

Dauermagnetsysteme in Fahrraddynamos

Dieter Oesingmann, Gerd Böttcher

1 Überblick

Die Fahrraddynamos sind mit wenigen Ausnahmen zu Beginn ihrer Entwicklungsgeschichte um 1900 als dauermagneterregte Wechselstromgeneratoren entwickelt worden. Die Gestaltung und das Gewicht der seit 118 Jahren gebauten Dynamos sind in erster Linie bestimmt von den Eigenschaften der jeweils verfügbaren Magnetmaterialien. In Wechselwirkung mit dem technologischen Stand der Ankerfertigung wurden viele Varianten des dauermagnetischen Erregersystems entworfen und in die Fertigung überführt, von denen 27 in der Übersicht im Bild 1.1 benannt sind. Die Ausführungsformen sind geordnet nach den Magnetmaterialien, zu denen Magnetstähle, AlNi-Magnete, AlNiCo-Magnete, keramische Magnete und NdFeB-Magnete gehören, und in Abhängigkeit davon, ob der Magnet im Rotor oder im Stator untergebracht ist. Unabhängig von den spezifischen Konstruktionen in den einzelnen Herstellerfirmen, werden die Erregersysteme vorgestellt, wobei die zeitliche Aufeinanderfolge der Markteinführungen nur bedingt mit der gewählten Reihenfolge in den folgenden Ausführungen übereinstimmen.



Bild 1.1: Magnetmaterialien und konstruktive Gestaltung ruhender und rotierender Erregersysteme

Die ersten Versuche, einen Generator aus einem Magneten und einer Spule zu bauen, gehen auf Hippolyte Pixii 1832 (1776-1861) und Emil Stöhrer 1843 (1813-1890) zurück (Bild 1.2). Verwendet wurden jeweils Hufeisenmagnete und Zylinderspulen. H. Pixii versetzte den Magneten in Rotation, während E. Stöhrer einen Aufbau

wählte, bei dem der Magnet ruhte. Zur Vergrößerung des Luftspaltfeldes verwendeten Emil Stöhrer um 1877 und Marcel Deprez 1879 keine massiven sondern geschichtete Hufeisenmagnete, weil sich dünnere Bleche besser magnetisieren ließen. Solche Magnetpakete kamen aber in Fahrraddynamos nicht zum Einsatz.

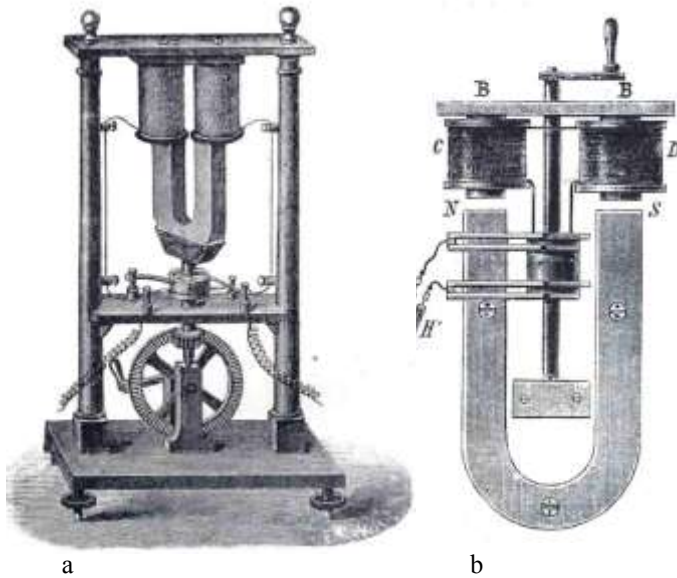


Bild 1.2: Erste Dauermagnete in Gleichstromgeneratoren:
 a) Hippolyte Pixii 1832, rotierender Hufeisenmagnet,
 b) Emil Stöhrer 1843, ruhender Hufeisenmagnet,

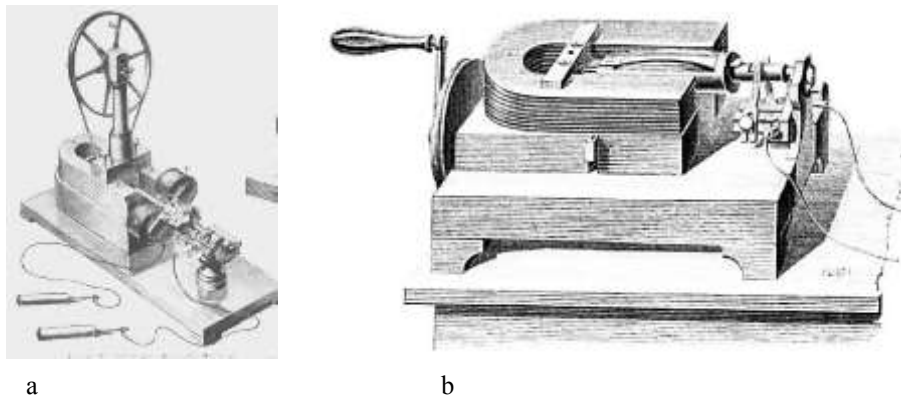


Bild 1.3: Generatoren mit geschichteten Hufeisenmagneten:
 a) Emil Stöhrer 1877,
 b) Marcel Deprez 1879



Bild 1.4: Einfluss der Dauermagneteigenschaften auf die Größe der Dynamos von 1910 bis 1956



Die Entwicklung der Dauermagnetmaterialien bewirkte die Verkleinerung der Dynamoabmessungen. Das lässt sich an ausgewählten Exemplaren der Firma Berko erkennen, die im Zeitraum von 1910 bis 1956 produziert wurden. Die Änderung der Magnetabmessungen wird in der Gegenüberstellung eines Hufeisenmagneten mit einem Walzenmagneten sichtbar (Bild 1.5).

Bild 1.5: Gegenüberstellung eines Hufeisenmagneten von 1910 mit einem Walzenmagneten von 1956

2 Ruhende Stahlmagnete

In Verbindung mit den Hufeisenmagneten werden nicht wie bei Pixii und Störcher Zylinderspulen (Drahtrollen) sondern Doppel-T-Anker eingesetzt, die nicht an den Stirnseiten der Pole sondern zwischen den Magnetschenkeln rotieren. Realisiert wurden zwei Stellungen des Ankers und des Magneten. Einmal steht die Ankerachse senkrecht auf der vom Magneten aufgespannten U-förmigen Fläche (Bild 2.1) und in der zweiten Anordnung liegt die Ankerachse parallel zur Hufeisenebene (Bild 2.2). Zunächst wurde der Hufeisenmagnet mit seinem rechteckigen Querschnitt ohne Polschuhe verwendet (Bild 2.3a). Eine Anpassung der Magnetpole an die zylindrische Oberfläche des Ankers erfolgte mit Blechen (Bild 2.3b) oder mit massiven Polschuhen (Bild 2.1 und Bild 2.2). Im Bild 2.3c und sind die Polflächen ausgefräst, sodass Zusatzelemente für die Anpassung entfallen.



Bild 2.1: Hufeisenmagnet mit einem Anker senkrecht zur Hufeisenebene



Bild 2.2: Hufeisenmagnet mit einem Anker in der Hufeisenebene

a

b

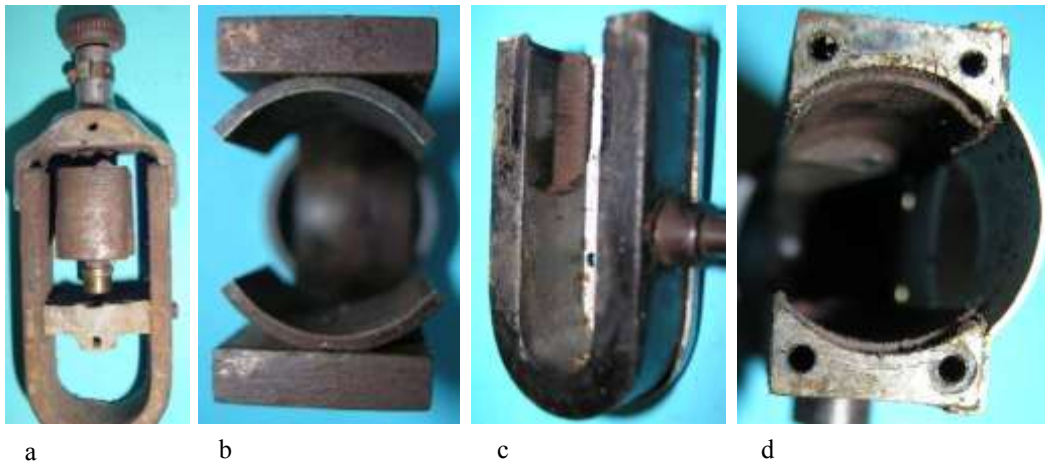


Bild 2.3: Polgestaltung: a) Ohne Polschuhe, b) Massive Bleche zu Polbögen geformt, c) Magnet mit gefrästen Polflächen, d) Stirnseiten des Magneten mit gefrästen Polflächen

Die Hufeisenmagnete umspannen einen großen ungenutzten Raum, sodass die Reduzierung des Bauvolumens die Ursache für die Verwendung eines Ringmagneten war (Bild 2.4a). Er ist an einer Stelle geschlitzt. Von den zwei Enden sind massive Polschuhe nach innen gerichtet angeflanscht, sodass die Drehachse des Läufers mit der geometrischen Achse des Ringmagneten übereinstimmt. Im Beispiel von Bild 2.4b bilden die Schenkel des Hufeisenmagneten einen spitzen Winkel, sodass eine V-Form entsteht, bei der es sich anbietet, die Polflächen der Krümmung des Ankers anzupassen, um separate Polschuhe einzusparen.

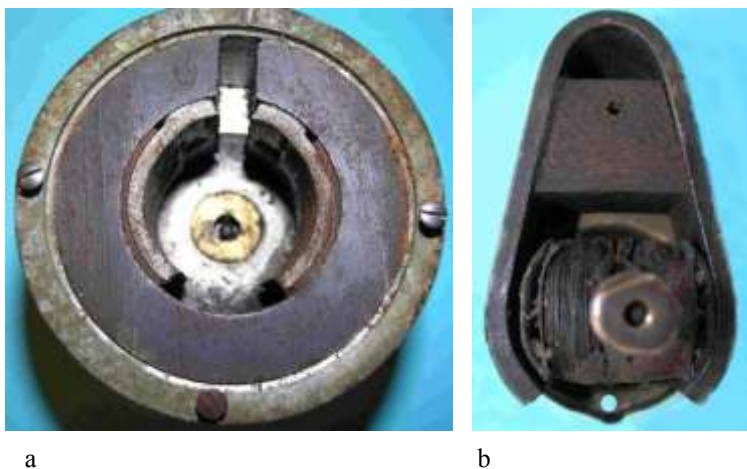


Bild 2.4: Modifikationen des Hufeisenmagneten

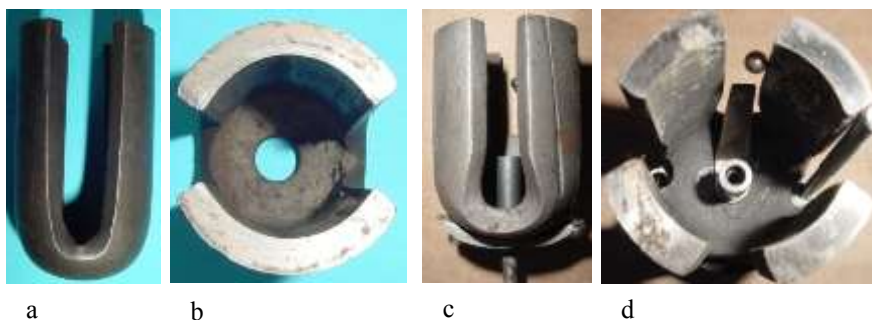


Bild 2.5: Tulpenmagnete: a) und b) Zweipolige Anordnung, c) und d) Vierpolige Ausführung

Die Anpassung des Magneten an die Kontur des Ankers erfolgte mit den Tulpenmagneten, deren Polschuhe sich wie ein Kelch um den Anker legen (Bild 2.5). Sie werden zwei- und vierpolig ausgeführt. Ausgangsmaterialien sind Rechteckprofile in der Stärke zwischen 4 mm und 8 mm, die zugeschnitten und verformt werden. Eine Vereinfachung der Herstellung vierpoliger Konturen stellen zweipolige Magnetsegmente dar (Bild 2.6), mit denen auch 6- und achtpolige Erregersysteme zusammengestellt werden können (Bild 2.7). Eine Alternative zu den einteiligen Tulpenmagneten mit vier Polen ist die Gabelpolarordnung, die aus zwei zum U gebogenen Stäben besteht (Bild 2.8). Sie sind unterschiedlich lang und werden zum Kreuz zusammengesetzt.

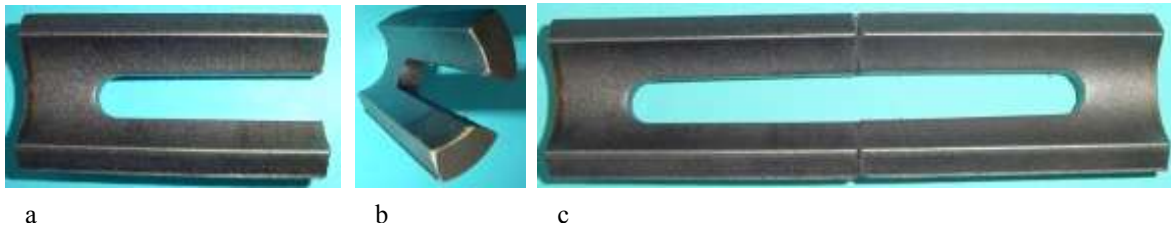


Bild 2.6: Zweipolige Magnetsegmente: a) Innenseite, b) Pollücke, c) Halbzeug mit Langloch

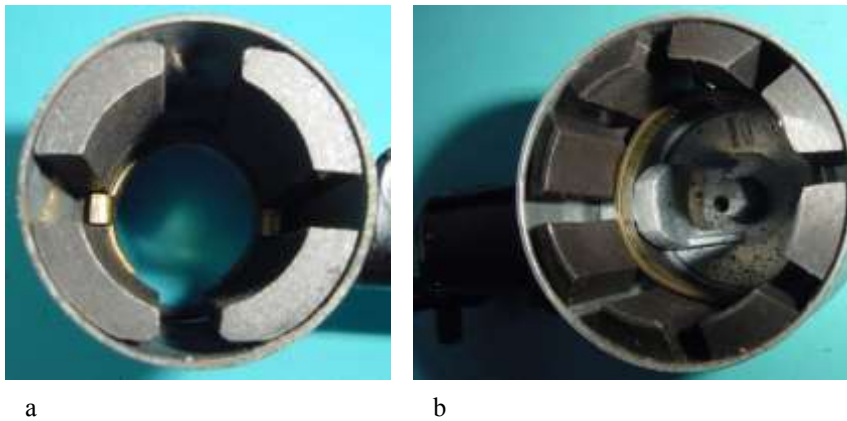


Bild 2.7: Erregersysteme mit zweipoligen Magnetsegmenten
a) Vierpolig
b) Achtpolig

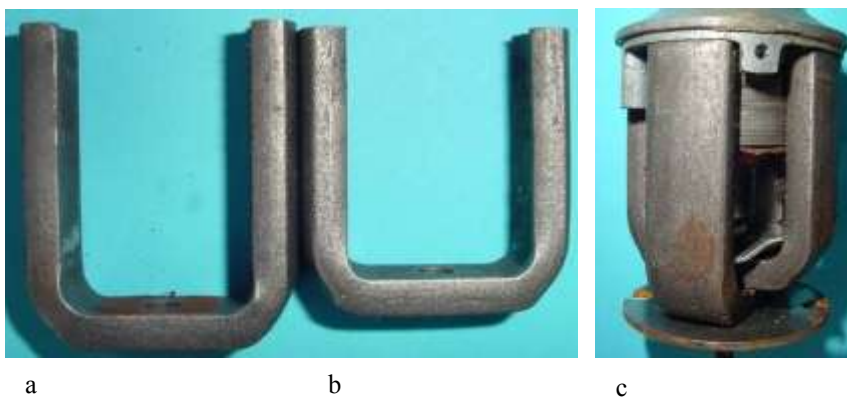


Bild 2.8: Gabelpolarordnung:
a) und b) Zum U gebogene Profilstäbe
c) Montiertes Erregersystem

Eine weitere Vereinfachung der Magnetfertigung erfolgte durch die Kombination von Magnetstahlstäben mit einem ferromagnetischen Joch (Bild 2.8). Das letztere wurde so konstruiert, dass die Stäbe durch Verformung des Jochs oder mit einer Messingbandage am Joch befestigt werden können. So wurden vorrangig vierpolige Erregersysteme hergestellt. Die Möglichkeiten, aus Profilmaterial, ruhende Magnetanordnungen mit den Polzahlen 2 bis 8 zu konstruieren, sind im Bild 2.10 zusammengestellt.

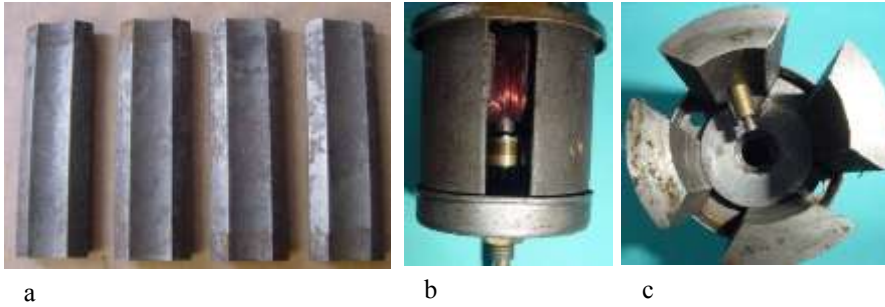


Bild 2.9: Stabmagnete: a) Vier einzelne Stäbe, b) Magnet im Bodentopf eingesetzt, c) Jochplatte drückt die Stäbe gegen den Bodentopftrand

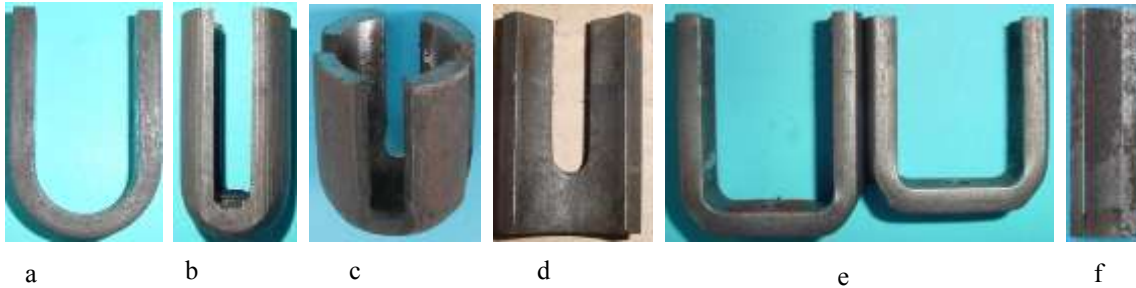


Bild 2.10: Ruhende Magnetstahlsysteme: a) Hufeisenmagnet, b) Zweipoliger Tulpenmagnet, c) Vierpoliger Tulpenmagnet, d) Zweipoliges Segment, e) Stimmgabelmagnete, f) Stabmagnet

3 Rotierende Magnetstahlanordnungen

Die Vorstellung, die schweren Magnetstähle rotieren zu lassen und den Anker am Gehäuse zu befestigen, erscheint bei Drehzahlen bis zu $10\,000\text{ min}^{-1}$ schwer realisierbar. Dennoch ist es erfolgreich praktiziert worden, um die Schleifkontakte zur Stromübertragung einzusparen.

Dynamos mit rotierendem zweipoligem Tulpenmagneten wurden nicht nur erprobt sondern auch serienmäßig gefertigt. Die Begründung, warum viele Firmen davon Abstand nahmen, liefert die Bruchstelle im durchbohrten Magnetbogen, die im Bild 3.1b dargestellt ist. Zur Vermeidung der hohen Drehzahlen wurde eine Fliehkraftkupplung ergänzt (Bild 3.1c und b), die bei entsprechender Fahrgeschwindigkeit den Magneten von der Welle mit dem Reibrad trennt.

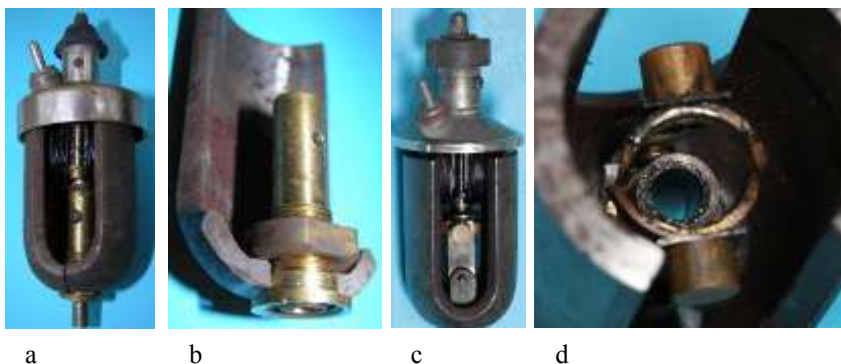


Bild 3.1: Rotierender zweipoliger Tulpenmagnet: a) Positionen des Ankers und des Magneten im Gehäuse, b) Zerbrochener Magnet mit Montagehülse, c) Läufer mit Fliehkraftkupplung, d) Fliehkraftmassen mit Kuppelungsbacken

Die Bruchneigung des Polrades ist in der vierpoligen Ausführung im Bild 3.2, bei der die Pole an der Peripherie einer Scheibe abgewinkelt sind, nennenswert geringer.

Mit der Montage eines ringförmigen Magneten auf einer Lagerplatte mit hochgezogenen Rand, an dem sich der Magnet abstützt, ist die Beschädigung des Magneten durch Fliehkräfte ausgeschlossen (Bild 3.3). Die Ausbildung der Pole durch das Einklappen der Magnetenden hat den Vorteil, dass sich die Magnetlänge vergrößert.



a



b

Bild 3.2: Magnetstahlscheibe mit abgewinkelten Polen
a) Sternanker,
b) Polsystem



Bild 3.3: Polrad mit eingeklappten magnetischen Polschuhen

Statt der Außenläufer, wie sie im Bild 3.1, Bild 3.2 und Bild 3.3 dargestellt sind, wurden auch Innenläufer entwickelt. Deren Polräder sind aus Sternblechen auf der Welle pakettiert (Bild 3.4) oder aus einem massiven Zylinderblock gefertigt (Bild 3.5).



a



b

Bild 3.4: Geblechte Polräder
a) 14 gestapelte Bleche
b) Verschraubung des Pakets



Bild 3.5: Massives Polrad mit gefrästen Pollücken

Statt der radialen Luftspaltfelder, hat man etwa 80 Jahre nach den Versuchen von Pixii und Stöhrer (Bild 1.2) die geometrischen Magnetachsen ebenfalls parallel zur Drehachse des Läufers angeordnet. Im Bild 3.6 sind sechs Säulenmagnete um die Welle gruppiert und in einem Joch aus mehreren ferromagnetischen Scheiben eingelassen. Ihren Stirnflächen stehen die der Spulenkerne des Ankers gegenüber. Mit dieser Anordnung lassen sich Luftspalte im Bereich von 0,1mm einstellen. Statt mit sechs einzelnen Säulen wurde das Polrad auch aus einem massiven Zylinderblock hergestellt, bei dem die Pollücken tief eingefräst sind (Bild 3.7).

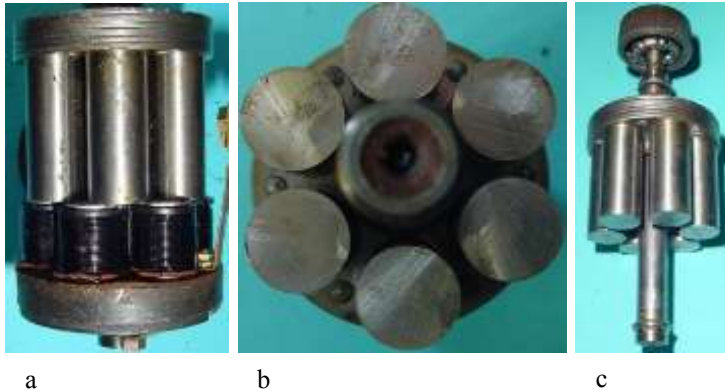


Bild 3.6: Säulenmagnete
a) Generator
b) Polflächen
c) Magnete mit Welle

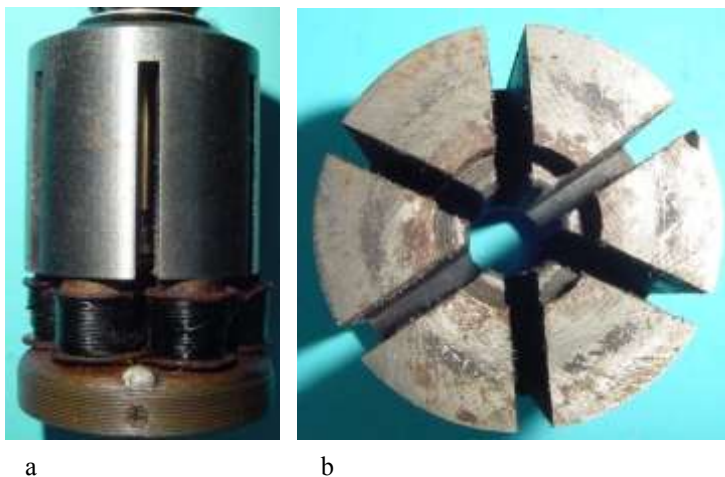


Bild 3.7: Gefräster Zylinderblock
a) Generator
b) Polflächen

4 Ruhende AlNi-Magnetsysteme

Mit der Verfügbarkeit von AlNi-Magneten ab 1932 ergaben sich konstruktive Möglichkeiten, sowohl ruhende als auch rotierende raumsparende Erregersysteme zu entwerfen. Zunächst wurden Walzenmagnete eingesetzt. In der Kombination mit ferromagnetischen Gabeln wurden sie axial magnetisiert (Bild 4.1) und in Kombination mit ferromagnetischen Stäben erfolgte eine radiale Magnetisierung (Bild 4.2).

Eine Übersicht ruhender Magnetrings mit 4 bis 10 Polen, die unmittelbar im Gehäuse eingepasst sind, vermittelt die Zusammenstellung im Bild 4.3. Die darin gezeigten Varianten umfassen den Anker, sodass die axiale Ausdehnung des Generators vergleichsweise kurz ist. Die quadratische Außenkontur des vierpoligen Magneten im Bild 4.3a ergibt sich aus der Begrenzung des Materialeinsatzes. Die Ecken sind abgerundet um einen passgerechten Sitz im zylindrischen Gehäuse zu erreichen. Die Zielstellung, mit wenig Magnetmaterial auszukommen, kennzeichnet die vierpolige Variante mit zwei Ringsegmenten im Bild 4.3f. Dies gelingt durch das Eingießen von vier ferromagnetischen Polschuhen im Gehäuse.



Bild 4.1: Axialmagnetisierte Magnetwalze mit ferromagnetischen Gabelpolen



Bild 4.2: Radialmagnetisierter Magnetstern: a) An ferromagnetische Stäbe angepasster Magnet, b) Sternmagnet, c) Eingegossene ferromagnetische Stäbe

a

b

c

Die 10-poligen Magnete haben ausgeprägte Pole und werden ins Gehäuse eingepresst (Bild 4.3b) oder in ein Kunststoffgehäuse eingegossen (Bild 4.3c). Ihre Außenkonturen haben eine zylindrische oder gewellte Form (Bild 4.3b und d). Das größte Magnetgewicht wist der 10-polige Magnetring mit zylindrischen Innen- und Außenflächen im Bild 4.3e auf.

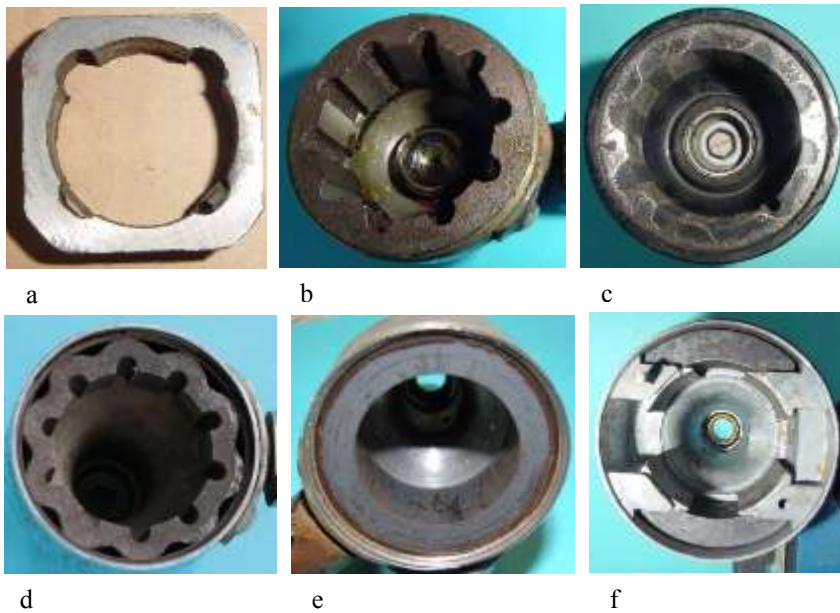


Bild 4.3: Ausführungsformen der AlNi-Magnetringe:
 a) Vierpoliger Ring mit quadratischer Außenkontur,
 b) 10-poliger Magnet mit ausgeprägten Polen und zylindrischer Außenkontur,
 c) Im Kunststoff eingegossener Magnet,
 d) Gewellte Außenkontur,
 e) Zylindrische Innen und Außenkontur, f) Kreisringsegmente eines vierpoligen Dynamos

5 Rotierende Polräder mit AlNi-Magneten

Die Eigenschaften des AlNi-Magnetmaterials wurden genutzt, um die Stromleitung über Schleifkontakte in Fahrraddynamos zu vermeiden. Es wurden ausschließlich Innenläufer mit fliegender Lagerung konstruiert, wobei in Abhängigkeit von den Technologien zur Herstellung und Bearbeitung der Magnetkörper 2-polige bis 10-polige Polräder hergestellt wurden. Dabei lassen sich Polradausführungen mit und ohne ferromagnetische Polschuhe unterscheiden. Zur Anpassung an die gekrümmten Ankerpolschuhe wurden zylindrische und quaderförmige Grundkörper mit geblechten und massiven ferromagnetischen Polschuhen komplettiert (Bild 5.1).



Bild 5.1: Zweipolige Dauermagnete mit ferromagnetischen Polschuhen: a) 2-polig mit geblechten Polschuhen, b) Zylindrischer Magnet mit Aluminiumtragkörper, c) Gabelpolschuhe für b) (4-polig), d) 8-polige Klauenpolanordnung

In der weiteren Entwicklung der Magnettechnologien verzichtete man auf die Zusatzelemente und hat die Magnete so gestaltet, dass die Magnete selbst die Polflächen bilden (Bild 5.2). Ein technologisches Problem stellte die Befestigung der Magnete an der Welle dar. Während dafür im Bild 5.1 die ferromagnetischen Polschuhe genutzt wurden, kamen bei den Magnetkörpern ohne Polschuhe Schraubverbindungen sowie Klebe- und Ver-
 gusstechniken zum Einsatz.

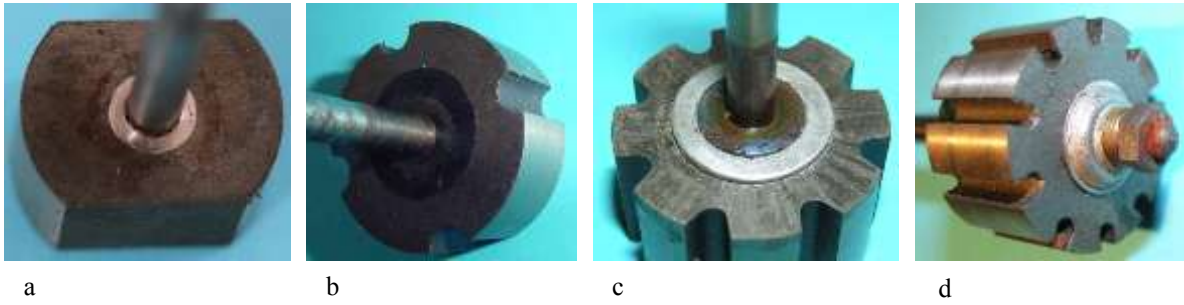


Bild 5.2: AlNi-Polräder: a) 2-polig, b) 4-polig, c) 8-polig, d) 10-polig

6 Keramische Magnete

Bei den Seitendynamos vollzog sich in den 50er Jahren die Ablösung der AlNi-Magnete durch Keramikmagnete. Eingeleitet wurde dieser Prozess von den Blockmagneten, die um den rotierenden Anker gruppiert sind (Bild 6.1). Bemerkenswert ist, dass dafür auch kunststoffgebundene Ferrite (Bild 6.1a) verwendet wurden. Die störanfällige Stromleitung durch die Lager wurde mit einer rotierenden Magnetscheibe vermieden (Bild 6.2b). Sie ist in axialer Richtung 6-polig magnetisiert. Das Polrad mit einem walzenförmigen Magneten im Bild 6.2c beherrscht bis heute die Auslegung achtpoliger Seitendynamos. Sehr selten sind Dynamos mit rotierendem keramischem Blockmagneten (Bild 6.2a).

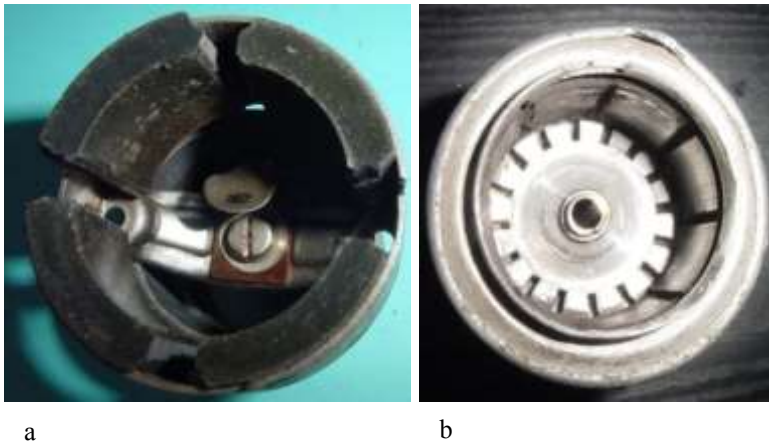


Bild 6.1: Blockmagnete im Ständer:
a) Kunststoffgebundenes
Keramikpulver
b) 8 Keramikblöcke

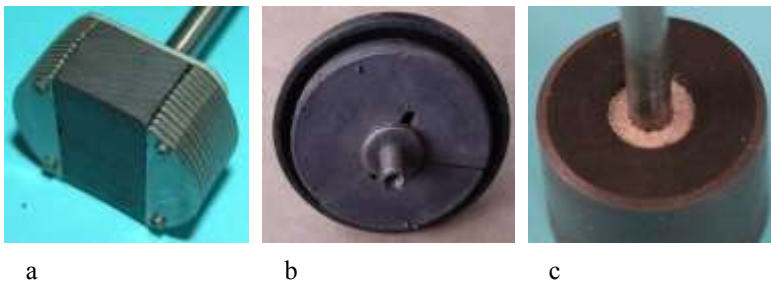


Bild 6.2: Rotierende Keramikmagnete:
a) Blockmagnet mit geblechten Pol-
schuhen
b) 6-polig magnetisierte Scheibe
c) Walzenform

Mit flexiblen kunststoffgebundenen Magnetbändern wurden die Außenläufer von Walzendynamos aber auch von Seitendynamos ausgerüstet (Bild 6.3).



Bild 6.3: Kunststoffgebundene Magnetstreifen
a) Walzendynamo
b) Seitendynamo

a

b

7 AlNiCo-Läufer

AlNiCo-Magnete wurden etwa 1938 in Nabendynamos eingesetzt. Im Bild 7.1 ist ein Außenläufer mit 20 Polen angegeben. Er rotiert um einen Klauenpolanker, dessen Klauenpolkränze aus drei übereinander gestapelten Blechen bestehen.



Bild 7.1: AlNiCo-Magnet im Nabendynamo 1938

a

b

8 NdFeB-Magnete

Während AlNiCo-Nabendynamos heute keine Rolle spielen, haben sich NdFeB-Magnete in Nabendynamos durchgesetzt. Die Innenwand der Vorderradnaben werden mit einem Magnetring (Bild 8.1a), mit Magnetsegmenten (Bild 8.1b) oder mit Magnetstäben bestückt (Bild 8.1c und d).



Bild 8.1: Bestückung der Naben mit NdFeB-Magneten:

- a) Geschlossener Magnetring 28 Pole,
- b) 5 Magnetsegmente 28 Pole,
- c) 44 Magnetstäbe
- d) 26 Magnetstäbe

a

b

c

d

Eine auffällige Gestaltung des Polrades stellt die Variante im Bild 8.2 dar. Das Polrad wird nur von einem Magnetring gebildet, der doppelt so viel Pole aufweist als der Anker.

Die große Energiedichte der NdFeB-Magnete ermöglicht es, Luftspalte im magnetischen Kreis vorzusehen, die lang genug sind, um darin Ankerspulen ohne ferromagnetischen Kern unter zu bringen. Erregersysteme, die in solchen Anordnungen eingesetzt wurden, sind im Bild 8.3 und Bild 8.4 angegeben. Dabei handelt es sich um vierpolige Polräder mit einem Innenläufer (Bild 8.3) und mit einem Zwischenanker (Bild 8.4).

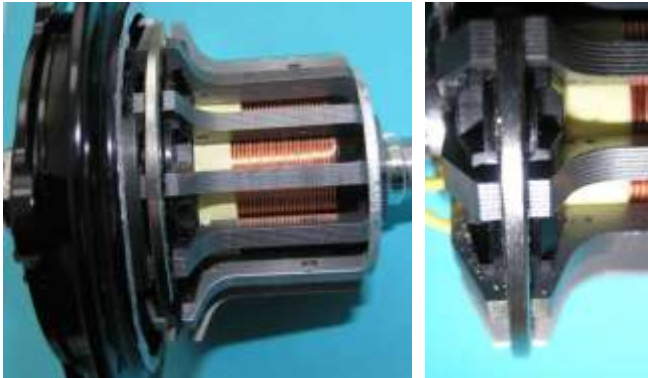
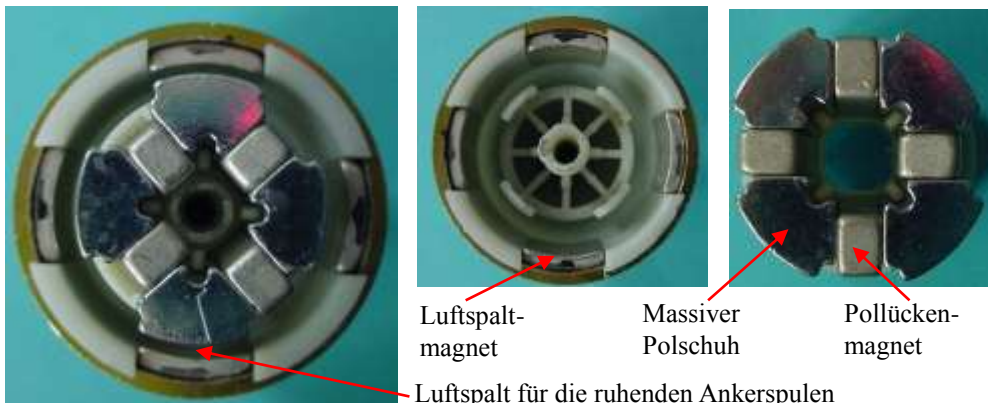


Bild 8.2: 14-poliger Anker mit einem 28-poligen Magnetring



Bild 8.3: Vierpoliges Polrad im Seitendynamo mit selbsthaltenden Magnetsegmenten



Luftspalt-
magnet

Massiver
Polschuh

Pollücken-
magnet

Luftspalt für die ruhenden Ankerspulen

Bild 8.4:
Rotierendes
vierpoliges Erre-
gersystem

Für die Anordnung mit einer Ankerspule und einem 6-poligen Polrad (Bild 8.5) existiert bisher keine fachspezifische Bezeichnung, die diesen Aufbau widerspiegelt. Der damit ausgerüstete Seitendynamo hat den Vorteil, dass zu seiner Funktion keine Berührung mit dem Rad erforderlich ist.



a



b

Bild 8.5: Berührungsloser Seitendynamo
a) Generator,
b) Polrad