

# Praktikumsbericht

Abteilung: Primary Beams

Betreuer: Hr. Dr. Omet und Hr. Dr. Stadlmann

Zeitraum: 14.07.14 bis 25.07.14

von Mathurin Choblet, mathurin@choblet.com

---

Zuerst ging es montagsmorgens in die Personalabteilung, wo ich nachdem die wichtigsten Papiere mit Fr. Engel ausgetauscht worden waren, von meinem Praktikumsbetreuer Herrn Omet abgeholt wurde. Auf dem Weg zu C27, dritter Stock Raum 020, dem Ort wo ich mich in den folgenden 2 Wochen am meisten aufhielt, wurden mir bereits die Halle des unter dicken Betonplatten versteckten UNILAC-Beschleuniger-Experimenten gezeigt. Mit diesen völligen neuen Eindrücken konfrontiert wurde mir erst wirklich die Monumentalität des Beschleunigers und all den damit verbundenen Einrichtungen bewusst, war es mir doch nun ersichtlich wieso sich hier bei der GSI sich über 1000 Menschen damit beschäftigen. Zudem merkte ich zum ersten Mal die Präsenz des SIS 18 Ringbeschleuniger unter der Erde als wir an der zierpenden Trafostation vorbeigingen und in Maschinenhallen sah ich supraleitende Magneten in Ausmaßen wie ich sie nie vorher vermutet hätte. Als letztes sah ich bei dieser kleinen Runde das Baufeld des Zukunftsprojektes FAIR, dessen Ausmaße schon ohne Bebauung beeindruckend erschienen.

Im Büro angekommen war es meine allererste Aufgabe am PC den GSI Sicherheitstest zu absolvieren um für jegliche Art von Notfällen gewappnet zu sein. Dann traf auch noch Hr. Stadlmann, mein zweiter Praktikumsbetreuer, mit Deutschlandfahne ein, den ich aber bereits von seinem Vortrag bei der Berufsbörse am Weidiggymnasium in Butzbach kannte. Vor der Mittagspause unternahm Hr. Stadlmann mit mir noch kurz einen Abstecher in den Hauptkontrollraum (HKR), wo ich mir nun nach nur wenigen Stunden bei der GSI meine so gut wie vollständige Unwissenheit über das was hier wirklich abläuft eingestehen musste, aber sich daraus natürlich die Hoffnung ergab zum Ende des Praktikums hin doch etwas schlauer zu sein, was sich dann im Laufe des Praktikums bewahrheiten sollte. Gleich in der Mittagspause gab mir Hr. Stadlmann den Tipp, dass sich die wissenschaftliche Erkenntnis proportional zum Kaffeekonsum verhalte, ein Tipp dessen Tragweite für den weiteren Lebensverlauf sich jeder sicherlich selbst erdenken kann. Zu meiner Erleichterung erfuhr ich dann einige Tage später, dass dieser proportionale Zusammenhang auch bei dem von mir präferierten Tee vorliege. Nachdem mir die Basics vermittelt worden konnte ich nun anfangen mich mit meiner Aufgabe auseinanderzusetzen...

Diese erwies sich als alles andere als trivial, kurz gesagt geht es darum die Menschheit zu retten, wenn ein Asteroid beschließt dem Leben auf der Erde ein Ende zu bereiten.

Nicht Bruce Willis, sondern hochqualifizierte Wissenschaftler mithilfe eines Teilchenbeschleunigers sollen es richten und den Tag des Jüngsten Gericht in eine weite entfernte Zukunft verschieben. Plan ist es den Asteroiden mit einem Strahl aus Protonen, welche sich mit einer unvorstellbaren Geschwindigkeit knapp unter der Lichtgeschwindigkeit, dementsprechend mit sehr hoher, konzentrierter Energie, bewegen zu beschließen. Material des Asteroiden soll somit zum Verdampfen gebracht werden. Dieses Asteroiden-Gas gibt dem Asteroiden dann beim Austreten den entscheidenden Impuls um ihn von seiner todbringenden Laufbahn abzulenken. So der Plan.

Praktikanten vor mir waren bereits mit dem Rechnen und Prüfen dieser Möglichkeit als potentielle Rettung der Menschheit beauftragt worden und waren allesamt zu dem Schluß gekommen, dass diese Methode Jahrtausende vor der Kollision mit der Erde durchgeführt werden müsste um uns zu retten, da sich die Auswirkungen eines solchen Teilchenbeschusses stark in Grenzen halten würden. Grundlage dieser Rechnung war der berühmte Large Hadron Collider (LHC) in Genf. Die Energie der Protonen beträgt dort bis zu 7 TeV Energie. Da es sich bei dem LHC um einen Collider handelt treffen dort zudem 2 Teilchen aufeinander, sodass man bei einer Kollision im Schwerpunktsystem konzentriert 14TeV an Energie erhält.

Diese Werte erwiesen sich in den Berechnungen aber als nicht ausreichend. Seit Anfang des Jahres 2014 sind jedoch bereits Planungen in Gange, die noch größeres versprechen. Der sogenannte Future Circular Collider (FCC, zu Deutsch Zukunfts-Teilchenkollidierer) erzeugt bei einer Kollision zweier hochbeschleunigter Teilchen Energien im Bereich 100TeV! Wird dieser Beschleuniger nun endlich genug konzentrierte Energie liefern um die Bahn des Asteroiden ausreichend zu verändern? Gibt es Hoffnung? Werden nun endlich alle Wissenschaftler dieser Welt, welche seit Jahrzehnten Kraft ihres Lebens für die Grundlagenforschung und Entwicklung der Beschleuniger verwenden, von der ignoranten Masse des Volkes den ihnen gebührenden Dank erhalten?

Nichts anderes als das galt es zu berechnen. Erst einmal war es für mich Zeit Wissenslücken zu füllen und zu verstehen, was bereits gerechnet worden war und vor allem wie es gemacht wurde, ohne dem von Hr. Omet erwähnten NIH-Syndrom (englisch für *not invented here*, zu deutsch *Nicht hier erfunden*-Syndrom (siehe wikipedia).) zu verfallen. Dies erwies sich als ein hartes Stück Arbeit und bereits bei diesem schier leichten Einstieg in die Materie wurde meinem Denkvermögen einiges abverlangt. Bei der Beschließung des Asteroiden kommt es nämlich auf viele Faktoren an und im Laufe der Arbeit sollten sich noch für mich unvorhergesehene Hürden, so zum Beispiel spezifische thermodynamische Werte bestimmter Stoffe herauszufinden, zeigen.

Als sich mir, auch nach vielen Erläuterungen meiner Praktikumsbetreuer, ein Überblick der Thematik abzeichnete, war es an der Zeit genauere Spezifikationen der „Protonenkanone“ herauszufinden. Obwohl es sich nur um den ersten Entwurf eines FCC auf der Website des CERN handelt, wurden viele Parameter des zukünftigen Beschleunigers bereits bestimmt, von denen ich vorher noch nie etwas gehört hatte, diese sich aber als sehr relevant erweisen sollten. Bei dem Asteroiden geht man von 1998 QE2 aus und dass dieser aus reinem Forsterit ( $Mg_2(SiO_4)$ ), einem Mineral, besteht (Eigenschaften siehe Excel-sheet *Astronomie v2*).

Bislang war in den Berechnungen der Wert für die Eindringtiefe der Protonen in das Material ein abgeschätzter Wert, aber natürlich lässt sich dieser auch berechnen. So kam ich mit der Bethe-Bloch-Formel in Kontakt, jedoch war von Anfang an klar, dass die Formel in einem Bereich bei solch hohen Energie in der Praxis keine reproduzierbaren Werte mehr liefert. Ich erläutere nun etwas detaillierter die Vorgehensweise bei der Bethe-Bloch-Formel, da diese auf den vorliegenden Fall anzuwenden und in eine Excel-Tabelle zu übertragen, einen großen Teil meiner Praktikumszeit in Anspruch genommen hat.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

Was für Größen sind die verschiedenen Buchstaben?

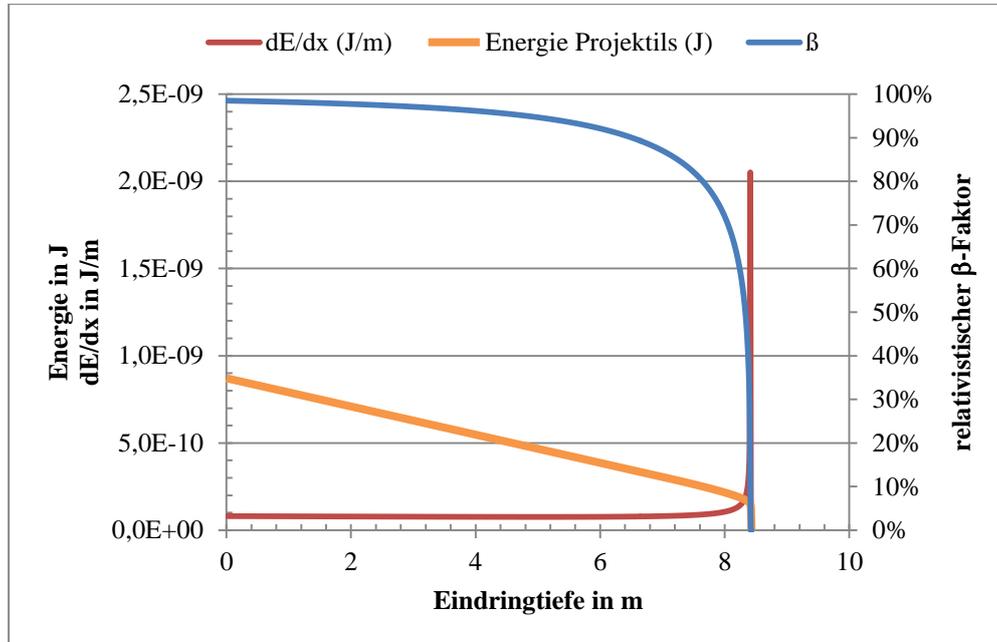
Das  $dE/dx$  gibt an, wieviel Energie das Teilchen auf einer bestimmten Strecke verliert.  $m_e$  ist hierbei die Masse des Elektrons,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $n$  die Elektronendichte von Forsterit (berechnet mithilfe der Dichte, Massenzahl und Ordnungszahl des Material, hier Forsterit),  $\beta$  ist die momentane Geschwindigkeit des Teilchens geteilt durch  $c$ ,  $z$  die Ladungszahl des Projektils,  $e$  die Elementarladung,  $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante, und  $I$  das mittlere Anregungspotential.

Doch inwiefern hilft uns diese Formel um die maximale Eindringtiefe zu berechnen? Integriert ergibt  $dE/dx$  die Gesamtenergie des Teilchens, und diese ist bekannt.  $x$  ist der Wert den ich benötigte, aber problematisch ist nun mal, das sich mit abnehmender Energie des Teilchens aus dessen Geschwindigkeit verändert und somit ist auch  $\beta$  eine Variable. Anstatt den kompletten auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens stehenden Term analytisch zu integrieren, leistet das numerische Integrieren Abhilfe.

Der Verlauf von  $dE/dx$  wird in möglichst dünne „Scheibchen“ aufgeteilt, deren addierte Flächen die Gesamtenergie ergeben. Diese Berechnung lässt sich in dem von mir erstellten Excel-sheet *Bethe-Bloch-Proton auf Forsterit.xls* nachvollziehen, verschiedene Werte können angepasst werden. Bei dieser Berechnung wurde ich auch mit relativistischen Effekten konfrontiert, die im Alltag bei mir zwar nie eine Verwendung finden, aber hier musste ich mit relativistischen  $\gamma$ -Faktor und  $c$  rechnen, aber so scheint es nun mal zu sein bei der Hochenergiephysik! Die Massen- und Ordnungszahl der Verbindung Forsterit

musste nur noch ermittelt werden und schon spuckte die Formel Ergebnisse über die Reichweite von schnellen Teilchen in Materie aus. Prinzipiell lässt sich das Verhalten von Ionen beim Eindringen in Materie und ihren Energieverlust wie folgt beschreiben.

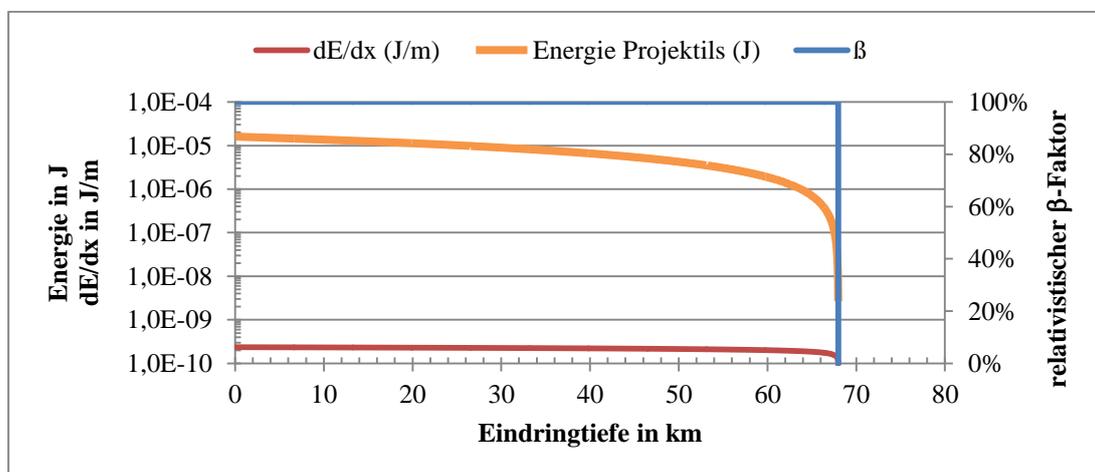
Die Ionen verlieren die meiste Zeit verhältnismäßig wenig Energie, werden daher aber trotzdem langsamer und kurz bevor sie vollständig stecken bleiben geben sie ihre meiste Energie ab (der sogenannte Bragg-Peak). Das Computer-Programm S-RIM bestätigte die Ergebnisse, zu meiner Überraschung waren meine auf einfachem Weg ohne Korrekturen berechnete Werte sogar relativ genau. Beim Eindringen eines Proton in Forsterit mit 4,5 GeV sieht das Diagramm daher folgendermaßen aus:



Auf der x-Achse lässt sich somit die Eindringtiefe ablesen, aus der von Excel berechneten Tabelle kann man einen recht genauen Wert 8,402 m bestimmen.

An einem Nachmittag zeigte mir Hr. Stadlmann das Medizin-Cave, welches gerade unkontrollierten Zugang hatte, wo dieses Verhalten von Ionen, vor Jahren bereits zur Rettung von Leben entdeckt wurde, nur in einem anderen Art und Weise. Die sehr effektive Kohlenstoff-Ionen-Therapie bei Tumorerkrankungen entstand als sogenanntes Nebenprodukt der Wissenschaft und wird nun erfolgreich an Patienten in Heidelberg ausgeübt.

Bei den 100 TeV des FCC jedoch zeigt sich die Unverwendbarkeit der Bethe-Bloch-Formel. Laut Berechnung dringt der Strahl dann 68 km (!) in das Forsterit ein.



Ein Bragg-Peak ist nicht mehr erkennbar, die Energie des Proton-Projektils nimmt linear ab. In der Praxis wird es nie zu solch hohen Reichweiten kommen, da tatsächlich mit höherer Energie immer öfter auftretende Kernreaktionen in der BBF keine Berücksichtigung finden, zudem ist der Asteroid eigentlich gar keine 67 km lang, eine hohe Energie ist daher sogar kontraproduktiv. S-RIM rechnet bei so hohen Energie bewusst nichts aus.

Aus Gründen der Vereinfachung und meines begrenzten Wissens und Möglichkeiten werde ich mit den 68 km weiterrechnen. Bei dieser extremen Energie müsste man natürlich auch besonders aufpassen, dass nichts vom Strahl verloren geht, da ja dann auch der Beschleuniger selbst Schäden tragen könnte.

Zwischenzeitlich durfte ich einen Vormittag lang auch bei der Frühschicht von Hr. Omet im HKR dabei sein, so hatte Hr. Omet genug Zeit mir zu erklären, was die vielen Bildschirme anzeigen. Da während der Strahlzeit der Kontrollraum immer besetzt sein muss, gibt es dort Schichtdienst. An diesem Morgen, gab es Probleme bei der langsamen Extraktion und mir wurde klar, dass so ein Teilchenbeschleuniger nicht einfach mal auf Knopfdruck funktioniert, sondern es viele Variationsmöglichkeiten gibt und manchmal auch die fachkundigen Physiker vor dem Bildschirm nicht wissen wieso ihnen etwas vom Strahl verloren geht.

Jetzt wo die Eindringtiefe des Strahls bekannt ist kann man auch berechnen wie viel Masse des Asteroiden verdampft wird. Hierfür berechnet man wieviel Energie nötig ist um einen kg Forsterit von seinem festen Ursprungszustand aus verdampfen zu lassen. Dafür addiert man die spezifische Schmelzwärme, spezifische Verdampfungswärme und den Temperaturzuwachs (Dampftemperatur minus Temperatur des Asteroiden vor dem Beschuss) multipliziert mit der Wärmekapazität von Forsterit. Diese spezifischen Werte herauszufinden führte zu einer zunächst kaum ausgiebigen Internetrecherche, da es wenig Daten für das ungewöhnliche Forsterit gibt, letztendlich wurde ich trotzdem in Fachartikeln und Dissertationen im Netz fündig.

$$\frac{E_{fest\ zu\ dampf}}{1kg} = q_s + q_v + c * \Delta T = 810 \frac{kJ}{kg} + 3149,2 \frac{kJ}{kg} + 0,85 \frac{kJ}{kg * K} * (2163K - 179K) = 5646 \frac{kJ}{kg}$$

$$m = \frac{\text{Strahlenergie}}{\frac{E_{fest\ zu\ dampf}}{kg}} = \frac{1,69E + 10\ J}{5646 \frac{kJ}{kg}} = 2993,21kg$$

Strahlenergie (Annahme, dass diese komplett umgewandelt wird) geteilt durch die Energie für einen kg ergibt eine Menge an verdampften Material von 3 t (siehe *Bethe-Bloch-Proton auf Forsterit; Tabelle Thermodynamik*).

Dieses verdampfte Forsterit kann man sich als einen Zylinder vorstellen. Das Volumen dieses Zylinders lässt sich sowohl über Masse und Dichte, als auch über eine geometrische Herangehensweise ermitteln, vielmehr interessiert aber der Wert für den Strahlradius, den der Strahl in dem Asteroiden haben muss, daher rechnen wir:

$$V = \frac{m}{\rho} = \pi r^2 * x$$

Daraus folgt:

$$r = \sqrt{\frac{m}{\rho * \pi * x}} = \sqrt{\frac{2993,21kg}{3270 \frac{kg}{m^3} * \pi * 67980m}} \approx 2,07mm$$

Dieser Wert wird bei der Ionenoptik eine wichtige Rolle spielen, um zu berechnen an welchem Punkt der Umlaufbahn der Strahl den Asteroiden treffen muss. Zudem lässt sich über Formeln für Temperatur und Strahlleistung die mittlere Geschwindigkeit des Gases ermitteln.

Neben dem Tüfteln durfte ich donnerstagnachmittags an einer Führung in der GSI teilnehmen. Nach einem Einstiegsvortrag inklusive dem schon oft gehörten Uhr-an-die-Wand-schmeißen-Prinzip, bekam die Gruppe den HKR, den ich ja bereits kannte, gezeigt. Dann bekam ich aber auch neue Sachen gezeigt, wie den gerade geöffneten Experimentier-Speicher-Ring (ESR) und das imposante HADES-Experiment. Die Führung stellte sich für mich als eine gute Ergänzung heraus und sicherlich gibt es noch vieles mehr in der GSI zu entdecken, hoffentlich wird es bei der neuen FAIR-Anlage auch Möglichkeiten der Besichtigung geben. Das Sommerstudentenprogramm, welches mir Hr. Stadelmann empfahl werde ich mir auf jeden Fall merken.

Als nächstes wird es bei der Berechnung komplizierter, über die Ionenoptik-Tabelle muss nun bei festgelegten TWISS-Parametern und Emittanz des Strahles, sowie festgelegtem Radius des Strahls im Asteroid berechnet werden, aus welcher Distanz dieser beschossen werden muss. Vor diesem Praktikum hatte ich noch nie von dieser Emittanz gehört, aber nun stelle ich fest, dass der Strahl nicht perfekt ist und streut, und daher kommt auch die sogenannte Emittanz.

$\beta$  und die normalisierte Emittanz des Strahls sind bekannt, daraus müssten die weiteren Twiss-Parameter und die Emittanz berechnet werden, wenn ich mehr Zeit gehabt hätte, wäre ich vielleicht auch in der Lage gewesen dies zu berechnen, aber zum Schluss dieses Praktikums stehen noch einige offene Fragen im Raum. So lässt sich ja anhand der Umlaufdauer des Strahls im FCC, dessen Länge, sowie dessen Energie eine gewisse Leistung berechnen. Praktikanten vor mir rechneten daher mit Gleichungen zur Thermodynamik wie dem Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz, jedoch stellt sich mir die Frage, ob man dies hier anwenden kann. Bei meiner gewünschten Strahlfleckgröße auf dem Asteroid entstehen laut dieser Gleichung Temperaturen im Plasmabereich.

Bei diesem Ergebnis welches ich nicht glauben möchte, sondern vermute die Formel in irgendeiner Weise falsch angewandt zu haben, erreicht man mit einer mittleren Gasgeschwindigkeit von 20,8 km/s eine Abweichung von der Halbachse der elliptischen Bahn des Asteroiden (auch etwas, was ich vor dem Praktikum nicht wusste) von immerhin 127m. Dieses Ergebnis ist schon einmal größer als das was mit dem LHC berechnet wurde. Genauso wie ich mein Ergebnis mit astronomischen Temperaturen innerhalb des Asteroiden (über 2 Millionen Kelvin, zum Vergleich: innerhalb der Sonne ca. 15,6 Millionen Kelvin) anzweifle, halte ich auch die Ergebnisse der anderen Praktikanten für fragwürdig, da diese mit einer Strahlfleckgröße von ca. 5 Million m<sup>2</sup> rechnen. Hr. Omet hatte es schon angedeutet, auch mit dem FCC wird der Asteroid kaum aufzuhalten sein...

Insgesamt scheint es dann doch gar nicht so leicht zu sein, alle Parameter welche schlussendlich eine Rolle spielen im Überblick zu behalten. Es war zudem das erste Mal, dass ich mit relativ einfach aussehenden Thermodynamik-Formeln gerechnet habe, ich vermute aber die Fehlerquelle liegt hier. Interessant wäre es auch noch sich genauer mit der Ionenoptik zu beschäftigen. Meine Grundvorstellung von Physik ist es, mit mehreren Unbekannten rechnen zu dürfen, und dies war dann auch der Fall. Allein die Formeln zu verstehen wenn man sich noch nie wirklich mit so vielen Faktoren umhergeschlagen hat war anspruchsvoll, aber letztendlich war ich doch überrascht, dass es mir mit meinem Schülerwissen gelungen ist mit den Formeln praktisch reproduzierbare Ergebnisse wie bei der komplexeren Bethe-Bloch-Formel zu berechnen. Ich würde sogar sagen, dass nach einer gewissen Frustrations- und Verständnisphase, langwierigen Internetrecherchen endlich korrekte Ergebnisse zu berechnen eine Genugtuung war und ich dann meinen Spaß mit der Excel-Tabelle haben konnte.

Mein Praktikum bei der GSI war definitiv eine große Bereicherung, da es anspruchsvoll war und ich sehr viele neue Sachen lernen konnte, aber wie das nun mal so ist, ergeben sich mit neuem Wissen immer mehr neue Fragen als man an Erkenntnis gewinnen konnte. Ich bekam einen sehr guten Einblick in die Arbeit in der GSI, dies merke ich auch daran, dass ich in der Retrospektive sagen kann vor dem Praktikum tatsächlich kaum eine Ahnung von der Arbeit eines Physikers an der GSI, aber nach 2 Wochen fühle ich mich schon deutlich schlauer. Es gibt für mich noch sehr vieles zu verstehen und zu lernen und ich hoffe die mir fehlenden Erkenntnis in Zukunft erlangen zu können um vielleicht auch einmal an dem wissenschaftlichen Fortschritt teilhaben zu können.