



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## **Danksagung**

Mein Dank gilt an meinen Betreuern Prof. Lothar Fickert und Jürgen Pasker die mich so gut sie konnten während meiner Masterarbeit unterstützt haben.

## **Kurzfassung**

Schlüsselwörter: Asynchronmaschine, Anlaufvorgang, Kurzschlüsse

Die 3-phasige Asynchronmaschine, besonders in der Käfigläuferausführung, gehört zu den am meisten verbreiteten Antriebsmaschinen in elektrischen Netzen. Diese elektrischen Betriebsmittel sind dadurch charakterisiert, dass sie beim Einschalten, aber auch nach Spannungsunterbrechungen, hohe Ströme und eine hohe Blindleistungsaufnahme aufweisen und sich auch bei Netzfehlern an den Kurzschlussströmen beteiligen. Da es bei einzelnen Netzausfällen bzw. bei Unterbrechungen der Netzspannung durch die hohen Anlaufströme bei gleichzeitigem Zuschalten der motorischen Lasten zu längeren Spannungseinbrüchen im Netz kommen kann, gilt es daher diese anhand von Netzszenarien zu untersuchen. Dabei spielen Einflüsse wie etwa die Kabellänge und mechanische Belastung der Maschine eine Rolle. Deren Abhängigkeiten werden für repräsentative Mittelspannungs- und Niederspannungsmotoren in dieser Diplomarbeit genauer untersucht.

## **Abstract**

Keywords: asynchronous machine, start-up, short-circuit

The three-phase asynchronous machine, especially of the squirrel cage type, belongs to the most used engines in electrical power systems. This electrical equipment is characterized by high start-up current and reactive power consumption in case of start-up processes after connecting to a source or after a voltage interruption. They also contribute to the short-circuit current at network faults. The main problem after a voltage interruption or network fault is indeed the high start-up current if all motor loads are switched on at the same time. This may cause undesirable long lasting voltage dips which also affect the functionality of other loads. The main target of this master thesis is to investigate this behaviour for different scenarios. Thereby it's important to consider the influence of the line length and the mechanical loads of the machines. The investigations are carried out for representative m.v. and l.v. motors.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Kurzfassung.....</b>	<b>11</b>
1.1 Ziel.....	11
1.2 Methode.....	11
1.3 Ergebnisse.....	11
1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick .....	11
<b>2 Einleitung .....</b>	<b>12</b>
<b>3 Allgemein .....</b>	<b>13</b>
3.1 Ausgleichsvorgänge .....	13
3.1.1 Grundlegendes zu Differenzialgleichungen:.....	13
3.1.2 Analytische Methoden .....	13
3.1.3 Numerische Methoden.....	14
3.2 Kurzschlussstromberechnung.....	14
3.2.1 Überlagerungsverfahren .....	15
3.2.2 Ersatzquellenverfahren .....	16
3.2.3 Anfangskurzschlussstrom $I_k''$ .....	17
3.2.4 Stoßkurzschlussstrom $i_p$ .....	18
3.2.5 Gleichstromkomponente $i_{dc}$ .....	18
3.2.6 Ausschaltstrom $I_b$ .....	19
3.2.7 Stationärer Kurzschlussstrom $I_k$ .....	20
3.2.8 Lichtbogeneinfluss .....	20
3.3 Asynchronmaschine .....	21
3.3.1 Transientes Ersatzschaltbild .....	21
3.3.2 Transiente Reaktanzen.....	22
3.3.3 Transiente Zeitkonstanten .....	23
3.3.4 Hochlauf bei stillstehendem Rotor .....	23
3.3.5 Anlaufzeit.....	24
3.3.6 Kurzschlussvorgänge .....	25
3.3.7 Wiedereinschalten bei laufendem Rotor .....	27

3.3.8	IEC Kurzschlussstromberechnung.....	28
<b>4</b>	<b>Simulationsmodellierung .....</b>	<b>30</b>
4.1	Das Asynchronmaschinenmodell.....	30
4.2	Das Transformatormodell .....	32
4.3	Das Leitungsmodell .....	33
4.4	Das Spannungsquellenmodell .....	34
4.5	Modellierung der mechanischen Last.....	35
<b>5</b>	<b>Grunduntersuchungen einer leistungsstarken Asynchronmaschine im Mittelspannungsnetz .....</b>	<b>36</b>
5.1	Parametrierung mit der Kurzschlussimpedanz.....	37
5.2	Anlaufvorgang bei Stillstand.....	39
5.3	Kurzschlussvorgang .....	42
5.4	Wiedereinschaltvorgang bei drehender Asynchronmaschine .....	44
<b>6</b>	<b>Einfluss von Zuleitung und der mechanischer Last einer Asynchronmaschine im Niederspannungsnetz .....</b>	<b>46</b>
6.1	Parametrierung mit Leerlauf- und Kurzschlussversuch .....	46
6.2	Einfluss beim Anfahren im Stillstand .....	48
6.3	Einfluss beim 3-poligen Kurzschluss.....	50
6.4	Einfluss beim Wiederhochfahren .....	54
<b>7</b>	<b>Vergleich zwischen Mittelspannungsasynchronmaschine und Niederspannungsasynchronmaschine .....</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Nachbildung eines Gesamtnetzes mit Wirklasten und Asynchronmaschinen .....</b>	<b>62</b>
8.1	Kurzschlussströme der Asynchronmaschinen im 110-kV-Netz .....	63
8.2	Wiederhochfahren nach einem Netzausfall.....	64
8.3	Diskussion .....	68
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>71</b>
	Anhang A - Rechnen in pu .....	71

Anhang B - Umrechnung in ein dq-Bezugssystem.....	72
Anhang C - Daten der Asynchronmaschinen.....	74

# Abkürzungsverzeichnis

Hier sind die wichtigsten Abkürzungen in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet:

a	Koeffizient für den mechanischen Lastverlauf in Matlab
F	Reibungskoeffizient („Friction“) in Matlab
f	Netzfrequenz
$f_{eigen}$	Eigenfrequenz der Asynchronmaschine
$I_0$	Leerlaufstrom der Asynchronmaschine
$I_b$	Effektivwert des Ausschaltstroms
$i_{dc}$	Maximaler Gleichstromanteil des Kurzschlussstroms
$I_{LR}$	Höchster Stromeffektivwert des Asynchronmotors im Kurzschlussversuch mit Nennspannung
$I_k$	Effektivwert des stationären Kurzschlussstroms
$I_k''$	Effektivwert des Anfangskurzschlussstroms
$I_{kG}''$	Effektivwert des Generatorkurzschlussstroms
$I_{ki}''$	Teilkurzschlussströme
$I_{k3}''$	Effektivwert des 3-poligen Anfangskurzschlussstroms
$I_{k2}''$	Effektivwert des 2-poligen Anfangskurzschlussstroms
$I_{k2}$	Effektivwert des 2-poligen stationären Kurzschlussstroms
$I_{k2E}''$	Effektivwert des 2-poligen Anfangskurzschlusses mit Erdberührung
$I_{k2E}$	Effektivwert des 2-poligen stationären Kurzschlussstroms mit Erdberührung
$I_{k1}''$	Effektivwert des Anfangskurzschlussstromes beim einpoligen Erdschluss
$I_{k1}$	Effektivwert des einpoligen stationären Kurzschlussstroms
$I_{kM}''$	Effektivwert des Asynchronmotorkurzschlussstroms
$I_{kmaxM}''$	Effektivwert des maximalen Kurzschlussstroms ohne Motoren
$I_{kmin}''$	Effektivwert des minimalen Kurzschlussstroms
$I_{kM}$	Kurzschlussstrom der Asynchronmaschine im Kurzschlussversuch
$I_{kmax}$	Effektivwert des maximalen stationären Kurzschlussstroms
$I_{kmin}$	Effektivwert des minimalen stationären Kurzschlussstroms



$i_p$	Stoßkurzschlussstrom
$I_{rG}$	Nennstrom des Generators
$I_{rM}$	Nennstrom der Asynchronmaschine
$\underline{I}'_r$	Rotorströme in Raumzeigerdarstellung
$\underline{I}_s$	Ständerströme in Raumzeigerdarstellung
$J_M$	Massenträgheitsmoment der Welle
$J_L$	Massenträgheitsmoment der mechanischen Last
$k_r$	Kopplungsfaktor des Läufers
$k_s$	Kopplungsfaktor des Ständers
$L_M$	Induktivität der Asynchronmaschine im Kurzschluss
$L_m$	Hauptinduktivität (Leerlaufinduktivität)
$L'_r$	Transiente Läuferinduktivität
$L_{rl}$	Läuferstreuinduktivität
$L'_s$	Transiente Ständerinduktivität
$L_{sl}$	Ständerstreuinduktivität
$M_L$	Mechanisches Lastmoment
$n$	Drehzahl der Asynchronmaschine in U/min
$P_0$	Leerlaufverluste der Asynchronmaschine
$P_{kM}$	Kurzschlussleistung der Asynchronmaschine im Kurzschlussversuch
$P_N$	Nennleistung
$P_{Reib}$	Reibleistung bei Nenndrehzahl
$P_{Fe+Reib}$	Eisen- und Reibverluste bei Nenndrehzahl
$P_V$	Gesamt-Verlustleistung bei Nenndrehzahl
$R_M$	Wirkwiderstand der Asynchronmaschine im Kurzschluss
$R'_r$	Läuferwiderstand
$R_s$	Ständerwiderstand
$S_{rM}$	Scheinleistung der Asynchronmaschine
$s$	Schlupf
$T_A$	Reale Anlaufzeit der Asynchronmaschine
$T_a$	Anlaufzeitkonstante a

$T_b$	Anlaufzeitkonstante b
$t_{min}$	Mindestschaltverzug
$T_n$	Nennanlaufzeit
$T_r'$	Transiente Läuferzeitkonstante
$T_{r0}$	Leerlaufzeitkonstante
$T_s'$	Transiente Ständerzeitkonstante
$u_k$	Kurzschlussspannung in p.u.
$u_r$	Wirkkomponente von $u_k$ in p.u.
$U_0$	Ständerspannung im Leerlaufversuch
$U_N$	Nennspannung
$U_{rM}$	Nennspannung des Asynchronmotors
$\underline{U_r'}$	Rotorspannungen in Raumzeigerdarstellung
$\underline{U_s}$	Ständerspannungen in Raumzeigerdarstellung
$U_q$	Ideale Spannungsquelle beim Kurzschluss im Mitsystem
$X_1'$	Transiente Reaktanz der Ständerphase 1
$\underline{Z_1}$	Impedanz im Mitsystem
$\underline{Z_2}$	Impedanz im Gegensystem
$\underline{Z_0}$	Impedanz im Nullsystem
$\underline{Z_k}$	Kurzschlussimpedanz im Mitsystem
$Z_M$	Kurzschlussimpedanz der Asynchronmaschine
$\delta_r$	Rotorwinkel
$\sigma$	Blondel'scher Koeffizient bzw. Streuziffer
$\underline{\psi_s}$	Ständerflüsse der Asynchronmaschine in Raumzeigerdarstellung
$\underline{\psi_r}$	Rotorflüsse der Asynchronmaschine in Raumzeigerdarstellung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit des Koordinatensystems
$\omega_m$	Mechanische Rotorwinkelgeschwindigkeit
$\omega_n$	Nennzahl in $s^{-1}$
$\omega_r$	Elektrische Rotorwinkelgeschwindigkeit
$\omega_s$	Netzkreisfrequenz

# 1 Kurzfassung

## 1.1 Ziel

Es gilt in dieser Diplomarbeit das dynamische Verhalten von Mittelspannungsasynchronmaschinen und eine Niederspannungsasynchronmaschinen zu untersuchen. Dabei wird deren Verhalten unter Einfluss der Kabellängen und mechanischen Belastung bei 3-poligen Kurzschlüssen und Hochlaufvorgängen aus dem Stillstand und bei Spannungsunterbrechungen in Netzen untersucht. Letztendlich soll anhand eines Szenarios mit mehreren Asynchronmaschinen im Niederspannungsnetz vorhergesagt werden wie sehr sich diese auf den Netzkurzschluss bzw. Spannungswiederaufbau auswirken.

## 1.2 Methode

Zur Untersuchung der Asynchronmaschinen wird ausschließlich das Simulationsprogramm Matlab Simulink® verwendet weswegen zunächst einfache Netze simuliert werden um ein tieferes Verständnis der Matlabmodelle zu bekommen. Chronologisch gesehen fängt dies bei einfachen Modellen an und erstreckt sich bis zum Endscenario mit mehreren Transformatoren, Leitungsstücken, Lasten und Asynchronmaschinen im Netz.

## 1.3 Ergebnisse

Das Szenario mit 2000 Niederspannungsasynchronmaschinen hat gezeigt, dass deren Kurzschlussstrombeiträge bezogen auf die Kurzschlussströme des starren Netzes, nur einen geringen Anteil beitragen. Das Verhalten nach einem darauffolgenden Hochlauf nach einer Spannungsunterbrechung zeigt eine starke Abhängigkeit vom Lastmoment der Motoren. Die Kabellängen zeigen einen weitaus geringeren Einfluss.

## 1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die erbrachten Ergebnisse in den Simulationen sind als fiktive Basis-Szenarien anzusehen und sind deshalb für bessere Aussagen an die realen Netzbegebenheiten anzupassen. Genauere Aussagen sind in der derzeitigen Forschung aber auch generell schwer zu treffen da nicht nur die Daten aller Asynchronmaschinen im Netz bekannt sein müssten, sondern auch neben vielen anderen Einflüssen besonders das Sättigungsverhalten berücksichtigt werden sollte.

## 2 Einleitung

Im Zuge von Erdschlussmessungen in Prag kam die Frage auf inwiefern Asynchronmaschinen die Kurzschlussströme beeinflussen. Basierend auf dieser Fragestellung führte dies zum Diplomarbeitsthema über das dynamische Verhalten von 3-phasigen Asynchronmaschinen in Netzen.

Durch den Anstieg der Rechenleistungen von Computern in den letzten Jahrzehnten macht es Sinn Untersuchungen von Asynchronmaschinen mithilfe von Simulationsprogrammen, wie das in dieser Arbeit verwendete Matlab Simulink®, zu machen. Messungen an einer realen Maschine werden dabei in dieser Diplomarbeit nicht behandelt.

Durch die Vielfalt an Asynchronmaschinen, nicht nur durch ihren Rotoraufbau wie Käfigläufer, Schleifringläufer und Doppelkäfigläufer, sondern auch durch verschieden starke Einflüsse von Sättigung, Temperatur (Kühlung) usw. stellen Untersuchungen mit dem hier verwendeten Ersatzmaschinenmodell nur eine Vereinfachung dar. Da in dieser Diplomarbeit nicht zu sehr die ASM selbst im Mittelpunkt steht, sondern mehr die Auswirkung für das vorgelagerte Netz, werden diese Vereinfachungen als ausreichend für eine qualitative Aussage angesehen. Für genauere Betrachtungen wird an andere Stelle in der modernen Forschung auf die Finite Elemente Methode zurückgegriffen, jedoch mit dem Ziel, Optimierungsaufgaben für den Energiewandler zu bewirken.

Ein besonderer Wert wird in dieser Arbeit auf das Verständnis von Asynchronmaschinen gelegt wodurch etwas genauer auf den Unterschied zwischen einfachen theoretischen Berechnungen und numerischer Simulation eingegangen wird. Weiteres wird auch der IEC-Standard 60909 behandelt, welcher die genormte Kurzschlussstromberechnung in einem Netz darstellt. Diese wird teilweise zur Kontrolle mit den Simulationsergebnissen verglichen, um auch eine Aussage über die Genauigkeit der Norm zu bekommen.

Da am Institut für Elektrische Anlagen der Netzausfall ein wichtiges Forschungsgebiet ist, wird diesbezüglich der Beitrag durch das Anlaufverhalten der Asynchronmaschinen bei Rückkehr der Netzspannung nach kurzen Unterbrechungen bzw. Kurzschlüssen im Netz untersucht.

## 3 Allgemein

### 3.1 Ausgleichsvorgänge

Als Ausgleichsvorgang oder auch transients Vorgang, wird der Übergang von einem stationären Zustand in einen anderen verstanden. Bezogen auf ein elektrisches Energiesystem treten diese hauptsächlich in folgenden Situationen auf:

- Schalthandlungen
- Durch- bzw. Überschlägen jeglicher Art
- **Erd- bzw. Kurzschlüssen**

Zur mathematischen Berechnung von transienten Vorgängen ist die Lösung von Differentialgleichungen essentiell, wobei zwischen analytischen und numerischen Methoden unterschieden wird (siehe Kapitel 3.1.2. und 3.1.3). [1]

#### 3.1.1 Grundlegendes zu Differentialgleichungen:

Differentialgleichungen werden in gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen eingeteilt. Weiteres können gewöhnliche in impliziter Form bzw. in expliziter Form dargestellt werden (3.1 und 3.2).

$$\text{Implizit:} \quad F(x; y; y'; \dots; y^{(n-1)}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Explizit:} \quad y^{(n)} = f(x; y; y'; \dots; y^{(n-1)}) \quad (3.2)$$

Zur Berechnung der allg. Lösung sind zusätzliche Bedingungen notwendig, die je nach Art des Problems als Anfangsbedingungen oder Randbedingungen angegeben werden können. In elektrischen Energiesystemen spielen gewöhnliche Differentialgleichungen mit Anfangsbedingungen eine große Rolle. [1]

#### 3.1.2 Analytische Methoden

Die analytische Lösung von Differentialgleichungen kann mit verschiedensten Verfahren im Zeit- bzw. im Bildbereich gelöst werden. Die Wahl eines Lösungsverfahrens hängt stark vom Typ der Differentialgleichung ab. [2]

*Methoden im Zeitbereich:*

Die homogene Lösung lässt sich mit „Trennung der Variablen“ lösen.

Die Inhomogene Lösung kann mit „Variation der Konstanten“ oder durch „Aufsuchen einer partikulären Lösung“ aufgefunden werden, wobei letztere Methode bei linearen Differentialgleichungen die praktisch am meisten verwendete ist.

### *Methoden im Bildbereich:*

Hier seien die zwei wichtigsten Arten von Transformationen erwähnt. Die Laplace- und Fourier Transformation.

Anhand von analytischen Methoden lassen sich mathematische Modelle wie etwa bei der ASM nicht lösen. Begründet ist dies zum Beispiel durch die nichtlineare Induktivität aufgrund der Sättigung. Nichtlineare Differentialgleichungen sind dadurch generell analytisch lösbar. [2] [3]

### **3.1.3 Numerische Methoden**

Wenn Differentialgleichungen algebraisch schwer oder gar nicht zu lösen sind, bedient man sich numerischer Methoden. Dies sind Näherungsverfahren, welche von Simulationsprogrammen wie etwa MATLAB unterstützt werden.

Da viele Problemstellungen in praktischen ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen meist keiner genauen Berechnung bedürfen, reicht die numerische Berechnung aus, um verwertbare Ergebnisse zu bekommen, wobei als Nachteile zu beachten sind:

- Endliche Schrittzahl (Näherungslösung) ist oft erforderlich
- Komplizierte Probleme benötigen hohe Rechenkapazität
- Rundungs-, Abbruchs- und Konvergenzfehler können entstehen [4]

## **3.2 Kurzschlussstromberechnung**

Die Kalkulation des stationären Kurzschlussstroms  $I_k$  am Fehlerort, aber auch einige charakteristische transiente Werte wie  $I_k''$ ,  $i_p$ ,  $i_{dc}$  und  $I_b$  (Abbildung 3.1), lassen sich näherungsweise nach IEC 60909 mit folgenden zwei Methoden bestimmen:

- *Überlagerungsverfahren (siehe 3.2.1)*
- *Ersatzquellenverfahren (siehe 3.2.2)*

In der IEC Norm wird im Allgemeinen zwischen maximalem und minimalem Kurzschlussstrom unterschieden, wobei der maximale zur Bemessung elektrischer Betriebsmittel, Anlagen und Personenschutzeinrichtungen und der minimale zur Adjustierung von Schutzeinrichtung bedeutend ist. Die Größe dieser beiden Werte ist in elektrischen Netzen von mehreren Faktoren abhängig:

Netzaufbau (Sternpunktbehandlung), Art des Kurzschlusses, verwendete Betriebsmittel, Betriebsspannung vor KS, Verhalten der Verbraucher (z.B.: ASM), Generatorspannungsregler, Regeltransformatorstellung. [5] [6]

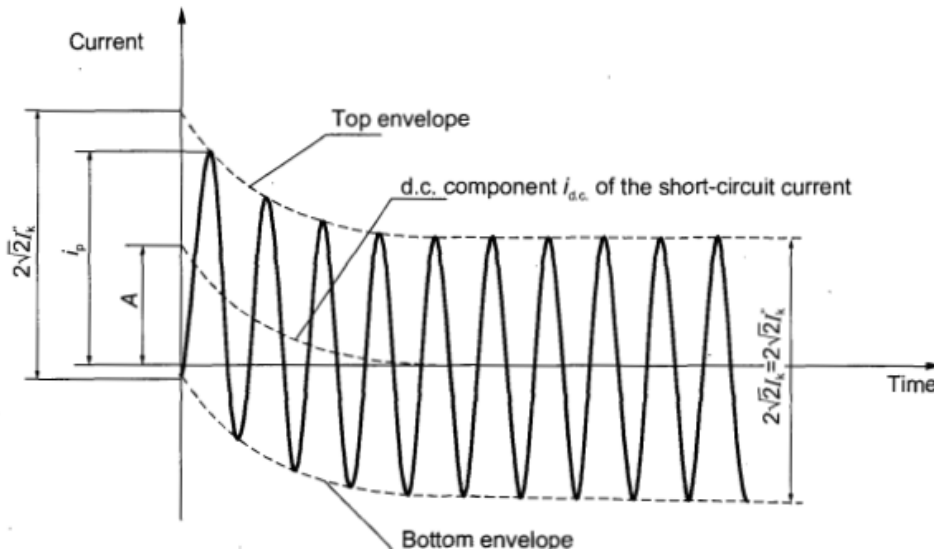


Abbildung 3.1 – Stromverlauf eines generatorfernen Kurzschlusses [5]

### 3.2.1 Überlagerungsverfahren

Um dieses Verfahren anwenden zu können, wird vorausgesetzt, dass der Leistungsflusszustand, die Spannungswerte der Generatoren und die Transformatorstellungen als auch deren Impedanzen vor dem KS bekannt sind. Im Prinzip wird beim Überlagerungsverfahren der Zustand des Netzes vor dem KS mit dem Zustand unmittelbar nach dem KS subtrahiert, und dadurch erhält man den veränderten Zustand.

In Abbildung 3.2 ist ein einfaches Beispiel zur KS-Berechnung eines Generators mit einer Innenimpedanz  $R_G + j \cdot X_d''$  anhand des Superpositionsverfahrens dargestellt.

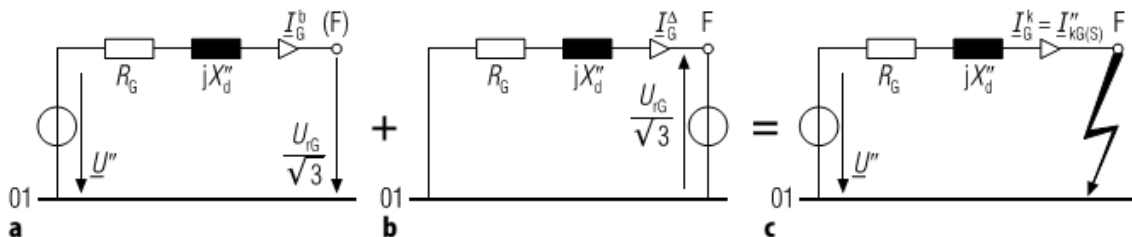


Abbildung 3.2 – Berechnung des  $I''_{kG(S)}$  mit dem Superpositionsverfahren

Da, falls der Anfangskurzschlussstrom bei dieser Vorgehensweise unter Umständen mit einem zufälligen Lastfluss berechnet wurde, dies nicht unbedingt zum maximalen KS-Strom führt, muss man, um diesen zu bekommen, den „worst-case“-Lastfluss bestimmen. [7]

### 3.2.2 Ersatzquellenverfahren

Diese Methode ist verglichen mit dem Überlagerungsverfahren eine wesentliche Vereinfachung. Hier wird nur der KS-Zustand betrachtet und der Betriebszustand vor dem KS nicht. [6]

Bei diesem Verfahren wird nur eine aktive Spannungsquelle am Kurzschlussort im Mitsystem angelegt dessen Spannungswert  $U_q$  ist (3.3).

$$U_q = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Der sog. Spannungsfaktor  $c$  in Gleichung (3.3) wurde eingeführt da die Netzspannungen im fehlerfreien Betrieb einer Schwankung unterliegen. Die Höhe dieses Faktors wird je nach Spannungsebene angepasst (Abbildung 3.3). [6]

Netzennspannung	Spannungsfaktor $c$ für die Berechnung der	
	größten Kurzschlussströme $c_{\max}^a$	kleinsten Kurzschlussströme $c_{\min}$
Niederspannung 100 V bis 1000 V	1,05 <sup>c</sup> 1,10 <sup>d</sup>	0,95
Mittelspannung > 1 kV bis 35 kV	1,1	1,0
Hochspannung > 35 kV <sup>b</sup>	1,1	1,0

<sup>a</sup>  $c_{\max}U_n$  soll die höchste Spannung  $U_m$  für Betriebsmittel nicht überschreiten.

<sup>b</sup> Wenn keine Nennspannung bekannt ist, soll  $c_{\max}U_n = U_m$  und  $c_{\min}U_n = 0,9 U_m$  gewählt werden.

<sup>c</sup> Für Niederspannungsnetze mit einer Toleranz von +6% [IEC 60038], z. B. bei einer Umbenennung von 380 V auf 400 V.

<sup>d</sup> Für Niederspannungsnetze mit einer Toleranz von +10%.

Abbildung 3.3 – Wert des Spannungsfaktors  $c$  je nach Netzebene

Durch die zusätzliche Einführung von diversen Impedanzkorrekturfaktoren bei Generatoren, Transformatoren und Kraftwerken kommt man auf gut angenäherte Werte sogar für deren Teilkurzschlussströme. [7]

Des Weiteren werden nach der IEC-Norm folgende Vereinfachungen bzw. Vernachlässigungen in der Berechnung gemacht:

- Netzeinspeisungen sowie Synchron- und Asynchronmaschinen werden mit ihrer internen (subtransienten) Reaktanz ersetzt.
- Parallelkapazitäten und Queradmittanzen (von Lasten), mit Ausnahme der von den Motoren, werden im Mit- und Gegensystem vernachlässigt.
- Kapazitäten im Nullsystem sind im Allgemeinen zu berücksichtigen und nur bei geerdeten Niederspannungs- und Hochspannungsnetzen zu vernachlässigen. [5] [7]



### 3.2.3 Anfangskurzschlussstrom $I''_k$

Der größte auftretende Effektivwert des Anfangskurzschlussstroms tritt im Allgemeinfall bei einem 3-poligen KS auf, wenn  $\underline{Z}_0 > \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$  ist. Falls der KS-Ort nahe eines Transformators liegt könnte die Nullimpedanz kleiner sein. Somit wäre dann der 2-polige KS mit Erdberührung der höchste. [5]

Dieser Parameter lässt sich je nach Kurzschlussart wie folgt Berechnen:

$$\text{3-poliger KS:} \quad I''_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_k} \quad (3.4)$$

$$\text{2-poliger KS:} \quad I''_{k2} = \frac{c \cdot U_N}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)} \quad (3.5)$$

$$\text{2-poliger KS mit Erdberührung:} \quad I''_{k2E} = - \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N \cdot \underline{Z}_2}{(\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2) + (\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_0) + (\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_0)} \quad (3.6)$$

$$\text{1-poliger Erdschluss:} \quad I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0)} \quad (3.7)$$

Generell kann man bei generatorfernen Kurzschlüssen in Gleichung (3.5), (3.6) und (3.7) vereinfachend sagen dass  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$  ist.

Bei Kurzschlüssen in unvermaschten Netzen mit mehreren Einspeisungen können alle Teilkurzschlussströme (3.8) zusammenaddiert werden.

$$I''_k = \Sigma I''_{ki} \quad (3.8)$$

In einem vermaschten Netz muss die Kurzschlussimpedanz  $\underline{Z}_k = \underline{Z}_1$  berechnet werden. Am einfachsten geht dies durch Netzreduktion des Mitsystems mit dem Ersetzen der Betriebsmittel durch ihre KS-Reaktanzen. [6]

### 3.2.4 Stoßkurzschlussstrom $i_p$

Der Stoßkurzschlussstrom ist der maximal mögliche Augenblickswert bei einem KS. Es wird der Faktor  $\kappa$  eingeführt, welcher sich aus der Differentialgleichungsberechnung eines RL-Gliedes beim Einschalten (mit z.B.: analytische Berechnung) ergibt. Dieser berücksichtigt den Einschaltzeitpunkt der Spannungsquelle, welcher den höchsten KS-Wert hervorbringt. Der Parameter  $\kappa$  ist nach IEC60909 in Gleichung (3.9) angegeben. [6]

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \quad (3.9)$$

Durch zusätzliche Multiplikation von  $\sqrt{2}$  erhält man schließlich den Stoßkurzschlussstrom (3.10).

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (3.10)$$

Beide Gleichungen (3.9) und (3.10) setzen sowohl einen Schaltzeitpunkt im Spannungsnulldurchgang voraus als auch das Erreichen von  $i_p$  nach in etwa einer halben Netzperiode (ca. 10ms bei 50Hz). [5]

In unvermaschten Netzen mit mehreren Einspeisungen können die Teilkurzschlussströme von  $i_p$  wie in Gleichung (3.8) addiert werden. Bei vermaschten Netzen kann  $\kappa$  anhand verschiedener Methoden bestimmt werden. [6]

### 3.2.5 Gleichstromkomponente $i_{dc}$

Der größtmögliche Gleichspannungsanteil bei Kurzschlüssen wird in der IEC-Norm mit der Gleichung (3.11) berechnet.

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \frac{R}{X}} \quad (3.11)$$

### 3.2.6 Ausschaltstrom $I_b$

Der Effektivwert des Ausschaltstroms setzt sich aus einem Wechselstromanteil und dem Gleichstromanteil aus Gleichung (3.11) zusammen. Allerdings trägt der Gleichstromanteil  $i_{dc}$  nur einen geringen Anteil zum Ausschaltstrom bei. [6]

Bei einem generatorfernen KS ist  $I_b$  gleich dem Anfangskurzschlussstrom bei jeglicher Art von Fehlern. (3.12)

$$I_b = I_k'' = I_{k2}'' = I_{k2E}'' = I_{k1}'' \quad (3.12)$$

Bei generatornahen KS mit Einfach- oder Mehrfacheinspeisung kommt der Faktor  $\mu$  hinzu. (3.13)

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (3.13)$$

Der Faktor  $\mu$  ist abhängig vom Mindestschaltverzug  $t_{min}$ , also der Zeit vom Eintritt des Kurzschlusses bis zum Abschalten des Stromes und vom Verhältnis  $\frac{I_{kG}''}{I_{rG}}$  des Generators. In Abbildung 3.4 kann der Faktor  $\mu$  bestimmt werden, wobei zu sehen ist dass bei  $\frac{I_{kG}''}{I_{rG}} \leq 2$  unabhängig von  $t_{min}$  für  $\mu = 1$  eingesetzt wird. Für die Asynchronmaschine gilt statt  $\frac{I_{kG}''}{I_{rG}}$  das Verhältnis  $\frac{I_{kM}''}{I_{rM}}$ . [5]

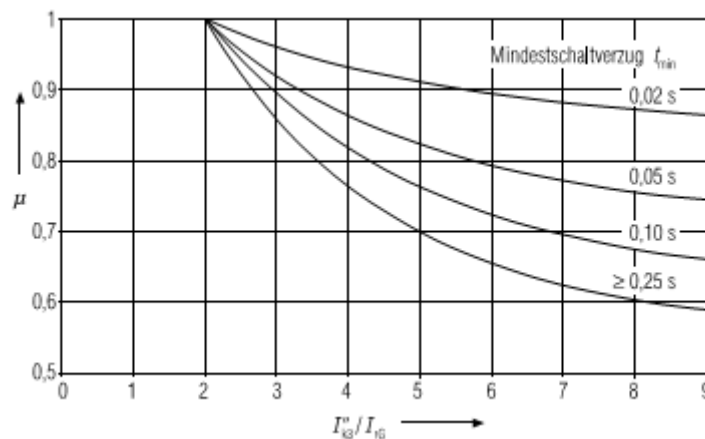


Abbildung 3.4 – Bestimmung des Faktors  $\mu$  [6]

In vermaschten Netzen kann der Ausschaltstrom nach Gleichung (3.12) berechnet werden, wobei größere Werte als in der Realität bei symmetrischen Kurzschlüssen zu erwarten sind. [5] [6]

### 3.2.7 Stationärer Kurzschlussstrom $I_k$

Der stationäre Effektivwert des Kurzschlussstroms kann im Gegensatz zur Berechnung des Anfangskurzschlussstromes nicht sehr genau bestimmt werden.

Bei dreiphasigen Kurzschlüssen mit Einfacheinspeisung durch Synchrongeneratoren hängt dieser Strom vom Erregersystem, Spannungsregler und Sättigungseffekt der Einspeisung ab. Dies wird durch den Faktoren  $\lambda$  berücksichtigt wobei es zwischen minimalen (3.13) und maximalen (3.14) stationären Strom zu unterscheiden gilt je nachdem welches  $c$  verwendet wurde (siehe Abbildung 3.3). [5]

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I''_{rG} \quad (3.13)$$

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I''_{rG} \quad (3.14)$$

In vermaschten Netzen wird näherungsweise gesagt, dass der stationäre Strom gleich dem Anfangskurzschlussstrom ist (3.15).

$$I_{kmax} = I''_{kmaxM} ; I_{kmin} = I''_{kmin} \quad (3.15)$$

Für unsymmetrische KS gilt:

$$I_{k2} = I''_{k2} ; I_{k2E} = I''_{k2E} ; I_{k1} = I''_{k1} \quad (3.16)$$

### 3.2.8 Lichtbogeneinfluss

In der Norm wird der Einfluss des Lichtbogens auf den Kurzschlussstrom vernachlässigt. Allerdings kann der Lichtbogen den Kurzschlussstrom merklich beeinflussen. Dies ist hauptsächlich bei Niederspannungsnetzen der Fall. Hier kann der Spannungsabfall am Lichtbogen die Spannung an der Netzreaktanz und somit auch den Kurzschlussstrom verringern. Die Gefahr besteht darin, dass beim minimalen KS-Strom mit einem Lichtbogen der Fehler von der Schutzeinrichtung nicht erkannt werden kann und somit nicht auslöst. [8]  
[9]

### 3.3 Asynchronmaschine

In diesem Kapitel werden zur Erklärung der stationären und transienten Vorgänge der ASM folgende Vereinfachungen gemacht:

- Die ASM ist phasenbezogen symmetrisch gebaut.
- Die Sättigung des Eisens als auch die Eisenverluste werden vernachlässigt.
- Harmonische Schwingungen werden ebenfalls vernachlässigt.
- Die angelegten Sinusspannungen am Ständer sind konstant in Amplitude und Frequenz.
- Die Betrachtung gilt nur für Einfachkäfig- bzw. Schleifringläufer.
- Keine Drehzahländerung während des transienten Vorgangs.

Im Gegensatz zu Synchronmaschinen sind für die Ausgleichsvorgänge der ASM die Wirkwiderstände größer und deswegen meist nicht zu vernachlässigen. Durch die höheren Wirkwiderstände klingen auch die transienten Vorgänge schneller ab als bei Synchronmaschinen. Weiteres gibt es im Läufer der ASM keinen Unterschied zwischen Längs- und Querkomponente. [10] [11]

#### 3.3.1 Transientes Ersatzschaltbild

Das transiente Verhalten der ASM kann durch die Gleichungen (3.17) (3.18) (3.19) und (3.20) beschrieben werden wobei die Induktivitäten in den Gleichungen (3.21) und (3.22) zusammengefasst werden.

$$\underline{U}_s = \underline{I}_s \cdot R_s + \frac{d \cdot \underline{\psi}_s}{d \cdot t} + j \cdot \omega \cdot \underline{\psi}_s \quad (3.17)$$

$$\underline{U}'_r = \underline{I}'_r \cdot R'_r + \frac{d \cdot \underline{\psi}'_r}{d \cdot t} + j \cdot (\omega - \omega_r) \cdot \underline{\psi}'_r \quad (3.18)$$

$$\underline{\psi}_s = L_s \cdot \underline{I}_s + L_m \cdot \underline{I}'_r \quad (3.19)$$

$$\underline{\psi}'_r = L_m \cdot \underline{I}_s + L_r \cdot \underline{I}'_r \quad (3.20)$$

$$L_s = L_{sl} + L_m \quad (3.21)$$

$$L_r = L'_{rl} + L_m \quad (3.22)$$

Die Spannungen, Ströme und Flüsse sind als Raumzeiger definiert und in den Gleichungen (3.23) (3.24) (3.25) (3.26) (3.27) und (3.28) beschrieben.

$$\underline{U}_s = \frac{2}{3} \cdot (U_{1s}(t) + U_{2s}(t) \cdot e^{-j2\pi/3} + U_{3s}(t) \cdot e^{-j4\pi/3}) \quad (3.23)$$

$$\underline{U}'_r = \frac{2}{3} \cdot (U_{1r}(t) + U_{2r}(t) \cdot e^{-j2\pi/3} + U_{3r}(t) \cdot e^{-j4\pi/3}) \quad (3.24)$$

$$\underline{\psi}_s = \frac{2}{3} \cdot (\psi_{1s}(t) + \psi_{2s}(t) \cdot e^{-j2\pi/3} + \psi_{3s}(t) \cdot e^{-j4\pi/3}) \quad (3.25)$$

$$\underline{\psi}'_r = \frac{2}{3} \cdot (\psi_{1r}(t) + \psi_{2r}(t) \cdot e^{-j2\pi/3} + \psi_{3r}(t) \cdot e^{-j4\pi/3}) \quad (3.26)$$

$$\underline{I}'_s = \frac{2}{3} \cdot (I_{1s}(t) + I_{2s}(t) \cdot e^{-j2\pi/3} + I_{3s}(t) \cdot e^{-j4\pi/3}) \quad (3.27)$$

$$\underline{I}'_r = \frac{2}{3} \cdot (I_{1r}(t) + I_{2r}(t) \cdot e^{-j2\pi/3} + I_{3r}(t) \cdot e^{-j4\pi/3}) \quad (3.28)$$

Aus den Gleichungen (3.17) (3.18) (3.19) und (3.20) kann das transiente ESB der ASM in Abbildung 3.5 konstruiert werden.

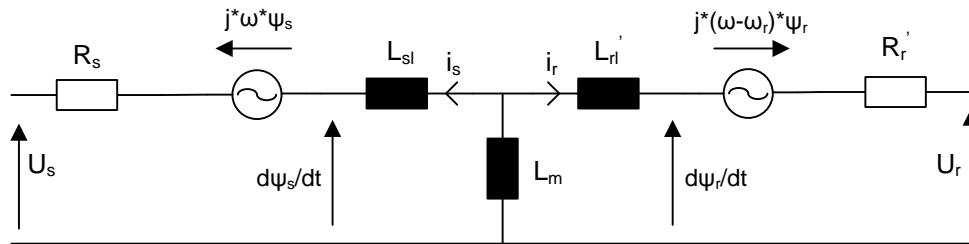


Abbildung 3.5 – Transientes Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine für ein beliebiges Koordinatensystem [11]

### 3.3.2 Transiente Reaktanzen

Aus dem ESB in Abbildung 3.5 lässt sich die transiente Ständerinduktivität  $L'_s$  bezogen auf den Ständer bei stillstehender ASM und kurzgeschlossenem Läufer bestimmen. Wird  $L_m$  noch zusätzlich vernachlässigt, welches einen geringen Fehler von ungefähr 2% ergibt, setzt sich  $L'_s$  nur aus den Streuinduktivitäten zusammen (3.29).

$$L'_s = L_{sl} + \frac{L'_{rl} \cdot L_m}{L'_{rl} + L_m} \approx L_{sl} + L_{rl} \quad (3.29)$$

Gleichermaßen gilt dies auch für die Bestimmung der transienten Läuferinduktivität  $L'_r$  bezogen auf den Läufer wo aber zum Unterschied der Ständer kurzgeschlossen ist (3.30).

$$L'_r = L'_{rl} + \frac{L_{sl} \cdot L_m}{L_{sl} + L_m} \quad (3.30)$$

Es wird der Streufaktor  $\sigma$  mit Gleichung (3.31) eingeführt.

$$\sigma = 1 - k_r \cdot k_s = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \quad (3.31)$$

Dadurch lässt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen stationären und transienten Reaktanzen herstellen (3.32).

$$L'_s = \sigma \cdot L_s \quad \text{bzw.} \quad L'_r = \sigma \cdot L_r \quad (3.32)$$

### 3.3.3 Transiente Zeitkonstanten

Die transienten Zeitkonstanten ergeben sich aus dem Verhältnis zwischen L und R des Ständers bzw. Läufers (3.33).

$$T'_S = \frac{L'_S}{R_S} \text{ bzw. } T'_r = \frac{L'_r}{R'_r} \quad (3.33)$$

Durch das Einsetzen von Gleichung (3.33) und Einführen der Leerlaufzeitkonstante  $T_{s0} = \frac{X'_S}{\omega \cdot R_S}$  ergibt sich für den Ständer die Gleichung (3.34).

$$T'_S = \sigma \cdot \frac{X'_S}{\omega \cdot R_S} = \sigma \cdot T_{s0} = \frac{X'_S}{X_S} \cdot T_{s0} \quad (3.34)$$

Mit guter Näherung kann auch  $X'_S : X$  als Verhältniss zwischen Leerlauf- und Kurzschlussstrom angesehen werden. [11]

Analog zum Ständer ergibt sich für den Läufer Ähnliches (3.35).

$$T'_r = \frac{X'_r}{X_r} \cdot T_{r0} \quad (3.35)$$

Betrachtet man noch zusätzlich die Impedanz des Anschlusskabels, so verändern sich die Zeitkonstanten in dem Sinne, dass bei längeren Kabeln in der Regel der Wert der Ständerzeitkonstante abnimmt und derjenige der Läuferzeitkonstanten zunimmt. [6]

### 3.3.4 Hochlauf bei stillstehendem Rotor

Bei Stillstand des Läufers ist die ASM wie ein Transformator zu betrachten, nur mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung. Durch die Berechnung der inhomogenen Differenzialgleichungen der Spannungs- und Flussgleichungen (3.17) bis (3.20) im Stillstand  $\omega_r = 0$  und im ruhenden Koordinatensystem  $\omega = 0$  bekommt man als Lösung die stationären und transienten Ströme im Einschaltvorgang. Dies stellt allerdings nur eine Vereinfachung dar und ist genauer, je kleiner die Beschleunigung ist. [11]

Für die meisten Maschinen wird mit guter Näherung von in etwa gleichen Ständer- und Läufergrößen ausgegangen und somit wird vereinfacht für die Berechnung der Einschaltströme  $R = R_S = R_r$ ,  $L_{sl} = L'_{rl}$  gleichgesetzt. In diesem Fall ergibt sich eine symmetrische Aufteilung der Ausgleichsströme mit zwei verschiedenen Dämpfungszeitkonstanten (3.30).

$$T_a \approx 2 \cdot \frac{L_r}{R} = 2 \cdot T_{r0} ; T_b = \frac{L_{sl}}{R} ; \quad (3.36)$$

Bei großen Maschinen kann  $T_a$  bis zu einigen Sekunden betragen wobei  $T_b$  im Bereich von einigen Millisekunden liegt. Da die Gleichstromkomponente, die mit der Zeitkonstante  $T_a$  gedämpft wird, klein ist, kann sie in der Näherung vernachlässigt werden und somit ergibt sich der Einschaltstromverlauf für die Ständerphase wie in Gleichung (3.37).

$$I_{1s}(t) = \frac{\hat{U}_{1s}}{j \cdot X'_1} \cdot (e^{i(\omega_s \cdot t + \alpha - \varphi_k)} - e^{i(\alpha - \varphi_k)} e^{-\frac{t}{T_b}}) \quad (3.37)$$

Hierbei ist  $\varphi_k$  der Winkel zwischen Ständerspannung und Ständerstrom und  $\alpha$  der Phasenwinkel der Phasenspannung zu seinem Maximalwert. Die größte Gleichstromkomponente erhält man bei  $\alpha = \varphi_k$  und nach einer halben Periode in etwa den Höchstwert des gesamten Einschaltstromverlaufes. Für die restlichen zwei Phasen sind  $\alpha+120^\circ$  bzw.  $\alpha-120^\circ$  einzusetzen. [11]

Das Drehmoment, wenn  $p=1$  lässt sich mithilfe der Ständerströme und den konjugiert komplexen Ständerflüsse wie in Gleichung (3.38) berechnen.

$$M_{el} = \frac{3}{2} \cdot \text{Im}(\underline{I}_s \cdot \underline{\psi}_s^*) \quad (3.38)$$

Durch das Einsetzen der Ständerströme und -flüsse in die obige Gleichung entstehen vier Drehmomentkomponenten von denen eine davon stationär ist und die anderen drei abhängig von den Zeitkonstanten  $T_a$  und  $T_b$  abklingen.

Die Berechnungen in diesem Kapitel stimmen allerdings nur unter der Annahme dass alle 3 Phasen gleichzeitig eingeschaltet werden und die Maschine zuvor stromlos war. Des Weiteren gelten die Drehmomentberechnungen hier bei festgehaltener Welle da sonst ein Teil der Leistung zur Beschleunigung des Läufers abhängig von Trägheits- und Lastmoment gebraucht wird. [11]

### 3.3.5 Anlaufzeit

Die Anlaufzeit lässt sich aus der mechanischen Bewegungsgleichung (3.39) berechnen. Zu unterscheiden gilt zwischen der Nennanlaufzeit und der tatsächlichen Zeit bis zum Hochlaufen auf die Betriebsdrehzahl.

$$(J_M + J_L) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = M_{el} - M_d - M_L \quad (3.39)$$

Die Nennanlaufdauer  $T_n$  (3.40) ist ein theoretischer Wert bei einer Maschine und beschreibt, jene Zeit, welche benötigt wird, um die Maschine vom Stillstand bis zur Nenndrehzahl mit ihrem konstanten Bemessungsmoment zu beschleunigen.

$$T_n = \frac{J_M \cdot \omega_n}{M_n} \quad (3.40)$$

Dadurch dass das Moment bei Vernachlässigung des dynamischen Drehmomentverhaltens dem Kloss'schen Drehmomentverlauf folgt und die Last berücksichtigt werden muss weicht die tatsächliche Anlaufzeit von  $T_n$  ab.

Eine gute Abschätzung lässt sich nach Gleichung (3.41) machen und zwar mithilfe der Mittelwerte des erzeugenden Moments und des Lastmoments. [3]



$$T_A = \int_0^{\omega_n} \frac{(J_M + J_L)}{M_{el}(\omega) - M_L(\omega)} \cdot \frac{1}{p} d\omega_r \approx \frac{1}{p} \cdot \frac{(J_M + J_L) \cdot \omega_n}{M_{el,av} - M_{L,av}} \quad (3.41)$$

### 3.3.6 Kurzschlussvorgänge

Der Ausgleichsvorgang einer ASM verhält sich ähnlich wie bei derjenigen einer Synchronmaschine.

Folgende Ströme sind bei einer symmetrisch angeschlossenen Maschine beteiligt:

- ➔ Ströme im stationären Zustand im Ständer mit der Netzfrequenz  $f_1$  und im Läufer mit  $s \cdot f_1$ .
- ➔ Gedämpfter Ständergleichstrom welcher einen Läuferwechselstrom mit einer Frequenz von  $(1 - s) \cdot f_1$  erzeugt.
- ➔ Gedämpfter Läufergleichstrom welcher einen Ständerwechselstrom mit der Frequenz  $(1 - s) \cdot f_1$  generiert.

Wird ein 3-poliger KS betrachtet, so haben im Augenblick des Kurzschlusses der Ständerfluss  $\underline{\psi}_s$  und Läuferfluss  $\underline{\psi}_r$  gleiche Richtung und Größe. Im späteren Zeitverlauf  $t > 0$  bleibt der Ständerfluss unbeweglich wobei sich aber der Läuferfluss weiter dreht. Nach einer halben Periode haben beide Flüsse eine entgegengesetzte Richtung wodurch die Flüsse über Streuwege erzeugt werden und es somit zu hohen Stromstärken kommt.

Durch Auflösen der Gleichungen aus Kapitel 3.3.1 nach dem Phasenstrom  $I_{s1}(t)$ , das Einsetzen der Ständer- und Läuferflüsse im Kurzschlussfall und mit Gleichung (3.31) erhält man den Ständerkurzschlussstrom der Phase 1 mit Gleichung (3.42).

$$I_{1s}(t) = \frac{\widehat{U}_{1s}}{j \cdot X'_1} \cdot [1 - (1 - \sigma) \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t}] \quad (3.42)$$

Da für die Bestimmung der Ströme in obiger Gleichung die Wirkwiderstände vernachlässigt wurden müssen noch die jeweiligen Zeitkonstanten vom Kapitel 3.3.3 eingeführt werden. Dadurch gelangt man zu einer gedämpften Schwingung mit jeweils einem Gleich- und Wechselanteil (3.43).

$$I_{1s}(t) = \frac{\widehat{U}_{1s}}{j \cdot X'_1} \cdot [e^{-\frac{t}{T'_s}} - (1 - \sigma) \cdot e^{j \cdot \omega_s \cdot t} \cdot e^{-\frac{t}{T'_r}}] \quad (3.43)$$

In Abbildung 3.6 sieht man den Ausschwingvorgang als Vektordiagramm und Zeitfunktion für Zeitkonstanten von  $T'_r = T'_s = 0,0212$  und  $\sigma = 0,08$  abgebildet. Aus dem rechten Diagramm ist zu sehen, dass der Stromhöchstwert in etwa bei  $T/2$  erreicht ist. Dieser Wert hier beträgt in etwa das 6-fache des höchsten Nennstroms. Bei größeren ASM kann es sogar bis zum 8 bis 9 fachen Strom kommen. [11]

Der im Vektordiagramm in Abbildung 3.6 gezeigte Stromverlauf bei  $t=0$  geht vom Leerlaufstrom aus (KS im Leerlaufbetrieb). Allerdings ist der höchste KS-Wert bei einer belasteten Maschine schätzungsweise der gleiche wie im Leerlauf.

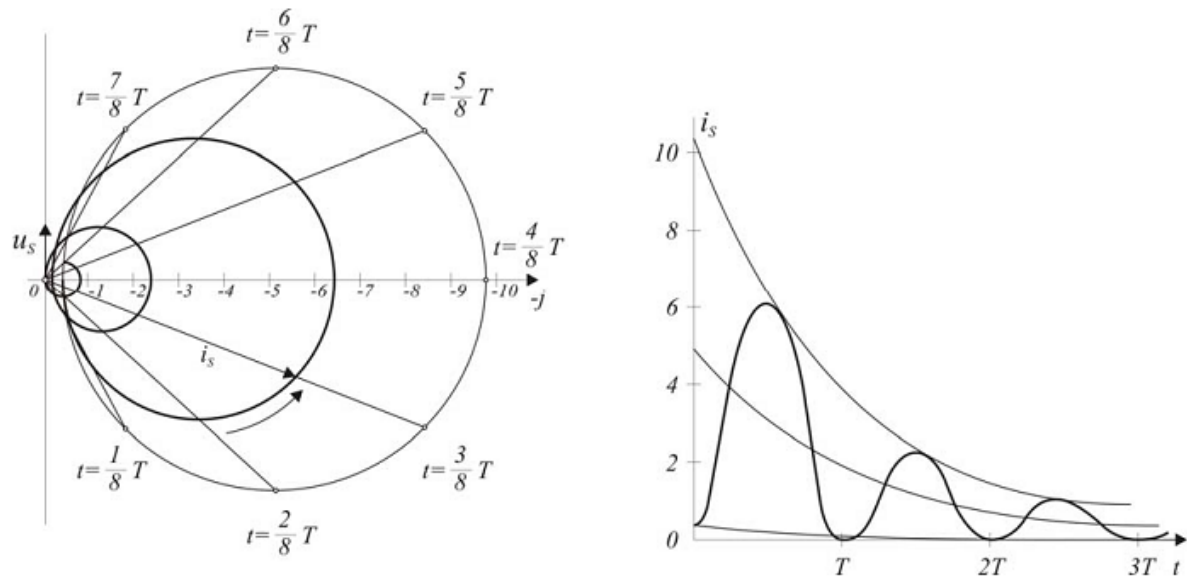


Abbildung 3.6 – Vektordiagramm (links) und Strom-Zeitfunktion (rechts) des Kurzschlusses [12]

Das Drehmoment kann aus dem Vektorprodukt der Ständer- und Läuferflüsse berechnet werden und ergibt bei KS ein pulsierendes Drehmoment, welches abhängig von der Größe der Zeitkonstanten  $T_r'$  und  $T_s'$  gedämpft wird. Da die Exponenten im Vektorprodukt addiert werden, ergeben sich hier kleinere Zeitkonstanten für die Drehmomente als bei Strömen. Allerdings ist wie auch bei den Strömen die Dämpfung geringer, je größer die Maschine ist, bedingt durch ihre kleineren Widerstände. Insgesamt gesehen kommt es im Mittel zu einem negativen Drehmomentverlauf. [11]

### 3.3.7 Wiedereinschalten bei laufendem Rotor

Wird eine stromlose ASM bei Vernachlässigung der Wirkwiderstände eingeschaltet so entstehen die Flüsse gleich wie beim Einschalten einer stillstehenden. Der Läuferfluss ist hier dann gleich Null und unabhängig von der Drehung des Läufers. Die vollständige Vernachlässigung der Widerstände bei der Berechnung der Ströme bringt grobe Fehler mit sich und ist deshalb unzulässig. Außerdem würde es wegen  $\underline{\psi}_r = 0$  zu keiner Drehmomentbildung kommen.

Eine annähernd gute Berechnung gestaltet sich damit, dass die Bestimmung der Flüsse mit Berücksichtigung der Widerstände im stationären Zustand ( $\psi_{s1\infty}, \psi_{r1\infty}$ ) erfolgt und schließlich die gedämpften Gleichstromflüsse dazu addiert werden. Im ruhenden Koordinatensystem  $\omega = 0$  lassen sich dann die beiden Flüsse für die Phase 1 wie in Gleichungen (3.44) und (3.45) berechnen. [11]

$$\psi_{s1}(t) = \psi_{s1\infty} \cdot (e^{j\omega_s t} - e^{-\frac{t}{T_s'}}) \quad (3.44)$$

$$\psi_{r1}(t) = \psi_{r1\infty} \cdot (e^{j\omega_s t} - e^{-\frac{t}{T_r'}} \cdot e^{j(1-s)\omega_s t}) \quad (3.45)$$

Die Ströme ergeben sich durch Auflösen der Gleichungen (3.17) bis (3.20) nach den beiden Rotor- und Ständerströmen und das anschließende Einsetzen der Flüsse der obigen Gleichungen (3.44) und (3.45).

Die erhaltenen Stromverläufe sind ähnlich wie jene im Kurzschluss und unterscheiden sich nur in Bezug auf den stationären Stromverlauf. [11]

Es entstehen ähnlich wie im Kapitel 3.3.4 beim stillstehenden Rotor 4 Drehmomentkomponenten. Das Gesamt-Drehmoment ist pulsierend und verhält sich im schlimmsten Fall also bei Stillstand stark schwingend, wo es auch zu hohen Drehmomentspitzen kommt (siehe Kapitel 3.3.4). Demnach ist zu sagen dass ein Einschalten bei höheren Drehzahlen ein geringeres Pulsieren verursacht. [11]

### 3.3.8 IEC Kurzschlussstromberechnung

Die Mittelspannungs- und Niederspannungsmotoren wirken sich auf die bereits im Kapitel 4.2 beschriebenen transienten Stromkennwerte  $I''_k$ ,  $i_p$ ,  $I_k$  und  $I_b$  aus. Dabei wird deren Einfluss in Niederspannungsnetzen, wenn sie nicht mehr als 5% des  $I''_k$  ausmachen vernachlässigt. [7]

In der Berechnung gestaltet sich die Berücksichtigung der ASM durch das Ersetzen mit der Anlaufimpedanz  $Z_M$  die sich nach Gleichung (3.46) berechnen lässt. Dies ist gerechtfertigt da der Unterschied zwischen Anlauf- und Kurzschlussimpedanz nur marginal ist. [10] [13]

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (3.46)$$

Die Gleichung (3.46) gilt für ein Mit- bzw. Gegensystem. Da der Motor an einem Neutraleiter angeschlossen ist, kann die Nullimpedanz als unendlich groß angesehen werden. Sonst sollte diese vom Motorenhersteller angegeben werden. [7]

Für verschiedene Arten von Kurzschlüssen am Anschlusspunkt der Maschine lassen sich deren Stromkennwerte wie in Abbildung 3.7 berechnen.

Kurzschluss	Dreipoliger Kurzschluss	Zweipoliger Kurzschluss	Einpoliger Kurzschluss
Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	$I''_{k3M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M}$	$I''_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$	$\frac{I''_{k1M}}{I''_{k3M}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{X_{3A}}{X_A} \left( 1 + \frac{I''_{k3M}}{I''_{k3A}} \right)}$
Stoßkurzschlussstrom	$i_{p3M} = \kappa_M \sqrt{2} I''_{k3M}$	$i_{p2M} = \kappa_M \sqrt{2} I''_{k2M}$	$i_{p1M} = \kappa_M \sqrt{2} I''_{k1M}$
	<p>Mittelspannungsmotoren:  <math>\kappa_M = 1,75</math> (<math>R_M/X_M = 0,10</math>) für Leistungen <math>P_{rM}/p \geq 1</math> MW  <math>\kappa_M = 1,65</math> (<math>R_M/X_M = 0,15</math>) für Leistungen <math>P_{rM}/p &lt; 1</math> MW                      Niederspannungsmotorguppen:  <math>\kappa_M = 1,30</math> (<math>R_M/X_M = 0,42</math>)</p>		
Ausschaltwechselstrom	$I_{b3M} = \mu q I''_{k3M}$ mit $I''_{k1M}/I_{rM}$	$I_{b2M} \approx I''_{k2M}$	$I_{b1M} \approx I''_{k1M}$
Dauerkurzschlussstrom	$I_{k3M} = 0$	$I_{k2M} \approx I''_{k2M}$	$I_{k1M} \approx I''_{k1M}$

Abbildung 3.7 – Gleichungen zur Berechnung der Stromkennwerte bei KS am Anschlusspunkt der ASM [6]

Die nach IEC-60909 gelieferten Ergebnisse der Kurzschlussberechnungen sind gewissen Ungenauigkeiten unterworfen. Vor allem bei Motorengruppen größerer oder kleinerer Leistung, wie sie zum Beispiel in Industrienetzen auffindbar sind, kommt es zu groben Abweichungen. Untersuchungen zeigen, dass in der IEC-Kurzschlussberechnung bei Gruppen kleinerer Asynchronmaschinen zu große KS-Ströme zu erwarten sind und bei Gruppen größerer Maschinen hingegen zu kleine. In diesem Fall sind die Ergebnisse einer transienten Berechnung (siehe Kapitel 3.3.4) wenn die Kabellängen zur Sammelschiene berücksichtigt werden, genauer. [6]

In [6] wird empfohlen den Faktor  $\kappa_{MM}$  zu verwenden statt des  $\kappa_M$  welcher in der Norm beschrieben wird. Dadurch sind bessere Resultate auf Kosten eines höheren Aufwands zu erwarten.

## 4 Simulationsmodellierung

Zur Simulation von verschiedenen Netzelementen wurden die fertigen Modelle aus der SimPowerSystems Bibliothek im Simulink verwendet. Die in den folgenden Kapiteln verwendeten Modelle und Simulinkblöcke werden hier beschrieben und deren Parameter mit Ausnahme der ASM bestimmt.

### 4.1 Das Asynchronmaschinenmodell

Das ASM-Modell besteht aus Gleichungen für ein elektrisches und mechanisches System. Die Spannungs- und Flussgleichungen in Tabelle 4.1 entsprechen im Wesentlichen denen wie sie im Kapitel 3.3.1 beschrieben sind. Die Darstellung dieser Gleichungen sind in ein dq-Bezugssystem transformiert (siehe Anhang B). Das dazugehörige ESB im dq-Bezugssystem wird in Abbildung 4. gezeigt. Die dq-Transformation ist als eine allgemeine Transformation anzusehen wo je nach Anwendungsfall ein statorfestes, drehfeldfestes oder rotorfestes Koordinatensystem simuliert werden kann. Die Auswahl des Bezugssystems hat Einfluss auf die Genauigkeit und Simulationsgeschwindigkeit. [14]

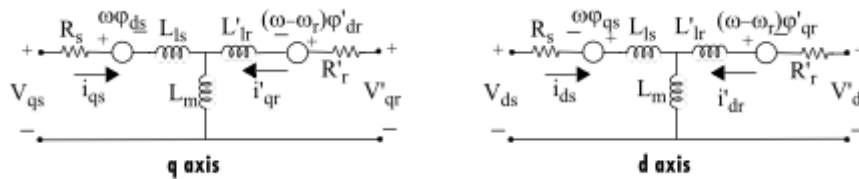


Abbildung 4.1 – Elektrisches Modell im dq-Bezugssystem für den Käfig- oder Schleifringläufer [14]

Tabelle 4.1 – Spannungs- und Flussgleichungen im dq-Bezugssystem

q-Achse	d-Achse
$V_{qs} = i_{qs} \cdot R_s + \frac{d \cdot \varphi_{qs}}{d \cdot t} + \omega \cdot \varphi_{ds}$	$V_{ds} = i_{ds} \cdot R_s + \frac{d \cdot \varphi_{qs}}{d \cdot t} - \omega \cdot \varphi_{qs}$
$V'_{qr} = i'_{qr} \cdot R'_r + \frac{d \cdot \varphi_{qs}}{d \cdot t} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{dr}$	$V'_{dr} = i'_{dr} \cdot R'_r + \frac{d \cdot \varphi_{ds}}{d \cdot t} - (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{qr}$
$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qs}$	$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}$
$\varphi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qs} + L_m \cdot i_{qs}$	$\varphi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}$

Die Tabelle 4.2 zeigt die Korrespondenz zwischen den verwendeten Größen in Kapitel 3.3.1 und den dq-Größen in Tabelle 4.1.

**Tabelle 4.2 – Korrespondenztabelle**

Allgemeine Bezeichnungen	ASM-Modell in Matlab (dq-Größen)
$\underline{U}_s$	$V_{qs}$ und $V_{ds}$
$\underline{I}_s$	$i_{qs}$ und $i_{ds}$
$\underline{\psi}_s$	$\varphi_{qs}$ und $\varphi_{ds}$
$\underline{U}'_r$	$V'_{qr}$ und $V'_{dr}$
$\underline{I}'_r$	$i'_{qr}$ und $i'_{dr}$
$\underline{\psi}'_r$	$\varphi'_{qr}$ und $\varphi'_{dr}$

Neben den Fluss- und Spannungsgleichungen gehört zum elektrischen Modell auch das elektrodynamische erzeugte Drehmoment  $T_e$  dazu welches der Gleichung (3.38) folgt und in Gleichung (4.1) in dq-Koordinaten beschrieben ist.

$$T_e = 1,5 \cdot p \cdot (\varphi_{ds} \cdot i_{qs} + \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (4.1)$$

Das mechanische Modell der ASM ist mit den Gleichungen (4.2) und (4.3) beschrieben und besteht aus einer Bewegungsgleichung (vgl. Gleichung 3.39) und, ergänzend dazu, die Differentialgleichung für den Rotorwinkel  $\delta_r$ .

$$\frac{d \cdot \omega_m}{d \cdot t} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (T_e - F \cdot \omega_m - T_m) \quad (4.2)$$

$$\frac{d \cdot \delta_r}{d \cdot t} = \omega_m \quad (4.3)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_r}{p} \quad (4.4)$$

Der H-Wert in Gleichung (4.2) ist dabei die Trägheitszeitkonstante und entspricht der Nennanlaufzeit in Gleichung (3.40), dividiert durch 2. Die Zusammenhänge zu den Bezeichnungen in Gleichung (3.39) sind in Tabelle 4.3 zu sehen ist. Die Drehmomente  $T_e$ ,  $T_m$  und  $F \cdot \omega_m$  sind dabei auf  $\frac{M_n}{\omega_n}$  bezogen.

**Tabelle 4.3 – Zusammenhänge der Bewegungsgleichungen**

Allgemeine Bezeichnungen	Matlab-Bezeichnungen
$M_{el}$	$T_e$
$M_L$	$T_m$
$M_d$	$F \cdot \omega_m$

Mit dem Faktor  $F$  (Friction) sind die Lager- und Lüfterreibung berücksichtigt. Dessen Moment steigt beim verwendeten Modell konstant mit der Drehzahl. Dies ist eine Annäherung der Reibmoment-Drehzahlabhängigkeit und bedeutet einen quadratischen Anstieg der Verlustleistung. Üblicherweise steigen die Verluste leistungsmäßig in etwa mit den Potenzen zwischen 2 und 2.5 der Rotordrehzahl, aber dadurch, dass die Lüfter- und Reibverluste gegenüber den Gesamtverlusten einen nicht allzu großen Anteil ausmachen, wird diese Annäherung als ausreichend betrachtet. [3]

Bezüglich der Verlustbetrachtung der ASM sind folgende Vernachlässigungen zu machen:

- ➔ Ummagnetisierungsverluste (durch fehlendes  $R_{Fe}$  im ESB)
- ➔ Zusatzverluste (Streuverluste, etc.)

Weiteres werden Stromverdrängungseinflüsse, Temperatureinflüsse, Oberwellen, Streufeld- und Hauptfeldsättigung in diesem Modell vernachlässigt.

Die Parameterbestimmung der verwendeten ASM wird in den Kapiteln 5 und 6 behandelt.

## 4.2 Das Transformatormodell

Zur Simulation der Trafos werden 3-Phasen-Zweiwicklungstransformatoren verwendet. Das ESB ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Die Angaben der Induktivitäten und Widerstände erfolgt in per unit. Näheres zur pu-Umrechnung ist aus dem Anhang B zu entnehmen.

Ebenso wie bei der ASM wurde auf den Eisenwiderstand  $R_{Fe}$  und auch auf die Leerlaufinduktivität  $L_m$  verzichtet und deshalb diese in den Einstellungen auf unendlich bzw. auf einen vernachlässigbar hohen Wert gesetzt. Das Sättigungsverhalten des Trafokerns wird zur Vereinfachung hier ebenfalls nicht simuliert.

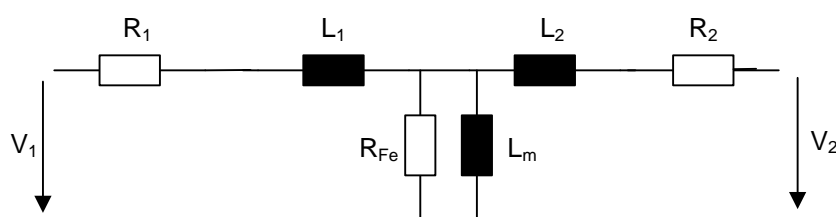


Abbildung 4.1 – Einphasiges Ersatzschaltbild des Zweiwicklungstrafos

In der Tabelle 4.4 sind die notwendigen Daten der verwendeten Transformatoren in den Simulationen angegeben. Für die Längsimpedanzen werden ihre KS-Impedanzen eingesetzt. Die anschließende Aufteilung in Primär- und Sekundärimpedanzen erfolgt durch Halbierung der KS-Impedanzen. Dies ist eine Näherung, welche bei größeren Übersetzungsverhältnissen immer weniger übereinstimmt. Jedoch ist die Aufteilung der Impedanzen in den hier durchgeführten Untersuchungen nicht von großer Bedeutung. [15]

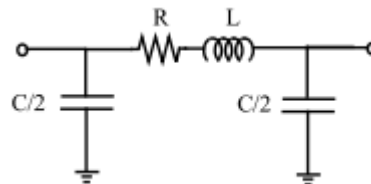


**Tabelle 4.4 – Transformatordaten [6]**

	Trafo 1	Trafo 2	Trafo 3
$U_{N,OS}$ in kV	400	110	20
$U_{N,US}$ in kV	110	20	0,4
$S_N$ in MVA	300	31,5	0,63
$u_k$ in p. u.	0,18	0,13	0,06
$u_r$ in p. u.	0,002	0,0037	0,014
$R_1 = R_2$ in p. u.	0,001	0,0018	0,0071
$L_1 = L_2$ in p. u.	0,0893	0,064	0,0294

### 4.3 Das Leitungsmodell

Für die Simulationen der Leitungen wird das Pi-Ersatzschaltbild in Abbildung 4.2 verwendet. In der Tabelle 4.5 sind die verwendeten Daten für die Leitungen aufgezeigt. Die Nullimpedanzen wurden hier nicht verwendet, da ein KS mit Erdberührung nicht betrachtet wird.



**Abbildung 4.2 – Pi Ersatzschaltbild**

**Tabelle 4.5 – Leitungsdaten im Mitsystem [6]**

	Freileitung 1	Kabel 1	Kabel 2	Kabel 3
Typ	Al/Stahl	Cu	Cu	Cu
Querschnitt in mm <sup>2</sup>	2x435/55	300/35	95	2,5
Spannungsbereich in kV	110	20	0,4	0,4
Widerstandsbelag in $\Omega$ /km	0,033	0,066	0,195	7,41
Induktivitätsbelag in $\Omega$ /km	0,266	0,103	0,080	0,106
Kapazitätsbelag in $\mu$ F/km	0,013	0,5	1	0,2

#### 4.4 Das Spannungsquellenmodell

Als „Slack-Knoten“ wird eine 3-phasige Spannungsquelle verwendet mit Angaben der Widerstände und Induktivität welche in der Tabelle 4.6 zu sehen sind. Für den Slack Knoten 2 wurden willkürliche Werte hergenommen um eine hohe Kurzschlussleistung zu bekommen. Nähere Erklärungen dazu sind im Kapitel 7 nachzusehen.

**Tabelle 4.6 – Daten der Spannungsquellen**

	Slack Knoten 1	Slack Knoten 2	Slack Knoten 3
Spannungsebene in kV	400	20	6
Widerstand in $\Omega$	0,5	0,02	0,01
Induktivität in H	0,015	0,0006	0,00001
Kurzschlussleistung in GVA	34	2	3,4

## 4.5 Modellierung der mechanischen Last

Das Verhalten der Lasten bei Antriebsmaschinen wird durch deren Momenten-Drehzahl-Charakteristik definiert. Die Lasten werden dabei in 4 verschiedenen Klassen aufteilt:

- Konstante Last ( $M = \text{konst.}$ , z.B.: Hebermaschinen)
  - Lineare Last ( $M \sim n$ , z.B.: Extruder)
  - Quadratische Last ( $M \sim n^2$ , z.B.: Lüfter, Pumpen)
  - Lasten mit konstanter Leistungsaufnahme ( $M \sim 1/n$ , z.B.: Dreh- und Fräsmaschinen)
- [3]

In Matlab wurden die drehzahlvariablen Lasten mit Hilfe einer Polynomfunktion mit Rückkopplung auf die ASM realisiert. Für die konstanten Lasten wird lediglich ein konstanter Wert eingegeben. In Tabelle 4.7 sind die verwendeten Lastfunktionen angegeben wobei die Lasten bei Nenndrehzahl stets auf das Nennmoment angepasst wurden. Die Anpassung erfolgt mit dem Koeffizienten  $a$  welche in Gleichung (4.5) für ein quadratisch zunehmendes Moment als Beispiel demonstriert wird.

$$a = \frac{M_n}{\omega_n^2} \quad (4.5)$$

**Tabelle 4.7 – Mechanische Lasten der ASM**

	Leerlauf	Last 1
Lastmomentfunktion	$M_L = 0$	$M_L = a \cdot \omega_m^2$
Koeffizient $a$ für die zweipolige ASM (11kW)	0	$3,8 \cdot 10^{-6}$

Für üblich ändert sich die Massenträgheit  $J$  des mechanischen Gesamtsystems beim Anschluss einer Last nach Gleichung (3.39). Wegen einer gewünschten Erhöhung der Dynamik wird sie in den Simulationen nicht berücksichtigt.

## 5 Grunduntersuchungen einer leistungsstarken Asynchronmaschine im Mittelspannungsnetz

In diesem Kapitel gilt es eine Käfigläufer ASM an einem starren Netz zu untersuchen. Mit einem starren Netz wird ein Netz bezeichnet, bei dem die gesamte Leistung des Netzes sehr groß gegenüber dem einzelnen Erzeuger bzw. Verbraucher ist. Dies bedeutet eine vernachlässigbar geringe Impedanz des Netzes. [16]

Die hier durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf das Verhalten der ASM bei folgender Schaltsequenz:

- 1) Einschalten im Stillstand
- 2) 3-poligen Kurzschluss
- 3) Wiedereinschalten der Maschine nach dem 150ms andauernden Kurzschluss

Es wird ein Mittelspannungsmotor der Firma ABB mit 2,9 MW betrachtet, der an ein 6-kV-Netz gespeist wird. Das Simulinkmodell ist in Abbildung 5.1 zu sehen. Hier wird die ASM direkt an den Slack-Knoten 3 angeschlossen und vom Stillstand weg und stromlos hochgefahren. Der nach dem Hochlaufen angelegte Kurzschluss liegt dabei direkt an den Anschlussklemmen und nach einer Zeit von 150ms wird der KS wieder weggeschaltet. Die ASM ist während dieser Vorgänge nicht belastet und hat somit kein Lastmoment. Somit besitzt sie nur das Trägheitsmoment der Welle, welches im Anhang C zu finden ist. Zur Kontrolle der Simulationsergebnisse wurden die dabei auftretenden Ströme durch angenäherte Berechnungen mithilfe von Gleichungen aus dem Kapitel 3.3 verglichen.

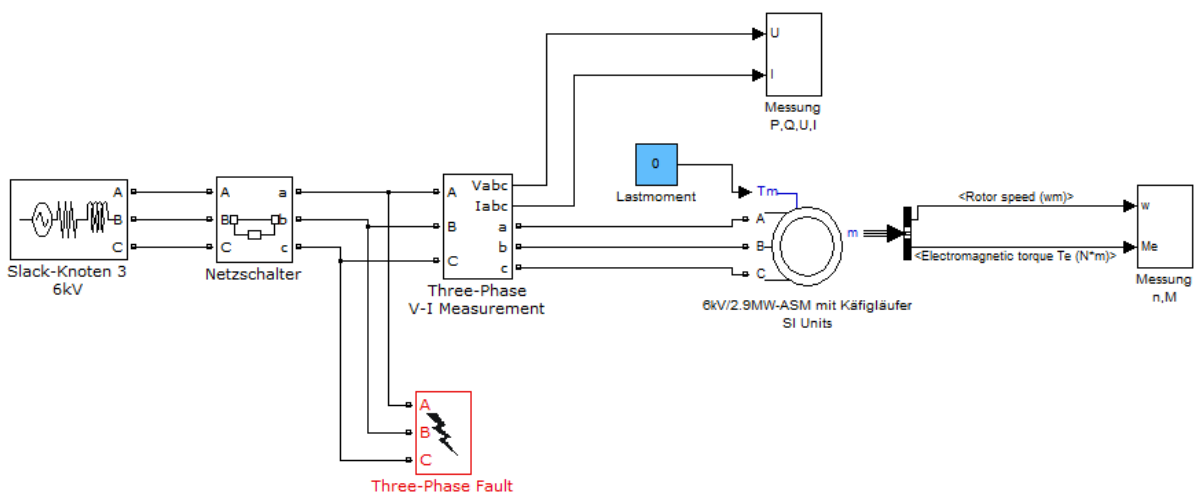


Abbildung 5.1 – Simulationsmodell der 6kV-2,9-kW-ASM

## 5.1 Parametrierung mit der Kurzschlussimpedanz

Um die notwendigen Impedanzen aus dem ESB in Abbildung 3.3.1 zu berechnen, werden dessen Nenndaten aus dem Anhang C entnommen.

Wegen der fehlenden Daten für den Kurzschluss- bzw. Leerlaufversuch wird die KS-Impedanz nach IEC-Norm, welche mit der Gleichung (3.46) berechnet.

$$S_{rM} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 6kV \cdot 321A = 3,336 \text{ MVA}$$

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4,9} \cdot \frac{6000^2}{3,336} = 2,2 \Omega$$

Da das R/X Verhältnis der ASM nicht bekannt ist, wird es nach [5] bestimmt:

$$X_M = 0,995 \cdot Z_M = 2,18 \Omega$$

$$L_M = \frac{2,18}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0069 \text{ H}$$

$$R_M = \sqrt{Z_M^2 - X_M^2} = 0,22 \Omega$$

Die Aufteilung der Ständer- und Läuferimpedanzen wird wie beim Transformator (siehe Kapitel 4.2) gleichmäßig aufgeteilt, da dies für die meisten ASM eine gute Näherung ist. [11]

$$R_s = R'_r = \frac{R_M}{2} = 0,11 \Omega$$

$$L_{sl} = L'_{rl} = \frac{L_M}{2} = 0,00345 \text{ H}$$

Die Abschätzung der Hauptreaktanz  $X_m$  wird mit dem Leerlaufstrom (in Sternschaltung) und bei Vernachlässigung der Streureaktanzen ermittelt. [17]

$$X_m = \frac{U_{rM}}{I_0 \cdot \sqrt{3}} = \frac{6000}{65 \cdot \sqrt{3}} = 53 \Omega$$

$$L_m = \frac{53}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,169 \text{ H}$$

Die Reibungsverluste machen für eine 2 polige Maschine in dieser Leistungsklasse in etwa 31% der Gesamtverluste bei Nennlast aus. [18]

$$P_V = P_N \cdot (1 - \eta) = 2,9 \text{ MW} \cdot (1 - 0,965) = 101,5 \text{ kW}$$

$$P_{Reib} = 0,31 \cdot P_V = 31,5 \text{ kW}$$

$$F = \frac{P_{Reib}}{\omega_n^2} = \frac{31,5 \text{ kW}}{(312 \text{ s}^{-1})^2} = 0,32 \text{ Nms}$$

Bei Nenndrehzahl entspricht dies  $M_R = 3,37 \text{ Nm}$

Aus den berechneten Werten lassen sich die transienten Reaktanzen und Zeitkonstanten wie sie im Kapitel 3.3 beschrieben sind berechnen.

$$L_s = L_r = L_{sl} + L_m = 0,00345 + 0,169 = 0,1725 \text{ H}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} = 1 - \frac{0,169^2}{0,1725^2} = 0,04$$

$$L'_s = L'_r = \sigma \cdot L_s = 0,00693 \text{ H}$$

$$T'_s = T'_r = \frac{L'_s}{R_s} = 62,1 \text{ ms}$$

Durch gleiche Größen der Ständer- und Läuferimpedanz ergibt sich somit für beide die gleiche transiente Zeitkonstante.

Die Anlaufzeitkonstanten ergeben sich bei Drehzahl Null gemäß Gleichung (3.36).

$$T_a = 2 \cdot \frac{L_r}{R_r} \approx 3 \text{ s}, T_b = \frac{L'_{rl}}{R'_r} \approx 30 \text{ ms}$$

In Tabelle 5.1 sind die berechneten Parameter nochmals übersichtlich aufgelistet.

**Tabelle 5.1 – Parameter der 6kV-2,9-MW-ASM**

	2,9 MW-ASM mit p=1
$R_s = R'_r$	0,11 $\Omega$
$L_{sl} = L'_{rl}$	3,45 mH
$L_m$	0,169 H
$\sigma$	0,04
$P_{Reib}$	31,5 kW
$T'_s = T'_r$	62,1 ms

## 5.2 Anlaufvorgang bei Stillstand

In Abbildung 5.2 wird der Anlaufstrom (blau) der Phase  $I_1$  beim Einschalten im Spannungsnulldurchgang von  $U_1$  gezeigt, welches den höchsten Einschaltstrom bewirkt. Die rot punktierte Linie zeigt den berechneten Verlauf nach Gleichung (3.37).

Zur Erklärung der Abbildung 5.2 wird diese in 3 Zeitabschnitte geteilt:

$0s < t < 0,1s$ : Bei  $t=0$  sieht man am Gleichstromanteil des Anlaufstroms  $I_{1offset}$  dass dieser in etwa gleich groß ist wie der Wechselanteil („worst case“). Das Abklingen des Gleichstromglieds geschieht mit der Zeitkonstante  $T_b$  welche mit den im vorigen Kapitel berechneten 30 ms gut übereinstimmt.

$0,1s < t < 2,5s$ : Bei  $t=0.1$  ist die Gleichkomponente nahezu verschwunden. Im späteren Verlauf ist jedoch eine Schwebung des Anlaufstroms zu sehen. Dies liegt an der Drehzahländerung welche die Gleichströme des Ständers je nach Beschleunigung verändert.

$t > 2,5s$ : In diesem Bereich geht der Anlaufstrom beim Erreichen der Leerlaufdrehzahl in den Leerlaufstrom über, wo der Rotorzweig im ESB vernachlässigt werden kann und hauptsächlich nur noch die hochohmige Hauptreaktanz  $X_m$  wirkt. Das Überschwingen der Drehzahl über der Nenndrehzahl wird im Kapitel 5.4 erklärt.

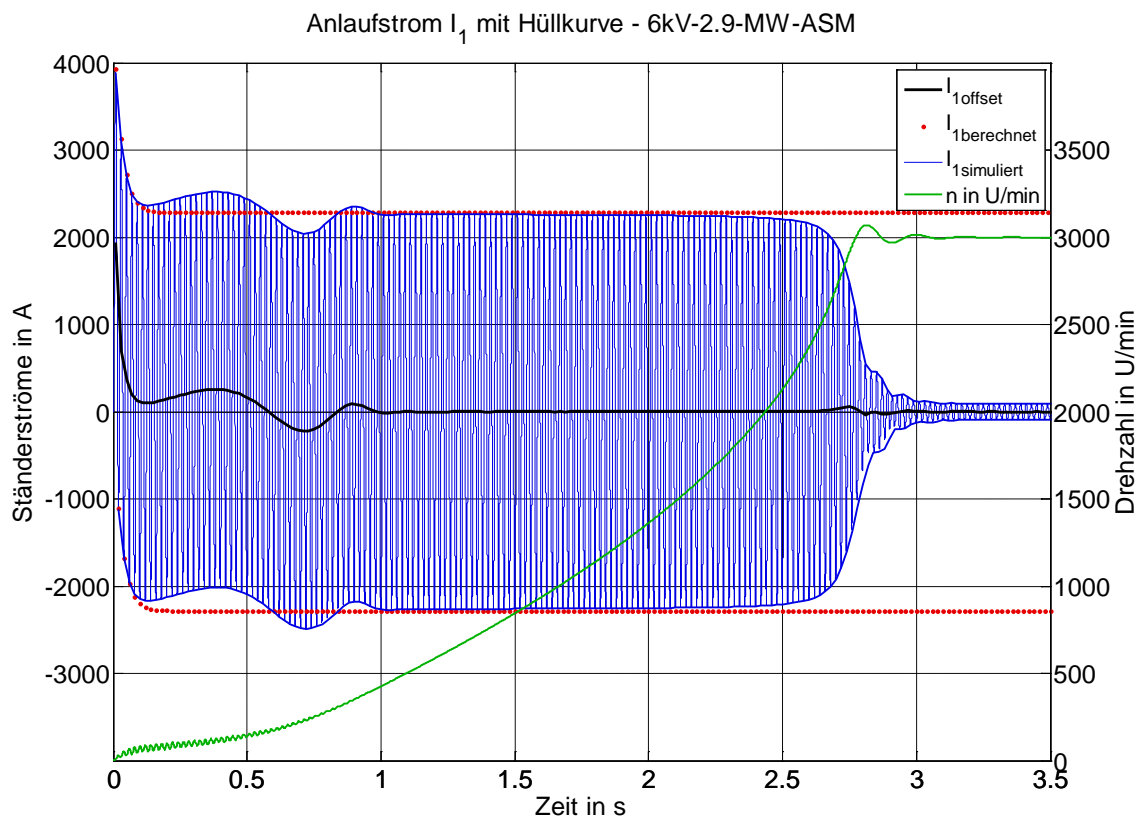


Abbildung 5.2 – Anlaufströme der 2,9-MW-ASM mit Drehzahlverlauf

In Abbildung 5.3 sieht man mit der blauen Linie den dynamischen Drehmomentverlauf. Die Anfangsdynamik besitzt stark schwankende Drehmomentverläufe welche mit etwa 50Hz pulsieren und mit den Anlaufzeitkonstanten  $T_a$  und  $T_b$  abklingen. Der dynamische Verlauf kann bei etwa  $t=1s$  als abgeklungen gesehen werden also wesentlich früher als mit der berechneten Zeitkonstante von 3s. Dies liegt am Drehzahlanstieg welche die Zeitkonstanten bei erhöhter Drehzahl verringern. [3]

Der Mittelwert des dynamischen Drehmomentverlaufs wird durch die stationären Ströme hervorgerufen und stimmt in etwa mit der statischen Kennlinie (Kloss'sche Gleichung) in rot gut überein. Eine größere Abweichung von ca. 33% zwischen beiden Kennlinien tritt beim Kippmoment auf. Dies kommt dadurch, dass im Anlauf der Hauptfluss zu diesem Zeitpunkt seinen Endwert nicht erreicht hat. [3]

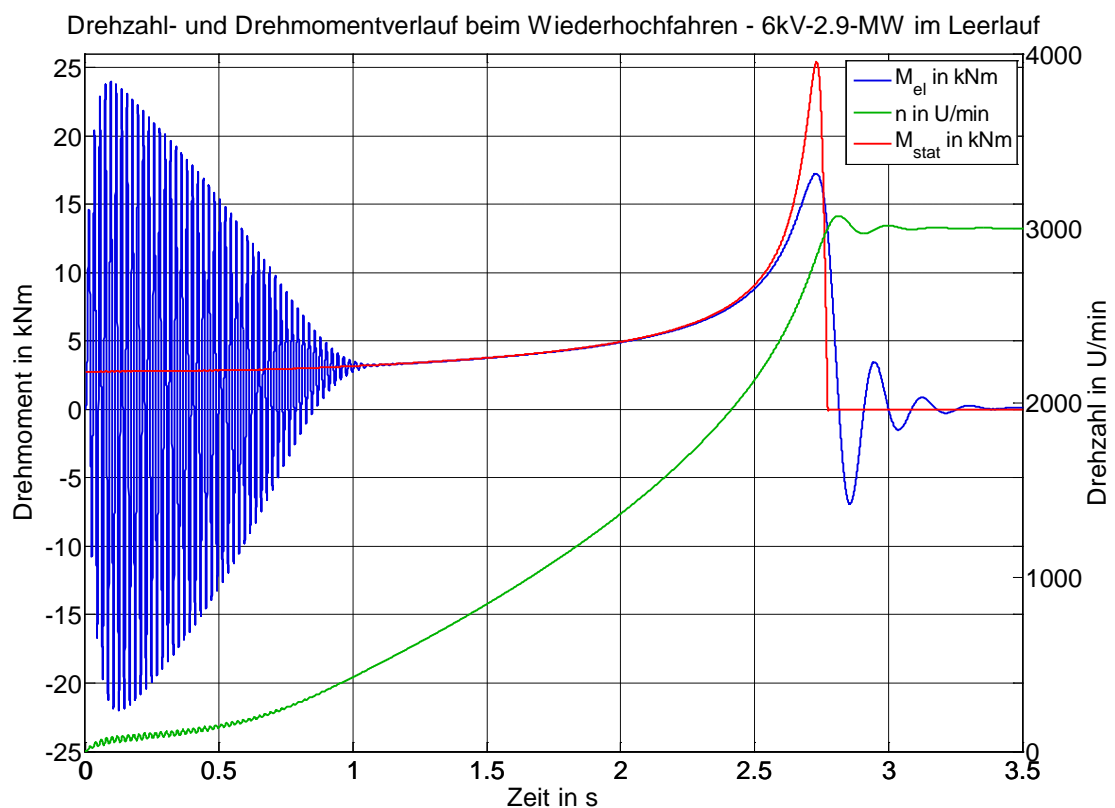


Abbildung 5.3 – Drehmoment der 2,9-MW-ASM mit Drehzahlverlauf

Die Abweichung zwischen dynamischen und statischen Kippmoment wird in der Literatur mit dem Pfaff-Jordan Parameter  $P$  abgeschätzt und zwar durch das Verhältnis der mechanischen Zeitkonstante zur Rotorkurzschlusszeitkonstante. [3]



Der Parameter P lässt sich für die verwendete ASM folgendermaßen berechnen:

$$P = \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\frac{U_N}{\sqrt{3}}} \cdot \frac{L_s}{L_m} \right)^2 \cdot J_M \cdot \frac{R_r'^2}{3 \cdot p^2 \cdot L_r'} = \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 0,1725 \text{ H}}{\frac{6000}{\sqrt{3}} \text{ V}} \cdot \frac{0,169 \text{ H}}{0,169 \text{ H}} \right)^2 \cdot 38,8 \text{ kgm}^2 \cdot \frac{(0,11 \Omega)^2}{3 \cdot 1^2 \cdot 0,00693 \text{ H}} = 0,193$$

Wird in Abbildung 5.4 der berechnete Parameter eingetragen ergibt dies ein Verhältnis von 0,67 zwischen dynamischen und statischen Kippmoment. Wird dieses Verhältnis mit denjenigen in Abbildung 5.3 verglichen so stimmt dieses gut mit der Simulation überein.

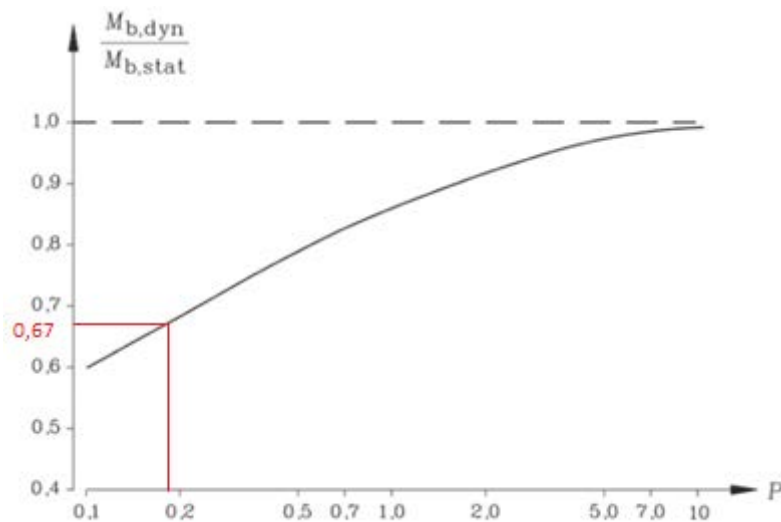


Abbildung 5.4 – Verhältnis zwischen dynamischen  $M_{el}$  und statischen  $M_{stat}$  Kippmoment in Abhängigkeit des Parameters P [3]

### 5.3 Kurzschlussvorgang

In Abbildung 5.5 ist der KS-Verlauf aus dem stationären Betriebszustand aller 3 Phasen der Ständerströme abgebildet. Vor dem KS ist die ASM im stationären Leerlaufbetrieb und es fließt der Leerlaufstrom. Im Kurzschlussaugenblick wo die Spannung der Phase 1 ihren Nulldurchgang hat, bewirkt sie den höchsten KS-Strom, wie an der blauen Linie zu erkennen ist. Dies kann auch anhand des Gleichstromglieds  $I_{1\text{gleich}}$  gesehen werden, welcher während des gesamten Verlaufs etwa eine gleich große Amplitude wie der Wechselanteil hat. Dies stimmt allerdings nur bei gleich großen transienten Zeitkonstanten ( $T_r' = T_s'$ ). Deshalb sinken der Gleich- und Wechselanteil mit ca. 62ms Zeitkonstante in diesem Fall gleich schnell ab.

Die Stromverläufe welche in der Legende der Abbildung 5.5 als „angenähert“ bezeichnet werden, sind jene, die näherungsweise im Kapitel 3.3.6 nach Gleichung (3.43) berechnet sind. Diese stimmen in den ersten Perioden gut überein, solange der Drehzahlunterschied nicht allzu groß ist.

Die Kurzschlussströme einer ASM klingen, wie in Abbildung 5.5 abzusehen ist, nach einiger Zeit völlig ab und tragen im Gegensatz zur Synchronmaschine nicht zum stationären KS-Strom bei.

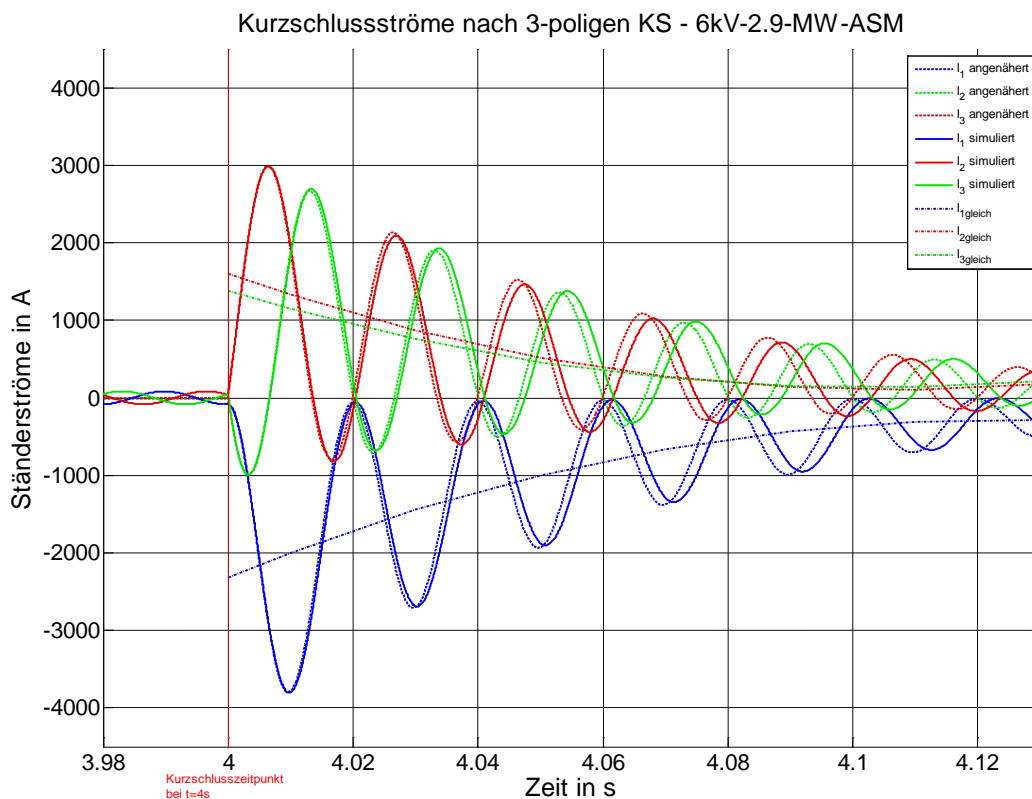


Abbildung 5.5 – 3-phasige Kurzschlussstromverläufe der 2,9-MW-ASM

In Tabelle 5.2 werden die Stromkennwerte der IEC60909 Berechnung (Abbildung 3.7) mit denen in der Simulation erhaltenen Ergebnisse verglichen. Hierbei wurden sie mit jenen dem in Abbildung 5.5 simulierten Ständerphasenstrom der Phase 1 verglichen, welcher den größten KS-Strom verursacht.

Tabelle 5.2 – Vergleich IEC und Simulation

	$I''_{k3M}$ in kA	$i_{p3M}$ in kA	$i_{k3M}$
IEC	1,7	4,2	0
Simulation	~1,7	3,8	0

In Abbildung 5.6 wird der dazugehörige Drehzahl-Drehmoment Verlauf abgebildet. Das erzeugte Drehmoment fängt beim Kurzschlusseintritt analog zum Strom mit der Netzfrequenz zu schwingen. Allerdings ist zu sehen, dass das Drehmoment wegen gleich großer transients Ständer- und Läuferzeitkonstante ca. doppelt so schnell gedämpft wird wie der Strom. Das maximale Drehmoment tritt nach 5ms auf und beträgt hier ca. 48kNm, was in etwa das 5,2 fache Nennmoment ist.

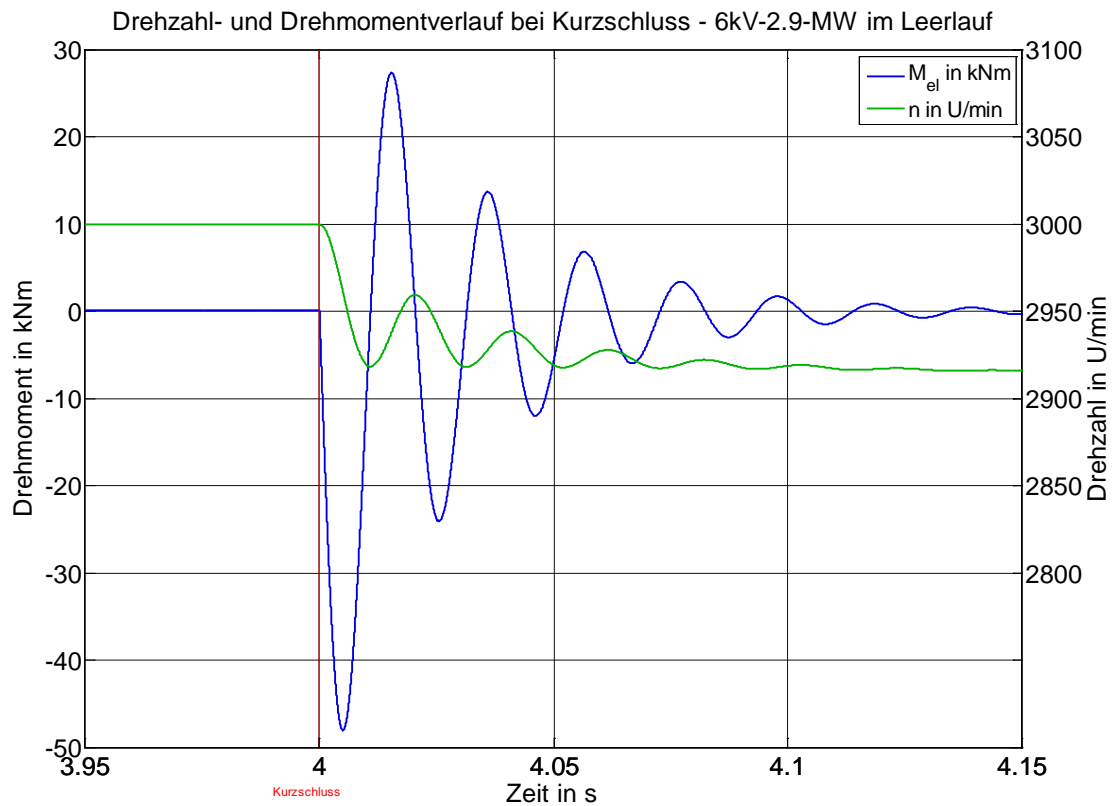


Abbildung 5.6 – Drehmoment und Drehzahl der 2,9-MW-ASM beim 3-poligem Kurzschluss

Das bei 3-poligen Kurzschlüssen stets negative erzeugte Moment hat eine schnelle Drehzahlabenkung zur Folge welche hier etwa 1,9% der Leerlaufdrehzahl beträgt. Nachdem die Drehmomentschwingung abgeklungen ist, wirkt nur noch das Reibmoment wonach die Maschine sehr langsam abgebremst wird. Falls das in Kapitel 5.1 berechnete Reibmoment konstant bei jeder Drehzahl wäre, käme die ASM in diesem Fall erst nach 9,3 h zum Stillstand.

### 5.4 Wiedereinschaltvorgang bei drehender Asynchronmaschine

Wird die ASM nach einem 150ms andauernden 3-poligen KS sofort wieder an das Netz mit allen 3 Phasen gleichzeitig wiedereingeschaltet, kommt es zum Ständerstromverlauf, wie es in Abbildung 5.7 gezeigt wird. Er unterscheidet sich nicht sehr von den Kurzschlussströmen in Abbildung 5.5 da der Drehzahlunterschied marginal ist. Lediglich ein Unterschied im etwas höheren Strom beim Wiedereinschalten besteht welcher durch die Überlagerung des nicht ganz abgeklungenen KS-Stromes entsteht.

Die Ständerströme die in der Legende in Abbildung 5.7 mit „angenähert“ bezeichnet sind werden mithilfe der Gleichungen (3.44) und (3.45) berechnet. Sie zeigen wie erwartet anfangs eine gute Übereinstimmung ehe die Drehzahlveränderung eine Rolle zu spielen beginnt.

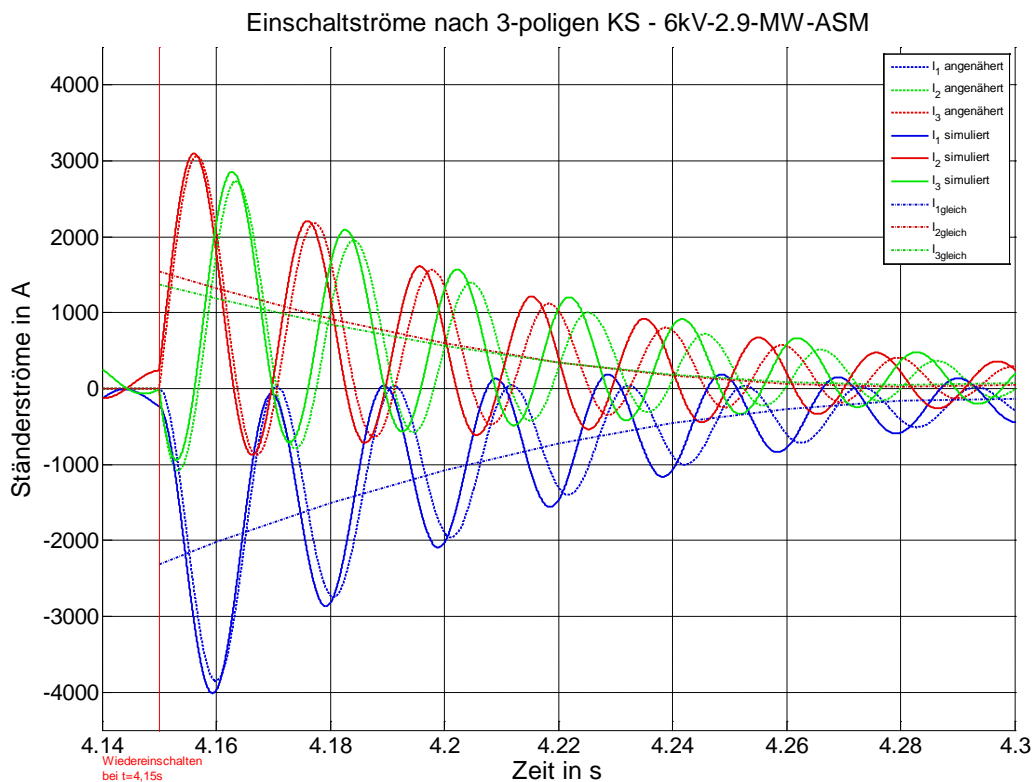


Abbildung 5.7 – Ständerströme der 2,9-MW-ASM nach dem Wiedereinschalten

Der Drehmoment und Drehzahlverlauf in Abbildung 5.8 zeigt neben dem bekannten mit 50Hz pulsierenden Anteil auch einen überlagerten niederfrequenten periodischen Verlauf welcher auch in Abbildung 5.2 bzw. Abbildung 5.3 beim Erreichen der Leerlaufdrehzahl zu sehen ist. Physikalisch ist dies durch das Zusammenspiel des Ständerdrehfeldes und Rotorgleichfeldes gemeinsam mit der Massenträgheit zu erklären. [3]

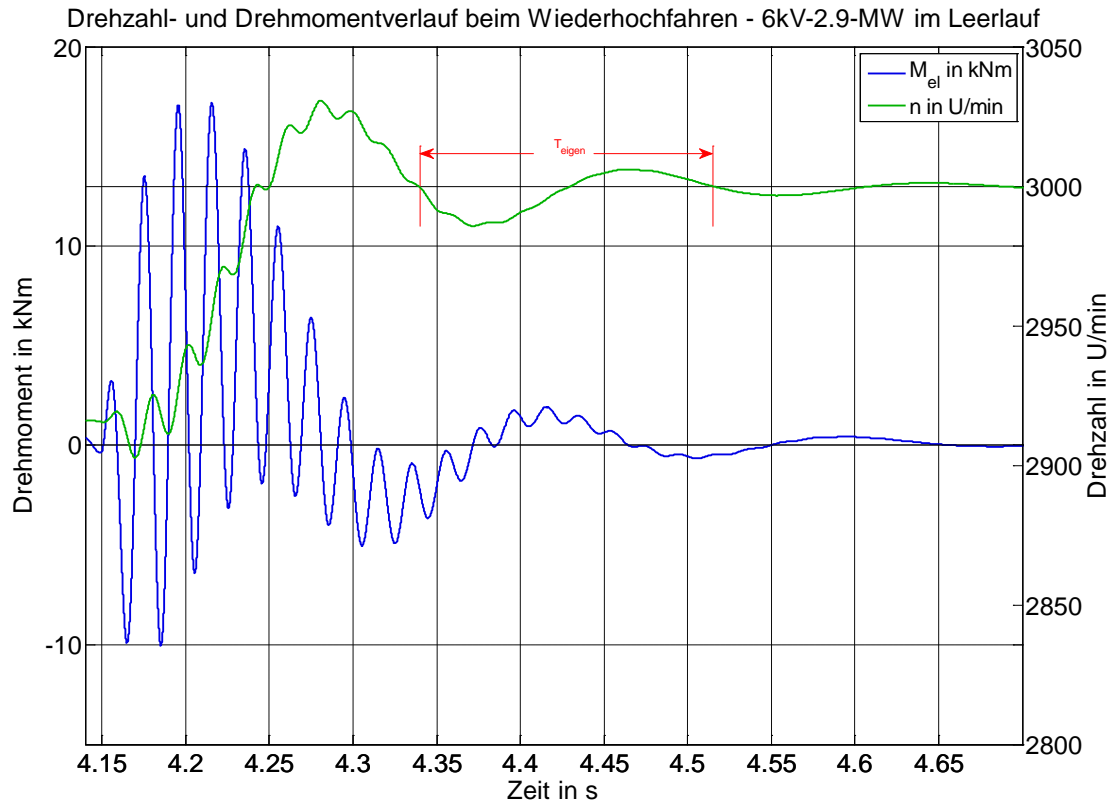


Abbildung 5.8 – Drehzahl und Drehmoment beim Wiederhochfahren der 2,9-MW-ASM

Die Drehzahl bzw. das Drehmoment pendelt sich mit der in Abbildung 5.8 gemessenen Eigenfrequenz  $f_{eigen} = \frac{1}{T_{eigen}}$  ein und beträgt bei dieser Maschine etwa 5,7Hz. Berechnen lässt sich die Eigenfrequenz für diese ASM folgenderweise:

$$f_{eigen} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot p^2}{J_M} \cdot \frac{1 - \sigma}{L_s} \cdot \left(\frac{U_N}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{3}}\right)^2 - \frac{1}{(2 \cdot T_s')}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 1^2}{38,8 \text{ kgm}^2} \cdot \frac{1 - 0,04}{0,00693 \text{ H}} \cdot \left(\frac{6000 \text{ V}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot \sqrt{3}}\right)^2 - \frac{1}{(2 \cdot 0,062)}} \approx 5,7 \text{ Hz}$$

Die Eigenschwingung kann dabei durch größere Läuferwiderstände und ein erhöhtes Trägheitsmoment verkleinert werden wodurch der Drehzahlverlauf beim Erreichen der Betriebsdrehzahl „flacher“ wird. [3]

## 6 Einfluss von Zuleitung und der mechanischer Last einer Asynchronmaschine im Niederspannungsnetz

In diesem Kapitel werden in Abhängigkeit der Anschlusskabellänge und der mechanischen Last 1 (siehe Tabelle 4.7) Simulationen durchgeführt um deren Auswirkungen auf die obengenannten 3 verschiedenen dynamischen Vorgänge zu erläutern. Diese sind der Hochlauf bei Rotorstillstand, der 3-polige KS und das Wiederhochfahren nach einem Netzausfall.

Die Nachbildung des zu simulierenden NS-Netzes zeigt die Abbildung 6.1. Der 3-polige KS liegt direkt an der Sekundärseite des NS-Transformators (Trafo 3) womit die ASM mit dem Verteilnetzkabel (Kabel 2) und dem Anschlusskabel (Kabel 3) verbunden ist.

Es wird ein 2-poliger 11kW Siemensmotor der Effizienzklasse IE2 verwendet. Dessen Daten sind wie im vorigen Kapitel aus dem Anhang C zu entnehmen.

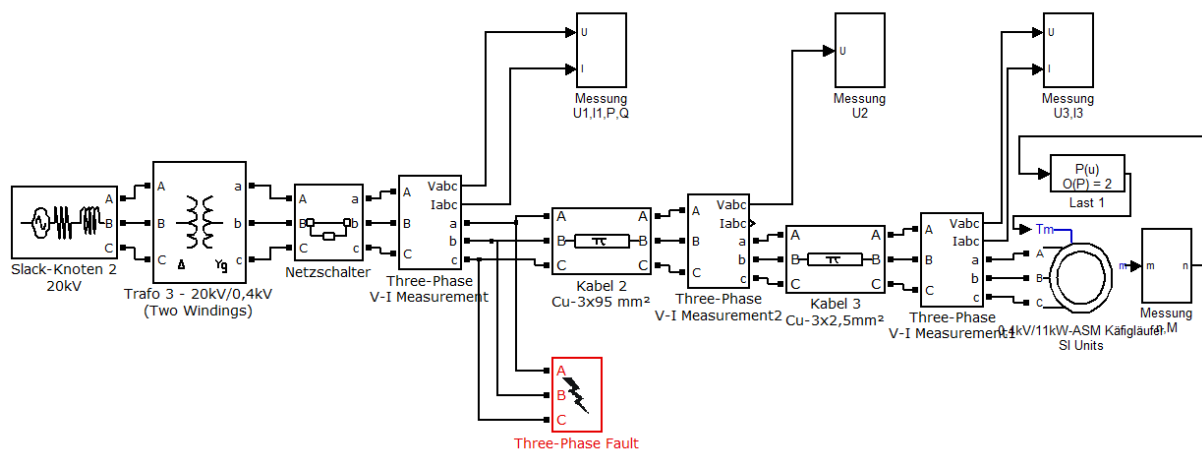


Abbildung 6.1 – Simulationsmodell der 11-kW-ASM mit Last M-n²

### 6.1 Parametrierung mit Leerlauf- und Kurzschlussversuch

Die Bestimmung der ASM Impedanzen erfolgt unter Zuhilfenahme der Daten aus dem Kurzschluss- und Leerlaufversuch (Anhang C). Die Berechnung wird gemäß [17] durchgeführt.

Aus dem Kurzschlussversuch lassen sich für die 2-polige ASM die Längsimpedanzen aus dem ESB in Abbildung 3.5 berechnen:

$$R_M = \frac{P_{kM}}{3 \cdot (I_{kM}/\sqrt{3})} = \frac{54,27}{3 \cdot (154,7/\sqrt{3})^2} = 2,27 \Omega$$

$$Z_M = \frac{U_N}{I_{kM}/\sqrt{3}} = \frac{400}{154,7/\sqrt{3}} = 4,48 \Omega$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = 3,86 \Omega$$

$$R_r' = R_M - R_s = 2,27 - 0,79 = 1,48 \Omega$$

$$L_M = \frac{3,86}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0123 H$$

Wie bereits im Kapitel 5.1 wird die Induktivität im Längszweig des Ersatzschaltbilds auf den Ständer und Läufer gleich aufgeteilt.

$$L_{sl} = L_{rl}' = \frac{L_M}{2} = 0,0061 H$$

Aus dem Leerlaufversuch (in Dreieckschaltung) wird bei Vernachlässigung der Eisenverluste und Ständerstreureaktanz die Hauptreaktanz berechnet.

$$X_m = \frac{U_0}{I_0/\sqrt{3}} = \frac{399,8}{4,82} = 83 \Omega$$

$$L_m = \frac{83}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,264 H$$

Mithilfe der Leerlaufverluste erhält man nach Abzug der Stromwärmeverluste des Ständers die Eisen- und Reibverluste worauf schließlich die letzteren aus Mangel an Daten unter Berücksichtigung von [18] abgeschätzt werden.

$$P_{Fe+Reib} = P_0 - 3 \cdot \left(\frac{I_0}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot R_s = 523 - 3 \cdot \left(\frac{8,35}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 0,79 = 467,9 W$$

$$P_{Reib} \approx 200 W \text{ geschätzt}$$

$$F = \frac{P_{Reib}}{\omega_n^2} = 0,002 Nms$$

Die Streuziffer und Zeitkonstanten lassen sich gleich wie im Kapitel 5.1 berechnen.

**Tabelle 6.1 – Parameter der 0,4kV-11-kW-ASM**

	ASM mit p=1
$R_s$	0,79 $\Omega$
$R_r'$	1,48 $\Omega$
$L_{sl} = L_{rl}'$	6,14 mH
$L_m$	0,264 H
$\sigma$	0,045
$P_{Reib}$	200 W
$T_s'$	15,3 ms
$T_r'$	8,1 ms

## 6.2 Einfluss beim Anfahren im Stillstand

Es wird die Anschlusskabelleitung (Kabel 3) von 2,5 m<sup>2</sup> zwischen dem Verteilnetz-kabel (Kabel 2) und den Motoranschlussklemmen variiert. Es werden die Kabellängen von 10, 15, 20, 25, 30, 40 und 50 Metern simuliert. Das Verteilnetz-kabel (Kabel 2) ist dabei konstant mit 130m gehalten.

Zuerst wird der Leerlauf der Maschine betrachtet. In Abbildung 6.2 werden der Ständerstrom eines Phasenstroms und dessen Effektivwert im Anlauf gezeigt. In der Y-Achse ist der dazugehörige Spannungsabfall am Verteilnetz-kabel abgebildet. Durch die höhere Impedanz bei größeren Kabellängen ist ersichtlich, dass die Ständerströme anfangs durch die geringere Spannung an den Motoranschlussklemmen kleiner sind. Durch den erhöhten Widerstand auf der Ständerseite sind auch die Anlaufzeitkonstanten kleiner (siehe Gleichung 3.30) wodurch anfangs auch die Anlaufströme dementsprechend kleiner sind. Der Stoßstrom beim Anfahren ist beispielsweise beim Vergleich der Stromverläufe in Abbildung 6.2 bei Kabellängen von 50m um etwa 5% kleiner als bei 10m.

Im späteren Zeitverlauf bei ca.  $t=0,2s$  sinkt jedoch der Strom mit der geringeren Kabellänge schneller ab. Dieser Umstand ist dem schnellen Drehzahlanstieg zu verdanken wodurch sich die elektrischen Zeitkonstanten verringern. [3]

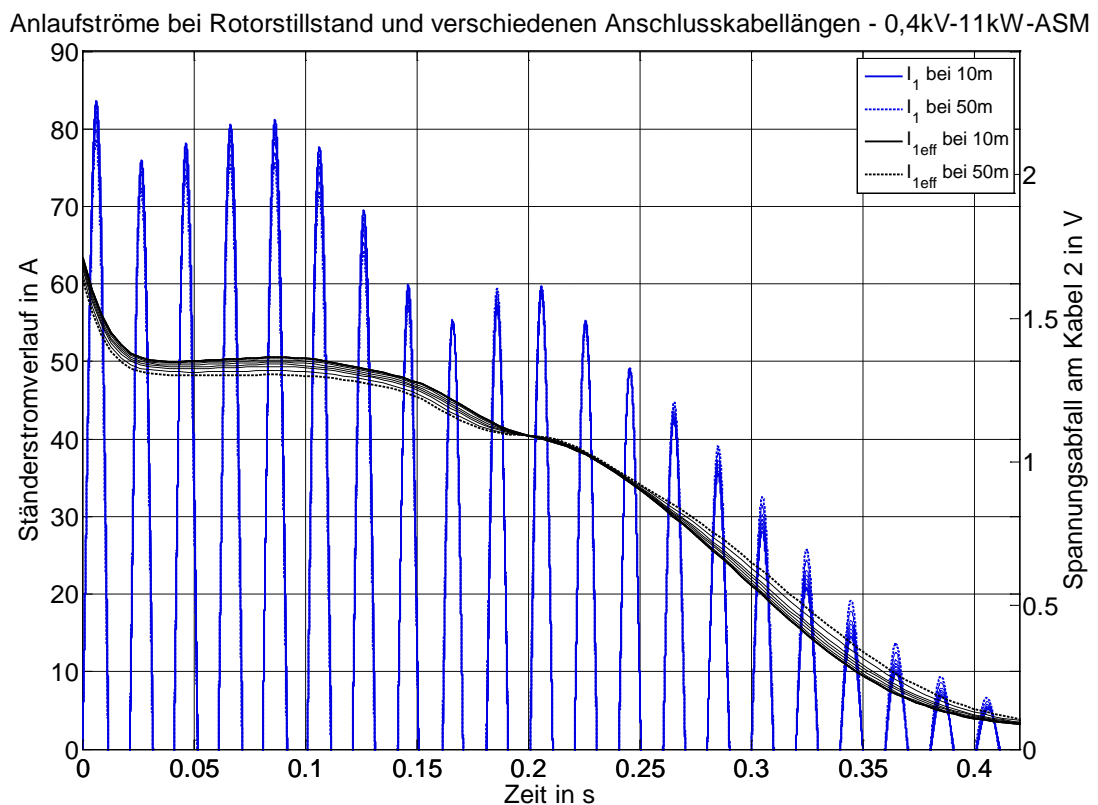


Abbildung 6.2 – Ständerstromverlauf  $I_1$  im Anlauf bei verschiedenen Anschlusskabellängen und leerlaufender ASM



Bei mechanischer Belastung der Maschine mit der Last 1 (siehe Tabelle 4.7) ändert sich in Bezug auf den dynamischen Stromverlauf am Anfang kaum etwas. Durch die längere Anlaufzeit bei mechanischer Belastung wird lediglich der Unterschied zwischen den Zeitkonstanten kurz vor dem Erreichen des stationären Laststroms bei verschiedenen Kabellängen größer und markanter als im Leerlauf.

Wird der Drehzahlverlauf in Abbildung 6.3 betrachtet, so ist festzustellen, dass bei  $M_L \sim n^2$  (schwarze Linie) die Anlaufzeit gemäß Gleichung (3.41) ansteigt und länger braucht als im Leerlauf (blaue Linie). Dadurch dass das erzeugte Drehmoment mit dem Quadrat der Ständerspannungen sinkt, führt die Erhöhung der Kabellänge zu einer zusätzlich leicht höheren Anlaufzeit.

Die Anlaufzeit in Abhängigkeit von der Kabellänge des Anschlusskabels ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Als Anlaufzeit gilt hier der Zeitpunkt der Spannungszuschaltung bis zum Erreichen von 99% der stationären Betriebsdrehzahl. In diesem Fall steigt die Anlaufzeit bei Betrachtung der Ausgleichsgerade in etwa linear mit der Kabellänge an und beträgt im Leerlauf 0,45 ms je 10m und bei mechanischer Belastung 0,8 ms je 10m.

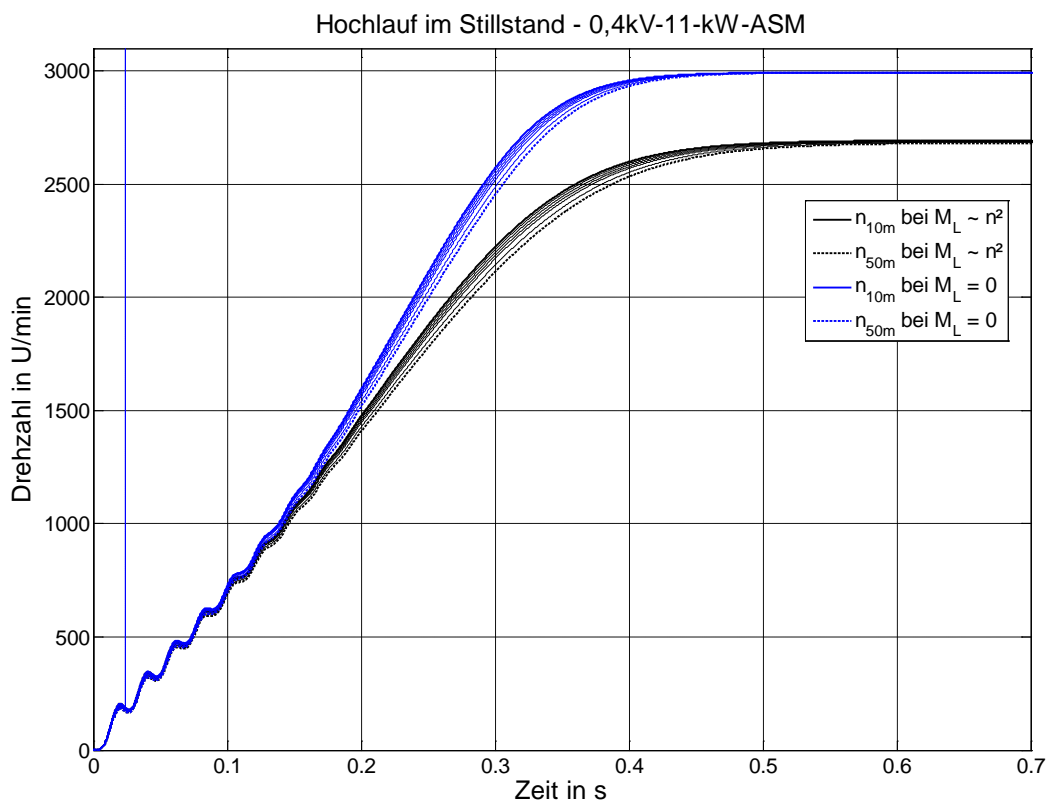


Abbildung 6.3 – Drehzahlverlauf beim Hochlauf im Stillstand für  $M_L = 0$  und  $M_L \sim n^2$

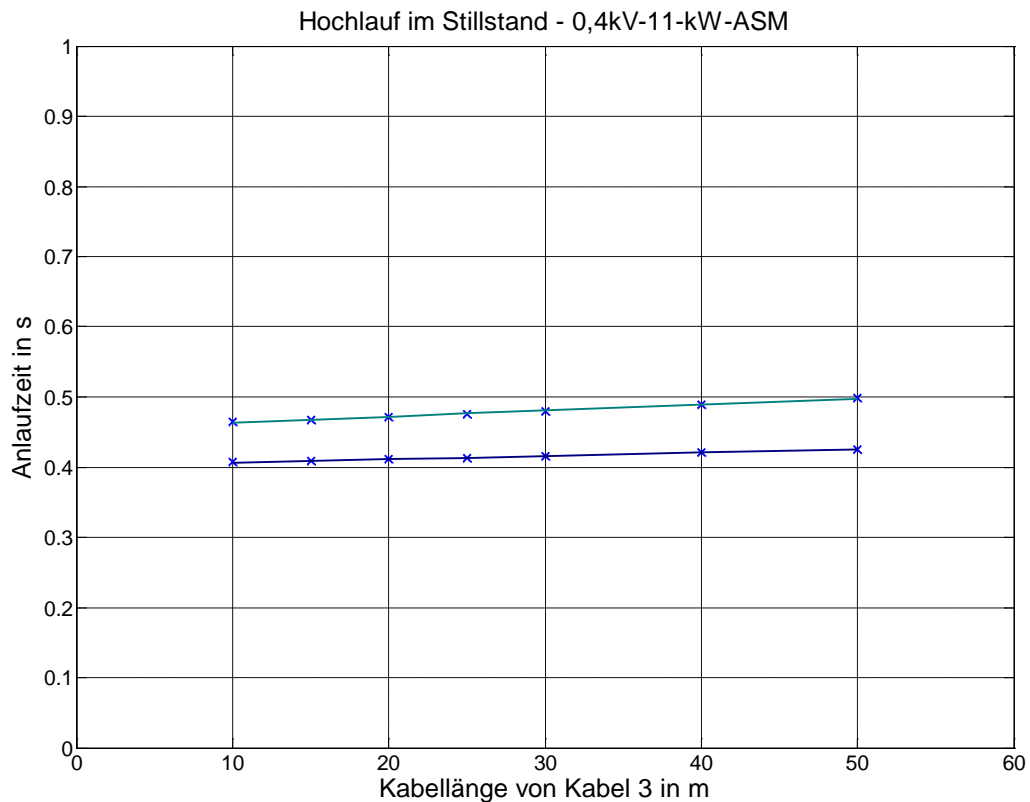


Abbildung 6.4 – Anlaufzeiten bei verschiedenen Kabellängen für  $M_L = 0$  und  $M_L \sim n^2$

Bei Simulationen mit Kabeln unter Vernachlässigung von Widerständen sind durch den geringen Anteil des Induktivitätsbelags (siehe Tabelle 4.5) vernachlässigbar kleine Unterschiede in der Anlaufzeit zu erwarten und werden hier deshalb in diesen Untersuchungen nicht explizit betrachtet.

### 6.3 Einfluss beim 3-poligen Kurzschluss

Der 3-polige KS wird direkt nach der Niederspannungstransformatorstation simuliert, wie in Abbildung 6.1 zu sehen ist. Durch Variation der Anschlusskabellänge (Kabel 3) wird bei der mit stationärer Betriebsdrehzahl umlaufenden Maschine beim Erreichen des maximalen Spannungsmomentanwertes der Phase 1, der KS angelegt.

Die Abbildung 6.5 zeigt den 3-phasigen Kurzschlussstromverlauf der leerlaufenden ASM bei Kabellängen von 10 bis 50 m. Wie zu erkennen ist, sinkt im Allgemeinen der Kurzschlussstrom bei längeren Kabeln auf geringere Werte. Diese Tatsache kann man auch anhand der Gleichung (3.43) erkennen, wo die Ständerzeitkonstante bei vernachlässigbarer Drehzahländerung, mit steigender Kabellänge abnimmt. Wird zum Beispiel der Stoßkurzschlussstrom der Phase 1 in Abbildung 6.5 betrachtet, so sinkt dieser bei 50m auf einen um 6% kleineren Wert als bei 10m.

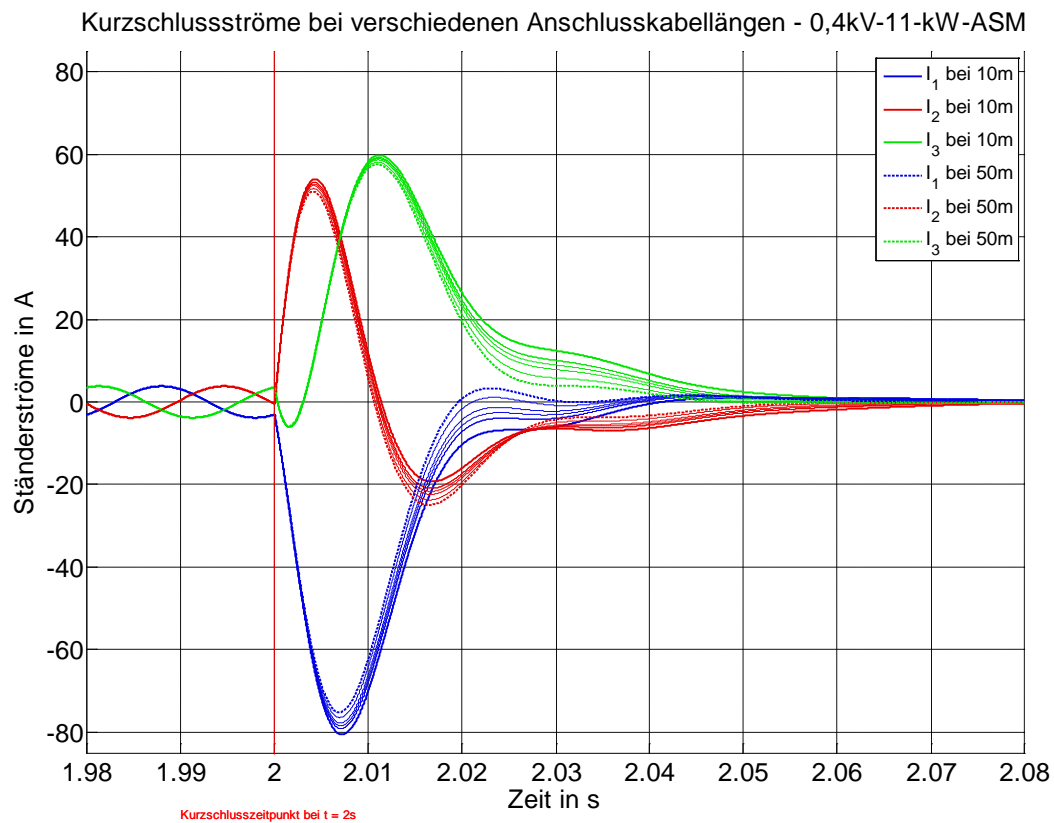


Abbildung 6.5 – Ständerkurzschlussströme der 11-kW-ASM bei verschiedenen Kabellängen im Leerlauf

Werden die Kurzschlüsse bei mechanischer Belastung und zu gleichen Spannungszeitpunkten wie im zuvor gesehenen Leerlauf gemacht, so sind die Kurzschlussstromverläufe insbesondere wegen der verschiedenen stationären Stromwerte vor dem KS nicht gleich. Dies ist in Abbildung 6.6 zu sehen, wo die ASM mit der Last 1 (siehe Tabelle 4.7) sogar geringere KS-Ströme aufweist als im Leerlauf. Hier spielt auch der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung eine Rolle welcher im Leerlauf größer ist ( $\cos \varphi \approx 0.1$ ). Beim Vergleich von Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 ist zum Beispiel der Stoßkurzschlussstrom von  $I_1$  bei Last um etwa 12% kleiner als jener im Leerlauf.

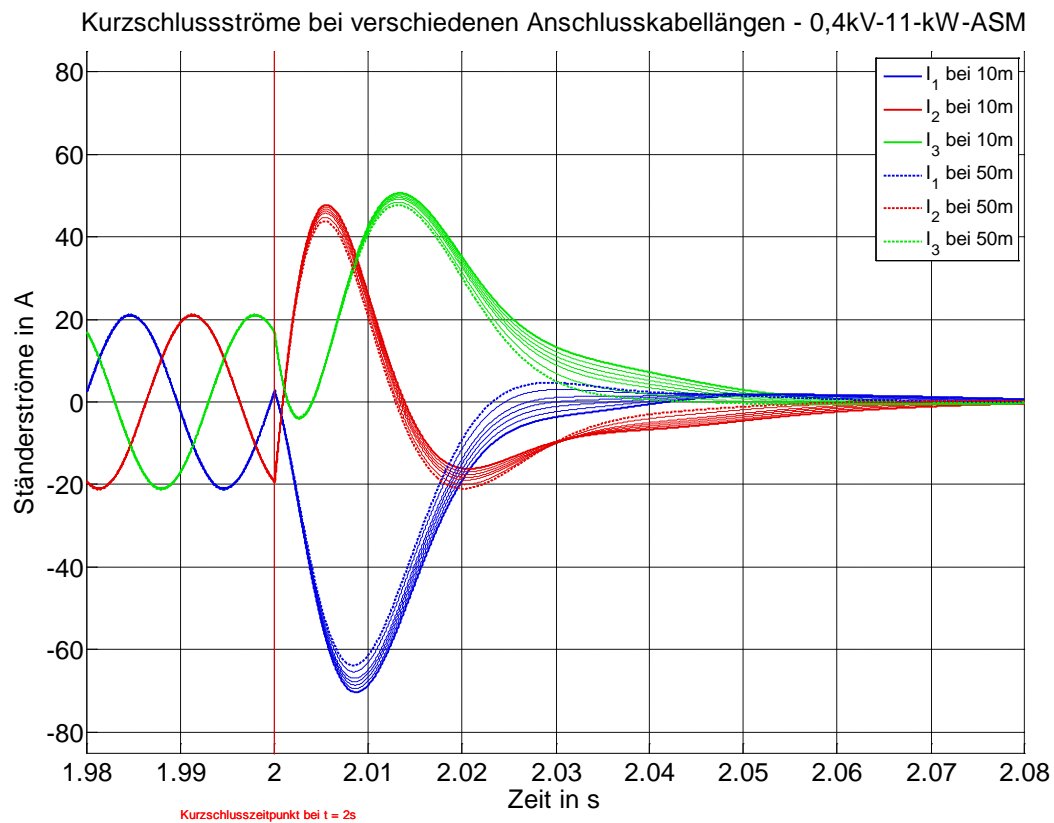


Abbildung 6.6 – Ständerkurzschlussströme der 11-kW-ASM bei verschiedenen Kabellängen mit  $M_L \sim n^2$

Die Verringerung des Kurzschlussstroms mit der Kabellänge verursacht auch ein im Mittel kleineres negatives Drehmoment im KS sodass - wie in Abbildung 6.7 zu sehen ist - eine kleinere Drehzahländerung resultiert.

Wie hoch der Drehzahlabfall beim 3-poligen Kurzschluss ist, hängt gemäß Gleichung (3.39), vom Lastmoment abgesehen, nur vom elektrisch erzeugten negativen Drehmoment und Massenträgheitsmoment ab. Letzteres ist konstant und somit kann in Abbildung 6.8 der Drehzahlabfall in Abhängigkeit der Kabellänge aufgetragen werden. Die Drehzahländerung ist in % angegeben und bezieht sich auf die Betriebsdrehzahl vor dem KS.

Das Absinken der Drehzahl liegt nach Abbildung 6.8 im Bereich von 4-5% und ändert sich nicht linear mit der Kabellänge.

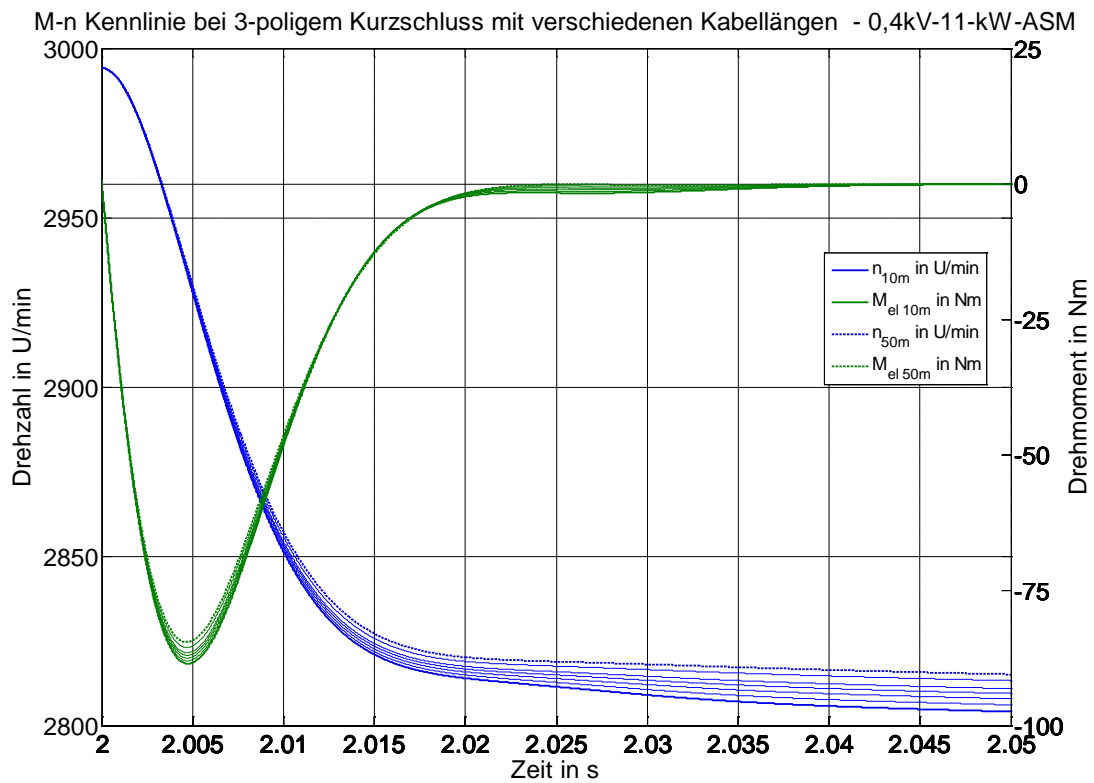


Abbildung 6.7 – Momenten- und Drehzahlverlauf beim 3-poligen Kurzschluss mit verschiedenen Kabellängen im Leerlauf

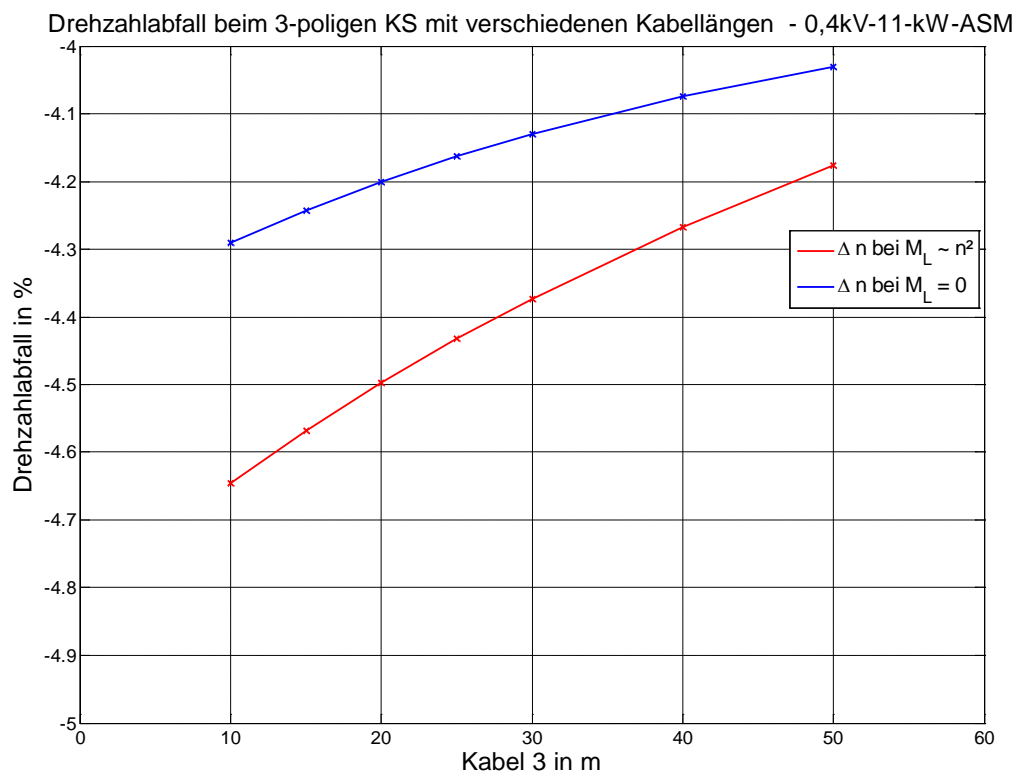


Abbildung 6.8 -  $\Delta n$  beim 3-poligen Kurzschluss mit verschiedenen Kabellängen

### 6.4 Einfluss beim Wiederhochfahren

Nachdem der 3-polige KS aufgehoben ist liegt wieder die Netzspannung an der ASM an. Dies entspricht einer Wiedereinschaltung allerdings mit rotierender Maschine. Wie in Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 zu sehen ist sind die KS-Ströme vom KS-Zeitpunkt weg bereits nach etwa 50ms vollständig abgeklungen. Dies bedeutet beim Wiedereinschalten nach 150ms ein stromloses Einschalten einer umlaufenden ASM (siehe Kapitel 3.3.7).

Die Abbildung 6.9 zeigt den invertierten Ständerstromverlauf  $I_1$  und dessen Effektivwert der leerlaufenden ASM zum Wiedereinschaltzeitpunkt  $t = 2,15s$ . Der Einschaltstrom wurde in der Darstellung invertiert, um diesen mit dem Effektivwert auf die gleiche Achse zu bringen, da zum Zeitpunkt  $U_1 = -\frac{\hat{u}_1}{2}$  eingeschaltet wird. Der Effektivwert wurde wie bereits im Kapitel 6.2 mit 20ms Perioden ermittelt und anschließend interpoliert.

Einschaltströme nach 3-poligem KS mit verschiedenen Anschlusskablängen - 0,4kV-11-kW-ASM

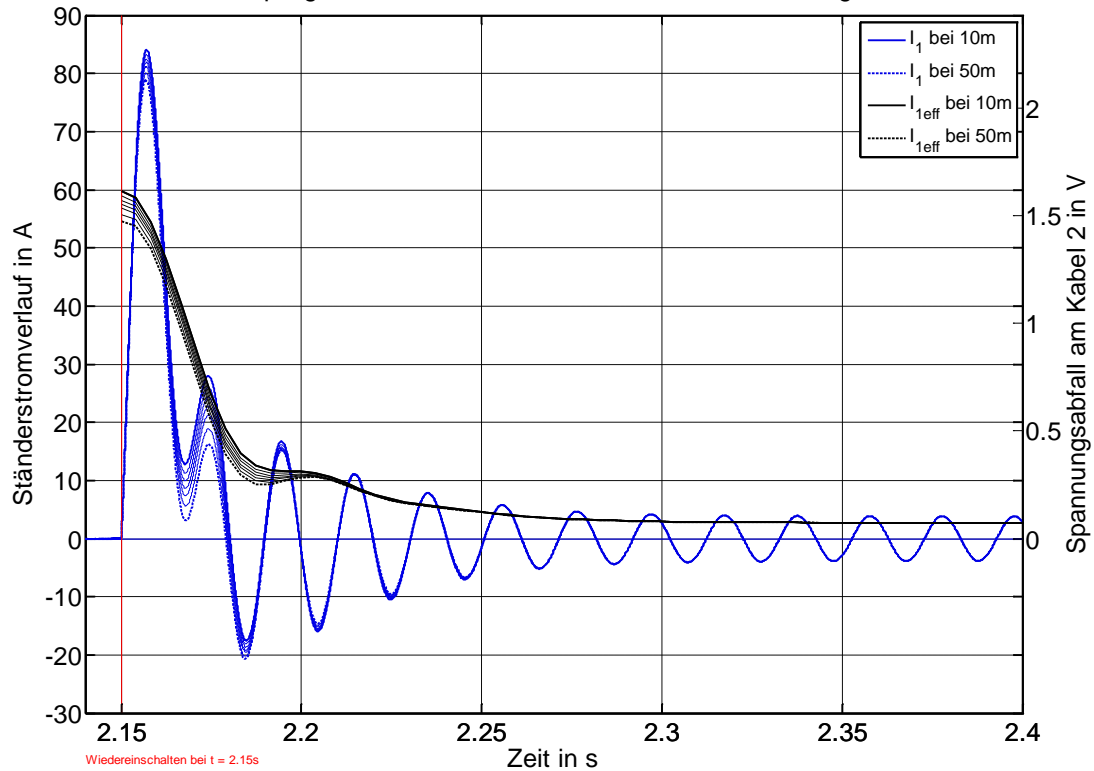


Abbildung 6.9 – Ständerstrom beim Wiedereinschalten mit verschiedenen Kabellängen  $M_L = 0$

Bei Betrachtung der Flussgleichungen (3.44) und (3.45) sieht man dass die dortigen Zeitkonstanten  $T'_s$  und  $T'_r$  in etwa mit denen in Abbildung 6.9 übereinstimmen. Dies liegt daran, wie später zu sehen sein wird, dass es kaum zu einer Drehzahländerung der leerlaufenden ASM während des Kurzschlusses gekommen ist. Anders ist dies in Abbildung 6.10 bei belasteter Maschine. Hier sind die Zeitkonstanten der Ausgleichsströme für den Hochlauf bedingt durch die niedrigere Drehzahl vor dem Einschalten größer.

Einschaltströme nach 3-poligem KS mit verschiedenen Anschlusskabeln - 0,4kV-11-kW-ASM

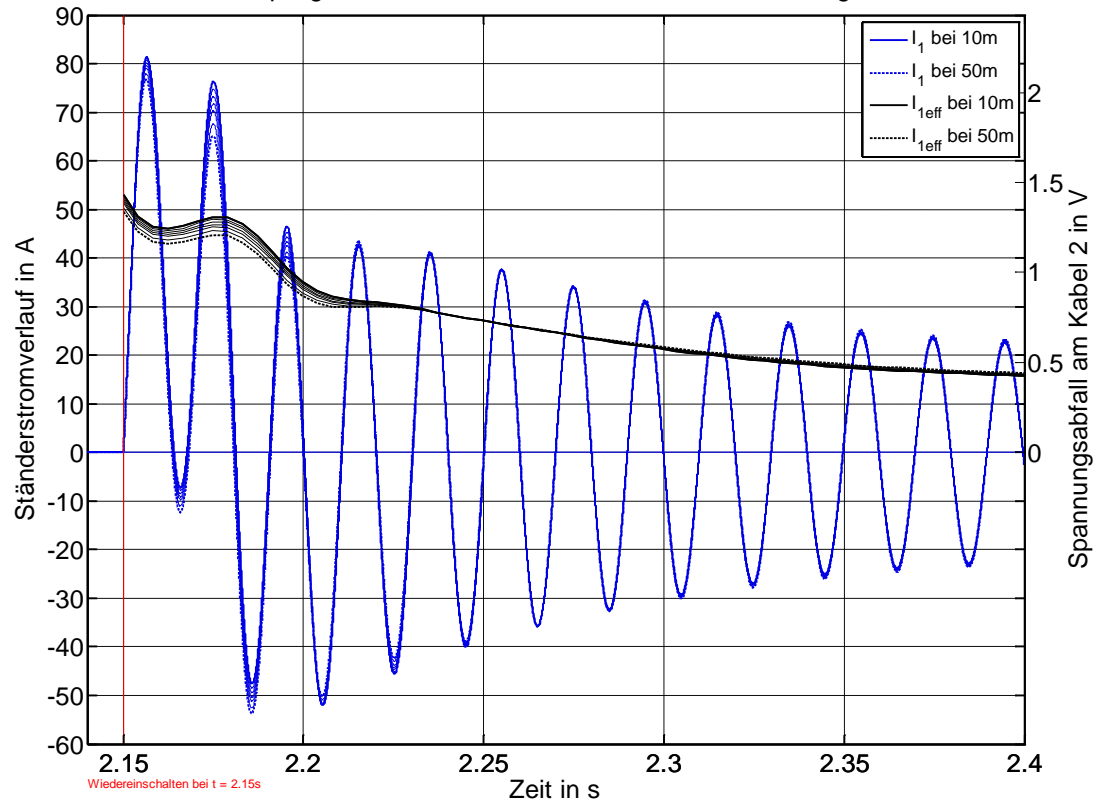


Abbildung 6.10 – Ständerstrom beim Wiedereinschalten mit verschiedenen Kabellängen  $M_L \sim n^2$

Die Simulationen bei verschiedenen Kabellängen zeigen wie bereits in Kapitel 6.2 den gleichen Einfluss. So ist etwa der Stoßkurzschlussstrom bei 50m Anschlusskabel im Leerlauf und bei Last um etwa 6% kleiner als bei 10m.

Wird die stromlose ASM mit allen 3 Phasen gleichzeitig wiedereingeschaltet, so entsteht gleich wie beim Anfahren ein stark mit etwa 50 Hz schwankendes Drehmoment. In Abbildung 6.11 ist dies bei der ASM für den unbelasteten Hochlauf gezeigt. Das elektrisch erzeugte Drehmoment schwingt um den stationären Arbeitspunkt und ist hier anfangs negativ. Gleiches gilt für die ASM mit Last in Abbildung 6.12. Jedoch schwingt das Drehmoment hier um den stationären Nennarbeitspunkt. Dies bedeutet auch einen anfangs geringen Drehzahlabfall.

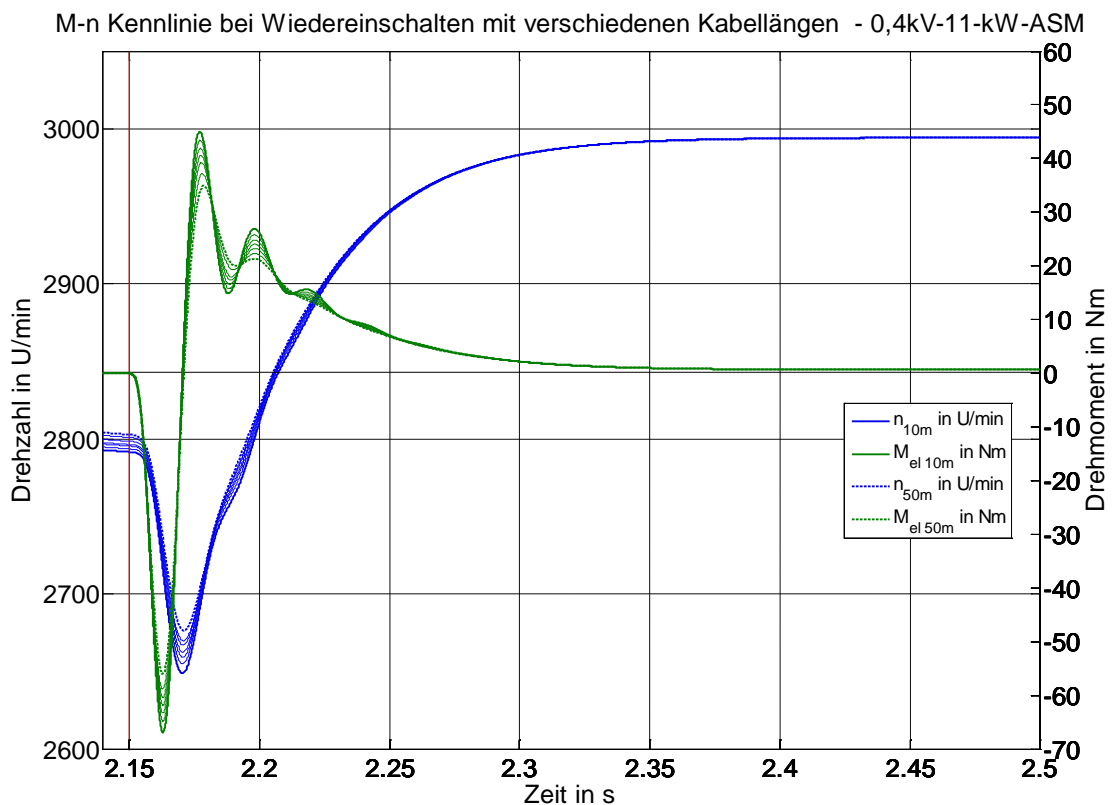


Abbildung 6.11 – Momenten- und Drehzahlkennlinie beim Wiedereinschalten mit  $M_L = 0$



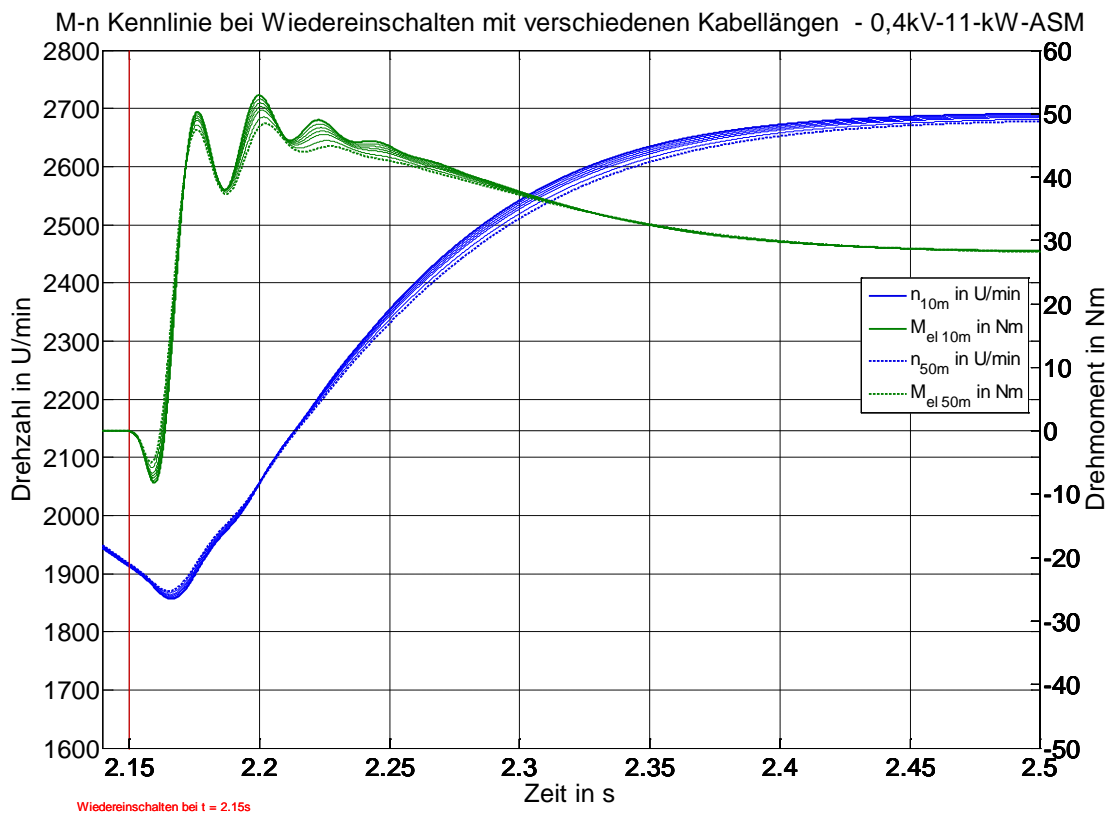


Abbildung 6.12 - Momenten- und Drehzahlkennlinie beim Wiedereinschalten mit  $M_L \sim n^2$

Die Kabellänge wirkt sich bei leerlaufender als auch belasteter ASM wie in den vorigen Kapiteln beschrieben auf die Zeitkonstanten aus. Längere Kabeln haben eine größere Dämpfungen zur Folge wie in den Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 zu sehen ist.

In Abbildung 6.13 sind die Zeiten aufgetragen, die die ASM vom Zeitpunkt des Wiedereinschaltens bis zum Erreichen von 99% der Betriebsdrehzahl braucht. Der Einfluss des Kabels wirkt sich hier annähernd linear auf die Anlaufzeit aus (vgl. Abbildung 6.4). Bei Belastung steigt sie in etwa gleich wie im Kapitel 6.2 mit 0,18% pro m an. Im Leerlauf hingegen ergeben sich dadurch wegen der geringen stationären Momente kaum Unterschiede in der Wiederanlaufzeit.

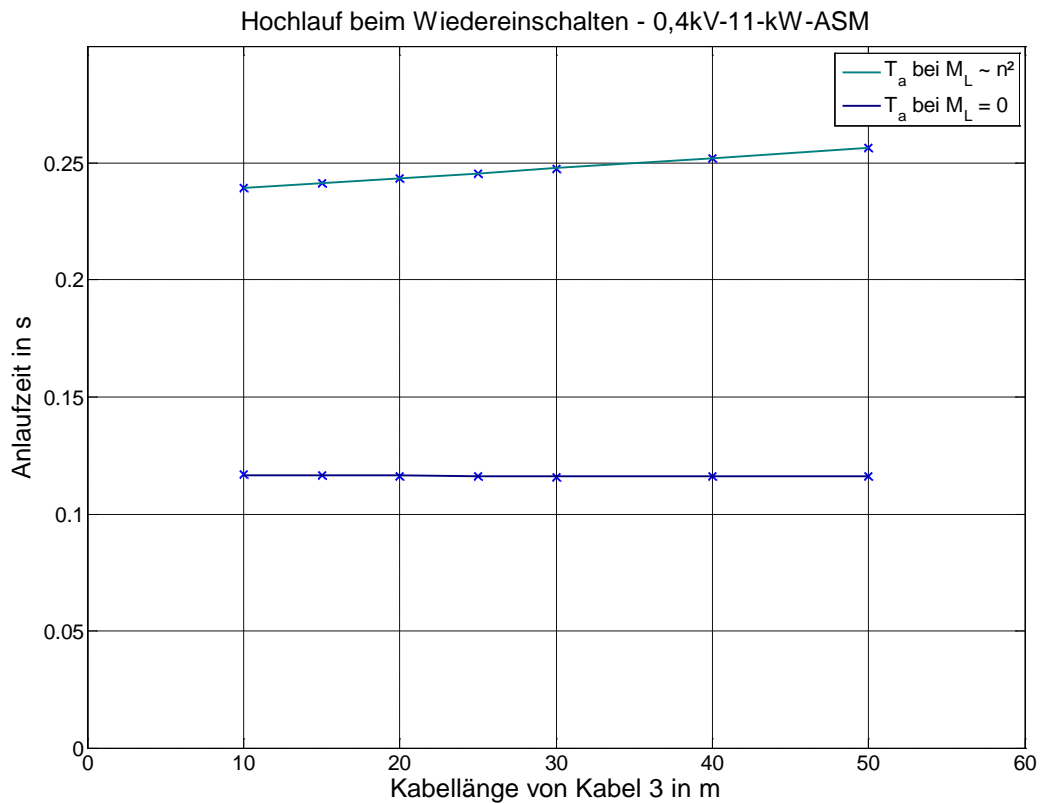


Abbildung 6.13 – Wiederanlaufzeiten bei verschiedenen Kabellängen für  $M_L = 0$  und  $M_L \sim n^2$

**Tabelle 6.2 – Vergleich von Anlaufzeiten der 11-kW-ASM**

Mechanische Last	$M_L = 0$		$M_L \sim n^2$	
	Stillstand	Wiedereinschalten	Stillstand	Wiedereinschalten
$\Delta t$	0,071 s	0,117 s	0,209 s	0,239 s
Drehzahlbereich	zwischen 2791 U/min und 2964 U/min		zwischen 1912 U/min und 2694 U/min	
$\Delta t$ - Verhältnis	~61% länger beim Wiedereinschalten		~14 % länger beim Wiedereinschalten	

Werden die Anlaufzeiten der wiedereingeschalteten ASM mit der vom Stillstand anfahrenen im gleichen Drehzahlbereich verglichen, so ergeben sich, wie in Tabelle 6.2 zu sehen ist, für die umlaufende ASM größere zeitliche Unterschiede. Die Ursache dafür bildet der dynamische Drehmomentverlauf, welcher in Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 negativ ist und die ASM anfangs abbremst, ehe sie sich stetig mit der statischen M-n-Kennlinie an die Betriebsdrehzahl nähert.

Die hier untersuchte 11-kW-ASM verursacht beim gleichzeitigen Einschalten aller 3 Phasen bei drehendem Rotor immer ein anfänglich negatives Drehmoment. Jedoch kann beim Wiederhochfahren am Anfang auch ein positives Drehmoment gebildet werden. Der Drehmomentverlauf beim Wiedereinschalten hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab:  
[11]

Schlupf  $s$

Transiente Zeitkonstanten  $T_r'$  und  $T_s'$

Winkel zwischen Ständerfluss und Läuferfluss

## 7 Vergleich zwischen Mittelspannungsasynchronmaschine und Niederspannungsasynchronmaschine

Ein wichtiger Unterschied zwischen großen und kleinen Asynchronmaschinen ist generell das Verhältnis zwischen Nennmoment und Trägheitsmoment. Dabei wächst bei größer werdenden Maschinen das Nennmoment bzw. Leistung im geringeren Maße an als das Massenträgheitsmoment. In [3] wird dies mit Gleichung (7.1) abgeschätzt. Diese Abschätzung stimmt beim Vergleich zwischen der MS-ASM in Kapitel 5 und der NS-ASM in Kapitel 6 gut überein.

$$\frac{J_1}{J_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{5/4} \quad (7.1)$$

Durch den ungleichen Anstieg von  $\frac{P}{J}$  wirkt sich das nach Gleichung (4.34) auf die Anlaufzeit aus. Betrachtet man die untersuchten Asynchronmaschinen, so ist das Verhältnis ungleich. Für die MS-ASM beträgt das  $\frac{P}{J}$  Verhältnis  $74\,742\,s^{-3}$  und bei der NS-ASM  $244\,444\,s^{-3}$ . Dies bedeutet für die 11-kW-Maschine einen um 3,27 höheres Verhältnis. Dadurch, dass beide Maschinen die gleiche Nenndrehzahl haben, braucht demzufolge die MS-ASM theoretisch eine um diesen Faktor höhere Anlaufzeit. Jedoch entspricht dies nicht der tatsächlichen Zeit bis zum Erreichen der Betriebsdrehzahl, da die NS-ASM durch den relativ groß eingestellten Rotorwiderstand ein großes Anzugsmoment besitzt und somit schneller hochfährt. Dadurch liegt das Verhältnis der Anlaufzeit beider Motoren bei Betrachtung der Drehzahlkennlinien bei etwa 5.

Für die Netzbetrachtung bedeutet dies einen um das ca. 5-fache länger andauernden Anlaufvorgang und führt somit zu länger anliegenden hohen Spannungsabfällen an den Leitungsimpedanzen. Die transienten Zeitkonstanten als auch Anlaufzeitkonstanten aber ändern sich aufgrund der Impedanzen nicht im exakt gleichen Verhältnis mit der Anlaufzeit.

In Tabelle 7.1 sind die Unterschiede der Zeitkonstanten und Anlaufzeiten der untersuchten Asynchronmaschinen aufgezeigt.

**Tabelle 7.1 – Unterschiede der Zeitkonstanten und Anlaufzeiten**

	2,9 MW – ASM	11 kW - ASM	Verhältnis
Tatsächliche Anlaufzeit	~2,7 s	~0,5 s	5,4
$T'_s$	62,1 ms	15,3 ms	4,1
$T'_r$	62,1 ms	8,1 ms	7,6
$T_a$	3 s	0,69 s	4,35
$T_b$	30 ms	5,4 ms	5,5

Werden die 3-poligen Kurzschlussvorgänge beider Asynchronmaschinen in den Kapiteln 5.3 und 6.3 betrachtet, so erkennt man, dass der Drehzahlabfall im Kurzschlussfall und Leerlauf bei der NS-ASM bezogen zu Nenndrehzahl etwa doppelt so groß ist. Dies kommt vor allem wegen dem nicht linearen  $\frac{P}{J}$  Verhältnis. Jedoch spielt auch das im Mittel erzeugte negative Drehmoment während des Kurzschlusses eine Rolle und ist bei der MS-ASM bezogen zu seinem Nennmoment größer. Demnach ist festzuhalten, dass das negative Drehmomentmittel bei der größeren Maschine verhältnismäßig größer ist; allerdings dies durch das große Trägheitsmoment es dennoch zu einer geringeren Drehzahländerung führt (siehe Tabelle 7.2).

**Tabelle 7.2 – Drehzahl- und Drehmomentvergleich im Kurzschlussfall und Leerlauf**

	2,9 MW – ASM	11 kW - ASM
$M_{mittel}$	-2174 Nm	-5,78 Nm
$M_{mittel}$ bez. auf $M_N$	23,4 %	16,5 %
$\Delta n$ bez. auf $n_n$	1,9%	4,2%

Wegen der geringeren Drehzahlabenkung bzw. des größeren Massenträgheitsmoments der MS-ASM im Leerlauf erreicht sie obwohl die Anlaufzeit  $T_A$  größer ist, nach dem Wiedereinschalten bei gleichen Bedingungen die Betriebsdrehzahl schneller als die leerlaufende NS-ASM. Ein aussagekräftiger Vergleich ist hier allerdings schwer zu machen da die leistungsstarke MS-ASM niederfrequente Eigenpendelungen aufweist wo die NS-ASM ein aperiodisches Verhalten zeigt.

## 8 Nachbildung eines Gesamtnetzes mit Wirklasten und Asynchronmaschinen

Es wird ein Netz nach Abbildung 8.1 in simuliert um deren Verhalten bei einem Netzausfall durch einen 3-poligen KS im Hochspannungsnetz zu zeigen. Das Hauptaugenmerk gilt auch dem Moment der Fehlerabschaltung welcher 155 ms nach dem KS-Eintritt erfolgt. Die Lastaufteilung von Wirklasten und Motorlasten wird mit jeweils 22-MW realisiert. Die Parameter der 11-kW Asynchronmaschinen entsprechen denen wie im vorigen Kapitel.

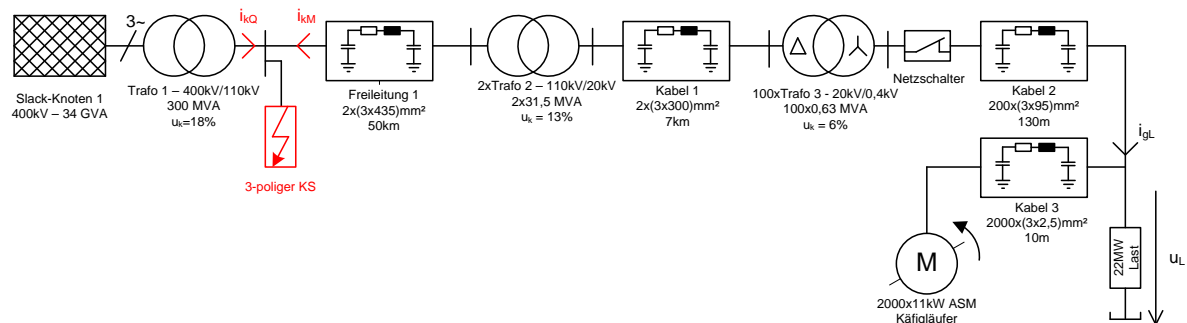


Abbildung 8.1 – Netzmodell mit Wirklasten und Asynchronmaschinen

Um die Vielzahl von gewissen Netzelementen zu vermeiden wurden diese auf ein einziges Netzelement reduziert und an die Leistung angepasst. Somit wurden die Kabelimpedanzen (Kabel 1, Kabel 2 und Kabel 3) und Transformatorimpedanzen (Trafo 2 und Trafo 3) mit der tatsächlichen Anzahl dividiert. So steht zum Beispiel in Abbildung 8.1 für das Kabel 2 unterhalb 200x und ist gleichbedeutend für 200 gleich lange und parallele Kabellängen.

Speziell zur Simulation von 2000 Stück ASM mit je 11kW wurden folgende Anpassungen in den Simulationseinstellungen durchgeführt:

- Massenträgheitsmoment und Reibmoment wurden mit 2000 multipliziert.
- Die restlichen ASM-Impedanzen wurden mit 2000 dividiert.

Das mechanische Lastmoment der Asynchronmaschinen würde ebenfalls mit 2000 multipliziert werden müssen, jedoch werden sie nur im Leerlauf betrieben, womit diese Berücksichtigung entfällt.

### 8.1 Kurzschlussströme der Asynchronmaschinen im 110-kV-Netz

In Abbildung 8.2 sind die von 2000 Asynchronmaschinen zum KS-Punkt zurückspeisenden Phasenströme gezeigt. Dieser ist dem im Kapitel 6.3 ähnlich, da die Zeitkonstanten durch Verwendung gleicher ASM die gleichen sein müssen.

Wie am größten KS-Stromverlauf der Phase  $I_3$  (grün) zu sehen ist verursacht dieser im 110 kV Netz einen relativ hohen Strombeitrag welcher im Scheitelwert sogar das 3 fache der stationären Stromamplitude beträgt.

Die in der Abbildung 8.2 berechneten Effektivwerte der Phasenströme wie auch jene die in den weiteren Kapiteln zu sehen sein werden, wurden in 20ms Perioden ermittelt und sind anschließend miteinander interpoliert.

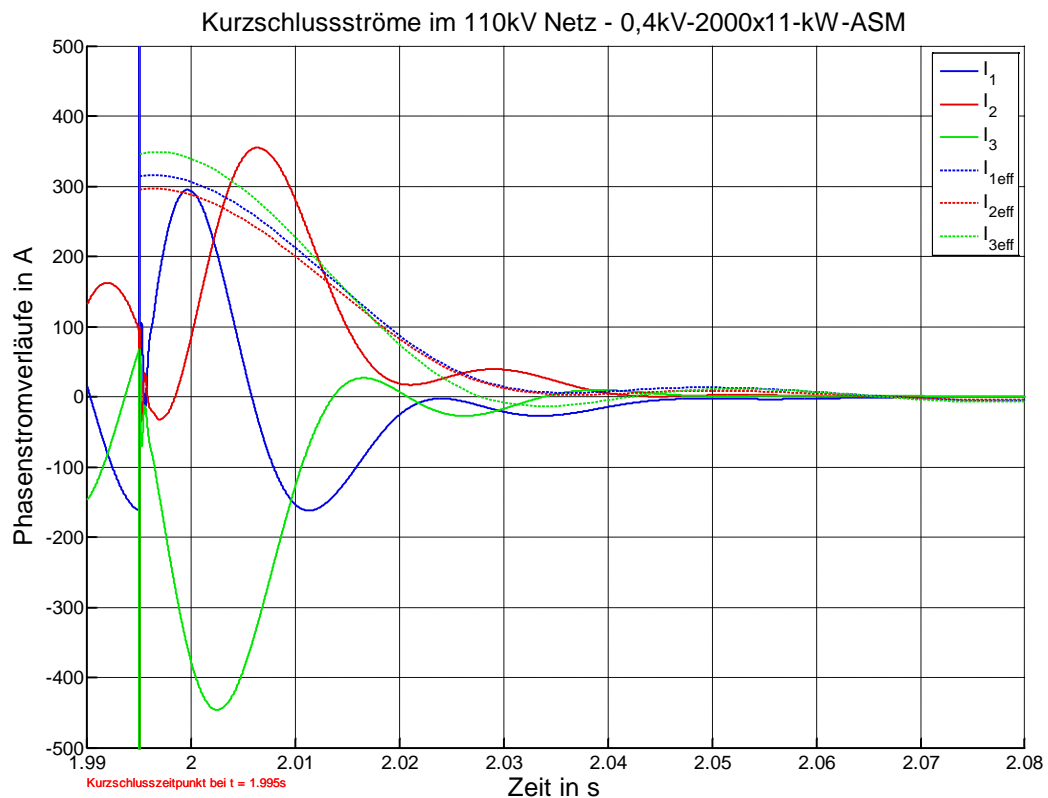


Abbildung 8.2 – Kurzschlussstrombeitrag von 2000 Asynchronmaschinen im 110kV Netz

Nach der IEC-Kurzschlussnorm kann der ASM-Kurzschlussstrom  $i_{kM}$  jedoch gegenüber dem vom Slack-Knoten  $i_{kQ}$  vernachlässigt werden, da der Einfluss weniger als 5 % des gesamten KS-Stroms ausmacht. [5]

## 8.2 Wiederhochfahren nach einem Netzausfall

Wird das NS-Netz in Abbildung 8.1 nach der Spannungsunterbrechung von 150ms zugeschaltet, so kommt es aufgrund der Anlaufströme der Asynchronmaschinen zu kurzzeitig hohen Spannungsabfällen an den Kabelleitungen. Der Spannungsabfall am Kabel 2 verringert die Spannungen  $u_L$  an den Wirklasten welche durch ihr konstantes Z bzw. R auch einen geringen Strom beziehen. Zusammen mit den ASM Anlaufströmen ergibt sich der Stromverlauf  $i_{gL}$  aller drei Phasen nach Abbildung 8.3 wobei  $I_1$  den größten KS-Strom hervorruft.

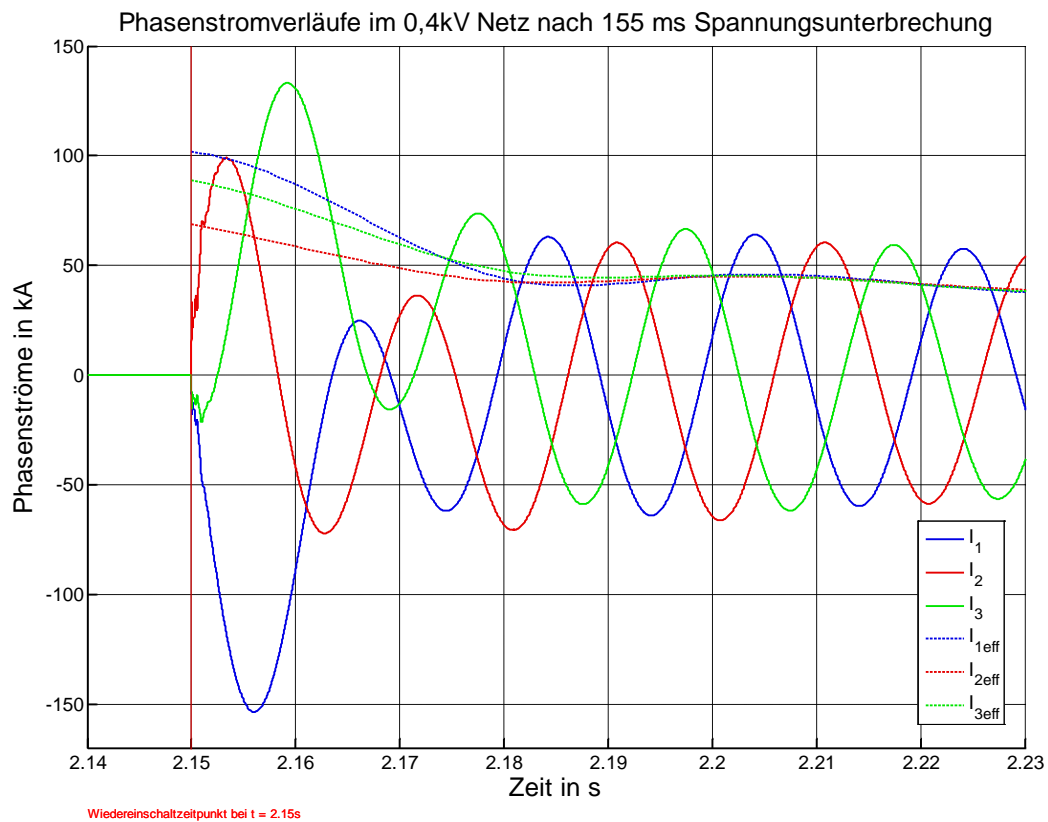


Abbildung 8.3 – Lastströme im NS-Netz nach einer 155 ms Spannungsunterbrechung

Werden die Stromeffektivwerte der Abbildung 8.3 betrachtet, so sinken diese mit den relativ kleinen Zeitkonstanten der ASM ab. Im späteren Verlauf ist dann wieder ein leichter Anstieg zu sehen. Diese Eigenschaft lässt sich durch die Beschleunigung der Maschine erklären welches die Flüsse bzw. Ständerströme umso mehr beeinflusst, je größer sie ist. [11]



Die Phasenspannungen  $u_L$  an den Wirklasten nach der Netzzuschaltung sind in Abbildung 8.4 dargestellt. Die Spannungseffektivwerte zeigen den anfänglichen Spannungseinbruch welcher sich bereits nach etwa einer Periodendauer über 90% der Nennspannung befindet.

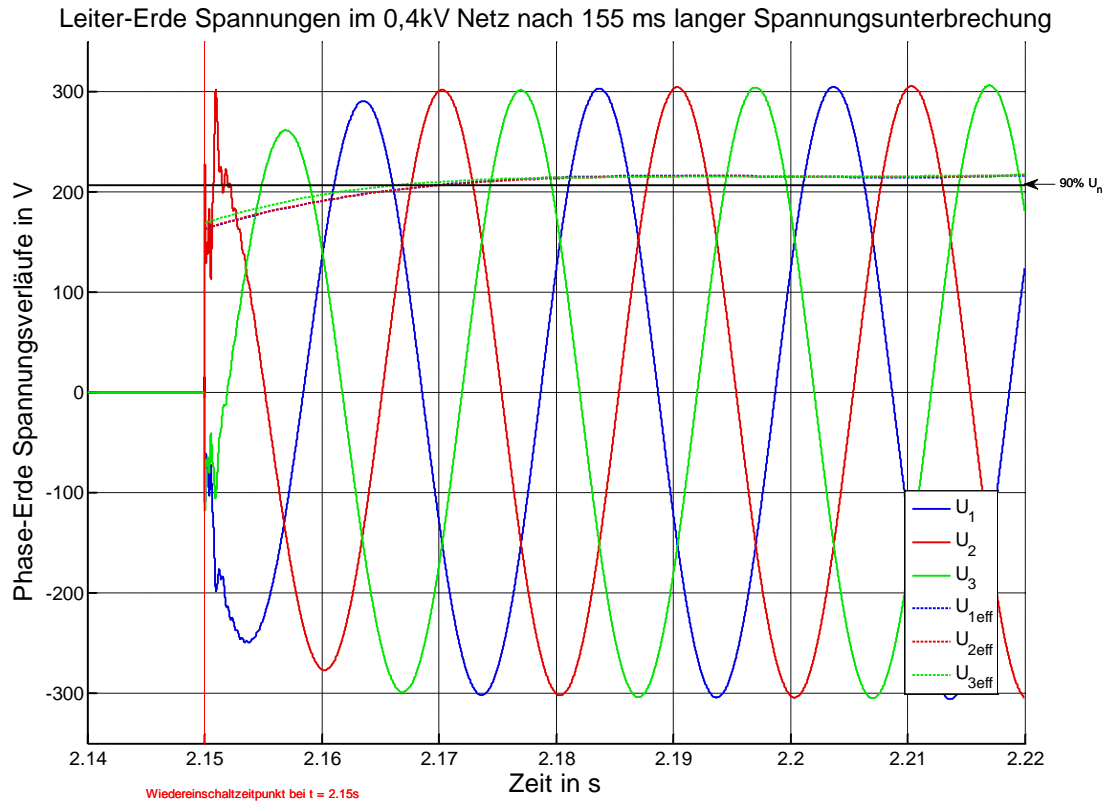


Abbildung 8.4 – Phasenspannungen an den Wirklasten nach 155ms Spannungsunterbrechung

Werden die Effektivwerte der Spannungen mit den Grenzwerten des LVRT (Low Voltage Ride Through) verglichen so liegen diese weit oberhalb jeglicher LVRT-Profile. [19]

Der Drehzahl- und Drehmomentverlauf nach dem Wiedereinschalten einer repräsentativen 11-kW-ASM der ASM-Gruppe mit der Bezeichnung  $M_{el1}$  und  $n_1$  ist in Abbildung 8.5 ersichtlich. Dieser ist vergleichbar mit den Verläufen einer einzelnen ASM am starren Netz wie sie Kapitel 6.4 gezeigt wird, da die Wiedereinschaltbedingungen und Anschlusskabelnängen im NS-Bereich gleich sind. Diese sind in der Abbildung 8.5 mit  $M_{el2}$  und  $n_2$  bezeichnet.

Die Unterschiede im Verlauf machen zwei Tatsachen aus:

- Vor dem Zuschalten ( $t < 2,15s$ ) des NS-Netzes hat die Gruppe von Asynchronmaschinen eine höhere Restdrehzahl. Dies ist bedingt durch die KS-Stelle welche von den Impedanzen her eine größere ist.
- Nach dem Einschalten wird der Drehmomentverlauf der ASM Gruppe stark gedämpft. Dies bewirkt sowohl der geringere Drehzahlunterschied zur Leerlaufdrehzahl als auch die Spannungseinsenkung, welche quadratisch mit dem Drehmomentverlauf einhergeht.

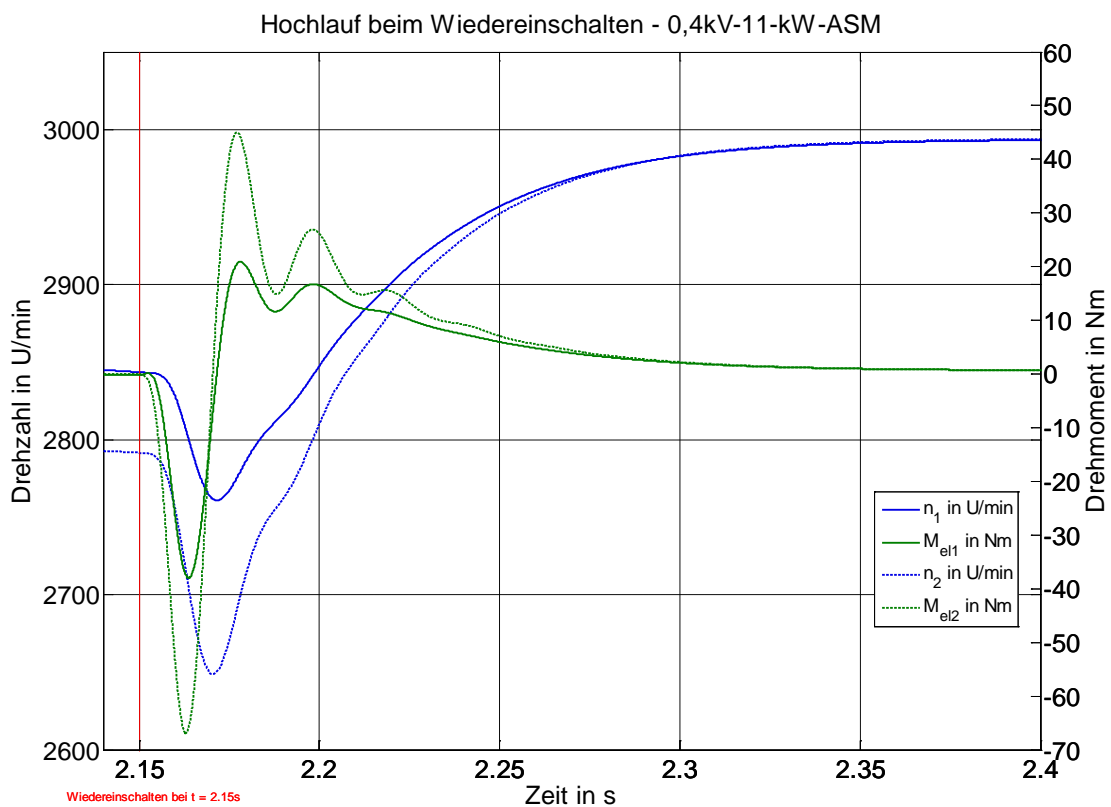
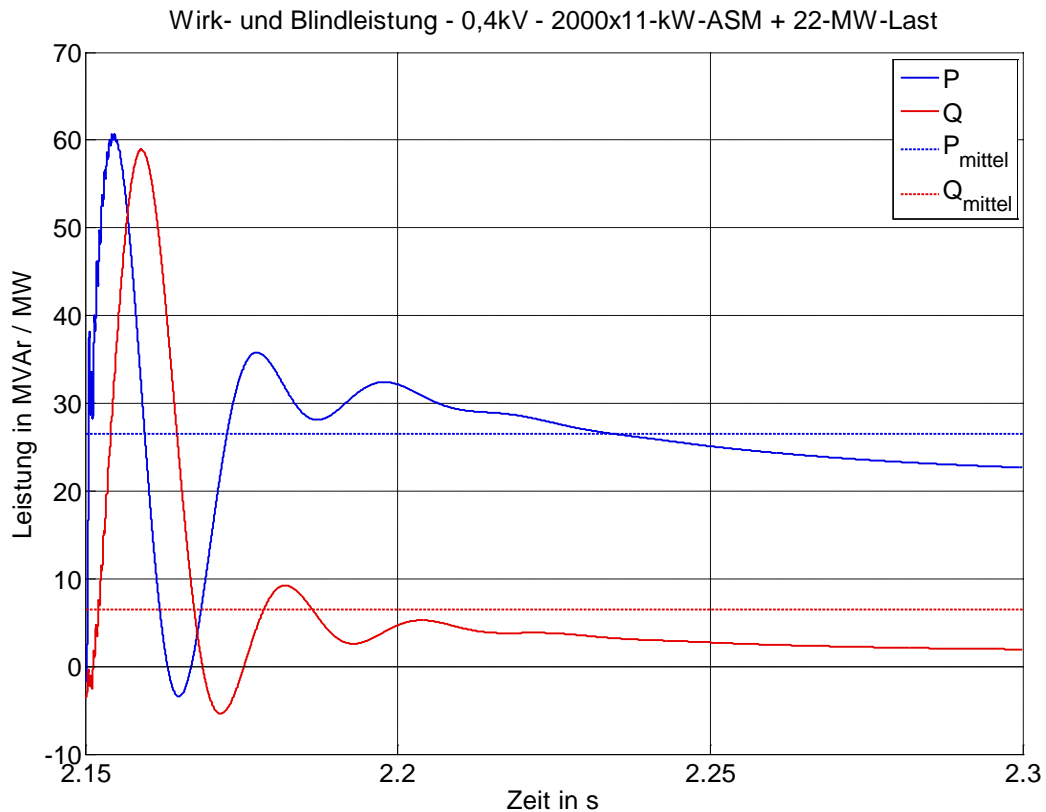


Abbildung 8.5 – Vergleich Drehmoment- und Drehzahlkennlinien beim Wiedereinschalten einer Gruppe von Asynchronmaschinen und einer einzelnen mit  $M_L = 0$

Wie am Drehzahlverlauf von Abbildung 8.5 abzusehen ist, erreichen beide Verläufe die Leerlaufdrehzahl (ca.2995 U/min) zur etwa gleichen Zeit.

Wird die Wirk- und Blindleistungsbilanz aller Lasten in Abbildung 8.6 betrachtet, so schwankt diese gemäß dem in Abbildung 8.5 erzeugten Drehmoment der Asynchronmaschinenlasten. Speziell am Verlauf der Wirkleistung erkennt man, dass das Abbremsen der Asynchronmaschinen eine Umkehr der Wirkleistungsrichtung verursacht und eine Beschleunigung das Gegenteil bewirkt.



**Abbildung 8.6 – Wirk- und Blindleistung im Niederspannungsnetz mit Wirklasten und leerlaufenden Asynchronmaschinen**

Werden die in Abbildung 8.6 zeitlich gemittelten Wirk- und Blindleistungsverläufe mit den stationären verglichen, so ist zu erkennen, dass insgesamt für den Wiederhochlauf eine höhere Leistung bezogen wird. Die Tabelle 8.1 zeigt hier den Vergleich von stationären Leistungen und dynamisch gemittelten Leistungswerten im Zeitbereich zwischen  $t = 2,15s - 2,3s$ . Anzumerken ist der besonders hohe Unterschied der Blindleistungen.

**Tabelle 8.1 – Wirk- und Blindleistungsverhältnis von stationären und dynamisch gemittelten Werten**

	Stationär	Dynamisch	Verhältnis
$P_{mittel}$	21,7 MW	26,5 MW	1,22
$Q_{mittel}$	1,7 MVAr	6,54 MVAr	3,84

### 8.3 Diskussion

Die in diesem Kapitel durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass der Einfluss der Kurzschlussströme der Asynchronmaschinen gemäß IEC bezüglich Amplitude und Zeitdauer vernachlässigt werden kann. Der im Hochspannungsnetz verursachte 3-poligen Kurzschluss wirkt sich aufgrund der dazwischen liegenden Impedanzen positiv auf den Drehmoment- und Drehzahlverlauf der Asynchronmaschinen aus und verringert die Drehmomenten Stöße als auch Drehzahlabsenkungen. Diesbezüglich wirkt sich der geringere Drehzahlabfall beim KS auch auf das Wiedereinschalten aus, wo es ebenfalls zu kleineren Drehmoment-Stößen kommt.

Die Zeit bis zum Erreichen der Leerlaufdrehzahl der Asynchronmaschinen zeigt keine großen Unterschiede zwischen den durchgeführten Simulationen im Kapitel 6 und denen im Kapitel 8.

Die Spannungseinsenkung beim nochmaligen Wiedereinschalten des NS-Netzes nach einer 155 ms langen Spannungsunterbrechung erweist sich bei dieser Simulationskonstellation durch die leerlaufenden Asynchronmaschinen als eher unproblematisch da die Anlaufströme relativ schnell abklingen und es bereits nach einer Periodendauer wieder zum Überschreiten des 90 %-igen Nennspannungswertes kommt. Dies kann durch Belastung der Maschine erheblich beeinflusst werden. So zeigen Simulationen bei mechanischer Belastung der ASM-Gruppe mit der quadratisch zur Drehzahl steigenden Last das es bis zur Wiederkehr von stationären Spannungsverhältnissen an den Verbrauchern etwa um die 7-fache Zeit (ca. 0,7 s) länger dauert als beim Leerlauf (ca. 0,1 s).

Die Aufzeichnung der Leistungsbilanz zeigt im Anlauf der leerlaufenden Asynchronmaschinen eine höhere Aufnahme von Blind- als auch Wirkleistung. Bezogen zur stationären Leistungsbilanz ist im speziellen die im Mittel benötigte Blindleistung um ein Vielfaches höher und muss somit vom Netz sichergestellt werden.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] A.M. Miri, *Ausgleichsvorgänge in Elektroenergiesystemen*. Karlsruhe: Springer, 2000.
- [2] L. Papula, *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 13th ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [3] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Darmstadt: Springer, 2012.
- [4] H. Benker, *Ingenieurmathematik*. Halle: Springer, 2010.
- [5] IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part0: Calculation of currents, July 2001.
- [6] B.R. Oswald D. Oeding, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 7th ed. Hannover: Springer, 2011.
- [7] IEC 60909-1, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part1: Factors fo the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0, July 2002.
- [8] K.D. Dettmann K. Heuck, *Elektrische Energieversorgung*, 2nd ed. Hamburg: Vieweg, 1991.
- [9] D. Sweeting, *Applying IEC 60909, Short-Circuit Current Calculations*, 2011.
- [10] A.J. Schwab, *Elektroenergiesysteme*, 3rd ed. Karlsruhe: Springer, 2011.
- [11] I. Rácz K.P. Kovács, *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*. Budapest: Ungarische Akademie der Wissenschaft, 1959, vol. 2.
- [12] H. Bacher, *Skriptum: Elektrische Maschinen für die Energietechnik*, WS 2011.
- [13] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1*, 3rd ed. Evillard, Schweiz: Springer, 2011.
- [14] Hydro-Québec TransÉnergie Technologies, *SimPowerSystems for Use with Simulink, User's Guide*, 3rd ed., 2003.
- [15] K.D. Dettmann, D. Schulz K. Heuck, *Elektrische Energieversorgung*, 8th ed. Hamburg: vieweg+teubner, 2010.
- [16] H. Renner, *Skriptum: Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme*. Graz, 2013.
- [17] E. Spring, *Elektrische Maschinen*, 3rd ed. Darmstadt: Springer, 2009.
- [18] A. Arkkio, A. Niemenmaa, A. Sountausta R. Kytömäki, *Validity of conventional and modern methods of no-load loss calculation in Asynchronous Machines-Statistic Approach*, 1997.
- [19] Renner H. Essl N., *Modellierung und Validierung von LVRT-Simulationsmodellen*

Dezentraler Erzeugungseinheiten, 2014, 13.Symposium Energieinnovation.

[20] L.M. Tolbert B.Ozpineci, Simulink Implementation of Induction Machine Model - A Modular Approach, 2009.

[21] Matlab R2011b, Help, 1984-2011.

[22] M. Sakulin H. Renner, *Skriptum: Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit*. Graz, 2008.

# 10Anhang

## Anhang A - Rechnen in pu

Zur Erklärung der pu Umrechnung wurde als Beispiel der Trafo 3 aus Tabelle 5.1.1 verwendet.

Berechnung der Impedanzen (auf die Unterspannungsseite bezogen):

$$R_T = u_r \cdot \frac{U_{N,US}^2}{S_N} = 0,0142 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{630 \cdot 10^3 \text{ VA}} = 3,6 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = u_x \cdot \frac{U_{N,US}^2}{S_N} = 0,058 \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{630 \cdot 10^3 \text{ VA}} = 14,8 \text{ m}\Omega$$

Bei gleicher Aufteilung beider Impedanzgrößen auf der Primär- und Sekundärseite ergibt dies:

$$R_1 = R_2 = 0,5 \cdot R_T = 1,8 \text{ m}\Omega$$

$$X_1 = X_2 = 0,5 \cdot X_T = 7,4 \text{ m}\Omega$$

In pu-Einheiten:

$$Z_{base} = \frac{U_{N,US}^2}{S_N} = \frac{(400 \text{ V})^2}{630 \cdot 10^3 \text{ VA}} = 0,254 \Omega$$

$$R_1 = R_2 = \frac{R_1}{Z_{base}} = 0,0071 \text{ p. u.}$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_1}{Z_{base}} = 0,0294 \text{ p. u.}$$

Die Impedanzwerte in pu entsprechen somit dem halben  $u_r$  bzw.  $u_x$ . Dadurch fällt es dem Benutzer einfach, die Daten einzugeben, da Matlab die Umrechnung von pu-Werte in SI-Werte automatisch bei Angabe der Leistung und Spannungen des Transformators für die Ober- und Unterspannungsseite macht.

## Anhang B - Umrechnung in ein dq-Bezugssystem

Die Umwandlung wird hier anhand der dreiphasigen Ständerspannungen gezeigt welches in ein zweiachsiges dq Koordinatensystem erfolgt. Dadurch dass der Sternpunkt nicht geerdet ist gibt es keine 0-Komponenten. [14]

Die Transformation der Ständerspannungen erfolgt im Matlab in zwei Schritten:

1. Schritt ist die Transformation der drei Ständerspannungen in ein stationäres (Index s) Zweiachsen-Koordinatensystem.

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}$$

2. Schritt ist das Einführen des Winkels  $\theta$ .

$$V_{qs} = V_{qs}^s \cdot \cos(\theta) - V_{ds}^s \cdot \sin(\theta)$$

$$V_{ds} = V_{qs}^s \cdot \sin(\theta) + V_{ds}^s \cdot \cos(\theta)$$

Je nachdem welches Bezugssystem gewählt wird können für  $\theta$  verschiedene Werte genommen werden wobei für den Rotor einer ASM ähnliches gilt mit dem Unterschied das der Winkel  $\beta = \theta - \theta_r$  statt  $\theta$  verwendet wird (siehe Tabelle 10.1). [20]

**Tabelle 10.1 – Wahl des Bezugssystems im ASM-Modell [14]**

Reference Frame	$\theta$	$\beta$
Rotor	$\theta_r$	0
Stationary	0	$-\theta_r$
Synchronous	$\theta_e$	$\theta_e - \theta_r$



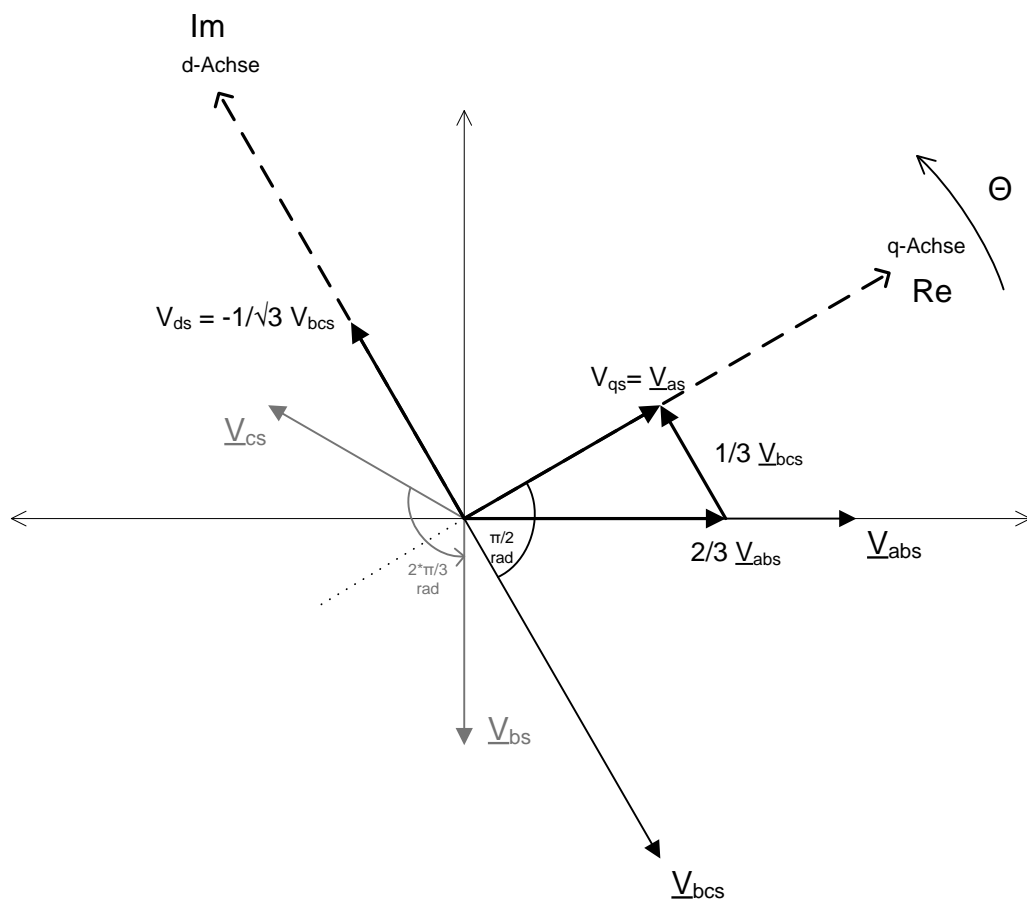
In [21] wird für die ASM die Umwandlung ins dq-System mit den Aussenleitergrößen  $V_{abs}$  und  $V_{bcs}$  gemacht. Dies macht keinen Unterschied aus wie in Abbildung 10.1 zu sehen ist.

Für Statorspannungen gilt:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta & \cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta \\ 2 \sin \theta & \sin \theta - \sqrt{3} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix}$$

und die Rotorspannungen:

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta \\ 2 \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix}$$



**Abbildung 10.1 – Zeigerdiagramm der Ständerspannungen und deren Umwandlung in dq-Komponenten (Im Augenblick  $\theta = 0$ )**

Die Umwandlung der Ströme folgt auf ähnlicher Weise und ist in [21] beschrieben.

## Anhang C - Daten der Asynchronmaschinen

Alle Angaben in der Tabelle 10.2 beziehen sich auf 50 Hz und die gemessenen Werte aus den KS- und Leerlaufversuchen sind nach IEC/EN 60034 Norm durchgeführt worden.

**Tabelle 10.2 – Daten der ASM**

Marke	ABB	Siemens
Typ	AMI 560L2A B	1LE10011DA234
Nennspannung in kV	6	0,4
Polpaarzahl	1	1
Nennleistung in kW	2900	11
Nenndrehzahl in U/min	2979	2955
Leistungsfaktor bei 100% Last	0,9	0,87
Nennwirkungsgrad in %	96,5	89,4
Nennstrom in A	321	20,5
Wellenträgheitsmoment in kgm <sup>2</sup>	38,8	0,045
Daten aus dem Kurzschlussversuch („locked rotor test“)		
Spannung in kV	k.A.	0,4
Strom in A	k.A.	154,7
Wirkleistung in kW	k.A.	54,27
cos φ	k.A.	0,506
Daten aus dem Leerlaufversuch („no load test“)		
Spannung in kV	6	0,399
Strom in A	65	8,35
Wirkleistung in kW	k.A.	0,523
cos φ	k.A.	0,09
Arithmetischer Mittelwert der 3 Wicklungswiderstände		
$R_s$ in Ω	k.A.	0,7897
$\frac{I_A}{I_N}$ bzw. $\frac{I_{LR}}{I_{TM}}$	4,9	7,4