

Regelung mit Reihenschlussmotoren

Inhaltsverzeichnis

Problemstellung	III
Zusammenfassung	IV
1. Theoretischer Teil	1
1.1 Motorbauarten	1
1.2 Kennlinien	2
1.3 Ansteuerung	5
1.4 Regelung	6
2. Material und Methoden	9
2.1 Motorauswahl	9
2.2 Auswahl der benötigten Bauelemente	9
2.3 Auswahl der Messgeräte	11
2.4 Planung der Messreihen	12
2.5 Durchführung des Umbaus	12
3. Experimenteller Teil	15
3.1 Durchführung der Messungen	15
3.2 Auswertung der Messungen	15
3.3 Fehlerbetrachtung	17
3.4 Vergleich der Messergebnisse	18
3.5 Nachweis der Regelung	23
3.6 Ausblick	25
4. Messreihen	27
4.1 Zugmassen der benutzten Wagen	27
4.2 Messungen ohne Umbau	27
4.3 Messungen mit Umbau, ohne Kondensator, Regelung deaktiviert	28
4.4 Messungen mit Umbau, mit Kondensator, Regelung deaktiviert	29
4.5 Messungen mit Umbau, mit Kondensator, Regelung aktiviert	30
5. Schrifttum	31

Problemstellung

Elektrisch angetriebene Modellbahnen im Maßstab H0 (1:87) gibt es seit 1935. Von Beginn an wurde die Geschwindigkeit mit Hilfe einer Amplitudensteuerung vom Nutzer eingestellt, der gleichzeitig somit die Funktion eines Lokführers, Fahrdienstleiters und einer Regelung übernahm. Im Zuge einer Automatisierung erfolgte 1985 die Einführung digitaler Steuerungen, mit deren Hilfe mehr als nur ein Modell zur gleichen Zeit gesteuert werden konnte. Nach kurzer Zeit wurde die Forderung nach einer lastunabhängigen Geschwindigkeit gestellt, mit dem Ergebnis einer Umstellung der Motoren bei Märklin auf Gleichstrom, da mit den vorhandenen Produkten keine sinnvolle Regelung unter den gegebenen Umständen möglich war. Diese Umstellung ist so erfolgreich, dass keine nennenswerten Versuche mit Reihenschlussmotoren, ebenfalls eine Regelung zu erreichen, durchgeführt wurden. Der Reihenschlussmotor wurde somit unter Hinweis auf die Unvereinbarkeit mit einer Regelung der bekannten Art „ad acta“ gelegt. Experimente einiger Techniker und interessierter Modellbahner zeigten jedoch die prinzipielle Möglichkeit einer Kombination, die nie offiziell bestätigt oder weiter verfolgt wurde. Aufgrund dieser Berichte ist es erfolgversprechend, diesen Sachverhalt nachzugehen.

Infolgedessen ist es Ziel der vorliegenden Arbeit,

- die Funktionalität einer Regelung mit einem Reihenschlussmotor zu kombinieren
- die Funktionsfähigkeit der Regelung nachzuweisen
- das Ausmaß der Regelung zu bestimmen

Zusammenfassung

Im vorliegenden Dokument wird eine funktionierende Umbaumaßnahme vorgestellt, die die Vereinbarkeit einer elektronischen Lastregelung, wie sie in den meisten aktuellen Dekodern enthalten ist, mit dem Aufbau eines Reihenschlussmotors nachweist. Zu diesem Zweck werden die Feldspulen über Dioden angesteuert und parallel zu jeder Spule jeweils ein Elektrolytkondensator passender Größe angeschlossen. Die Lastregelparameter sind dementsprechend an die Gegebenheiten anzupassen. Im Unterschied zur ausgeschalteten Lastregelung werden erhebliche Komfort- und Leistungsverbesserungen des fahrenden Modell festgestellt:

- bessere Geschwindigkeitskonstanz (von +/- 2,1% auf +/- 0,9%)
- niedrigere Mindestgeschwindigkeit (von 54 km/h auf 14 km/h)
- kleinere Geschwindigkeitssprünge bei Änderung der Fahrstufe
- fast ideale Exponentialkurve (bei den genutzten Einstellungen)
- Beibehaltung des Reihenschlussverhaltens des Motors (kurzfristige Überlastbarkeit)
- Ausrollen bei abrupter Spannungsunterbrechung
- kleinere Tempoverluste bei Lastschwankungen

Aufgrund der begrenzten Einstellmöglichkeiten des Dekoders in Bezug auf die Lastregelparameter und der nicht durchgeführten Optimierung der vorhandenen Parameter stellen die oben genannten Verbesserungen eine noch umfassendere Verbesserung der Laufkultur dar. Im Vergleich zu aufwändigen Umrüstaktionen unter Motorentausch ist der Aufwand für die hier vorgestellte Umrüstung vernachlässigbar klein. Einzig der Programmieraufwand erfordert nicht nur Zeit, sondern auch Detailkenntnisse im Verhalten der Motoren und Dekoder. Letztere beiden Punkte sind jedoch auch bei DC-Motoren erforderlich.

1. Theoretischer Teil

1.1 Motorbauarten

Elektromotoren unterteilen sich in verschiedene Arten ^{[1],[2],[3],[4]}, von denen die Stromwendermotoren die größte Rolle spielen. Es gibt noch einige Versuche mit bürstenlosen Synchronmotoren ^{[5],[6]}, deren Verbreitung sich jedoch in Grenzen hält. Bei den Stromwendermotoren wurden in der Anfangszeit die Reihenschlussmotoren, bei denen sowohl Läufer als auch Ständer aus Magnetspulen bestehen und in Reihe geschaltet sind, benutzt. Diese Motoren sind sogenannte Allstrommotoren, weil sie mit jeder Versorgungsspannung (Gleichspannung, Wechselspannung, Mischspannung) betrieben werden können. Diese Motoren sind kurzzeitig überlastbar und somit ideale Bahnmotoren, weil bei der Anfahrt entsprechende Lasten vorkommen können. Ab den 1950'er Jahren kamen auch die fremderregten Motoren in die Modellbahnen. Hier wurde die Ständerspule durch einen Permanentmagneten ersetzt. Vor allem aus Kostengründen, aber auch aus Platzgründen geschah diese Umstellung bei nicht wenigen Herstellern, da die Produktion von Spulen im Vergleich zu Permanentmagneten aufwändig ist. Ferner nehmen die Magnete deutlich kleineren Raum ein, was bei Modellen mit Platzmangel sich optisch deutlich bemerkbar macht. Viele Anwender legen großen Wert auf die Optik, weniger auf die Elektrik. Stromwendermotoren bestehen in der Hauptsache aus einem Läufer (auch Anker oder Rotor genannt) mit Stromwender (Kommutator),

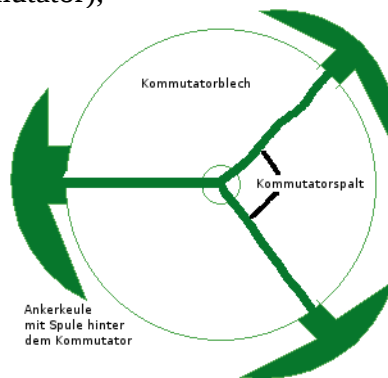


Abb.1: schematischer Aufbau eines Läufers mit Stromwender

einem Ständer (auch Stator genannt) und einem Motorschild mit Bürsten, durch welche der Motor mit der notwendigen Spannung bzw. dem Betriebsstrom versorgt wird. Durch die Bürsten wird der auf dem Läufer befindliche Stromwender mit Strom versorgt, wobei zwei Stromzweige zum anderen Bürstenkontakt entstehen: einmal im Uhrzeigersinn und einmal gegen den Uhrzeigersinn. Aufgrund der Spulenanordnung im Läufer entsteht ein Magnetfeld, welches in Wechselwirkung mit dem Ständerfeld tritt und somit ein Drehmoment in oder gegen den Uhrzeigersinn erzeugt. Sobald das Läuferfeld stark genug ist (d.h. die Stromstärke groß genug) wird die der Läufer in Bewegung setzen. Gleichzeitig drehen sich die Kommutatorbleche mit. Die Stromrichtung in einer Läuferspule bleibt gleich bis der Nut im Kommutatorblech die Bürste erreicht. In diesem Moment wird die dazugehörige Spule kurzgeschlossen bis dieser Nut die Bürste wieder verlässt. Dabei ändert sich die Stromrichtung in der Spule, aber die Drehrichtung bleibt gleich. Bei jeder Umdrehung des Läufers geschieht diese Umpolung doppelt so oft, wie es Läuferspulen gibt (also 6 mal bei dreipoligen, 10 mal bei fünfpoligen Läufern). Durch die abrupte Umpolung entstehen durch Induktion Spannungsspitzen (Kommutationssignale), die abhängig von der Stromstärke (I), Induktivität (L) der Läuferspule und Drehzahl ($\sim dt$) nach

$$U = -L \frac{dI}{dt} (1)$$

sehr hohe Spannungen erreichen können. Durch geeignete Maßnahmen (z.B. Entstörkondensatoren) werden diese hochfrequenten Signale herausgefiltert, damit nach Außen keine Funkstörung stattfindet, bzw. diese minimiert wird.

Bei Permanentmagnetständen ändert sich die Richtung des Ständerfelds nicht, womit dieser Motor nicht für Wechselspannungen geeignet ist, der Läufer würde bestenfalls in der Frequenz der Wechselspannung mitschwingen. Eine Drehrichtungsänderung erfolgt durch Änderung der Polarität.

Bei Reihenschlussmotoren ändert sich das Ständerfeld in der selben Weise wie das Läuferfeld, folglich kann bis zur Grenzfrequenz der Motor auch mit reiner Wechselspannung betrieben werden. Die Fahrtrichtungsänderung ist nur durch eine zweite, entgegengesetzt gewickelte Ständerspule realisierbar, da eine umgedrehte Polarität keine Änderung insgesamt bewirkt.

1.2 Kennlinien

Bei Elektromotoren gibt es eine ganze Reihe von Kennlinien und Diagrammen, die zur Beurteilung der Qualität oder zum Vergleich mit anderen Motoren herangezogen werden. Im Folgenden werden hier nur die wichtigsten Unterschiede zwischen fremderregten Motoren und Reihenschlussmotoren anhand des Drehzahl-Spannungs-Diagramms und des Drehzahl-Drehmomenten-Diagramms besprochen.

Drehzahl-Drehmomenten-Diagramme geben das Verhalten der Elektromotoren bei konstanter Spannung unter verschiedener Last wieder. Hierbei gelten für beide hier betrachteten Motorarten verschiedene Berechnungsformeln für das Drehmoment:

$$M = \alpha \cdot \Phi \cdot I \text{ (fremderregter Motor) } (2)$$

$$M = \alpha \cdot \Phi' \cdot I^2 \text{ (Reihenschlussmotor) } (3)$$

Darin bedeuten: M das Drehmoment am Läufer, Φ ist eine Motorkonstante und I ist die Stromaufnahme. Anhand dieser Bestimmungformeln ist für den Graph der Stromaufnahme bei fremderregten Motoren eine Gerade, für Reihenschlussmotoren eine Wurzelfunktion zu erwarten. Die nach I aufgelösten Formeln (2) und (3) werden dann in die Drehzahlformeln für den jeweiligen Motor eingesetzt:

$$n = \frac{(U_k - RI)}{2\pi \alpha \Phi} \text{ (fremderregte Motoren) } (4)$$

In Formel (4) bedeuten: U_k : Klemmenspannung des Motors, R= Anschlusswiderstand, n=Drehzahl in Hz und α ist eine von der Motorgeometrie abhängige Konstante. Da außer der Belastung M, und somit I alle anderen Faktoren konstant sind, ist der Graph im Drehzahl-Drehmomenten-Diagramm eine Gerade für fremderregte Motoren:

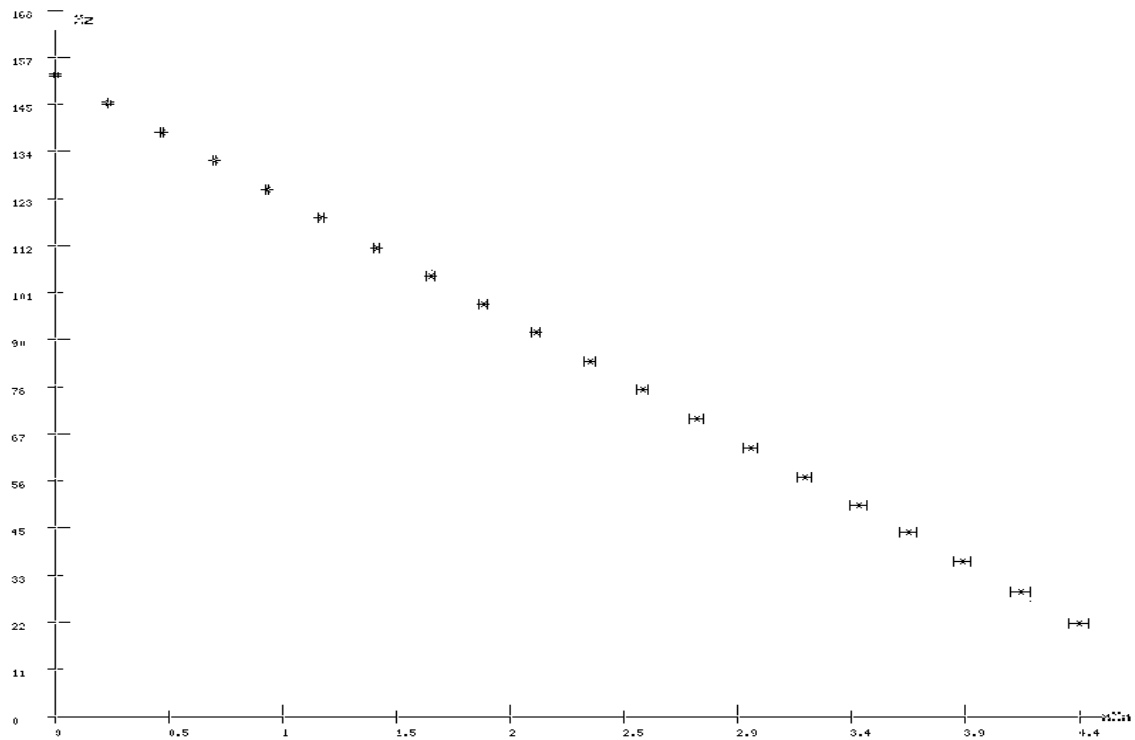


Abb.2: Drehzahl-Drehmomenten-Diagramm eines fremderregten Motors

Gleichmaßen ist auch das Drehzahl-Spannungsdiagramm des fremderregten Motors eine Gerade, da die dynamischen Verluste im Vergleich zur Belastung oft vernachlässigbar sind. Lediglich die Anfahrspannung ist nicht gleich Null, weil die innere Reibung der Lager sowie die eigene Masse des Triebfahrzeugs nach der Drehmomentenformel überwunden werden muss.

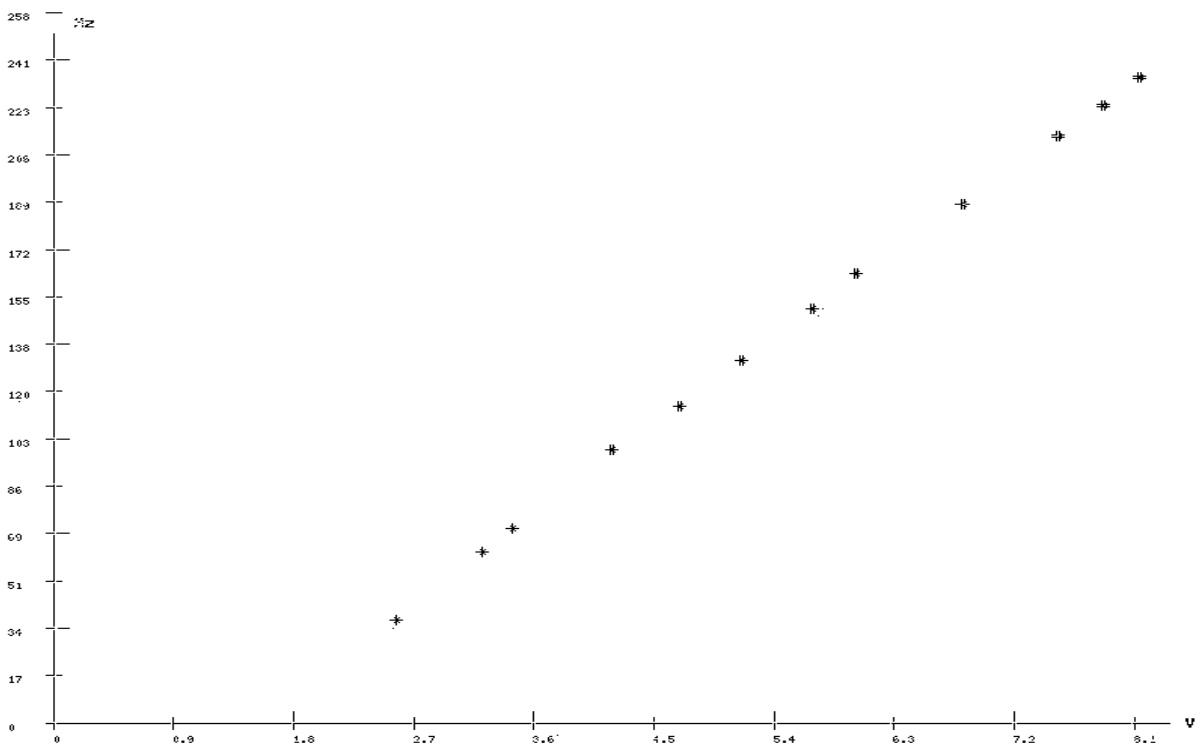


Abb.3: Drehzahl-Spannungsdiagramm eines fremderregten Motors.

Beim Reihenschlussmotor besteht gem. Formel (3) keine lineare Abhängigkeit zwischen Drehmoment und Stromaufnahme. Ferner ist auch die Motorkonstante eine andere, womit sich die Drehzahlformel abändert in

$$n = \frac{\left(\frac{U_k}{I} - R\right)}{2\pi \alpha \cdot c} \quad (\text{Drehzahlformel für Reihenschlussmotoren}) \quad (5)$$

Hier ist c eine typische Konstante für Reihenschlussmotoren. Aufgrund der Nichtlinearität sind die Graphen keine Geraden mehr. Das Drehzahl-Drehmomenten-Diagramm ist nunmehr ein 1/I-Graph (siehe Abbildung 4 auf der nächsten Seite), weil außer der Stromaufnahme I alle anderen Werte konstant gehalten werden. Wird nun gleichermaßen die Drehzahl in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen (siehe Abbildung 5 auf der nächsten Seite), so wird der Graph kompliziert, da sich selbst die kleinen Änderungen in der Stromaufnahme wegen der reziproken Abhängigkeit vom Strom auswirken.

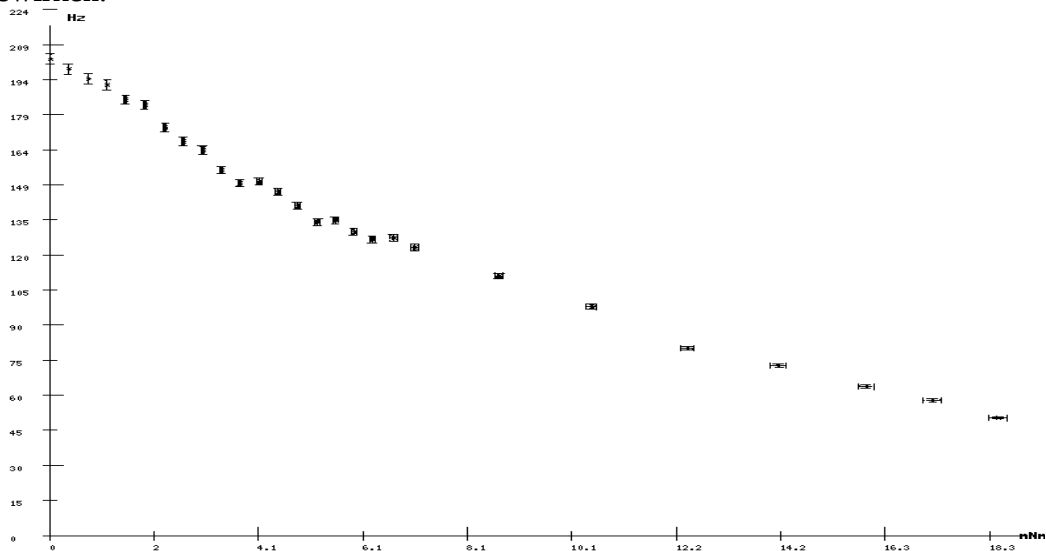


Abb.4: Drehzahl-Drehmomenten-Diagramm eines Reihenschlussmotors

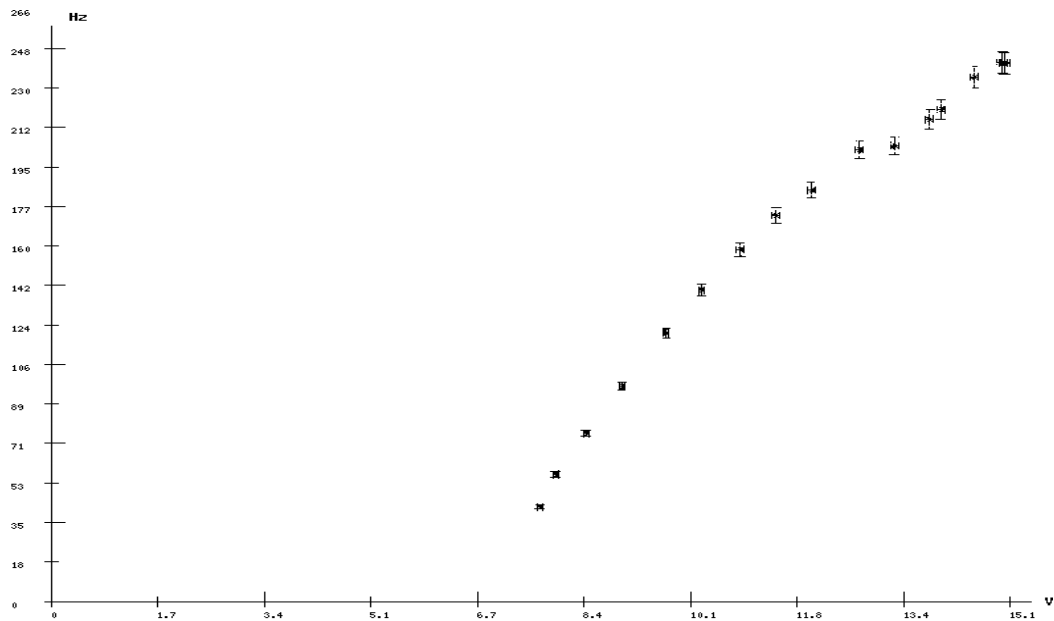


Abb.5: Drehzahl-Spannungsdiagramm eines Reihenschlussmotors

1.3 Ansteuerung

Gemäß Formeln (4) und (5) wird die Drehzahl der Motoren durch Amplitudensteuerung, die die Klemmenspannung vorgibt, eingestellt. Diese Klemmenspannung kann entweder direkt durch die Änderung der Schienenspannung (Amplitudensteuerung im engeren Sinne), hier auch ohne Elektronik vorgegeben werden, oder mit Hilfe der Impulstechnik. Im letzteren Fall geschieht die Einstellung der Klemmenspannung mit Hilfe einer Kombination aus Amplitude und dem Verhältnis aus der Zeitspanne, in der die volle Spannung anliegt zur gesamten Periodendauer. Dieses Verhältnis wird auch Tastgrad genannt^[7]. In Abbildung 6 sind die wichtigsten Angaben bei einer Impulssteuerung aufgeführt. Diese Impulssteuerung setzt eine hohe Frequenz (also kurze Periodendauer der Impulswiederholung) voraus, damit der Läufer den Impulsen nicht mehr folgen kann. Aus diesem Grund „sieht“ der Motor nur die gemittelte Spannung.

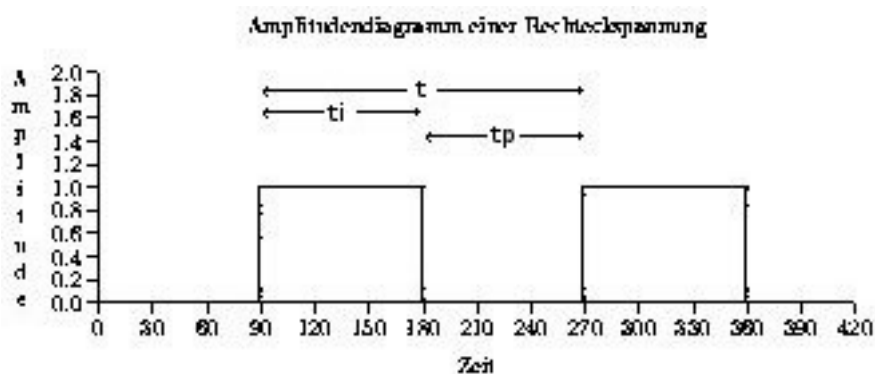


Abb.6: Impulsiagramm einer Rechteckspannung

In Abbildung 6 sind drei verschiedene Größen dargestellt:

t = Periodendauer, t_i = Impulsdauer, t_p = Pausendauer. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$f = \frac{1}{t} (6)$$

mit f = Frequenz,

$$\tau = \frac{t_i}{t} (7)$$

mit τ = Tastgrad^[7],

$$U = \tau \cdot \hat{U} \text{ (fremderregte Motoren)} (8)$$

mit U =mittlere Spannung, $\hat{U}$ = Amplitude der Spannung,

$$U_{eff} = \sqrt{\tau} \hat{U} \text{ (Reihenschlussmotoren)} (9)$$

mit U_{eff} = effektive Spannung.

Sofern bei Reihenschlussmotoren die Frequenz niedrig genug ist, damit der Läufer den Schwankungen folgen kann gilt der nichtlineare Zusammenhang aus (9). Bei ausreichend hohen Frequenzen spielen die Wechselanteile der Impulsspannung keine Rolle mehr und der Motor wird wie die fremderregten Motoren mit dem Gleichspannungsanteil gemäß (8) betrieben, da der Reihenschlussmotor mit allen Spannungsarten betrieben werden kann. Für die benutzten Motoren im Modellbahnbereich ist die Grenzfrequenz bei ca. 500 Hz. Ein signifikanter Unterschied in den Kennwerten (Drehzahl, Leistung, Stromaufnahme) besteht zwischen den verschiedenen Ansteuerungsarten bei gleichen (effektiven) Klemmenspannungen nicht.

1.4 Regelung

Im Betrieb ohne Elektronik ist eine Abnahme der Geschwindigkeit stets zu beobachten und wird von nicht Wenigen als Störung empfunden. Dies betrifft Fahrten unter verschiedenen Anhängelasten, Steigungen und Gefälle, Spannungsschwankungen und Kurven. Während die Schwankungen durch unterschiedliche Spannungen durch stabilisierte Netzteile und ausreichende Einspeisung mit parallel verlegten Versorgungsleitungen erheblich reduzieren kann, gilt dies nicht für die Lastschwankungen. Gefordert wurde also eine Methode, mit deren Hilfe die Geschwindigkeit (nahezu) konstant bleibt. In diesem Zusammenhang wurde auch nach einer einfachen Möglichkeit für besonders langsamen Fahrt verlangt, die jedoch einfacher und nachhaltiger auf konstruktive Weise verwirklicht werden kann.

Wollte man diese Kriterien in der Amplitudensteuerung umsetzen, wäre der elektronische Aufwand oftmals zu groß, um als Platine in die Miniaturen hineinzupassen, als externe Lösung müsste diese auf jedes einzelne Fahrzeug individuell eingestellt werden. Einen Automatismus gibt es hierzu nicht, womit die externe Lösung nur in Spezialfällen sinnvoll ist.

In der Impulstechnik hingegen kann man die Impulspausen dann nutzen, wenn vom Motor eine Art Rückmeldung erfolgt. Für die fremderregten Motoren mit Permanentmagnetständer ist dies der Fall, da der Motor in Impulspausen als Generator fungiert und somit eine Spannung erzeugt. Diese Spannung kann in einem Regelkreis ausgewertet werden, der entsprechend den Vorgaben (Potentiometer oder CV) den Tastgrad τ variiert. Ein solcher Regelkreis arbeitet wie folgt:

Ein **Regelkreis** besteht aus **Regeleinrichtung** und **Regelstrecke**.

Die **Regeleinrichtung** besteht aus **Meßeinrichtung**, welche die **Regelgröße** (zumeist die Drehzahl in Form der Generatorspannung nach

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ (Induktionsspannung eines Generators)} (10)$$

U = Generatorspannung, N = Windungszahl der im Magnetfeld mit der Polstärke Φ gedrehten Spule, t =Drehzahl) erfaßt. **Sollwerte** (meist ebenfalls Drehzahlen in Form von Spannungen) werden mit dem **Sollwerteinsteller** vorgegeben (z.B. **Potentiometer** oder in modernen Dekodern **entsprechende Configurations Variablen, CV**). Ein **Vergleicher** bildet die Differenz aus Ist- und

Sollwert, die **Regeldifferenz**. Diese Regeldifferenz wird im **Stellglied** aufgearbeitet und an die **Regelstrecke** gegeben. Bis hierhin ist die Regeleinrichtung vollständig.

In der **Regelstrecke** wird die **Stellgröße** durch **Störgrößen** (Last, Temperatur,...) beeinflusst und bildet den **Istwert**. Das Ausmaß und der Einfluss der Störgrößen kann durch eigene CV eingestellt werden. Somit ist der **Regelkreis** geschlossen. Zur Funktion der **Regelung** ist es notwendig **immer** eine **Regeldifferenz** zu haben, folglich: es gibt keine 100 prozentige Regelung! Allen mechanischen Größen ist eine elektrische Größe zugeordnet (meistens eine Spannung), welche von der Elektronik problemlos verarbeitet werden kann.

Zusätzlich ist noch die Art der Störgrößen und die Motorparametrisierung zu beachten. Hierzu gibt es drei Größen, die nicht von allen Dekodern berücksichtigt werden:

- eine proportionale Größe (P), die direkt mit der Polstärke zusammenhängt. Je stärker der Motor, desto weniger muss die Elektronik ausregeln,
- eine integrative Größe (I), welche dauerhafte Abweichungen vom Soll ausgleichen soll, und
- eine differentielle Größe (D), die die Reaktionszeit des Motors auf Laständerungen berücksichtigt.

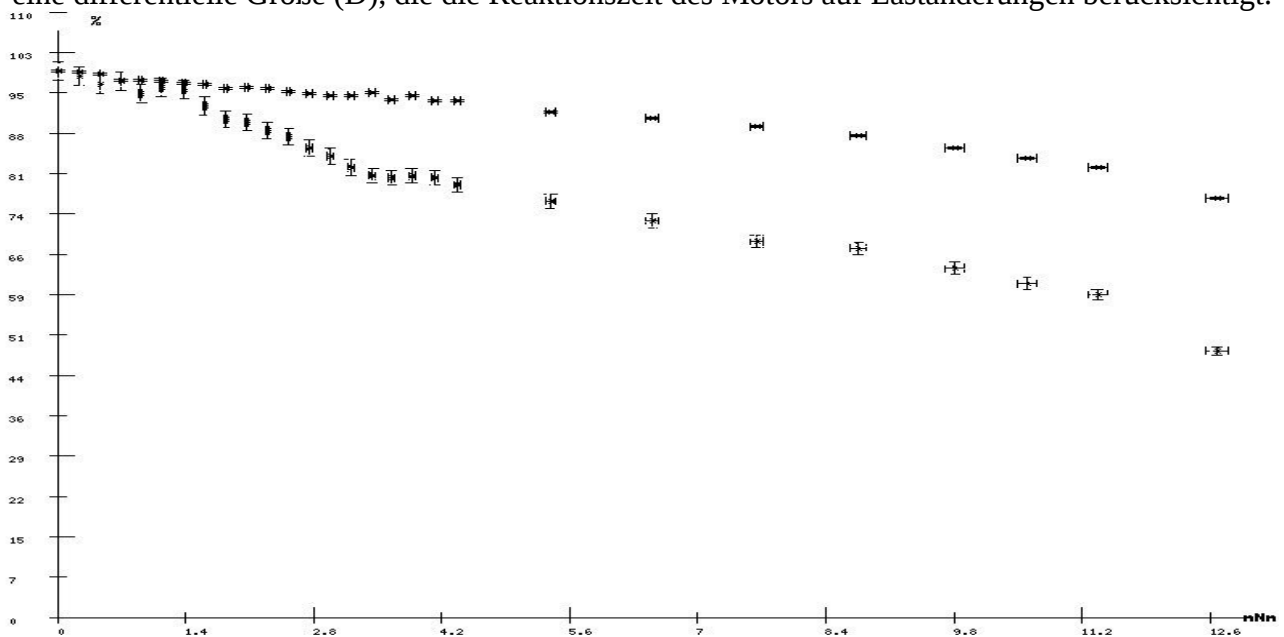


Abb.7: nrel-M-Diagramm mit und ohne Regelung

Eine ideale Regelung gleicht zu 100% aus. Da dies nicht möglich ist, muss man entweder eine Art „Ausmaß der Regelung“ festlegen, oder einen direkten Vergleich zwischen aktiver und nicht aktiver Regelung finden. Ein solcher Vergleich wird in Abb. 7 (vorherige Seite) gezeigt.

Aufgetragen ist hier die relative Drehzahl (normiert auf Leerlauf = 100%) in Abhängigkeit von der Belastung in mNm. Je näher der Graph in diesem Diagramm der Horizontalen bei 100% ist, desto besser ist die Regelung. Gleichzeitig dient diese Diagrammart auch der Beurteilung der Motorstärke unabhängig von der Spannung und Drehzahl (wegen der Normierung). Der stark abfallende Graph zeigt ein Modell ohne Regelung mit einem Dekoder, der obere Graph mit Regelung. Erst bei sehr hoher Belastung wird der Bereich, in dem die Regelung ausgleichen kann verlassen und die Geschwindigkeit nimmt auch hier deutlich ab. Dies ist jedoch im Vergleich zum Modell ohne Regelung bei sehr viel größerer Belastung der Fall. Spätestens jedoch bei der mechanischen Lastgrenze, wenn das Modell nicht mehr genügend Drehmoment auf den Untergrund übertragen kann, wird die Regelung versagen und das Modell bleibt mit durchdrehenden Rädern stehen. Wollte man nun das Regelausmaß bei einer bestimmten Belastung ausrechnen, geht man wie folgt vor:

- man berechne die relative Drehzahl bei z.B. 7mNm für beide Graphen (0,829 ohne Regelung,

0,944 mit Regelung).

- der Wert ohne Regelung ist der neue Nullpunkt, also werden die Differenzen beider Werte zu 1 gebildet (0,171 ohne; 0,056 mit Regelung) gebildet.

- Abschließend berechnet man den Quotienten mit/ohne (0,327) und subtrahiert das Ergebnis von 1 (Umdrehen der Skala). In diesem Fall ergibt sich ein Regelausmaß bei ca. 7 mNm von 67,3%.

Beim Vergleich der letzten Punkte beider Graphen erhält man so 48,5%, wobei die Traktion schon erheblich nachlässt.

Als Formel dargestellt:

$$\eta_{rel} = \frac{n_{relm} - n_{relo}}{1 - n_{relo}} (\text{Regelungsausmaß}) (10)$$

Aufgrund der Zusammenhänge ist die Auswertung der Impulspausen bei Reihenschlussmotoren schwierig, weil in Abhängigkeit von der Zeitkonstanten des Motors keine verwertbaren Signale vorhanden sind. Dekoder mit niedrigen Frequenzen können die Reihenschlussmotoren gar nicht, Dekoder mit hohen Frequenzen nur sehr schwierig überhaupt steuern. Diesbezügliche Versuche, Reihenschlussmotoren mit einer Regelung via Impulssteuerung zu verknüpfen scheiter(te)n oft an den layout- und bauteilebedingten, engen Grenzen der Dekodereinstellungen. Dennoch sind die Ansätze einer Regelung zu bemerken, obwohl sie nicht befriedigen.

Um eine funktionierende Regelung mit Reihenschlussmotoren zu erreichen, sind entweder grundlegende Änderungen in der Elektronik notwendig, oder Maßnahmen um in den Impulspausen ein Magnetfeld aufrecht zu erhalten, welches im benutzten Dekoder ausreicht, um die induzierte Spannung auszuwerten.

2. Material und Methoden

2.1 Motorauswahl

Zur Auswahl können nur die Motorbauarten, welche auch als Reihenschlussmotoren benutzt wurden und die zugleich ausreichende Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Modellen zulassen. Weiterhin müssen die Platzverhältnisse im Modell ausreichen, um sowohl den Dekoder, als auch notwendige und optionale Bauelemente unterzubringen. Ferner ist eine leichte Zugänglichkeit des Innenlebens für Messzwecke erforderlich. Schließlich sollte das Modell einen Motor ausreichender Zugkraft haben, um auch größere Lasten zu bewegen. Im vorliegenden Fall ist die Wahl auf ein Modell der V200 (Märklin-Artikel 3021) Baujahr 1959 gefallen, von dem bereits vier konstruktionsgleiche Modelle getestet wurden, darunter ein Modell der selben Version. Der Läufer ist ein sog. LFCM1

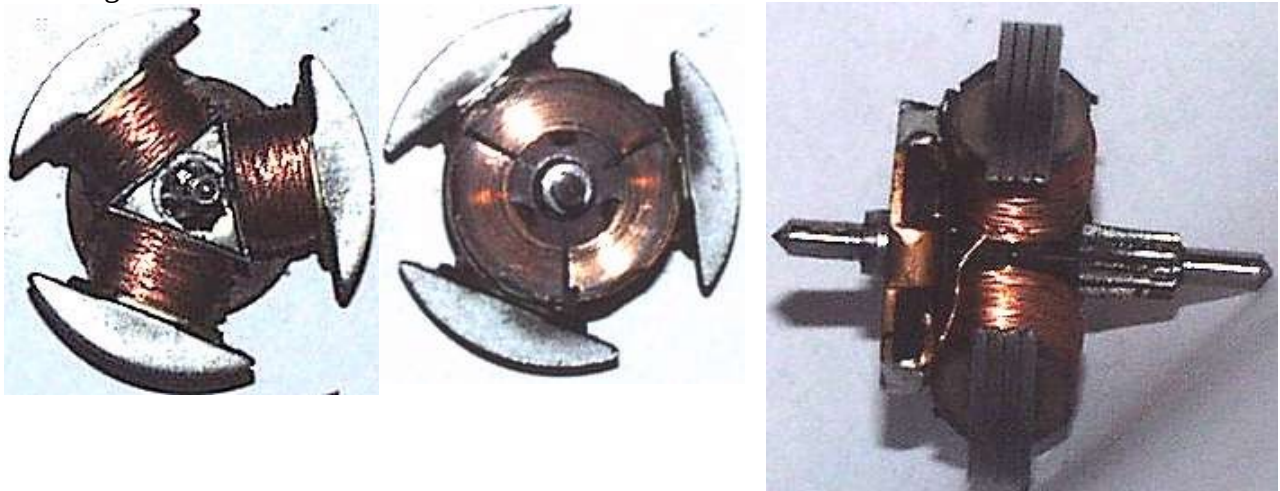


Abb.8-10: Hinter-, Vorder- und Seitenansicht des 202930-Läufers (Märklin) alter Bauart.

2.2 Auswahl der benötigten Bauelemente

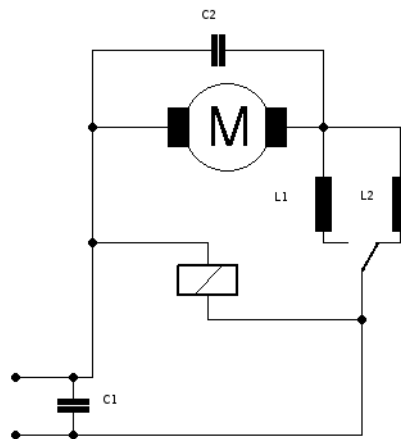


Abb.11: Schaltplan des Motors mit Relais, nicht eingezeichnet: Leuchtmittel

Anstelle des Relais (Abbildung 11), welches ausschließlich die Fahrtrichtung umschaltet, soll ein Dekoder für fremderregte Motoren zum Einsatz kommen. Für eine bessere Austauschbarkeit der Dekoder ist der zusätzliche Einbau einer Schnittstelle nach NEM 652 notwendig.

Die für fremderregte Motoren konstruierten Dekoder haben jedoch keine gesonderten Anschlüsse für die zwei Feldmagnetspulen, wie sie in alten Modellen der Firma Märklin zu finden sind. Um auch diese alten Motoren zu nutzen, ist eine Maßnahme anzuwenden, wie Sie bei Kuehn^[8] beschrieben wird:

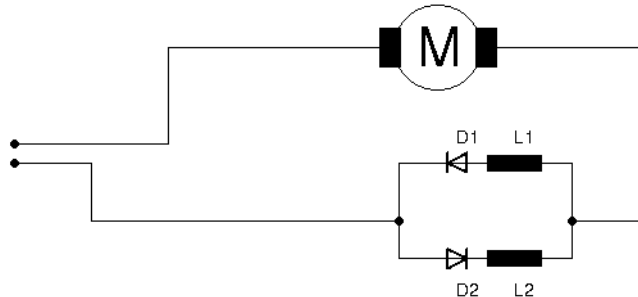


Abb.12: Diodenlösung zur Verwendung der Reihenschlussmotoren mit DC-Dkodern

Ein Motorausgang des Dekoders wird direkt am Motorschild angeschlossen, der andere Motorausgang wird über zwei Dioden (D1 und D2 in Abbildung 12) zu den Feldmagneten (L1 und L2) geleitet. Diese Dioden von ihren Grenzwerten so zu wählen, daß der normale Betrieb (analog und digital) nicht beeinträchtigt wird und die Bauteile nicht leichtfertig zerstört werden können (Abbildung 12). Die relevanten, elektrischen Größen sind die zu erwartende Stromstärke und die Spannungen, die u.a. durch Kommutationssignale als Peaks auftreten können. Für den eingesetzten Motor (LFCM1/202930) sind bei 12V als Durchschnittswert der Stromaufnahme (<http://www.sheyn.de/Modellbahn/Service/Anker/index.php> 27.12.2011, 14:33) 392mA gemessen worden. Geht man von der dreifachen Stromstärke als Maximum aus, so ergeben sich 1,2A. Die Spannungsspitzen bei der Kommutation liegen zwar deutlich über 40V, werden jedoch von der Feldspule abgefangen, sodaß diese kein Problem darstellen. Als passendes, verfügbares Bauteil wurde die Diode BYD77D, welche als SMD (PH77D) bereits auf Dekodern verbaut wurde ausgewählt. Vor weiteren Versuchen ist zuerst diese Anordnung auf Funktionsfähigkeit zu überprüfen und mit dem reinen Analogmodell zu vergleichen (Regelung beim Dekoder bleibt ausgeschaltet).

Um die in den Abschnitten 1.3 (Steuerungen) und 1.4 (Regelung) erläuterten Probleme der Feldlosigkeit in Impulspausen in den Griff zu bekommen, ist ein Energiespeicher notwendig, welche diese Pausenzeiten überbrückt. Dies kann durch einen Kondensator ausreichender Kapazität parallel zu den Feldspulen erreicht werden:

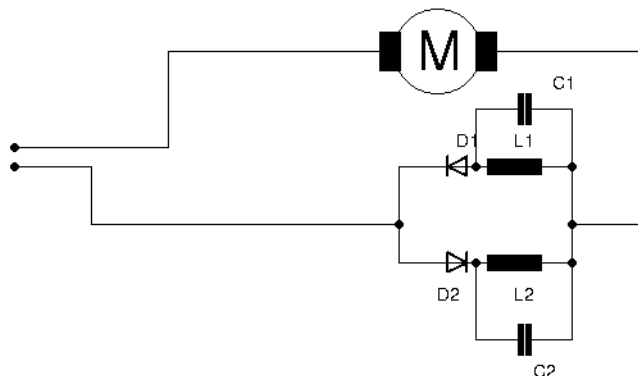


Abb.13: Diodenlösung mit Kondensatoren parallel zu den Feldmagnetspulen

Folgende Anforderungen an den Kondensator sind zu erfüllen:

a) Spannungsfestigkeit in der Höhe, die an der Feldmagnetspule maximal abfällt. Dies sind selbst bei Kurzschluss $5\Omega \cdot 1,2A = 6V$; also genügen 10V Spannungsfestigkeit. Da Kondensatoren

größerer Kapazität um so kleiner sind, je niedriger die Spannung, werden die möglichen Platzprobleme im Modell entschärft.

b) Kapazität in mindestens der Stromstärke angemessenen Größe,

c) Kapazität in der Größe dass unter den Ansteuerungsbedingungen des Dekoder keine Resonanz (Reihen- und Parallelschwingkreise) auftritt,

d) Kapazität um die größtmögliche Pausenzeit so zu überbrücken, daß die Entladung keine nennenswerte Dimension erreicht.

Die unter a) genannte Bedingung ist mit Standardbauteilen (Elektrolytkondensatoren) leicht zu erfüllen, stellt also kein Hindernis dar.

Bedingung b) wird durch die Faustregel $1\mu\text{F}/\text{mA}$ erreicht; folglich sind für diesen Motor Kapazitäten um die $470\mu\text{F}$ erforderlich.

Um Bedingung c) zu erfüllen sind die Frequenz der Impulssteuerung, die Induktivität des Läufers und die Induktivität der Ständerspulen zu berücksichtigen. Als resonanzfrei wird hier eine Kapazität bezeichnet, die um mehr als eine Größenordnung (=Faktor 10) über oder unter dem Resonanzwert nach

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} (\text{Resonanzfrequenz eines Schwingkreises}) \quad (11)$$

liegt. Hierin bedeuten L = Induktivität, C = Kapazität. Die Induktivitäten belaufen sich um die 5mH , während $f \approx 16\text{ kHz}$. Nach C aufgelöst ergibt sich eine Resonanzkapazität von $0,12\mu\text{F}$. Unter Bedingung b) wurde bereits $C=470\mu\text{F}$ ermittelt, dies sind 3 Größenordnungen über dem Ergebnis; also resonanzfrei.

Bedingung d) schließlich wird erfüllt, wenn die Zeitkonstante zur Entladung des Kondensators über die Ständerspule mindestens eine Größenordnung über der maximalen Pausendauer liegt. Diese Zeitkonstante wird errechnet mit:

$$t_c = RC (\text{Zeitkonstante für die Ladung bzw. Entladung eines Kondensators}) \quad (12)$$

Die Ständerspulen besitzen einen Widerstand um die 5Ω , somit ist die Zeitkonstante der Entladung $t_c = 2,35\text{ms}$ (dies entspricht einer Frequenz von 425Hz für die unter b) bestimmte Kapazität). Folglich ist auch Bedingung d) erfüllt. Bei Elektrolytkondensatoren ist allerdings auf die richtige Polung zu achten, sonst überhitzt dieser und explodiert.

2.3 Auswahl der Messgeräte

Neben Geräten zur Spannungs- und Stromüberwachung bzw. -messung, wird in der Hauptsache eine Stopuhr benötigt, da die erforderlichen Zugmassen jedes einzeln angehängten Wagen durch Ausrollversuche bestimmt wurden. Die Stabilität der Drehzahlen bei konstanter Spannung ist gem. http://www.sheyn.de/Modellbahn/FAQ/Funktion/Funktion_2_1.php#Allgemeinklassen (27.12.2011 15:28) bei durchschnittlich 2% im Analog- und bei 0,75% im Digitalbetrieb. Eine Stopuhr, die diese Fehlergrenzen erfassen kann, sollte also eine Genauigkeit von 0,075% haben. Folglich reicht bei durchschnittlich 20s-Intervallen eine Stopuhr mit 1/100s Auflösung.

2.4 Planung der Messreihen

Bevor eine sinnvolle Messung unter Last durchgeführt werden kann, ist der Motor (und damit das Modell) mindestens 30 Minuten bei der Bemessungsspannung einzufahren. Damit erreicht man ein thermisches Gleichgewicht und hat keine unerwünschten Einflüsse durch sich ändernde Temperaturen. Auch ist das Schmiermittel (hier Knochenöl) auf Betriebstemperatur. Die gewünschte Spannung muss deswegen schon eingestellt werden, weil bei anderen Spannungen sich andere Arbeitspunkte und somit andere Temperaturen einstellen. Drehzahlen können durch die Art des Betriebs nicht direkt gemessen werden, wohl aber indirekt durch Zeitmessung für eine bekannte Strecke (hier 13,181m eines fertigen Ovals) und Umrechnung mit Hilfe von Radradius und Getriebeübersetzung. Hierbei treten zwei Schwierigkeiten auf:

- weitere Erwärmung durch steigende Belastung. Diesem Problem kann man begegnen, indem die Steigerung der Last nur allmählich geschieht, sodaß das System als Ganzes Zeit hat sich auf die neue Last einzustellen. Die vorgesehene Durchführung berücksichtigt dies, indem jeweils eine Runde bei konstanter Spannung gemessen wird, ein weiterer Wagen wird angehängt, eine Runde Einfahrt und erneute Zeitmessung bei der selben Fahrgeräteeinstellung.
- zunehmender Schlupf der Treibräder bei zunehmender Belastung. Der Schlupf ist in der vorgesehenen Testweise nicht direkt messbar; zudem beeinflusst er direkt die Messgröße, womit in der Drehzahl ein Fehler entsteht. Für einen Nachweis einer Regelung spielt dies jedoch keine Rolle, da die Regelung i.A. deutlich größere Auswirkungen auf die gemessene Zeit hat, als der Schlupf. Erst bei Überschreiten des Leistungsmaximums steigt der Schlupf stärker an, als die Regelung ausgleichen kann. An dieser Stelle wird die Testreihe zur Getriebe- und Motorschonung abgebrochen.

2.5 Durchführung des Umbaus

Nach der Entfernung des Gehäuses wird zuerst das Innenleben auf Vollständigkeit überprüft.

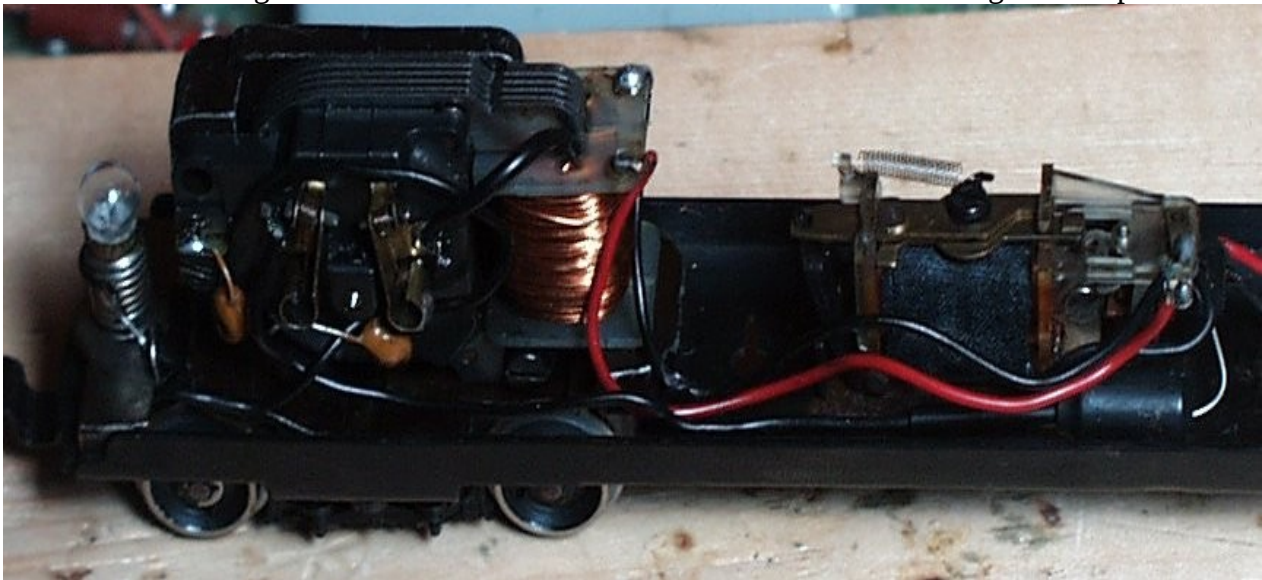


Abb.14: Modell 3021.6 im Originalzustand vor der Umrüstung

Zur Vorbereitung des nächsten Arbeitsschritts werden sämtliche Anschlusskabel abgelötet. Dabei ist sorgfältig auf den Anschlussplan zu achten, um etwaige Verwechslungen und somit Schäden an der einzubauenden Elektronik und/oder den vorhandenen Bauteilen zu vermeiden.

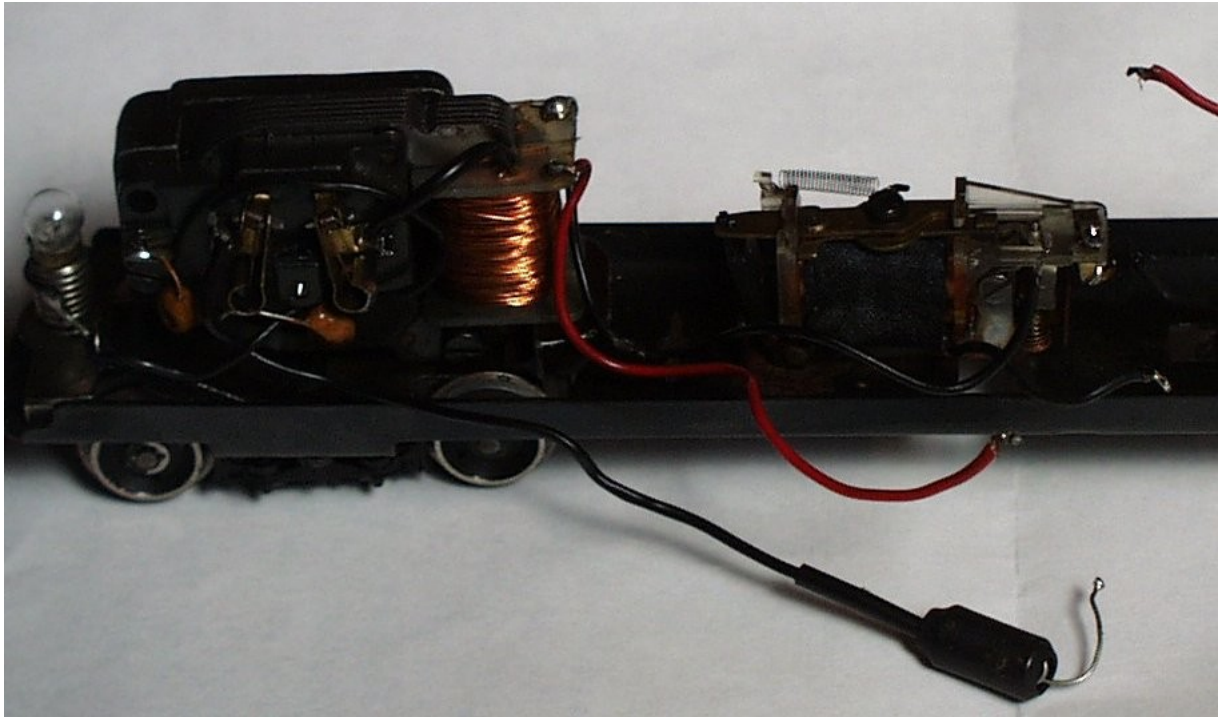


Abb.15: 3021.6 mit abgelöteten Anschlusskabeln.

Sind schließlich alle Kabel abgelötet, kann das Umschaltrelais ausgebaut und für spätere Zwecke aufbewahrt werden. Zur Vorbereitung des Dekodereinbaus wird vorher noch eine Schnittstelle nach NEM 652 (8 polig) angeschlossen und der Platz auf dem Feldmagneten reicht genau aus, um zwei SMD-Dioden vom Typ BYD77D anzulöten. Die Verbindung inmitten beider Dioden ergibt den zweiten Motoranschluss vom Dekoder, dessen erster Anschluss auf der linken Seite des Motorschilds erfolgt.

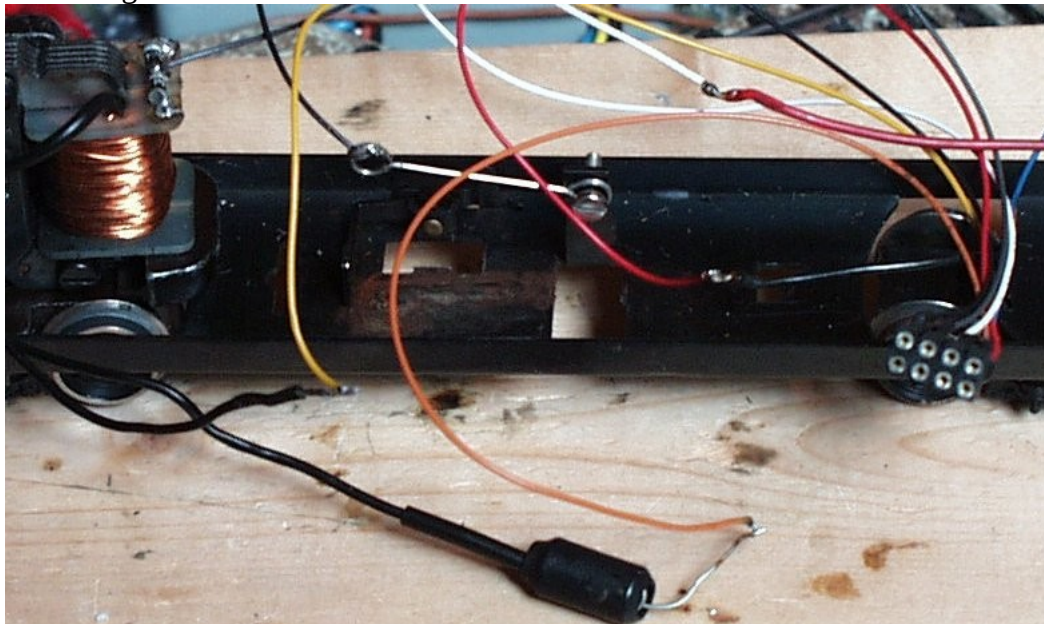


Abb.16: 3021.6 mit Feldmagnet, Dioden und Anschluss der NEM 652

Vor weiteren Schritten werden die vorhandenen Lötverbindungen nach außen isoliert, um interne Kurzschlüsse und somit eine Zerstörung der elektronischen Komponenten zu vermeiden.

Abschließend werden noch die gepolten Elektrolytkondensatoren 470µF/10V zwischen Dioden und Motorschild rechts (parallel zu den Feldmagnetspulen) verbunden und statt der Glühlampen zwei LED-Birnchen eingesetzt.

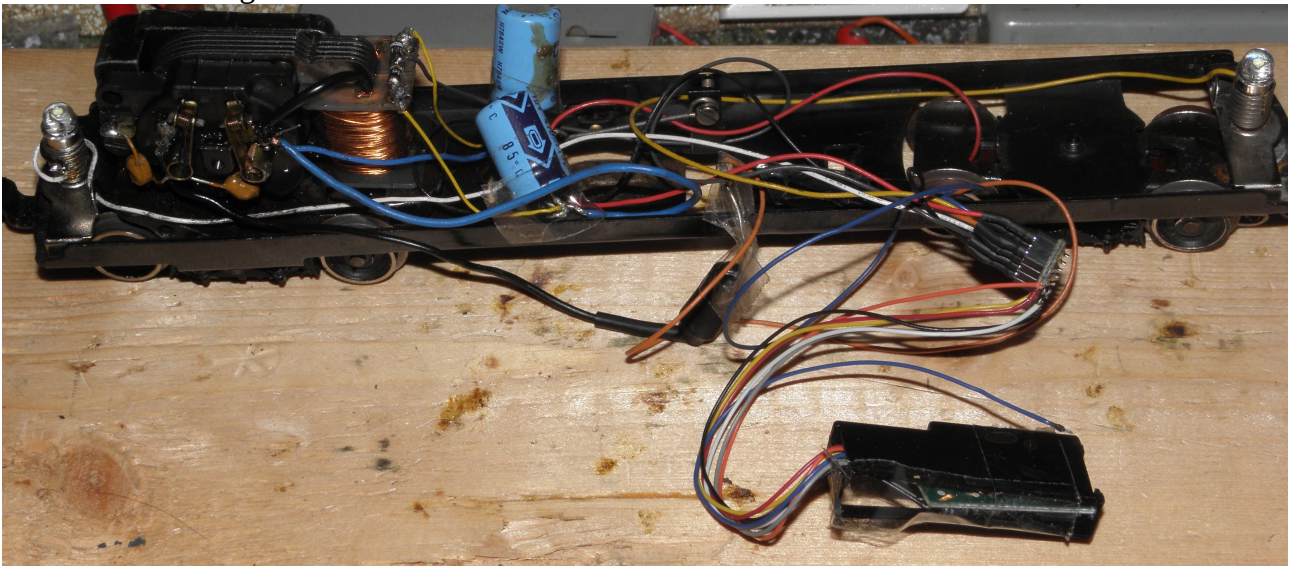


Abb.17: 3021.6 vollständig umgerüstet mit NEM 652, Dioden, Elkos und Dekoder Kuehn T-125

Für Testzwecke ist dieser Umbau geeignet, allerdings nicht für ständigen Dekoderwechsel. Die Schwachstelle ist hier die Schnittstelle, vor allem der Stecker (der noch mit Tesa abgeklebt wurde) verliert gerne die angelöteten Drähte. Die Anschlüsse entsprechen dem Schaltplan nach Abbildung 13.

3. Experimenteller Teil

3.1 Durchführung der Messungen

Zum Erhalt vergleichbarer Resultate sind einige Rahmenbedingungen notwendig, deren Einhaltung erforderlich sind. Die Vorgehensweise einer jeden Messreihe erfolgt nach folgendem Schema:

- 30 Minuten Einfahrt des Modells in jedem Betriebssystem bei Bemessungsspannung (12V Analog bzw. FS7/14 Digital)
- komplette UIt-Messung des Modells im Leerlauf: eine Runde bei höchster Trafospannung (analog max. 18 Werte, Digital maximale 14 Werte), eine Runde Leerlauf bei der nächsniedrigeren Einstellung bis zum Stillstand. *Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird nur U und t benötigt.*
- Lasttests bei vorgegeben Einstellungen: jeweils Zeitmessungen für drei Runden ohne Zug bei 9,18V, 12,56V und 15,03V Analog bzw. FS 4,7,11 von 14 in Digital, mit leichtem und mit schwerem Zug jeweils bei 12,56 und 15,03V bzw. FS7 und 11 von 14.
- Gleichlaufmessungen bei Bemessungsspannung (UIt jeweils 15 Werte) mit anschließender Temperaturmessung an Motor und ggf. Endstufen im Modell.
- erneute Einfahrt ca. 15 Minuten bei Bemessungsspannung nach erfolgtem Abschmieren der Drehbewegungselemente.
- Lastfahrten bei Bemessungsspannung: eine Runde komplette UIt-Messung, einen Wagen anhängen, eine Runde Einfahren und erneute UIt-Messung. Dies wird wiederholt, bis die Rundenzeit deutlich stärker zunimmt als die Last (Überschreitung des Leistungsmaximums).
- Das Modell wird angehalten, der Zug abgekuppelt, ein anderes Betriebssystem eingestellt und bei a) erneut begonnen. Es sei denn die neue Messreihe wird unmittelbar nach der Vorangegangenen durchgeführt, dann wird bei b) begonnen.

3.2 Auswertung der Messungen

Zur Auswertung werden lediglich die benötigten (und vorher gemessenen) Zugmassen der Wagen und die gestoppten Zeiten verwendet. Alle anderen Messwerte werden hier nicht benötigt. Aus der Streckenlänge von 13,181m, der Treibradradius (6,0mm) und der Getriebeuntersetzung 1:14,03 wird die Drehzahl des Läufers berechnet und für die Lastmessungen auf 100% bei Lokleerfahrt normiert. Die Rechenergebnisse werden anschließend in ein n_{rel} -M-Diagramm eingezeichnet und verglichen. Eine Regelung gilt dann als nachgewiesen, wenn die Abnahme der Drehzahl signifikant kleiner ist im Vergleich zur regelungsfreien Messung unter identischen Bedingungen. Anhand der Messreihe eines Analogmodells mit Relais in DC sei die Vorgehensweise erläutert (vollständige Angaben im Abschnitt 4.1, Eintragsnummer M3021.6:b_3) m =Zugmasse in g, n^* =normierte Drehzahl in %. Die angegebenen Zugmassen werden aus den jeweiligen Angaben der einzelnen Wagen^[9] berechnet bzw. gemessen^[10].

m	0	3,271	6,679	9,950	13,267	16,606	20,106	23,445
n^*	100	96,7	90,5	89,3	90,7	85,3	82,2	77,4
m	26,784	30,055	33,417	36,734	40,073	43,481	46,889	50,183
n^*	76,4	73,9	70,7	71,2	72,6	69,0	65,2	65,9
m	53,310	56,725	60,339	63,999	78,938	95,048	111,796	
n^*	62,6	60,3	57,1	53,7	49,7	39,6	33,7	

Tabelle 1: berechnete Zugmassen und normierte Drehzahlen

Aus den Angaben in Tabelle 1 wird nach Umrechnung der Zugmassen in Drehmomente (Faktor $6 \cdot 9,81/14,03$) dann das Diagramm^[11] erzeugt (Bildnachbearbeitung mit Gimp 2.6.2):

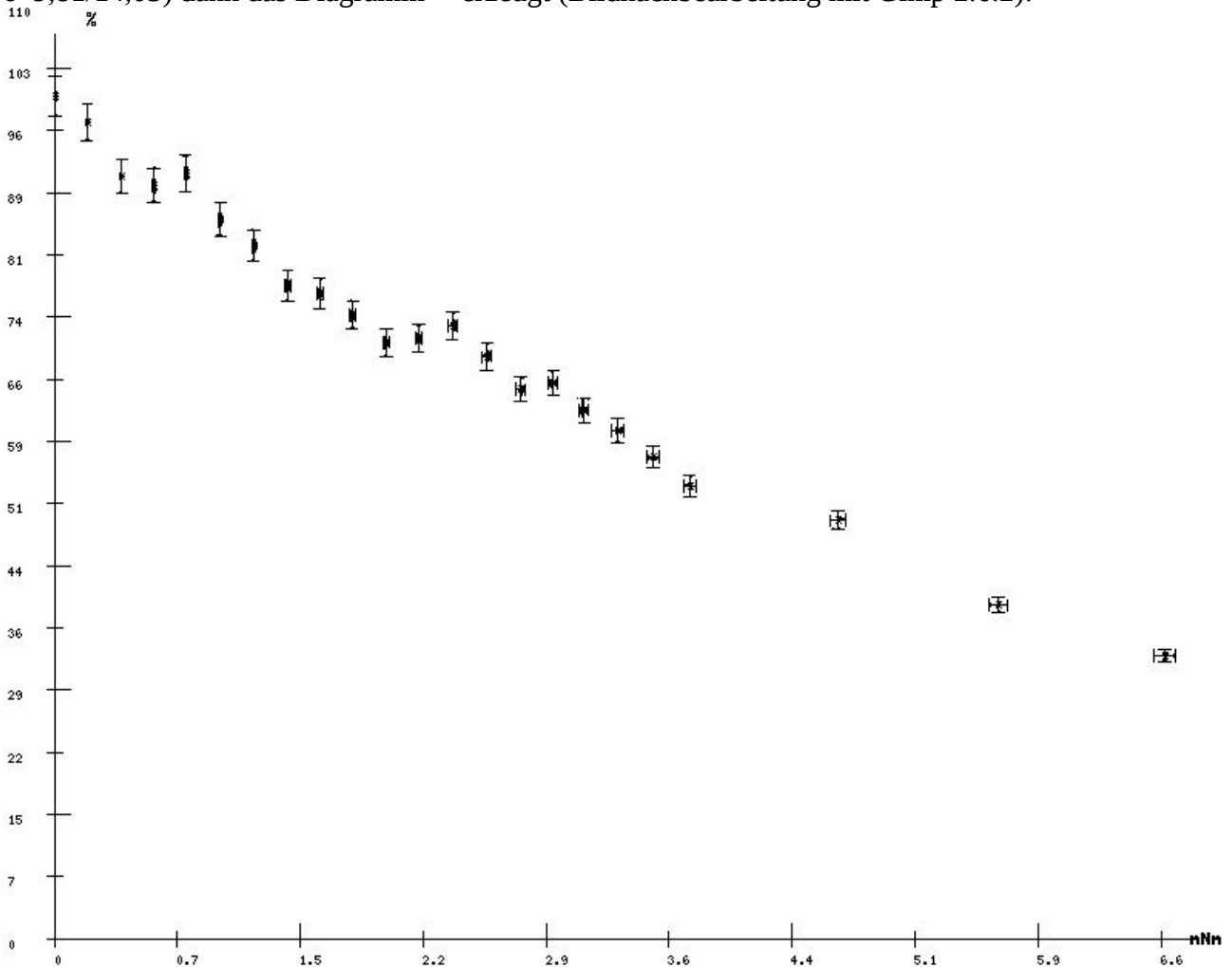


Abb.18: n_{rel} -M-Diagramm eines analog mit DC angesteuerten Modells

Das in Abbildung 18 gezeigte Diagramm dient als Referenz für den Vergleich mit anderen Ansteuerungen bzw. zum Nachweis der Regelung: bei gleicher Spannung ähnliches Aussehen, bei geringerer Spannung stärkere Abnahme der Drehzahlen, bei Regelung signifikant kleinere Abnahme der Drehzahl.

Da der Elektrolytkondensator das Ständerfeld stark verändert, muss auch die Kennlinie $n(U)$ überprüft werden (Reihenschlussverhalten oder fremderregter Motor). Dies geschieht durch Auftragen der Messwerte aus den UI-Messungen (Tabelle 2) in ein Diagramm (Abbildung 19):

Spannung in V	8,08	8,47	8,95	9,61	10,48	11,22
Drehzahl in Hz	82,8	94,6	110,9	128,5	145,1	158,8
Spannung in V	12,02	12,96	13,63	14,21	14,85	
Drehzahl in Hz	170,9	185,1	202,0	218,3	231,5	

Tabelle2: Spannungs- und Drehzahlwerte zur Feststellung des Motortyps

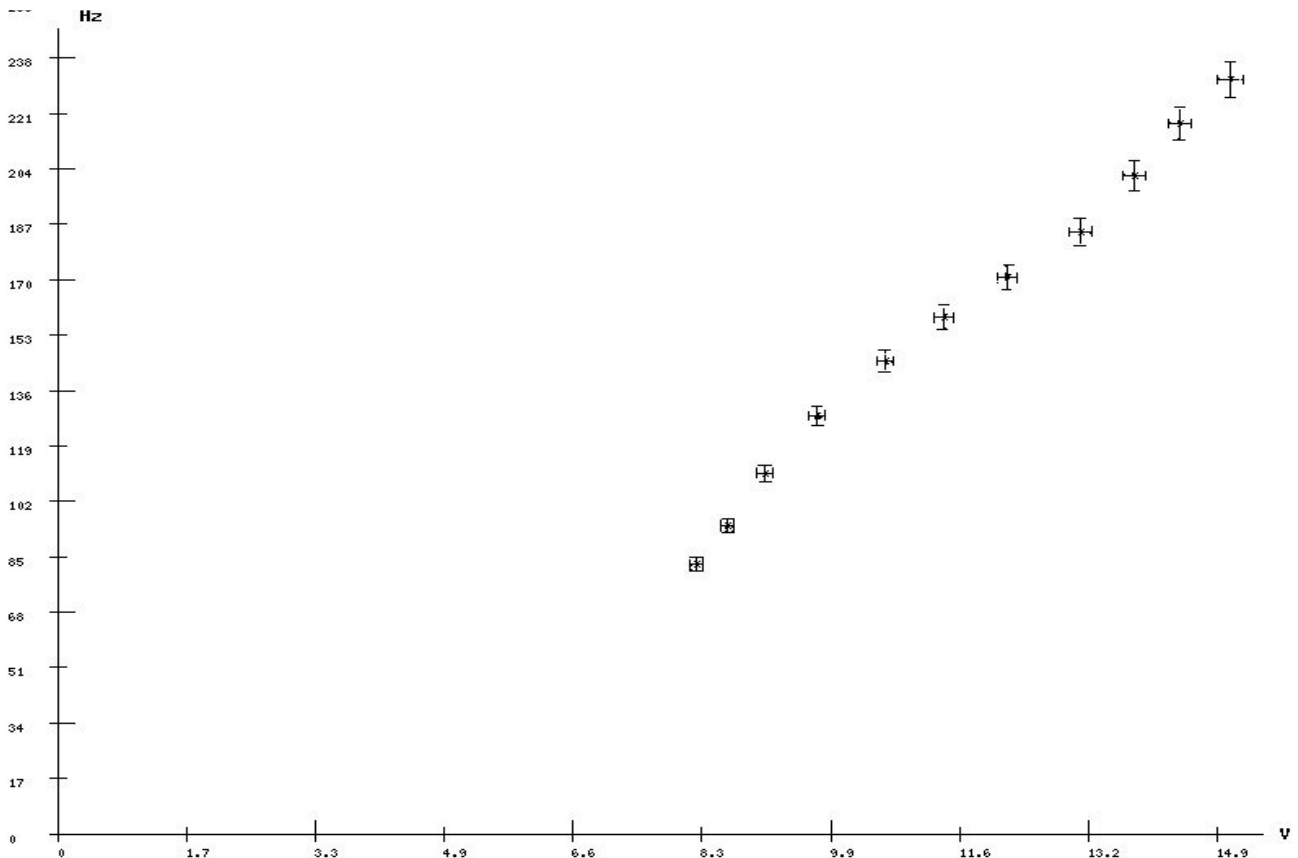


Abb.19: nU-Diagramm eines DC-angesteuerten Analogmodells

Eine Besonderheit ergibt sich im analogen PWM-Betrieb. Hier wurden die Fahrstufen des Digitalbetriebs simuliert. Die Spannung ergibt sich aus U und $\tau = (FS+1)/16$.

3.3 Fehlerbetrachtung

Jede Messung ist mit systematischen und zufälligen Fehlern^{[12],[13]} behaftet. Während systematische Fehler nicht ohne Weiteres erkennbar sind, können zufällige Fehler durch geeignete Maßnahmen reduziert^{[14],[15],[16]} werden. Zur Reduzierung systematischer Fehler ist auf eine geeignete Auswahl der Messgeräte und auf Einhaltung der Rahmenbedingungen zu achten. Zufällige Fehler können dagegen in gewissen Grenzen^{[13],[14]} durch Wiederholung der Messungen reduziert werden. Eine Rolle spielen die Fehlergrenzen in vorliegenden Fall nur dann, wenn deren Größenordnung einen signifikanten Unterschied in den Diagrammen verhindert. Die Abschätzung der Fehlergrenzen erfolgt nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz^{[14],[15],[16]}, nachdem sich bei Summen und Differenzen die absoluten Fehler, bei Produkten und Quotienten die relativen Fehler quadratisch addieren.

a) n_{rel} -M-Diagramm:

Fehlerquelle	Stopuhr	Rundenzeit	Streckenlänge	Wagenmasse	Raddurchmesser
Fehlergröße	0,005s/20s	2,32%	0,1%	0,5g/155g	0,05mm/12mm
Fehlerquelle	Ausrollweg	Temperatur			
Fehlergröße	2%	5%*			

Tabelle 3: Abschätzung der Fehlergrenzen für das n_{rel} -M-Diagramm *abgeschätzter Einfluss der Temperatur auf das Rollverhalten durch das Schmiermittel

Bei der quadratischen Addition der relativen Fehler sind all die Fehler vernachlässigbar, die eine Größenordnung kleiner sind als der größte Fehler. Folglich ist der Gesamtfehler zu berechnen nach:

$$F_{ges} = \sqrt{(0,0232^2 + 0,02^2 + 0,05^2)} = 0,0586 (\text{Gesamtfehlerabschätzung}) \quad (13)$$

Der Gesamtfehler in diesem Diagramm ist also für das Analogmodell bei 5,9%. Die Diagramme dürften also leicht zu unterscheiden sein.

b) n-U-Diagramm

Fehlerquelle	Stopuhr	Rundenzeit	Streckenlänge	Spannung	Raddurchmesser
Fehlergröße	0,005s/20s	2,32%	0,1%	1,06%	0,05mm/12mm
Fehlerquelle	Temperatur				
Fehlergröße	5%*				

Tabelle 4: Abschätzung der Fehlergrenzen für das nU-Diagramm, * abgeschätzter Einfluss der Temperatur auf das Rollverhalten durch das Schmiermittel

$$F_{ges} = \sqrt{(0,0232^2 + 0,0106^2 + 0,05^2)} = 0,0561 (\text{Gesamtfehlerabschätzung}) \quad (14)$$

Gesamtfehler hier 5,6%.

Die hier genannten Fehlergrenzen sind gegen die Abschätzung der Toleranzen im Betrieb von 15% vernachlässigbar.

3.4 Vergleich der Messergebnisse

- Analogbetrieb ohne Umbau DC vs. PWM (6,63 kHz bei 17,5V)

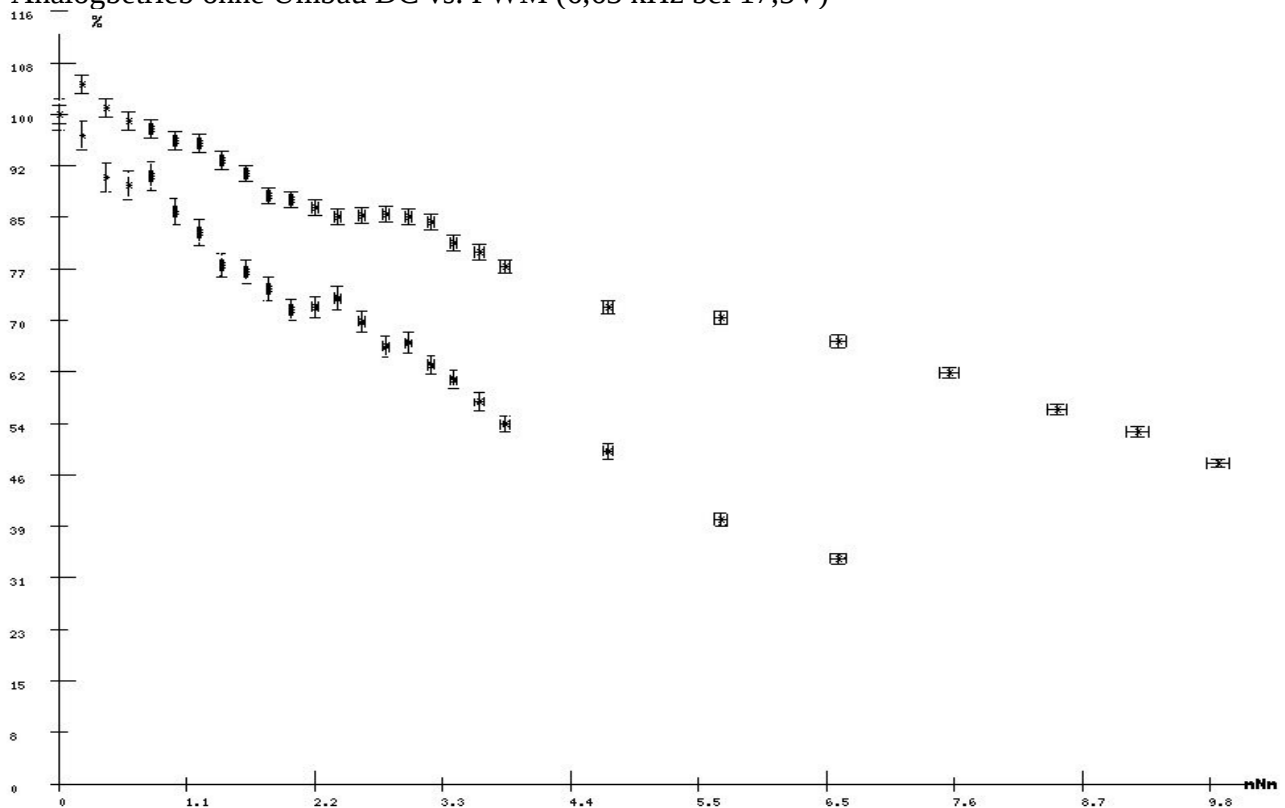


Abb. 20: relative Drehzahl als Funktion des Drehmoments analog.

In Abbildung 20 sind die relativen Drehzahlen unter Last für das nicht umgebaute Analogmodell aufgetragen. Der obere Graph gibt die Werte für PWM wieder, der untere jene für DC. Auf den ersten Blick unterscheiden sich beide Graphen erheblich. Die Resultate der PWM-Messreihe sind im Vergleich zu anderen Messreihen ein Ausreißer nach oben und somit nicht signifikant.

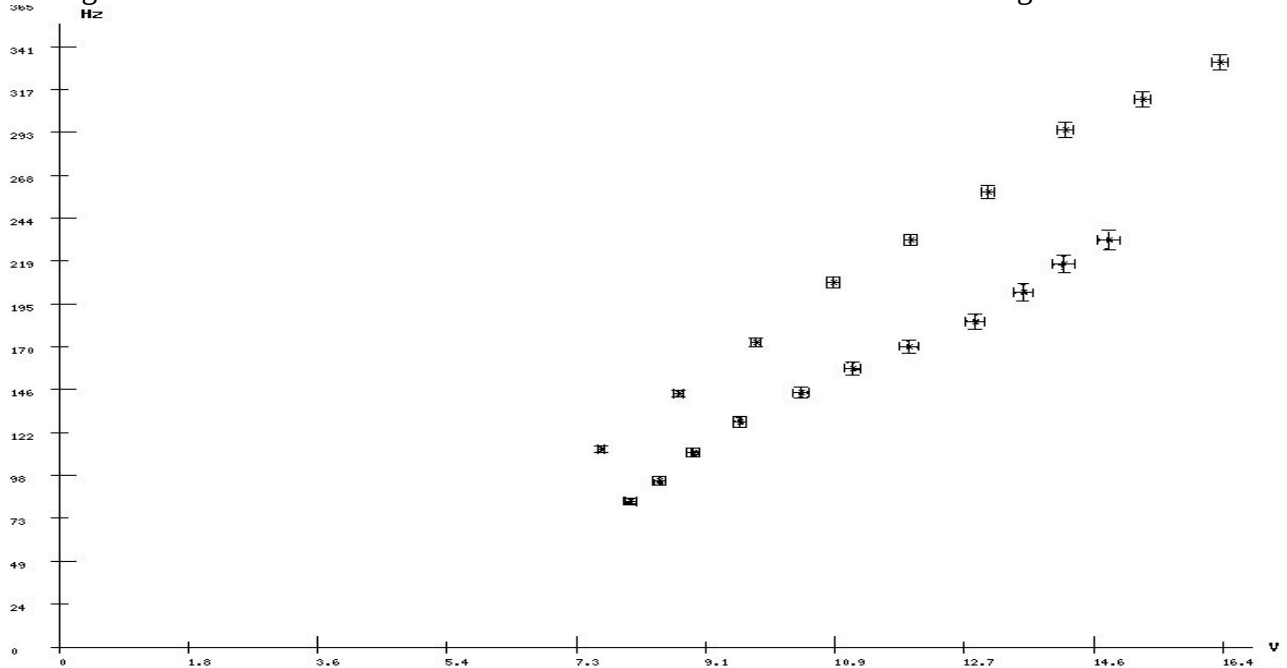


Abb.21: Drehzahl als Funktion der Effektivspannung, analog.

Abbildung 21 gibt die Drehzahlen in Abhängigkeit der Effektivspannung für den nicht umgebauten Reihenschlussmotor wieder. Das bereits zum nM-Diagramm geschriebene gilt hier entsprechend. Das Reihenschlussverhalten ist erkennbar (keine Gerade).

- Analogbetrieb

Im Analogbetrieb mit DC ist keine Regelung aktivierbar. Daher erwartet man für die umgebauten Motoren gleichwertiges Verhalten, lediglich der übliche Einfluss geringerer Spannungen sollte zu erkennen sein.

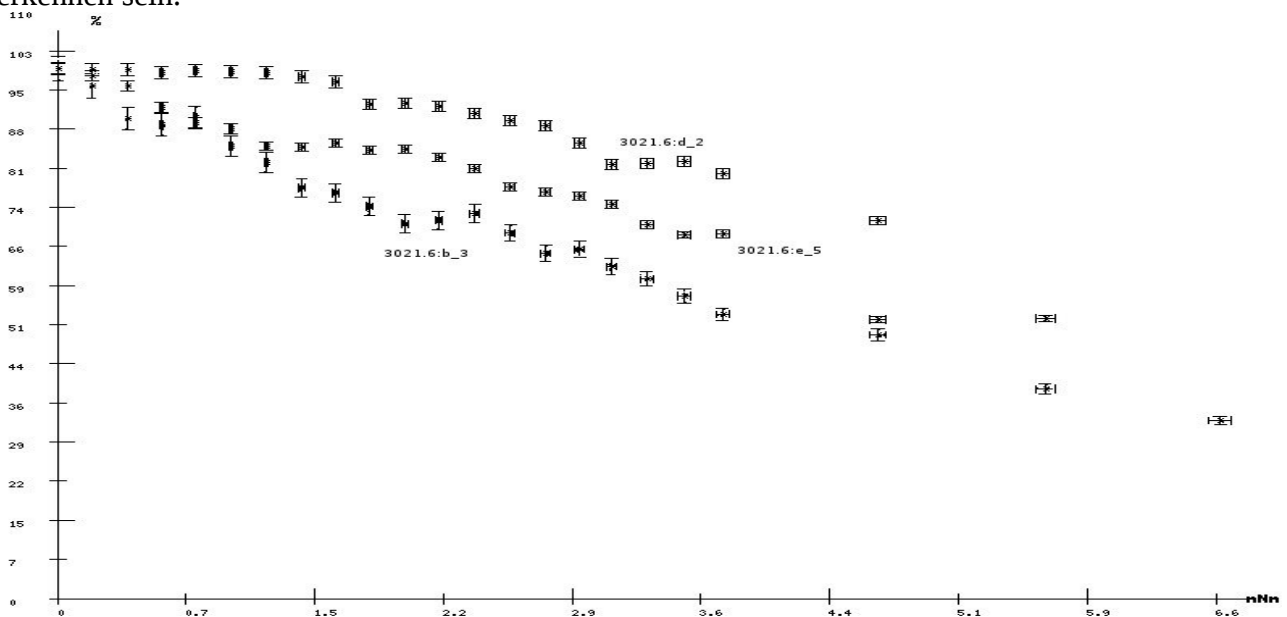


Abb.22: Vergleich der relativen Drehzahlen unter Last im Analogbetrieb

Wie in Abbildung 22 zu erkennen, ist zwischen den drei aufgenommenen Datenreihen kein signifikanter Unterschied festzustellen. Dies entspricht den Erwartungen, da keinerlei Regelung vorhanden ist. Die vorhandenen Differenzen basieren hauptsächlich auf unterschiedliche Temperaturen und Betriebszustände (Bürsten, Einfahrzeit...).

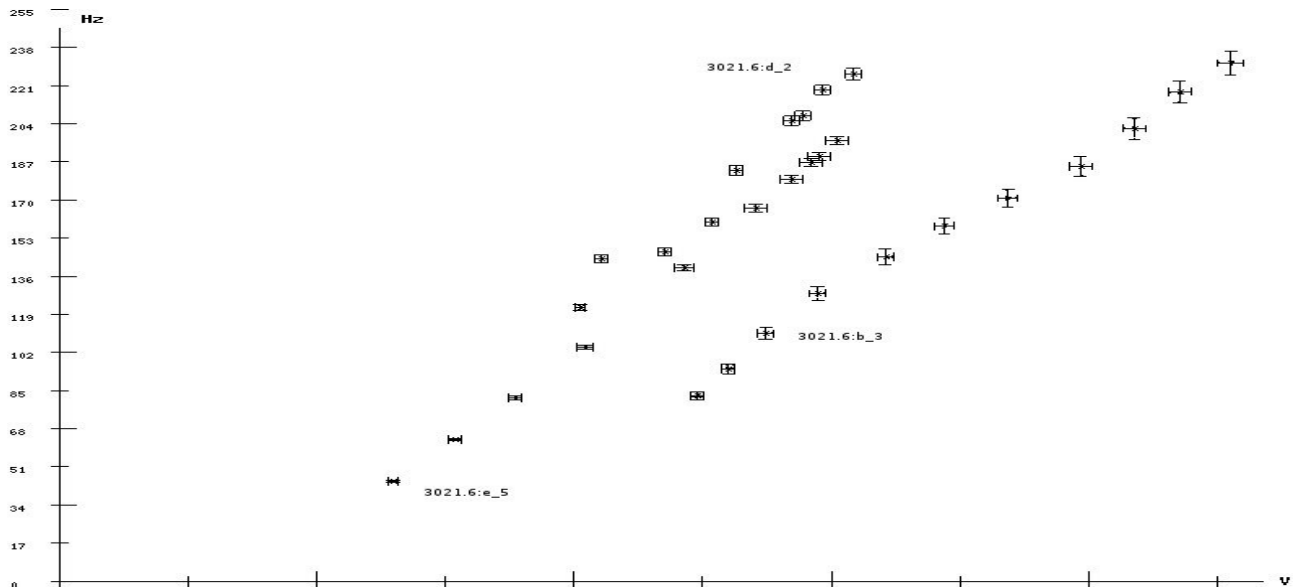


Abb.23: Drehzahl-Spannungsdiagramm im analogen DC-Betrieb

Während die Graphen des Analogmodells ohne Regelung (3021.6:b_3 und 3021.6:d_2) ein Reihenschlussverhalten aufweisen, könnte man bei eingeschalteter Regelung (3021.6:e_5) auf einen fremderregten Motor schließen. Da die Regelung im Analogbetrieb nicht aktiv ist (siehe Abbildung 22), kann dieser Graph im Analogbetrieb nur ein Zufall sein.

- Digitalbetrieb ohne Regelung

Vergleicht man hingegen die digitalen Steuerungen mit ausgeschalteter Regelung, so findet man weitgehende Übereinstimmung im n_{rel} -M-Diagramm:

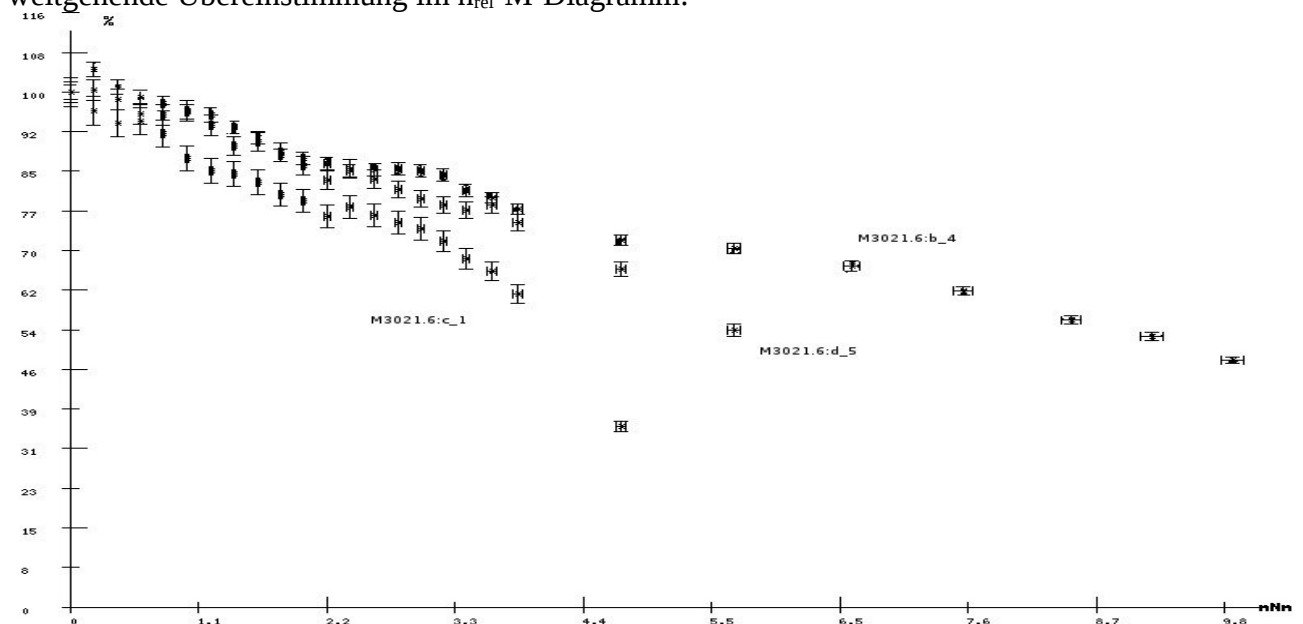


Abb.24: n_{rel} -M-Diagramm für digitale Steuerung, Regelung ausgeschaltet.

In Abbildung 24 sind die relativen Drehzahlen in Abhängigkeit der Belastung für analogen PWM (Digitalemulatation) unter 3021.6:b_4, Digitalbetrieb ohne Regelung mit Tams LD-G33 als M3021.6:c_1 und mit Kuehn T-125 als M3021.6:d_5 eingetragen. Auch hier ist die Digitalemulatation (analoges PWM) ein Ausreißer nach oben.

Ein ähnliches Bild ergibt auch das nU-Diagramm in Abbildung 25:

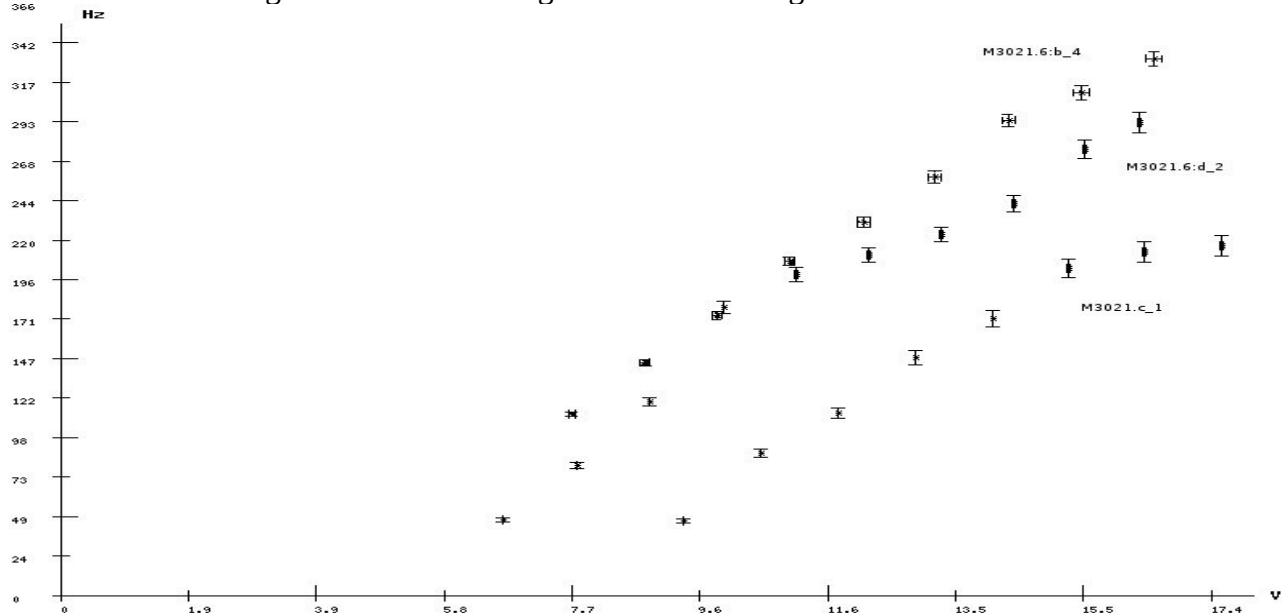


Abb.25: nU-Diagramm im Digitalbetrieb ohne Regelung

Ausreißer nach unten ist hier das Modell mit Tams LD-G33-Dekoder, was neben der Streuung auch auf andere Dekoderwerte zurückzuführen ist (größere Summe der Schleußenspannungen der Halbleiter). Ansonsten sind alle Steuerungen hier gleichwertig.

- Digitalbetrieb mit Regelung

Schließlich bleibt noch der Vergleich zwischen Digitalbetrieb ohne und mit Regelung. Hierbei ergab sich folgende Problemstellung: die CV-Einstellungen zu vmin (CV2), vmax (CV5) und vmid (CV6) mussten für einen ordnungsgemäßen Betrieb mit Regelung gegenüber dem Betrieb ohne Regelung verändert werden:

	CV2	CV5	CV6
ohne Regelung	1	255	128
mit Regelung	5	127	66

Tabelle 5: Vergleich der CV-Einstellungen zwischen Betrieb mit und ohne Regelung.

Dies erschwert leider den direkten Vergleich, war jedoch nicht anders möglich:

stellt man für den Betrieb ohne Regelung die unteren Werte ein, ist bei Fahrstufe 7

(Bemessungswert) kein sinnvoller Betrieb möglich weil das Modell zu langsam wird. Andererseits führt die obere Einstellung im Betrieb mit Regelung zur Höchstgeschwindigkeit ab Fahrstufe 7. Mit den angegebenen Werten ist zumindest im Leerlauf eine gleichwertige Geschwindigkeit vorhanden. Für den Graphen unter Last ohne Regelung bedeutet dies erheblich stärker negative Steigung als im Graphen dargestellt (der dargestellte Graph entspricht verdoppelter Klemmenspannung). Die Bezeichnungen M3021.6:d_xxx sind vom Betrieb ohne Regelung, jene mit der Bezeichnung M3021.6:e_xxx mit Regelung.

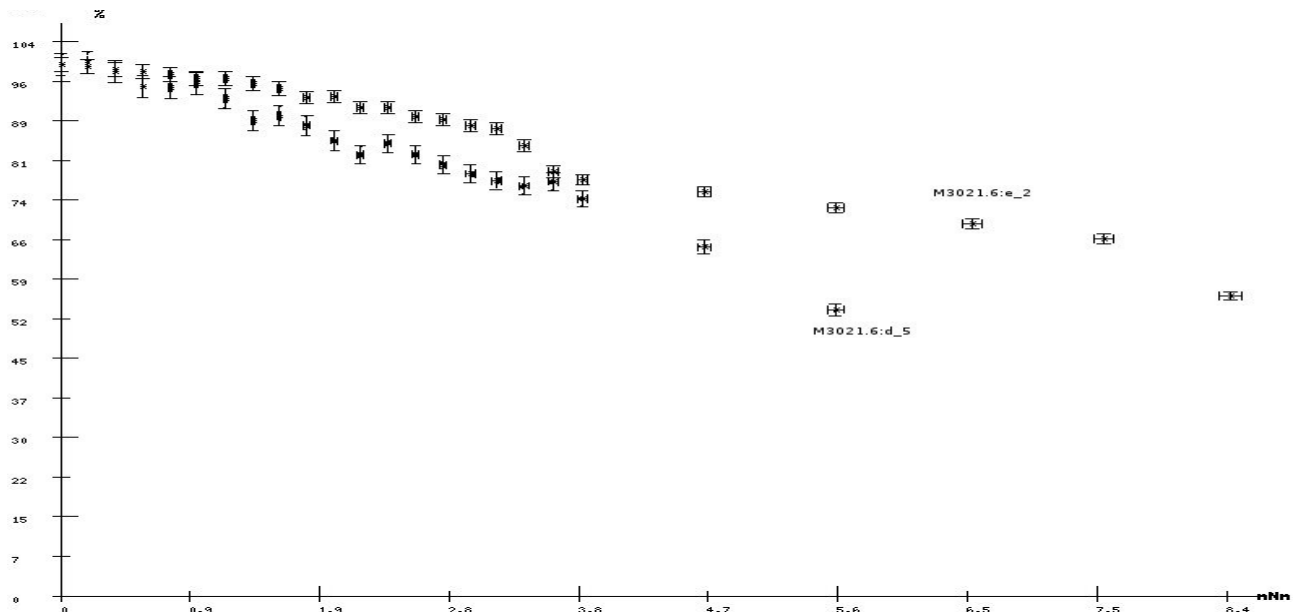


Abb.26: relative Drehzahl als Funktion des Drehmoment im Betrieb mit und ohne Regelung

Trotz der abgebildeten Gleichwertigkeit der Graphen ist das Ausmaß der Regelung zu erkennen, weil die d_Reihe mit verdoppelter Klemmenspannung durchgeführt wurde.

Abschließend noch der Vergleich der nU_Diagramme:

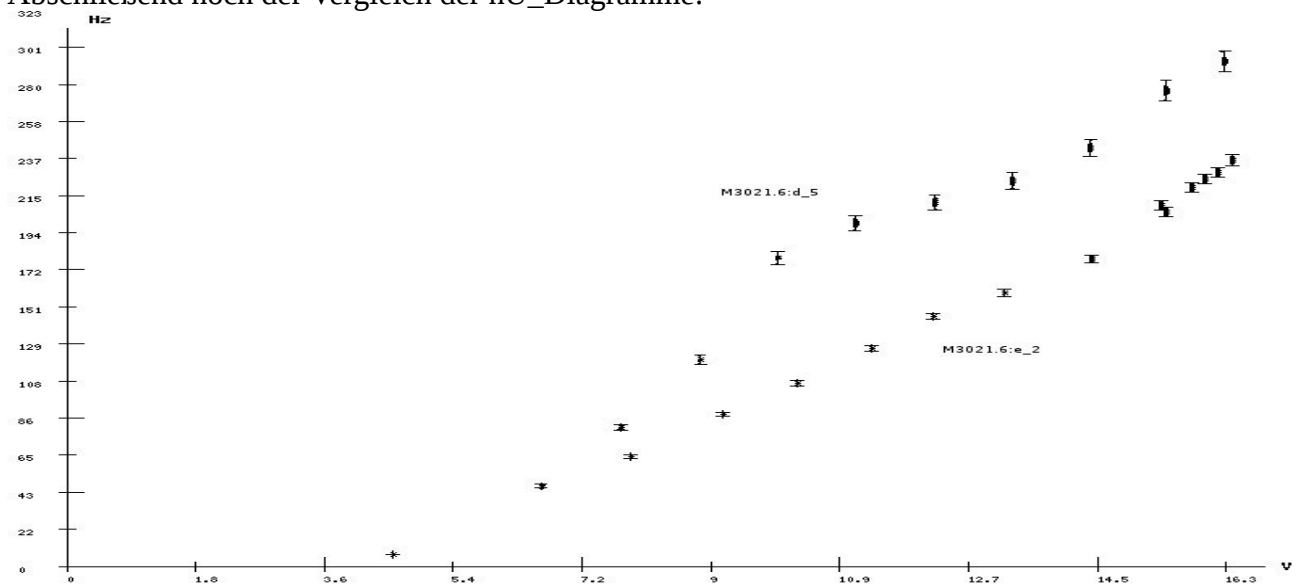


Abb.27: nU-Diagramme im Betrieb mit und ohne Regelung

Aus Abbildung 27 wird ersichtlich, daß die Regelung sich deutlich auf den Verlauf des Graphen auswirkt, indem die Geschwindigkeit erheblich gleichmäßiger ansteigt und zu deutlich niedrigeren Drehzahlen hinabreicht. Gleichzeitig ist nach wie vor das Reihenschlussverhalten des Motors erkennbar.

3.5 Nachweis der Regelung

Zum Nachweis der Regelung gibt es mehrere Kriterien:

a) deutlich niedrigere Geschwindigkeitsschwankungen

Geschwindigkeitskonstanz im Digitalbetrieb ohne Regelung im oberen Fall bei +/- 2,03%, mit Regelung +/-1,3%. Reproduzierbar durch aktivieren/desaktivieren und auch mit anderen Digitalzentralen und -Formaten. Insgesamt (alle getesteten Systeme) ergeben sich für die Geschwindigkeitsstabilität bei konstanter Fahrstufe/Spannung. Diese Schwankungen sind unabhängig von den CV-Einstellungen:

Ohne Regelung (3,11; 1,49; 2,09; 3,27; 1,2; 1,55)% = +/- 2,12%

Mit Regelung (0,49; 1,3; 1,17; 0,6)% = +/- 0,89%

b) deutlich niedrigere Mindestgeschwindigkeiten

Ohne eine Regelung bleibt ein Modell bei zu niedriger Spannung einfach stehen, selbst bei den geringsten Kontaktproblemen. Mit Regelung ist das Modell in einem weiteren Bereich niedriger Geschwindigkeiten steuerbar. Nach Zusammenfassung aller Testreihen ergeben sich als niedrigste, erreichbare Geschwindigkeiten, dies ist zudem unabhängig von den CV-Einstellungen:

Ohne Regelung: (112; 71; 40; 37; 42; 88) km/h = 54 km/h

Mit Regelung (14; 6; 42; 50)km/h = 14 km/h

c) vom Ausmaß der Regelung abhängige Reduktion der Geschwindigkeitsabnahme unter Last

Eine Regelung mit diesen Graphen nachzuweisen ist dann am leichtesten, wenn generell die selben CV-Einstellungen vorhanden sind. Im vorliegenden Fall war dies aus betrieblichen Gründen nicht möglich: mit der Einstellung CV2=1, CV5=255, CV6=128 erreicht das Modell mit eingeschaltener Regelung die Höchstgeschwindigkeit bereits bei Fahrstufe 7 in welcher der Lasttest durchgeführt wird. Andererseits ist das Modell mit der Einstellung CV2=5, CV5=127, CV6=66 bei Fahrstufe 7 nicht sinnvoll steuerbar, weil zu langsam. Diese sehr unterschiedlichen CV-Einstellungen führen automatisch dazu, dass das Regelungsausmaß nach Formel 10 nicht zu berechnen ist. Eine mögliche Extrapolation der Geschwindigkeiten scheidet mangels Umrechnungsformel aus.

d) gleichmäßigerer Anstieg der Geschwindigkeit bei Erhöhung der Fahrstufe

Die in Abbildung 21 gezeigte Kurve für die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Klemmenspannung (bzw. Fahrstufe) zeigt einen leicht gekrümmten Verlauf bei aktivierter Regelung. Alle anderen Graphen enthalten deutliche Abweichungen und Ausreißer in ihrem Verlauf. Ein Indiz für die Funktionsfähigkeit der Regelung.

e) Änderung des Tastgrads im Impulsoszillogramm bei Änderung der Belastung

Wird ein Motor ohne Regelung im Impulsbetrieb belastet, ändert sich lediglich die Amplitude, der Tastgrad bleibt konstant. Bei vorhandener Regelung ändert sich der Tasgrad.
Im Leerlauf wurde folgendes Oszillogramm aufgenommen:

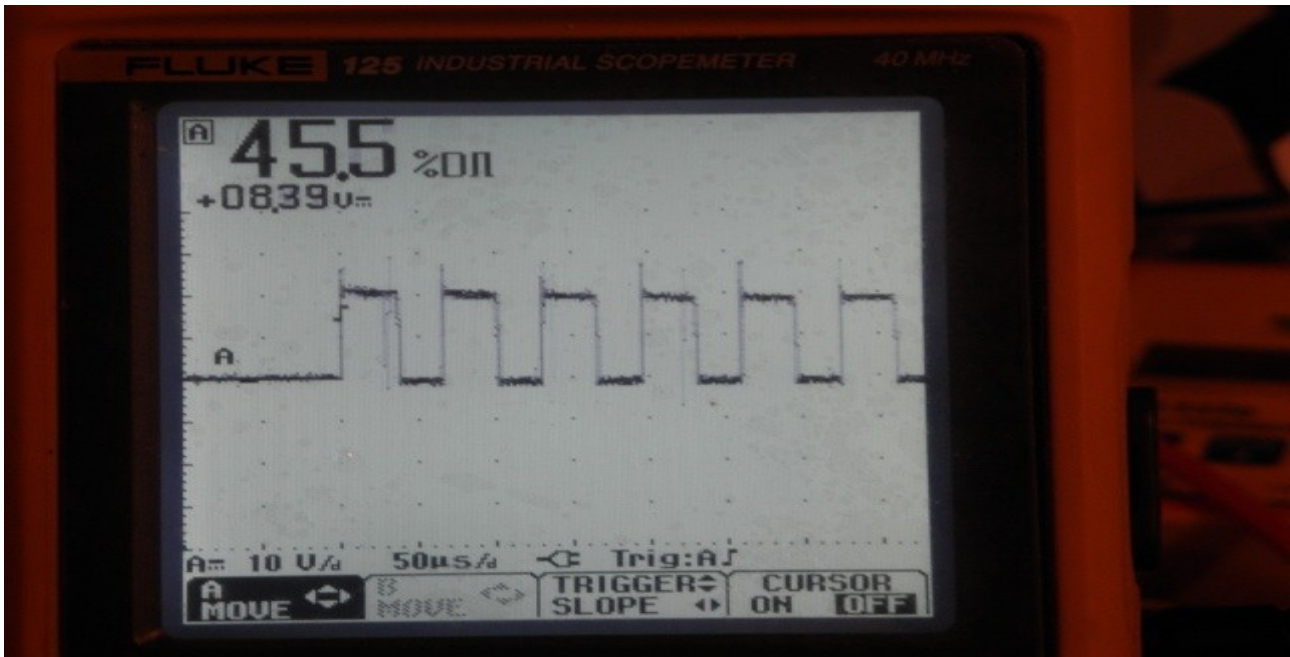


Abb.28: 3021.6 Oszillogramm im Leerlauf bei hochgebocktem Treibgestell und FS 32/128 DCC

Wird der Motor belastet (z.B. mit einem Schraubendreher, der an die Treibräder mit Haftreifen gedrückt wird) bei ansonsten gleichen Einstellungen, so ändert sich das Oszillogramm auf markante Weise, wie in Abbildung 29 gezeigt wird:

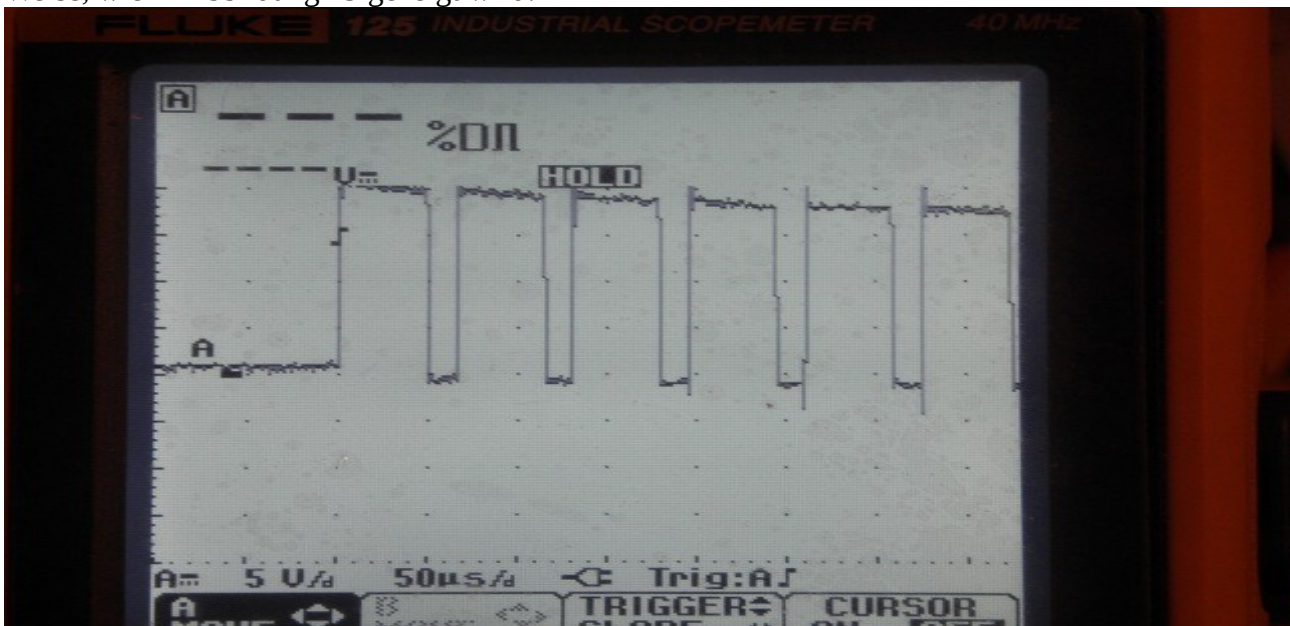


Abb.29: 3021.6 Oszillogramm unter Belastung bei hochgebocktem Treibgestell und FS 32/128 DCC

Anhand des Vergleichs zwischen Abb. 28 und Abb. 29 ist die deutliche Änderung des Tasgrads zu erkennen, ein eindeutiger Beweis für die Funktionsfähigkeit der Regelung.

3.6 Ausblick

In Abschnitt 3.5 ist die Regelung zum Aufbau nach dem Schaltplan in Abbildung 13 nachgewiesen. Das Ausmaß der Regelung gemäß Formel 10 konnte nicht berechnet werden aufgrund

unterschiedlicher Einstellungen der CV's. Ferner wurden die Parameter der Lastregelung nicht optimiert, was ebenfalls ein Erschwernis darstellt, die Leistungsfähigkeit insgesamt abzuschätzen. Folglich sind folgende Schritte notwendig, um diese Umbaumaßnahme abzusichern:

- Optimierung der Regelungsparameter auf den Aufbau. Leider fehlen hierzu bei den meisten Dekodern die notwendigen Parameter (P,I,D, Austastlücke, Frequenz, Regelungsausmaß).
- Die Dekoder sind in der derzeitigen Entwicklung auf DC-Motoren angepasst, womit das Reihenschlussverhalten des vorliegenden Aufbaus nur mit zusätzlichem Aufwand programmierbar ist (siehe nU-Diagramm in Abbildung 27, mit leicht exponentiellem Graphen).
- Bei anderen Motoren (Typ SFCM, DCM usw.) sind andere Kondensatoren notwendig, die besonders bei kleinen Modellen zu Platzproblemen, auch auf dem Feldmagneten, führen können. Die besonders großen Motoren vom Typ SLFCM1, die in den großen Triebwagen der 50'er Jahre sowie im Krokodil 3015 zu finden sind, erfordern noch größere Kondensatoren (1000µF) aufgrund der größeren Stromaufnahme dieser Motoren unter Last. Auch hier könnte es zu Platzproblemen kommen.
- Schwachpunkt dieser Umbaumaßnahme ist der Störfall, wenn ein Draht zur Feldmagnetspule abreißt. Dann liegt fast die volle Spannung am Kondensator an. Dies kann innerhalb kurzer Zeit zur Überhitzung und somit Zerstörung desselben führen. Dieses Risiko lässt sich jedoch deutlich reduzieren, indem diese Anschlüsse bei Wartungsarbeiten am Motor und Getriebe jeweils vorher abgelötet werden. Ferner ist die hier benutzte Lösung mit der Schnittstelle (lose in Gehäuse gelegt) nicht optimal.

Der durchgeführte Umbau ermöglicht die Verwendung eines beliebigen DC-Dekoders; lediglich auf die maximale Stromaufnahme muss geachtet werden. Dies ist jedoch ein übliches Kriterium bei der Auswahl des Dekoders. Einer Verwendung in den verschiedensten Betriebssystemen ist somit keine Grenze mehr gesetzt. Besonders interessant wird nun das Austesten derartig umgebauter Modelle auf ihre Langsamfahrtauglichkeit. Das vorliegende Modelle konnte mit dieser Maßnahme von $v_{\min} =$ ca. 46 km/h auf ca. 6 km/h gedrosselt werden. Mit anderen Dekodern und Parametern sind noch kleinere Geschwindigkeiten möglich. Gegenüber den Modellen mit fremderregten Motoren haben umgebaute Modelle der vorliegenden Art den enormen Vorteil der Ausrollens bei plötzlicher Stromunterbrechung. Eine zusätzliche Schwungmasse entfällt hier somit.

4. Messreihen

4.1 Zugmassen der benutzten Wagen

Von allen angehängten Wagen wurden die Fahrwiderstände sowohl berechnet als auch gemessen. Dabei war eine sehr gute Übereinstimmung zwischen theoretischen und praktischen Ergebnissen gefunden worden. Aus diesem Grund seien hier lediglich die berechneten Werte in der Reihenfolge angegeben, wie die Wagen angehängt wurden.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m _{fahr} (g)	3,27	3,41	3,27	3,32	3,34	3,50	3,34	3,34	3,27
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
m _{fahr} (g)	3,36	3,32	3,34	3,41	3,41	3,29	3,16	3,39	3,62
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
m _{fahr} (g)	3,66	14,97	16,14	16,78	16,14	15,46	11,58	11,53	18,99

Tabelle 6: berechnete Fahrwiderstandsmassen der angehängten Wagen

4.2 Messungen ohne Umbau

3021.6:b_[1-4] sind die Bezeichnungen für das nicht umgebaute Analogmodell, welches in vier verschiedenen Analogmodi getestet^[11] wurde. Zum Vergleich herangezogen wurden 3021.6:b_3 (DC) und 3021.6:b_4 (PWM 6,63 kHz 20V).

a) 3021.6:b_3

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	96,8	90,6	89,4	90,8	85,4	82,4	77,5	76,8	74,0
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	70,8	71,3	72,7	69,1	65,3	66,0	62,7	60,4	57,2
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	53,8	49,7	39,6	33,7					

Tabelle 7: relative Drehzahlen unter Last DC-analog bei 12V 3021.6:b_3

U in V	8,08	8,47	8,95	9,61	10,48	11,22
n in Hz	82,8	94,6	110,9	128,5	145,1	158,8
U in V	12,02	12,96	13,63	14,21	14,85	
n in Hz	170,9	185,1	202,0	218,3	231,5	

Tabelle 8: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:b_3

b) 3021.6:b_4

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	104,4	100,9	99,1	97,9	96,2	95,8	93,2	91,2	87,9
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	87,3	86,1	84,8	84,9	85,2	84,8	83,9	80,9	79,9
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	77,4	71,3	69,7	66,2	61,9	55,9	52,7	48,0	

Tabelle 9: relative Drehzahlen unter Last PWM-analog bei $U_{amp}=17,5V$ 3021.6:b_4

FS von 14	6	7	8	9	10	11
n in Hz	112,5	144,1	173,5	207,3	231,6	259,1
FS von 14	12	13	14			
n in Hz	294,4	311,5	332,6			

Tabelle 10: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:b_4

Toleranzen: Spannung: 0,73%; Zeiten: 1,38%

4.3 Messungen mit Umbau, ohne Kondensator, Regelung deaktiviert

Benutzter Dekoder: Tams LD-G33

Einstellungen: CV2,3,4=1; CV5=255; alle anderen CV auf Werkseinstellung.

Testreihe mit DC konnte nicht durchgeführt werden.

3021.6:c_1 (Digital, MMS, Zentrale Tams Easy Control, Booster B4 eingestellt auf 20V)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	96,4	94,0	94,3	91,9	87,2	84,7	84,2	82,4	80,0
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	79,0	76,1	77,8	76,2	74,8	73,9	71,0	67,8	65,2
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	60,9	35,2							

Tabelle 11: relative Drehzahlen unter Last Digital bei $U_{amp}=20V$ 3021.6:c_1

FS von 14	7	8	9	10	11	12
n in Hz	46,7	88,5	113,1	147,5	171,5	202,7
FS von 14	13	14				
n in Hz	213,3	217,1				

Tabelle 12: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:c_1

4.4 Messungen mit Umbau, mit Kondensator, Regelung deaktiviert

Benutzter Dekoder: Kuehn T-125

Einstellungen: **CV2=1**; CV3,4=0; **CV5=255**; **CV6=128**; CV29=4; CV56=32; **CV56=4**

Digitalbetrieb: Zentrale Tams Easy Control + Booster B4, eingestellt auf 20V, MMS

a) Analog DC 3021.6:d_2

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,8	99,8	99,4	99,8	99,4	99,2	98,9	97,4	93,2
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	93,9	93,0	91,8	90,1	89,3	85,9	82,0	82,1	82,9
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	71,4	52,9							

Tabelle 13: relative Drehzahlen unter Last analog bei 12V 3021.6:d_2

U in V	9,91	10,32	11,51	12,42	12,87	13,91
n in Hz	122,1	143,9	147,0	160,3	183,4	205,7
U in V	14,15	15,52	15,08			
n in Hz	207,9	219,5	226,3			

Tabelle 14: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:d_2

b) Digital MMS 3021.6:d_5

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100,4	98,8	95,7	95,7	96,4	93,5	89,5	90,4	88,4
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	85,7	83,0	85,1	83,1	81,2	79,4	78,1	77,2	78,0
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	74,8	65,8	53,9						

Tabelle 15: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 20V 3021.6:d_5

FS von 14	6	7	8	9	10	11
n in Hz	47,0	80,6	120,1	178,8	199,0	211,3
FS von 14	12	13	14			
n in Hz	243,0	276,4	292,9			

Tabelle 16: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:d_5

4.5 Messungen mit Umbau, Regelung aktiviert

Benutzter Dekoder: Kuehn T-125

Einstellungen: CV2=5; CV3,4=0; CV5=128; CV6=66; CV29=4; CV56=32; CV56=6

Die Höchstgeschwindigkeit musste halbiert werden, da ansonsten ab Fahrstufe 7/14 keine Geschwindigkeitsänderung wegen Erreichen des Maximums möglich ist.

Digitalbetrieb: Zentrale Tams Easy Control + Booster B4, eingestellt auf 20V, MMS

a) Analog DC 3021.6:e_5

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	98,7	96,7	92,8	89,8	88,7	85,3	85,3	85,9	84,6
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	84,9	83,4	81,2	77,7	76,8	76,0	74,5	70,6	68,6
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	69,0	52,7							

Tabelle 17: relative Drehzahlen unter Last analog bei 12V 3021.6:e_5

U in V	8,55	9,20	9,82	10,62	11,62	12,59
n in Hz	44,7	63,2	82,1	104,7	140,0	166,5
U in V	13,28	14,14	14,61	15,24		
n in Hz	179,4	187,1	189,8	196,7		

Tabelle 18: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:e_5

b) Digital MMS 3021.6:e_2

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,6	99,0	98,6	98,0	97,4	97,3	96,3	95,4	93,8
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	93,9	91,8	91,8	90,1	89,6	88,4	87,8	84,7	78,2
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	76,1	73,0	70,0	67,2	56,5				

Tabelle 19: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 20V 3021.6:e_2

FS von 14	1	2	3	4	5	6	7
n in Hz	6,9	64,1	88,6	106,6	126,7	145,0	158,7
FS von 14	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	178,4	205,7	209,8	219,9	224,9	228,8	235,7

Tabelle 20: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:e_2

5. Schrifttum

- [1] H. Häberle et al., „Fachkunde Informationselektronik“, Verlag Europa-Lehrmittel, Wuppertal 1984, ISBN 3-8085-3231-9
- [2] Friedrich Franz Mertens „Physikalisch-Technische Elektrizitätslehre“, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1927
- [3] F. Sass, Ch. Bouche, A. Leitner, „Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau“ 12. Auflage, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg Neudruck 1963
- [4] Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen, „Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau“ 21. Auflage 2005, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3-540-22142-5
- [5] Klaus Kern, Offenlegungsschrift DE 196 21 989 A1 vom 04.12.1997, „Antriebsblock für Fahrzeuge von Modelleisenbahnen“
- [6] Adolf Haass, Patentschrift DE 197 22 453 C1 vom 15.10 1998, „Elektrisches Antriebssystem“
- [7] DIN IEC 60469-1
- [8] Einbauanleitung Kuehn T-125 Dekoder zur Verwendung von Reihenschlussmotoren.
- [9] <http://www.sheyn.de/Modellbahn/FAQ/Zuggewicht.php> (29.12.2011 09:21)
- [10] <http://www.sheyn.de/Modellbahn/FAQ/Reibung.php> (29.12.2011 09:24)
- [11] http://www.sheyn.de/Modellbahn/mb_loktests/ (29.12.2011 12:49) in den verschiedenen Unterverzeichnissen mit Auswahltabellen (UIt, Wirkungsgrade, Drehzahlen) und automatischer Diagrammerzeugung
- [12] Horst Ludwig, „Mathematische Grundlagen für Pharmazeuten“, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, 1987
- [13] Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig "Taschenbuch der Mathematik" 6. Auflage, Verlag Harri Deutsch 2006, ISBN 978-3-8171-2016-1
- [14] Horst Stöcker et al. "Taschenbuch der Physik" 5. Auflage, Verlag Harri Deutsch 2005, ISBN 978-3-8171-1721-3
- [15] Horst Rinne, "Taschenbuch der Statistik" 4. vollständig überarbeitete Auflage Verlag Harri Deutsch 2008, ISBN 978-3-8171-1827-4
- [16] DIN 1319-1 bis 4