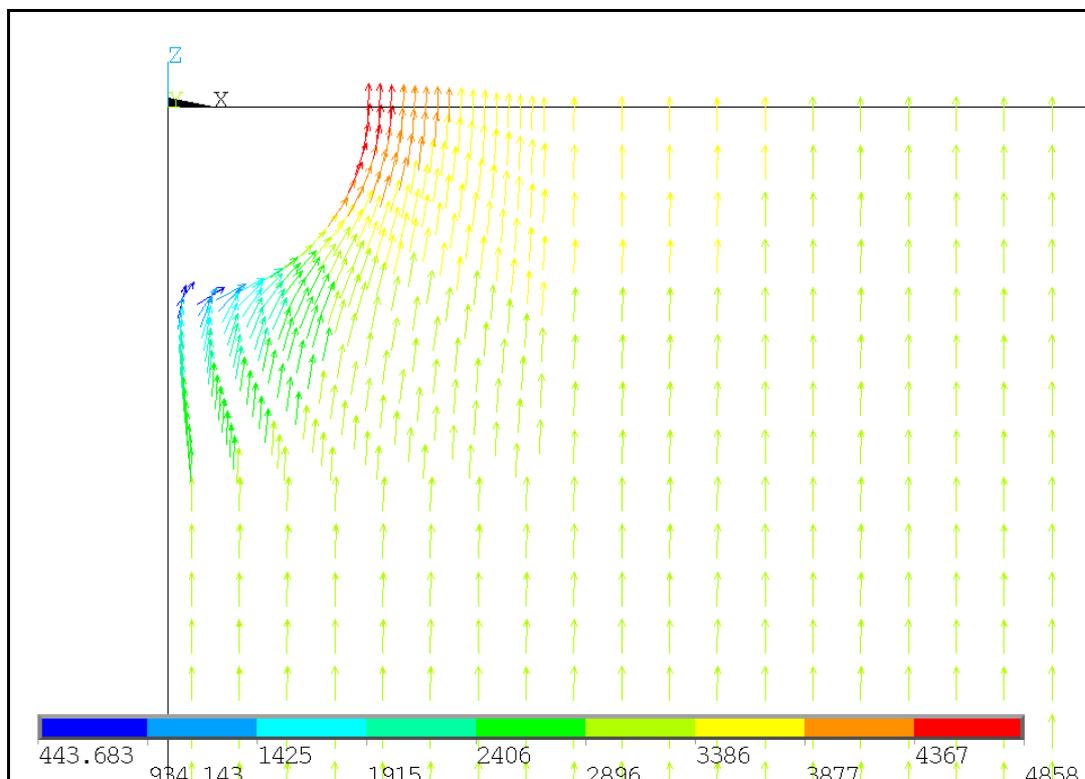


Abbildung 3: Stromdichteverteilung im Bereich des Defekts (Defektradius 21,6 mm, Strom 300 A). Die Stromdichte ohne Defekt beträgt überall in dem Brennstoffzellen-Stack $j_{\text{ohne Defekt}} = 300 \text{ A} / (300^2 \text{ mm}^2) = 3333,3 \text{ A} / \text{m}^2$.

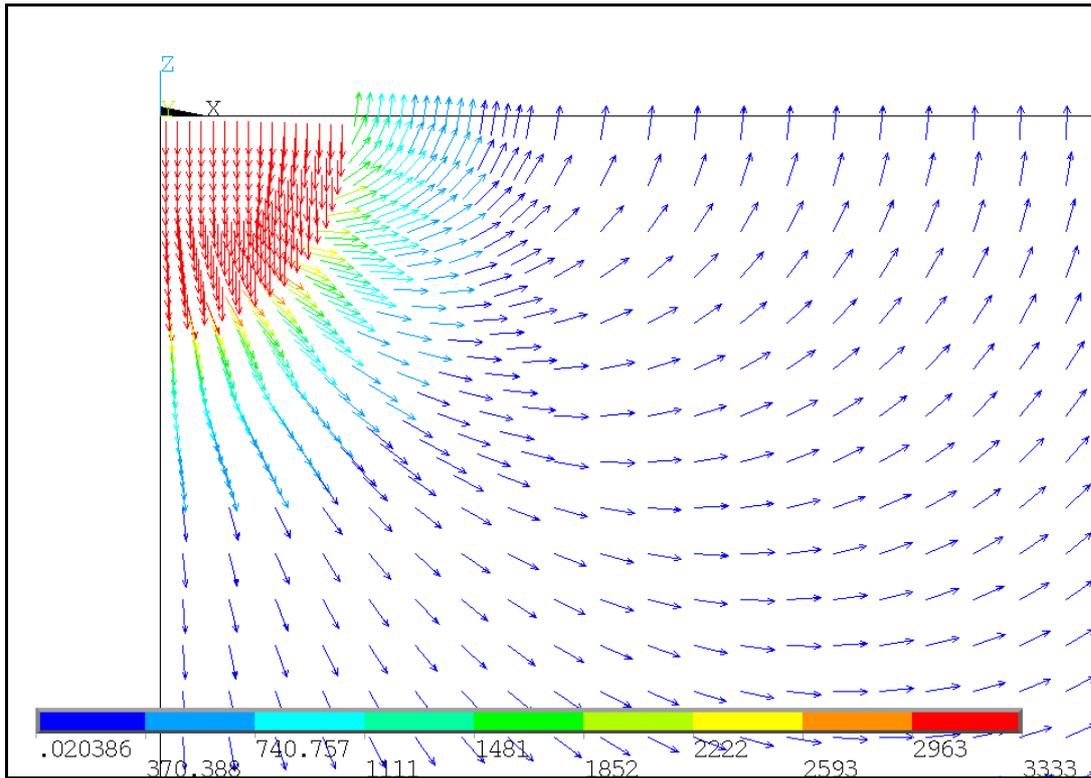


Abbildung 4: Verteilung der Differenzstromdichte im Bereich des Defekts (Defektradius 21,6 mm, Strom 300 A).

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Differenzflussdichte

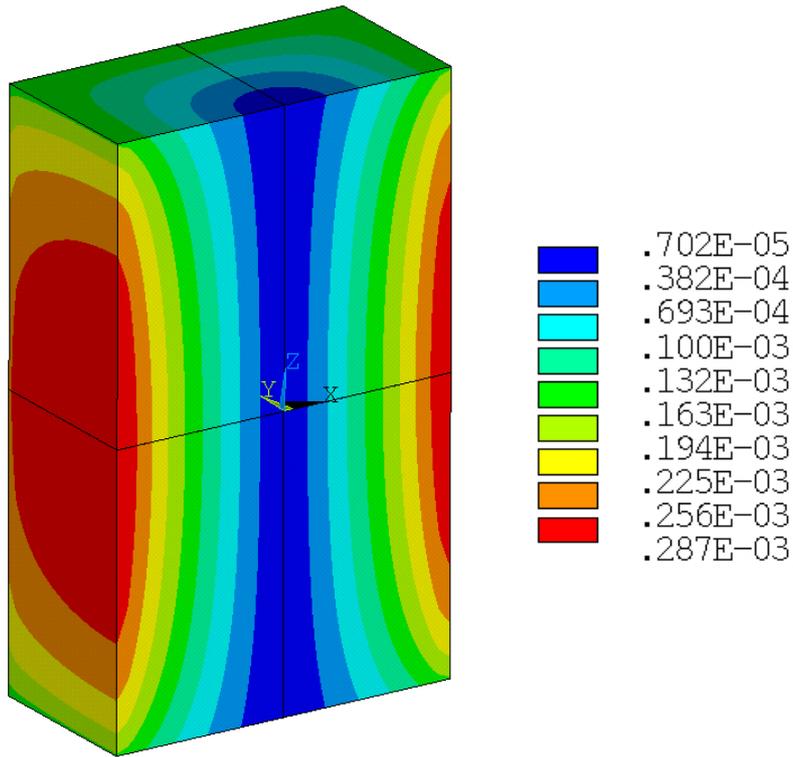
4.1.1 Verteilung der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Differenzflussdichte bei verschiedenen Defektpositionen und -größen

Die Größen aller hier vorgestellten Defekte sind so gewählt, dass bei vorgegebener Position eine maximale Änderung des Betrags der magnetischen Flussdichte von 120 nT innerhalb der Messfläche erzeugt wird (siehe Abschnitt 1).

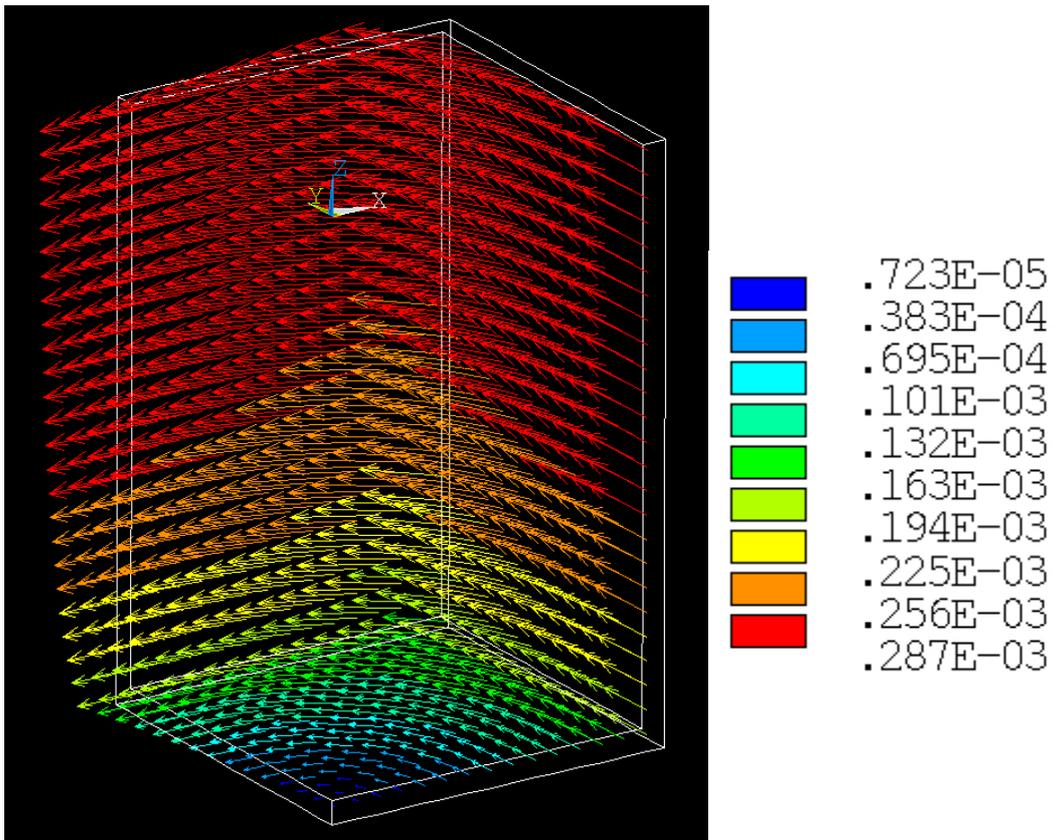
Abbildung 5 zeigt die Flussdichteverteilung in der Brennstoffzelle für den Fall ohne Defekt. In der Messfläche (nicht mit dargestellt) entstehen maximale Flussdichten von knapp $3 \cdot 10^{-4}$ Tesla.

In Abbildung 6 sind die Flussdichteänderungen (Differenz der Flussdichten mit und ohne Defekt) für die Defektpositionen in Zellenmitte sowie 70 mm in x-Richtung und 140 mm in negative z-Richtung verschoben dargestellt. Dabei haben die Defekte jeweils eine Größe, die zu einer maximalen Änderung der Flussdichte von 120 nT in der Messfläche führt. Die gewählte Darstellung mit Flächen gleicher Flussdichte lässt die räumliche Verteilung besonders deutlich erkennen. Abbildung 7 zeigt die Differenzflussdichte in der nächsten Umgebung des mittigen Defekts (vgl. Abb. 6a).

Die Abbildungen 8 bis 10 zeigen die Verteilung der Differenzflussdichte im Bereich der Messebene, d. h. in einem Abstand von 10 mm von der Stack-Oberfläche. Die Messebene ist die Mittelfläche der in Abbildung 8 dargestellten ersten zwei den Stack umgebenden Elementlagen.



a)



b)

Abbildung 5: Verteilung der magnetischen Flussdichte in dem Brennstoffzellen-Stack ohne Defekt; a) Betrag der Flussdichte, b) Vektordarstellung der Flussdichte an der Stack-Oberfläche in einem Symmetriesegment.

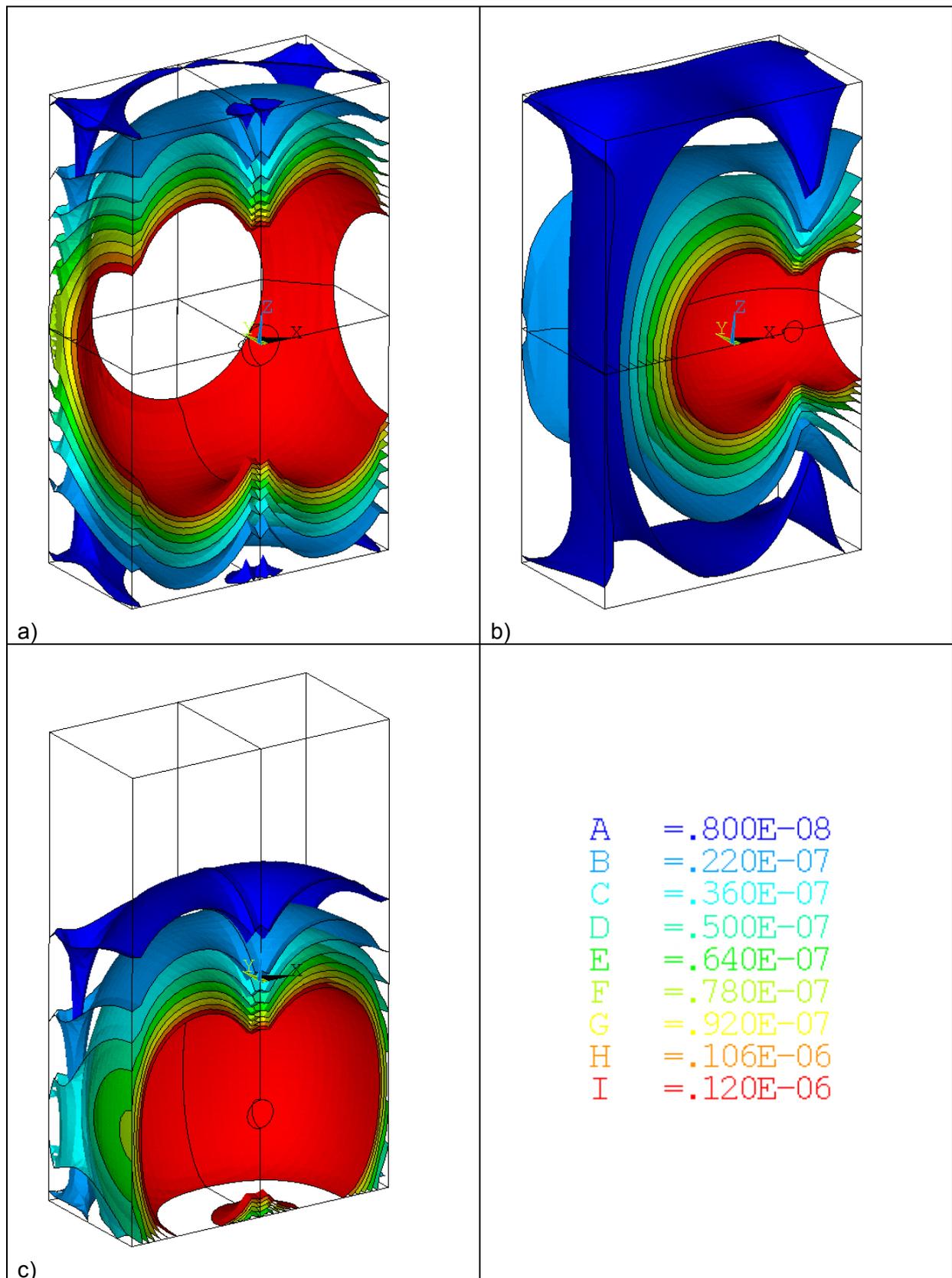


Abbildung 6: Änderung der magnetischen Flussdichte (= Differenzflussdichte, in Tesla); a) Defekt mit Radius 21,6 mm in Stack-Mitte, b) Defekt mit Radius 11,0 mm, 70 mm in x-Richtung verschoben, c) Defekt mit Radius 15,0 mm, 140 mm in negative z-Richtung verschoben.

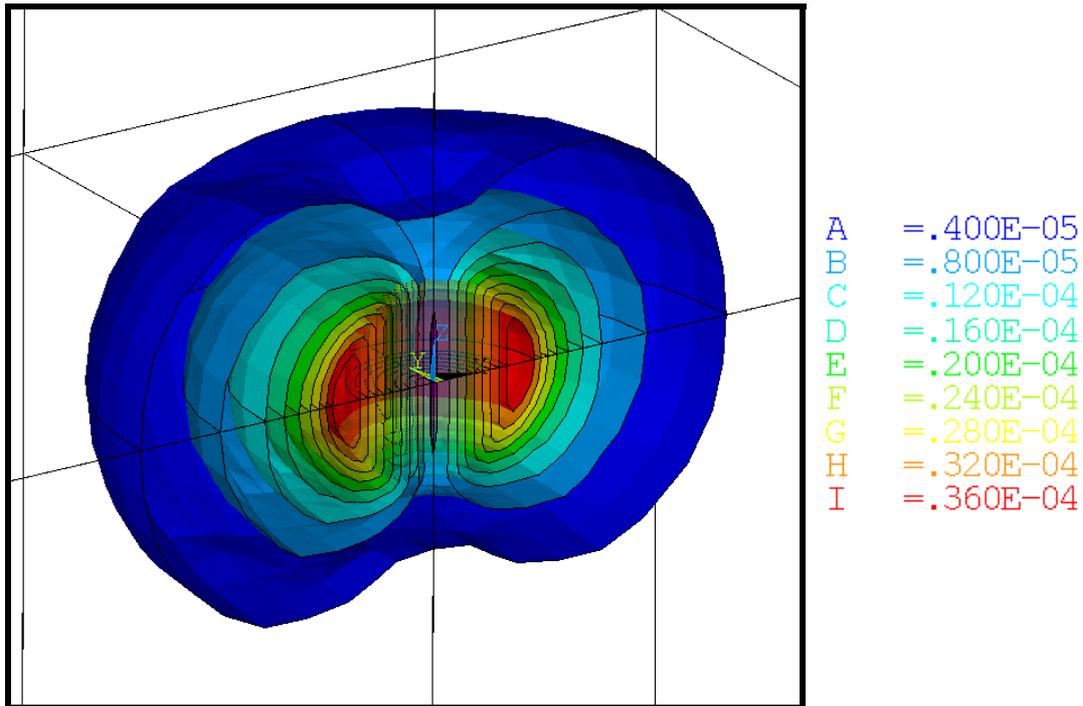


Abbildung 7: Änderung der magnetischen Flussdichte (= Differenzflussdichte, in Tesla); im Bereich des Defekts mit Radius 21,6 mm in Stack-Mitte.

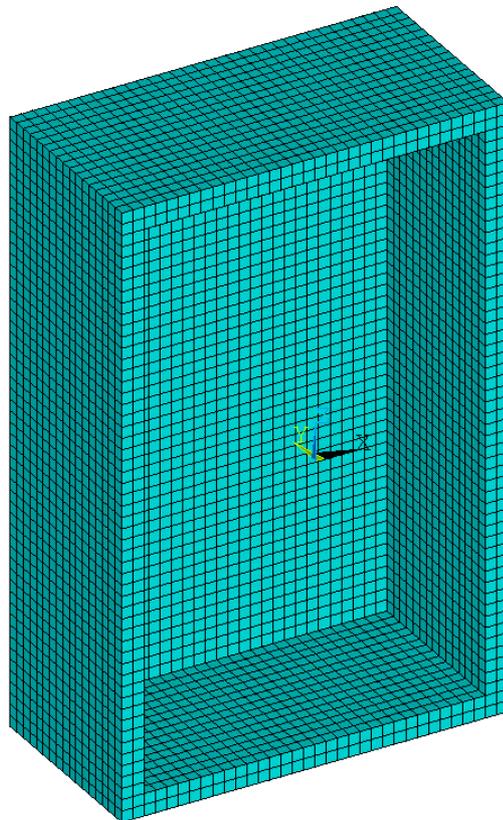


Abbildung 8: Die ersten beiden den Brennstoffzellen-Stack direkt umgebenden Element-Lagen (Elementkantenlänge 10 mm) enthalten die Messfläche als Mittelfläche.

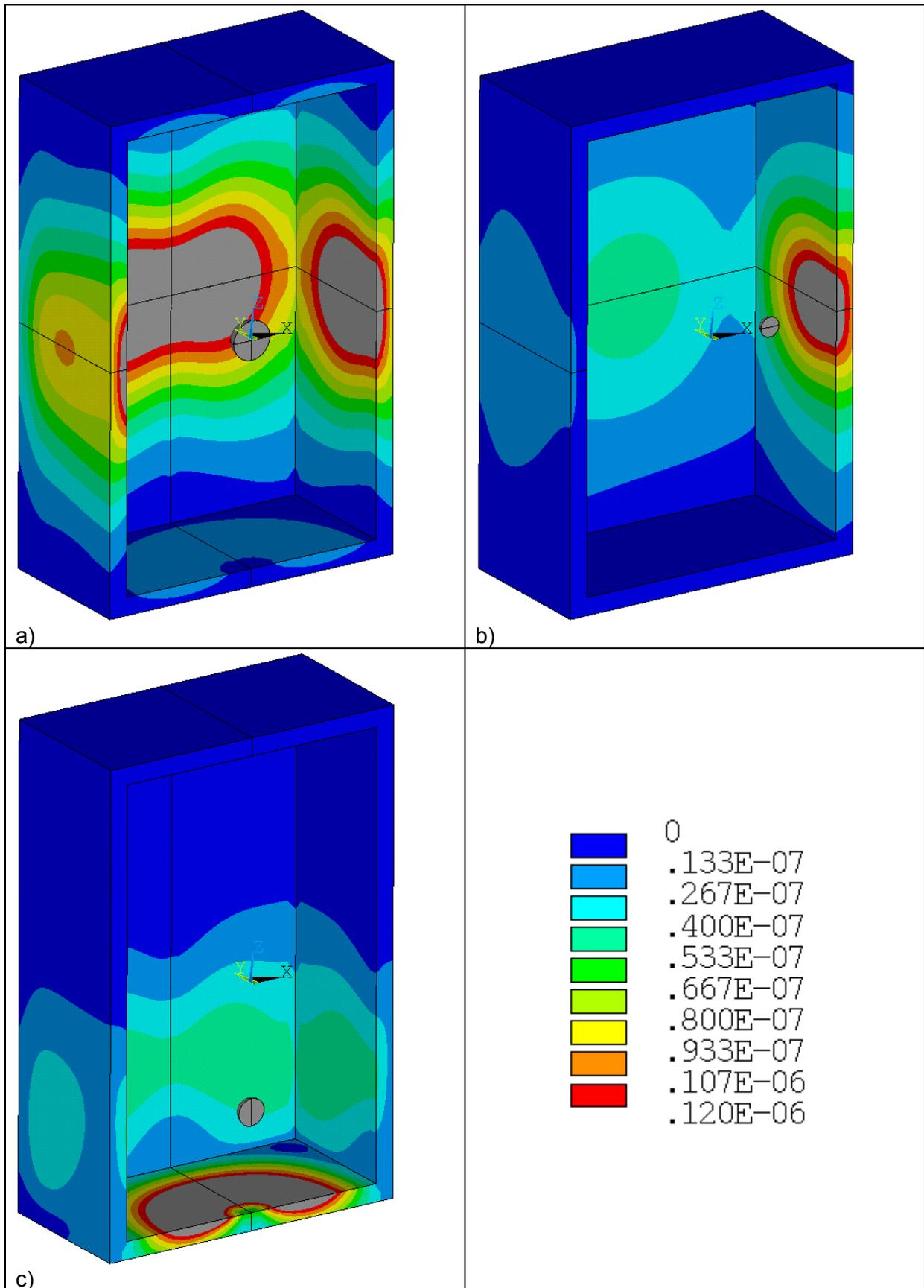


Abbildung 9: Betrag der Änderung der magnetischen Flussdichte (= Differenzflussdichte, in Tesla) im Bereich der Messfläche aufgrund eines Defekts (vgl. Abb. 7); a) Defekt mit Radius 21,6 mm in Stack-Mitte, b) Defekt mit Radius 11,0 mm, 70 mm in x-Richtung verschoben, c) Defekt mit Radius 15,0 mm, 140 mm in negative z-Richtung verschoben.

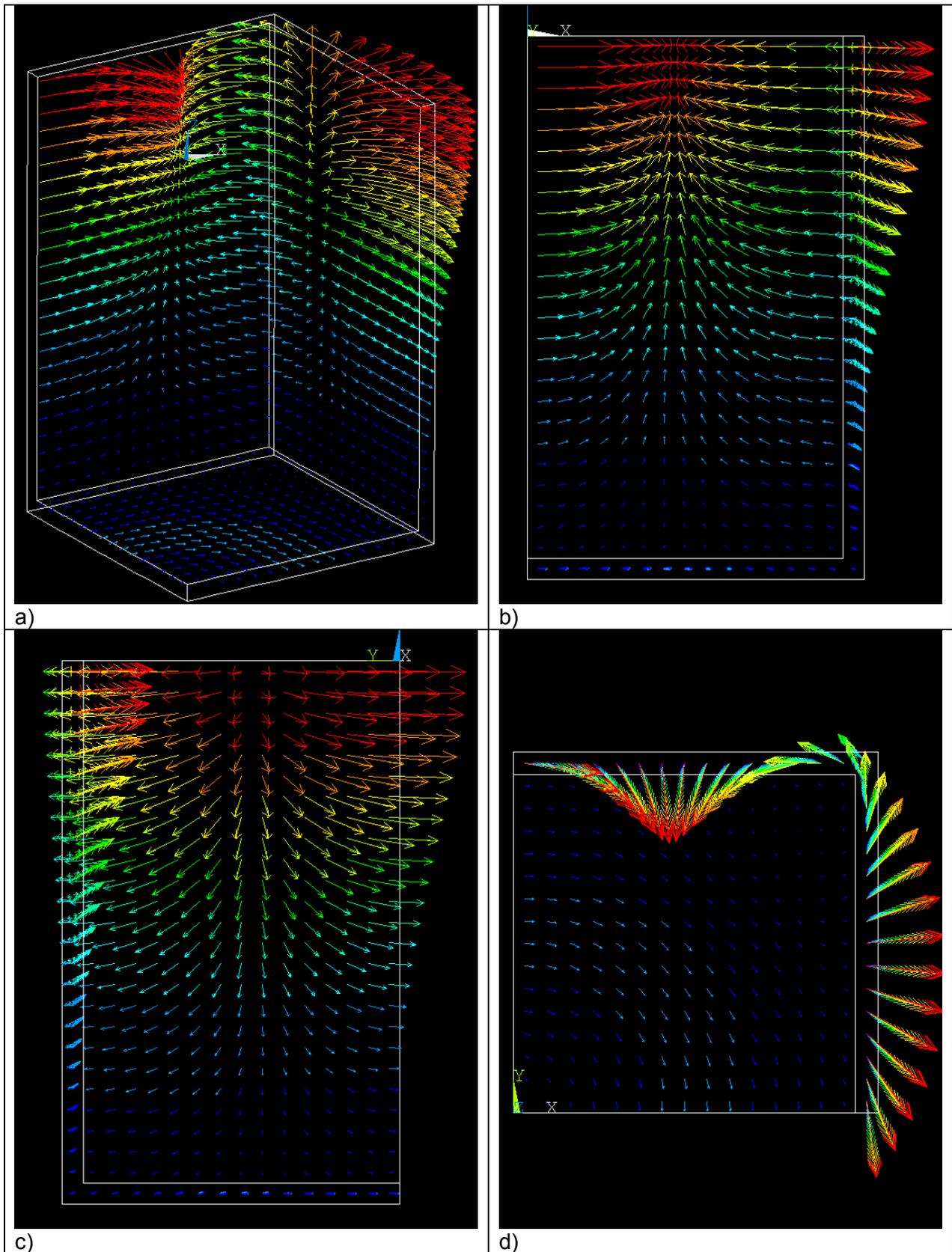


Abbildung 10: Vektordarstellung der Änderung der magnetischen Flussdichte (= Differenzflussdichte, in Tesla) im Bereich der Messfläche aufgrund eines Defekts in Stack-Mitte mit Radius 21,6 mm (vgl. Abb. 6a); a) Schrägansicht eines Achtelsegments des Stacks; außerdem Blick senkrecht auf die b) xz-Ebene, c) yz-Ebene, d) xy-Ebene.

4.1.2 Verlauf der berechneten magnetischen Flussdichten entlang der Zellenlängs- und -querachse bei mittigem Defekt

Abbildung 11 zeigt den Verlauf des Betrags der magnetischen Flussdichte bei einem mittigen Defekt mit Radius 21,6 mm entlang der z-Achse von $z = 0$ mm bis $z = -800$ mm sowie entlang der x-Achse von $x = 0$ bis $x = 800$ mm.

Durch die logarithmische Darstellung ist die Ordnung der Minderung der Feldstärke mit zunehmendem Abstand bei größerer Entfernung von dem Brennstoffzellen-Stack zu erkennen. In der x-Richtung ist diese Ordnung ca. $r^{-1,9}$, in der z-Richtung ca. $r^{-2,4}$.

Abbildung 12 zeigt die analogen Verläufe für die Differenzflussdichte, berechnet mit der Differenzstromdichte entsprechend Abschnitt 3. Die Ordnung der Minderung der Feldstärke mit zunehmendem Abstand bei größerer Entfernung von dem Brennstoffzellen-Stack ist in z-Richtung ca. $r^{-5,25}$.

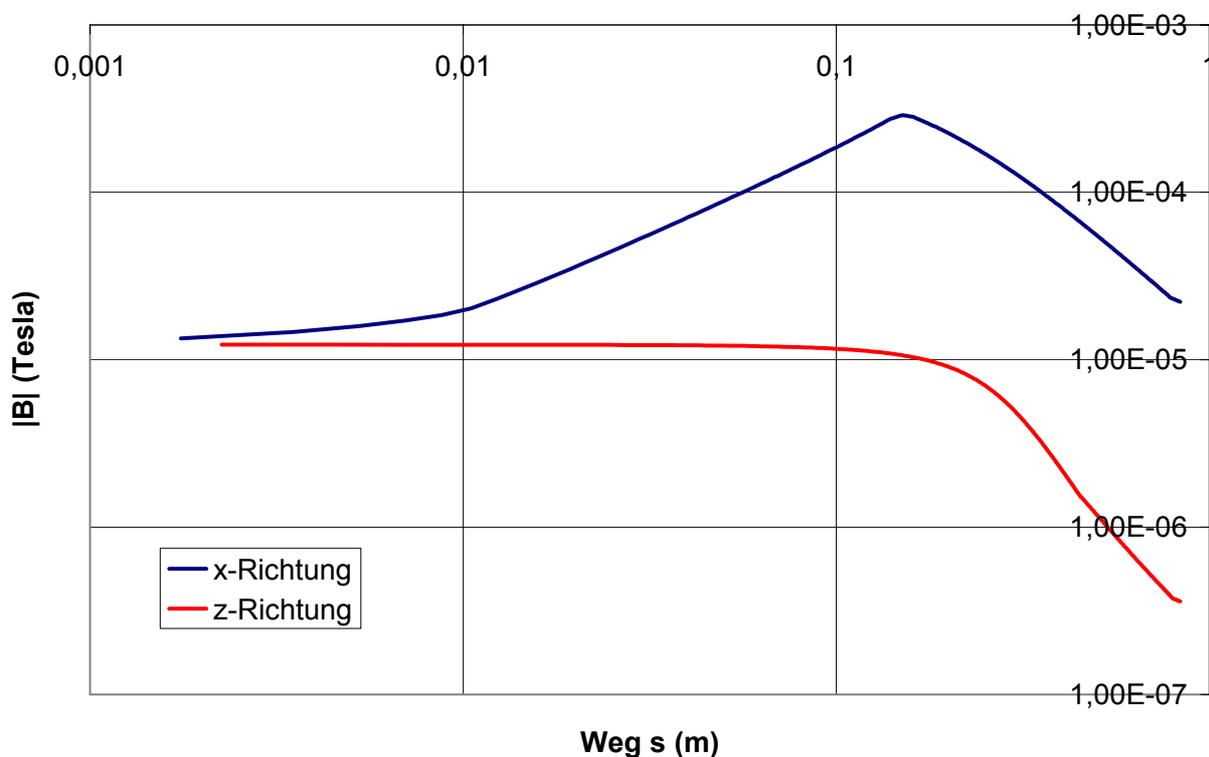


Abbildung 11: Verlauf des Betrags der magnetischen Flussdichte (in Tesla) entlang der x- und der z-Achse ohne Defekt.

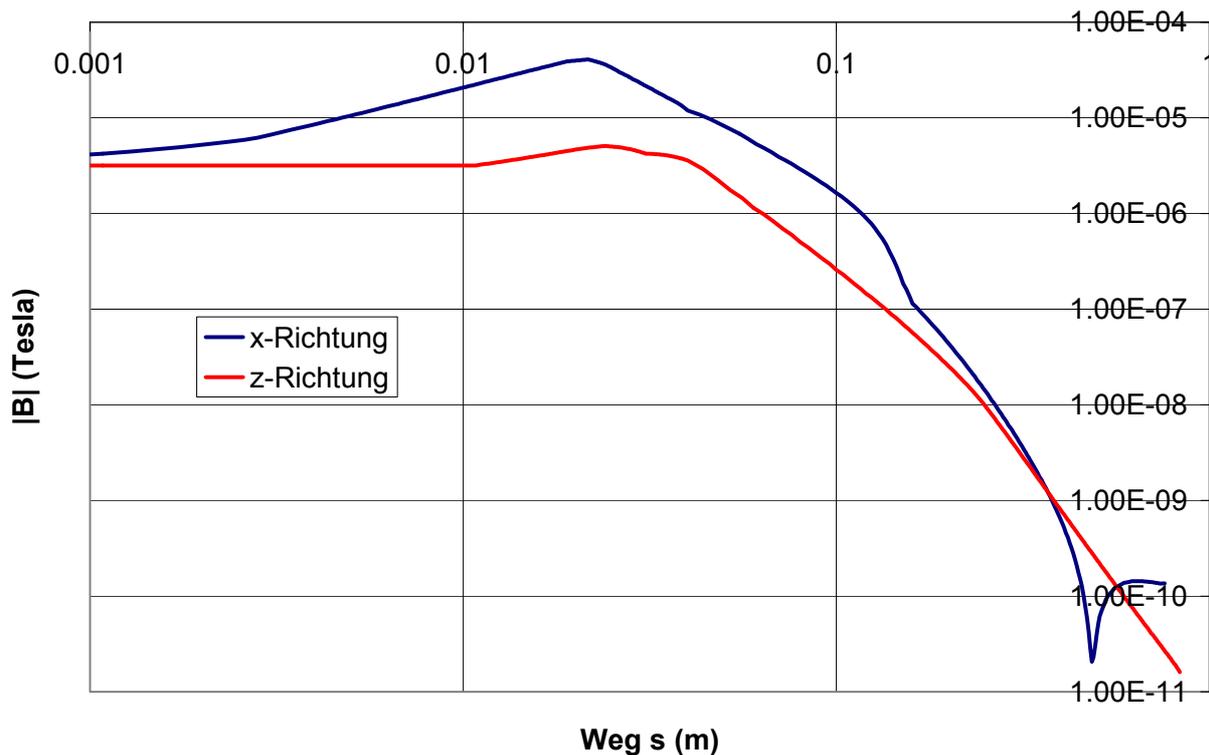


Abbildung 12: Verlauf des Betrags der magnetischen Differenzflussdichte (in Tesla) entlang der x- und der z-Achse bei mittigem Defekt mit Radius 21,6 mm.

4.2 Ergebnisse für die Flussdichtedifferenz

Die Differenz der Beträge der magnetischen Flussdichte mit und ohne Defekt ist eine vorzeichenbehaftete skalare Größe. Die nachfolgenden Abbildungen 13 und 14 geben hiervon einen Eindruck.

In der Messebene entstehen messbare Flussdichtedifferenzen in etwa gleicher Größe wie bei der Auswertung der Differenzflussdichte. Tabelle 1 zeigt die berechneten Werte für drei verschiedene Defekte.

Position des Defekts	Radius des Defekts	maximaler Betrag der Differenzflussdichte in der Messebene	größte Flussdichtedifferenz in der Messebene
x=0, y=0, z=0	21,6 mm	121,09 nT	-113,82 nT
x=70mm, y=0, z=0	11,0 mm	120,38 nT	-120,68 nT
x=0, y=0, z=-140mm	15,0 mm	119,57 nT	-119,57 nT

Tabelle 1: Vergleich der beiden Auswerteverfahren.

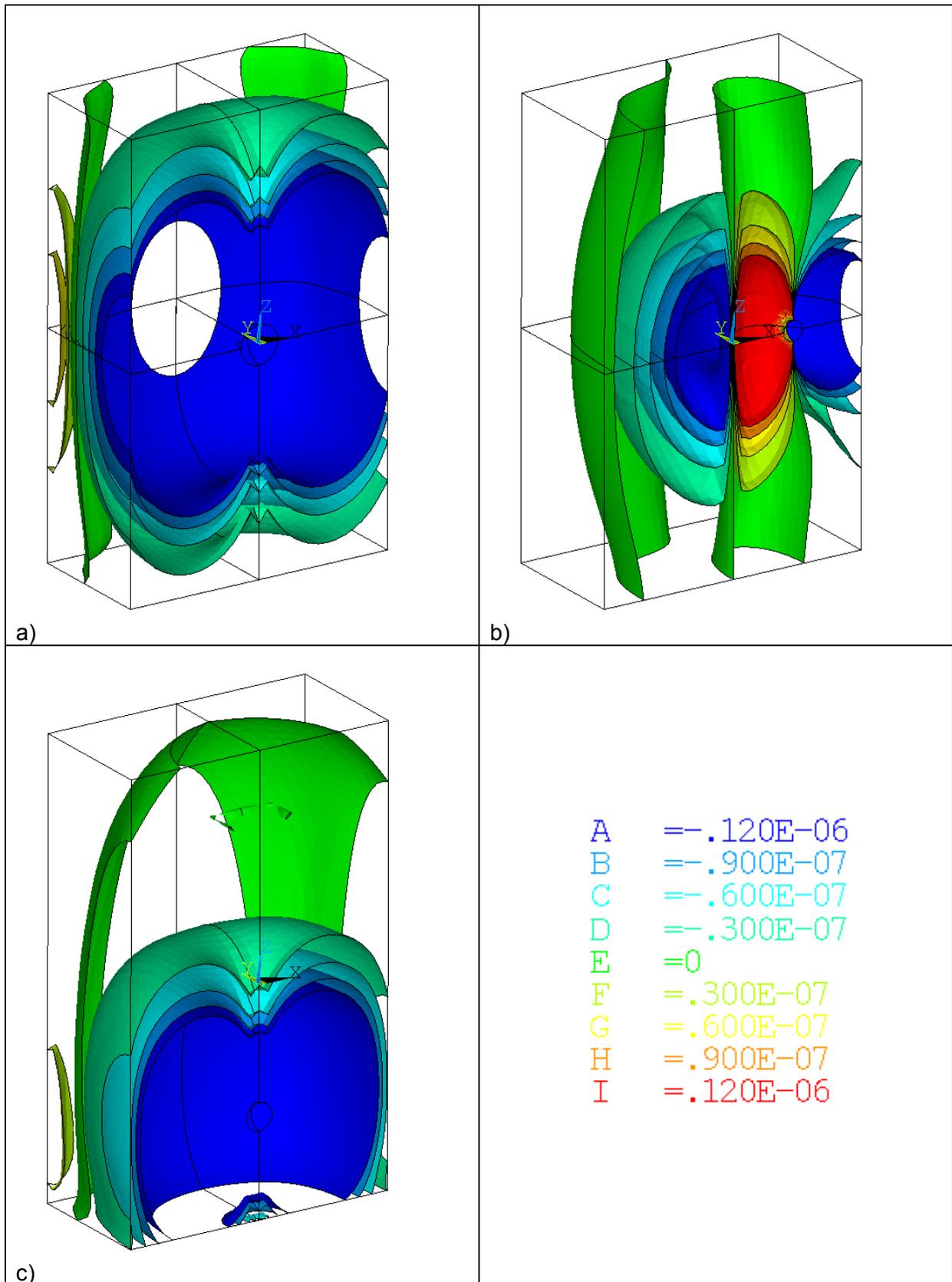


Abbildung 13: Differenz der Beträge der magnetischen Flussdichte mit und ohne Defekt (= Flussdichtedifferenz, in Tesla); a) Defekt mit Radius 21,6 mm in Stack-Mitte, b) Defekt mit Radius 11,0 mm, 70 mm in x-Richtung verschoben, c) Defekt mit Radius 15,0 mm, 140 mm in negative z-Richtung verschoben.

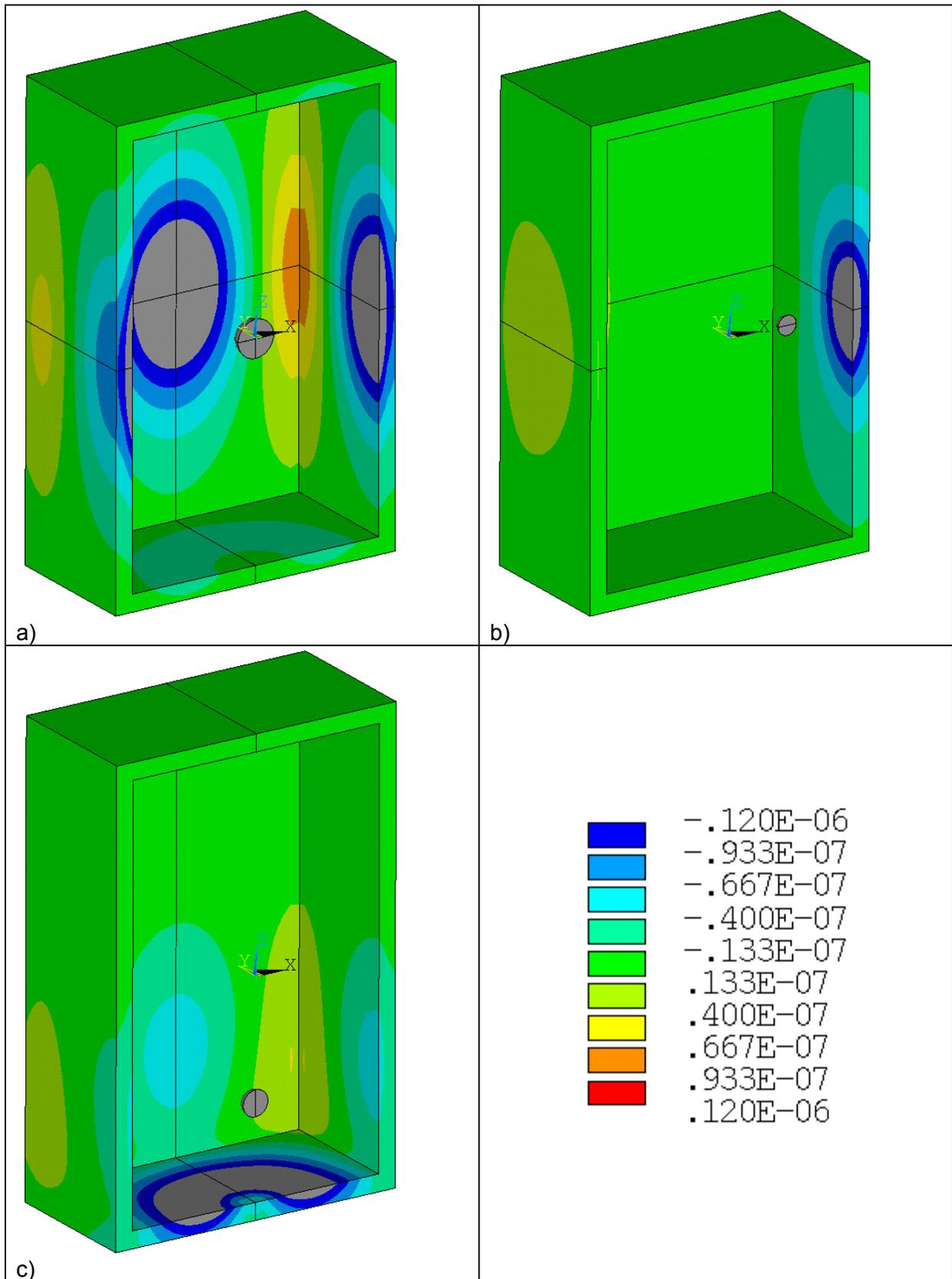


Abbildung 14: Differenz der Beträge der magnetischen Flussdichte mit und ohne Defekt (= Flussdichtedifferenz, in Tesla) im Bereich der Messfläche aufgrund eines Defekts (vgl. Abb. 7); a) Defekt mit Radius 21,6 mm in Stack-Mitte, b) Defekt mit Radius 11,0 mm, 70 mm in x-Richtung verschoben, c) Defekt mit Radius 15,0 mm, 140 mm in negative z-Richtung verschoben.

5 Auswertung

Abbildung 15 zeigt die Radien der an verschiedenen Orten auf entweder der x- (Querrichtung) oder der z-Achse (Längsrichtung) positionierten kugelförmigen Defekte, für die eine gegenüber dem ungestörten Fall maximale Änderung der magnetischen Flussdichte in der Messfläche von 120 nT entstehen.

Man erkennt, dass bei der auf 120 nT festgelegten Detektierbarkeitsschwelle Defekt mit einem Radius von mehr als 20 mm bzw. einem Durchmesser von mehr als 40 mm unentdeckt bleiben können.

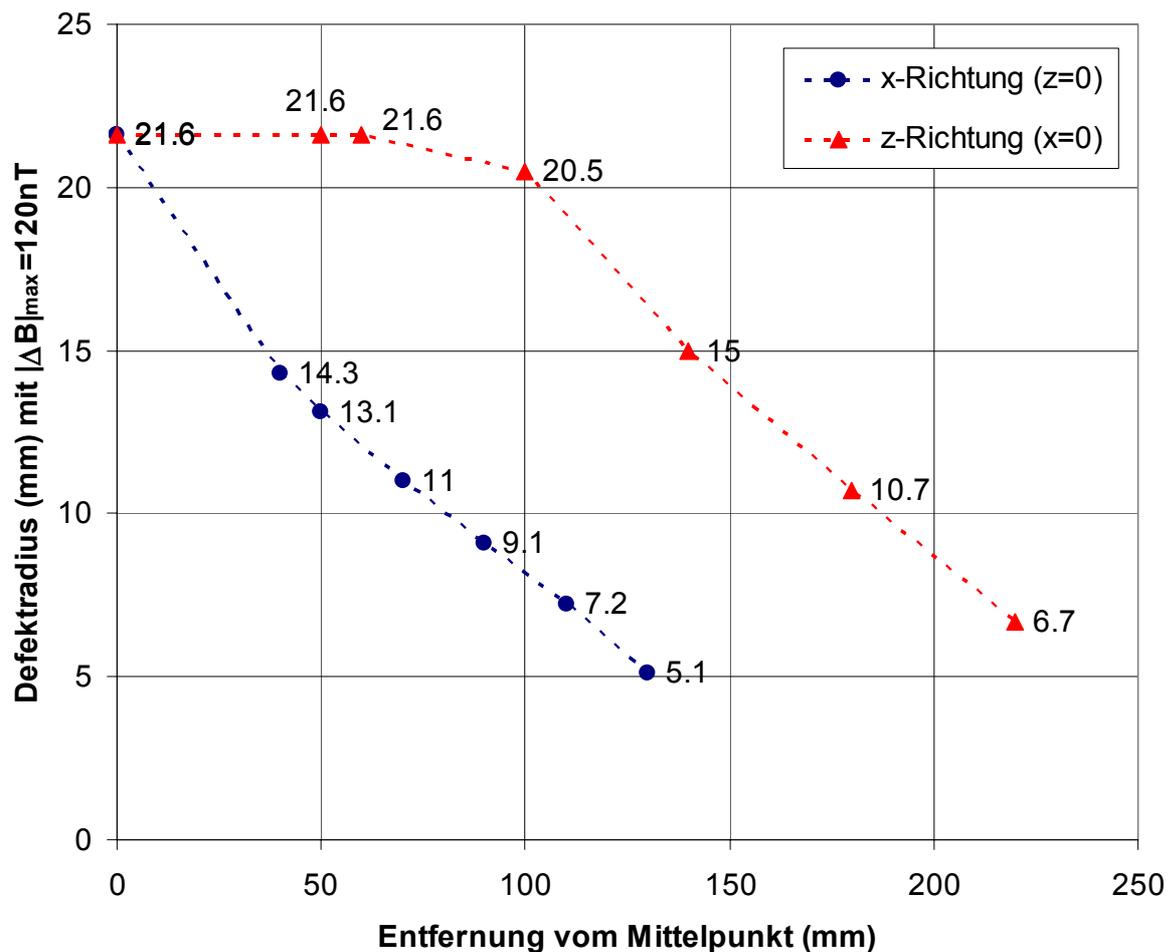


Abbildung 15: Defektradien, die eine messbare Differenzflussdichte von 120 nT erzeugen.