

Die Magnetfelder der Planeten

Frei drehbare magnetische Steinchen richten sich durch die Kraft des Erdmagnetfeldes stets nach Norden aus. Das wussten die Chinesen schon vor langer Zeit und perfektionierten diese Entdeckung im 11. Jahrhundert zu einem magnetischen Kompass. Ein Durchbruch für die Navigation auf offener See. Im Zeitalter von Kompass und GPS gibt es zwar präzisere Methoden der Navigation, doch das wissenschaftliche Interesse an den Magnetfeldern der Erde und anderer Planeten ist größer denn je. Zurzeit etwa vermessen der deutsche Forschungssatellit *Chang* und sein

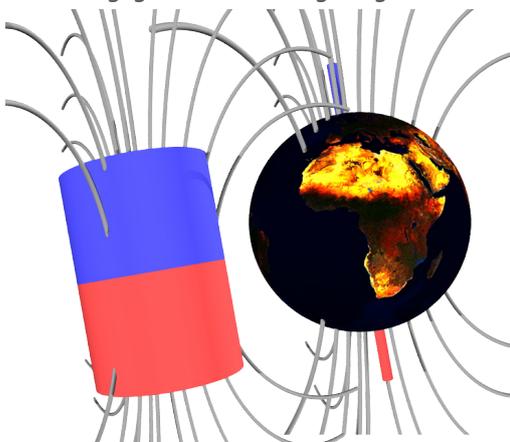
dänisches Gegenstück *Ørsted* das Erdmagnetfeld mit nie gekannter Genauigkeit. Weitere Raumsonden erkunden die Felder der anderen Planeten in unserem Sonnensystem und viele Missionen sind in Planung. Woher kommt dieses neu erwachte Interesse an einem so alten Forschungsgebiet?

Unser magnetischer Schutzschild

Die Erde ist einem ständigen Strom energiereicher Teilchen von der Sonne ausgesetzt, dem Sonnenwind. Durch das Erdmagnetfeld werden die meisten dieser Teilchen um unseren Planeten herumgelenkt (Abbildung A). Näher an der Erde ähnelt das Magnetfeld dem eines Stabmagneten (Abbildung B). Weiter von der Erde entfernt jedoch wird es durch die Wechselwirkung mit dem Sonnenwind verformt. Er staucht die Feldlinien auf jener Seite zusammen, die der Sonne zugewandt ist, und zieht sie auf der abgewandten Seite zu einem langen Schweif aus. Die Sonnenwindteilchen folgen diesen Feldlinien.

Besonders in den Polarregionen gelingt es einigen der Teilchen immer wieder, bis in die Atmosphäre vorzustoßen.

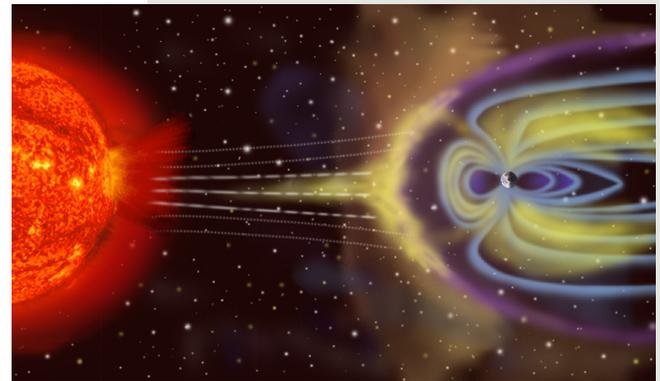
B Das Erdmagnetfeld ähnelt in etwa dem Dipolfeld eines Stabmagneten, der um 10 Grad gegen die Erdachse geneigt ist.



Dort erzeugen sie die Nordlichter (Abbildung C). Obwohl der Sonnenwind dank des Erdmagnetfeldes keine Gefahr für unsere Gesundheit darstellt, hat er dennoch ein paar negative Folgen: An Bord von Satelliten fallen elektronische Geräte bei stärkerer Sonnenaktivität regelmäßig aus. Und auch auf der Erdoberfläche sind vereinzelt technische Störungen zu verzeichnen.

Ein planetares Magnetfeld schützt nicht nur unmittelbar vor dem Sonnenwind. Es verhindert auch, dass dieser die Atmosphäre langsam abbaut. Diesen Effekt beobachten Forscher vom MPS etwa auf dem Mars. Der rote Planet besitzt heute kein globales Magnetfeld mehr und hat nur eine sehr dünne Atmosphäre.

Doch auch das Magnetfeld der Erde verändert sich. Seit etwa 150 Jahren nimmt jener Anteil ab, der dem Feld eines Stabmagneten gleicht. Wenn sich dieser Vorgang fortsetzt, könnte sich die Richtung des Feldes sogar umkehren. Aber keine Angst: Das Magnetfeld der Erde verschwindet nie ganz.



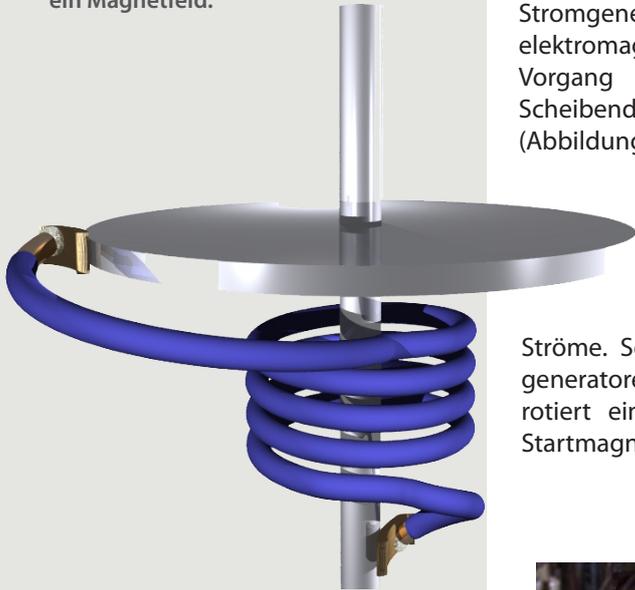
A Das Erdmagnetfeld lenkt den größten Teil des Sonnenwindes um unseren Planeten herum.

C Nordlichter entstehen, wenn die geladenen Teilchen des Sonnenwindes auf die Gase der Atmosphäre treffen. Dies ist in der Nähe der Pole besonders wahrscheinlich.



Der Dynamomechanismus

D Der Scheibendynamo veranschaulicht die Erzeugung eines Magnetfeldes durch Bewegung. Eine Metallscheibe rotiert um eine Metallachse. Die dabei induzierten elektrischen Ströme werden durch eine Spule geleitet und erzeugen so ein Magnetfeld.



Das Prinzip

Die Magnetfelder der Planeten werden durch einen Dynamomechanismus erzeugt, der auf dem gleichen physikalischen Prinzip beruht wie ein Fahrraddynamo und andere Stromgeneratoren (Abbildung E): der elektromagnetischen Induktion. Der Vorgang lässt sich gut an einem Scheibendynamo veranschaulichen (Abbildung D).

Wenn man einen elektrischen Leiter in einem Magnetfeld bewegt, erzeugt die magnetische Lorentzkraft elektrische Ströme. So funktionieren alle Stromgeneratoren. Beim Scheibendynamo rotiert eine Metallscheibe in einem Startmagnetfeld. Der induzierte Strom

fließt zwischen Scheibenachse und Rand und wird über Schleifkontakte durch eine Spule geleitet. So nutzt man ihn, um ein neues Magnetfeld zu erzeugen. Das Startmagnetfeld kann dann nach einer Anlaufphase ausgeschaltet werden.

Natürlich verbraucht ein Dynamo Energie, und zwar genau jene Energie, die durch Reibung und über den elektrischen Widerstand in Wärme umgewandelt wird. Diese Energie muss durch ein entsprechend kräftiges Drehen ausgeglichen werden. Sonst wird die Scheibe immer langsamer und kommt schließlich zum Stillstand. Techniker nutzen diesen Effekt in Wirbelstrombremsen, die etwa die Räder der ICE 3 Züge berührungslos abbremsen.

F Der Gesteinsmantel der Erde umhüllt einen Kern, der im Wesentlichen aus Eisen besteht. Im Zentrum ist der Kern fest, im äußeren Teil jedoch aufgrund der hohen Temperaturen flüssig. Hier erzeugen turbulente Strömungen das Erdmagnetfeld in einem Dynamoprozess.



E Beispiele verschiedener Generatoren, die Bewegung in Strom umwandeln.

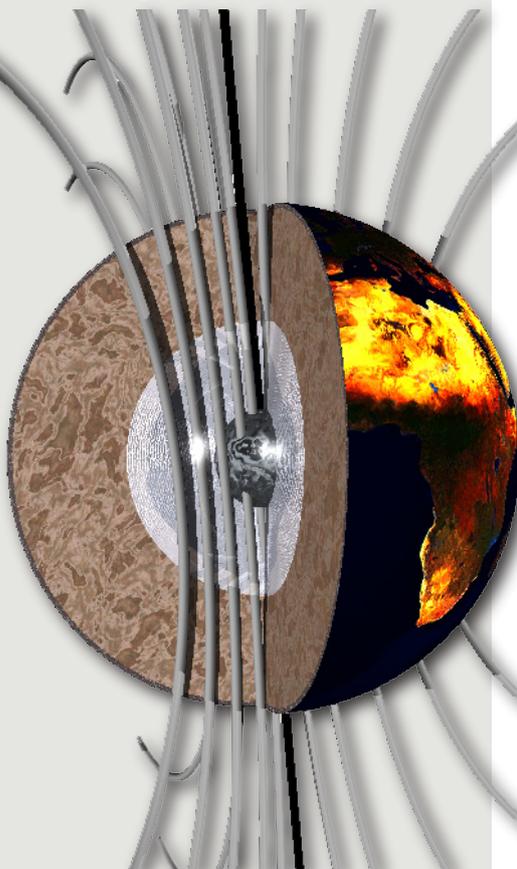
Der Erddynamo

Die Prozesse, die den Erddynamo antreiben, finden tief in der Erde statt (Abbildung F). Würde man senkrecht nach unten bohren, dann hätte man in 2900 km Tiefe den Gesteinsmantel der Erde durchquert und träfe auf einen Eisenkern mit einem Durchmesser von fast 7000 km.

Temperatur und Druck nehmen mit der Tiefe ständig zu. Im äußeren Teil des Kerns herrschen Temperaturen von einigen tausend Grad. Darum ist das Eisen hier flüssig. Tiefer im Kern verdichtet der hohe Druck das Eisen zu einem festen Kern von etwa 2400 km Durchmesser. Der Erddynamo arbeitet

im flüssigen Teil des Erdkerns. Das elektrisch leitfähige Eisen wird hier durch turbulente Strömungen in Bewegung gehalten.

Ursprung dieser so genannten Konvektion ist der Temperaturunterschied zwischen dem Erdinnern und dem Gesteinsmantel. Das flüssige Eisen in den heißen, tiefen Schichten des äußeren Kerns ist weniger dicht und somit leichter als das darüber gelegene, kältere Eisen und steigt deshalb auf. An der Grenze zum Mantel kühlt es wieder ab und sinkt zurück in die Tiefe. So entsteht ein Kreislauf, der zur Kühlung der Erde beiträgt.

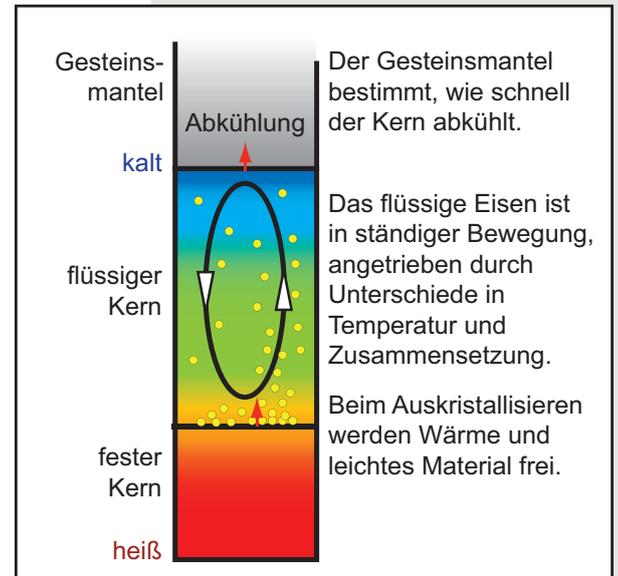


Vergleichbare Prozesse treiben etwa die Winde in der Erdatmosphäre und das Driften der Kontinentalplatten an.

Durch die fortwährende Abkühlung des Kerns kristallisiert immer mehr Eisen aus und der innere Kern wächst. Dabei wird Kristallisationswärme frei, die die Konvektion zusätzlich antreibt. Außerdem werden an der Oberfläche des inneren Kerns leichte Stoffe wie Schwefel und Sauerstoff freigesetzt. Sie sind im flüssigen Eisen gelöst, werden jedoch nicht in den festen Kern eingebaut. Das Aufsteigen dieser leichten Stoffe nennt man chemische Konvektion. So trägt das Wachsen des inneren Kerns zweifach zur Konvektion im flüssigen Eisen bei.

Auch im Gesteinsmantel findet Wärmetransport durch Konvektion statt. Da diese aber in Gestein natürlich sehr viel langsamer ist als im flüssigen Eisen, lässt der Mantel relativ wenig Wärme passieren.

Dies begrenzt die Abkühlung des Erdkerns und indirekt damit auch das Wachsen des inneren Kerns. Der Erdmantel kontrolliert also die Konvektion im Erdkern.



G Schematische Darstellung der Antriebskräfte für die Konvektion im äußeren Erdkern. Die Konvektionsbewegung erzeugt hier das Erdmagnetfeld.

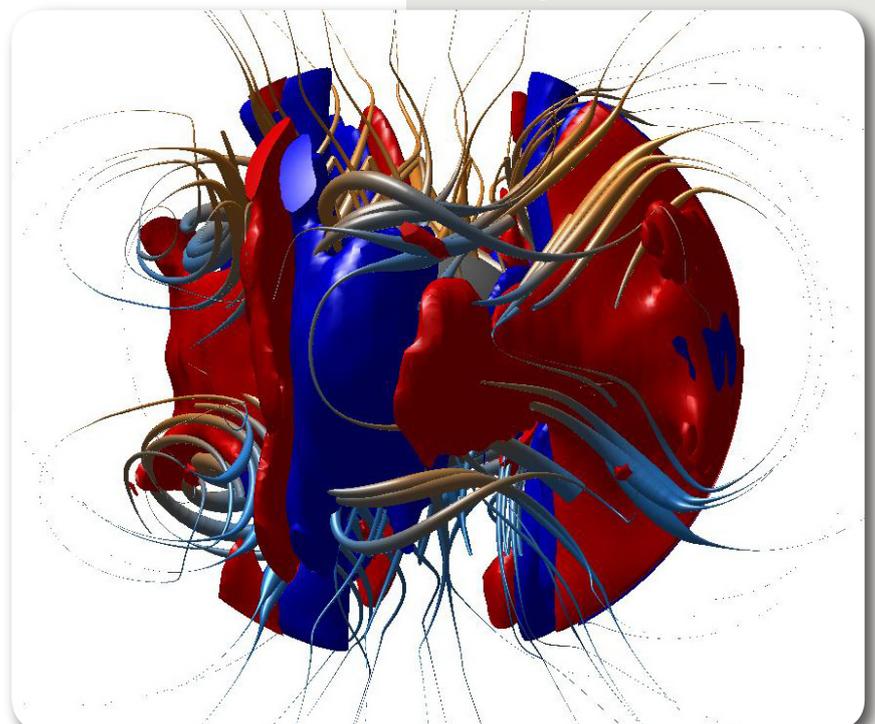
Der Dynamo am Computer

Wie der Erddynamo genau funktioniert, konnten Forscher am MPS in Computersimulationen klären. Ein Scheibendynamo oder ein Fahrraddynamo funktioniert durch die geschickte Anordnung der Kabel und der anderen Einzelteile. Im Vergleich dazu scheint der äußere Erdkern zu einfach aufgebaut: Er besteht nur aus einer homogenen Menge flüssigen Eisens. Die Computersimulationen zeigen, dass hier die Komplexität der Konvektionsbewegung eine entscheidende Rolle spielt.

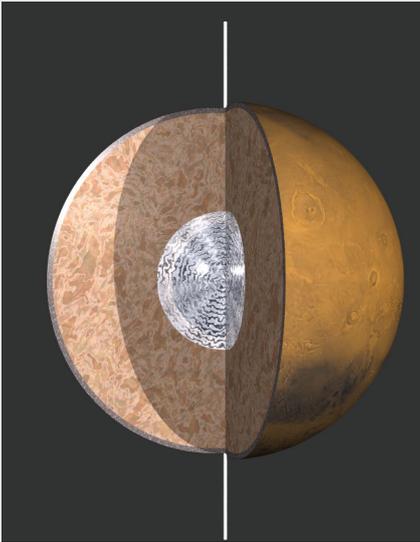
Die Erdrotation bewirkt, dass sich die Bewegung in Säulen organisiert, ähnlich wie bei Wirbelwinden. In Abbildung H, dem Ergebnis einer Computersimulation, sind diese Säulen blau und rot dargestellt. Blaue Säulen rotieren im Uhrzeigersinn, rote Säulen rotieren in die andere Richtung. Zudem gibt es Strömungen, die in den blauen Säulen zu den Polen und in den roten Säulen zum Äquator fließen. Das Verbiegen und Strecken der magnetischen Feldlinien veranschaulicht die Umwandlung von Bewegungsenergie in magnetische Energie. Selbst bei diesem recht einfachen Computermodell sind die Konvektion und das Magnetfeld bereits recht kompliziert. Im Erdkern dürfte es noch viel komplizierter zugehen.

Die Computerrechnungen erlauben es uns auch, den Energieverbrauch des Erddynamos abzuschätzen. Er beträgt etwa 200.000 bis 500.000 Megawatt. Das entspricht dem Hundertfachen des Energieverbrauchs von New York. Gar nicht mal so viel, wenn man die Größe der Erde bedenkt.

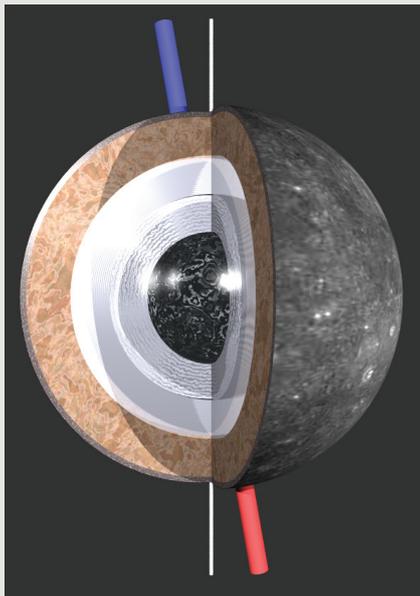
H Computersimulation des Erddynamos. Neben den magnetischen Feldlinien sind die Wirbel der Konvektionsbewegung in rot und blau dargestellt.



Die Magnetfelder anderer Planeten



I Mars hat einen Radius von 3400 km und ist damit etwa halb so groß wie die Erde. Der Planet besitzt heute keinen Dynamo und hat wahrscheinlich noch keinen inneren Kern gebildet.



J Merkurs Radius beträgt 2440 km. Er ist damit etwa ein Drittel so groß wie die Erde. Der Gesteinsmantel ist relativ dünn und bereits recht fest. Der Wärmefluss aus dem Kern ist darum eingeschränkt und der äußere Kern konvektiert nur im unteren Bereich. Merkurs Magnetfeld ist 100 mal schwächer als das der Erde.

Johannes Wicht und
Ulrich Christensen
Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung
Max-Planck-Straße 2
37191 Katlenburg-Lindau
<http://www.mps.mpg.de>
Kontakt: Wicht@mps.mpg.de

Die Magnetfelder der Planeten sind recht unterschiedlich. Am besten kennen wir das Magnetfeld der Erde. Es ähnelt dem Dipolfeld eines Stabmagneten, der etwa 10 Grad gegen die Rotationsachse unseres Planeten geneigt ist. Eine Kompassnadel zeigt darum immer in etwa nach Norden. Im Detail ist das Magnetfeld jedoch komplizierter. Dies ist auf die komplexe Konvektion im Kern zurückzuführen. Zudem ändert es sich ständig, etwa alle 250.000 Jahre kehrt es sogar seine Richtung um.

Auch diese Umpolungen simulieren Forscher am MPS am Computer. Es zeigt sich, dass Umpolungen einem Zufallsprinzip folgen, das dem beim Würfeln ähnelt: Wenn lange keine Sechs gefallen ist, wird es darum nicht wahrscheinlicher, dass im nächste Wurf eine Sechs fällt. Genauso macht die Tatsache, dass die letzte Umpolung bereits 780.000 Jahre her ist, es nicht wahrscheinlicher, dass die nächste bald stattfindet.

Mars und Venus besitzen heute keinen aktiven Dynamo, da wohl die Antriebskräfte zu gering sind. Bei der Erde ist der Gesteinsmantel noch recht aktiv. Kalte Ozeanplatten tauchen ab und heißes Mantelmaterial erreicht in so genannten Plumes und an mittelozeanischen Rücken die Oberfläche. Diese speziellen Formen der Konvektion bilden die Elemente der Plattentektonik. Sie lässt die Erde relativ schnell abkühlen und treibt so den Geodynamo an.

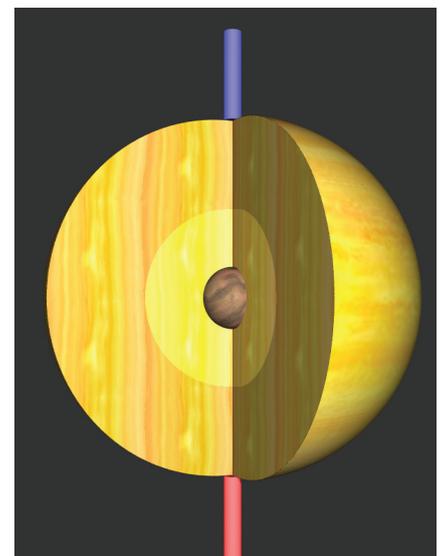
Bei Mars und Venus hingegen ist der obere Mantel weitgehend erstarrt und verhindert eine effektiv Abkühlung der Planetenkerne. Zudem dürfte ihr Inneres noch so heiß sein, dass kein fester Kern ausfrieren konnte. Darum stehen weder thermische noch chemische Konvektion als Antrieb für einen Dynamo zur Verfügung. Durch jüngere Weltraummissionen wissen wir jedoch, dass der Mars einmal ein Magnetfeld besaß, dessen Signatur in über 4 Milliarden Jahren alten Krustengesteinen erhalten ist.

Der Wärmefluss aus dem Kern muss damals viel stärker gewesen sein als heute.

Merkur besitzt nur ein sehr schwaches Magnetfeld. Die Computersimulationen am MPS zeigen die mögliche Ursache: Auch im Merkur verhindert der Mantel ein effektives Kühlen, doch es hat sich bereits ein innerer Kern gebildet. Sein langsames Wachsen genügt, um einen Dynamo im unteren Bereich des flüssigen Kerns anzutreiben. Das dort erzeugte Magnetfeld muss jedoch erst die obere, nicht aktive Schicht durchdringen. Es wird dabei entscheidend abgeschwächt und verliert zudem an Komplexität.

Die Gasplaneten Jupiter und Saturn bestehen zum Großteil aus Wasserstoff und Helium. Der Wasserstoff wird unter dem hohen Druck im Planeteninneren zu einem elektrischen Leiter. Hier arbeiten die Dynamoprozesse, die im Saturn ein sehr einfaches Magnetfeld erzeugen, während das Jupiterfeld dem Erdmagnetfeld ähnelt. Über die Ursache für diesen Unterschied gibt es nur Spekulationen.

Der Saturn ist kleiner als Jupiter und darum schon weiter abgekühlt. Bei den tieferen Temperaturen können sich Heliumtröpfchen bilden und in die Tiefe des Planeten regnen. In den oberen Regionen ist deshalb das Gasgemisch ärmer an schwererem Helium und darum leichter als das Gemisch in größeren Tiefen. Solch eine Schichtung unterdrückt Konvektion, bei der leichteres Material aus der Tiefe aufsteigen will. Ähnlich wie beim Merkur ist der obere Teil der Dynamoregion darum recht passiv und filtert die komplizierteren Anteile des Magnetfeldes heraus.



K Saturn ist fast 10 mal so groß wie die Erde. Das Helium/Wasserstoff-Gemisch seiner Atmosphäre wird bei etwa der Hälfte des Radius zum elektrischen Leiter. Das Saturnmagnetfeld ist etwa so stark wie das der Erde. Es ist jedoch sehr viel einfacher und der Dipol ist nicht geneigt.