

Regelung mit Reihenschlussmotoren Eine Verbesserung

Inhaltsverzeichnis

Problemstellung	3
Zusammenfassung	4
Danksagung	5
1. Theoretischer Teil	6
1.1 Einleitung	6
1.2 Steuerungen	6
1.3 Regelungen	6
1.4 Optimieren einer Regelung	8
2. Material und Methoden	9
2.1 Auswahl eines Referenzmodells	9
2.2 Auswahl der benötigten Bauelemente	9
2.3 Auswahl der Messgeräte	11
2.4 Planung der Messreihen	11
2.5 Durchführung des Umbaus	12
3. Experimenteller Teil	16
3.1 Durchführung der Messungen	16
3.2 Einstellung der Regelungsparameter auf den Motor	16
3.2.1 Allgemeine Einstellung eines Uhlenbrock 76200 als Referenz	16
3.2.2 Einstellung des Tams LD-G33 auf Elektronik ohne Cx	21
3.2.3 Einstellung des Tams LD-G33 auf Elektronik mit Cx	21
3.2.4 Einstellung der Zimo MX 63x-Familie auf die Elektronik mit Cx	21
3.3 Auswertung der Messungen	22
3.4 Fehlerbetrachtung	35
3.5 Vergleich zwischen den Schaltungen ohne/mit Cx	38
3.5.1 Modelltyp 3000	38
3.5.2 Modelltyp 3021	41
3.5.3 Modelltyp 30159/36159	43
3.5.4 Modelltyp 33221	47
3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion	48
3.6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	48
3.6.2 Diskussion der Ergebnisse	50
3.6.3 Ausblick	53
4. Messreihen	54
4.1 Zugmassen der benutzten Wagen	54
4.2 Messungen am Modell 3000	54
4.3 Messungen am Modell 3021	58
4.4 Messungen an den Modellen 30159 und 36159	60
4.5 Messungen am Modell 33221	64
5. Schrifttum	66

Problemstellung

Eine funktionierende Regelung mit Reihenschlussmotoren wurde mit einfachen Mitteln bereits^[1] beschrieben. Die hierbei erzielte Regelgüte ist nicht besonders hoch. Zudem waren weitere Versuchsobjekte sowie eine Beschreibung der Optimierung der Regelung noch nicht verfügbar. Diskussionen und Hinweise im Internet auf eine mögliche Verbesserung^[2] zeigten indes, dass dies erst der Anfang ist. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es folglich,

- die Verbesserung vorzustellen,
- die neue Schaltung experimentell zu überprüfen,
- die neue Schaltung mit der ursprünglichen bezüglich ihrer Funktion zu vergleichen,
- eine Prozedur zur Optimierung der Regelung für diese Schaltung vorzustellen,
- die Schaltung mit anderen als funktionierend geltenden Regelungen zu vergleichen.

Zusammenfassung

Im der vorliegenden Arbeit wird eine Erweiterung für die Schaltung zur Regelung mit Reihenschlussmotoren^[1] vorgestellt. Diese Erweiterung ist ein Vielschichtkondensator, welcher zwischen den Dioden für die Feldmagnete und dem Motorschildanschluss der Feldmagnete geschaltet wird. In der vorliegenden Arbeit werden Anleitungen zur Einstellung von Dekodern der Zimo MX 63x-Familie und des Tams LD-G33 vorgestellt.

Aufgrund der Baugröße dieses Kondensators ist auch die Erweiterung in alle Modelle einbaubar, in welche die ursprüngliche Schaltung passt. Die Verbesserungen durch diese Maßnahme betreffen

- bessere Regelgüte, vergleichbar mit denen von fremderregten Motoren
- leichtere Dekodereinstellung durch Vergrößerung der induzierten Spannung
- verbesserte Langsamfahreigenschaften einschließlich geringerer Mindestgeschwindigkeit

Weitere Testreihen zum weiteren Feintuning gerade im Bereich der Langsamfahrt sind notwendig. Die vorgestellte Schaltung eröffnet weitere Perspektiven im Hinblick auf die Verwendung bislang wenig genutzter Motoren und ist somit eine vollwertige Alternative zur Umrüstung auf Permanentmagnete. Bei Motoren mit hoher Stromaufnahme sogar die bislang einzige Möglichkeit unter Erhalt des Originalmotors.

Danksagung

An der Erstellung dieser Ausarbeitung haben eine Reihe von Personen mitgewirkt. Ihnen möchte ich hier herzlich danken:

Herrn H.-J. Mauser für die freundliche Genehmigung zur Wiedergabe seiner Vorschrift zur Einstellung der Uhlenbrock 76200-Dekoder,
Herrn Thomas Horstmann für seine Anregungen, die zu dieser Verbesserung führten,
sowie für das Korrekturlesen,
Herrn Karl-Friedrich Schwanck für das Korrekturlesen.

1. Theoretischer Teil

1.1 Einleitung

Die Grundlagen des Aufbaus von Motoren sowie deren grundlegendes Verhalten wurden bereits in der Literatur beschrieben ^{[1],[3]-[7]} und brauchen daher nicht erneut notiert zu werden. Lediglich der Abschnitt über die Regelung muss ausführlicher behandelt werden, um Wirkungsweise und Optimierung der Einstellungen leichter zu gestalten und zu verstehen.

1.2 Steuerungen

Unter einer Steuerung versteht man i.A. den Betrieb einer Maschine, die vom Benutzer mit einem Steuerelement (z.B. einem Drehknopf) auf einen Betriebspunkt eingestellt wird und dann läuft. Die Maschine wird dann im Betrieb sämtliche äußeren Änderungen ohne Ausgleich übernehmen. Bei einem Elektromotor bedeutet dies eine Variation der Drehzahl bei Last- und Spannungsänderungen je nach Stärke des Motors. Sofern die Drehzahl des Motors geändert werden soll oder muss, ist eine Aktion des Benutzers notwendig. In der Modellbahn wird dies auch als „Direktsteuerung“ bezeichnet, weil alle geschwindigkeitsrelevanten Maßnahmen ausschließlich vom Benutzer durchgeführt werden. Eine Rückmeldung und somit Konstanthaltung der Geschwindigkeit erfolgt zumindest nicht automatisch. Diese Vorgehensweise war jahrzehntelang maßgeblich verbreitet als Analogsteuerung: mehr Betriebsspannung für den Motor bei ansteigenden Rampen, weniger Spannung bei Gefällestrrecken. Im Zuge einer Automatisierung mit Hilfe vor allem der Digitaltechnik wurden Begehrlichkeiten geweckt, die ein Eingreifen des Benutzers reduzieren sollten. Dadurch wurde der Ruf nach einer Regelung laut, dem recht schnell Folge geleistet wurde. Wie nun eine Regelung realisiert wird und welche Eigenschaften sie hat, wird im folgenden Abschnitt behandelt.

1.3 Regelungen

Eine typische Anforderung an eine Regelung ist in einem Satz formuliert: die Geschwindigkeit soll automatisch konstant gehalten werden. Damit dies möglich wird, ist außer dem Motor und der Ansteuerungselektronik eine Rückmeldung vom Motor zur Elektronik notwendig. Alles zusammen wird als Regelkreis (wegen der Rückmeldung) bezeichnet. Ein Regelkreis besteht aus einer Regelstrecke (dem Antrieb) und einer Regeleinrichtung (der Elektronik).

Das Ganze funktioniert wie folgt: die Elektronik gibt eine Spannung an den Motor. Dieser stellt sich auf typische Weise auf diese Spannung ein, und es ergibt sich eine Drehzahl, die von der Spannung (Stellgröße) abhängt. Da aber die Motordrehzahl auch noch von anderen Größen, die als Störgrößen bezeichnet werden, beeinflusst wird (Last, Temperatur usw.), verändert sich die Motordrehzahl, wenn die Stellgröße einfach konstant belassen wird. Die naheliegendste Methode zur Gewinnung einer Rückmeldung vom Motor ist die Verwendung eines Tachos. Dies wird im Bereich der Modellbahn tatsächlich in seltenen Fällen realisiert, indem die Motorschwungmasse an ihrem Umfang mit einer abwechselnd weiß und schwarz gestreiften Folie beklebt wird. Die Abnahme des Tachosignals hat den Vorteil, sehr exakte Regelungen zu ermöglichen, lässt sich aber vor allem bei kleinen Modellen aus Platzgründen kaum realisieren. Auch nachträgliche Umrüstungen wären oftmals nicht möglich. Im Bereich der Modellbahnen nutzt man daher am weitesten häufigsten den Umstand, dass ein Elektromotor immer dann als Generator weiterläuft, wenn die versorgende Spannung unterbrochen wird. Hierfür genügen bereits

äußerst kurzzeitige Unterbrechungen, die möglich sind, wenn eine gepulste Spannung an den Motor abgegeben wird: z.B. eine Impulsbreitenmodulation (PWM). In den entstehenden Pausen erzeugt die tatsächliche Drehzahl eine induzierte Spannung wenn die Felderregung bestehen bleibt (Die induzierte Spannung wird auch als Umlaufspannung oder Gegen-EMK bezeichnet). Der große Nachteil dieser Methode zur Gewinnung der Rückmeldegröße sei jedoch nicht verschwiegen: die induzierte Spannung ist extrem vom Motortyp abhängig, womit die weitere Verarbeitung der Rückmeldegröße aufwändiger wird. Außerdem ist auch der Aufwand für die korrekte Einstellung des Systems wesentlich erhöht! Trotzdem befasst sich die vorliegende Arbeit mit genau dieser Methode, weil sie für Nachrüstungen verfügbar ist und im Übrigen die weiteste Verbreitung gefunden hat. Die induzierte Spannung wird nun im weiteren Verlauf von einer Messeinrichtung aufgenommen und umgeformt, sodass in der Regeleinrichtung eine Verarbeitung möglich ist. Dazu bildet die Regeleinrichtung die Differenz zwischen Sollwert der Stellgröße und dem Istwert aus der Messeinrichtung. Diese Regeldifferenz wird dann zur Stellgröße addiert, und der Motor kann sich auf die neue Spannung einstellen. Diese Differenzbildung geschieht periodisch in den o.a. Pausen (den sog. Austastlücken) und nicht kontinuierlich. Wird der Motor auf diese Weise betrieben, so ist stets eine Regeldifferenz vorhanden, deren Größe von der Stärke der Regelung abhängt: je stärker die Regelung, desto geringer die Differenz. Da die Regelung proportional zur Differenz eingreift, nennt man diese Art von Regler auch „Proportionalregler“ (P). Gegenüber einem unregelmäßigen Antrieb eine erhebliche Verbesserung!

Die Zielvorgabe ist jedoch, eine absolute und nicht eine angenäherte Ausregelung zu erreichen. Daher ist eine weitere Maßnahme erforderlich, die die Regelung zeitabhängig beeinflusst. Dies geschieht wie folgt: die Zeitspanne zwischen zwei Austastlücken ist festgelegt. Zu jedem Messzeitpunkt wird die Differenz Sollwert-Istwert gebildet. In einem zweiten Rechenschritt wird diese Differenz mit der Zeit zwischen zwei Messzeitpunkten multipliziert. Multipliziert wird außerdem noch mit einem passenden Faktor. Abschließend wird das Resultat zum Sollwert addiert. Die beschriebene Art der Auswertung entspricht einem Aufsummieren über die Zeit, und das ist mathematisch eine Integration. Folglich wird diese Art der Regelung auch Integralregler (I) genannt. Mit Hilfe dieses Werkzeugs ist es nun möglich, die Regeldifferenz auf Null zu reduzieren. Ein Nachteil aber ist, dass jede Integration Zeit benötigt. In der Modellbahn kann dies u.U. auch zu lange dauern. Um dieses Problem zu reduzieren, ist ein weiterer Schritt notwendig, der ebenfalls zeitabhängig ist.

Zu diesem Zweck wird in einem weiteren Rechenschritt zusätzlich eine Differenz zwischen dem letzten Messzeitpunkt und dem aktuellen gebildet. Diese Differenz ist ein Maß dafür, wie sehr (bzw. wie schnell) sich die Stellgröße ändert. Mathematisch ist dies nichts anderes als ein Differential, womit dieser Teil eines Reglers auch „Differentialregler“ (D) genannt wird. Regelkreise werden mit den Kürzeln der enthaltenen Reglertypen bezeichnet. Sind alle drei vorhanden, wird dies kurz PID genannt.

In der Literatur^{[8],[9]} werden diese Regeleinrichtungen mit ihren Eigenschaften und mathematischen Methoden ausführlich besprochen. Für die praktische Anwendung reicht dies jedoch nicht aus, zumal die Beobachtungen in der Modellbahn nicht mit den theoretischen Ableitungen übereinstimmen (es wurde bislang noch kein einziges Modell mit einer Regeldifferenz = 0 beobachtet!). Dies ist auf folgende Ursachen zurückzuführen: Alle theoretischen Ableitungen für Regler mit I-Anteil gehen von einer Sprungfunktion aus, die einmalig ihren Wert ändert und dann konstant bleibt. Dies ist in der Praxis aber nicht der Fall. Die Störgrößen ändern sich schneller, als die Regeleinrichtungen reagieren können (Spurerweiterungen, Kurven, Lastschwankungen, Spannungsschwankungen, Unebenheiten, um nur einige zu nennen). In der Literatur^[9] S.746 wird zudem eine schlechtere Regelgüte (d.h. Ausregelung) bei motorischen Antrieben genannt. Ferner entsteht durch den D-Regler eine Art Unruhe, die zu Schwingungen, im Extremfall zu

resonantem Verhalten und damit sogar bis zum Ausfall der Regelung führen können. Deshalb ist eine Anleitung notwendig, wie ein (PID)-Regler sinnvoll und stabil einstellbar ist.

1.4 Optimierung einer Regelung

Jede Regelung ist nur so gut, wie sie eingestellt ist. Das Ziel einer absoluten Ausregelung ist jedoch oft nicht erstrebenswert oder gar erreichbar, insbesondere in motorischen Antrieben^{[8],[9]}. Eine Besonderheit in der Modellbahn sind auch Einflüsse außerhalb des Regelkreises die ebenfalls nicht ausgeregelt, sondern lediglich reduziert werden können. Theoretische Ableitungen verwenden verschiedene Kriterien, die die Qualität einer Regelung bewerten, eine davon ist die als Ausmaß für die Regelgüte benutzte Regelfläche^{[9] Kap. 10}. Die hier erzielten Verbesserungen werden jedoch anhand von Eigenschaften erreicht, die im Millisekundenbereich liegen; sie sind somit für den Anwender von Modellbahnfahrzeugen nicht mit vertretbarem Aufwand zu bestimmen und einzustellen. Wesentlich praktischer sind Regelungen, die stabil sind. Und genau für diese Stabilitätsgrenze wurde bereits 1942^[10] eine Arbeit an pneumatischen Reglern von Ziegler und Nichols vorgestellt, die die Regelung für einen industriellen Prozess optimierten. Diese Einstellregeln und die damit erhaltenen Parameter werden auch heute noch oft referenziert. Die Z.-N.-Optimierung wird auch als „closed loop method“^[11] bezeichnet, weil sie an einem geschlossenen Regelkreis stattfindet. Neben Ziegler-Nichols wird oft auch eine als „open loop method“ bezeichnete Optimierung nach Chien, Hrones und Reswich^[12] benannt. In^[11] werden neben der Tyreus-Luyben-Methode^[13] noch eine ganze Reihe weiterer Methoden genannt und anhand der Regelfläche verglichen. Alle Optimierungen haben im Endeffekt einen Satz von Parametern, mit denen ein PID oder PI-Regler dann optimal auf den jeweiligen Einsatzzweck eingestellt ist. Es fehlt nun noch eine Adaption der Optimierungsvorschriften auf die Modellbahn, denn mit An- und Ausregelungszeit, Vorhalte- und Nachlaufzeitkonstanten wird in der Modellbahn nicht gearbeitet. Die im Abschnitt 3.2 wiedergegebenen Einstellregeln sind die Basis für die Einstellregeln anderer Dekoder in dieser Arbeit.

Als Alternativen für die o.g. Regelgüte werden hier benutzt:

a) das Ausmaß der Geschwindigkeitseinbuße bei Belastung^{[1] S.8 Formel (10)}:

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

n steht hier für die Drehzahl, Index rel steht für relativ: auf den Leerlauf bezogene Drehzahl, Index o = ohne Regelung, Index m = mit Regelung.

b) die Reduktion der Geschwindigkeitsschwankungen nach folgender Formel:

$$\delta \eta_{reln} = \frac{\delta n_{relosolo} - \delta n_{relmsolo}}{\delta n_{relosolo}} (\text{Regelungsausmaß}) (2)$$

wobei der Index "solo" für die Geschwindigkeit des unbelasteten Modells steht.

2. Material und Methoden

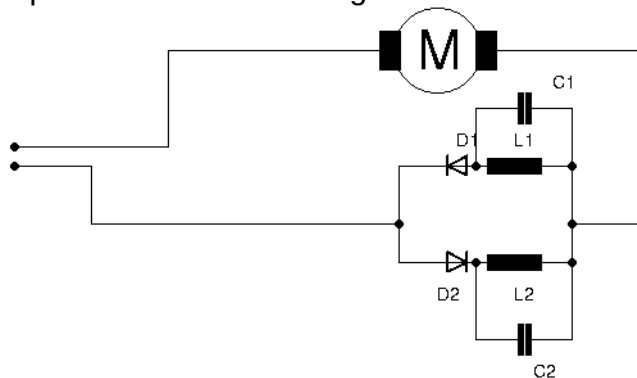
2.1 Auswahl eines Referenzmodells

In ^[1] wurde ein Modell zum Umbau ausgewählt und getestet. Um eine mögliche Verbesserung zu erkennen ist es zweckmäßig, das selbe Modell für die Verbesserung zu nutzen. Daher wird in dieser Ausarbeitung ebenfalls das Modell der Baureihe V200, Katalognummer 3021 Märklin, Version 6 nach Koll ^[23] verwendet. Weitere Modelle mit anderer Konstruktion und anderen Dekodern werden zu Vergleichszwecken, insbesondere für die Einstellung der Regelungsvariablen genutzt (alle Modelle sind Märklinartikel):

BR 89 005 DB	3000.6
BR Ce 6/8 SBB	30159.1
BR 1020 024 ÖBB	33221.1
BR Ce 6/8 SBB	36159.1

2.2 Auswahl der benötigten Bauelemente

Der in ^[1] benutzte Schaltplan bildet die Grundlage für die Erweiterung:



Mit Hilfe der Kondensatoren C1/C2 werden die Feldmagnete auch in den Impulspausen und in den Austastlücken (Pausen zwischen den Pulspaketen) mit Strom versorgt. Dadurch kann der Dekoder eine Spannung aufgrund der Induktion des sich im Magnetfeld drehenden Läufers auswerten. Die Dioden D1/D2 sorgen dafür, dass je nach Polarität der Dekoderausgänge nur jeweils eine Spule und damit eine Richtung mit Strom versorgt wird. Diese Schaltung hat den Nachteil, dass die in Impulspausen auszuwertende Spannung zu klein ist, weil sich im Generatorbetrieb die Stromrichtung umkehrt, womit der jeweils andere Diodenzweig vom Messstrom durchflossen wird (Zur Beachtung: im jeweils anderen Diodenzweig liegt keine Spannung am Kondensator an!) Je nach Empfindlichkeit des Dekoders kann dann eine sinnvolle Auswertung des Signals nicht mehr gewährleistet werden. Zur Vergrößerung des Signals ist ein weiterer Kondensator (Cx) notwendig, welcher zwischen D1/D2 und dem Motoranschluss geschaltet wird:

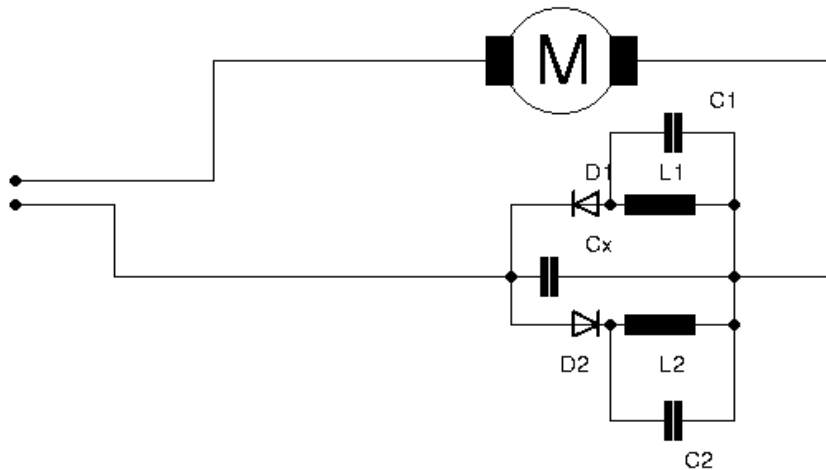
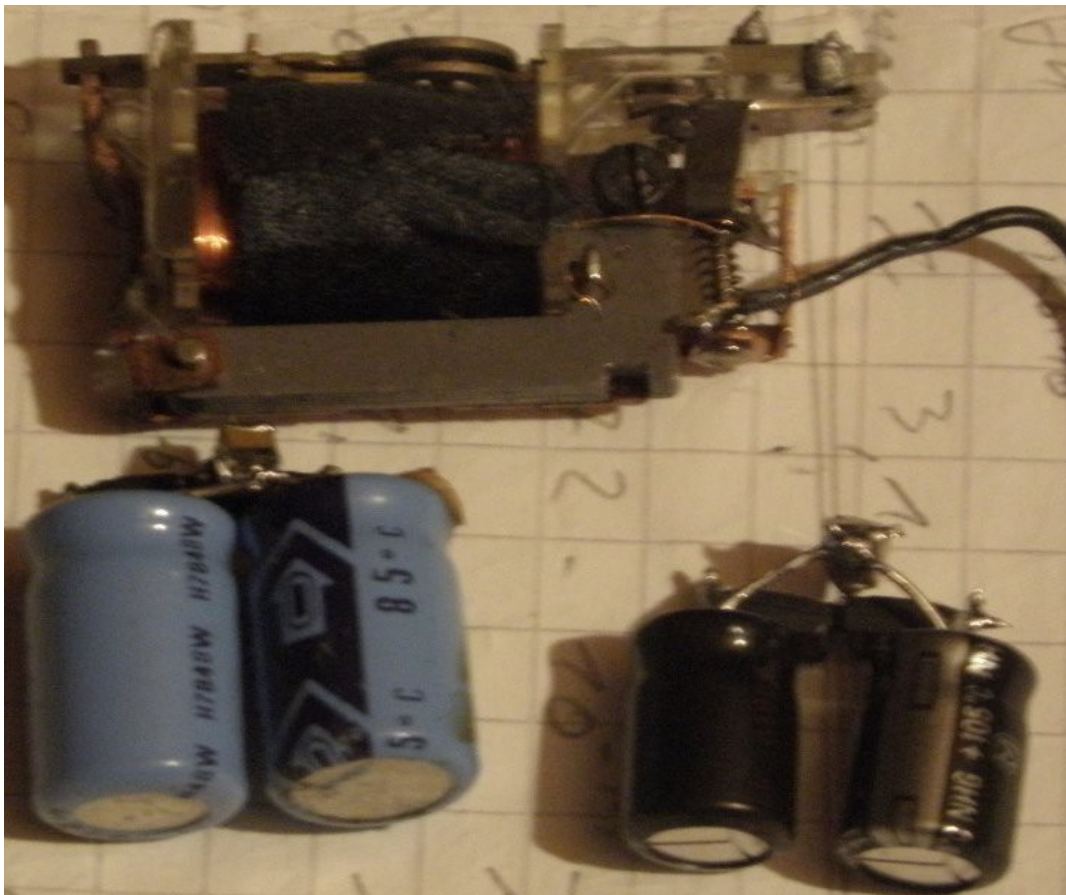


Abb.2: Verbesserte Schaltung mit Cx

Der in Abb.2 eingefügte Kondensator Cx muss aufgrund der mit der Fahrtrichtung wechselnden Polarität ein bipolarer Kondensator sein und groß genug, um die Austastlücke zu überbrücken und gleichzeitig eine Spannungsfestigkeit in Höhe der Motorspannung haben. Gewählt wurde ein bipolarer Vielschichtkondensator mit $22\mu\text{F}/25\text{V}$. Dieser ist klein genug, um auf die Schaltung nach Abb.1 zu passen, ohne weiteren Platz zu benötigen. Um sich ein Bild von der Größe der Schaltung zu machen wurden zwei Schaltungen ohne Feldmagnet aufgebaut und mit einem normalen Umschaltrelais verglichen. Oben im Bild ein mechanisches Relais Typ 208240 (Märklin), links unten die Schaltung ohne Feldmagnet mit zwei Kondensatoren $470\mu\text{F}/10\text{V}$ aus älterer Fertigung, rechts unten Kondensatoren $470\mu\text{F}/10\text{V}$ aktueller Produktion.



2.3 Auswahl der Messgeräte ^{[1] S.11}

Es stehen die selben Messgeräte wie bei ^[1] zu Verfügung:

Neben Geräten zur Spannungs- und Stromüberwachung bzw. -messung, wird in der Hauptsache eine Stoppuhr benötigt, da die erforderlichen Zugmassen jedes einzeln angehängten Wagen bereits durch Ausrollversuche bestimmt wurden. Die Stabilität der Drehzahlen bei konstanter Spannung liegt laut den Ergebnissen von über 200 Messungen auf http://www.sheyn.de/Modellbahn/FAQ/Funktion/Funktion_2_1.php#Allgemeinklassen (27.12.2011 15:28) bei durchschnittlich 2% im Analog- und bei 1% im Digitalbetrieb. (Die Messgenauigkeit des Messgeräts liegt bei 1% und damit in der Größenordnung der beobachteten Schwankung, daher geht die Messgenauigkeit des Geräts ein.) Eine Stoppuhr, die diese Fehlergrenzen erfassen kann, sollte also eine Genauigkeit von 0,075% haben. Folglich reicht bei durchschnittlich 20s-Intervallen eine Stoppuhr mit 1/100s Auflösung.

Ausgewählt wurden daher:

Spannungen:	M230B Gossen-Metrawatt
Ströme:	Fluke 289
Zeiten:	Rucanor
Oszillogramme:	Fluke 125
Massen:	Fortec CR-104

2.4 Planung der Messreihen ^{[1] S. 12}

Unter ^[1] wurde das Procedere bereits beschrieben und hier übernommen:

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 sich bei anderen Spannungen 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 Getriebeuntersetzung. 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, ein weiterer Wagen angehängt, eine Runde eingefahren und dann eine erneute Zeitmessung bei der selben Fahrgeräteeinstellung durchgeführt wird.

- 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 jedoch zur Getriebe- und Motorschonung abgebrochen.

2.5 Durchführung des Umbaus ^[1] S. 12-14

Der eigentliche Umbau auf die Schaltung ohne Cx wurde bereits in ^[1] beschrieben. Die fertige Schaltung ohne Cx ist auch von der Fa. Tams unter der Artikelbezeichnung LRA (Last-Regel-Adapter) verfügbar. Der Aufbau der Schaltung beginnt mit der Auswahl der Bauteile: zwei Dioden (Typ S2D SMB 2A; Artikel 160242 Conrad-Elektronik), zwei Elektrolytkondensatoren (470 μ F/10V oder 1000 μ F/10V) und ein Vielschichtkondensator (22 μ F/25V Typ X5RG1210 22 Reichelt-Elektronik):



Zum Aufbau der Schaltung werden zuerst die Dioden (im Fall der in Abb. 2.5-1 gezeigten Bauteile zwei 2A-SMD-Dioden Typ S2D SMB 2A) Anode an Kathode zusammengelötet. Dabei ist auf eine Verwendung von möglichst wenig Lötzinn und rasches Verlöten zu achten. Das Ergebnis dieser Aktion ist in Abbildung 2.5-2 zu sehen.



Der Vielschichtkondensator in Abb. 2.5-2 wird im nächsten Schritt an die Verbindungsstelle der Dioden gelötet. Das Ergebnis wird in Abb. 2.5-3 gezeigt:



Abb. 2.5-3: Dioden mit Cx (Vielschichtkondensator 22 μ F/25V)

Die in Abb. 2.5-3 gezeigte Baugruppe wird nun mit richtiger Polarität an die Anschlüsse der beiden Elektrolytkondensatoren (1000 μ F/10V) gelötet. Zur Platzersparnis möglichst nah am Kondensatorkörper.



Die in Abb. 2.5-4 zu sehenden, überstehenden Anschlüsse werden gekürzt. Die noch nicht verbundenen Anschlüsse der Elektrolytkondensatoren werden mit der zweiten Seite des Vielschichtkondensators verbunden.



Abb. 2.5-5: Vollständige, bearbeitete und einbaufertige Schaltung.

Die in Abb. 2.5-5 gezeigte Baugruppe ist nun einbaufertig. Die Verbindungen sind wie folgt:

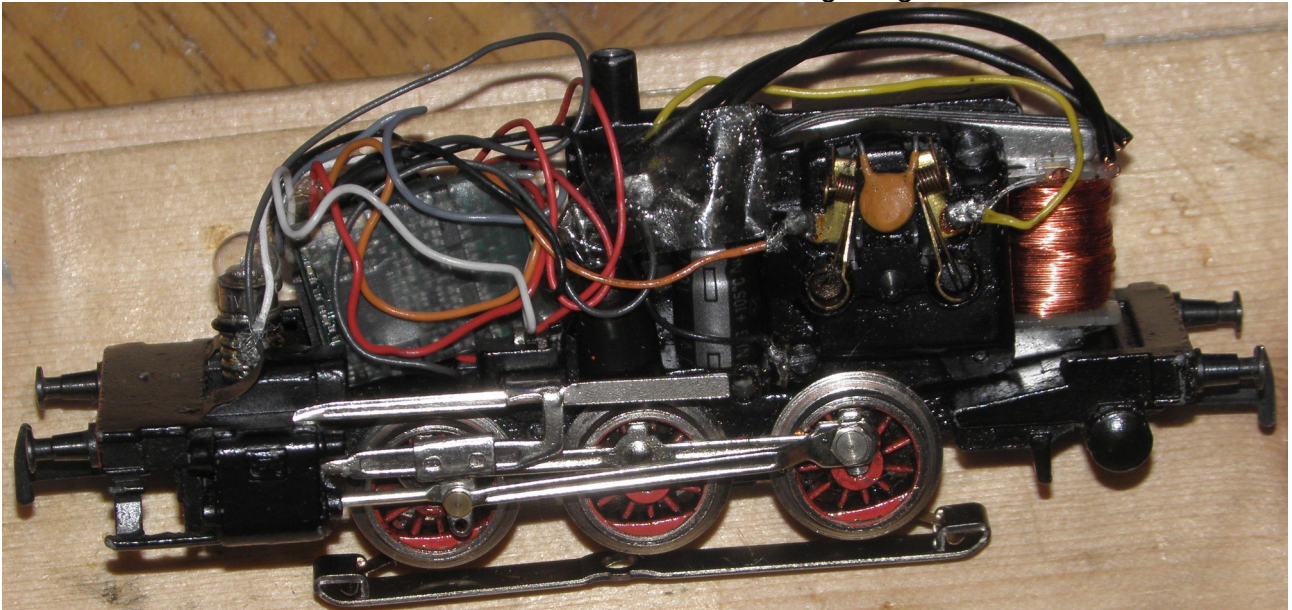
Dioden außen: Feldmagnet 1 bzw. Feldmagnet 2

Dioden innen vor dem Vielschichtkondensator: Motoranschluss 1 des Dekoders

Dioden innen nach dem Vielschichtkondensator: Motorschild Feldmagnetanschluss

Motorschild andere Seite: Motoranschluss 2 des Dekoders.

Bei Verwendung eines Schnittstellensteckers nach NEM 652 ist dieser entsprechend dem Anschlussschema zu verbinden. Die fertige Schaltung mit 470 μ F/10V-Elkos, NEM 652-Schnittstelle und Zimo MX634R-Dekoder ist in Abb. 2.5-6 gezeigt:



Beim Aufsetzen des Gehäuses des in Abb. 2.5-6 gezeigten Modells Typ 3000 (Märklin) ist darauf zu achten, dass die Kabel nicht abreißen. Anschließend kann mit der Programmierung des Dekoders nach Kapitel 3.2 begonnen werden.

Zum Abschluss ein Größenvergleich zwischen Elektrolytkondensatoren früherer und aktueller Produktion:



3. Experimenteller Teil

3.1 Durchführung der Messungen^{[1] S. 15}

Zum Erhalt vergleichbarer Messungen, müssen eine Reihe von Rahmenbedingungen erfüllt werden, die bereits in^[1] beschrieben sind. Diese werden hier wiedergegeben, weil exakt die selben Bedingungen genutzt werden:

- a) 30 Minuten Einfahrt des Modells in jedem Betriebssystem bei Bemessungsspannung (12V Analog bzw. FS7/14 Digital)
- b) komplette Ult-Messung des Modells im Leerlauf: eine Runde bei höchster Trafospannung (analog max. 18 Werte, digital maximal 14 Werte), eine Runde Leerlauf bei der nächst niedrigeren Einstellung bis zum Stillstand. *Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird nur U und t benötigt.*
- c) 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 Digital, mit leichtem und mit schwerem Zug jeweils bei 12,56 und 15,03V bzw. FS7 und 11 von 14.
- d) Gleichlaufmessungen bei Bemessungsspannung (Ult jeweils 15 Werte) mit anschließender Temperaturmessung an Motor und ggf. Endstufen im Modell.
- e) erneute Einfahrt ca. 15 Minuten bei Bemessungsspannung nach erfolgtem Abschmieren der Drehbewegungselemente.
- f) Lastfahrten bei Bemessungsspannung: eine Runde komplette Ult-Messung, einen Wagen anhängen, eine Runde Einfahren und erneute Ult-Messung. Dies wird wiederholt, bis die Rundenzeit deutlich stärker zunimmt als die Last (Überschreitung des Leistungsmaximums).
- g) Das Modell wird angehalten, der Zug abgekuppelt, ein anderes Betriebssystem eingestellt und bei a) erneut begonnen. Wird jedoch die neue Messreihe unmittelbar nach der vorangegangenen durchgeführt, dann wird bei b) begonnen.

3.2 Einstellung der Regelungsparameter auf den Motor

Dekoder für Modellbahnen haben je nach Hersteller sehr unterschiedliche Eigenschaften und Einstellungsmöglichkeiten. Zusätzlich ist aufgrund einer Vielzahl verschiedener Motoren und Getriebe ein Standardsatz von Parametern für alle Fälle nicht verfügbar. Daher muss jeder Dekoder auf die jeweilige Motor- und Getriebekombination eingestellt werden. Die Einstellregeln, wie sie in der Literatur ^{[8]-[13]} beschrieben werden, lassen sich nicht ohne weiteres auf die Modellbahnmotoren übertragen. Eine mehr experimentelle Vorgehensweise ist daher angebracht. Diese orientiert sich an closed-loop-Methoden ^{[10], [13]}, weil sie an aktivierter Regelung stattfindet. Folglich werden auch die damit verbundenen Vor- und Nachteile mit übernommen. Primäres Ziel ist es, eine stabile Regelung zu erhalten, vor allem ist ein Überschwingen nicht erwünscht. Im Folgenden werden verschiedene Vorgehensweisen beschrieben, wobei mit einem Dekoder begonnen wird, welcher alle notwendigen Parameter zur Verfügung stellt. Diese Vorgehensweise dient als Referenz. Alle anderen Vorgehensweisen sind davon abgeleitet bzw. an die jeweiligen Dekoder- und Motorverhältnisse angepasst.

3.2.1 Allgemeine Einstellung eines Uhlenbrock 76200 als Referenz^{[14],[25]}

Der Dekoder vom Typ Uhlenbrock 76200 ist für Reihenschlussmotoren konzipiert. Aus diesem Grunde sind mehr Einstellungen notwendig als für die fremderregten Motoren, die ein konstantes Magnetfeld haben. Die Beschreibung zur Einstellung dieses Motors lautet

nach ^[14] zitiert wie folgt:

Alle folgenden Infos beruhen auf praktischen Erfahrungen mit dem Decoder, Infos von Uhlenbrock und allgemeinen Kenntnissen der Regelungstechnik. Sie sind daher ohne Garantie o.ä. zu verstehen und können durch neue Erkenntnisse ggf. revidiert werden. Ergänzungen werde ich in Form von Antworten und Überarbeitungen hinzufügen, sobald und sowie welche kommen :).

Zur Übersicht möchte ich den Text in eine Beschreibung der Regelparameter sowie eine praktische Einstellanleitung für Regler allgemein gliedern. Wer den ersten Teil nicht ganz versteht, bitte übergehen und/oder fragen - der praktische Teil sollte wieder verständlicher sein ;) Ich versuche, einen Kompromiss aus Elektrotechnik-Sprache und verständlichem Deutsch zu finden, wobei dies zugunsten ersterem leider nicht immer gelingen wird. Im Zweifelsfall fragen - einfachere Erklärungen sind nach dem Schreiben der "Gesamtübersicht" problemlos möglich.

1. Regelparameter, CVs und Bedeutungen

Der Decoder verwendet einen vollwertigen PID-Algorithmus zur Drehzahlregelung mit zyklischer Verarbeitung. Die Istwertermittlung erfolgt nach dem Tachogenerator-Prinzip, indem kurze stromlose Phasen in der Motoransteuerung eingefügt werden, wo die vom Motor erzeugte EMK-Spannung gemessen wird (wie das fast jeder Modellbahn-Decoder macht). Die EMK wird mit einem integrierend messenden A/D-Wandler bestimmt.

Ein zyklischer Regler bekommt am Zyklusbeginn alle Soll- und Istwerte und ermittelt daraus die Regelabweichung. Mit dieser, der derzeitigen Stellgröße und den Reglerkonstanten (P, I und D) ermittelt er eine neue Stellgröße, die am Zyklusende ausgegeben wird und einen Zyklus lang bestehen bleibt. Stellgröße ist bei einem Drehzahlregler typischerweise der Strom oder die Spannung, der/die an den Motor gegeben wird.

P bedeutet Proportionalregelung und ist nichts als ein Verstärkungsfaktor, mit dem die momentane Regelabweichung gewichtet wird und in die Stellgrößenkorrektur einfließt. Der P-Anteil hat kein "Gedächtnis", sondern wirkt immer sofort und bestimmt sozusagen die "Grundhärte"/"Grundgüte" des Reglers.

I bedeutet integrierende Regelung und ist eine "Zeitkonstante". Ein P-Regler kann eine Abweichung niemals völlig korrigieren, da er sich ohne "Gedächtnis" nicht anhand alter Werte "was besseres einfallen lassen kann", um näher an den Sollwert zu kommen - eine bestehende Restabweichung bleibt. Der I-Anteil nun besitzt ein "Gedächtnis" und versucht über die Zeit, eine Nullabweichung anzustreben. Er legt sozusagen jeden Zyklus "eine Schippe drauf", bis der Motor die angepeilte Geschwindigkeit hat. Die Zeitkonstante legt fest, wie schnell dies erfolgt.

D bedeutet differenzierende Regelung und ist nur bei schnellen Lastsprüngen sinnvoll und bei instabilen Systemen erforderlich.

Hier prüft der Regler, ob sprungartige Änderungen (Differenz) aufgetreten sind und reagiert mit kurzen, heftigen Gegenimpulsen, um diese Einflüsse schnell zu kompensieren. Bei Drehzahlreglern ist ein D-Anteil eher störend und sollte nicht bis höchstens ganz behutsam verwendet werden.

Zuordnung der CV-Nummern zu Reglerparameter-Bezeichnungen:

CV 2: Führungsgröße (Sollwert) min. Geschwindigkeit --> Erwartungswert der Tachogeneratorspannung bei min. FS --> Abhängigkeit zu CV 53, 56 und 58. Höherer Wert = höhere Geschwindigkeit

CV 5: Führungsgröße (Sollwert) max. Geschwindigkeit --> Erwartungswert der Tachogeneratorspannung bei max. FS --> Abhängigkeit zu CV 53, 56 und 58. Höherer Wert = höhere Geschwindigkeit

CV 6: Bedeutung wie CV 2 und 5, aber für "mittlere" FS.

CV 53: Grundtakt des Regelalgorithmus als Faktor einer Zykluszeit. Kleinere Werte lassen den Regler schneller und genauer agieren (unter etwas Verlust an Motorleistung durch mehr nötige Zeit für Istwerterfassung), große Werte machen ihn "gröber" (dafür steht mehr Motorleistung zur Verfügung, da weniger Messpausen eingelegt werden). Wird dieser Wert verstellt, so ändern sich alle Grundeigenschaften des Reglers, da alle Faktoren in CV 54, 55, 57, ggf. 58 sich auf diesen Grundtakt beziehen - daher ist nach Änderung an CV 53 eigentlich eine komplette Neueinstellung der Regelung nötig - trotzdem kann der Bedarf an CV 53-Änderung erst nach einer erfolgten Einstellung ermittelt werden, siehe 2. Teil unten...

CV 54: P-Anteil der Regelung, Erklärung siehe oben. Großer Wert sorgt für hohe Verstärkung.

CV 55: I-Anteil der Regelung, Erklärung siehe oben. Großer Wert bedeutet schnelles Nachregeln. Entgegen der Anleitung scheint diese CV nur 7 Bit breit zu sein und hat max. Wirkung bei "127" (Bits 0-6 = 1), Wert "128" entspricht in der Wirkung wieder einer "1". Ob Bit 7 eine eigene Bedeutung hat und irgendetwas ändert, weiß ich nicht.

CV 56: Skalierungsfaktor zwischen Soll- und Ist-Drehzahlwerten. Kann als Istwertverstärker oder Sollwertteiler aufgefasst werden - bei hohen Werten peilt die Regelung niedrigere Drehzahlen an, bei kleinen Werten kommen höhere Drehzahlen zustande. Daher hängen alle Geschwindigkeits-CVs elementar hiervon ab!

CV 57: D-Anteil der Regelung, Erklärung siehe oben. Ein großer Wert sorgt für starkes differenzierendes Regeln und macht den Regler "nervös" - kann schnell zu Ruckeln/Schwingen führen. Um den D-Regler sinnvoll verwenden zu können und das Langsamfahrverhalten zu optimieren (Ankerrastmoment und sonstige Unwägbarkeiten des Märklin-Motors), muss unbedingt eine kleine Reglertaktzeit verwendet werden (CV 53)

CV 58: Zeitspanne, die der Istwertmessung pro Zyklus zur Verfügung steht. Große Werte "opfern" mehr Zeit für die Messung zu Lasten

der Motorleistung, da während der Messung kein Strom fließen kann. Da der A/D-Wandler integrierend misst, sorgen vergrößerte Werte für eine Unterdrückung von Sprüngen/Spitzen im Messwert und die Regelung wird ruhiger und präziser.

2. Experimentelle Einstellung einfach und exakt

Nach so viel Fachchinesisch ist es nun Zeit für was Einfaches - das Einstellen :)

Als Startbedingung sollten alle obengenannten CVs die Standardwerte haben. Die Geschwindigkeits-CVs 2,5,6 werden als LETZTES eingestellt, wenn die Regelung stimmt und können daher erstmal außen vor bleiben bzw. sollten, wie im Fall der Standardwerte, mit CV 2 und 5 den maximalen Wertebereich von 2 - 63 aufspannen.

Achtung: Vor dem Einstellen unbedingt sicherstellen, dass die Lok mechanisch optimal ist. Insbesondere beim TROMMELKOLLEKTOR-Motor auch prüfen, dass kein Kohlenstaub (der kommt nicht aus dem Tender ;)) zwischen den Kollektorsegmenten sitzt! Ggf. auskratzen! Auch sonst sollte natürlich die Mechanik optimal sein - verharztes Öl weg, dünnes, harzfreies Öl an allen Schmierstellen, kein Dreck in den Zahnrädern.

CV 55 und 57 auf 0 setzen. Lok aus dem Stand langsam "aufschalten" und schauen, wann sie losrollt. Wenn erst in Stufe 3 oder höher, dann CV 54 schrittweise erhöhen. Bei ruckartigem Losfahren in Stufe 1 oder 2 den Wert wieder leicht verringern, so dass aber spätestens in Stufe 2 ein sanftes Anfahren zu sehen ist. Dass dies noch nicht schön ist, macht nix, denn der P-Anteil allein kann das nicht, ist jetzt aber passend.

(Praxiserfahrung: Werte von 120 - 245 kommen bei mir vor).

Nun kommt die CV 55 dran: von einem Wert von ca. 30 in 10er-Schritten erhöhen und immer wieder die Lok vom Stand in Fahrstufe 1 schalten und warten. Sie muss in dieser Stufe sanft, aber schnell anfahren. Fährt sie erst spät oder nicht an, Wert erhöhen, aber nur auf max. 127. Ruckt sie sofort hart an, Wert wieder leicht zurücknehmen, dass ein schnelles und bestimmtes, aber gerade noch sanft zu nennendes Losrollen eintritt. Damit ist der I-Anteil eingestellt und sorgt für schnelles Regeln und später auch sauberes Anfahren! Werte aus meinen Erfahrungen: 70-125.

Nun wird die Anfahrgeschwindigkeit in Fahrstufe 1 betrachtet: ruckelt die Lok, ist CV 56 schrittweise in ca. 5er-Schritten zu verringern. Braust sie zügig los, ist der Wert zu erhöhen (max. 127). Beim besten Kompromiss ist die Anfahr-Eigenschaft optimal eingestellt. Praxiswerte: 45-120.

Nun kann noch der D-Anteil mit CV 57 dazugenommen werden, um bei Lastsprüngen durch Ankerrastmoment/Mechanik etwas Glättung zu erreichen. Wert der CV 57 in EINER-Schritten von 0 an erhöhen und in Fahrstufe 1 beobachten, ob die Lok unruhig zu fahren beginnt. Sobald sie "Ruckeln/Schaukeln" anfängt, den Wert wieder um 1 erniedrigen. Praxiswerte: 1-5 bei Grundeinstellung des Reglertaktes in CV 53 von 150. Bei kleineren Werten in CV 53

(siehe unten) kann der D-Anteil evtl. noch interessanter werden - das muss ich aber noch testen.

Sollte die Lok nun noch nervös fahren in Stufe 1, den Wert der CV 58 in kleinen Schritten (2er bis 5er) erhöhen. Praxiswerte: 25-40. Nun mittlere Fahrstufen testen, ggf. auch mal mit Belastung (Zug). Wenn die Fahreigenschaften nicht ausreichen in Form von Ruckeln/Ungleichmäßigkeiten, gehts ans Fundament: CV 53 in 10er- bis 20er-Schritten verkleinern und gesamte Einstell-Prozedur wiederholen, sobald direkt nach der CV53-Verstellung das Verhalten ansprechender aussieht.

Sollte dagegen ein ruhiges Fahrverhalten vorhanden, aber die Leistung des Motors schwachbrüstig sein, CV 53 in 10er- bis 20er-Schritten vergrößern und gesamte Einstell-Prozedur wiederholen, sobald direkt nach der CV53-Änderung ein besseres Verhalten zu sehen ist.

Nach meiner Erfahrung liegt bei den meisten Märklin-Modellen exakt eine etwas kritische Resonanzfrequenz des Systems beim Standard-Reglertakt von 150 in CV 53 immer im Drehzahlbereich des Motors, bei mir meist um die Fahrstufe 13-16, wenn ich DCC mit 28 FS fahre. Dies ist eigentlich unproblematisch (nur mit gutem Ohr hörbar, ohne Auswirkungen auf das Fahrverhalten) und hat auch etwas mit der sogenannten "Getriebebose" (Spiel) des Märklin-Antriebsstrangs zu tun. Mit kleineren Werten in CV 53 muß ich hier noch experimentieren, ob man die Resonanzfrequenz aus dem Arbeitsbereich herausbekommen kann.

Nach dieser Einstellaktion kann die gewünschte Geschwindigkeitskennlinie über CV 2, 5, 6 oder die Tabelle eingestellt werden. Hierbei die CV 2 nicht unter 2 stellen, da sonst im Rangiergang die FS 1 Stillstand bedeutet ("1" ist nunmal in Integer-Berechnungen nicht halbierbar...) - aber VOR dieser Einstellung unbedingt zuerst mit CV 5 = 63 prüfen, ob die Höchstgeschwindigkeit ausreicht. Sollte dies nicht der Fall sein, muß die CV 56 im Wert verringert werden, bis die Höchstgeschwindigkeit hoch genug ist, was im Gegenzug die Mindestgeschwindigkeit wieder etwas erhöht. Ist die Höchstgeschwindigkeit zu hoch, ist keine Änderung an CV 56 erforderlich!

Nun die Kennlinie nach Wunsch einstellen und fertig ist die regelungstechnisch optimale Einstellung. Mit dieser Vorgehensweise geht auch der berühmte 5-polige Trommelkollektor-Anker aus dem "5-Sterne-Set" und verleiht manchem Modell das letzte i-Tüpfelchen an Fahrverhalten, gerade bei schwach untersetzten Getrieben!

Da jeder Dekoder andere Variablen hat, muss vor einer Übertragung überprüft werden, welche Variablen genutzt werden können; in manchen Fällen ist eine Abweichung von o.a. Vorgehensweise notwendig.

3.2.2 Einstellung des Tams LD-G33 auf die Elektronik ohne Cx

Zur Verwendung des Dekoders vom Typ Tams LD-G33 ist unbedingt die Bedienungsanleitung ^[15] zu konsultieren, die Hinweise auf den Einbau und die vorhandenen „Configuration-Variables“ (CV) enthält.

Zur Einstellung wird wie folgt verfahren:

Alle Regelungsparameter werden auf Null gesetzt und die PWM-Frequenz auf maximal eingestellt.

Nun wird der KP-Wert schrittweise erhöht, bis die Maximalgeschwindigkeit erreicht wird. Da eine weitere Vergrößerung des KP-Wertes keine Verbesserung mehr bringt, ist eine weitere Überprüfung nicht notwendig.

Anschließend erhöht man den KI-Wert, bis das Modell bei Fahrstufe 2/14 sanft anfährt. Darauf folgend erhöht man den KD-Wert, bis auch in Fahrstufe 1 ein Anfahren erfolgt.

Zum Schluss werden CV2 und CV5 (CV6 hat dieser Dekoder nicht) so eingestellt, wie es die individuelle Vorgabe erfordert. Im vorliegenden Fall: lineare Geschwindigkeitskennlinie bei maximaler Ausnutzung des Tempobereichs.

Die erhaltenen Einstellungen sind:

Modell	CV2	CV5	CV29	CV49	CV50	CV51	CV52	CV56	CV57
3021.6	5	128	4	73	6	43	80	32	6

Tab. 3.2.2-1: CV-Einstellungen mit Lastregeladapter ohne Cx mit Tams LD-G33

3.2.3 Einstellung des Tams LD-G33 auf die Elektronik mit Cx

Mit Cx werden die elektrischen Eigenschaften des Motors in der Messpause in erheblichem Maße verändert. Dadurch ändern sich ebenfalls die notwendigen Einstellungen, die entsprechend der Anleitung für den Dekoder Uhlenbrock 76200 durchgeführt wurden. Hierbei ist zu beachten, dass der Tams LD-G33 nur KP, KI und KD als einstellbare Variablen hat.

Erhaltene Einstellungen sind:

Modell	CV2	CV5	CV29	CV49	CV50	CV51	CV52	CV56	CV57
3021.6	8	255	4	73	22	30	50	32	6

Tab. 3.2.3.-1: CV-Einstellungen mit Lastregeladapter und Cx mit Tams LD-G33

3.2.4 Einstellung der Zimo MX 63x-Familie auf die Elektronik mit Cx

Zimo-Dekoder enthalten mehr einstellbare Variablen als die Tams LD-G33/34-Dekoder. Dadurch kann die Prozedur mehr an die ursprüngliche Vorgehensweise in Abschnitt 3.2.1 angepasst werden. Auch hier gilt zuerst, die Bedienungsanleitung ^[16] zu beachten.

Grundlegende Einstellungen, die bisher identisch sind:

CV9=11 kleinste Austastlücke und kürzeste Messzeit; eine Testreihe mit größeren Werten ergab deutlich niedrigere Geschwindigkeiten. Dies könnte für den Rangierbereich von Bedeutung werden.

CV5= 255 höchstmögliche Geschwindigkeit

CV6 = 1 für exponentielle Kennlinie oder = 128 für lineare Kennlinie. Andere Werte beeinflussen die Höchstgeschwindigkeit und stören u.U. die richtige Einstellung.

CV112=32 höchste Frequenz 40 kHz. 20 kHz bringt keine Veränderung; Niederfrequenz (CV9>182) verschlechtert die Fahreigenschaften erheblich.

Sofern ein Motor mit Scheibenkollektor benutzt wird, empfiehlt es sich die CV145=1 (Fleischmann / Rund) zu setzen.

Zu Beginn wird mit CV56 die Einstellung der KP- und KI-Werte begonnen, indem mit dem Wert 11 angefangen wird. Gemäß ^[16] beginnt man hier mit dem I-Wert, indem die Einerstelle solange erhöht wird, bis das Modell bei plötzlicher Belastung innerhalb 0,5 Sekunden nachgeregelt hat.

Danach wird der KP-Wert (Zehnerstelle) solange verändert, bis sich die Fahreigenschaften wieder verschlechtern. Da bei der derzeitigen Software-Version KP in CV149 explizit eingegeben werden kann, ist diese CV vorzuziehen. CV149 wird dann solange erhöht, bis das Modell bei niedrigstmöglicher Fahrstufe anfährt. Sofern diese CV nicht zu Verfügung steht, muss natürlich CV56 Zehnerstelle benutzt werden.

Anschließend wird in CV148 der KD-Wert solange erhöht, bis die Anfahr-Fahrstufe nicht mehr kleiner wird, oder bis das Modell anfängt während der Fahrt zu ruckeln.

Bei Modellen mit Kardantrieb sollte die CV146 angepasst werden, die den Getriebeleergang berücksichtigt. Die CV 146 wird solange erhöht, bis der Start keinen deutlichen Ruck mehr zeigt.

Die Fahreigenschaften an dieser Stelle zeigen ab FS 7-8/14 keine Geschwindigkeitserhöhung mehr, sodass die Tempoeinstellung noch nachjustiert werden muss. Die Ursache hierfür ist eine recht kleine induzierte Spannung in den Austastlücken. Hierzu wird zuerst die Referenzspannung in CV57 auf 14-14,5V (also 140-145 in der CV 57) eingestellt. Um den vollen Fahrstufenbereich nutzen zu können, müssen die Trimm-CV's 66 und 95 solange reduziert werden, bis sich die Geschwindigkeiten zwischen FS13/14 und 14/14 unterscheiden.

Damit das Modell auch bei FS1/14 losfahren kann, muss die CV2 angepasst werden. Diese kann je nach Modell bei Werten zwischen 2-10 für normale Konstruktionen und zwischen 50 und 70 für schwergängige oder kardanische Antriebe liegen.

Modell	CV2	CV6	CV56	CV57	CV66	CV95	CV148	CV149
30159.1	66	130	145	140	32	32	60	120
33221.1	53	150	38	145	40	40	60	120
36159.1	70	128	19	145	80	80	80	160
3000.6	2	128	38	145	32	32	60	120

Tabelle 3.2.4: bisher benutzte Werte für Zimo MX63x-Dekoder.

3.3 Auswertung der Messungen

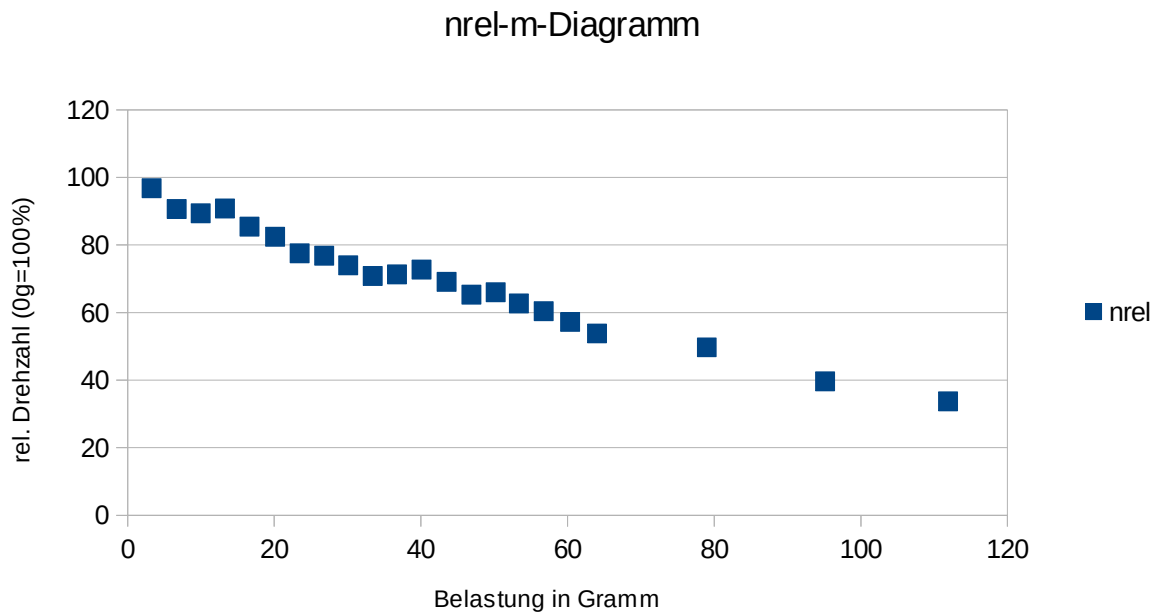
In Kapitel 4 sind die hier ausgewerteten Messergebnisse aufgelistet, welche in der Reihenfolge Lastwerte, Leerlaufwerte ausgewertet werden. Am Beispiel des ersten Modells 3021.6:b_3 sei die Vorgehensweise erläutert.

Tabelle 4.1-1 enthält die Fahrwiderstandsmassen der verschiedenen, angehängten Wagen. Bei mehreren angehängten Wagen müssen deren Fahrwiderstandsmassen zur gesamten Massenbelastung addiert werden. Die jeweilige Belastung der Lok durch die Wagen ist in Abb. 3.3-1 auf der Abszisse („x-Achse“) eingetragen. Die Lok ohne einen angehängten Wagen hat hier logischerweise eine Belastung von 0g.

Die Geschwindigkeit bzw. relative Drehzahl der unbelasteten Lok wird hier zu 100% normiert. Bei Belastung durch angehängte Wagen reduziert sich die relative Drehzahl auf einen niedrigeren Wert, welcher in Abb. 3.3-1 als Prozentwert in der Ordinate („y-Achse“) eingetragen ist. Im resultierenden XY-Diagramm wird also die Abnahme der relativen

Drehzahl durch Belastung illustriert.

3021.6:b_3 (originale Relais-Ausstattung, analoger DC-Betrieb):



Gleichzeitig wird auch die Differenz zwischen zwei jeweils aufeinanderfolgenden Messwerten der relativen Drehzahl gebildet, um die jeweilige Abnahme $\Delta n_{rel}/m_{fahr}$ zu berechnen.

Aus der Summe aller Quotienten wird der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Im Falle des ausgewählten Modells sind dies $(-0,67 \pm 0,62)\%/g$. Damit sind die Differenzwerte nicht nutzbar (Differenz zweier großer Werte). Stattdessen wird die Steigung der XY-Wertepaare bzw. der Korrelationskoeffizient benutzt. Diese betragen hier $-0,58 \%/g$ bzw. $-0,99$. Die relative Drehzahl bei 64g Last beträgt hier 53,8%

Besagte Steigung wird mit Hilfe der linearen Regression^{[17],[18],[20] S.80ff} aus den Messwerten berechnet. Die allgemeine Formel für lineare Gleichungen lautet:

$$Y = mX + b \quad (3)$$

wobei m die Steigung und b der Ordinatenabschnitt sind, X und Y sind die beobachteten (d.h. gemessenen) Wertepaare. Dabei ist X die vorgegebene Variable (Belastung) und Y die beobachtete Variable (Drehzahl), die auf 100% für den Leerlauf normiert ist. Alle anderen Variablen (z.B. U, f) werden weitestgehend konstant gehalten. Aus allen Wertepaaren (X, Y) wird nun die Steigung m und der Ordinatenabschnitt b so gewählt, dass die Summe der Abstandsquadrate $(Y_i - \hat{Y})^2$ möglichst klein ist (Methode der kleinsten quadratischen Abweichung, KQ^{[20] S.80}). Die Steigung berechnet sich nach dieser Methode zu:

$$m = \frac{n \cdot \sum (y_i \cdot x_i) - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

Hierbei werden die Diagramme zur Auswertung wie folgt benutzt:
 zuerst werden alle Datenpunkte zur Berechnung der Steigung gem. (4) herangezogen.
 Liegen die letzten beiden Datenpunkte deutlich unterhalb der Extrapolationsgeraden, so wird die Steigung unter Auslassung des letzten, bzw. beider letzter Werte erneut berechnet (Leistungsgrenze der Regelung erreicht bzw. überschritten). Verringert sich hierbei die Steigung um mehr als 20%, so werden die Ergebnisse (Steigung, deren Streuung und der Korrelationskoeffizient gem. (5) unter einer bzw. zwei Auslassung(en) übernommen.
 Entsprechend der Korrelationskoeffizient:

$$r = \frac{n \cdot \sum (y_i \cdot x_i) - \sum x_i \cdot \sum y_i}{\sqrt{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (5)$$

Die Eigenschaft der Reihenschlussmotoren, keine lineare Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung zu haben geht aus der Drehzahlformel (6)

$$n = \frac{U - RI}{2 \pi \cdot k \cdot I} \quad (6)$$

und der Drehmomentenformel (7) hervor:

$$M = k \cdot I^2 \quad (7)$$

Erweitern von (6) mit I_{\max} und Einsetzen von $U = RI_{\max}$, sowie (7) ergibt:

$$n = \frac{R \cdot (M_{\max} - \sqrt{M_{\max} \cdot M})}{2 \pi \cdot \sqrt{M_{\max} \cdot M}} \quad (7)$$

Für den Leerlauf gilt $M = M_0$; für alle anderen Belastungen $M = M_i = (M_0 + M_n)$. Somit gilt:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{(M_{\max} - \sqrt{M_{\max} \cdot M_i})}{\sqrt{M_{\max} \cdot M_i}} \cdot \frac{\sqrt{M_{\max} \cdot M_0}}{(M_{\max} - \sqrt{M_{\max} \cdot M_0})} \quad (8)$$

umgestellt:

$$\frac{n}{n_0} = \sqrt{\frac{M_0}{M_i}} \cdot \frac{M_{\max} - \sqrt{M_{\max} \cdot M_i}}{M_{\max} - \sqrt{M_{\max} \cdot M_0}} \quad (9)$$

also:

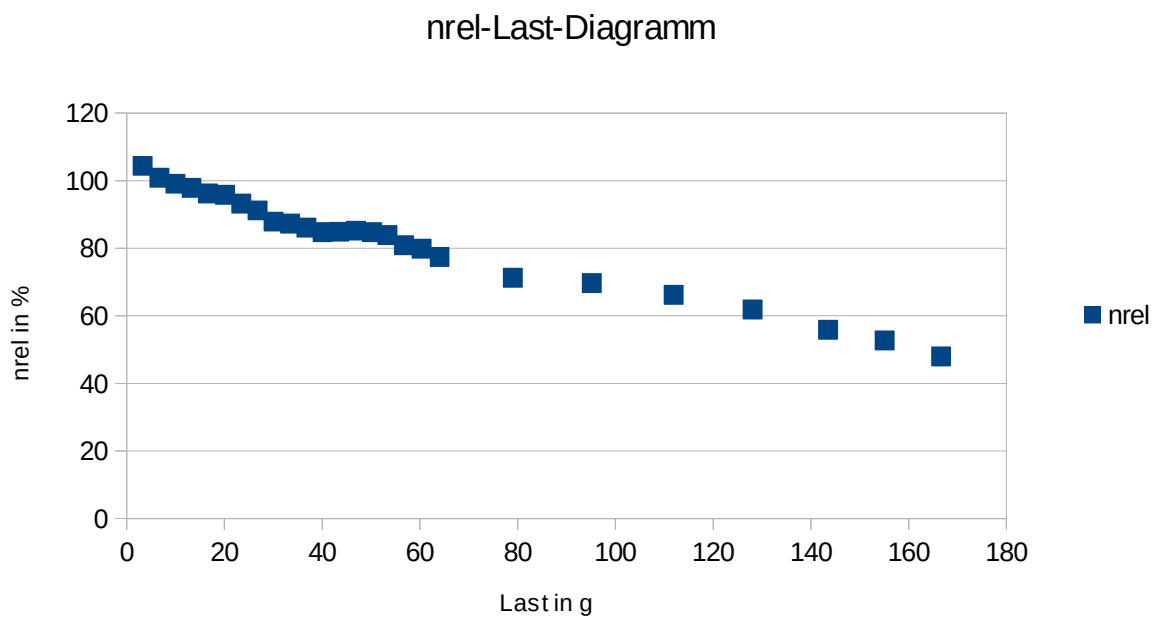
$$n = n_0 \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_i}} \cdot \frac{(\sqrt{M_{\max}} - \sqrt{M_i})}{(\sqrt{M_{\max}} - \sqrt{M_0})} \quad (10)$$

Da $M_{\max} \gg M_i (= M_0 + M_{\text{Last}}) \approx M_0$ und ferner die Lastmessungen nur einen kleinen Teil der möglichen Maximallast abdecken, kann Gleichung (10) wegen

$$\frac{1}{1+x} \approx 1-x \quad (11)$$

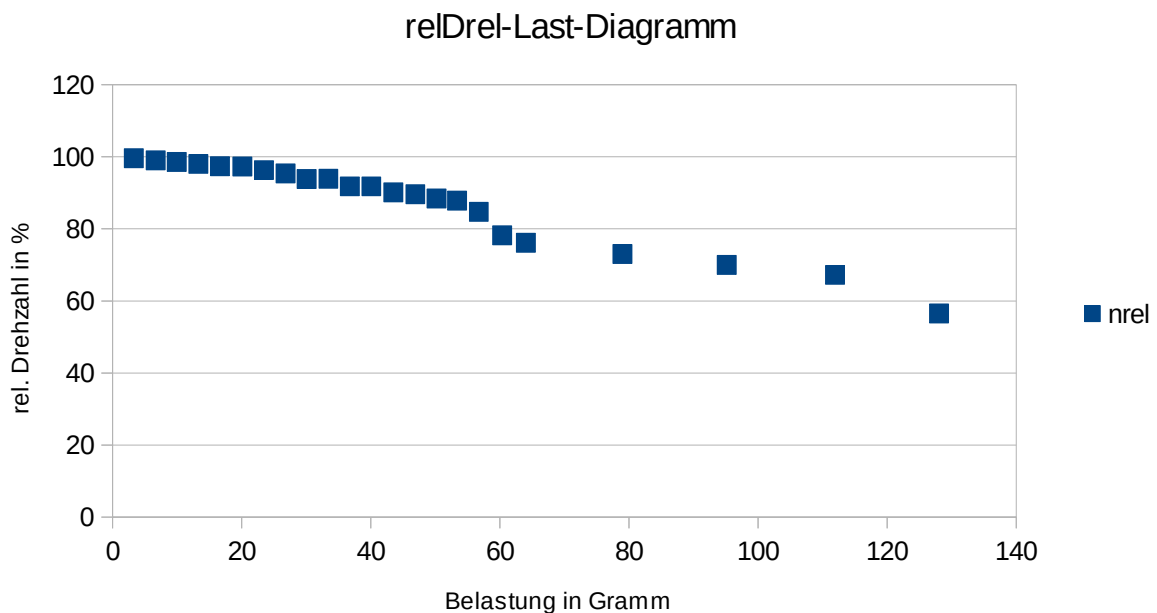
im gemessenen Bereich als nahezu linear angesehen werden.

3021.6:b_4 (originale Relais-Ausstattung, analoger PWM-Betrieb):



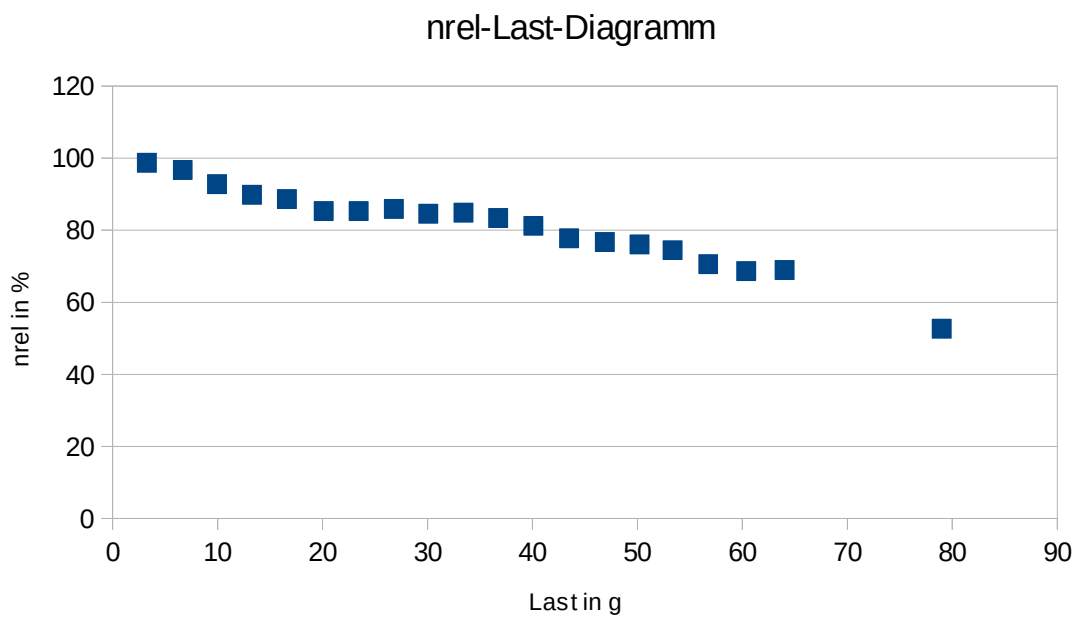
Steigung: $(-0,32 \pm 0,06) \text{ \%/g}$, Korr: -0,99, relative Drehzahl bei 64g: 77,38%

3021.6:e_2 (LRA-Umbau ohne Cx, Kuehn T-125, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



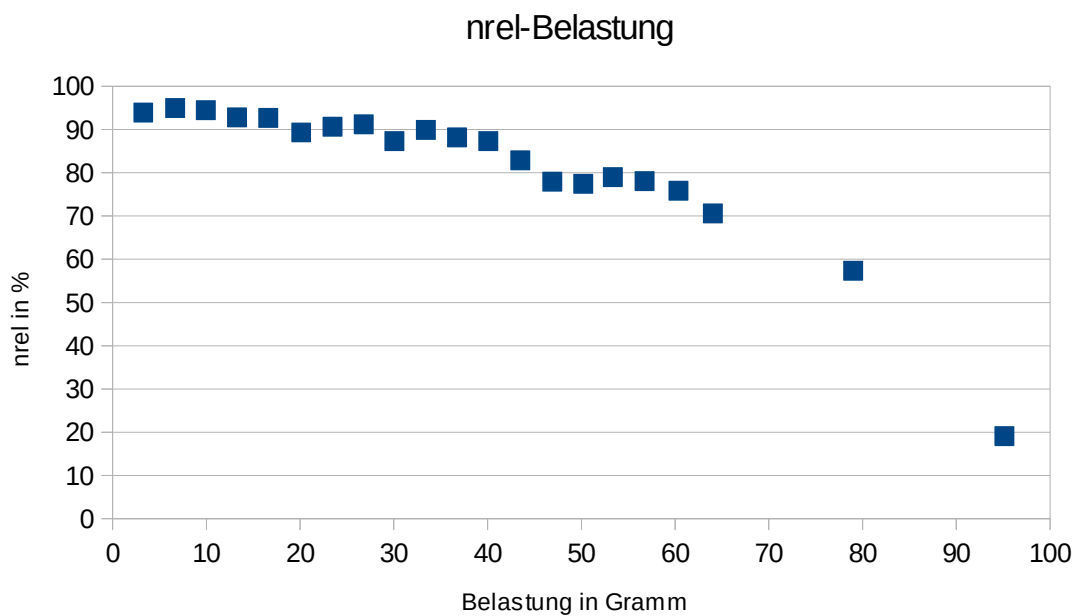
Steigung: $(-0,35 \pm 0,07) \text{ \%/g}$, Korr: -0,98, relative Drehzahl bei 64g: 76,10%

3021.6:e_5 (LRA-Umbau ohne Cx, Kuehn T-125, analoger DC-Betrieb):



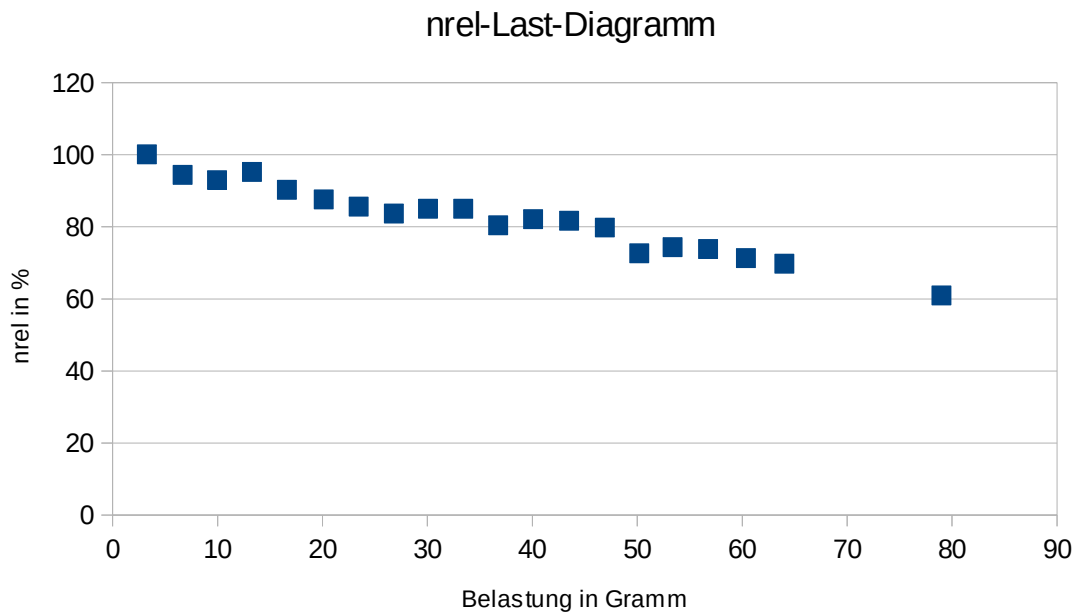
Steigung: $(-0,50 \pm 0,08) \text{ \%/g}$, Korr: 0,97, rel. Drehzahl bei 64g: 68,95%

3000.6:a_2 (Originale Relais-Ausstattung, analoger DC-Betrieb):



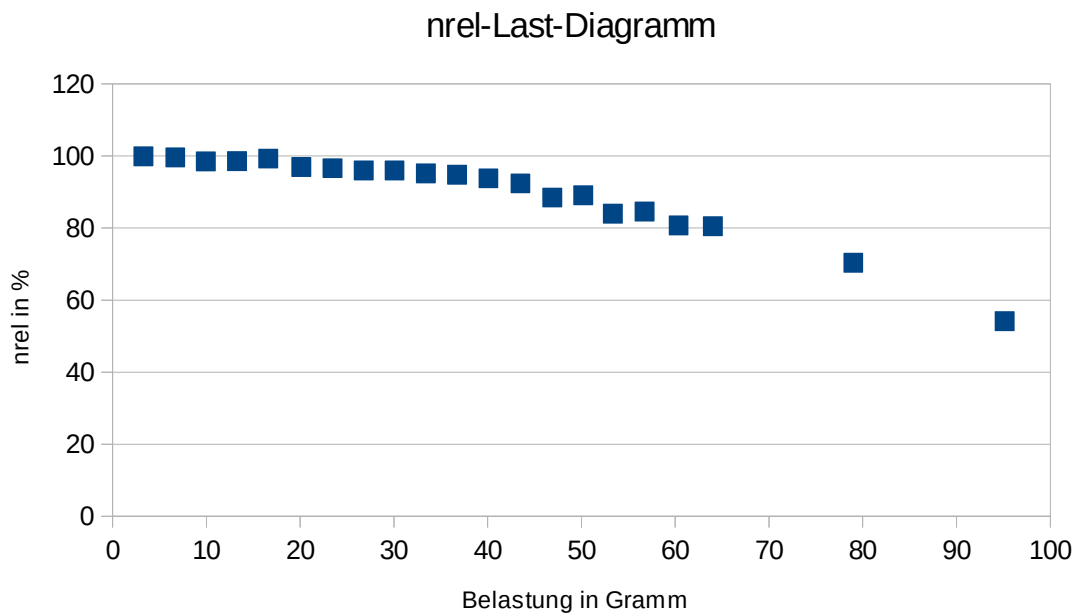
Steigung: $(-0,43 \pm 0,11) \text{ \%/g}$, Korr: -0,94, Auslassung des letzten Datenpunkts, relative Drehzahl bei 64g: 70,6%

3000.6:a_4 (originale Relais-Ausstattung, analoger PWM-Betrieb):



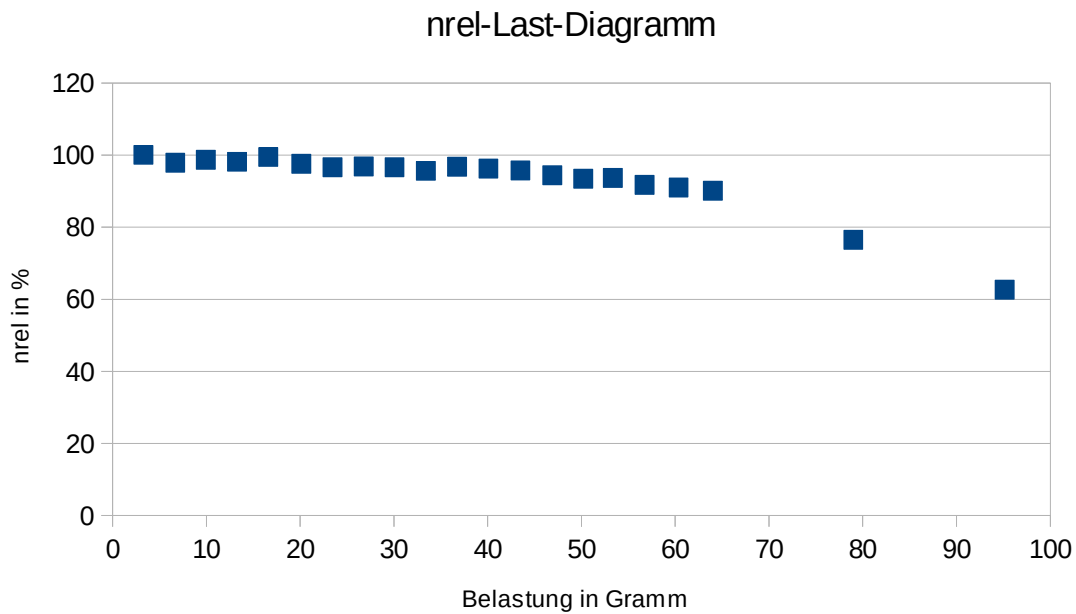
Steigung: $(-0,46 \pm 0,11)$ %/g, Korr: -0,98, relative Drehzahl bei 64g: 69,77%

3000.6:b_11 (HAMO-Umbau, Zimo MX634R, analoger DC-Betrieb):



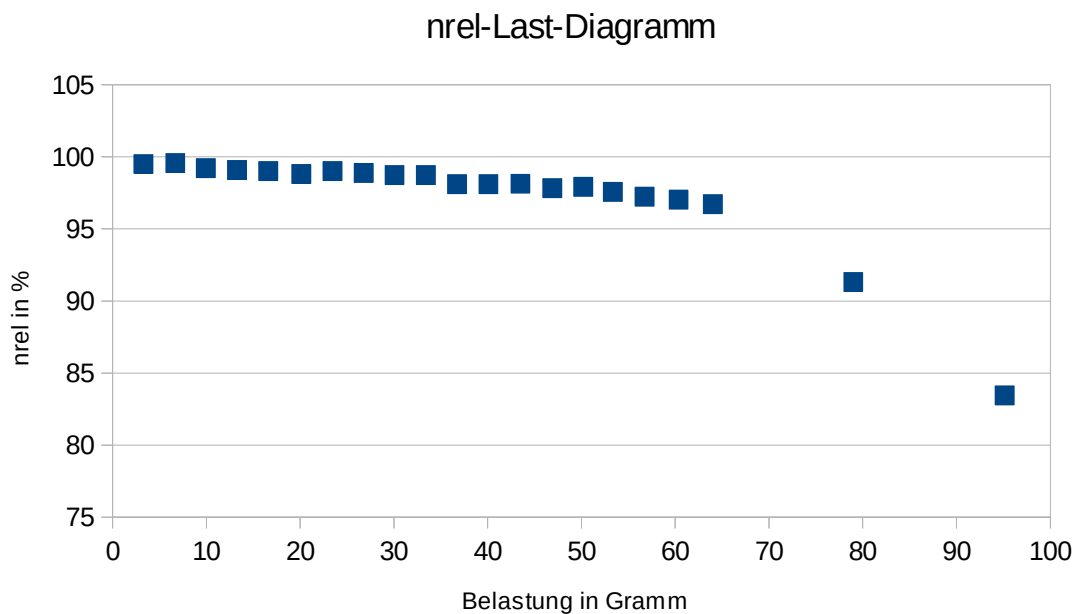
Steigung: $(-0,44 \pm 0,11)$ %/g, Korr: -0,94, relative Drehzahl bei 64g: 80,48%

3000.6:b_12 (HAMO-Umbau, Zimo MX634R, analoger PWM-Betrieb):



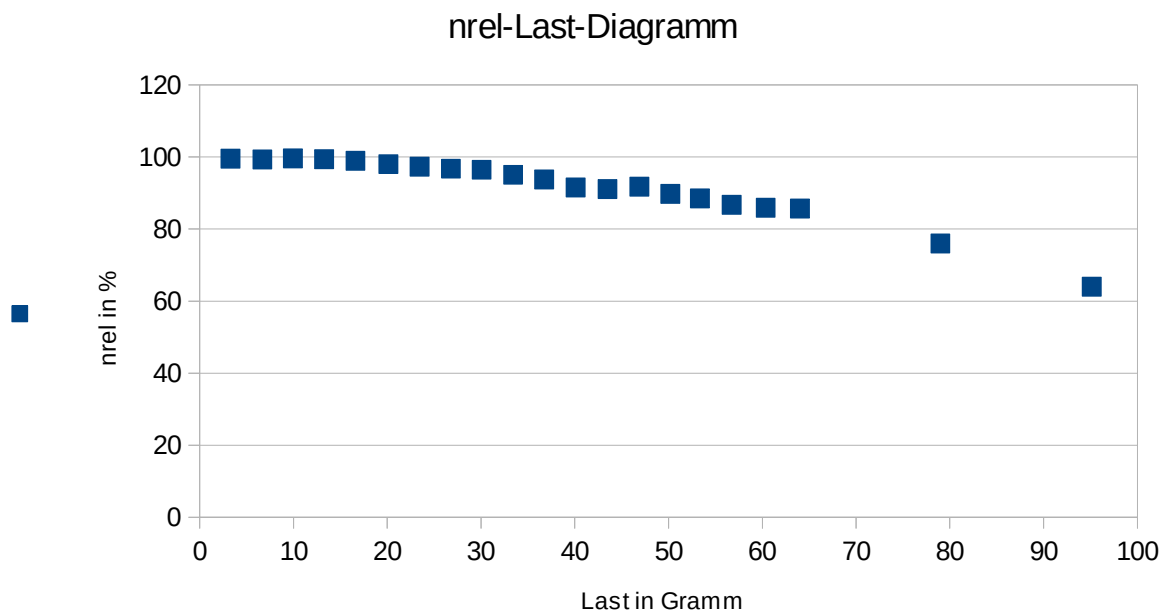
Steigung: $(-0,14 \pm 0,04) \text{ \%/g}$, Korr: -0,94; Auslassung der beiden letzten Datenpunkte, relative Drehzahl bei 64g: 90,42%

3000.6:b_13 (HAMO-Umbau, Zimo MX634R, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



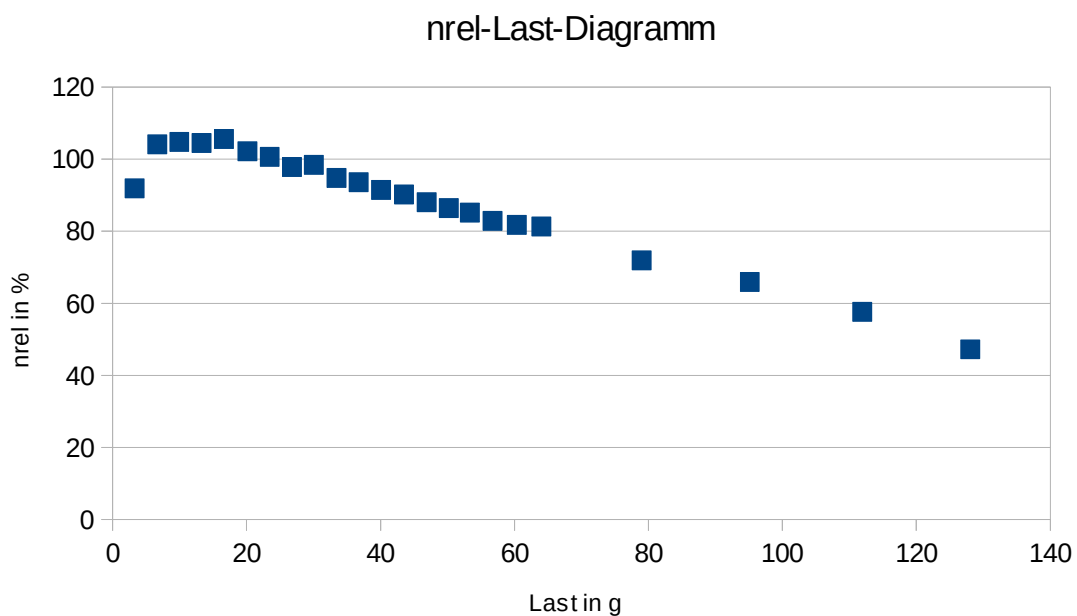
Steigung: $(-0,043 \pm 0,010) \text{ \%/g}$, Korr: -0,97; Auslassung der beiden letzten Datenpunkte, relative Drehzahl bei 64g: 96,71%

3000.6:d_5 (LRA-Umbau ohne Cx, Zimo MX634R, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



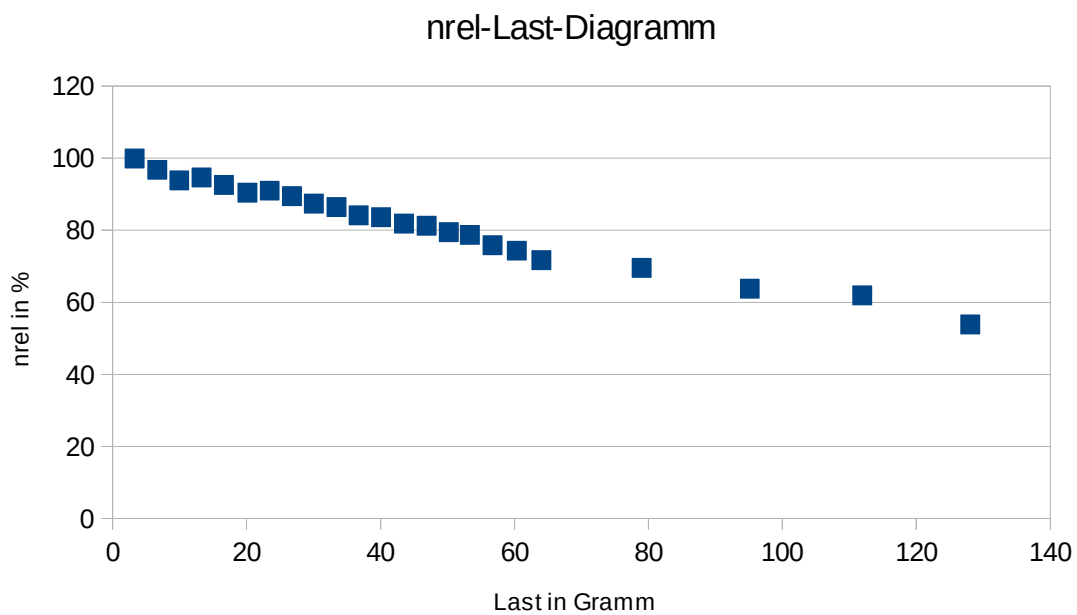
Steigung: $(-0,35 \pm 0,08) \text{ \%/g}$, Korr: -0,95, relative Drehzahl bei 64g: 85,72%

30159.1:a_3 (originale Relais-Ausstattung, analoger DC-Betrieb):



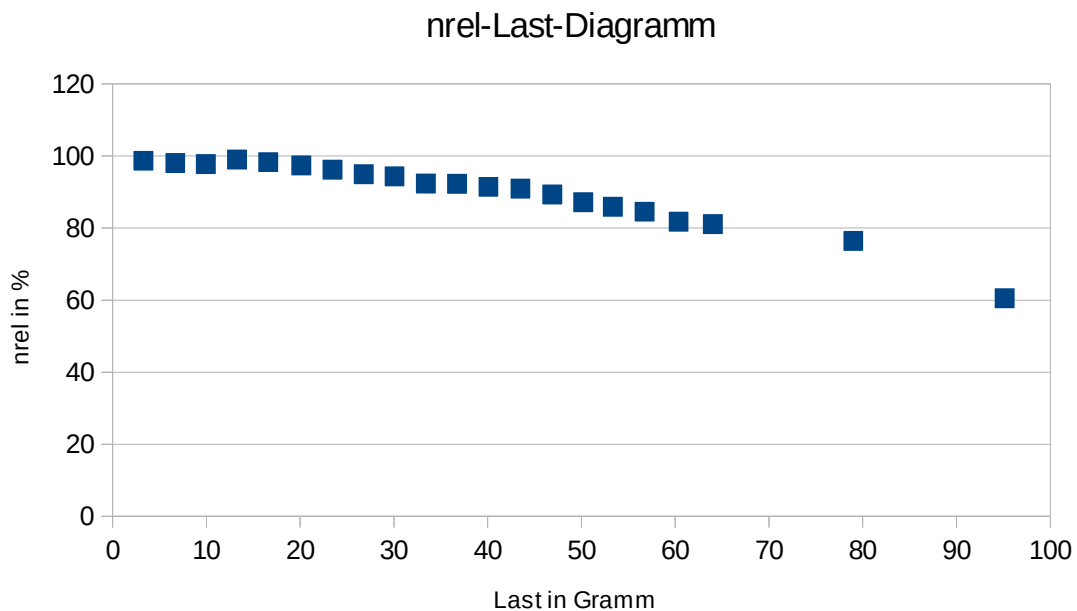
Steigung: $(-0,45 \pm 0,10) \text{ \%/g}$, Korr: -0,97, relative Drehzahl bei 64g: 81,31%

30159.1:a_4 (originale Relais-Ausstattung, analoger PWM-Betrieb):



Steigung: $(-0,36 \pm 0,08) \text{ \%/g}$, Korr: -0,99, relative Drehzahl bei 64g: 71,70%

36159.1:a_3 (originaler 6080-Dekoder, analoger DC-Betrieb):



Steigung: $(-0,37 \pm 0,09) \text{ \%/g}$, Korr: -0,96, relative Drehzahl bei 64g: 81,08%

36159.1:a_4 (originaler 6080-Dekoder, analoger PWM-Betrieb):

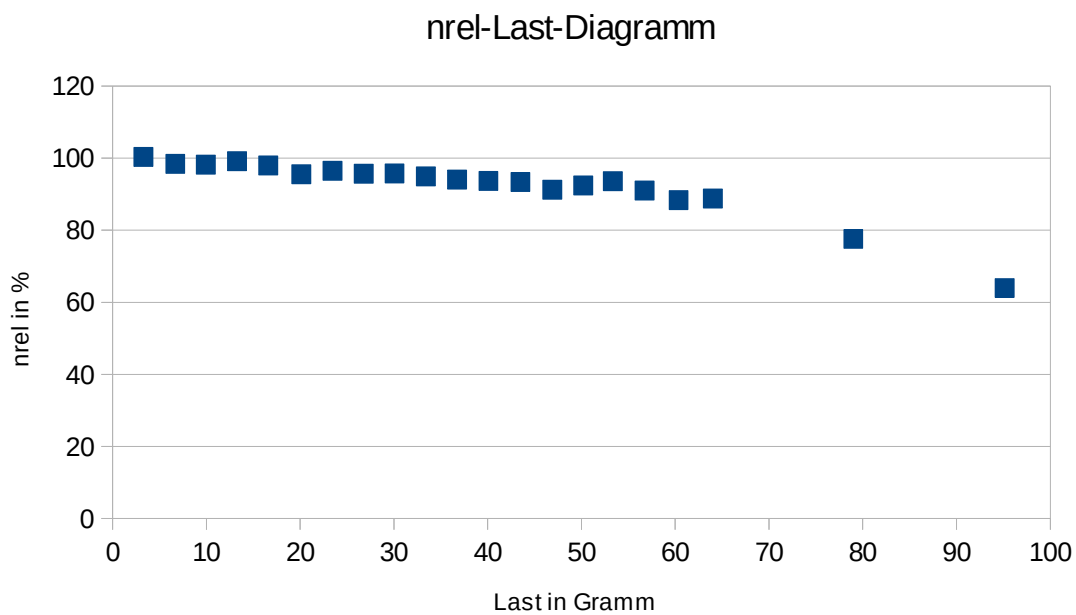
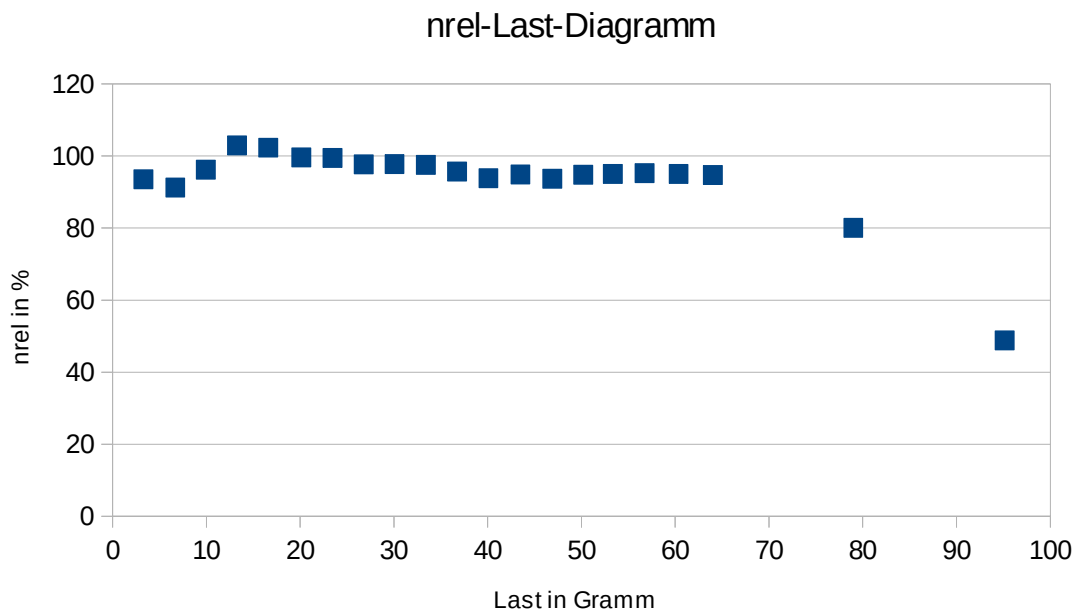


Abb. 3.3-14: relative Drehzahl in Abhängigkeit von der Belastung; Modell 36159.1:a_4

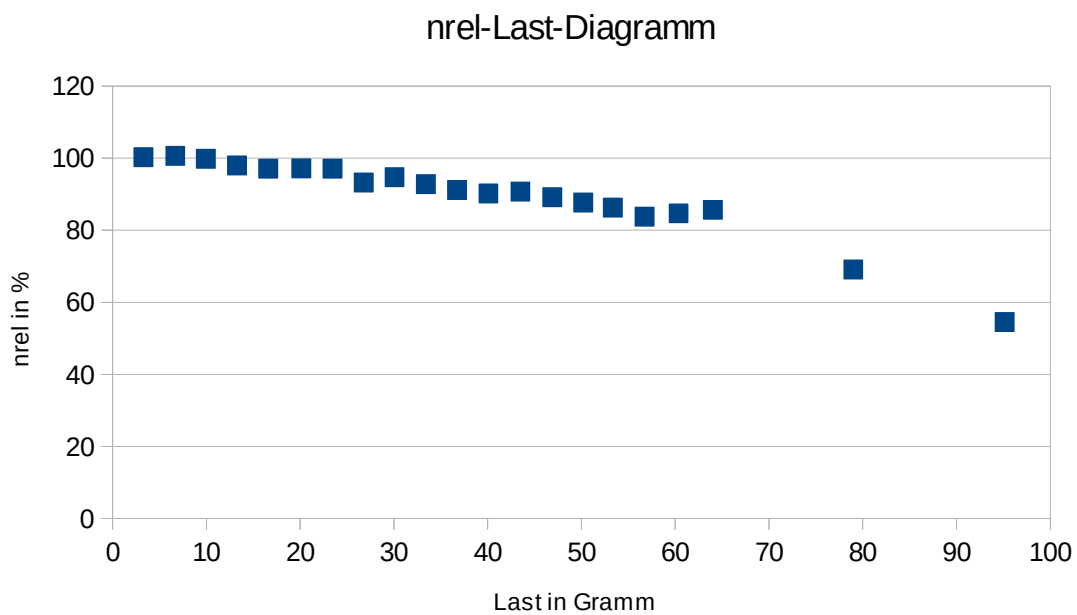
Steigung: $(-0,17 \pm 0,04) \text{ \%/g}$, Korr: -0,96; Auslassung der letzten beiden Datenpunkte, relative Drehzahl bei 64g: 88,82%

36159.1:a_5 (originaler 6080-Dekoder, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



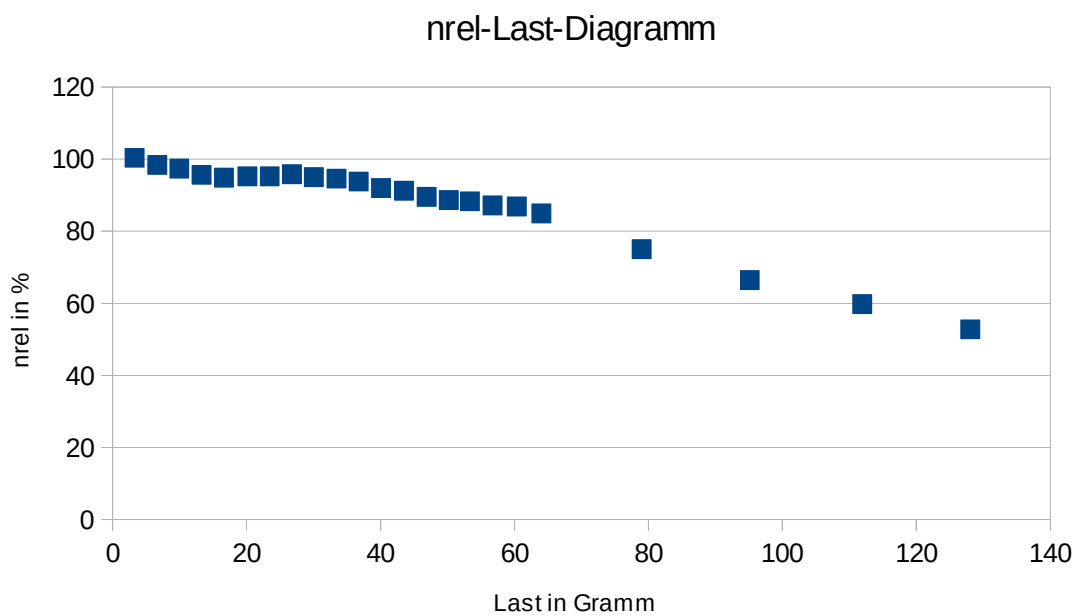
Steigung: $(-0,052 \pm 0,038) \text{ \%/g}$, Korr: -0,32; Auslassung der letzten beiden Datenpunkte, relative Drehzahl bei 64g: 94,71%

36159.1:b_5 (LRA-Umbau mit Cx, Zimo MX632R, analoger DC-Betrieb):



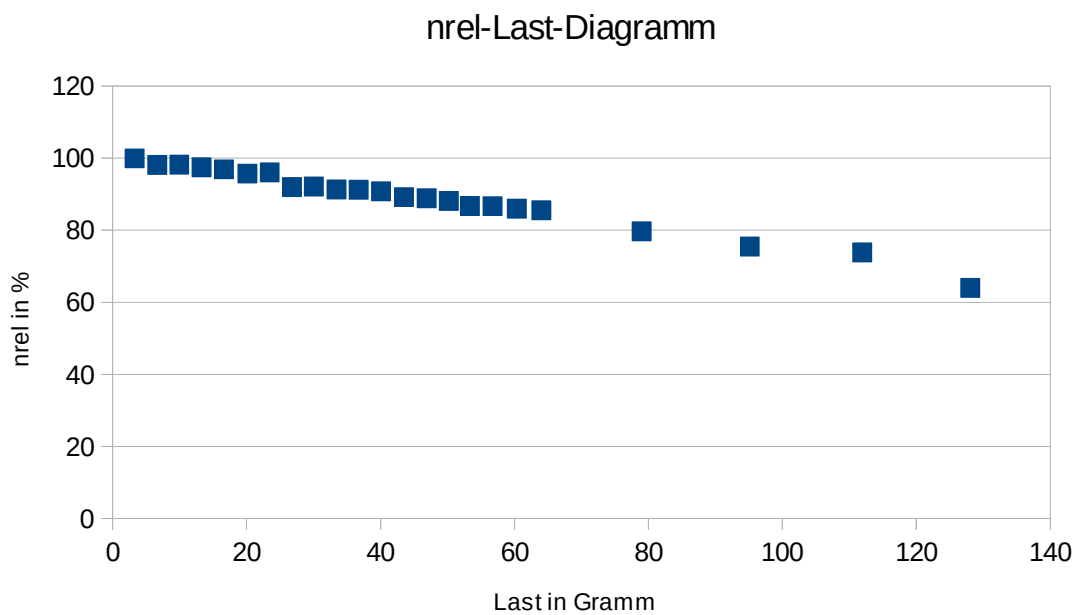
Steigung: $(-0,42 \pm 0,10) \text{ %/g}$, Korr: -0,94, relative Drehzahl bei 64g: 85,65%

36159.1:b_1 (LRA-Umbau mit Cx, Zimo MX632R, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



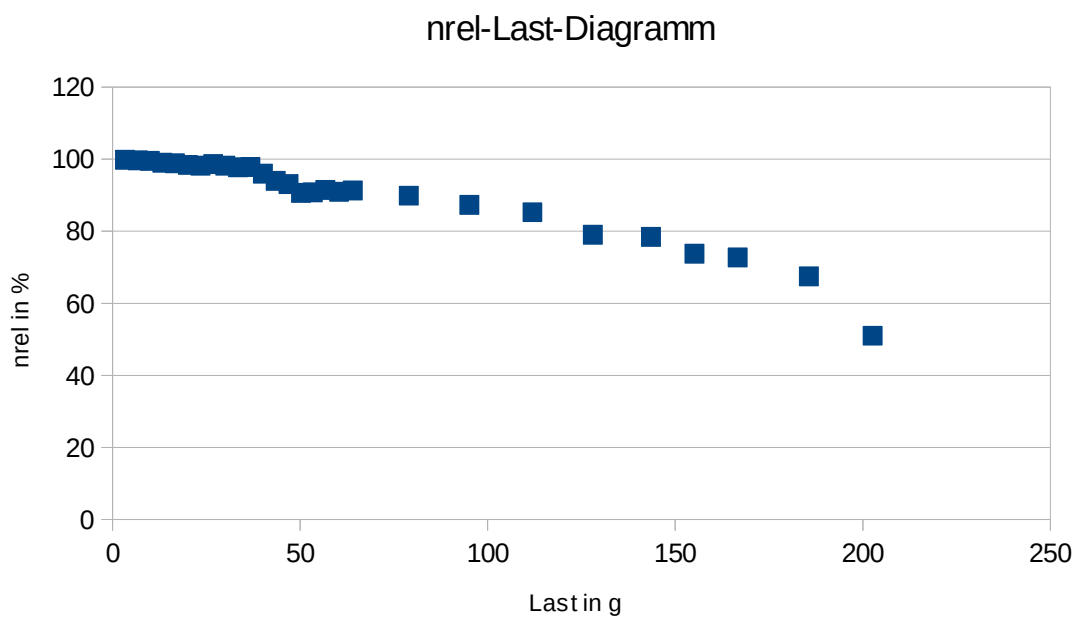
Steigung: $(-0,37 \pm 0,08) \text{ %/g}$, Korr: -0,97, relative Drehzahl bei 64g: 84,96%

30159.1:b_7 (LRA-Umbau mit Cx, Zimo MX632R, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



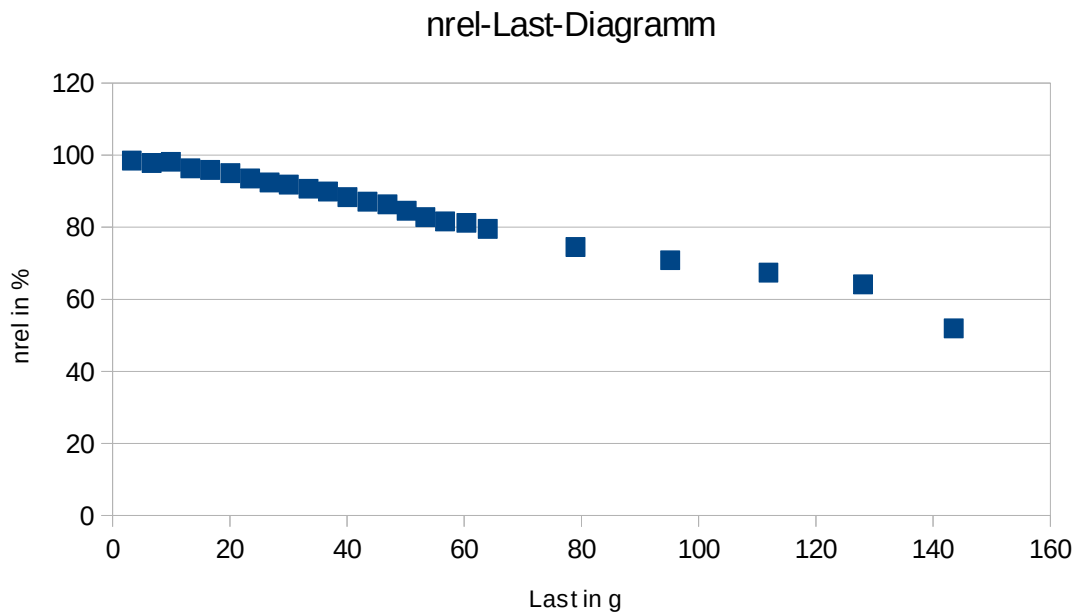
Steigung: $(-0,26 \pm 0,05) \text{ \%/g}$, Korr: -0,99, relative Drehzahl bei 64g: 85,56%

33221.1:d_6 (Umbau mit Uhlenbrock 76200, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



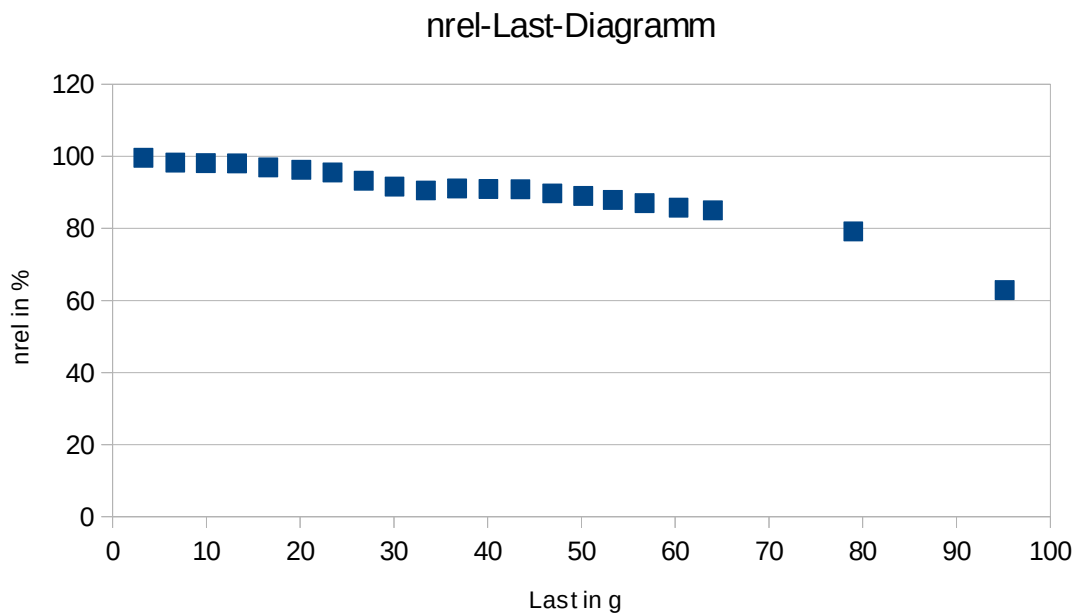
Steigung: $(-0,20 \pm 0,04) \text{ \%/g}$, Korr: -0,97, relative Drehzahl bei 64g: 91,33%

33221.1:e_2 (LRA-Umbau ohne Cx, Zimo MX632R, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



Steigung: $(-0,31 \pm 0,04) \text{ \%/g}$; Korr: -0,99, relative Drehzahl bei 64g: 79,54%

33221.1:f_8 (LRA-Umbau mit Cx, Zimo MX634R, Digitalbetrieb mit MMS/Tams):



Steigung: $(-0,32 \pm 0,02) \text{ \%/g}$; Korr: -0,94, relative Drehzahl bei 64g: 85,02%

3.4 Fehlerbetrachtung^{[1] Abschnitt 3.2}

Jede Messung ist mit systematischen und zufälligen Fehlern^{[17],[18]} behaftet. Während systematische Fehler nicht ohne Weiteres erkennbar sind, können zufällige Fehler durch geeignete Maßnahmen reduziert^{[19],[20],[21]} 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^{[18],[19]} durch Wiederholung der Messungen reduziert werden. Eine Rolle spielen die Fehlergrenzen im vorliegenden Fall nur dann, wenn deren Größenordnung einen signifikanten Unterschied in den Diagrammen verhindert. Die Abschätzung der Fehlergrenzen erfolgt nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz^{[19],[20],[21]}, nachdem sich bei Summen und Differenzen die absoluten Fehler, bei Produkten und Quotienten die relativen Fehler quadratisch addieren.

a) n_{rel} -M-Diagramm:

Fehlerquelle	Stoppuhr	Rundenzeit	Streckenlänge	Wagenmasse	Raddurchmesser
Fehlergröße	0,005s/20s	siehe Tab. 3b	0,1%	0,5g/155g	0,05mm/12mm
Fehlerquelle	Ausrollweg	Temperatur			
Fehlergröße	2%	5%*			

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

Modelltestreihe	ΔU	Rundenzeit	Modelltestreihe	ΔU	Rundenzeit
3000.6:a_2	0,80%	1,61%	30159.1:a_3	1,24%	4,73%
3000.6:a_4	0,91%	1,51%	30159.1:a_4	0,96%	1,88%
3000.6:b_11	1,65%	1,01%	30159.1:b_7	1,00%	0,34%
3000.6:b_12	0,77%	1,70%	36159.1:a_3	1,13%	1,05%
3000.6:b_13	1,00%	0,10%	36159.1:a_4	0,98%	1,97%
3000.6:d_5	1,00%	0,71%	36159.1:a_5	1,00%	0,79%
3021.6:b_3	1,03%	2,32%	36159.1:b_1	1,00%	1,40%
3021.6:b_4	0,73%	1,38%	36159.1:b_5	2,24%	5,03%
3021.6:e_2	1,00%	1,03%	33221.1:d_6	1,00%	1,18%
3021.6:e_5	1,54%	0,98%	33221.1:e_2	1,00%	0,76%
			33221.1:f_8	1,00%	1,23%

Tabelle 3b: Abschätzung der Fehlergrenzen für das n_{rel} -M-Diagramm, testreihentypische Toleranzen

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 (größtmöglicher Fehler gem. Tab. 3a und 3b):

$$F_{ges} = \sqrt{(0,0232^2 + 0,0473^2 + 0,05^2)} = 0,0726 (\text{Gesamtfehlerabschätzung}) \quad (13)$$

Der Gesamtfehler in diesem Diagramm liegt also für das Analogmodell bei 7,3%. Die Diagramme dürften also leicht zu unterscheiden sein.

b) n-U-Diagramm

Fehlerquelle	Stoppuhr	Rundenzeit	Streckenlänge	Spannung	Raddurchmesser
Fehlergröße	0,005s/20s	siehe Tab. 3b	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

$$F_{ges} = \sqrt{(0,0473^2 + 0,0106^2 + 0,05^2)} = 0,0696 \text{ (Gesamtfehlerabschätzung)} \quad (14)$$

Gesamtfehler hier 7%.

c) Streuung der Steigung aus der Regressionsrechnung (in den Auswertungen angegeben):

Formel (4) gibt die Berechnung der Steigung mit Hilfe der linearen Regression wieder. Mit Hilfe dieser Steigung kann man die Differenz zwischen beobachtetem Wert y und dem berechneten Wert bilden: $y - mx$. Analog zur Streuung einzelner Messwerte, kann man hier eine Reststreuung der Steigung^{[24] S. 315} berechnen:

$$s_m = \sqrt{\frac{(n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2) - m \cdot (n \cdot \sum (y_i \cdot x_i) - \sum y_i \cdot \sum x_i)}{(n-2)}} \quad (15)$$

Aus (15) berechnet sich die Standardabweichung der Steigung nach:

$$\sigma_m = \frac{s_m}{\sqrt{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (16)$$

Diese betragen 15-30%, womit alle anderen genannten Fehlergrenzen vernachlässigbar sind.

d) Regelungsausmaß gemäß Formel (1)

In Abschnitt 1.4 wurde eine Formel zur Quantifizierung des Regelungsausmaßes eingeführt:

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

Darin enthalten sind die relativen, d.h. auf den Leerlauf bezogene Drehzahlen. Diese relativen Drehzahlen haben einen relativen Fehler gem. Tab. 3b. Da die gemessenen Zeiten direkt in die Fehlerrechnung eingehen und alle anderen Fehler vernachlässigbar sind, genügt es hier an einem Beispiel die Fehlerrechnung durchzuführen. Alle angegebenen Fehler sind analog berechnet worden.

Als Bemessungswert für die relative Drehzahl unter Last wird die größtmögliche Belastung ausgewählt, die alle Testreihen ohne Auslassungen erreicht haben. Am Beispiel des Modelltyps 3000 ist dies der Wert bei 64g Belastung. Für die Beispielrechnung werden herangezogen:

3000.6:b_11 n_{relo} : 80,48%, Toleranz der absoluten Drehzahl: 1,01%

3000.6:b_13 n_{relm} : 96,71%, Toleranz der absoluten Drehzahl: 0,10%

Die absoluten Drehzahltoleranzen müssen zuerst in die relativen Drehzahltoleranzen umgerechnet werden. Es gilt:

$$n_{rel} = \frac{n_{Last}}{n_{Leerlauf}} (relative\ Drehzahl) \quad (17)$$

Da die Toleranzen für Last und Leerlauf die selben sind und sich die relativen Fehler quadratisch addieren, gilt für den Fehler der relativen Drehzahl:

$$\delta n_{rel} = \sqrt{(2)} \cdot \delta n (Toleranz\ der\ relativen\ Drehzahl) \quad (18)$$

Demnach sind die die Toleranzen der relativen Drehzahlen:

3000.6:b_11: 1,43%;

3000.6:b_13: 0,14%.

Bei Summen und Differenzen addieren sich die Absolutwerte der Fehler. Daher gilt für (1):

$$\delta \eta_{rel} = \sqrt{\left(\frac{\delta n_{relm} \cdot n_{relm} + \delta n_{relo} \cdot n_{relo}}{n_{relm} - n_{relo}} \right)^2 + \left(\frac{\delta n_{relo} \cdot n_{relo}}{1 - n_{relo}} \right)^2} (Fehler\ des\ Regelungsausmaßes) \quad (19)$$

Am gewählten Beispiel berechnet sich der Fehler des Regelungsausmaßes zu:

$$\delta \eta_{rel} = \sqrt{\left(\frac{0,0014 \cdot 0,9671 + 0,0143 \cdot 0,8048}{0,9671 - 0,8048} \right)^2 + \left(\frac{0,0143 \cdot 0,8048}{1 - 0,8048} \right)^2} = \sqrt{(0,0793^2 + 0,0590^2)} = 0,099$$

Folglich ist der relative Fehler des nach Formel (1) berechneten Regelungsausmaßes bei 10% am gewählten Beispiel; das Ergebnis lautet hier also: $(83 \pm 8)\%$

e) Regelungsausmaß gemäß Formel (2)

Formel (2) in Abschnitt 1.4 benutzt direkt die aus den Messungen berechneten Toleranzen, daher ist es hier nicht möglich, eine Fehlerrechnung anzugeben. Benutzt wird stattdessen die in Teil d) (Regelungsausmaß gemäß Formel (1) berechnete Größe; im benutzten Beispiel also 10%; mit dem Ergebnis $(90 \pm 9)\%$, also konsistent mit dem Resultat aus Teil d).

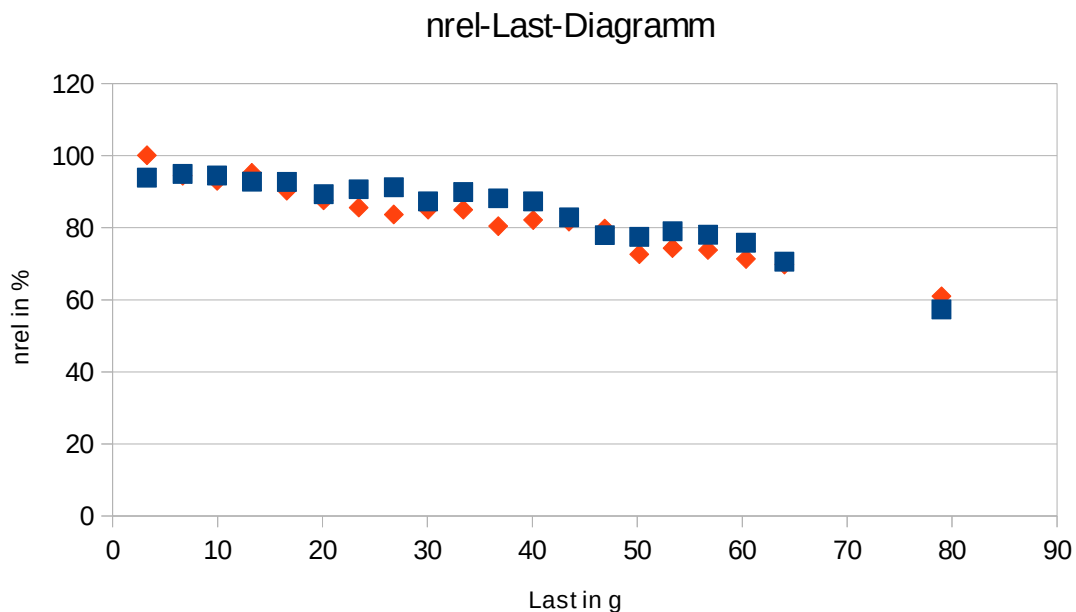
3.5 Vergleich zwischen den Schaltungen ohne/mit Cx

3.5.1 Modelltyp 3000

Bei diesem Modelltyp wurden nicht nur die Reihenschlussmotorvariante ohne Elektronik, sondern auch die Variante mit fremderregtem Motor (Gleichstrommotor) gemessen. Daher eignet sich dieses Modell auch zum Vergleich der hier vorgestellten Schaltung mit einer Regelung im herkömmlichen Sinn.

a) Reihenschlussmotor

das Modell wurde unter verschiedenen Betriebsarten gemessen, um zu sehen, ob alleine die Ansteuerung (DC, PWM) einen signifikanten Einfluss auf das Betriebsverhalten unter Last zeigt. Am besten eignet sich hierfür das nrel-Last-Diagramm:



Anhand der Abbildung 3.5.1-1 sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Auch die Auswertung ergibt für beide Messungen im Rahmen der Fehlergrenzen identische Werte:

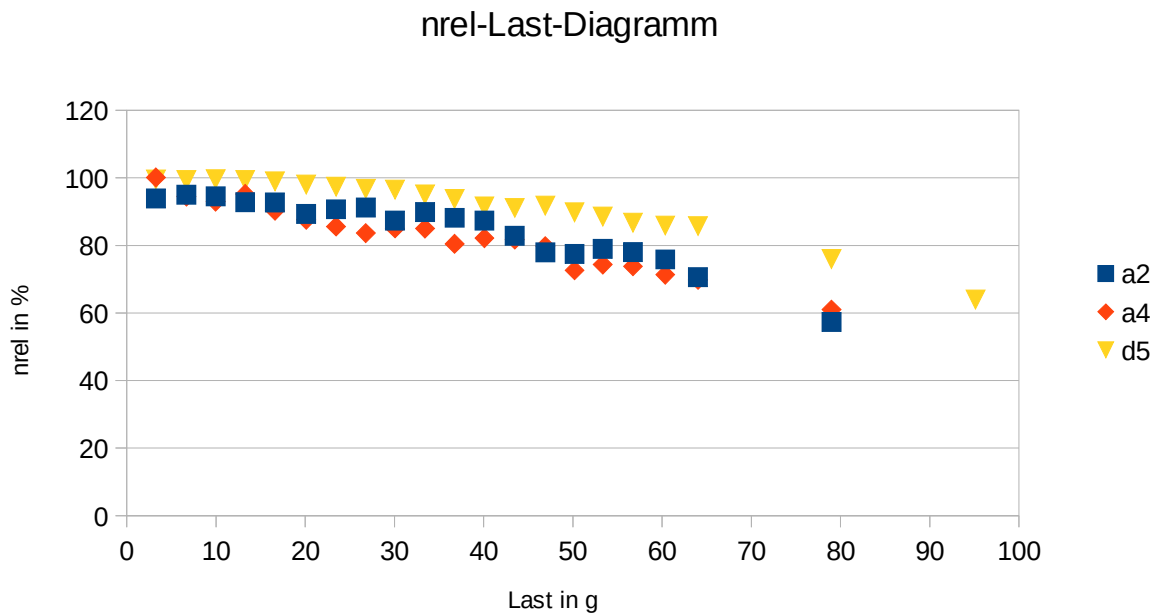
Steigung der Geraden: $(-0,43 \pm 0,11) \text{ \%/g}$ (a_2) vs. $(-0,46 \pm 0,11) \text{ \%/g}$ (a_4)

nrel am Bezugspunkt 64g: $(70,8 \pm 1,6)\%$ (a_2) vs. $(69,8 \pm 1,5)\%$ (a_4)

Wird nun anstelle des Relais die hier vorgestellte Schaltung mit Dekoder eingebaut einschließlich Optimierung der Dekodervariablen, ergibt sich ein im Diagramm sichtbarer Unterschied, wie er in Abbildung 3.5.1-2 gezeigt wird:

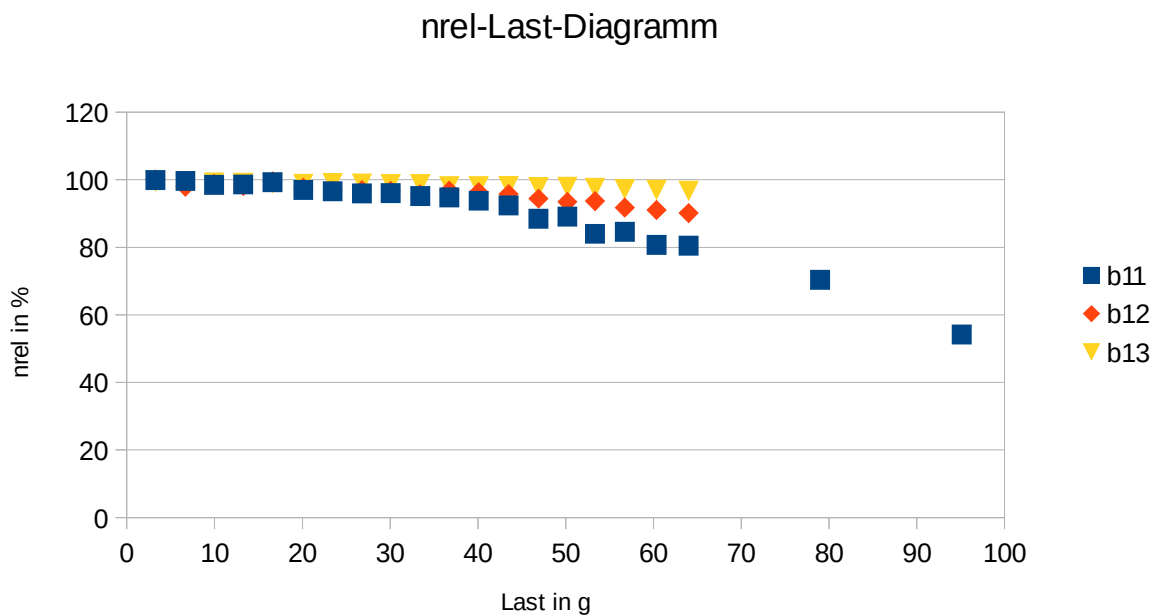
Die Steigung der Geraden mit Dekoder und Schaltung beträgt hier $(-0,35 \pm 0,08) \text{ \%/g}$ (d_5) und ist aufgrund der Fehlergrenzen nicht unterscheidbar. nrel am Bezugspunkt hingegen ist $(85,7 \pm 0,9)\%$ und damit signifikant größer. Damit lässt sich nach Formel (1) ein Regelungsausmaß berechnen, welches hier bei $(51 \pm 10) \%$ (a_2 vs. d_5) bzw. bei $(53 \pm 9)\%$ (a_4 vs d_5) liegt.

Die Reduktion der Geschwindigkeitsschwankungen als Regelungsausmaß gem. Formel (2) beträgt: $(56 \pm 11) \%$ (a_2 vs d_5) bzw. bei $(53 \pm 10)\%$ (a_4 vs d_5) in guter Übereinstimmung mit den Werten aus Formel (1).



b) Fremderregter Motor mit Dekoder

Wird der Motor zu einem fremderregten Motor mit dem selben Dekoder umgebaut und die Messreihe erneut durchgeführt, ergibt sich aufgrund des anderen Motortyps und des auf diesen Motortyp abgestimmten Dekoderdesigns ein anderes Bild:



Auf den ersten Blick sind hier die Unterschiede wesentlich kleiner, weil der Motor deutlich stärker (kleinere Abnahme der Drehzahl bei ansonsten gleichen Belastungen) ist. Daher ist hier um so genauer auf die Daten der Auswertung zu achten:

Steigungen: $(-0,44 \pm 0,11)$ vs. $(-0,14 \pm 0,04)$ vs. $(-0,04 \pm 0,01)$ (DC vs PWM vs MMS mit Regelung). Diese Steigungen sind alle signifikant unterschiedlich.
nrel beim Bezugspunkt 64g: $(80,5 \pm 1,1)\%$ vs. $(90,1 \pm 2,2)\%$ vs. $(96,7 \pm 0,1)\%$.

Somit beträgt das Regelungsausmaß gem (1):

b_11 vs b_13: $(83 \pm 6)\%$ bzw. b_12 vs. b_13: $(67 \pm 25)\%$.

Regelungsausmaß nach Formel (2):

b_11 vs. b_13: $(91\% \pm 7)\%$ bzw. b_12 vs. b_13: $(95 \pm 35)\%$.

Der Unterschied zwischen DC (b_11) und MMS (b_13) ist noch signifikant, während zwischen PWM (b_12) und MMS (b_13) nicht deutlich unterschieden werden kann aufgrund der großen Fehler, die durch die Differenz zweier ähnlich großer Zahlenwerte entstehen.

3.5.2 Modelltyp 3021

Dieses Modell wurde bereits in der ersten Arbeit^[1] zu diesem Thema ausgiebig untersucht und bietet sich daher für einen Vergleich zwischen den Schaltungen mit und ohne Cx an.

a) Originalmotor

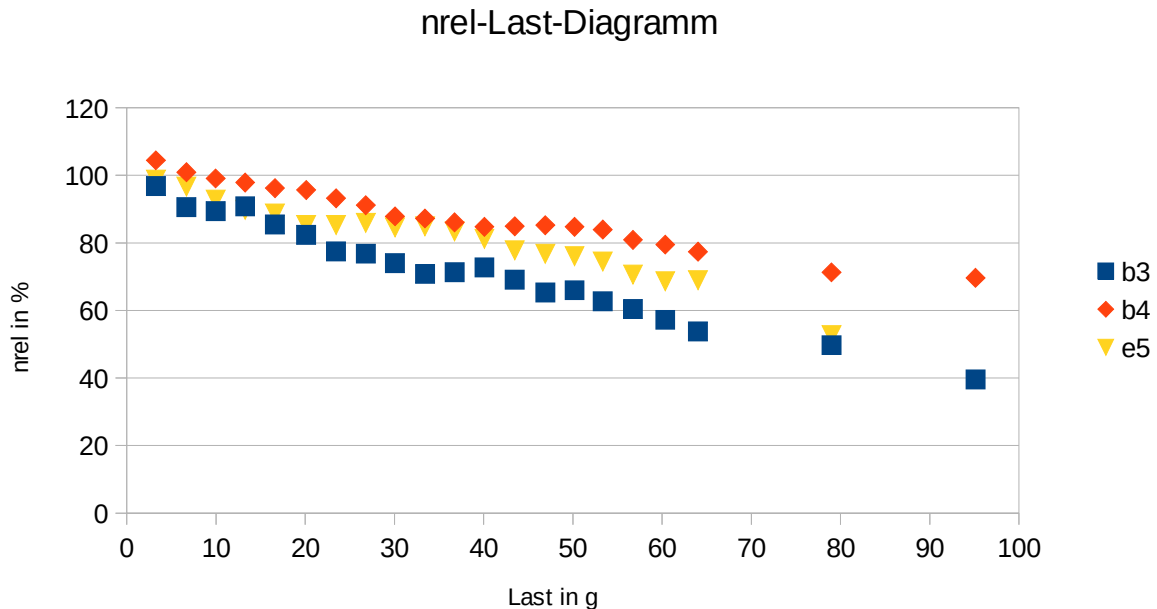


Abb. 3.5.2-1: Vergleich des Originalmotors mit Schaltung ohne Cx und ohne Regelung.

Der Abbildung 3.5.2-1 ist zu entnehmen, dass die Leistungen ohne Regelung, für DC (b_3) und DC mit Schaltung ohne Cx (e_5) gleichwertig sind, während im PWM-Betrieb (b_4) eine geringere Abnahme der Geschwindigkeit vorliegt. Letzteres steht im Gegensatz zu den Beobachtungen bei dem Modelltyp 3000 (vgl. Kap.3.5.1). Die in Abb. 3.5.2-1 ersichtlichen Verhältnisse werden auch durch die Steigungen wiedergegeben:

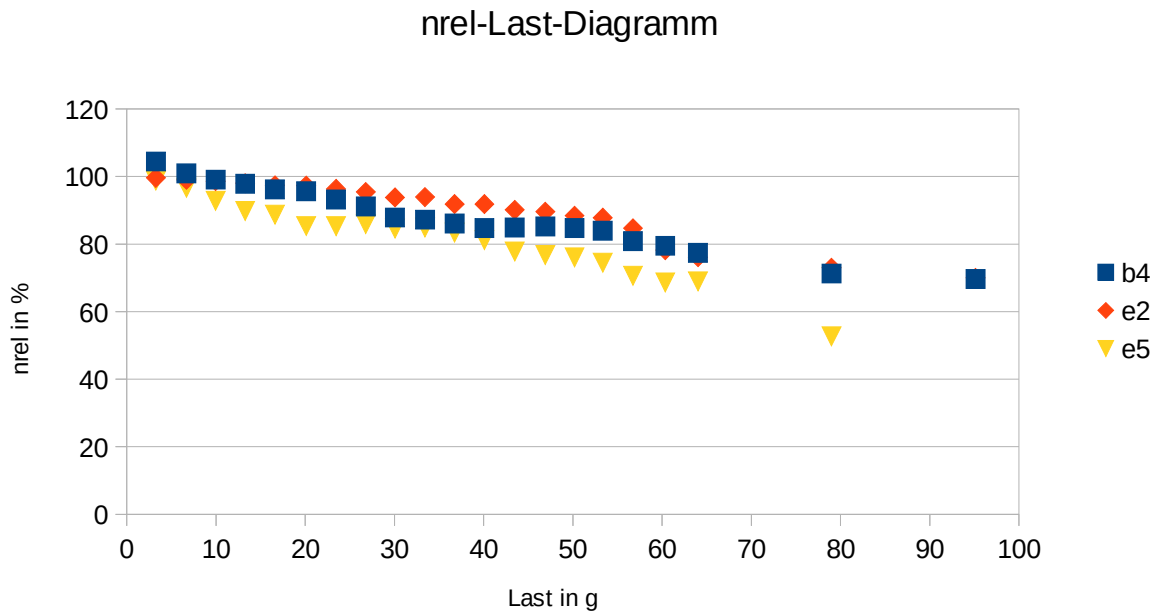
$(-0,58 \pm 0,12)\%/g$ (b_3) vs. $(-0,32 \pm 0,06) \%/g$ (b_4) vs. $(-0,52 \pm 0,08) \%/g$ (e_5).

nrel bei Bemessungslast 64g: $(53,8 \pm 1,7)\%$ vs. $(77,4 \pm 1,5)\%$ vs. $(69,0 \pm 1,0)\%$.

Da die Ergebnisse der Originalmotors im DC-Betrieb mit jenen des umgerüsteten Motors ohne Cx und Regelung im DC-Betrieb übereinstimmen, kann für den nachfolgenden Vergleich der DC-Betrieb des Originalmotors zwecks besserer Übersicht im Diagramm weggelassen werden.

b) Vergleich mit/ohne Regelung, Schaltung ohne Cx

In Abbildung 3.5.2-2 sind die Datenpunkte b_4 (PWM-Betrieb des unveränderten Motors), e_2 (mit Regelung und LRA-Schaltung, jedoch ohne Cx im MMS-Betrieb) und e_5 (mit LRA-Schaltung aber ohne Regelung und ohne Cx im DC-Betrieb) aufgezeichnet. Dem Schaubild ist zu entnehmen, dass die Regelung (e_2) eine sichtbare Verbesserung gegenüber dem DC-Betrieb (e_5) bringt. Damit ist die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Regelung gezeigt. Es werden damit aber nur die Verhältnisse des PWM-Betriebs des Originalmodells (b_4) erreicht.



Die Steigungen der Kurven sind wie folgt:

$(-0,32 \pm 0,06) \text{ \%/g}$ (b_4) vs. $(-0,35 \pm 0,07) \text{ \%/g}$ (e_2) vs. $(-0,52 \pm 0,08) \text{ \%/g}$ (e_5).

nrel bei Bemessungslast 64g: $(77,4 \pm 1,5)\%$ vs. $(76,1 \pm 1,1)\%$ vs. $(69,0 \pm 1,0)\%$.

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich nur für den Vergleich zwischen e_2 (Schaltung mit Regelung) und e_5 (Schaltung ohne Regelung) ein Regelungsausmaß nach (1) berechnen. Dieses beträgt $(23 \pm 5)\%$. Aufgrund der größeren Schwankung in der Zeitkonstanz bei der Schaltung mit Regelung kann hier kein Regelungsausmaß nach (2) berechnet werden.

c) Vergleich Regelung ohne/mit Cx

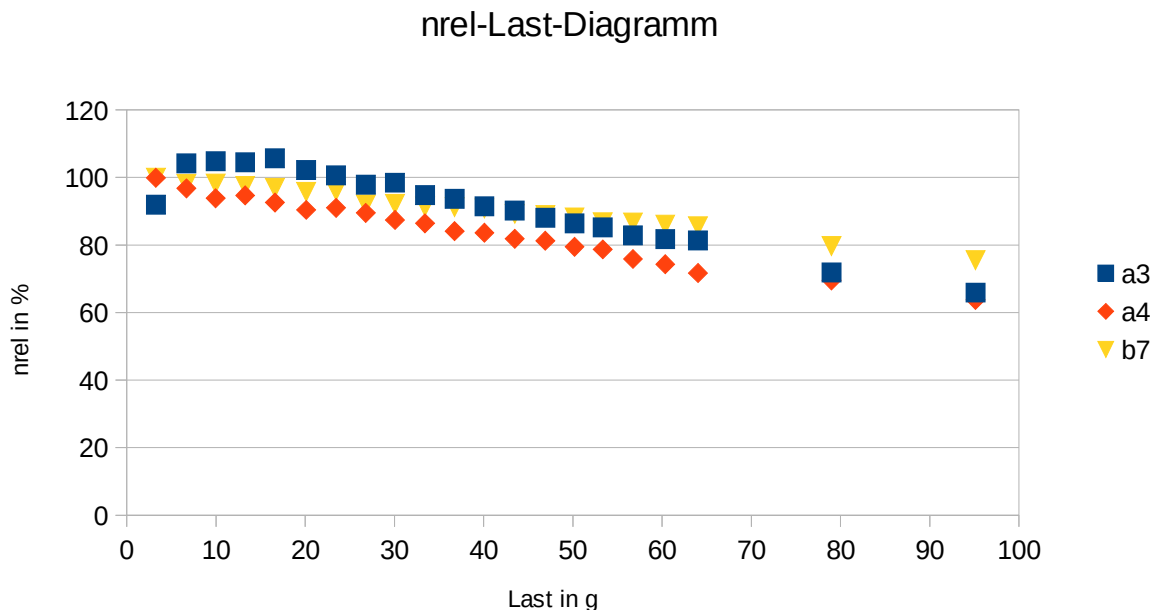
Zusätzlich zum vorherigen Abschnitt wurde das Modell im eingefahrenen Zustand aufgestellt, sodass die Räder in der Luft drehen konnten. Nach dem Einstellen von FS 3/14 (Digital/MMS) stellte sich eine Geschwindigkeit ein. Diese verringerte sich um mehr als 50%, wenn Cx über ein Kabel zwischen Motorschild und D1/D2 verbunden wurde. Ein eindeutiges Indiz für die erhebliche Zunahme der Regelungswirkung weil die induzierte Spannung in den Impulspausen stark vergrößert wurde. Als Dekoder musste ein Tams LD-G33 benutzt werden, da der Kuehn T-125 nicht mehr zur Verfügung stand. Nach dem Einstellen der CV-Werte gem. Abschnitt 3.2.3 wurde eine kurze Messreihe mit drei verschiedenen Lasten durchgeführt, um den Vergleich mit der Schaltung ohne Cx zu ermöglichen. Nachdem im vorherigen Abschnitt ohne Regelung und mit Regelung/ohne Cx verglichen wurde, kann dieser Vergleich auf die Schaltung mit Cx erweitert werden.

nrel bei Bemessungslast 64g: $(76,1 \pm 1,1)\%$ (e_2 mit Regelung/ohne Cx) vs. $(69,0 \pm 1,0)\%$ (e_5 ohne Regelung) vs. $(88,5 \pm 1,0)\%$ (f mit Regelung/mit Cx). Daraus resultiert ein Regelungsausmaß gem. Formel (1) zu $63 \pm 10\%$.

3.5.3 Modelltyp 30159/36159

Dieser Modelltyp ist konstruktiv (Getriebe und Motor) identisch. Der einzige Unterschied ist die Ansteuerung vor dem Umbau. Das Modell 30159 hat ein Umschaltrelais (also ausschließlich analoger Betrieb), dagegen ist das Modell 36159 mit einem Digitaldekoder ohne Regelung ausgestattet. Dieser Dekoder kann zusätzlich zu allen analogen Betriebsmodi auch digital im Märklin-Motorola-System fahren. Zuerst werden beide Modelltypen getrennt betrachtet, anschließend beide Umbauten gemeinsam.

a) 30159 vor und nach dem Umbau



In Abbildung 3.5.3-1 sind die Messpunkte des Modells 30159 vor dem Umbau (a_3 DC, a_4 PWM) mit dem selben Modell nach dem Umbau mit Cx (b_7 MMS) eingetragen. Während die analogen Betriebsmodi nahezu gleichwertig sind, ist für das umgebaute Modell eine Verbesserung zu erkennen. Die dazugehörigen Zahlenwerte sind für die Steigungen: $(-0,45 \pm 0,10) \text{ \%/g}$ (a_3) vs. $(-0,36 \pm 0,08) \text{ \%/g}$ (a_4) vs. $(-0,26 \pm 0,05) \text{ \%/g}$ (b_7).

nrel bei Bemessungslast 64g: $(81,3 \pm 5,4)\%$ vs. $(71,7 \pm 1,9)\%$ vs. $(85,6 \pm 0,4)\%$.

Somit sind die Steigungen zwischen a_3 und b_7 zwar signifikant verschieden, doch nicht im Falle a_4 vs. b_7. Umgekehrt ist es bei der relativen Drehzahl unter Bemessungslast 64g: a_4 und b_7 sind signifikant unterschiedlich, jedoch nicht a_3 und b_7.

Aufgrund obiger Ergebnisse lässt sich hier wiederum ein Regelungsausmaß berechnen.

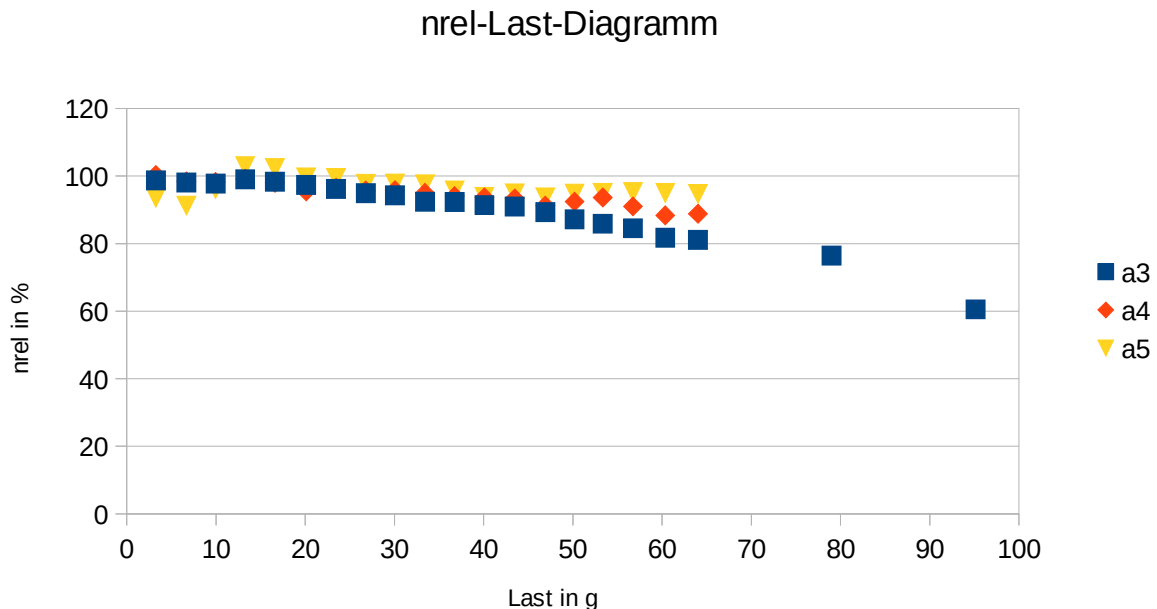
Es beträgt gem. (1): $(23 \pm 23)\%$ (a_3 vs. b_7) bzw. $(49 \pm 6)\%$ (a_4 vs. b_7)

und gem (2): $(93 \pm 92)\%$ bzw. $(82 \pm 10)\%$.

Anhand der Fehlergrenzen kann das Vergleichsergebnis zwischen a_3 und b_7 nicht weiter berücksichtigt werden. Für den Vergleich zwischen a_4 und b_7 ergibt sich eine recht große Diskrepanz zwischen den berechneten Regelungsausmaßen.

b) 36159 vor dem Umbau

Da der Originalzustand des Modells sowohl alle Analogbetriebsmodi, als auch Digital MMS ermöglicht, bietet es sich an, zwischen DC analog, PWM analog und PWM Digitalbetrieb (MMS) zu vergleichen:



Im Diagramm sind auf den ersten Blick keine bedeutenden Unterschiede festzustellen, folglich müssen die berechneten Steigungen bzw. nrel bei Bemessungslast näher betrachtet werden.

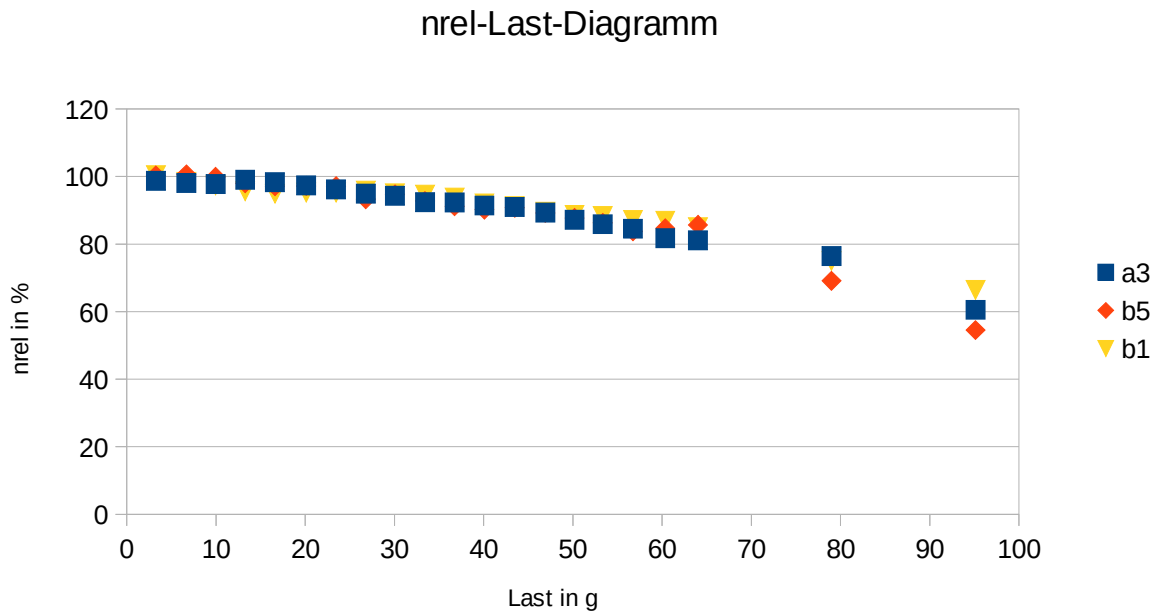
Steigungen: $(-0,37 \pm 0,09) \text{ \%/g}$ (a_3, DC) vs. $(-0,17 \pm 0,04) \text{ \%/g}$ (a_4, PWM) vs. $(-0,05 \pm 0,03) \text{ \%/g}$ (a_5, MMS).

nrel bei 64g: $(81,1 \pm 1,2)\%$ vs. $(88,8 \pm 2,5)\%$ vs. $(94,7 \pm 1,1)\%$

Die drei Betriebsmodi sind somit deutlich voneinander verschieden, wobei der Digitalbetrieb das beste, der DC-Analogbetrieb das schlechteste Ergebnis aufweist. Dies ist beim Vergleich mit dem umgebauten Modell zu berücksichtigen.

b) 36159 vor und nach dem LRA-Umbau mit Cx

Zu diesem Vergleich wurde die Testreihe im analogen DC-Betrieb vor dem Umbau mit einbezogen.



Im Diagramm 3.5.3-3 sind bis zur Bemessungslast von 64g keine Unterschiede zwischen den drei Testreihen (DC-analog a_3, DC-Umbau b_5 und MMS-Umbau b_1) zu erkennen. Dies sollte sich auch in den Steigungen und relativen Drehzahlen bei Bemessungslast widerspiegeln. Erst bei noch größeren Lasten scheint sich die eingeschaltete Regelung bemerkbar zu machen.

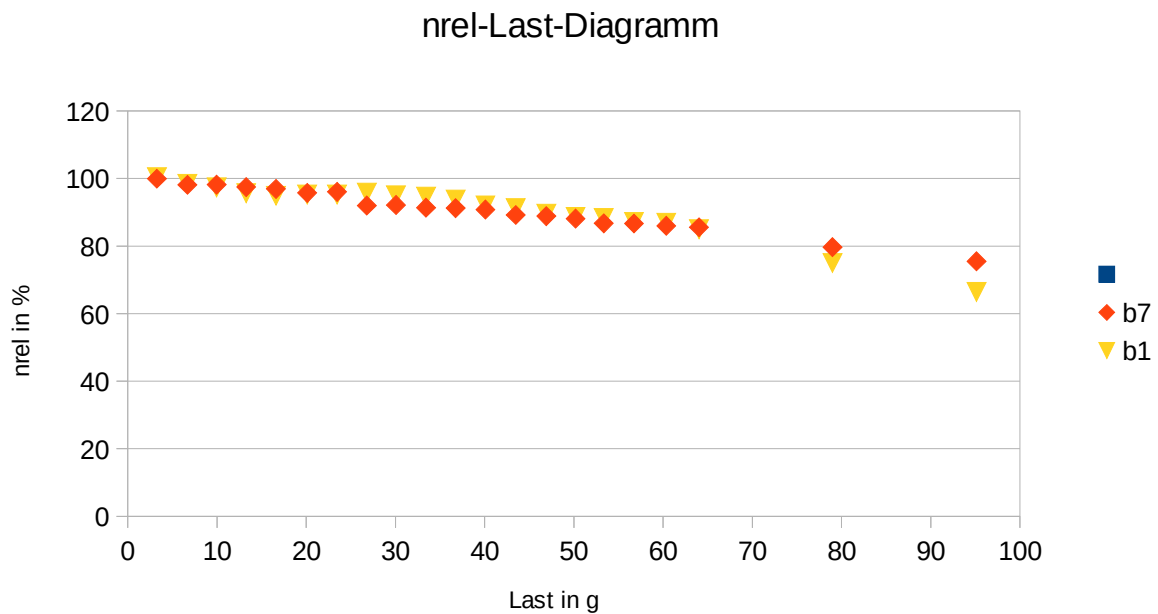
Steigungen: $(-0,37 \pm 0,09) \text{ \%/g}$ (a_3, DC) vs. $(-0,37 \pm 0,07) \text{ \%/g}$ (b_1, MMS) vs. $(-0,42 \pm 0,10) \text{ \%/g}$ (b_5, DC)

nrel bei 64g: $(81,1 \pm 1,2)\%$ vs. $(85,0 \pm 1,7)\%$ vs. $(85,6 \pm 6,1)\%$

Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich aus diesen Testreihen kein Regelungsausmaß berechnen oder die Fehlergrenzen sind $>100\%$ womit sich kein sinnvolles Ergebnis angeben lässt.

c) Vergleich zwischen den umgebauten Modellen 30159 und 36159 beide mit Cx und Regelung

Die konstruktiv identischen Modelle 30159 und 36159 erhielten durch die Einstellung der CV nach der Anleitung aus Abschnitt 3.2.4 unterschiedliche Werte, die in Tabelle 3.2.4. festgehalten sind. Daher ist es von Interesse, in welchem Ausmaß sich die Messungen zwischen den beiden Modellen unterscheiden. In der Abbildung 3.5.3-4 sind die Messreihen aufgetragen:

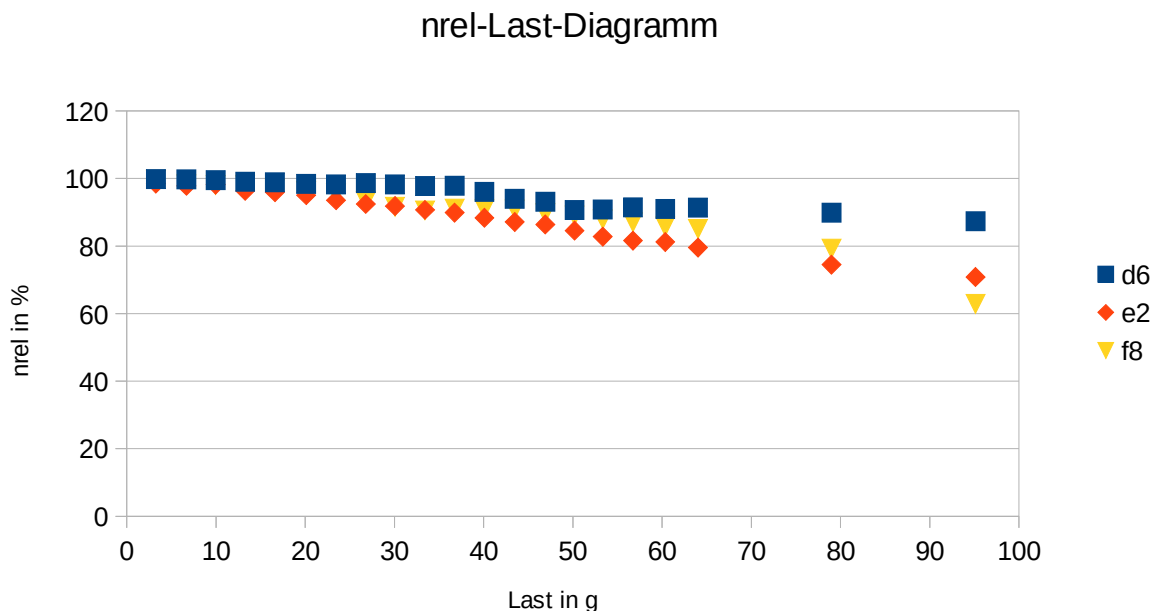


Beide Modelle sind bis zu einer Belastung von ca. 80g identisch, erst danach fällt das Modell 36159 in der relativen Drehzahl stärker ab. Die zu den Messungen gehörigen Angaben sind wie folgt:

Steigungen: $(-0,26 \pm 0,05) \text{ \%/g}$ (30159.1:b_7) vs. $(-0,37 \pm 0,08) \text{ \%/g}$ (36159.1:b_1)
im Rahmen der Fehlergrenzen also gleich. nrel bei Bemessungslast 64g ist $(85,6 \pm 0,4)\%$
bzw. $(85,0 \pm 1,7)\%$, also ebenfalls im Rahmen der Fehlergrenzen gleich.

3.5.4 Modelltyp 33221

Bei diesem Modell liegen drei vollständige Messreihen mit verschiedenen Regelungen vor. Zwischen diesen ist es nicht sinnvoll, ein Regelungsausmaß zu bestimmen. Daher wurde in einer weiteren Testreihe die Regelung beim Umbau mit Zimo-Dekoder abgeschaltet und ein Lasttest nach dem üblichen Prozedere durchgeführt. Da die Einstellungen der CV-Werte außer dem Regelungsausmaß (CV58=0) identisch sind, sollten die Ergebnisse direkt vergleichbar sein. Leider ist jedoch ein sinnvoller Betrieb bei FS 7/14 nicht möglich, da das Modell in dieser Einstellung nicht einwandfrei fährt. Stattdessen wurde FS 14/14 gewählt. Trotz dieser Einstellung ist das Modell sehr langsam. Daher wurde die Testreihe abgekürzt: es wurden drei Messwerte für drei verschiedene Belastungen aufgenommen und deren Mittelwert sowie die Standardabweichung zur Auswertung herangezogen. Auf eine Geschwindigkeitstabelle wurde verzichtet. In der Abbildung 3.5.4-1 sind die aufgenommenen Lastwerte der drei Testreihen mit Regelung aufgetragen.



Die aufgetragenen Werte sind von aktiven Regelungen: d_6 (UB 76200), e_2 (Zimo mit LRA) f_8 (Zimo mit LRA und Cx). Dazugehörige Steigungen: $(-0,20 \pm 0,04) \text{ \%/g}$ UB76200 vs. $(-0,31 \pm 0,04) \text{ \%/g}$ (LRA ohne Cx) vs. $(-0,32 \pm 0,02) \text{ \%/g}$ (LRA mit Cx). Anhand der Steigung ist zwischen den LRA-Schaltungen nicht zu unterscheiden. Die zugehörigen nrel-Werte bei Bemessungslast 64g: $(91,33 \pm 1,5)\%$ vs. $(79,54 \pm 0,9)\%$ vs. $(85,02 \pm 1,5)\%$ vs. $(62,69 \pm 0,7)\%$ (ohne Regelung). Aufgrund der Toleranzen lässt sich nur ein Regelungsausmaß nach (1) berechnen. Dies beträgt folglich: $(77 \pm 8)\%$ (UB76200), $(45 \pm 9)\%$ (LRA ohne Cx) bzw. $(60 \pm 10)\%$ (LRA mit Cx). Damit ist zwar das Regelungsausmaß zwischen UB 76200 und LRA ohne Cx signifikant verschieden, nicht jedoch zwischen LRA mit Cx und den beiden anderen.

3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussionen

3.6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Da die Funktionsfähigkeit der Regelung bereits bewiesen ist ^[1], genügt es hier das Regelungsausmaß der verschiedenen Messreihen zu vergleichen.

Testreihe	Referenz	Ausmaß (1)	Ausmaß (2)	Motor	Ansteuerung
3000.6:d_5	3000.6:a_2	51 ± 10	56 ± 11	RSM+Cx	DC
3000.6:d_5	3000.6:a_4	53 ± 9	53 ± 10	RSM+Cx	PWM
3000.6:b_13	3000.6:b_11	83 ± 6	91 ± 7	FEM	DC
3000.6:b_13	3000.6:b_12	67 ± 25	95 ± 35 [‡]	FEM	PWM
3021.6:e_2	3021.6:e_5	23 ± 5	†	RSM-Cx	MMS
3021.6:f S.59	3021.6:e_5	63 ± 10	†	RSM+Cx	MMS
30159.1:b_7	30159.1:a_3	23 ± 23 [‡]	93 ± 92 [‡]	RSM+Cx	DC
30159.1:b_7	30159.1:a_4	49 ± 6	82 ± 10	RSM+Cx	PWM
36159.1:b_1	36159.1:a_3	†	†	RSM+Cx	DC
33221.1:d_6	33221.1g S.65	77 ± 8	†	FEM	MMS
33221.1:e_2	33221.1g S.65	45 ± 9	†	RSM-Cx	MMS
33221.1:f_8	33221.1g S.65	60 ± 10	†	RSM+Cx	MMS
‡ Fehlergrenzen zu groß, Angaben daher nicht verwertbar					
† Regelungsausmaß kann nicht berechnet werden, da negative Werte resultieren					

Tab. 3.6.1-1: Übersicht der Messergebnisse von verschiedenen Modellen und Referenzen. Erläuterungen im Text.

Tabelle 3.6.1-1 enthält die zusammengefassten Ergebnisse der Testreihen, die als „mit Regelung“ bekannt sind (linke Spalte). Diese werden mit den als Referenz (2. Spalte) gekennzeichneten Testreihen verglichen. Spalten 3 und 4 enthalten das nach den Formeln (1) bzw. (2) jeweils berechnete Regelungsausmaß. In der fünften Spalte ist die Art des Motors angegeben. Dabei bedeutet RSM = Reihenschlussmotor und FEM = Fremderregter Motor. Cx kommt dabei nur für Reihenschlussmotoren in Frage. Die sechste Spalte enthält die Information, mit welcher Ansteuerung die Referenz betrieben wurde. DC und PWM sind dabei analoge, MMS (= Märklin-Motorola-System) ein digitales System.

Als Basis für eine Beurteilung der hier vorgestellten Schaltung mit Cx dienen zum einen der Umbau auf einen Motor mit Permanentmagneten, wie sie die Testreihen 3000.6:b darstellen, zum anderen mit dem Uhlenbrock 76200-Dekoder, der aus dem Feldmagnet einen unabhängig vom Läufer erregten Magneten macht, was ebenfalls eine Fremderregung bedeutet. Das Ergebnis dieses Umbaus ist in der Testreihe 33221.1:d wiedergegeben. Die Berechnung des Regelungsausmaßes nach Formel (2) bereitet dahingehend Schwierigkeiten, dass die individuelle Schwankung stark variieren kann, selbst mit einem Motor im thermischen Gleichgewicht. Die Toleranzen der Versorgungsspannung beeinflussen dieses Ergebnis zwar, doch sind die Zeitmessungen selbst davon unabhängig. Für die weitere Betrachtung wird die Berechnung nach Formel (1) zu Grunde gelegt. Für die Auswertungen der Modelle 30159 und 36159 ergaben sich einige Besonderheiten, die auf dem im Modell verbauten Motor basieren. Die Spitzenströme können u.U. sehr hoch sein und damit den Dekoder beeinträchtigen, dies

betrifft hauptsächlich das Modell 36159, weil im Originalzustand ein speziell für dieses Modell entwickelter Dekoder benutzt wurde, während nach dem Umbau der selbe Dekoder wie im Modell 30159 eingebaut wurde. Daher sind die Ergebnisse zum Vergleich vor/nach dem Umbau nicht sinnvoll verwendbar. Immerhin zeigt der direkte Vergleich zwischen 36159 und 30159 nach dem Umbau ein nahezu identisches Verhalten. Deshalb ist es ausreichend, wenn im Folgenden nur die Ergebnisse des 30159 nach dem Umbau zur Diskussion benutzt werden.

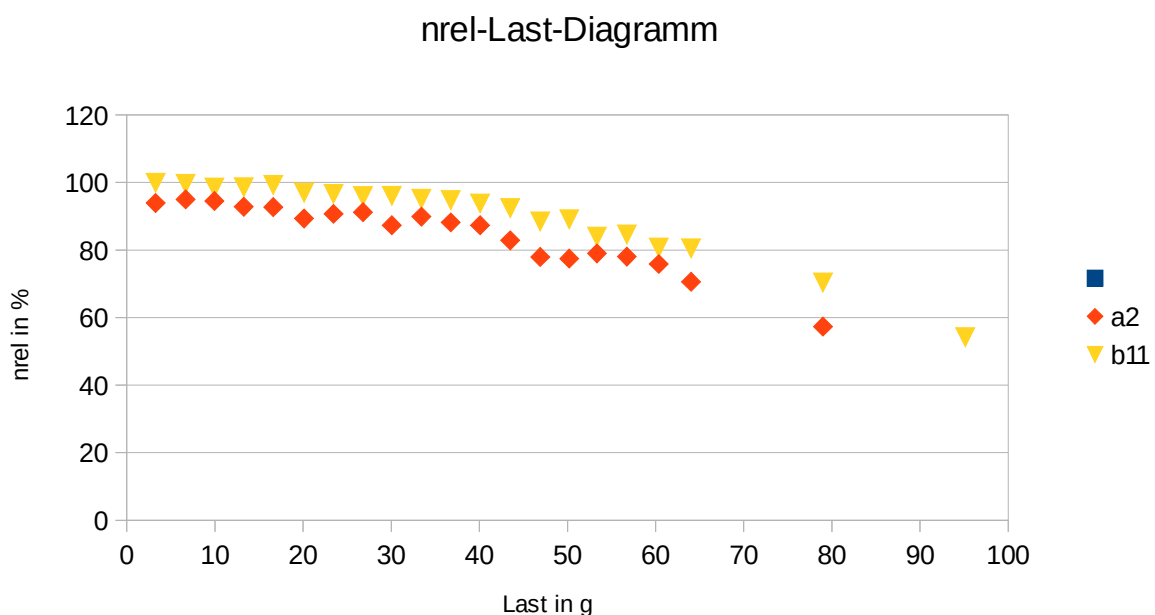
3.6.2. Diskussion der Ergebnisse

Digitaldekoder mit Lastregelung sind für Motoren mit Permanentmagneten (fremderregte Motoren, FEM) ausgelegt und optimiert. Aus diesem Grund ist ein Vergleich mit einem solchen Aufbau unabdingbar, zeigt er doch die Effizienz einer neuen Schaltung im direkten Vergleich zu bekannten Umbaumaßnahmen. Für den reinen Gleichstrommotor interessiert hier, in welchem Maße die Regelung des Dekoders bei ansonsten gleichwertigen Bedingungen (normierte Geschwindigkeit) die Verlangsamung durch eine Last ausgleicht. Für das Modell 3000.6:b sind dies gem. Formel (1) $(83 \pm 6)\%$ was ein guter Wert ist, zumal der Dekoder nicht optimiert ist. Weil die FEM auch mit PWM betrieben werden können und die Ansteuerung im Digitalbetrieb ebenfalls über PWM geschieht, ist zusätzlich noch interessant, in welchem Umfang o.g. Ergebnis auch im Vergleich zur analogen PWM-Ansteuerung erzielt werden kann. In diesem Fall sind dies $(67 \pm 25)\%$. Unter Berücksichtigung der Toleranzen ist das Resultat gleichwertig. Die große Toleranz basiert auf der Differenz zweier ähnlich großer Zahlenwerte. Daher kann an dieser Stelle nicht unterschieden werden; die Wahrscheinlichkeit einer geringeren Effizienz ist jedoch nicht gleich Null.

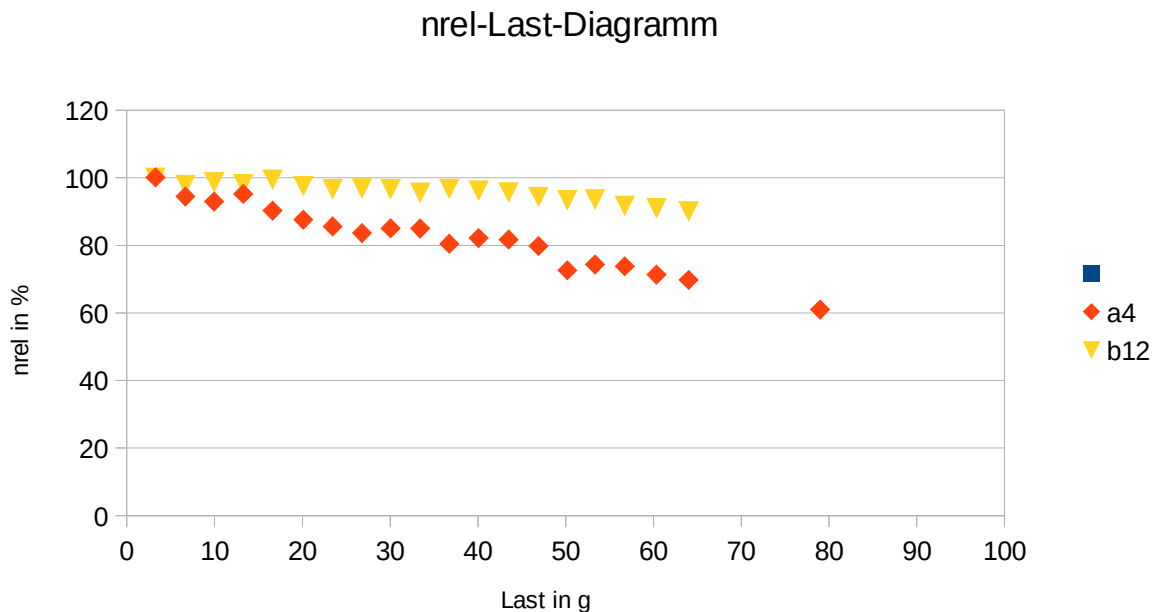
Bei gleichen Bedingungen, nur mit einem Reihenschlussmotor ergeben sich Regelungsausmaße von $(51 \pm 10)\%$ bzw. $(53 \pm 9)\%$ für DC- bzw. PWM-Betrieb.

Im Fall der Reihenschlussmotore (RSM) beim Modell 3000.6:a ist also kein Unterschied zwischen beiden analogen Betriebsarten zu erkennen; die Ergebnisse sind gleichwertig. Betrachtet man nun die Verbesserungen sowohl beim FEM, als auch beim RSM so erhält man folgende Schlussfolgerungen:

Die Regelung mit dem RSM und Cx ist im Vergleich zum FEM nicht so gut, wenn es um den reinen DC-Betrieb geht. Nimmt man als Basis den PWM-Betrieb, so kann aufgrund der Fehlergrenzen nicht zwischen beiden Lösungen in der Effizienz unterschieden werden; sie sind gleichwertig. Damit stellt sich die Frage, welche Leistungsunterschiede im Analogbetrieb zwischen FEM und RSM mit DC bzw. PWM bestehen. Dabei ist zu beachten, dass der FEM aufgrund der nicht vorhandenen Feldspule bei ansonsten gleichen oder gleichwertigen Bedingungen eine größere Umlaufspannung nach der Drehzahlformel hat.



Beim DC-Analogbetrieb ist hier kein signifikanter Unterschied zwischen RSM und FEM erkennbar, wie anhand Abb. 3.6.2-1 zu sehen ist.



Im PWM-Betrieb hingegen sind eindeutige Vorteile für den FEM im getesteten Modell erkennbar. Dies erklärt dann auch das deutlich reduzierte Regelungsausmaß und gleichzeitig die größeren Fehlergrenzen (weil sich die Zahlenwerte der Ergebnisse von analogem PWM-Betrieb und digitalem MMS mit Regelung sehr nahe sind). Vor diesem Hintergrund ist das Regelungsausmaß von ca. 50% zwar wenig für den Umbau des RSM, wenn er mit dem FEM verglichen wird, dennoch ist dies ein recht gutes Ergebnis.

Beim Modell 3021 wurde ohne Cx gemessen, das Regelungsausmaß ist mit 23% signifikant geringer als bei den anderen Modellen, doch wurde hier auch ein anderer Dekoder benutzt der aufgrund anderer Regelungsalgorithmen unterschiedlich reagiert. Daher ist dieses Ergebnis mit Vorsicht zu genießen. Für die Messung mit Cx stand dieser Dekoder nicht mehr zur Verfügung. Mit dem neuen Dekoder Typ Tams LD-G33 wurde ein Regelungsausmaß von $(62 \pm 10)\%$ bezogen auf die Basis 3021.6:e_5 erzielt. Dieses Ergebnis ist wegen des anderen Dekoders ebenfalls mit Vorsicht zu genießen.

Die Modelle 30159 und 36159 sind von der Konstruktion her identisch, lediglich die originale Ausstattung ist unterschiedlich (30159 mit Relais und 36159 mit Digitaldekoder). Der Motor ist ein Spur 0 Motor, welcher aufgrund seiner hohen Stromaufnahme eine Herausforderung für den Dekoder darstellt. Wie bereits in Abschnitt 3.6.1 beschrieben, sind die Resultate fast alle deshalb wenig aussagekräftig. Es bleibt ein einziger Wert: das Regelungsausmaß des umgebauten Modells 30159 mit Referenz des Originals im PWM-Betrieb. Dieses beträgt hier $(49 \pm 6)\%$, was in völliger Übereinstimmung mit den Ergebnissen beim Modell 3000 ist. Ferner sind die Eigenschaften und Leistungen beider umgerüsteter Modelle im Rahmen der Fehlergrenzen identisch, sodass ein weiterer Vergleich nicht notwendig erscheint.

Neben dem möglichen Umbau des RSM mit Hilfe eines Permanentmagneten in einen FEM gibt es von Uhlenbrock^[25] einen Dekoder, der den Feldmagneten in einen unabhängigen vom Läufer angesteuerten Magneten umfunktioniert, womit dieser Umbau

ebenfalls einen FEM darstellt. Bei richtiger Einstellung dieses Dekoders auf den Umbau wird ebenfalls eine bekanntermaßen funktionierende Regelung ermöglicht. Die hier vorgestellte Lösung sollte in ihrer Effizienz auch mit dem UB 76200-Umbau verglichen werden. Dies wurde anhand des Modell 33221 durchgeführt, dessen Originaldekoder gegen den Uhlenbrock bzw. den LRA+ mit Zimo ausgetauscht wurde. Als Referenz wird hier ein LRA+ mit deaktivierter Regelung benutzt, da der Originaldekoder nicht mehr benutzt werden konnte. Die Auswertungen konnten nur anhand Formel (1) durchgeführt werden. Für den UB76200 wurde ein Regelungsausmaß im Digital-MMS-Betrieb von $(77 \pm 8)\%$ berechnet, was einen guten Wert darstellt. Anschließend wurde der LRA ohne Cx gemessen und das berechnete Regelungsausmaß beträgt hier $(45 \pm 9)\%$. Dies ist signifikant weniger als beim Uhlenbrock 76200. Im Vergleich mit den LRA+ (also mit Cx) Messreihen beim Modell 3000 gibt es hier keinen Unterschied im Rahmen der Fehlergrenzen. Dabei ist zu beachten dass die Konstruktionen von 33221 und 3000 sich erheblich unterscheiden. Zum Schluss wurde beim 33221-Modell auch der LRA+ (also mit Cx und erneuter Einstellung des Dekoders) getestet. Das Regelungsausmaß beträgt hier nun $(60 \pm 10)\%$. Aufgrund der Fehlergrenzen ist dies nicht unterscheidbar zum Ergebnis ohne Cx. Die Fehlergrenzen sind jedoch nur deshalb so groß, weil die Einzeltoleranzen relativ groß sind bzw. die Differenzen zwischen Referenz und LRA ohne Cx klein im Vergleich zu den Absolutwerten sind. Zwischen UB76200 und dem LRA+ besteht nun ebenfalls im Rahmen der Fehlergrenzen kein Unterschied mehr.

Fasst man nun die Ergebnisse der Messungen ohne Cx bzw. mit Cx zusammen, so erhält man ein mittleres Regelungsausmaß: ohne Cx $(34 \pm 16)\%$, mit Cx $(56 \pm 6)\%$. Anhand der Toleranzen überschneiden sich die Regelungsausmaße gerade nicht, doch bei der geringen Anzahl von Messungen ohne Cx ist die große Standardabweichung unvermeidlich. Mit einer Reihe weiterer Messungen dürfte diese Unklarheit beseitigt werden. Hinzu kommt noch das Problem der Dekoder, die für FEM optimiert sind, nicht für den LRA. Mit Hilfe anderer Parametereinstellungen ließe sich das Regelungsausmaß genauso beeinflussen, wie durch weitere Änderungen in der Schaltung (z.B: Größe von Cx), da nicht ausgeschlossen werden kann, ob Cx vielleicht zu klein ist.

3.6.3. Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellte Schaltung besitzt ein Potential, welches erst Ansatzweise erkundet ist. Zur Absicherung der hier vorgestellten Ergebnisse sind weitere Testreihen notwendig. Diese können umfassen:

- andere Dekoder
- andere Motoren
- andere Getriebekonstruktionen

Aufgrund des geringen Raumbedarfs dieser Schaltung können selbst kleine Modelle entsprechend umgebaut werden. Vor dem Hintergrund eines gleichmäßigeren und damit ruhigeren Laufs, sind bei den Konstruktionen mit Trommelkollektormotor Umbauten mit dem fünfpoligen, analogen Motor („FDCM“, 610030) von Interesse.

Im Hinblick auf die Langsamfahreigenschaften, die außerhalb einer Leistungsmessung liegen, sind ebenfalls Verbesserungsmöglichkeiten vorhanden; obwohl diese Schaltung bereits die kleinstmögliche Geschwindigkeit gegenüber dem Originalzustand in den meisten Fällen erheblich reduziert, wie ein Blick in die Tabellen des Anhangs zeigt. Dies alles ist vor dem Hintergrund der programmierbaren Dekoder eine Frage der richtigen Einstellung der jeweiligen CV-Werte.

An der Schaltung selbst, sind ebenfalls Weiterentwicklungen denkbar, die auf eine Verstärkung der induzierten Spannung oder einer besseren Pufferung dieser Spannung hinauslaufen. Diese Änderungen betreffen:

- Vergrößerung von C_x
- Vergrößerung von $C1/C2$
- Reihenschaltung der Feldspulen und damit Verdoppelung des Erregerfelds

Große Kapazitäten bei $C1$ und $C2$ zeigten Probleme bei Zimo-Dekodern auf, indem dann kein Fahrtrichtungswechsel im reinen Digital-DCC-Betrieb mehr möglich ist, wenn der Motor bereits gelaufen ist. Es ist nicht auszuschließen, dass bei anderen Dekodern ähnliche Probleme auftreten können.

Abschließend könnte noch der Einfluss von C_x auf das Regelungsverhalten untersucht werden, wenn dieser nicht direkt mit dem Motorschild verbunden ist, sondern zwecks Filterung der hochfrequenten PWM-Anteile in Reihe mit einer Drossel geschaltet wird.

4. Messreihen

4.1 Zugmassen der benutzten Wagen ^{[1] S. 26}

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 4.1-1: berechnete Fahrwiderstandsmassen der angehängten Wagen

4.2 Messungen am Modell 3000

Die getesteten Modelle sind im Internet verfügbar ^[22]. Alle eindeutig gekennzeichneten Messreihen haben folgenden Aufbau:

xxxxx.x:y_z. Hierbei bedeuten xxxxx.x die Katalognummer einschließlich der gängigen Versionsnummer nach Koll ^[23]; y ist ein Buchstabe, der verschiedene Testexemplare unterscheidet und z ist die Testreihennummer mit der das getestete System unterschieden wird. Die Messreihen sind zur besseren Übersicht nach steigender Eintragsnummer geordnet. Die in dieser Arbeit untersuchte Schaltung wird mit LRA+ in der Beschreibung bezeichnet.

a) 3000.6:a_2 (Analog DC mit Relais)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	93,9	94,97	94,48	92,78	92,70	89,32	90,68	91,20	87,31
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	89,89	88,17	87,31	82,87	77,94	77,44	78,99	78,05	75,86
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	70,60	57,32	19,08						

Tabelle 4.2-a1: relative Drehzahlen unter Last 12VDC, 3000.6:a_2

U in V	7,12	7,59	7,96	8,50	9,25	9,92	10,71
n in Hz	48,3	63,4	70,0	82,9	96,9	114,4	121,5
U in V	11,41	12,49	13,17	13,98	14,63	15,31	
n in Hz	133,5	147,3	160,0	173,5	173,5	178,7	

Tabelle 4.2-a2: nU-Werte im Leerlauf DC-analog, 3000.6:a_2

Toleranzen: Spannung 0,8%; Zeit 1,61%

b) 3000.6:a_4 (Analog PWM mit Relais)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100,1	94,44	92,97	95,22	90,28	87,59	85,58	83,65	85,04
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	84,99	80,45	82,15	81,71	79,80	72,61	74,33	73,81	71,33
Nr.	19	20							
n _{rel}	69,77	60,98							

Tabelle 4.2-b1: relative Drehzahlen unter Last PWM-analog 18V/6,63kHz, 3000.6:a_4

FS von 14	7	8	9	10	11	12	13
n in Hz	83,0	102,8	123,8	135,8	148,0	167,6	181,6
FS von 14	14						
n in Hz	189,4						

Tabelle 4.2-b2: nU-Werte im Leerlauf PWM-analog, 3000.6:a_4

Toleranzen: Spannung 0,91%; Zeit 1,51%

c) 3000.6:b_11 (HAMO Analog DC mit Zimo MX634R)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,87	99,62	98,48	98,58	99,27	96,96	96,59	95,97	96,00
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	95,12	94,78	93,78	92,38	88,46	89,09	83,98	84,57	80,74
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	80,48	70,37	54,13						

Tabelle 4.2-c1: relative Drehzahlen unter Last 12VDC, 3000.6:b_11

U in V	7,95	8,76	9,77	10,34	11,08	11,55	12,63
n in Hz	23,5	46,0	87,8	112,9	146,6	172,8	190,0
U in V	13,17	13,56	14,48	15,01			
n in Hz	190,2	198,6	199,0	210,1			

Tabelle 4.2-c2: nU-Werte im Leerlauf DC-analog, 3000.6:b_11

Toleranzen: Spannung 1,65%; Zeit 1,01%

d) 3000.6:b_12 (HAMO Analog PWM mit Zimo MX634R)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100,08	97,92	98,72	98,15	99,49	97,58	96,66	96,88	96,66
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	95,64	96,77	96,29	95,75	94,40	93,43	93,67	91,75	91,03
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	90,12	76,50	62,66						

Tabelle 4.2-d1: relative Drehzahlen unter Last FS7 PWM, 3000.6:b_12

FS	4	5	6	7	8	9	10
n in Hz	33,5	73,2	136,7	178,8	214,4	227,4	231,1
FS	11	12	13	14			
n in Hz	242,6	257,2	268,3	271,1			

Tabelle 4.2-d2: nU-Werte im Leerlauf PWM-analog, 3000.6:b_12

Toleranzen: Spannung 0,77%; Zeit 1,70%

e) 3000.6:b_13 (HAMO Digital MMS mit Zimo MX634R, Zentrale Tams Easy Control/B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,50	99,57	99,21	99,08	99,01	98,81	99,01	98,88	98,73
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	98,73	98,11	98,11	98,13	97,82	97,91	97,57	97,24	97,03
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	96,71	91,32	83,44						

Tabelle 4.2-e1: relative Drehzahlen unter Last FS7 MMS/Tams, 3000.6:b_13

FS	2	3	4	5	6	7	8
n in Hz	15,5	31,9	47,9	66,9	99,2	130,4	168,8
FS	9	10	11	12	13	14	
n in Hz	215,5	250,9	253,9	250,5	245,5	237,6	

Tabelle 4.2-e2: nU-Werte im Leerlauf MMS/Tams, 3000.6:b_13

Toleranzen: Spannung 1,00%; Zeit 0,10%

f) 3000.6:d_5 (LRA+ Digital MMS mit Zimo MX634R, Zentrale Tams Easy Control/B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,53	99,32	99,62	99,35	98,91	98,00	97,32	96,75	96,46
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	95,05	93,73	91,51	91,10	91,77	89,77	88,52	86,72	85,88
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	85,72	75,99	63,99						

Tabelle 4.2-f1: relative Drehzahlen unter Last FS7 MMS/Tams, 3000.6:d_5

FS	2	3	4	5	6	7	8
n in Hz	30,0	38,1	45,4	51,9	60,6	68,1	75,1
FS	9	10	11	12	13	14	
n in Hz	86,3	96,5	112,9	126,3	139,5	146,4	

Tabelle 4.2-f2: nU-Werte im Leerlauf MMS/Tams, 3000.6:d_5

Toleranzen: Spannung 1,00%; Zeit 0,71%

4.3 Messungen am Modell 3021

Bedeutung der Schreibweisen wie in Abschnitt 4.2 erklärt.

a) 3021.6:b_3 (Analog DC mit Relais)

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 4.3-a1: 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 4.3-a2: nU-Werte im Leerlauf DC analog, 3021.6:b_3

Toleranzen: Spannungen 1,06%; Zeiten 2,32%

b) 3021.6:b_4 (Analog PWM mit Relais)

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 4.3-b1: 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 4.3-b2: nU-Werte im Leerlauf, PWM-analog, 17,5V/6,63 kHz; 3021.6:b_4

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

c) 3021.6:e_2 (Digital MMS mit LRA und Kuehn T-125; Zentrale Tams Easy Control/B4)

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 4.3-c1: 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 4.3-c2: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:e_2

Toleranzen: Spannung 1%; Zeiten 1,3%

d) 3021.6:e_5 (Analog DC mit LRA und Kuehn T-125; Zentrale Tams Easy Control/B4)

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	77,8	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 4.3-d1: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 20V 3021.6:e_5

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

Tabelle 4.3-d2: nU-Werte im Leerlauf 3021.6:e_5

Toleranzen: Spannung 1%; Zeiten 1,3%

e) 3021.6:f (Digital mit LRA+, Tams LD-G33, Digital MMS Easy Control/B4)

Zum direkten Vergleich zwischen der Schaltung mit und ohne Cx wurde das Modell 3021.6 nach der CV-Einstellung gem. Abschnitt 3.2.3 einem Lasttest bei drei verschiedenen Werten unterzogen: n₀=100% (s=0,27%); n₉=94,13% (s=0,29%); n₁₉=88,47% (s=0,85%). Der Kuehn-Dekoder stand nicht mehr zur Verfügung.

4.4 Messungen an den Modellen 30159 und 36159

a) 30159.1:a_3 (Analog DC mit Relais)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100,09	91,92	104,12	104,79	104,46	105,62	102,18	100,61	97,79
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	98,42	94,77	93,61	91,46	90,20	88,04	86,41	85,19	82,85
Nr.	19	20	21	22	23	24			
n _{rel}	81,75	81,31	71,90	65,91	57,61	47,21			

Tabelle 4.4-a1: relative Drehzahlen unter Last 12VDC, 30159.1:a_3

U in V	10,52	11,24	11,93	12,31	13,16	13,55	14,35
n in Hz	42,6	70,6	89,8	95,1	108,8	115,7	121,4
U in V	14,63	14,78					
n in Hz	123,8	127,5					

Tabelle 4.4-a2: nU-Werte im Leerlauf DC-analog, 30159.1:a_3

Toleranzen: Spannung 1,24%; Zeit 4,73%

b) 30159.1:a_4 (Analog PWM mit Relais)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,88	96,74	93,83	94,66	92,57	90,38	90,98	89,49	87,41
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	86,41	84,10	83,62	81,83	81,23	79,47	78,69	75,85	74,32
Nr.	19	20	21	22	23				
n _{rel}	71,70	69,52	63,76	61,93	53,84				

Tabelle 4.4-b1: relative Drehzahlen unter Last PWM-analog 16,6V/6,63kHz, 30159.1:a_4

FS von 14	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	56,3	86,1	120,3	141,6	159,1	167,9	183,3

Tabelle 4.4-b2: nU-Werte im Leerlauf PWM-analog, 30159.1:a_4

Toleranzen: Spannung 0,96%; Zeit 1,88%

c) 30159.1:b_7 (Digital MMS mit LRA+, Zimo MX632R, Tams Easy Control/B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	99,93	98,11	98,18	97,44	96,9	95,71	96,04	91,98	92,15
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	91,33	91,22	90,81	89,20	88,85	88,12	86,72	86,67	86,00
Nr.	19	20	21	22	23				
n _{rel}	85,56	79,67	75,47	73,82	64,02				

Tabelle 4.4-c1: relative Drehzahlen unter Last MMS-Digital, 30159.1:b_7

FS von 14	2	3	4	5	6	7	8
n in Hz	22,0	37,3	54,3	72,8	86,5	103,7	136,7
FS von 14	9	10	11	12	13	14	
n in Hz	156,2	183,3	190,9	196,7	200,6	208,9	

Tabelle 4.4-c2: nU-Werte im Leerlauf MMS-Digital, 30159.1:b_7

Toleranzen: Spannung 1,00%; Zeit 0,34%

d) 36159.1:a_3 (Analog DC mit 6080-Dekoder)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	98,67	98,05	97,74	98,98	98,29	97,35	96,20	94,93	94,31
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	92,37	92,27	91,41	90,94	89,29	87,18	85,89	84,54	81,77
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	81,08	76,43	60,54						

Tabelle 4.4-d1: relative Drehzahlen unter Last PWM-analog 17,4V/6,63kHz, 36159.1:a_3

U in V	9,65	10,52	11,33	12,19	12,65	13,18	13,71	14,17
n in Hz	60,2	82,8	100,8	124,9	136,7	149,7	153,8	161,7
U in V	14,81	14,88						
n in Hz	168,3	169,5						

Tabelle 4.4-d2: nU-Werte im Leerlauf PWM-analog, 36159.1:a_3

Toleranzen: Spannung 0,98%; Zeit 1,97%

e) 36159.1:a_4 (Analog PWM mit 6080)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100,31	98,40	98,22	99,15	97,95	95,50	96,46	95,67	95,79
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	94,97	94,04	93,69	93,36	91,22	92,43	93,61	90,99	88,34
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	88,82	77,57	63,95						

Tabelle 4.4-e1: relative Drehzahlen unter Last PWM-analog 17,4V/6,63kHz, 36159.1:a_4

FS von 14	7	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	78,4	96,3	116,3	129,2	135,5	164,5	173,0	180,0

Tabelle 4.4-e2: nU-Werte im Leerlauf PWM-analog, 36159.1:a_4

Toleranzen: Spannung 0,98%; Zeit 1,97%

f) 36159.1:a_5 (Digital MMS mit 6080, Tams Easy Control/B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	93,56	91,25	96,20	102,91	102,30	99,58	99,43	97,67	97,75
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	97,52	95,69	93,83	94,86	93,69	94,79	95,00	95,24	95,00
Nr.	19	20	21						
n _{rel}	94,72	80,06	48,81						

Tabelle 4.4-f1: relative Drehzahlen unter Last MMS-Digital 19,7V; Tams EC/B4/6173, 36159.1:a_5

FS von 14	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	42,3	72,3	102,4	123,1	137,6	152,0	158,7	163,8	169,4	174,4	179,4

Tabelle 4.4-f2: nU-Werte im Leerlauf MMS-Digital 19,7V; Tams EC/B4/6173, 36159.1:a_5

Toleranzen: Spannung 1,00%; Zeit 0,79%

g) 36159.1:b_1 (Digital MMS mit LRA+ und Zimo MX632R, Tams Easy Control/B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100	100,37	98,39	97,38	95,63	94,85	95,22	95,22	95,79
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	94,97	94,59	93,78	91,97	91,22	89,53	88,63	88,31	87,12
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	86,86	84,96	74,98	66,42	59,73	42,77			

Tabelle 4.4-g1: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 19,7V 36159.1:b_1

FS von 14	1	2	3	4	5	6	7
n in Hz				36,8	57,0	72,2	89,5
FS von 14	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	108,0	152,8	152,8	153,8	154,1	155,1	155,9

Tabelle 4.4-g2: nU-Werte im Leerlauf 36159.1:b_1

Toleranzen: Spannung 1%; Zeiten 1,23%

h) 36159.1:b_5 (Analog DC mit LRA+ und Zimo MX632R)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100,29	100,6	99,86	97,95	97,11	97,17	97,11	93,26	94,70
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	92,75	91,18	90,20	90,74	89,18	87,71	86,26	83,78	84,68
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	85,65	69,12	54,51						

Tabelle 4.4-g1: relative Drehzahlen unter Last Analog DC bei 12V 36159.1:b_5

U in V	10,31	10,90	11,74	11,82			
n in Hz	68,5	78,9	103,1	104,2			

Tabelle 4.4-g2: nU-Werte im Leerlauf 36159.1:b_5

Toleranzen: Spannung 1%; Zeiten 1,23%

4.5 Messungen am Modell 33221

a) 33221.1:d_6; (Digital MMS mit UB 76200, Tams Easy Control/B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100	99,83	99,70	99,53	99,02	98,87	98,39	98,20	98,63
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	98,20	97,73	97,80	95,99	93,98	93,09	90,67	90,78	91,45
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	90,94	91,33	89,87	87,32	85,26	79,01	78,44	73,74	72,74
Nr.	28	29							
n _{rel}	67,48	51,00							

Tabelle 4.5-a1: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 20V 33221.1:d_6

FS von 14	2	3	4	5	6	7	8
n in Hz	24,5	41,5	58,3	73,2	86,6	105,0	123,6
FS von 14	9	10	11	12	13	14	
n in Hz	132,8	146,1	165,1	176,8	188,5	207,3	

Tabelle 4.5-a2: nU-Werte im Leerlauf 33221.1:d_6

Toleranzen: Spannung 1%; Zeiten: 1,18%

b) 33221.1:e_2 (Digital MMS mit LRA und Zimo MX 632R, Tams Easy Control + B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100	98,48	97,81	98,15	96,33	95,93	95,02	93,55	92,44
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	91,82	90,69	89,88	88,36	87,11	86,36	84,55	82,78	81,60
Nr.	19	20	21	22	23	24	25		
n _{rel}	81,20	79,54	74,49	70,83	67,41	64,14	51,94		

Tabelle 4.3-b1: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 20V 33221.1:e_2

FS von 14	1	2	3	4	5	6	7
n in Hz	39,8	64,2	73,6	84,8	96,2	122,6	145,9
FS von 14	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	176,7	191,8	197,9	204,5	204,6	208,4	205,5

Tabelle 4.3-b2: nU-Werte im Leerlauf 33221.1:e_2

Toleranzen: Spannung: 1%; Zeiten 0,76%

c) 33221.1:f_8 (Digital MMS mit LRA+, Zimo MX634R, Tams Easy Control + B4)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n _{rel}	100	99,62	98,27	98,10	98,02	96,96	96,28	95,52	93,25
Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n _{rel}	91,60	90,53	91,06	90,91	90,84	89,72	88,99	87,92	87,00
Nr.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
n _{rel}	85,77	85,02	79,18	62,86					

Tabelle 4.5-c1: relative Drehzahlen unter Last Digital bei 19,9V **Lastwerte nicht im Internet verfügbar!**

FS von 14	1	2	3	4	5	6	7
n in Hz		23,1	39,1	63,0	84,8	108,8	120,1
FS von 14	8	9	10	11	12	13	14
n in Hz	121,3	120,7	121,9	123,0	123,7	122,8	122,3

Tabelle 4.5-c2: nU-Werte im Leerlauf 33221.1:f_8

Toleranzen: Spannung 1%; Zeiten 1,23%

d) 33221.1:g (Digital MMS mit LRA+, Zimo MX634R, deaktivierte Regelung, sonst wie c))

Zum direkten Vergleich ohne Regelung wurde mit den selben Einstellungen außer CV58=0 ein kurzer Lasttest durchgeführt. Da das Modell mit FS7/14 nicht befriedigend betrieben werden konnte, musste FS 14/14 benutzt werden.

$n_0=100\%$ ($s=0,23\%$); $n_9=78,96\%$ ($s=1,03\%$); $n_{19}=62,69\%$ ($s=0,77\%$)

Erläuterungen in Abschnitt 3.5.4 (S. 47).

5. Schrifttum

- [1] Stephan-Alexander Heyn, „Regelung mit Reihenschlußmotoren“, 01.01.2013
- [2] Thomas Horstmann, persönliche Mitteilung
- [3] H. Häberle et al., „Fachkunde Informationselektronik“, Verlag Europa-Lehrmittel, Wuppertal 1984, ISBN 3-8085-3231-9
- [4] Friedrich Franz Mertens „Physikalisch-Technische Elektrizitätslehre“, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1927
- [5] F. Sass, Ch. Bouche, A. Leitner, „Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau“ 12. Auflage, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg Neudruck 1963
- [6] Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen, „Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau“ 21. Auflage 2005, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3-540-22142-5
- [7] Ralf Kories, Heinz Schmidt-Walter, "Taschenbuch der Elektrotechnik" 9. korrigierte Auflage 2010, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, ISBN 978-3-8171-1858-8
- [8] Holger Lutz, Wolfgang Wendt "Taschenbuch der Regelungstechnik" 8. ergänzte Auflage 2010, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, ISBN 978-3-8171-1859-5
- [9] Holger Lutz, Wolfgang Wendt "Taschenbuch der Regelungstechnik", 9. ergänzt Auflage 2012, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, ISBN 978-3-8171-1895-3
- [10] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, „Optimum Settings for Automatic Controllers“, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, November 1942, S. 759-765
- [11] Mohammad Shahrokhi, Alireza Zomorodi, „Comparison of PID Controller Tuning Methods“, Proceedings of 8th National Iranian Chemical Engineering Congress; 2002 Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- [12] Astrom K,J, T. Hagglund; "PID controllers Theory, Design and Tuning ",2nd edition, Instrument Society of America,1994
- [13] Luyben W.L, M.L. Luyben; "Essentials of Process Control", McGraw-Hill,1997
- [14] Wiedergabe der Vorschrift mit freundlicher Genehmigung von H-J. Mauser unter <http://www.stummiforum.de/viewtopic.php?f=103&t=48853>
- [15] Bedienungsanleitung Tams LD-G33
- [16] Bedienungsanleitung Zimo 20.01.2013
- [17] Horst Ludwig, „Mathematische Grundlagen für Pharmazeuten“, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, 1987
- [18] Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig "Taschenbuch der Mathematik" 6. Auflage, Verlag Harri Deutsch 2006, ISBN 978-3-8171-2016-1
- [19] Horst Stöcker et al. "Taschenbuch der Physik" 5. Auflage, Verlag Harri Deutsch 2005, ISBN 978-3-8171-1721-3
- [20] Horst Rinne, "Taschenbuch der Statistik" 4. vollständig überarbeitete Auflage Verlag Harri Deutsch 2008, ISBN 978-3-8171-1827-4
- [21] DIN 1319-1 bis 4
- [22] http://www.sheyn.de/Modellbahn/mb_loktests/ (17.09.2013 14:38) in den verschiedenen Unterverzeichnissen mit Auswahltabellen (Ult, Wirkungsgrade, Drehzahlen) und automatischer Diagrammerzeugung
- [23] Kolls Preiskatalog, umfangreiche Beschreibung der Märklin H0-Modelle. Jährlich neu aufgelegt.
- [24] Alfred Ruland, "Küster; Thiel - Rechentafeln für die chemische Analytik", 105. Auflage, de Gruyter Verlag Berlin - New York 2002, ISBN 3-11-017566-5
- [25] Bedienungsanleitung Uhlenbrock 76200