

Anfertigung einer Umrüstanleitung für Pedelecs unter besonderer Beachtung der Funktion des Tretkurbelsensors basierend auf dem Hall-Effekt

Dominik Schmelter

Tutor: Herr Stefan Wentzel

Physik GK 12

Theodor-Körner-Schule

14.03.2011

Pedelec



Inhaltsverzeichnis

1. Begründung für die Auswahl des Themas	Seite 1
2. Infos zu Pedelecs	
2.1. Allgemeines	Seite 2
2.2. Rechtliche Betrachtung	Seite 3
3. Umrüstanleitung	
3.1. Vorbereitung	Seite 4
3.2. Bauanleitung	Seite 6
4. Hall-Effekt (Funktion des Tretekurbelsensors)	Seite 10
5. Resümee	Seite 12
6. Anhang	Seite 13
7. Quellen- und Literaturverzeichnis	Seite 19
8. Selbstständigkeitserklärung	Seite 20

1. Begründung für die Auswahl des Themas

Anlass zum Schreiben dieser Facharbeit war der Aktionstag (30.10.2010) „Elektromobilität 2010“¹ der Matthias-Claudius-Schule in Bochum. Dort wurden handelsübliche Fahrräder in eine besondere Art von Elektrofahrrädern - sogenannte „Pedelects“ - umgebaut.

Elektromobilität ist ein aktuelles und besonders auch zukunftsorientiertes Thema: zum einen aus Umweltschutzgründen, zum anderen wegen des hohen Kraftstoffpreises, der die Menschen dazu veranlasst, über Alternativen zum Auto nachzudenken.

Da Pedelects in Deutschland noch nicht so bekannt und verbreitet sind, kam die Idee auf, eine Umrüstanleitung für Standardfahrräder zu erarbeiten. Somit wird das Thema Elektromobilität deutlich mehr Nutzer zugänglich gemacht. Eine Umrüstung im „do-it-yourself“-Verfahren bietet zum einen den Vorteil des deutlich günstigeren Preises im Gegensatz zum Fertigkauf, darüber hinaus aber besonders den Vorteil, dass man selber nachvollziehen kann, wie ein solches Elektrofahrrad funktioniert. Auf diese Weise betrachtet man sein Pedelect später aus einer anderen Sicht und kann so seine eigene Faszination und sein Interesse für diese Zukunftstechnologie viel besser weitergeben.

Geringe Emissionen und Umweltverträglichkeit sind jedoch nicht die einzigen Vorteile, die ein Pedelect mit sich bringt. Gründe, die viele Menschen vom Fahrrad fahren abhalten, werden durch Pedelects nichtig: Menschen auf dem Weg zur Arbeit kommen nicht mehr ins Schwitzen und Senioren, denen die Kraft fehlt für längere Strecken, werden durch den Motor unterstützt.

Auf Grund der rechtlichen Lage verursachen Pedelects keine laufenden Kosten wie Versicherungen; und auch Führerschein- und Helmpflicht gelten für Pedelects nicht.

Dass ein Pedelect, besonders im Winter, keinen Ersatz für Auto, Bus oder Bahn darstellt, steht außer Frage. Doch in vielen Situationen - besonders für Senioren - ist das „Fahren mit Rückenwind“ die ideale Alternative zum Auto.

¹ weitere Informationen: <http://juniorakademie.mcs-bochum.de/start/aktuelles/aktuelles/article/bericht-vom-aktionstag-elektromobilitaet/index.html>

2. Infos zu Pedelecs

2.1. Allgemeines

Der Begriff Pedelec steht für „Pedal Electric Cycle“ (übersetzt: Pedal-Elektrisches-Fahrrad) und gehört zur Oberklasse der Elektrofahrräder. Im Gegensatz zum „E-Bike“, bei dem mit einem Handgriff und ohne eigenen Kraftaufwand wie bei einem Mofa Gas gegeben werden kann, setzt die Motorunterstützung beim Pedelec nur beim Treten der Pedale ein. Die Motorunterstützung ist hierbei an die eingesetzte Muskelkraft des Fahrers gekoppelt. Somit steht die Muskelkraft im Vordergrund und der Motor dient nur zur Unterstützung. Mehr als 90% aller Elektrofahrräder, die heute in Deutschland verkauft werden, sind Pedelecs.²

Das erste serienmäßige Elektrorad wurde 1932 vom Elektromotorhersteller EMI gebaut. 1982 entwarf Egon Gelhard aus Zülpich das erste Pedelec „ELFA“³.

Es gibt, je nach Anwendungsgebiet und Einsatzbereich, verschiedene Typen von Pedelecs (z.B. City-, Trekkingbikes, Falträder, Tandems, Dreiräder)⁴. Je nach Typ werden die Pedelecs nach unterschiedlichen Kriterien bewertet, wie z.B.

Reichweite, Spitzenlastunterstützung, Geräusch, Fahrgefühl ohne Antrieb.

Zurzeit erlebt die Elektroradbranche einen außergewöhnlichen Aufschwung: während 2005 lediglich 25.000 Elektrofahrräder in Deutschland verkauft wurden, waren es im Jahr 2009 150.000, und die Tendenz ist steigend.⁵

Käufer von Pedelecs sind inzwischen nicht mehr nur Ältere, besonders auch Jüngere haben an „dem Fahren mit Rückenwind“ Gefallen gefunden. Ebenso Lieferdienste haben Pedelecs für sich entdeckt. So hat die Deutsche Post aktuell bereits 8000 Elektroräder im Einsatz.⁶ Dem Vorbild von Vermiet-Stationen in Tokio folgend, hat die Stadt Stuttgart 2008 ihren Pedelec-Plan vorgestellt und beabsichtigt, in den nächsten Jahren in der ganzen Stadt 300 Mietstationen einzurichten.⁷

² vgl. aktiv Radfahren, Ausgabe 7-8/2008, S.62/ 63

³ Smolik, C.; Bollschweiler, M.; Ziese, V.: Das Elektrorad. 1. Aufl. Bielefeld 2010, S 6,8

⁴ a.a.O., S. 24-33

⁵ a.a.O., S. 14/15

⁶ aktiv Radfahren. S. 104

⁷ 25.08.2008: „Stuttgarter Pedelec-Modell in zwei Stufen“

<http://extraenergy.org/main.php?language=de&id=1873> (24.02.2011)

2.2. Rechtliche Betrachtung

Pedelecs sind rechtlich gesehen

„Fahrräder mit Trethilfe, die mit einem elektromotorischen Hilfsantrieb mit einer maximalen Nenndauerleistung von 0,25 kW ausgestattet sind, dessen Unterstützung sich mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit progressiv verringert und beim Erreichen einer Geschwindigkeit von 25 km/h oder früher, wenn der Fahrer im Treten einhält, unterbrochen wird“⁸.

Hierdurch gelten für Pedelecs die gleichen rechtlichen Bestimmungen wie für „normale“ Fahrräder ohne elektrischen Antrieb (keine Helmpflicht, kein Führerschein, kein Mindestalter, keine Versicherungspflicht).⁹

Die rechtliche Lage ändert sich jedoch, wenn das Pedelec über eine Schiebe- bzw. Anfahrhilfe verfügt. Sobald dies gegeben ist, muss der Fahrer mindestens 15 Jahre alt sein oder vor dem 1. April 1965 geboren und einen Mofaführerschein (Klasse M oder höherwertig) besitzen. E-Bikes und schnellere Pedelecs („Schweizer Klasse“, Motorunterstützung bis 45 km/h, höhere Motorleistung als 250 Watt) gelten im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen „klassischen Pedelecs“ rechtlich als Leichtmofas und sind dadurch versicherungspflichtig.¹⁰

Nach der StVZO ist auch bei Pedelecs eine „batterieunabhängige Beleuchtungsanlage“ Pflicht, doch haben einige Hersteller Sonderbescheinigungen vom TÜV erworben, sodass die Beleuchtung vom Akku mit betrieben werden kann.

Bei der Benutzung von Radwegen gilt es zu differenzieren: Pedelecs, die als Fahrräder gelten (s. oben), dürfen Radwege benutzen. E-Bikes und Pedelecs der „Schweizer Klasse“ hingegen müssen auf der Straße fahren und dürfen zudem keine Personen in Anhängern befördern.¹¹

So profitieren Pedelecs in vielerlei Hinsicht von ihrer rechtlichen Einordnung als Fahrrad und bringen so Vorteile mit sich, die andere Elektrofahrräder nicht bieten.

⁸ Europäisches Parlament und Rat, 18.03.2002: „Richtlinie 2002/24/EG; Kapitel 1, Artikel 1, 1(f)“ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0024:DE:HTML> (27.02.2011)

⁹ aktiv Radfahren. S. 63

¹⁰ Fehlau, Gunnar; Barzel, Peter: „Das E-Bike – Die neuen Fahrräder mit elektrischer Antriebsunterstützung“. 1 Auflage. Bielefeld 2009. S. 83

¹¹ Smolik, Das Elektrorad. S 16-23

3 Umrüstanleitung

3.1. Vorbereitung

Vor dem Kauf eines Pedelecnachrüstsatzes sollte man zwei Dinge berücksichtigen: erstens, ob das Fahrrad, das man aufrüsten will dafür auch geeignet ist und zweitens, welchen Nachrüstsatz man erwerben möchte. Bezüglich der Eignung eines Fahrrads stellt sich zuerst die Frage, ob das Fahrrad von der Wertigkeit her betrachtet für einen sinnvollen Umbau geeignet ist. Zum einen sollte ein umgerüstetes Fahrrad den Preis eines neuen, fertig zu kaufenden Pedelecs nicht übersteigen, zum anderen sollte auch der Umrüstsatz den Preis des Fahrrads nicht vielfach überschreiten.

Neben dieser wirtschaftlichen Sichtweise müssen nun auch noch technische Gegebenheiten betrachtet werden: halten Gabel (am besten Stahlgabel) und Rahmen die starke Belastung durch zusätzliches Gewicht (ca. +10kg) und die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit aus? Zudem muss die Vorder- oder Hinterradgabel breit genug für den Einbau des Motors sein. Bei der Montage von Vorderradnabenmotoren muss die Vordergabel hierfür gesondert zugelassen sein bzw. durch eine „Drehmomentstütze“¹² verstärkt werden.¹³

Beim Kauf eines Nachrüstsatzes gilt es zu berücksichtigen: Nachrüstsätze gibt es in einer Preisspanne zwischen 250 Euro (ohne Akku) und 2000 Euro. Die Unterschiede sind sehr groß. Die Qualität (Haltbarkeit, Verarbeitung, etc.) der einzelnen Komponenten ist natürlich dem Preis entsprechend; zudem nehmen auch die Komfort- und Sicherheitsstandards mit steigendem Preis zu (z.T. beinhalten günstigere Sets keinen Akku, keine Batterieladestandsanzeige, Controller mit nur einer Geschwindigkeitsstufe häufig keine neuen Bremsgriffe, sodass der Motor einige Zeit weiterläuft, obwohl der Fahrer bremst und es so zu gefährlichen Situationen kommen kann).¹⁴

Speziell auf die Auswahl des Akkus ist besonderer Wert zu legen, da dieser maßgeblich die Reichweite und das Gewicht des Pedelecs bestimmt und zusammen mit dem Ladegerät oft einen Preisanteil von bis zu 70% ausmacht. Ein

¹² ein Bauteil, dass die Kraft F , die auf die Gabel wirkt verringert, indem es den Hebelradius r , der für das Drehmoment M verantwortlich ist vergrößert ($M=F \cdot r$); s. Anhang Bild 1+2

¹³ Fehlau, Gunnar: „Das E-Bike“. S.117-127

¹⁴ Smolik, Das Elektrorad. S 80-93

solcher Akku kann zwischen 2,1kg und 13,5kg wiegen. Doch nicht das Gewicht, sondern der Inhalt ist entscheidend für die Qualität des Akkus¹⁵. Durch sein Gewicht nimmt der Akku zudem Einfluss auf den Schwerpunkt des Fahrrads. Daher ist es sinnvoll darauf zu achten, dass der Akku entweder an der Sattelstange bzw. am Rahmen befestigt wird, oder sich in einen neuen Gepäckträger integrieren lässt. Neben Gewicht und Befestigungsmöglichkeit sind natürlich auch der Preis und die Lebensdauer des Akkus Entscheidungsfaktoren. Bleiakkus sind zwar in der Anschaffung günstiger, jedoch sehr schwer und haben eine Lebenserwartung von lediglich einem Jahr. Lithium Batterien hingegen sind teurer in der Anschaffung, dafür aber klein, leicht und haben eine lange Lebenserwartung. Dadurch sind sie auf Dauer die wirtschaftlichere Lösung. Weiterhin ist es wichtig beim Kauf auf die Garantie zu achten, die der Hersteller gibt.¹⁶

Beim Motor sollte man sich erkundigen, wofür dieser entwickelt und ausgelegt wurde, ob eher für das flache Land und leichten Gegenwind, die Alpen und steile Berge oder als Schwerlastmotor für Fahrräder mit Anhänger, wie z.B. die Modelle im Einsatz der Post.¹⁷

Zuletzt stellt sich noch die Frage nach der Wahl zwischen Heck- und Frontantrieb.¹⁸ Der Frontantrieb hat den Vorteil, dass er einfacher nachzurüsten ist, da Ritzel und Schaltung vernachlässigt werden können und zudem das Fahrrad durch den „Allradantrieb“ stabilisiert wird. Voraussetzung dafür ist natürlich eine Gabel, die stabil und breit genug ist den Antrieb aufnehmen zu können. Ist dies nicht der Fall, so bietet sich der Heckantrieb an. Dieser ist zwar aufwändiger einzubauen, hat aber den Vorteil, dass das Antriebsrad nicht so schnell durchdreht, was zum Beispiel im Fall einer Anfahrthilfe zum Tragen kommt. Nachteilig ist hingegen, dass mit einem Heckantrieb eine „Rücktrittbremse“ nicht mehr nutzbar ist.¹⁹

¹⁵ s. Anhang 3 „Diagramm Leistungs-/Energiedichte verschiedener Akkus“

¹⁶ aktiv Radfahren. S. 84-86

¹⁷ a.a.O., S.98

¹⁸ a.a.O., S.99

¹⁹ ebd.

3.2. Bauanleitung

Damit beim Umbau keine großen Komplikationen auftreten, sollte das passende Werkzeug (abhängig vom umzurüstenden Fahrrad) bereit liegen. Wichtig sind neben passenden Schraubenschlüsseln in den meisten Fällen ein „Tretkurbelabzieher“²⁰ sowie eine Rohrzange oder ein Gelenkhakenschlüssel²¹, mit dem das Tretlager von einer Seite zu lösen und der Tretkurbelsensor einzubauen ist. Zur Befestigung von Kabeln und Komponenten werden Kabelbinder benötigt. Zudem sollte man den Akku vor bzw. während des Umbaus laden, damit man das Pedelec unmittelbar nach der Umrüstung testen kann. Sind alle Vorbereitungen getroffen, kann es los gehen. Hierfür sollte das Fahrrad optimaler Weise eingespannt oder umgekehrt aufgestellt werden. **Bremsen lösen** und das **alte Rad ausbauen**. Am einfachsten ist es, wenn man den Motor bereits fertig eingespeicht in einer neuen Felge gekauft hat, ansonsten muss nun der neue Motor in die alte Felge eingespeicht werden. Die **Luft aus dem alten Reifen lassen, Mantel und Schlauch abziehen** und **auf die neue Felge setzen**. Nun den Reifen soweit **aufpumpen**, dass der Mantel gerade ganz ausgefüllt ist und sicherstellen, dass keine Knicke mehr im Schlauch sind (Reifen einige Male auf den Boden stoßen).



Mantel und Schlauch auf neues Rad setzen

Als nächstes das Rad einsetzen und **darauf achten, dass die Kabel auf der richtigen Seite der Radnabe austreten**. In der Beilage des Herstellers ist angegeben, ob der Motor so eingebaut wird, dass das Kabel in Fahrtrichtung rechts bzw. links austreten muss (Vorsicht, wenn das Fahrrad auf dem Kopf steht: die Seitenverwechslung beachten).



Motor richtig herum einbauen

²⁰ ein Werkzeug, die meist benötigt wird, um die Tretkurbel zu lösen; in Baumärkten, Fahrradfachgeschäften oder im Internet für etwa 10 Euro erhältlich (Bild: s. Anhang 4)

²¹ Fahrradspezialwerkzeug zum Lösen der Tretlager-Haltemutter: Bilder s. Anhang 5+6

Wichtig ist zudem, die Unterlegscheiben mit dem Haltezahn richtig herum einzubauen, sodass sich das Vorderrad nicht in der Nabenaufnahme verdrehen kann.²² Bei falsch eingesetztem Motor können sowohl Gabel als auch Motor stark beschädigt werden.) Nun alle Schrauben wieder fest anziehen und testen, ob das Rad freien Lauf hat und auch die Kabel so befestigt sind, dass sie sich nicht mit drehen. .

Im nächsten Schritt wird das **Steuergerät (Controller) montiert**.²³ Gut geeignete Stellen sind unter bzw. am Gepäckträger oder am Sattelrohr. Wichtig ist, die Montagestelle so zentral zu wählen, dass die Kabel zu allen Komponenten lang genug sind, um sie mit dem Steuergerät verbinden zu können. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die **Kabelöffnung nach „unten“**, in Richtung Boden zeigt, sodass ggf. eintretendes Wasser



Steuergerät befestigen (Öffnung unten)

sich nicht im Gerät sammelt und die Elektronik zerstört, sondern wieder abfließen kann. Die Befestigung des Controllers erfolgt am besten mit Kabelbindern.

Nun gilt es das Bedienelement am Lenker zu befestigen sowie – je nach Umbausatz – die neuen Bremsen zu montieren (es gibt auch Umbausätze, bei denen in die Bremsen nachträglich Sensoren eingebaut werden; Umbauinformationen hierzu sind der Herstelleranleitung zu entnehmen).

Meist ist es in diesem Falle erforderlich, die **Griffe vom Lenker zu lösen** (etwas Schmieröl, Fett oder Creme können dies erleichtern). Nun das **Bedienelement** (manchmal auch zwei, bzw. zusätzlich die Bremsen) nach Belieben am Lenker **positionieren und befestigen**.²⁴



Bedienelemente befestigen

Als nächstes wird der **Tretkurbel- bzw. Drehfrequenzsensor eingebaut**. Bei diesem Schritt treten die meisten Komplikationen auf. Der Sensor besteht aus zwei Komponenten: dem Sensor selber und einer Scheibe mit einigen kleinen Magneten (Sensor fest an der Tretkurbel montiert, Magnetscheibe dreht sich).

²² Bild: s. Anhang 7

²³ weiteres Bild: Anhang 8

²⁴ weiteres Bild: Anhang 9

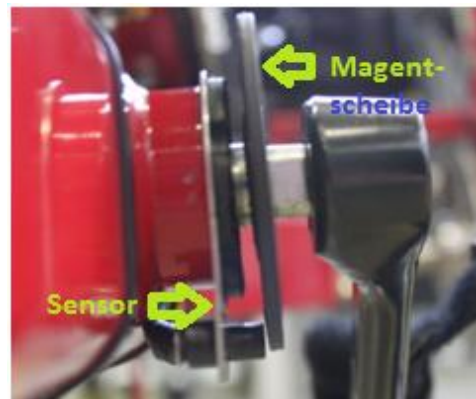
Zum Einbau des Sensors zuerst die **Tretkurbel** auf der Seite ohne Ritzel (Kurbelarm links) **abziehen** (Anlage 10). Dafür wird gegebenenfalls ein Tretkurbelabzieher²⁵ benötigt. Nun muss erst der Sensor befestigt werden. Dafür die große **Haltemutter des Tretlagers abschrauben** (ggf. Spezialwerkzeug²⁶ oder Rohrzange verwenden(Anlage 11)). Den



Haltemutter lösen

Tretkurbelsensor (Anlage 12) mit dem Haltering aufschieben und die Mutter wieder anschrauben (Position des Sensors [oben, unten, schräg...] frei wählbar).

Nun die **Magnetscheibe auf die Nabe drücken**. Hierbei ist die Drehrichtung zu beachten. Diese ist mit Pfeilen auf der Magnetscheibe markiert. Besonders wichtig ist der Abstand zwischen Magneten und Sensor (etwa 1 mm). Bevor die Tretkurbel wieder aufgeschraubt wird, sollte das



Seitenansicht Tretkurbelsensor

gesamte System zum Testlauf angeschlossen werden. Die noch installierte Tretkurbel drehen und so die Funktion aller Komponenten, besonders die des Tretkurbelsensors, überprüfen. Funktioniert alles, kann die Tretkurbel wieder angebaut werden.

Springt der Motor nicht beim Drehen der Pedale an, nochmals den Abstand zwischen Sensor und Magnetscheibe überprüfen und ggf. die Magnetscheibe mit anderer Drehrichtung einbauen.

Sollte der Abstand zwischen den beiden Komponenten (Sensor und Magnetscheibe) nicht passend sein, kann der Metallring, an dem der Sensor befestigt ist, in die erforderliche Position gebogen werden. In Einzelfällen ist es jedoch gar nicht erst möglich, den Sensor hinter der Haltemutter des Tretlagers zu befestigen. Für diesen Fall besteht die Möglichkeit, den Sensor vom Haltering

²⁵ s. Fußnote 20; Bilder: s. Anhang 5+6

²⁶ Bild: s. Anhang 5+6

abzuschrauben und mit einem geeigneten Kleber zu befestigen. „Ambitionierte Heimwerker“ können auch einen eigenen „neuen“ Halter für den Sensor bauen (Anlage 13).

Das **Verbinden von Kabeln und Akku** mit dem Controller muss nicht näher erläutert werden, da jeder Stecker nur ein passendes Gegenstück hat. Diese sind zudem meist farblich markiert. Vorsicht: es kann vorkommen, dass man einige Stecker falschherum verbindet (z.B. auf der einen Seite rot-blau-grün, dann darauf achten, dass man den entsprechenden Gegenstecker nicht 180° gedreht mit grün-blau-rot verbindet).²⁷ Daher unbedingt immer auf die Anordnung der Kabel und deren Belegung achten.

Wenn alles montiert ist und funktioniert müssen die **Kabel gut befestigt** werden, da diese keinesfalls an den Rädern oder der Kette

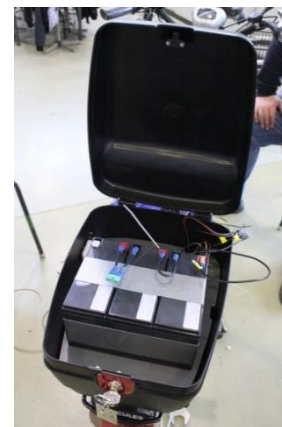


Kabel befestigen

schleifen dürfen. Dazu einzelne Kabel mit

Kabelwicklern immer zu einem Strang zusammenfassen und mit Kabelbindern am Rahmen oder anderen festen Stangen befestigen (s. Bild). Offene Kontakte können mit einem Schrumpfschlauch²⁸ versiegelt werden. Zudem kann man im Fahrradfachgeschäft „Kabelhüllen“ kaufen, die die Kabel schützen²⁹ (gleichzeitig positiver optischer Effekt).

Sollte es für den Akku nicht bereits eine spezielle Halterung geben, kann man diesen auf dem Gepäckträger befestigen (ggf. in einer Tasche; Foto Anlage 16). Auch dies kann mit



Akku in einer Fahrradbox

Kabelbindern geschehen. Möchte man den Akku jedoch nicht fest mit dem Fahrrad verbinden, um ihn zum Laden mit ins Haus nehmen zu können, so kann man diesen in einer Gepäckträgerbox unterbringen (Loch für das Stromkabel bohren). Diese Variante empfiehlt sich auch mit Blick auf einen angeratenen Diebstahlschutz.

²⁷ Bild: s. Anhang 14

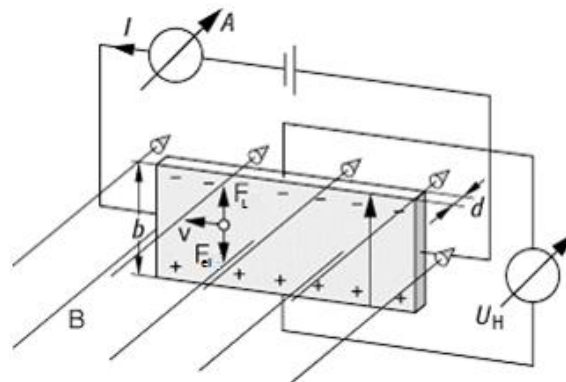
²⁸ Kunststoffschauch, der sich beim Erwärmen stark zusammenzieht und somit isoliert

²⁹ Bild: s. Anhang 15

4. Der Hall-Effekt (Funktion des Trekkurbelsensors)

Auf die Ladungsträger, die sich in einem stromdurchflossenen Leiter bewegen, der sich in einem homogenen Magnetfeld B befindet, wirkt die Lorentzkraft F_L (Drei-Finger-Regel). Auf Grund dieser Kraft werden die Ladungsträger im Leiter senkrecht zu ihrer Fließrichtung abgelenkt und dadurch entsteht auf der einen Seite ein Elektronenüberschuss, auf der anderen Seite ein Elektronenmangel. So ist die eine Seite positiv, die andere negativ geladen und es entsteht zwischen den beiden Seiten ein E-Feld und damit eine elektrische Spannung U_H , die „Hall-Spannung“.³⁰ Diese ist nach dem amerikanischen Physiker Edwin Herbert Hall (1855-1938) benannt, der sie im Jahr 1879 entdeckte.^{31 32}

Dieses elektrische Feld übt nun auf die Ladungsträger eine so große Kraft F_{el} aus, dass die darauf wirkende Lorentzkraft und die elektrische Kraft im



Der Hall-Effekt

Gleichgewicht stehen und sich so die Elektronen wieder gradlinig (als ob kein Magnetfeld vorhanden wäre) bewegen.³³

Setzt man die elektrische Kraft mit der Lorentzkraft gleich, dann gilt bei Gleichgewicht ($F_{el} = F_L$)^{34 35}:

$$U_H = b \cdot v \cdot B$$

Hierbei steht b für die Breite des Leiters und v für die Driftgeschwindigkeit der Elektronen.

³⁰ Grehn, J.; Krause, J.: Mentzler Physik. 4. Auflage Braunschweig 2007. S. 236/237

³¹ Bergmann; Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik – Band 2 – Elektromagnetismus. 8. Auflage Berlin 1999. S. 502

³² 28.12.2010: „Edwin Hall“ http://de.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hall (06.03.2011)

³³ Boysen, Gerd; u.a.: Oberstufe Physik Gesamtband. 1. Auflage Berlin 1999. S. 266/267

³⁴ Rechnung: Anhang 17

³⁵ Bildquelle: http://www.techniklexikon.net/images/h1034_hall-effekt.gif (05.03.2011), Veränderungen vorgenommen (Beschriftung der Kräfte)

Für die Hallspannung ergibt sich³⁶:

$$U_H = R_H \frac{IB}{d}$$

R_H ist dabei die Hall-Konstante, I steht für den Strom, B für das Magnetfeld und d für die Dicke des Leiters.

Die Hallkonstante ist eine spezifische Größe für das Material des Leiters. Zudem kann man aus dem Vorzeichen der Hallspannung darauf schließen, welches Vorzeichen die bewegten elektrischen Ladungen haben. Bei gleicher Stromrichtung würden sowohl positive als auch negative Ladungsträger in die gleiche Richtung abgelenkt, da die Geschwindigkeit v entgegengesetzt gerichtet wäre. Dadurch würde sich demnach die Spannung umpolen³⁷ (Grafik: s. Anhang 20).

Stellt man die Gleichung nach der Hallkonstanten um, ergibt sich für R_H ³⁸:

$$R_H = \frac{1}{ne}$$

Somit kann man mit der Hallkonstanten die Ladungsträgerdichte n des Leiterstoffes bestimmen und das Vorzeichen ihrer Ladung. Bei gut leitenden Metallen liegt n etwa bei der Atomzahldichte des Stoffes; folglich gibt jedes Atom ein Elektron als Ladungsträger frei. Bei vielen Halbleitern jedoch liegt n um mehrere Größenordnungen niedriger als die Atomkonzentration (Faktor 10^{-5} bis 10^{-10}). Daher zeigen Halbleiter meist einen besonders starken Hall-Effekt (Driftgeschwindigkeit deutlich größer bzw. n kleiner $\Rightarrow R_H$ größer³⁹)⁴⁰.

Benutzt wird diese Eigenschaft bei Halbleiterhallsonden, die somit bereits bei dünnen Halbleiterplättchen mit nur einigen Quadratmillimetern Fläche einen starken Halleffekt zeigen. Die Fläche kann deshalb so gering gewählt werden, dass „*B auf ihrer wirksamen Fläche als konstant angesehen werden kann*“⁴¹ ($U_H \sim B$). Somit kann man die Sonde auch zur Messung inhomogener Felder

³⁶ Rechnung: Anhang 18

³⁷ Mentzler, J.B.: Mentzler Physik. 2. Auflage Stuttgart 1988 S. 228

³⁸ Rechnung: Anhang 19

³⁹ Mentzler, J.B.: Mentzler Physik. 2. Auflage Stuttgart 1988 S. 229

⁴⁰ Grethsen; Kneser; Vogel: Physik. Dreizehnte Auflage Berlin 1977 S.266

⁴¹ Von Rhöneck, Christoph: Physik Kompendium. 1. Auflage Stuttgart 1980 S.101

verwenden und dies auch in kleinsten Luftspalten, wie z.B. Generatoren oder Elektromotoren.⁴² Hierbei ist jedoch zu beachten, dass immer nur die Komponente von B gemessen wird, die senkrecht zur Sonde steht⁴³.

Hallsensoren werden neben der Magnetfeldmessung auch als berührungs- und kontaktlose Signalgeber genutzt. Diese werden oft zur Drehzahlmessung verwendet, z.B. in Turbinen, in unserem Fall jedoch in Form eines Tretkurbel- bzw. Drehfrequenzsensors.⁴⁴ Vorteil dieser Messmethode ist, dass sie ohne Kontakt funktioniert und somit fast verschleißfrei und zudem schmutzunempfindlich ist.

5. Resümee

Pedelecs sind besonders auf Grund ihrer rechtlichen Vorteile und ihrer einfachen Handhabung für kurze Strecken eine gute Alternative zum Auto. Auch verändert ein Umbau nicht die Funktionalität des Fahrrads im ursprünglichen Sinne, sodass dieses auch ohne Elektrounterstützung weiterhin einschränkungslos genutzt werden kann.

Da mir der Aspekt der Umweltverträglichkeit bei der Betrachtung von Pedelecs besonders wichtig ist, abschließend eine kurze anschauliche Darstellung des Energieverbrauchs: mit dem Strom, den ein Pedelec braucht um über eine Strecke von 33km (Mischbetrieb) den Fahrer zu unterstützen, kann man eine Kanne Kaffee kochen oder zwei Minuten duschen⁴⁵. Mit drei Litern Diesel kann man etwa 30km mit dem Auto fahren, jedoch 5000km mit einem Pedelec.⁴⁶

Pedelecs sind ideal für Menschen, die durch die Elektrounterstützung das Auto stehen lassen können oder dadurch wieder Freude am Fahrrad fahren finden.

⁴² Grehn, J.; Krause, J. : Mentzler Physik. 4. Auflage Braunschweig 2007. S. 236/237

⁴³ Grafik: Anhang 21

⁴⁴ Grafik: Anhang 22

⁴⁵ betrachtet wird nur die Energie, die für das Erwärmen von 10l Wasser von 10° auf 45° benötigt wird

⁴⁶ aktiv Radfahren. S. 85/109

6. Anhang:



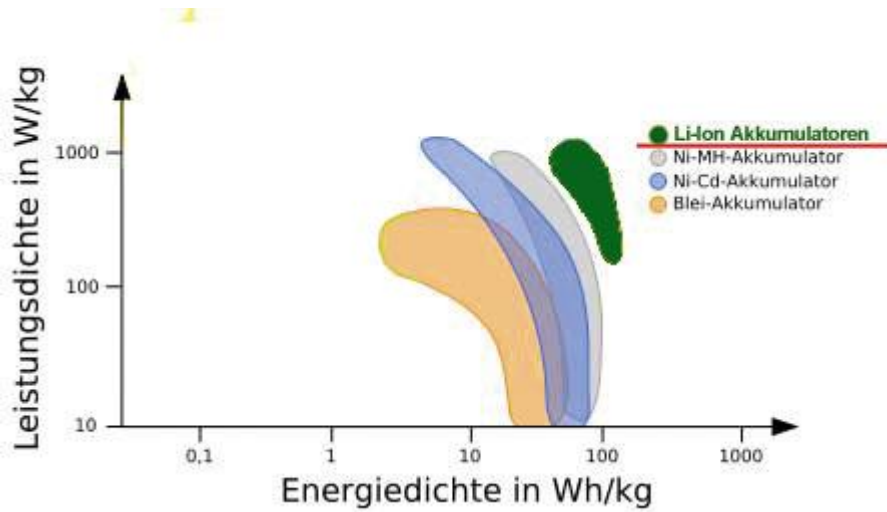
1)

Drehmomentstütze 1



2)

Drehmomentstütze 2



3)

Diagramm Leistungs-/Energiedichte verschiedener Akkus



4)

Tretkurbelabzieher

¹ Quelle: <http://www.pedelecforum.de/forum/imgcache/1360.png> (08.03.2011)

² Quelle: http://e-mobility.ch/ebikes/Wepon/pics/engerigedichte_Akkus.jpg (08.03.2011)

³ Quelle: http://de.academic.ru/pictures/dewiki/75/Kurbelabzieher_01_KMJ.jpg (08.03.2011)



4

Gelenkhakenschlüssel zum Lösen des Tretlagers



Befestigungsmöglichkeit für den Controller



Befestigung eines anderen Bedienelements



Tretkurbel lösen

⁴ Quelle: <http://www.wocken.com/var/StorageWocken/Produktbilder/large/01-308310.jpg> (08.03.2011)

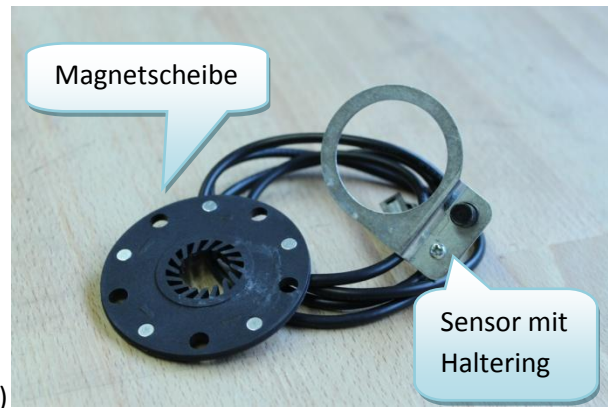
⁵ Bildquelle: Martin Behrs

11)



Haltemutter lösen 2

12)



Magnetscheibe

Sensor mit Haltering

Tretkurbelsensor und Magnetscheibe

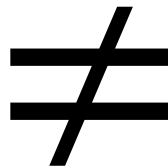
13)



Befestigungsmöglichkeit des Sensors

6

14)



Auf die richtige Belegung achten!

⁶ Bildquelle: <http://www.pedelecforum.de/forum/imgcache/4644.png> (13.03.2011)



15)

Kabelhülle



16)

Akku in einer Tasche

17) Bei Kräftegleichgewicht gilt:

$$F_L = F_{el}$$

$$e * v * B = e * E$$

$$e * v * B = e * \frac{U}{b}$$

$$U_H$$

$$18) U_H = v * b * B$$

v: Driftgeschwindigkeit
 u: Beweglichkeit der Elektronen
 E_a: äußere angelegte Feldstärke
 I: Stromstärke
 l: Länge
 R: Widerstand des Leiters
 δ: spezifischer Widerstand des Leiters
 d: Dicke des Leiters
 b: Breite des Leiters
 n: Dichte der Elektronen

$$U_H = v * b * B$$

$$U_H = u * E_a * b * B$$

$$U_H = u * \delta * \frac{IB}{d}$$

$$U_H = R_H \frac{IB}{d}$$

$$\text{Hallkonstante: } R_H = u\delta$$

$$v = u * E_a$$

$$E_a = \frac{U_a}{l} = R \frac{I}{l}$$

$$R = \delta \frac{l}{A} = \delta \frac{l}{db}$$

$$E_a = \delta \frac{Il}{ldb} = \delta \frac{I}{db}$$

$$19) R_H = u\delta$$

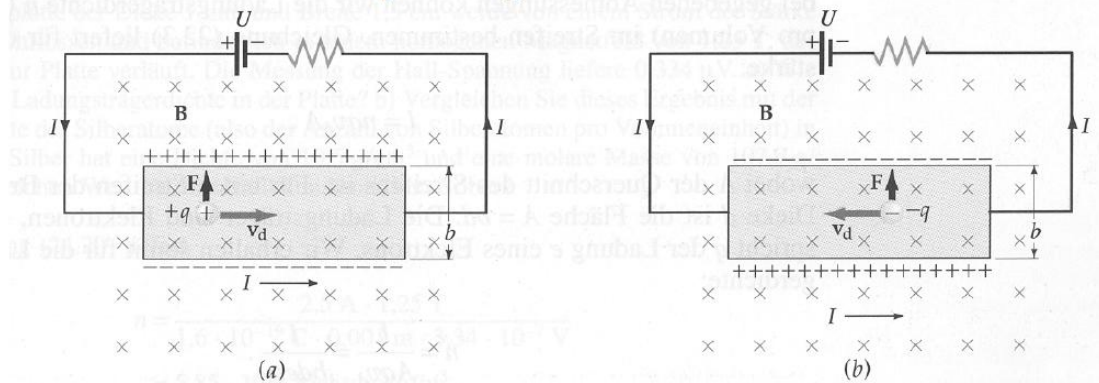
$$\delta = \frac{1}{une}$$

$$R_H = u * \delta = \frac{u}{une} = \frac{1}{ne}$$

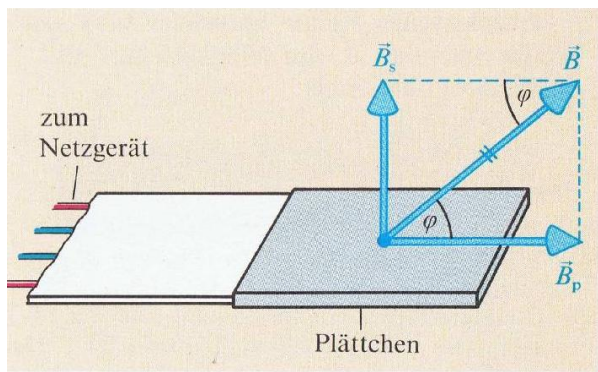
$$[R_H] = 1 \frac{m^3}{C}$$

u: Beweglichkeit der Elektronen
 R_H: Hallkonstante
 δ: spezifische Widerstand des Leiters
 n: Dichte der Elektronen
 e: Elementarladung

20)

Vorzeichen der HALL-Spannung

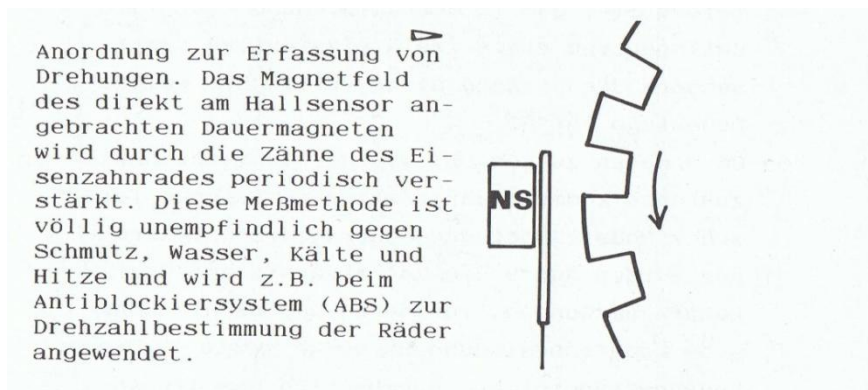
7



21)

8

Hallsonde misst nur die senkrechte Komponente von B



22)

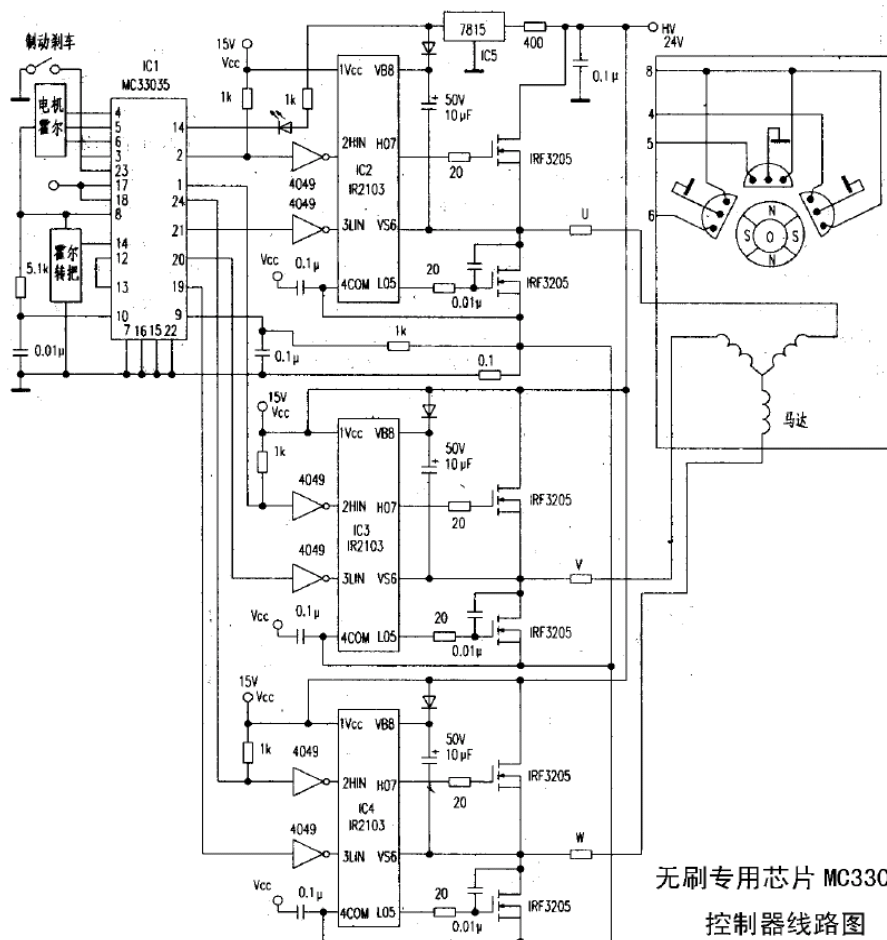
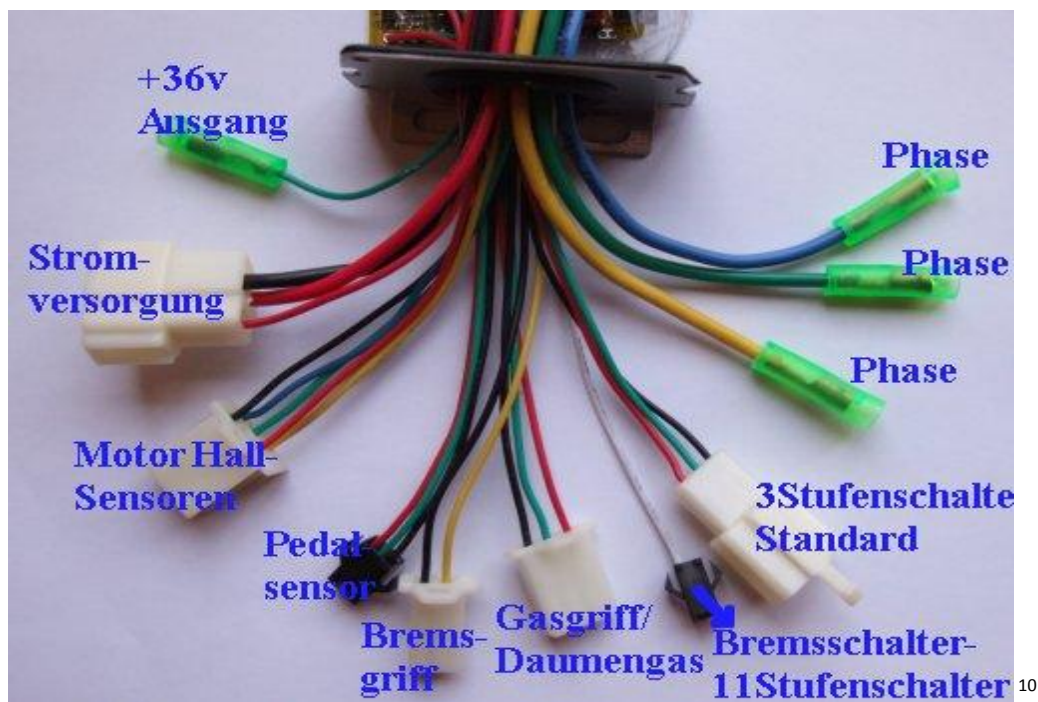
9

⁷ <http://www.mathe-schule.de/download/pdf/Physik/halleffekt.pdf> (05.03.2011)

⁸ Dorn; Bader: Physik Oberstufe Gesamtband 12/13 Neubearbeitung Hannover 1986 S.59.2

⁹ Schmidt, Werner: Physikaufgaben – Beispiele aus der modernen Arbeitswelt. 1. Auflage Stuttgart 1987 S. 163

zusätzliche Anlagen: Kabelbelegung und Stromlaufplan eines Controllers



无刷专用芯片 MC33035
控制器线路图

11

¹⁰ Bildquelle: Martin Behrs

¹¹ Bildquelle: Martin Behrs und Wolfgang Rode

7. Quellen- und Literaturverzeichnis

aktiv Radfahren. Ausgabe 7-8/2008

Smolik, C.; Bollschweiler, M.; Ziese, V.: Das Elektrorad. 1. Aufl. Bielefeld 2010

Fehlau, Gunnar; Barzel, Peter: „Das E-Bike – Die neuen Fahrräder mit elektrischer Antriebsunterstützung“. 1 Auflage. Bielefeld 2009

Grehn, J.; Krause, J. : Mentzler Physik. 4. Auflage Braunschweig 2007

Bergmann; Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik – Band 2 – Elektromagnetismus. 8. Auflage Berlin 1999

Boysen, Gerd; u.a.: Oberstufe Physik Gesamtband. 1.Auflage Berlin 1999

Mentzler, J.B.: Mentzler Physik. 2. Auflage Stuttgart 1988

Kuhn, Wilfried: Physik – Quantenphysik. Braunschweig 1976

Grethsen; Kneser; Vogel: Physik. Dreizehnte Auflage Berlin 1977

Von Rhöneck, Christoph: Physik Kompendium. 1. Auflage Stuttgart 1980

Dorn; Bader: Physik Oberstufe Gesamtband 12/13. Neubearbeitung Hannover 1986

Szaliies: Physik 2 – kurz & klar. 2. Auflage Donauwörth 2002

Luchner, Karl: Physik ist überall – Streifzüge durch Natur, Alltag, Technik und Forschung. 1.Auflage München 1994

Müller, Leitner, Mráz: Physik Grundkurs 1. und 2. Semester. 1. Auflage München 1988

Schmidt, Werner: Physikaufgaben – beispiele aus der modernen arbeitswelt. 1. Auflage Stuttgart 1987

Internetquellen:

<http://juniorakademie.mcs-bochum.de/start/aktuelles/aktuelles/article/bericht-vom-aktionstag-elektromobilitaet/index.html>

25.08.2008: „Stuttgarter Pedelec-Modell in zwei Stufen“

<http://extraenergy.org/main.php?language=de&id=1873> (24.02.2011)

Europäisches Parlament und Rat, 18.03.2002:“ Richtlinie 2002/24/EG; Kapitel 1, Artikel 1, 1(f)“ [http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0024:DE:HTML)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0024:DE:HTML](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0024:DE:HTML) (27.02.2011)

28.12.2010: „Edwin Hall“ http://de.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hall (06.03.2011)

Bildquellen

Alle nicht spezifisch ausgezeichneten Bildquellen beruhen auf Bildmaterial, das ich selber erstellt habe.

Titelseite:

http://images.fahrrad.de/products/Kopie_Vermont_Sondo_EPedalic_1024x768%5Ba9jPQWB2LVDIhcX21L6Y9w,,%5D.jpg?forceSize=true&forceAspectRatio=true (12.03.2011)

8. Selbstständigkeitserklärung:

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, in jedem einzelnen Fall unter der Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Das gleiche gilt auch für beigegebene Zeichnungen, Bilder und Darstellungen.

Bochum, den