

1	ZIELSTELLUNG	2
2	EINLEITUNG	2
3	VERSUCHSVORBEREITUNG	3
3.1	MODELL DES FREMDERREGTEN GLEICHSTROMNEBENSCHLUßMOTORS.....	3
3.1.1	<i>Erstzuschaltbild</i>	3
3.1.2	<i>Übertragungsfunktionen</i>	4
3.2	EINSCHLEIFIGE DREHZAHLREGELUNG	6
3.2.1	<i>Verhalten des unregulierten Motors</i>	6
3.2.2	<i>Einschleifiger Drehzahlregler</i>	7
3.3	ANKERSTROMREGELUNG.....	9
3.3.1	<i>Vorüberlegungen</i>	9
3.3.2	<i>Übertragungsfunktion</i>	9
3.3.3	<i>Ankerstromregler nach Reinisch</i>	10
3.4	DREHZAHLREGELUNG MIT UNTERLAGERTER ANKERSTROMREGELUNG.....	12
3.4.1	<i>Übertragungsfunktion</i>	12
3.4.2	<i>Drehzahlregler nach Reinisch</i>	12
4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	14
4.1	THYRISTORSTELLER	14
4.1.1	<i>Statische Kennlinie des Ankers mit Thyristorsteller</i>	14
4.1.2	<i>Sprungantwort und Einfluss der Glättung</i>	15
4.1.3	<i>Dynamisches Verhalten des unregulierten Motors</i>	15
4.2	STROMREGELKREIS.....	16
4.3	DREHZAHLREGLER MIT UNTERLAGERTEM ANKERSTROMREGLER	17
5	AUSWERTUNG	18

Matthias Löffelholz

1 Zielstellung

Elektrische Antriebe sind für die Automatisierungstechnik unverzichtbare Anlagenteile. Die Drehzahlregelung ist ein mehrschleifiger Regelkreis mit einer unterlagerten Ankerstromregelung. Stromregelung, Drehzahlregelung und eine übergeordnete Lageregelung zusammen, stellen im Rahmen der Automatisierungstechnik einen wesentlichen Anteil in mechatronischen Anwendungen dar. Die Beurteilung des dynamischen Verhalten eines geregelten Gleichstrommotors ist Inhalt dieses Versuches.

2 Einleitung

Ausgehend vom mechanischen Aufbau des fremderregten Gleichstromnebenschlußmotors werden über die spezifischen Motorengleichungen die Differentialgleichungen der elektrischen sowie mechanischen Teilsysteme hergeleitet. Diese werden mittels Laplace-Transformation in die Blockdarstellung überführt. Die innere Reibung wird ebenfalls berücksichtigt. Aus dieser Blockstruktur des Motors werden dann Teilübertragungstrecken extrahiert. Diese Ersatzregelstrecken dienen als Grundlage für den jeweiligen Reglerentwurf. Es werden der einschleifige Drehzahlregler sowie der Drehzahlregler mit unterlagerter Ankerstromregelung untersucht. Sämtliche errechneten Reglerparameter werden mittels einer Simulation auf Funktionalität getestet. Kritische Simulationsergebnisse werden im entsprechenden Diagramm hervorgehoben.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden die zuvor errechneten und simulierten Werte im Labor durch eine Messreihe überprüft. Die Versuchsdurchführung gliedert sich in die statische sowie dynamische Betrachtung der Komponenten.

3 Versuchsvorbereitung

3.1 Modell des fremderregten Gleichstromnebenschlusstromotors

3.1.1 Erststzschaltbild

Prinzipieller Aufbau

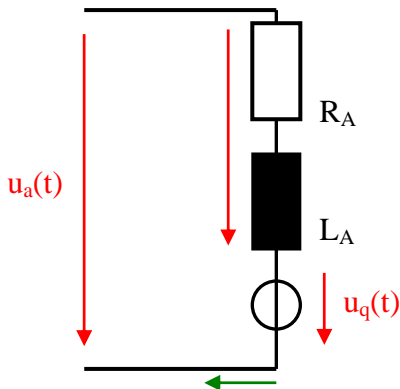
Motorengleichungen:

$$u_q(t) = c\Phi * \omega(t)$$

$$M(t) = c\Phi * i_A(t)$$

$$c\Phi = \text{konstant}$$

Ankerstromkreis G_A



$$i_A(t)R_A + L \frac{di_A(t)}{dt} = u_A(t) - u_q(t)$$

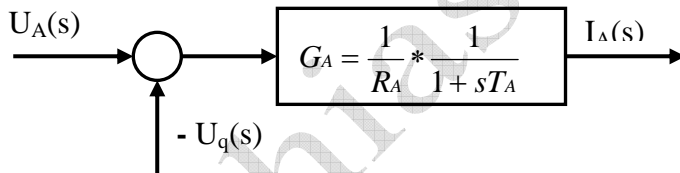
$$I_A(s)R_A + sLI_A(s) = U_A(s) - U_q(s)$$

$$G_A(s) = \frac{I_A(s)}{U_A(s) - U_q(s)} = \frac{1}{R_A} * \frac{1}{1 + sT_A}$$

$$\text{mit: } T_A = \frac{L_A}{R_A}$$

$$T_A = 1.5 \text{msek}$$

Blockbild:



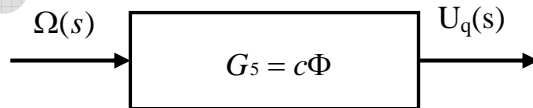
Ankerrückwirkung: G₅

$$u_q(t) = c\Phi * \omega(t)$$

$c\Phi$: magnetischer Fluß

$$G_5(s) = \frac{U_q(s)}{\Omega(s)} = c\Phi$$

Blockbild:



$$c\Phi = 1.3 \text{Vs}$$

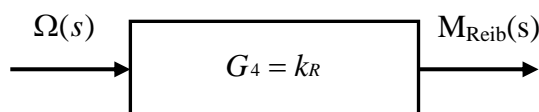
Reibung G₄

$$M_{\text{Reib}}(t) = k_R * \omega(t)$$

k_R : Reibungswert

$$M_{\text{Reib}}(s) = k_R * \Omega(s)$$

Blockbild:



$$k_R = 0.0036 \frac{\text{Nm}}{1/s}$$

Rotor G₂

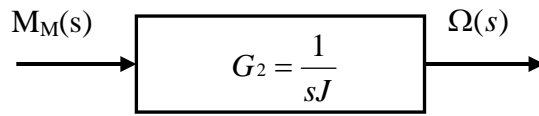
$$M_M(t) = J * \frac{d\omega(t)}{dt}$$

J : Massenträgheit des Motors

$$M_M(s) = sJ * \Omega(s)$$

$$G_2(s) = \frac{\Omega(s)}{M_M(s)} = \frac{1}{sJ}$$

Blockbild:



$$J = 0.015 \text{kgm}^2$$

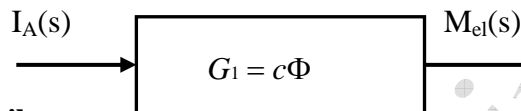
Lorenzkraft G₁

$$M_{el}(t) = c\Phi * i_A(t)$$

$$M_{el}(s) = c\Phi * I_A(s)$$

$$G_1(s) = \frac{M_{el}(s)}{I_A(s)} = c\Phi$$

Blockbild:

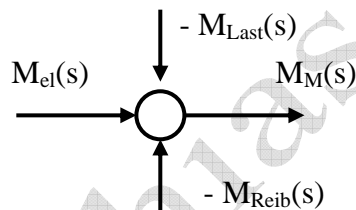


Drehmomentenbilanz

erzeugtes Drehmoment = Lastmoment + Reibmoment + Motormoment

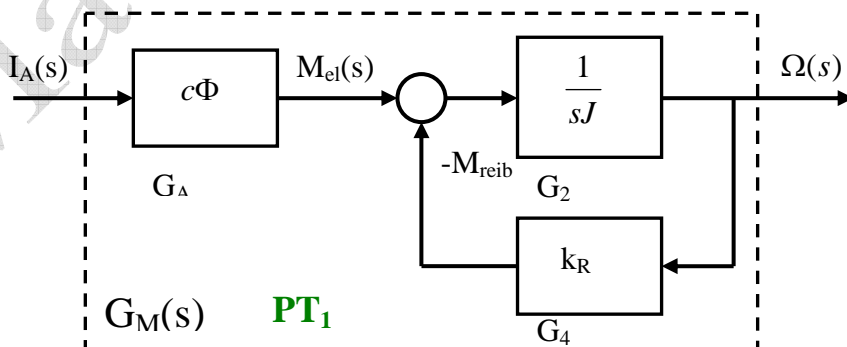
$$m_{el}(t) = m_{Last}(t) + m_{Reib}(t) + m_M(t)$$

Blockbild:



3.1.2 Übertragungsfunktionen

Der mechanischen Komponenten:

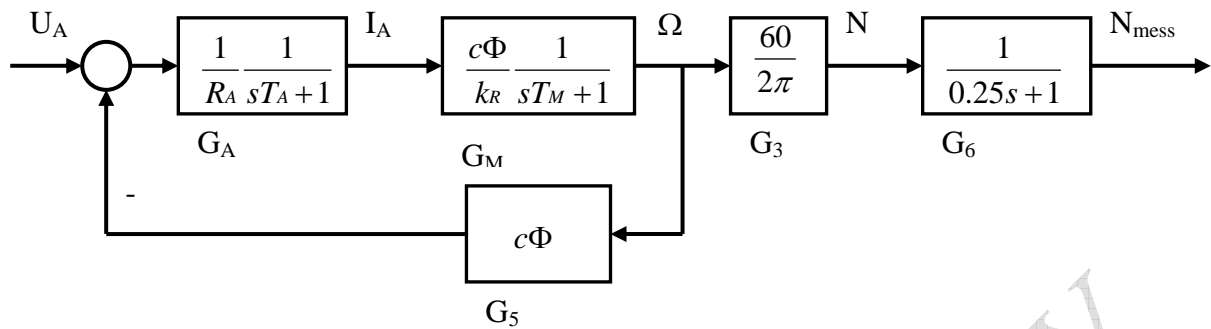


$$G_M(s) = \frac{\Omega(s)}{I_A(s)} = \frac{c\Phi}{sJ + k_R} = \frac{c\Phi}{k_R} * \frac{1}{sT_M + 1}$$

mit $T_M = \frac{J}{k_R}$

$$T_M = 4.167 \text{sek}$$

Des gesamten Motors:



$$G_{UN} = \frac{N(s)}{U_A(s)} = \frac{60}{2\pi} \frac{c\Phi}{k_R} \frac{1}{R_A} \frac{1}{(sT_A+1)(sT_M+1) + \frac{(c\Phi)^2}{k_R R_A}}$$

$$G'_{U'N'} = \frac{N_{mess}(s)}{U_{Astell}(s)} = \frac{60}{2\pi} \frac{c\Phi}{k_R} \frac{K}{R_A} \frac{1}{(sT_A+1)(sT_M+1) + \frac{(c\Phi)^2}{k_R R_A}} \frac{1}{0.25s+1}$$

Vereinfachung:

Da $1.5\text{ms} = T_A \ll T_M = 4.167\text{sek}$ wird T_A vernachlässigt. (→ Annahme: G_A hat P-Verhalten)

Es folgt:

$$G'_{U'N'} = \frac{N_{mess}(s)}{U_{Astell}(s)} = \frac{60}{2\pi} \frac{c\Phi}{k_R} \frac{K}{R_A} \frac{1}{sT_M+1 + \frac{(c\Phi)^2}{k_R R_A}} \frac{1}{0.25s+1}$$

$$G'_{U'N'ers} = \frac{N_{mess}(s)}{U_{Astell}(s)} = \frac{60K}{2\pi} \frac{c\Phi}{(c\Phi)^2 + k_R R_A} \frac{1}{k_R R_A} \frac{1}{sT_M+1} \frac{1}{0.25s+1}$$

$$G'_{U'N'ers} = \frac{N_{mess}(s)}{U_{Astell}(s)} = \frac{257.6}{(1.245s+1)(0.25s+1)} \frac{1/\text{min}}{\text{V}}$$

3.2 Einschleifige Drehzahlregelung

3.2.1 Verhalten des unregelmotors

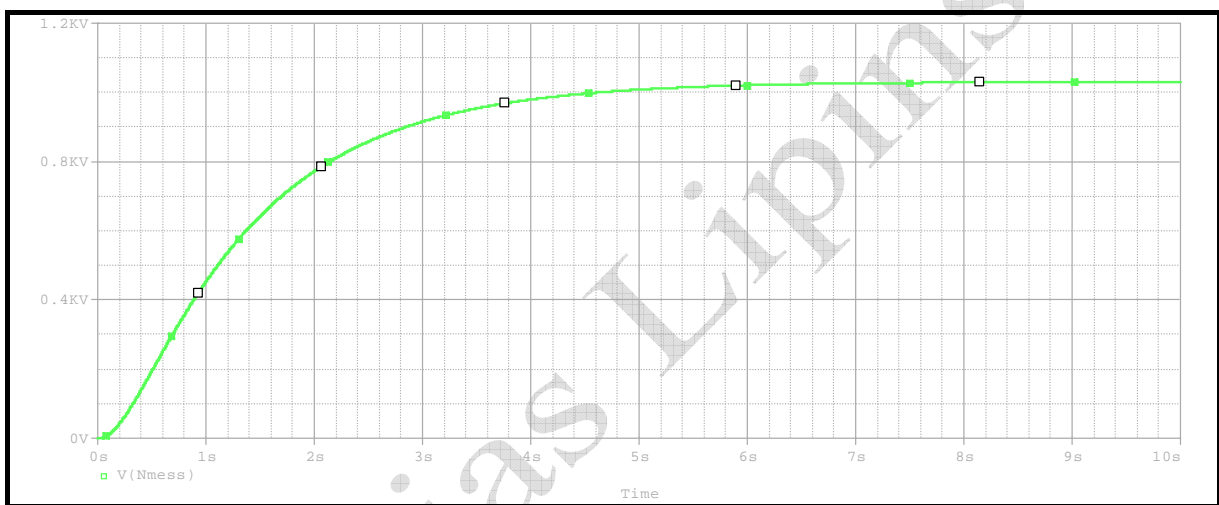
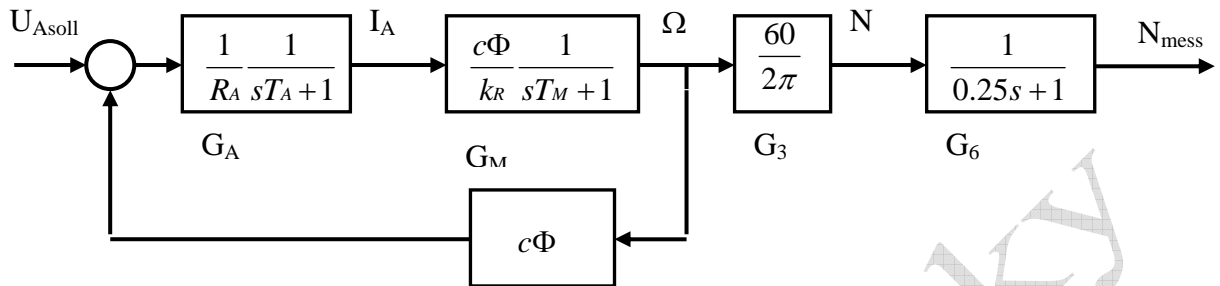


Abbildung 1: Sprungantwort $N_{\text{mess}}(t)$ bei $U_{\text{Asoll}}(t) = 4V * \epsilon(t)$

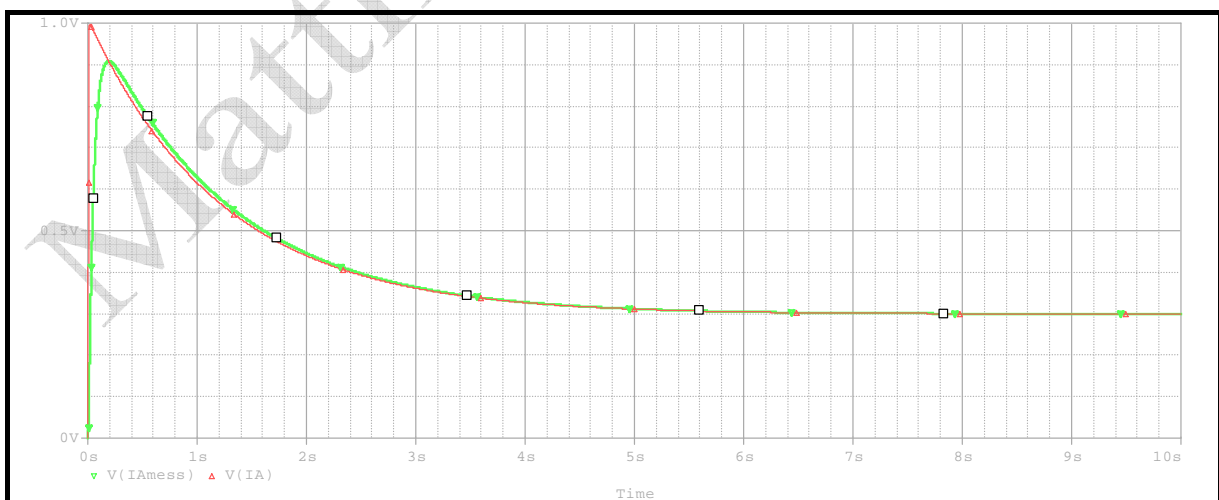
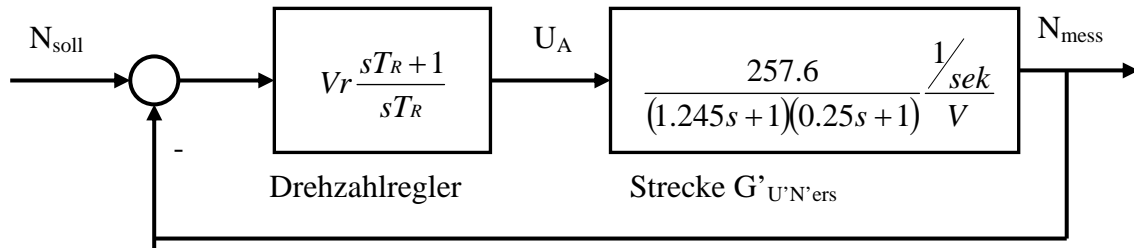


Abbildung 2: Sprungantwort $I_{\text{Amess}}(t)$ und $I_A(t)$ bei $U_{\text{Asoll}}(t) = 4V * \epsilon(t)$

3.2.2 Einschleifiger Drehzahlregler



für $dh=5\% \rightarrow a=2$:

$$G_0 = V_R \frac{1.245s + 1}{1.245s} \frac{257.6}{(1.245s + 1)(0.25s + 1)} = \frac{1}{2 * 0.25s * (0.25s + 1)}$$

$$\underline{V_R = 9.67 * 10^{-3} \text{ V} * \text{min}^{-1}}$$

$$\underline{T_R = 1.245 \text{ sek}}$$

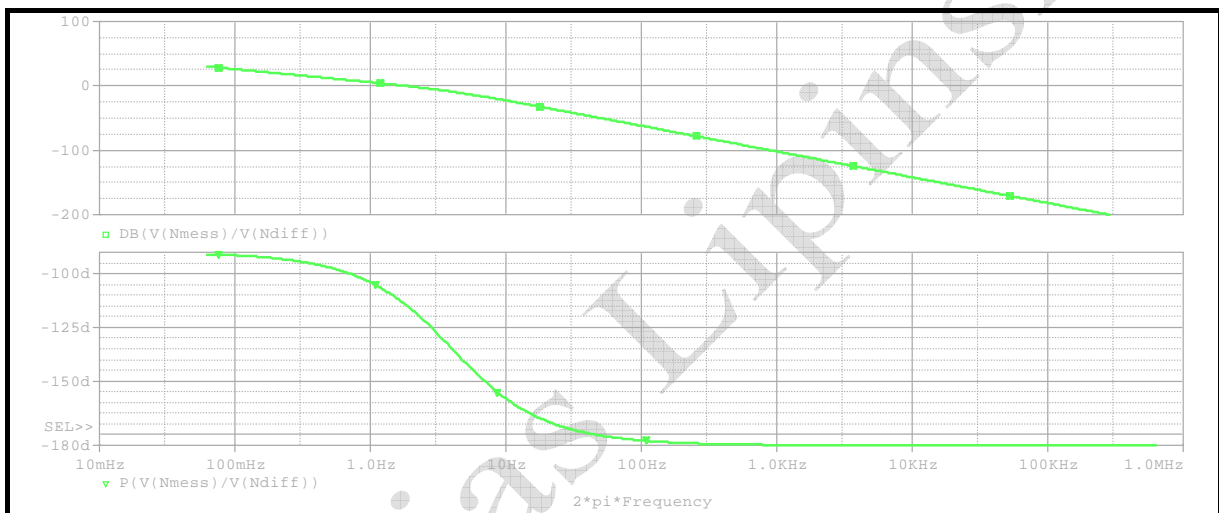


Abbildung 3: Bodediagramm des einschleifigen Regelkreises

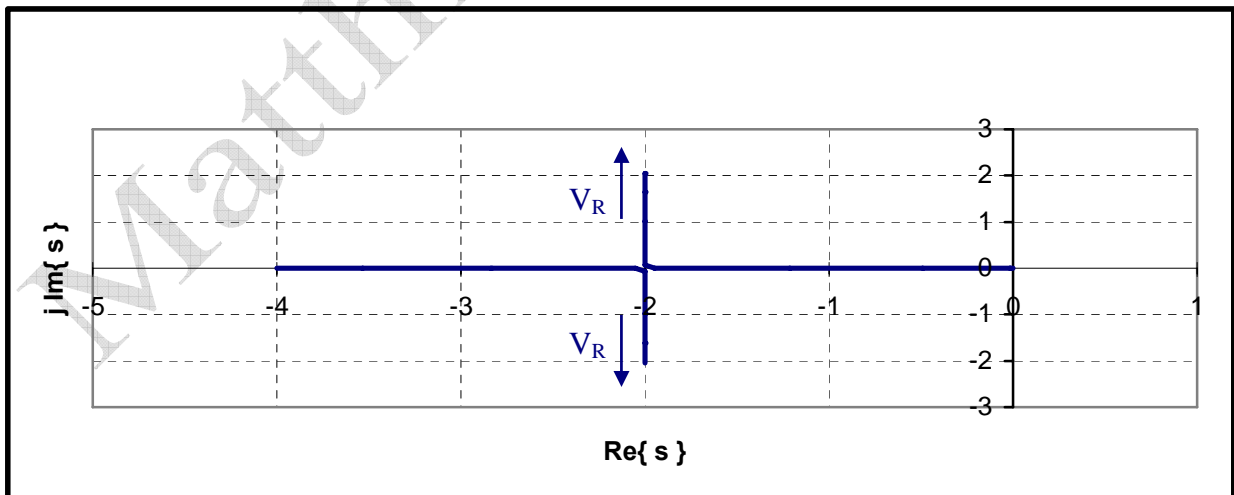


Abbildung 4: Wurzelortskurve des einschleifigen Regelkreises

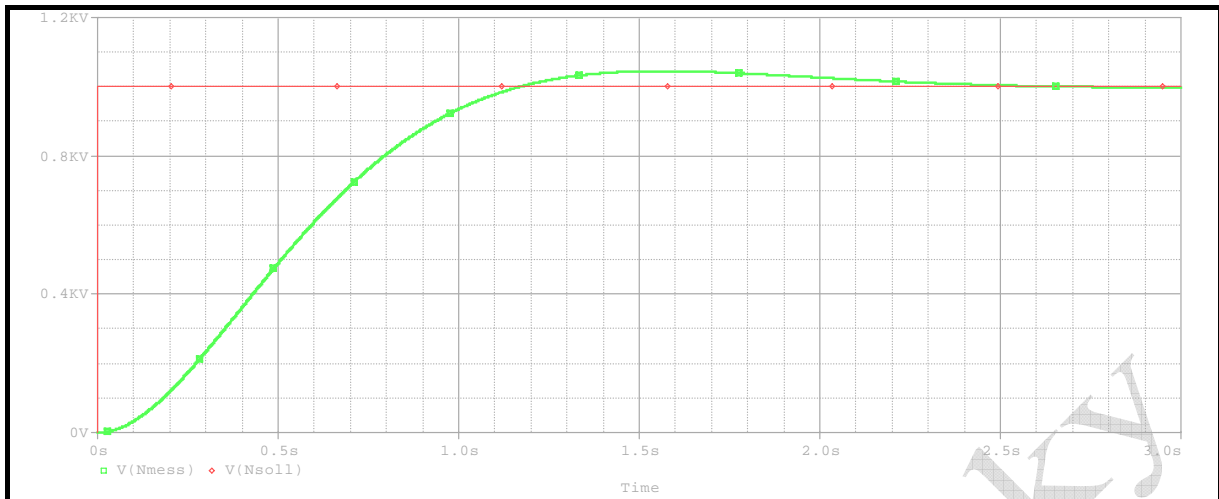


Abbildung 5: Sprungantwort von $N_{\text{mess}}(t)$ bei $N_{\text{sol}}(t)=1000[\text{min}^{-1}] * \epsilon(t)$

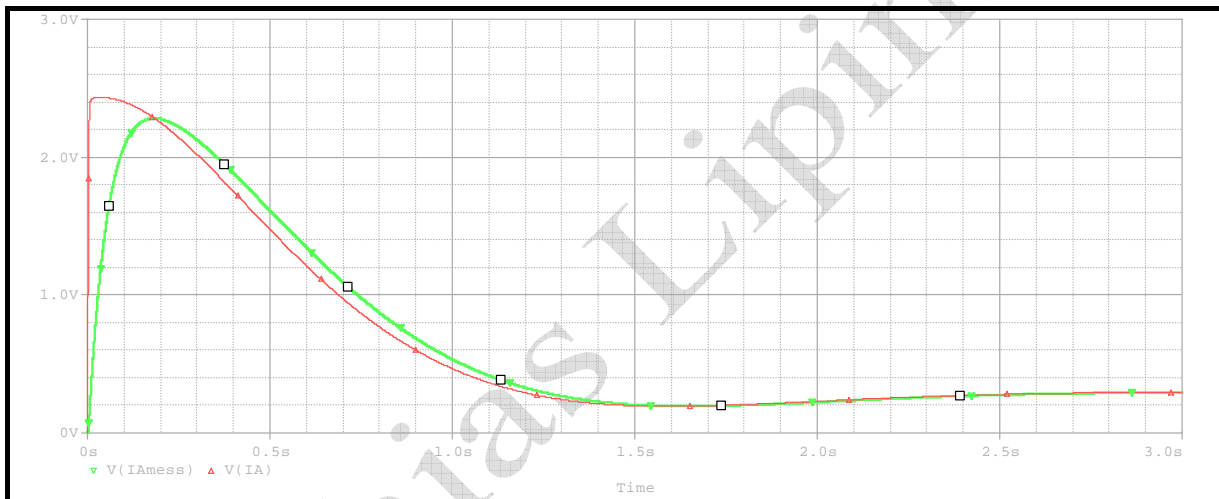


Abbildung 6: Sprungantwort von $I_{A\text{mess}}(t)$ und $I_A(t)$ bei $N_{\text{sol}}(t)=1000[\text{min}^{-1}] * \epsilon(t)$

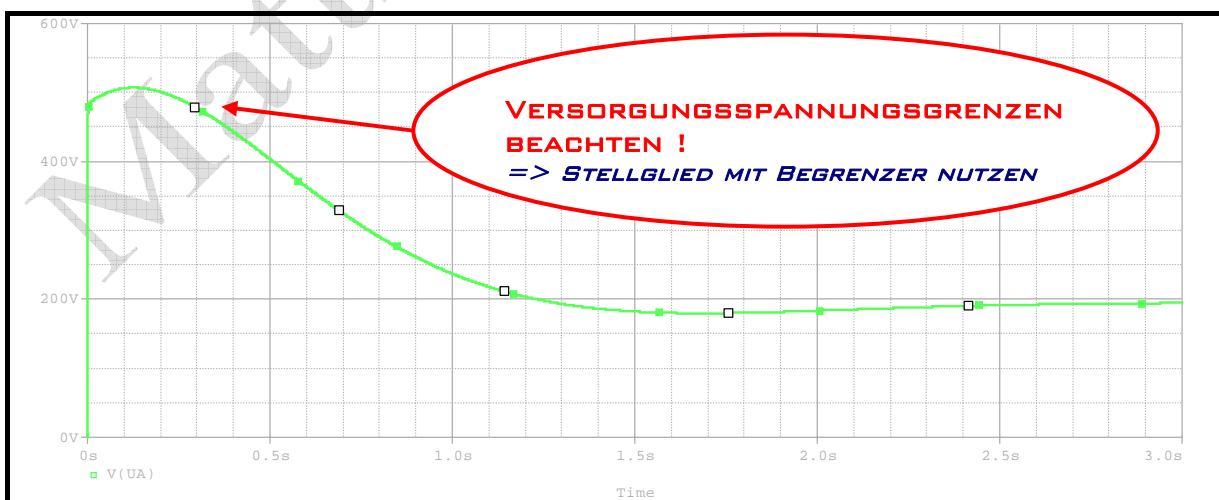
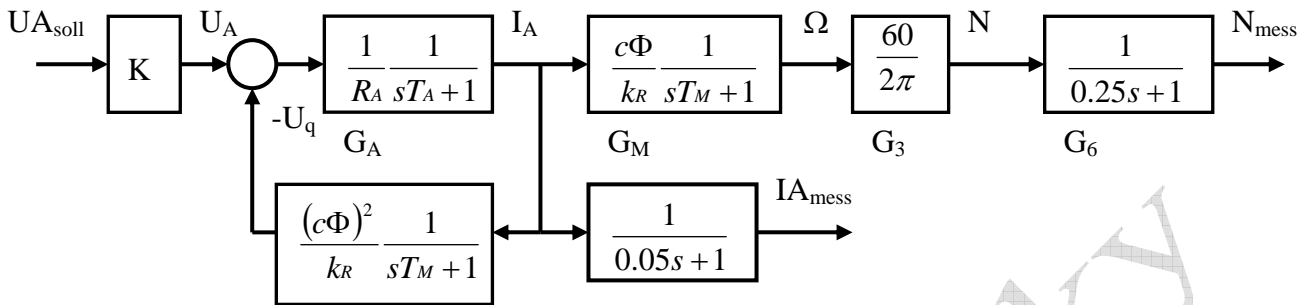


Abbildung 7: Sprungantwort von $U_A(t)$ bei $N_{\text{sol}}(t)=1000[\text{min}^{-1}] * \epsilon(t)$

3.3 Ankerstromregelung

3.3.1 Vorüberlegungen



$$G'_{U'I'} = \frac{I_{Amess}}{U_{Asoll}} = \frac{K}{R_A} \frac{1}{sT_A + 1} \frac{1}{0.05s + 1}$$

Da $T_A \ll T_M$ ist, kann die Gegenkopplung vernachlässigt werden. Diese kann aufgrund der großen Zeitkonstante als statische Störung aufgefasst werden, welche der schnelle Stromregler ausregelt.

3.3.2 Übertragungsfunktion

$$G_{U'I'E} = \frac{0.25 \text{ A/V}}{(0.0015s + 1)(0.05s + 1)}$$

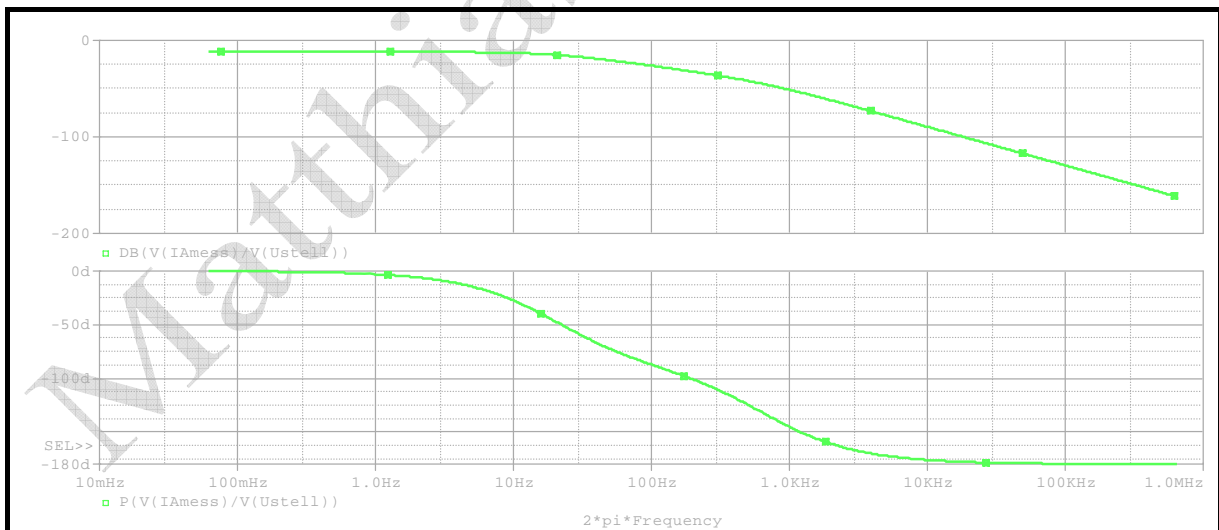
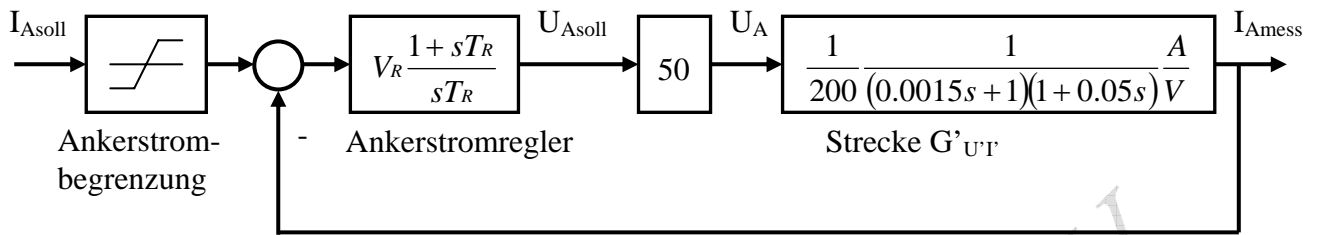


Abbildung 8: Bodediagramm der Ankerwicklung

3.3.3 Ankerstromregler nach Reinisch



für $dh=5\% \rightarrow a=2$:

$$G_0 = V_R \frac{0.05s + 1}{0.05s} \frac{1/200}{(0.0015s + 1)(0.05s + 1)} = \frac{1}{2 * 0.0015s * (0.0015s + 1)}$$

$$\underline{V_R = 66.67 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}}$$

$$\underline{T_R = 0.05 \text{ sek}}$$

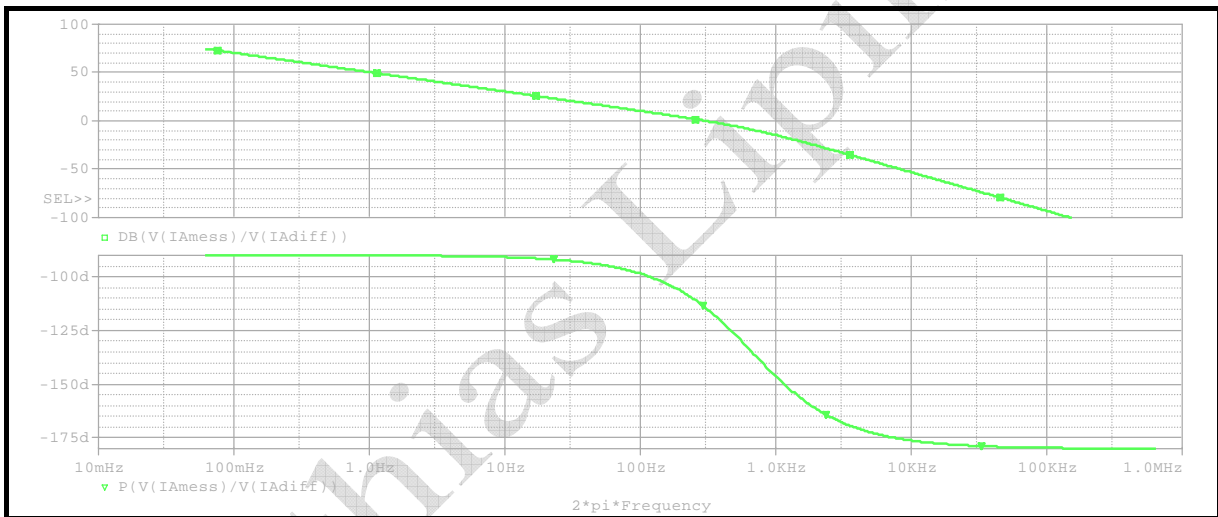


Abbildung 9: Bodediagramm des Ankerstromregelkreises

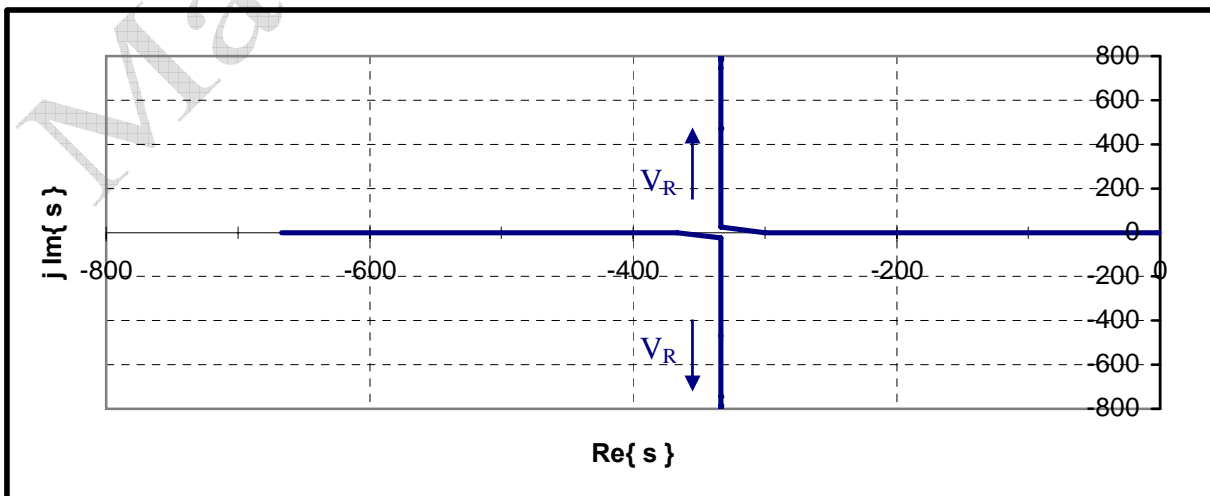


Abbildung 10: Wurzelortskurve des geschlossenen Regelkreises

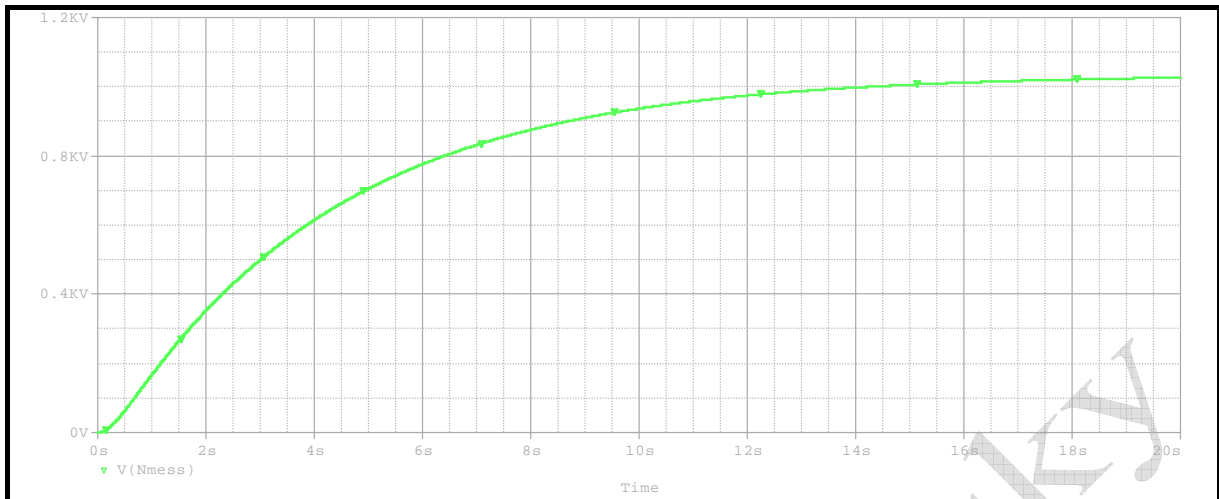


Abbildung 11: Sprungantwort von $N_{\text{mess}}(t)$ bei $I_{\text{Asoll}}(t)=0.3A * \epsilon(t)$

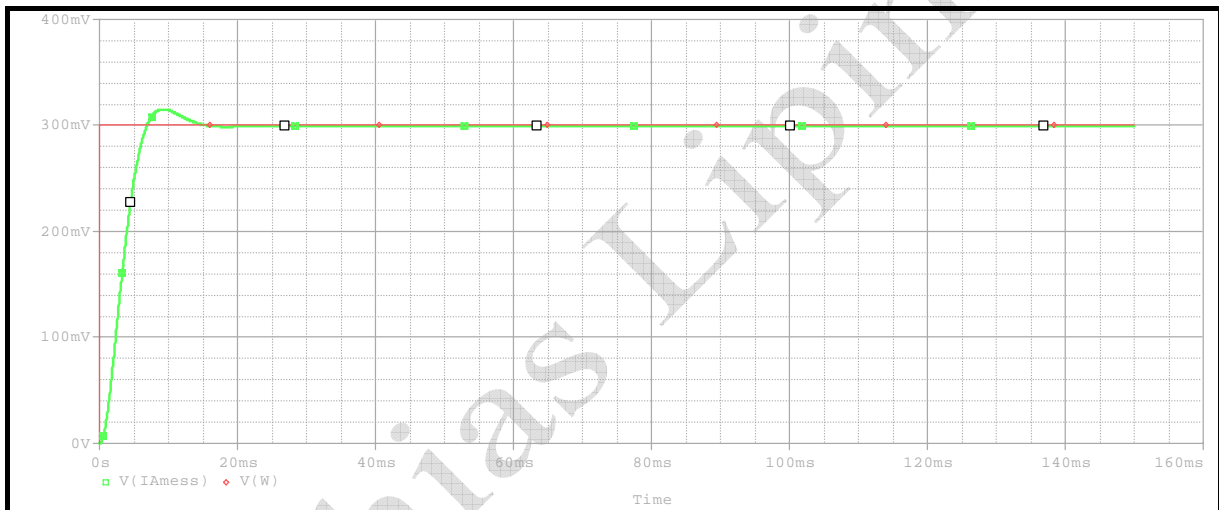


Abbildung 12: Sprungantwort von $I_{\text{Amess}}(t)$ bei $I_{\text{Asoll}}(t)=0.3A * \epsilon(t)$

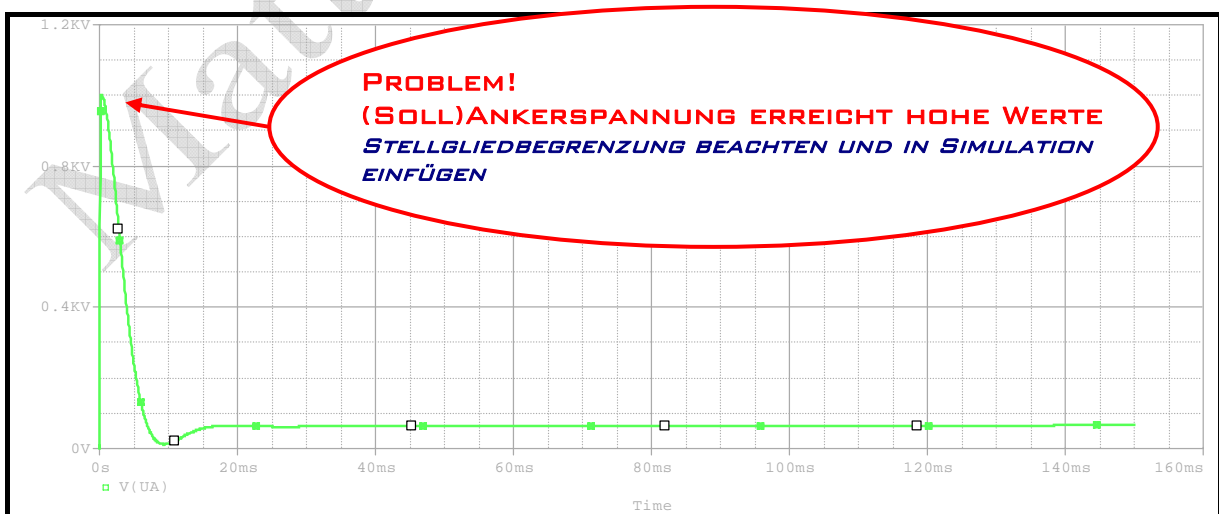
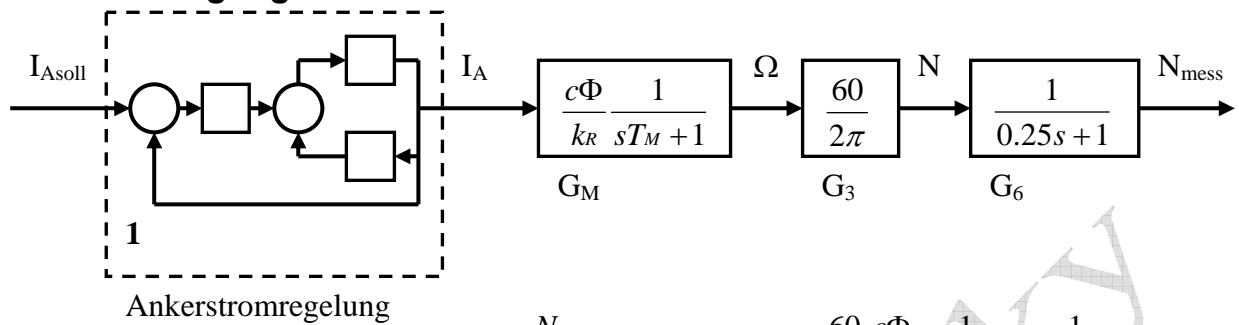


Abbildung 13: Sprungantwort von $U_A(t)$ bei $I_{\text{Asoll}}(t)=0.3A * \epsilon(t)$

3.4 Drehzahlregelung mit unterlagerter Ankerstromregelung

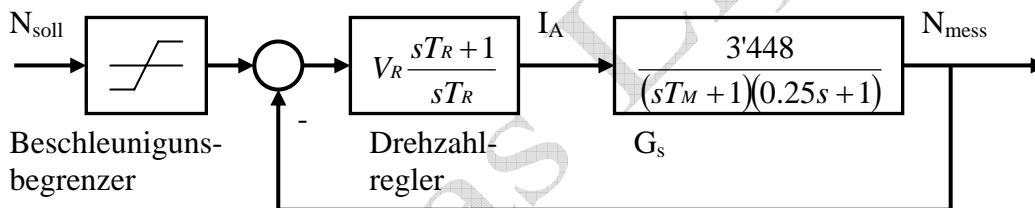
3.4.1 Übertragungsfunktion



$$G_S = \frac{N_{mess}}{I_{Asoll}} = G_3 * G_M * G_6 = \frac{60}{2\pi} \frac{c\Phi}{k_R} \frac{1}{sT_M + 1} \frac{1}{0.25s + 1}$$

$$\frac{60}{2\pi} \frac{c\Phi}{k_R} = 3'448 \frac{1/sek}{A} \quad T_M = 4.167sek$$

3.4.2 Drehzahlregler nach Reinisch



für dh=5% → a=2:

$$G_0 = V_R \frac{4.167s + 1}{4.167s} \frac{3'448}{(4.167s + 1)(0.25s + 1)} = \frac{1}{2 * 0.25s * (0.25s + 1)}$$

$$\underline{V_R = 2.417 * 10^{-3} \text{ A} * \text{min}^{-1}}$$

$$\underline{T_R = 4.167 \text{ sek}}$$

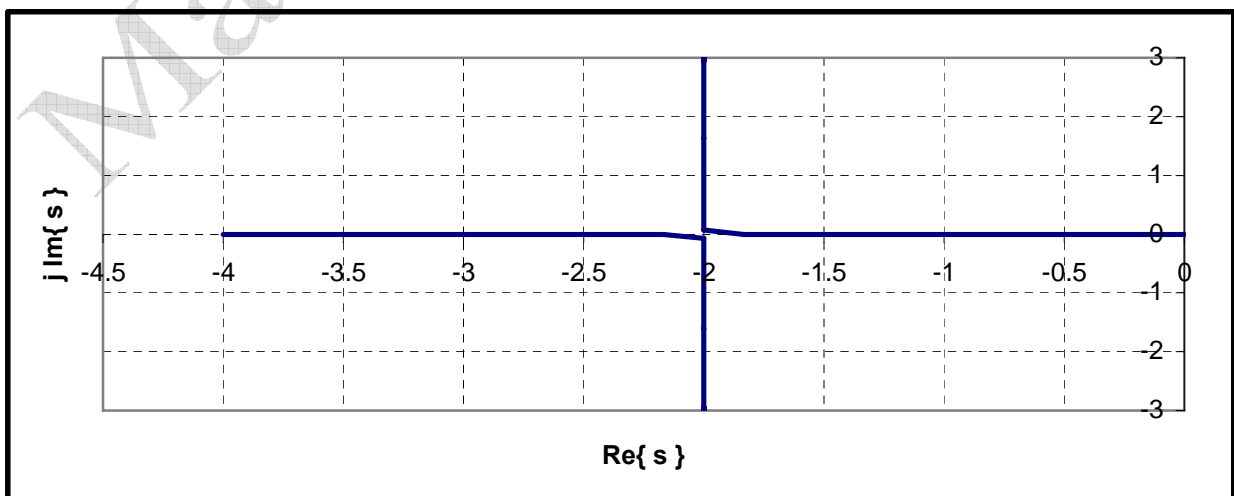


Abbildung 14: Wurzelortskurve des geschlossenen Regelkreises

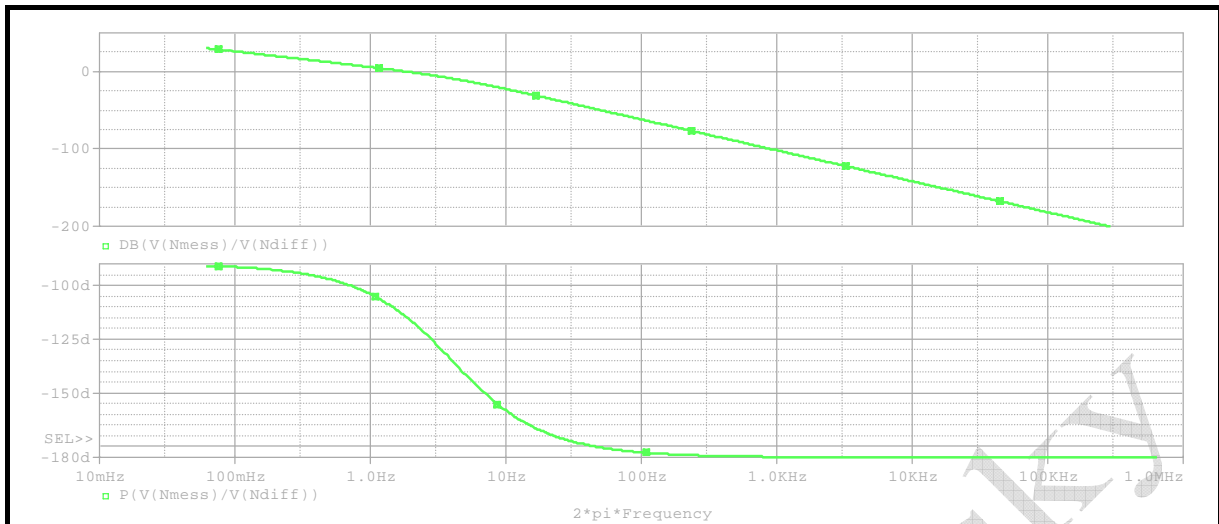


Abbildung 15: Bodediagramm des kaskadierten Drehzahlregelkreises

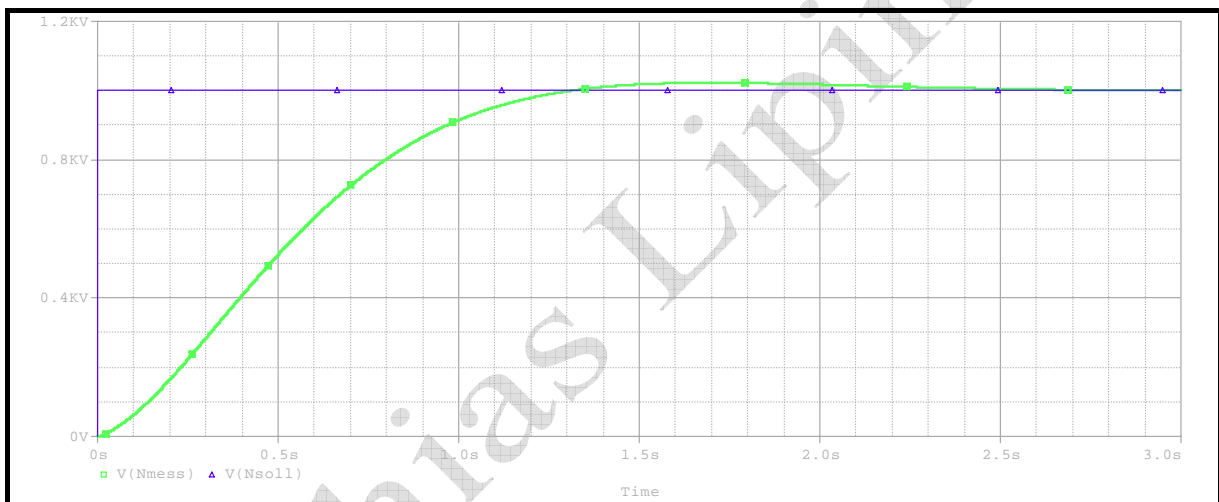


Abbildung 16: Sprungantwort von $N_{mess}(t)$ bei $N_{soll}(t)=1000[\text{min}^{-1}] * \epsilon(t)$

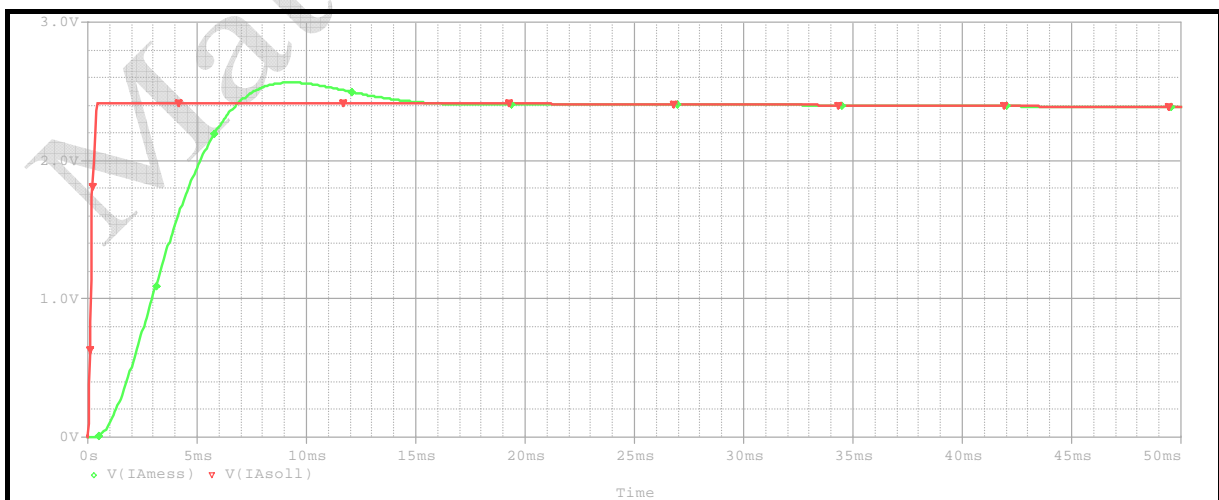


Abbildung 17: Sprungantwort von $I_{Amess}(t)$ und $I_{Asoll}(t)$ bei $N_{soll}(t)=1000[\text{min}^{-1}] * \epsilon(t)$

4 Versuchsdurchführung

4.1 Thyristorsteller

4.1.1 Statische Kennlinie des Ankers mit Thyristorsteller

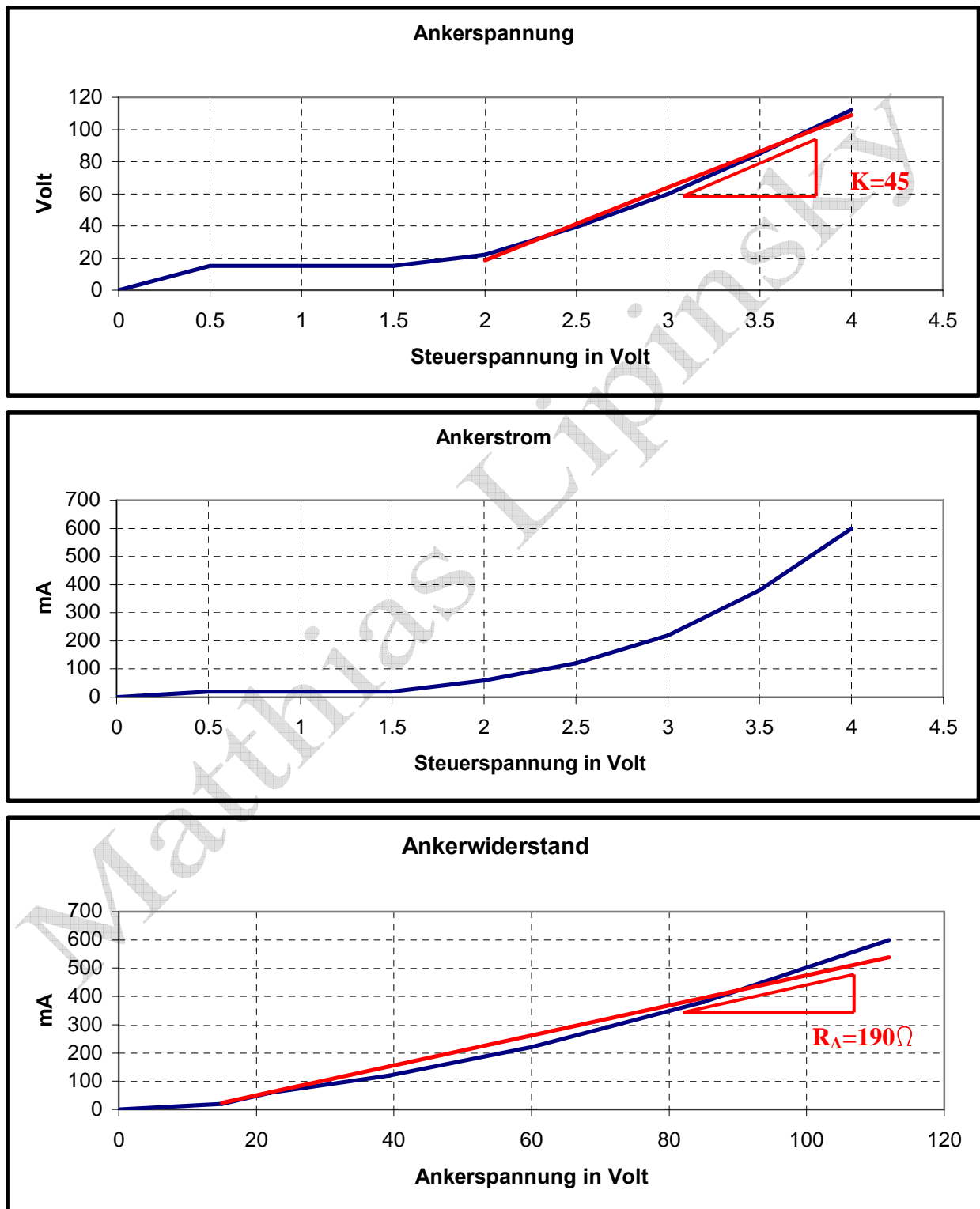


Abbildung 18: gemessene statische Kennlinien

4.1.2 Sprungantwort und Einfluss der Glättung

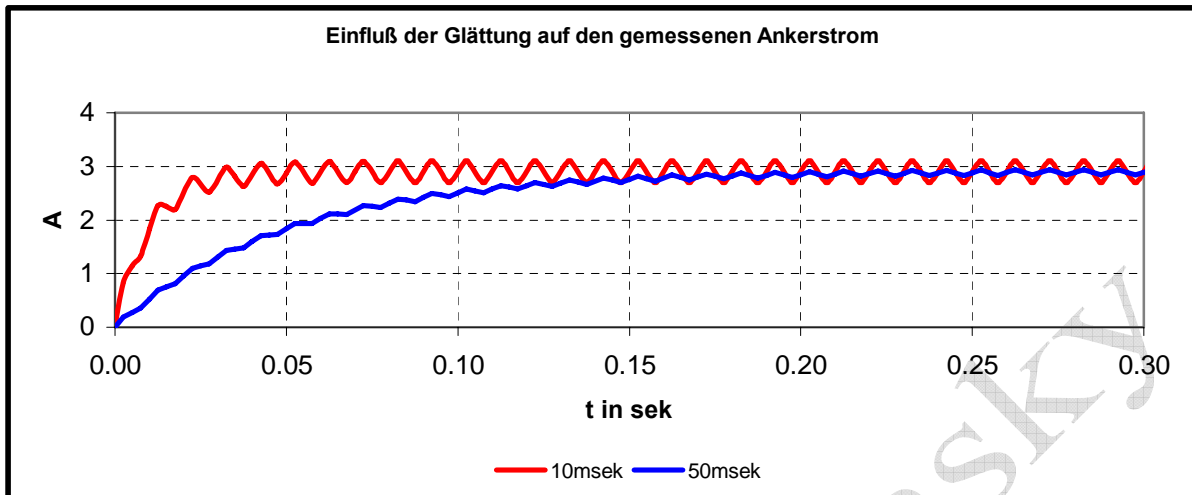


Abbildung 19: Kennlinien zum Einfluss der Glättungszeitkonstanten

4.1.3 Dynamisches Verhalten des unregulierten Motors

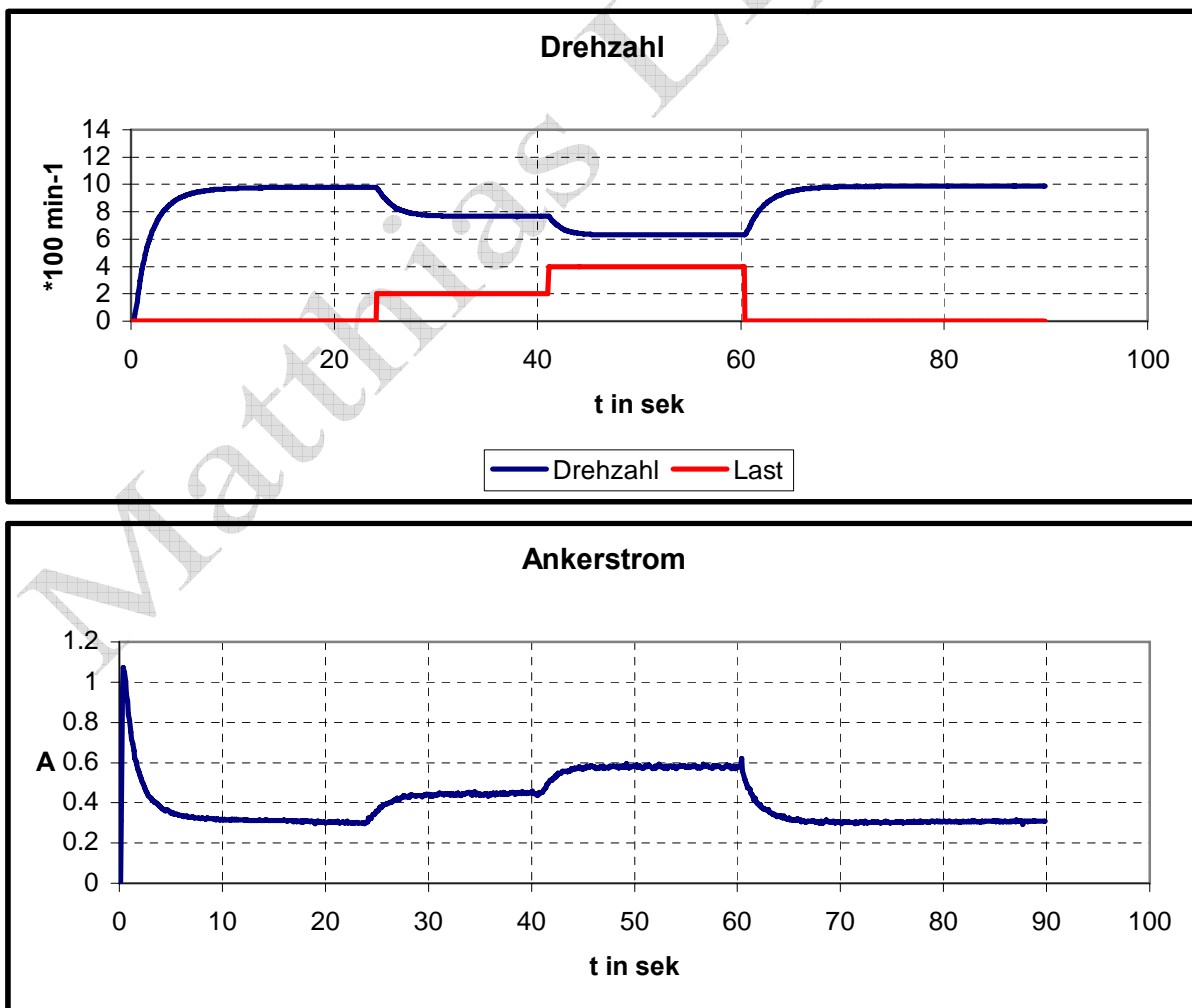


Abbildung 20: Kennlinien zum unregulierten Verhalten

4.2 Stromregelkreis

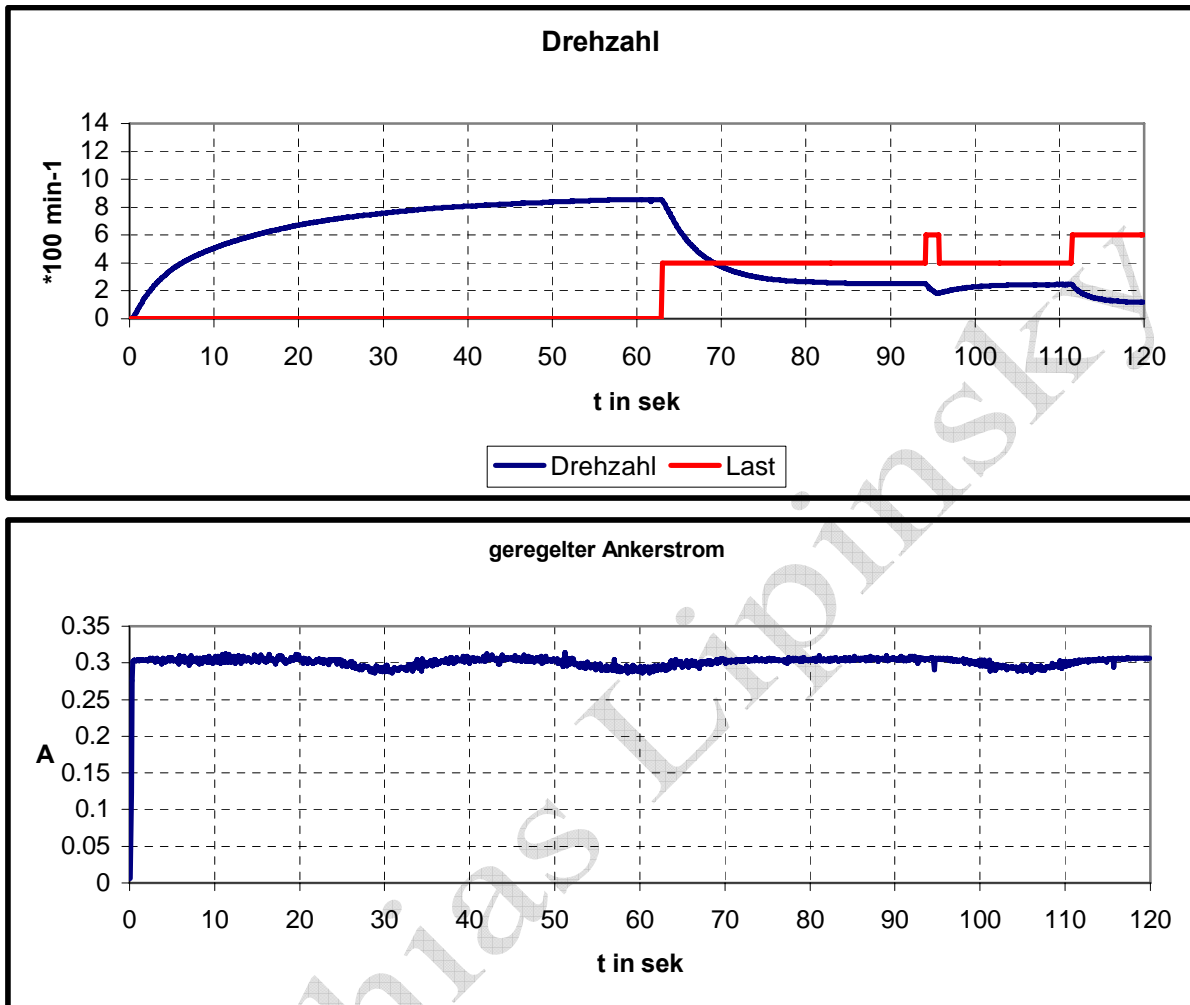


Abbildung 21: Kennlinien zur Ankerstromregelung

4.3 Drehzahlregler mit unterlagertem Ankerstromregler

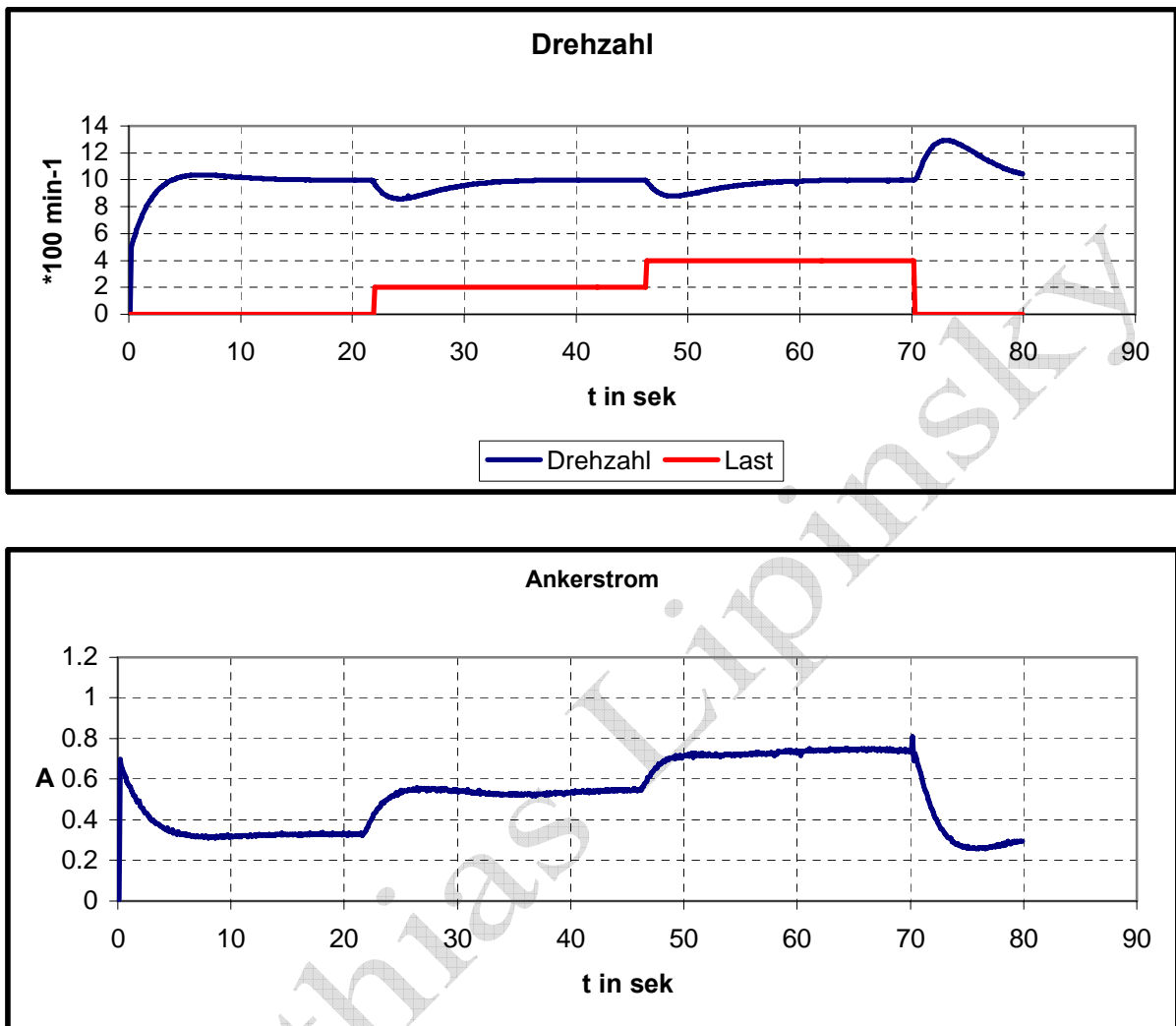


Abbildung 22: Kennlinien zur überlagerten Drehzahlregelung

5 Auswertung

In den **Kennlinien zum Einfluss der Glättungszeitkonstanten** ist zu erkennen, dass die Welligkeit des gemessenen Stromes mit Erhöhung der Zeitkonstanten abnimmt. Anders ausgedrückt, bedeutet das, dass die Anstiegsgeschwindigkeit des Ausgangssignals begrenzt wird. Somit werden mit zunehmender Glättungszeitkonstanten Störspitzen wirkungsvoller gedämpft, allerdings dauert es auch länger, bis Überströme erkannt werden können. Aus technologischen Gründen muss die Zeitkonstante größer sein als die Periodendauer der Schaltfrequenz des Stellgliedes. Beim hier verwendeten Thyristorsteller liegt sie also im Bereich von etwa einer Viertel Sekunde, da er die Netzfrequenz von 50Hz anschneidet. Dies bewirkt das träge Verhalten, welches sich besonders bei Stromsprüngen bemerkbar macht. Aus diesem Grund arbeiten Frequenzumrichter meist im PWM-Mode mit Schaltfrequenzen von einigen Kilohertz. Dadurch entstehen Glättungszeitkonstanten von etwa einer Millisekunde.

Vergleicht man die **Kennlinien zum unregulierten Verhalten** mit den **Kennlinien zur überlagerten Drehzahlregelung**, so ist sofort zu erkennen, dass das gesamte System Motor trotz der unterlagerten Ankerstromregelung nicht schneller geworden ist. Dies ist natürlich durch die konstant gebliebene mechanische Zeitkonstante zu erklären. In der WOK ist es exakt ablesbar: Die Realteile der Polstellen des einschleifigen Regelkreises sowie des kaskadierten Regelkreises haben dieselben Werte. Dieser ist bekanntlich ein Maß für die Ausregelgeschwindigkeit von Sollwertsprüngen.

Somit bleibt natürlich die Frage, warum man den erhöhten Aufwand mit dem unterlagerten Ankerstromregler in Kauf nimmt. Welche Vorteile hat diese Kaskadierung?

Der Regler im einschleifigen Kreis erzeugt eine Stellgröße abhängig von der Drehzahldifferenz. Diese Stellgröße ist die Ankerspannung. Die Ankerspannung ist aber keine Größe, die in den Motorengleichungen direkt vorkommt. Die wichtigste Größe ist der Ankerstrom, denn er erzeugt das gewünschte Drehmoment. Über die Stellgröße Ankerspannung wird hier der Ankerstrom verändert. Der Ankerstrom wird nicht gemessen bzw. überwacht. Somit ist es möglich, dass aufgrund eines ungünstigen Betriebszustandes des Motors (z.B. sehr große Last, Blockierung) sich ein sehr hoher statischer Ankerstrom einstellt. Dieser kann zur thermischen Zerstörung der Ankerwicklung und des Stellgliedes führen. Aus diesem Grund wird der Ankerstrom als unterlagerte Regelung aufgebaut: Der Ankerstromregler hat zwar als Stellgröße wieder die Ankerspannung, aber der Regler wertet keine Drehzahldifferenz, sondern eine Ankerstromdifferenz aus. Ankerstrom bedeutet laut Motorengleichung Drehmoment. Man kann also sagen, der Ankerstromsollwert, ist eigentlich ein Drehmomentensollwert, welcher geregelt wird. In diesem Regelkreis ist es ohne Aufwand möglich, den Stromsollwert auf einen Wert zu begrenzen, der keine Schäden verursacht. Die jetzt überlagerte Drehzahlregelung erzeugt also als Stellgröße keine Ankerspannung, sondern einen Ankerstrom-, oder besser Drehmomentensollwert. Zur weiteren Erhöhung des Komforts ist es denkbar, die Änderungsgeschwindigkeit der Drehzahl auf gewisse Werte zu begrenzen. Somit werden auch die erforderlichen Spitzenströme begrenzt. Dadurch wird das System zwar etwas träger, aber es arbeitet effektiver, da nicht unbegrenzt Energie vorhanden ist, bzw. die benötigte Stelleistung begrenzt wird.