

Anhang 5: **Dezember 2003**

Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Verteilnetzen

Simulationen im 400 V Niederspannungsnetz des ewz

ausgearbeitet durch

Prof. M. Höckel, P. Lüchinger
Berner Fachhochschule HTI Biel
Quellgasse 21
2501 Biel

mitfinanziert durch

Bundesamt für Berufsbildung und Technologie, KTI; KTI P-Nr: 5840.2;
ABB Schweiz AG; Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL;
AEK Energie AG; Elektrizitätswerk Davos AG; ewz Verteilnetz

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
Allgemein	1
Spannungs- und Leistungsprofile.....	2
Netzbilanzen	2
Tagesverläufe	3
Kurzschlussimulationen.....	4
Oberschwingungen	4
Schlussfolgerung	5
 1. Einleitung	 7
1.1. Ziel der Studie.....	7
1.2. Simulationen mit einem Teilnetz des ewz	7
1.3. Simulationsprogramm.....	8
1.4. Eigenschaften des Niederspannungsnetzes.....	9
1.5. Eigenschaften der DEA	10
1.6. Die verschiedenen Simulationsvarianten	11
1.6.1. Ohne DEA.....	11
1.6.2. U-Regelung.....	11
1.6.3. DEA bei Lasten >20 kW	11
1.6.4. Ohne U-Regelung	11
1.6.5. ASM/SM/Umrichter	12
1.6.6. Begrenzter $\cos(\varphi)$	12
1.7. Kenndaten der Altwiesenstr. 15	13
1.7.1. Tabelle Lastdaten	13
1.7.2. Tabelle der Umrichter.....	13
1.7.3. Tabelle der Synchronmaschinen	14
1.7.4. Tabelle gesamte Wirkleistungseinspeisung der DEA.....	14
1.7.5. Tabelle gesamte Blindleistungseinspeisung der DEA	14
1.8. Beispiel zur Blindleistungsaufnahme.....	15
1.9. Simulationsbedingungen	16
1.10. Netzgrafik.....	18
1.11. Zusammenfassung der Einleitung.....	19
 2. Spannungsprofile	 20
2.1. Spannungsprofil bei Planungslast.....	20
2.2. Spannungsprofil bei Mittellast.....	21
2.3. Spannungsprofil bei Höchstlast	22
2.4. Spannungsprofil bei Schwachlast	23
2.5. Spannungsprofile mit Ring bei Schwachlast.....	24
2.6. Spannungsprofil mit hoher Last, kleiner Einspeisung an K3.2, kleiner Last und hoher Einspeisung an K3.3	25

3.	Spannungsverläufe	26
3.1.	Spannungsverlauf Altwiesenstr.15 (K0.0) – K3.3 bei Planungslast	26
3.2.	Spannungsverlauf Altwiesenstr.15 (K0.0) – K3.2 bei Mittellast	27
3.3.	Spannungsverlauf Altwiesenstr.15 (K0.0) – K3.2 bei Höchstlast	28
3.4.	Spannungsverlauf Altwiesenstr.15 (K0.0) – K3.2 bei Schwachlast	29
3.5.	Spannungsverlauf K0.0 – K3.2 bei Schwachlast mit und ohne Ring	30
4.	Wirkleistungsprofile	31
4.1.	Wirkleistungsprofil bei Planungslast	31
4.2.	Wirkleistungsprofil bei Mittellast	32
4.3.	Wirkleistungsprofil bei Höchstlast	33
4.4.	Wirkleistungsprofil bei Schwachlast	34
5.	Blindleistungsprofile	35
5.1.	Blindleistungsprofil bei Planungslast	35
5.2.	Blindleistungsprofil bei Mittellast	36
5.3.	Blindleistungsprofil bei Höchstlast	37
5.4.	Blindleistungsprofil bei Schwachlast	38
6.	Stromprofile	39
6.1.	Stromprofil der Leitungen bei Planungslast	39
6.2.	Stromprofil der Leitungen bei Mittellast	40
6.3.	Stromprofil der Leitungen bei Höchstlast	41
6.4.	Stromprofil der Leitungen bei Schwachlast	42
7.	Wirk- und Blindleistungen der DEA	43
7.1.	Wirkleistungen der DEA	43
7.2.	Blindleistungen der DEA bei Planungslast	44
7.3.	Blindleistungen der DEA bei Mittellast	45
7.4.	Blindleistungen der DEA bei Höchstlast	46
7.5.	Blindleistungen der DEA bei Schwachlast	47
8.	Zusammenfassung Profile	48
9.	Netzbilanzen	49
9.1.	Netzbilanz Wirkleistung bei Planungslast	49
9.2.	Netzbilanz Wirkleistung bei Mittellast	50
9.3.	Netzbilanz Wirkleistung bei Höchstlast	51
9.4.	Netzbilanz Wirkleistung bei Schwachlast	52
9.5.	Netzbilanz Blindleistung bei Planungslast	53
9.6.	Netzbilanz Blindleistung bei Mittellast	54

9.7. Netzbilanz Blindleistung bei Höchstlast.....	55
9.8. Netzbilanz Blindleistung bei Schwachlast.....	56
9.9. Netzverluste Wirkleistung bei Planungslast.....	57
9.10. Netzverluste Wirkleistung bei Mittellast.....	58
9.11. Netzverluste Wirkleistung bei Höchstlast.....	59
9.12. Netzverluste Wirkleistung bei Schwachlast.....	60
9.13. Netzverluste Blindleistung bei Planungslast.....	61
9.14. Netzverluste Blindleistung bei Mittellast.....	62
9.15. Netzverluste Blindleistung bei Höchstlast.....	63
9.16. Netzverluste Blindleistung bei Schwachlast.....	64
9.17. Zusammenfassung Netzbilanzen.....	64

10. Tagesverläufe.....65

10.1. „Ohne DEA“	65
10.1.1. „Ohne DEA“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse	65
10.1.2. „Ohne DEA“ Spannungen	66
10.1.3. „Ohne DEA“ Leitungsströme	67
10.2. „ohne U-Regelung“	68
10.2.1. „ohne U-Regelung“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse.....	68
10.2.2. „ohne U-Regelung“ verschiedene DEA	69
10.2.3. „ohne U-Regelung“ Spannungen	70
10.2.4. „ohne U-Regelung“ Leitungsströme	71
10.3. „Photovoltaik“	72
10.3.1. „Photovoltaik“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse	72
10.3.2. „Photovoltaik“ verschiedene DEA	73
10.3.3. Vergleich von verschiedenen täglichen Produktionsverläufen.....	74
10.3.4. „Photovoltaik“ Spannungen	74
10.3.5. „Photovoltaik“ Leitungsströme	75
10.4. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“	75
10.4.1. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse	75
10.4.2. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ verschiedene Verläufe der DEA	77
10.4.3. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ Spannungen.....	78
10.4.4. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ Leitungsströme	79
10.5. „begrenzter cos (φ)“	80
10.5.1. „begrenzter cos (φ)“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse.....	80
10.5.2. „begrenzter cos (φ)“ verschiedene DEA	81
10.5.3. „begrenzter cos (φ)“ Spannungen	82
10.5.4. „begrenzter cos (φ)“ Leitungsströme	83
10.6. „Speicher“	83
10.6.1. „Speicher“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse	84
10.6.2. „Speicher“ Spannungen	85
10.6.3. „Speicher“ Spannungen, Ströme und Leistungen am Speicherelement	86
10.6.4. „Speicher“ Leitungsströme	87
10.7. Zusammenfassung Tagesverläufe	87

11. Kurzschlusswerte.....89

11.1. Kurzschlussleistungen	89
11.2. Kurzschlussströme	90
11.3. Kurzschluss Spitzenströme.....	91
11.4. Kurzschlussleistung an den Trafos und der Altwiesenstrasse	92

11.5. Schmelzkurve 400A Sicherung	93
12. Kurzschlussimulationen	94
12.1. Kurzschlüsse ohne DEA an der Leitung L2 K2.2-3.2	94
12.2. Kurzschlüsse mit DEA an der Leitung L2 K2.2-3.2	97
12.3. Zusammenfassung Kurzschlussanalyse	100
13. Oberschwingungsanalyse	101
13.1. Hintergrund	101
13.2. Oberschwingungen der Lasten	102
13.2.1. Symmetrische Last	103
13.2.2. Unsymmetrische Last	104
13.3. Beschreibung Umrichter	104
13.3.1. Symmetrische Werte der Umrichterüberwellenströme	105
13.3.2. Unsymmetrische Werte der Umrichterüberwellenströme	106
13.4. Oberschwingungsprofile	107
13.4.1. THD an K0.0-K3.3 symmetrische Simulation	107
13.4.2. THD an K0.0-K3.3 unsymmetrische Simulation	108
13.5. Oberschwingungsspektren	109
13.5.1. Ohne DEA K0.0-K3.3 symmetrische Simulation	109
13.5.2. Ohne DEA K0.0-K3.3 unsymmetrische Simulation	110
13.5.3. Mit DEA K0.0-K2.3 symmetrische Simulation	111
13.5.4. Mit DEA Knoten K3.1-K3.3 symmetrische Simulation	112
13.5.5. Mit DEA K0.0-K2.3 unsymmetrische Simulation	113
13.5.6. Mit DEA Knoten K3.1-K3.3 unsymmetrische Simulation	114
13.6. Impedanzverläufe ohne DEA	115
13.7. Impedanzverläufe mit DEA	116
13.8. Oberschwingungen durch 1-phasige Umrichter	117
13.8.1. Dreiphasiger Anschluss	117
13.8.2. Einphasiger Anschluss	117
13.8.3. Konsequenzen für die Simulation	117
13.9. Zusammenfassung Oberschwingungen	118

ZUSAMMENFASSUNG

ALLGEMEIN

Das Ziel der Simulationen mit dem Niederspannungsnetz des ewz besteht vor allem darin die Auswirkungen von vermehrter dezentraler Erzeugung in den regionalen und lokalen Verteilnetzebenen zu ermitteln und Lösungsansätze zu den technischen Problemstellungen zu finden.

Da bei der Anschlussimpedanz im NS-Netz eher die ohmschen Anteile dominieren, ist für den Spannungsabfall die Wirkleistung des Verbrauchs oder der Einspeisung der bestimmende Faktor. Durch Beispielsimulationen konnte gezeigt werden, dass Umrichter zum Teil sogar Blindleistung aufnehmen müssen um die Spannung am Anschlusspunkt auf dem gewünschten Wert zu halten. Bei tiefen Spannungen kann neben der Wirkleistung auch die Blindleistungsabgabe der DEA dazu verwendet werden, die Spannungen an den Knoten anzuheben.

Die Asynchronmaschinen nehmen bedingt durch ihren Aufbau immer Blindleistung auf und werden eher für kleinere Leistungen eingesetzt. Grössere Anlagen werden über Synchronmaschinen oder Umrichter an das Netz angeschlossen.

Die elektrischen Maschinen erhöhen die Kurzschlussleistung an den Anschlusspunkten im Vergleich zu den Umrichtern markant an.

Durch die Einspeisung von Wirkleistung steigt die Spannung an den Einspeiseknoten naturgemäss an. Man kann dem Spannungsanstieg entgegenwirken, indem man die DEA teilweise Blindleistung aufnehmen lässt. Es ist darauf zu achten, dass dabei die DEA nicht überlastet werden. Im Falle einer aktiven Spannungsregelung durch die DEA kann die berechnete Blindleistungsaufnahme der DEA sehr hoch werden. Wenn in der Praxis die Spannung geregelt sein sollte, müssten die Umrichter mit einer zusätzlichen Regelung ausgestattet werden, weil die heutigen Ausführungen meist über keine Spannungsregelung verfügen.

Aus der Sicht der DEA-Betreiber ist es am sinnvollsten, wenn die DEA nur Wirkleistung ins Niederspannungsnetz einspeisen. Die Vorteile der Spannungshaltung an den vom Transformator weit weg gelegenen Leitungen und der besseren Energieverteilung im Netz mit dem damit verbundenen Rückgang der Verluste, werden damit voll ausgeschöpft.

Bei sehr grossen Leistungen von einigen 10kW ist jeder Anschlusspunkt einer DEA über Simulationen oder durch Erfahrungswerte zu überprüfen. Dabei ist insbesondere auf die Anschlussimpedanz und im Anschlusspunkt zu achten. Sehr grosse Anlagen können zu Problemen mit der Einhaltung der Spannungstoleranz führen.

Mit einer ausgewogenen Verteilung der DEA im NS-Netz können sehr gute Resultate bezüglich Spannungsstabilität und Netzverluste erreicht werden. Auch der DEA-Typ ist von entscheidender Bedeutung: Asynchronmotoren eignen sich besonders gut, dass die Spannung im Niederspannungsnetz nicht zu hoch wird, während Umrichter und Synchronmaschinen auch regulierende Aufgaben übernehmen können.

SPANNUNGS- UND LEISTUNGSPROFILE

Durch den Einsatz von dezentralen Anlagen kann die Spannungsstabilität vor allem an den Sammelschienen mit einer grossen Entfernung zur Trafostation verbessert werden. Die Leitungsbelastung bleibt in praktisch allen Fällen mit DEA unterhalb der Grenzwerte.

Bei grösseren Einspeiseleistungen stösst man allerdings an die Grenzen des NS-Netzes. Zum einen steigt dann die Spannung an den Einspeiseknoten massiv an und zum anderen werden die Leitungen stark belastet.

In der Nähe der Trafos muss die Leitungsbelastung besonders genau betrachtet werden, weil es dort auch ohne Überschreitung der Grenzwerte zu lokalen thermischen Überlastungen kommen kann.

Anhand der Spannungsprofile ist feststellbar, dass DEA mit Leistungen von weniger als 100 kW im Normalfall keine Probleme darstellen. Im Gegenteil helfen DEA die Spannung vor allem an langen bzw. stark belasteten Leitungen zu stützen.

Die Grenzwerte wurden in den Simulationen mit DEA bei den Spannungen sowie den Strömen grösstenteils eingehalten. Erst bei grösseren Leistungen (300 kW) werden die Grenzwerte überschritten. Dabei ist immer die Anschlussimpedanz von grosser Bedeutung. Tendenziell werden die Spannungen nahe beim Trafo gelegenen und kurzen weniger stark angehoben, als bei langen und weit abgelegenen Leitungen.

Durch die Einspeisung von Wirkleistung wird die Spannungen an den Anschlusspunkten der DEA stark angehoben, dass die DEA mit Blindleistungsbezug entgegen wirken müssen, um die Spannung auf dem gewünschten Niveau zu halten. Die Asynchronmaschinen nehmen bedingt durch den Aufbau, Blindleistung auf und helfen, dass die Spannungen nicht zu hoch werden.

Bei kleinen Verbrauchern in der Nähe des Anschlusspunktes verursachen grosse Wirkleistungseinspeisungen hohe Spannungsanstiege, die wie schon erwähnt durch Blindleistungsaufnahme kompensiert werden müssen. Die Simulationen haben gezeigt, dass die DEA teilweise nicht in der Lage sind soviel Blindleistung aufzunehmen, dass die Spannung den gewünschten Wert erreicht. Von der Seite der Netzbetreiber her ist es nicht wünschenswert Blindleistung zu transportieren, nur damit die Spannungen an den Anschlusspunkten dem vorgegebenen Wert einhalten. Vielmehr wird mit der Anzahl der DEA der maximale Spannungsanstieg begrenzt oder mit einer ausgewogenen Mischung aus SM und Umrichter mit $\cos(\varphi) = 1$ und den ASM mit $\cos(\varphi) = 0.8$ die Spannungen in den tolerierbaren Bereich gebracht.

Die Auslastung der nahe am Trafo gelegenen Leitungen ist bedingt durch den Netzaufbau ohne DEA höher. Der Einsatz von DEA ermöglicht eine bessere Verteilung der Energieeinspeisung.

NETZBILANZEN

Nicht nur die Lasten nehmen Einfluss auf den Blindleistungsfluss, sondern auch die Art der Ankopplung der DEA ist entscheidend. Je mehr Asynchronmaschinen eingesetzt werden, desto höher wird der Blindleistungsfluss. Werden Spannungsregelungen bei den Umrichtern vorgesehen, ergibt sich auch eine Zunahme des Blindleistungsflusses.

Ohne spannungsregulierende Massnahmen der Umrichter und der Synchronmaschinen – d.h. wenn keine Blindleistung bezogen oder eingespiessen wird – wird je nach Belastungszustand im Netz mehr Blindleistung umgesetzt als wenn keine DEA eingesetzt werden. Im Normalfall erhöhen spannungsregulierende DEA den Blindleistungsfluss im Netz.

Durch den Einsatz von DEA vor allem bei hoher Belastung des Netzes wird eine starke Reduktion der Netzverluste erreicht. Bei schwacher Belastung kommt es auf die Art der Einspeisung an. Vor allem wenn viel Blindleistung bezogen werden muss, um die Spannung zu halten oder durch den Einsatz von Asynchronmaschinen, kann es sogar zu einer Erhöhung der Netzverluste kommen.

Die Simulationen der Netzbilanzen lassen den Schluss zu, dass mit der richtigen Wahl der DEA-Ankopplung Netzverluste eingespart werden, weil die Energie besser im Netz verteilt ist. Weiter kann bei hohen Lasten auch der Blindleistungsfluss minimiert werden.

TAGESVERLÄUFE

Ohne DEA bewegt sich die Spannung an der NS-Sammelschiene Transformatorenstation Altwiesenstrasse über den Tag betrachtet in einem schmalen Band von ca. 3 V.

Je weiter weg von der Einspeisestelle die Spannung betrachtet wird, desto grösser ist die Spannungsschwankung.

Werden DEA ohne Spannungsregelung eingesetzt, speisen diese während des Tages von 8.00 Uhr - 18.00 Uhr mit maximaler Wirkleistung ein. Durch die gleichzeitigen Ein- und Ausschaltzeiten der DEA erhöht sich die Spannung an der NS-Sammelschiene der Trafostation um ca. 2 V und es findet eine Rückspeisung statt. Es werden keine der betrachteten Leitungen überlastet. Je näher die Spannungen bei der Einspeisestelle betrachtet werden, desto höher wird die Spannungsänderung beim Ein- oder Ausschalten der DEA. Dazu ist zu bemerken, dass in der Praxis nicht alle DEA genau im gleichen Moment einschalten, wie das in den Simulationen der Fall ist.

Wird ein grosser Teil der DEA als Photovoltaikanlagen betrieben, ergibt sich im Vergleich zu der vorangegangenen Simulation ohne Photovoltaik ein weniger markanter Spannungsanstieg beim Ein- oder Ausschalten der DEA. Die Variation der Einspeisecharakteristiken führt noch einmal zu einer Verbesserung der „sprunghaften“ Spannungsänderungen während der Ein- bzw. Ausschaltzeit der DEA. Es ergeben sich bedingt durch die 4 verschiedenen Charakteristiken nur noch einige kleine Sprünge, die sich besser über den Tag verteilen. Mit der Anzahl verschiedener DEA-Typen mit unterschiedlichen Primärenergien kann sogar eine Glättung der Tagesverläufe erreicht werden. Damit wird klar, dass bei einem erhöhten Einsatz von DEA unbedingt darauf zu achten ist, dass nicht alle DEA zum gleichen Zeitpunkt ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Durch die Begrenzung der Blindleistung und die gezielte Blindleistungsaufnahme der Umrichter kann die Spannung über den Tag betrachtet stabilisiert werden. Die Spannungserhöhung an den DEA-Anschlusspunkten ist weit weniger hoch, als wenn keine spannungsregulierenden Massnahmen ergriffen werden. Wenn die DEA einschalten, steigt der Strom in einzelnen Leitungen bis knapp unter den Grenzwert, wobei die Blindleistungsaufnahme der Umrichter einen grossen Anteil dazu beitragen.

Eine weitere Möglichkeit, um ausgeglichene Tagesverläufe zu erhalten und den Transformator zu entlasten, ist der Einsatz von Speichern zusammen mit den DEA. Mit den Speichern

werden auch die Spannung am Anschlusspunkt stabilisiert. Speicher haben aber nur in sehr grosser Ausführung einen Einfluss auf die Spannungsstabilität. Damit die überschüssige Energie am Tag aufgenommen werden kann, wären Speicher mit einer technisch kaum realisierbaren Kapazität einzusetzen.

KURZSCHLUSSSIMULATIONEN

Die Kurzschlussleistungen nehmen mit DEA leicht zu. Die Umrichter tragen allerdings nur einen geringen Teil dazu bei. Verantwortlich für den Anstieg sind vor allem die Maschinen, wobei SM und ASM bei der Kurzschlussbetrachtung keine relevanten Unterschiede ausmachen. Die Umrichter speisen in der ersten Phase des Kurzschlusses mit dem 1.5-2 fachen Nennstrom ein, bevor sie vom Netz getrennt werden. Schwierigkeiten können bei knapp dimensionierten Transformatoren oder NS-Verteilungen in den Transformatorstationen entstehen: Durch den Anschluss von grossen ASM und SM werden die Kurzschlussleistungen stark erhöht.

Allgemein lässt sich sagen, dass mit DEA die Kurzschlussleistungen auf allen Leitungen ansteigen. Die Synchron- und Asynchronmaschinen sind dabei für den grössten Teil des Anstiegs verantwortlich.

Bei Inselbetrieb können eher Probleme durch zu kleine Kurzschlussströme auftreten, weil durch den zu kleinen Strom die Schutzelemente nicht mehr auslösen würden.

OBERSCHWINGUNGEN

Oberschwingungen entstehen durch Betriebsmittel mit nichtlinearer Kennlinie wie etwa Transformatoren, Leuchtstofflampen, Gleichrichter, Thyristoren usw. Umrichter gehören auch in diese Kategorie und erzeugen neben den harmonischen auch zwischenharmonische Oberschwingungen. Die Effektivwerte der Zwischenharmonischen sind im allgemeinen kleiner als 5 %, bezogen auf den Grundschwingungsstrom und nehmen mit steigender Frequenz ab.

Die Grenzwerte für den THD – der gesamte Spannungsklirrfaktor – betragen im Normalfall 8 %, an einzelnen Anschlusspunkten darf dieser Grenzwert überschritten werden.

Die Anschlussbedingungen eines Umrichters geben vor, dass der gesamte Klirrfaktor des Stromes drei Prozent nicht überschreiten darf. Je nach Anschlussimpedanz können an einzelnen Knoten zusammen mit den Oberschwingungsströmen der Lasten THD-Spannungswerte entstehen, die bei der symmetrischen Simulation knapp unter 4 % zu liegen kommen. Der Grenzwert von 8 % wird im betrachteten Netzausschnitt nicht erreicht. Der Spannungsklirrfaktor an den Knoten nimmt in Richtung des Trafos ab.

Mit der unsymmetrischen Simulation werden die Grenzwerte überschritten, d.h. die THD-Werte liegen über 12 %. Dabei gilt zu beachten, dass grosse Einspeiseleistungen angesetzt worden sind. Wird weniger Leistung eingespeisen, geht damit der gesamte Spannungsklirrfaktor zurück und die Grenzwerte können eingehalten werden. Der Unterschied zwischen der symmetrischen und unsymmetrischen Simulation lässt sich durch die unterschiedlichen Impedanzen der Kabel im Null- und Mit- bzw. Gegensystem erklären. Die bei der symmetrischen Simulation nicht berücksichtigten Nullimpedanzen der Kabel sind im betrachteten Netz um den Faktor 5 grösser als im Mit- oder Gegensystem. Daraus lässt sich schliessen, dass sich mit

der geeigneten Kabelwahl grosse Klirrfaktorwerte im Zusammenhang mit Umrichtern unter Umständen vermeiden lassen.

Der für die Simulationen eingesetzte Umrichter wurde mit einer Schaltfrequenz von ca. 2.55 kHz betrieben. Daraus ergeben sich maximale Oberschwingungsströme bei der 10. bis 15. Harmonischen. Die Oberschwingungsströme nehmen bei höheren Harmonischen kontinuierlich ab. Ab der 50. Harmonischen (2.5 kHz) gibt es bedingt durch die Taktfrequenz der Umrichter einen leichten Anstieg. Über 2.5 kHz gibt es keine Normen die Oberschwingungen beschränken, in den meisten Fällen sind sie auch unproblematisch. Die Interharmonischen können allerdings zu Problemen führen, weil sie die Rundsteuersignale stören können. Deshalb besteht in der Schweiz eine Norm die besagt, dass innerhalb von 100 Hz eines Rundsteuersignals die Spannungszwischenharmonischen nur 0.3 % betragen dürfen. Bei auftretenden Problemen mit grossen Umrichtern können die Ausgangsfilter soweit angepasst werden, dass die Rundsteuersignale nicht mehr gestört werden.

SCHLUSSEZIEHUNG

Im Niederspannungsnetz dominieren bei 50 Hz eher die ohmschen Anteile. Daher ist für den Spannungsabfall die Wirkleistung des Verbrauchs oder der Einspeisung der bestimmende Faktor. Durch die Einspeisung von Wirkleistung steigt die Spannung an den Einspeiseknoten naturgemäss an.

Dem Spannungsanstieg kann durch Blindleistungsbezug der DEA entgegengewirkt werden. Die Asynchronmaschinen nehmen bedingt durch ihren Aufbau Blindleistung auf. Auch Umrichter oder Synchronmaschinen eignen sich dafür die Spannungen an den Knoten durch Blindleistungsbezug auf dem gewünschten Niveau zu halten.

Wenige DEA und kleine DEA-Leistungen sind für das Niederspannungsnetz unproblematisch. Erst sehr grosse DEA und enorme DEA-Dichten, das heisst, wenn die Einspeiseleistung der DEA höher ist als der Verbrauch, führen zu Problemen mit der Einhaltung der Toleranzen. Durch den Einsatz von dezentralen Anlagen kann die Spannungsstabilität vor allem an den Knoten, die weit weg von den Transformatoren sind, verbessert werden. Die Leitungsbelastung bleibt auch mit einer hohen DEA-Dichte unterhalb der Grenzwerte.

Nicht nur die Lasten nehmen Einfluss auf den Blindleistungsfluss, sondern auch die Art der Ankopplung der DEA ist entscheidend. Je mehr Asynchronmaschinen eingesetzt werden, desto höher wird der Blindleistungsfluss. Werden Spannungsregelungen bei den Umrichtern vorgesehen, ergibt sich damit auch eine Zunahme des Blindleistungsflusses. Dies wirkt sich dann negativ auf die Netzverluste aus.

Die Simulationen der Netzbilanzen lassen den Schluss zu, dass mit der richtigen Wahl der DEA-Ankopplung Netzverluste minimiert werden können.

Die Kurzschlussleistungen nehmen mit DEA leicht zu. Die Umrichter tragen allerdings nur einen geringen Teil dazu bei. Die Tagesverlaufsimulationen haben gezeigt, dass eine Durchmischung mit verschiedenen DEA-Typen mit unterschiedlichen Einspeisecharakteristiken die Spannungsschwankungen über den Tag betrachtet klein halten.

Bei einer niedrigen DEA-Dichte stellen Oberschwingungen keine Probleme dar. Erst durch eine massive Einspeisung von Umrichtern können die Grenzwerte überschritten werden. Umrichter verursachen neben den harmonischen Oberschwingungen auch interharmonische, die im Zusammenhang mit Rundsteuersignalen zu Störungen führen. Die Ausgangsfilter der Um-

richter können jedoch soweit angepasst werden, dass die Rundsteuersignale nicht mehr stören.

1. EINLEITUNG

Mit der Verknappung der Erdölreserven können in naher Zukunft vermehrt dezentrale Wärmekraftkopplungsanlagen in den Einsatz kommen, welche einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Als aktuelles Beispiel kann man hier die Brennstoffzelle nennen. Sind bis anhin nur einige wenige Photovoltaik- und Windkraftanlagen im Einsatz, wird die Anzahl der dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) in den nächsten Jahren ansteigen. Bei wenigen kleinen DEA ist der Einfluss auf das Niederspannungsnetz noch sehr gering und kann vernachlässigt werden. Bei vielen DEA vor allem mit grösserer Leistung darf man die Einflüsse nicht mehr ausser Acht lassen. Neben teilweise höheren Leitungsbelastungen und Kurzschlussleistungen kann der Einsatz von dezentralen Anlagen auch positive Auswirkungen auf die Spannungsstabilität mit sich bringen. Ein weiterer Vorteil liegt in den kleineren Verlustleistungen in den Leitungen durch die kleineren Distanzen über die die Energie übertragen werden muss. Denkbar wären auch Leistungsregelungen der Verteilnetzbetreiber, die je nach Bedarf einzelne DEA ein- oder ausschalten könnten, um Leistungsdefizite oder -überschüsse besser regulieren zu können. So wäre es durchaus möglich, dass viele kleine DEA einen virtuellen Kraftwerkspark bilden könnten.

1.1. ZIEL DER STUDIE

Wesentlich ist die Beurteilung der Auswirkungen von vermehrter dezentraler Erzeugung in den regionalen und lokalen Verteilnetzebenen. Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, Lösungsansätze zu den technischen Problemstellungen zu finden und die ökonomischen Auswirkungen für die Verteilnetzbetreiber abschätzen zu können.

1.2. SIMULATIONEN MIT EINEM TEILNETZ DES EWZ

Um die Auswirkungen der Zunahme der DEA im NS-Netz untersuchen zu können, wurden entsprechende rechnerische Simulationen mit einem Teilnetz des ewz durchgeführt. Als Grundlage für die Simulationen dient das NS-Netz Altwiesenstrasse des ewz. Dieses Netz beinhaltet lange Leitungen sowie hohe Lasten, was wichtig ist, um eine allgemeine Aussage über die Auswirkungen von DEA im Niederspannungsnetz zu machen.

Bei den Simulationen wird wie folgt vorgegangen:

- An den Sammelschienen werden die Spannungen mit und ohne DEA miteinander verglichen.
- Für die Simulationen mit DEA werden verschiedene Varianten gebildet, auf die weiter unten näher eingegangen wird.
- Von den Leitungen wird ein Wirk- und Blindleistungsprofil aufgenommen und die Leitungsbelastungen überprüft.
- Der Strom der Trafos an der Altwiesenstrasse wurde für einen Tagesverlauf nachgebildet. Damit kann man die Spannungen, Ströme und Leistungen während eines Tages beobachten.
- Im Weiteren muss gewährleistet werden, dass die DEA nicht überlastet werden und dass auch der maximal mögliche Anteil an Blindleistung nicht überschritten wird.

- Von grossem Interesse sind auch die Kurzschlussleistungen und die Auslösezeiten der Schutzfunktionen.
- Durch die Einspeisung über Umrichter darf man auch die Oberschwingungen nicht ausser Acht lassen.
- Weiter werden Optimierungsmöglichkeiten der Spannungs- und Leistungsschwankungen mittels Kompensatoren oder Speicher untersucht.

Die Resultate dieser Simulationen werden in diesem Bericht aufgezeigt.

1.3. SIMULATIONSPROGRAMM

Für die Netzsimulationen wurde das Programm Digsilent verwendet. Es integriert sämtliche Funktionalitäten, welche für die umfassende Bewertung von Netzen notwendig sind: Lastflussberechnungen, Kurzschlussstromberechnungen, Momentanwertanalyse, Effektivwertanalyse und Oberschwingungsanalyse.

1.4. EIGENSCHAFTEN DES NIEDERSpannungsNETZES

Da das Impedanzverhältnis R/X im Niederspannungsnetz etwa 2:1 beträgt, ist für den Spannungsabfall die Wirkleistung des Verbrauchs oder der Einspeisung der bestimmende Faktor und nicht wie im Mittelspannungsnetz der Blindleistungsanteil.

Beispiel:

In folgendem Netz wurde für den ersten Berechnungsfall die DEA 1 auf P-Q-Regelung eingestellt sowie P und Q auf 0 gesetzt. An der Sammelschiene VK6292 beträgt die Spannung dabei 419 V. Setzt man nun die Wirkleistung der DEA 1 auf 500 kW (Abbildung 1), stellt sich eine Spannung von 443 V ein. Setzt man P wieder auf 0 und dafür Q auf 500 kVar (Abbildung 2), findet man eine Spannung von 437 V vor. Dies zeigt, dass im Niederspannungsnetz die Wirkleistung mehr Einfluss auf die Spannung hat als die Blindleistung.

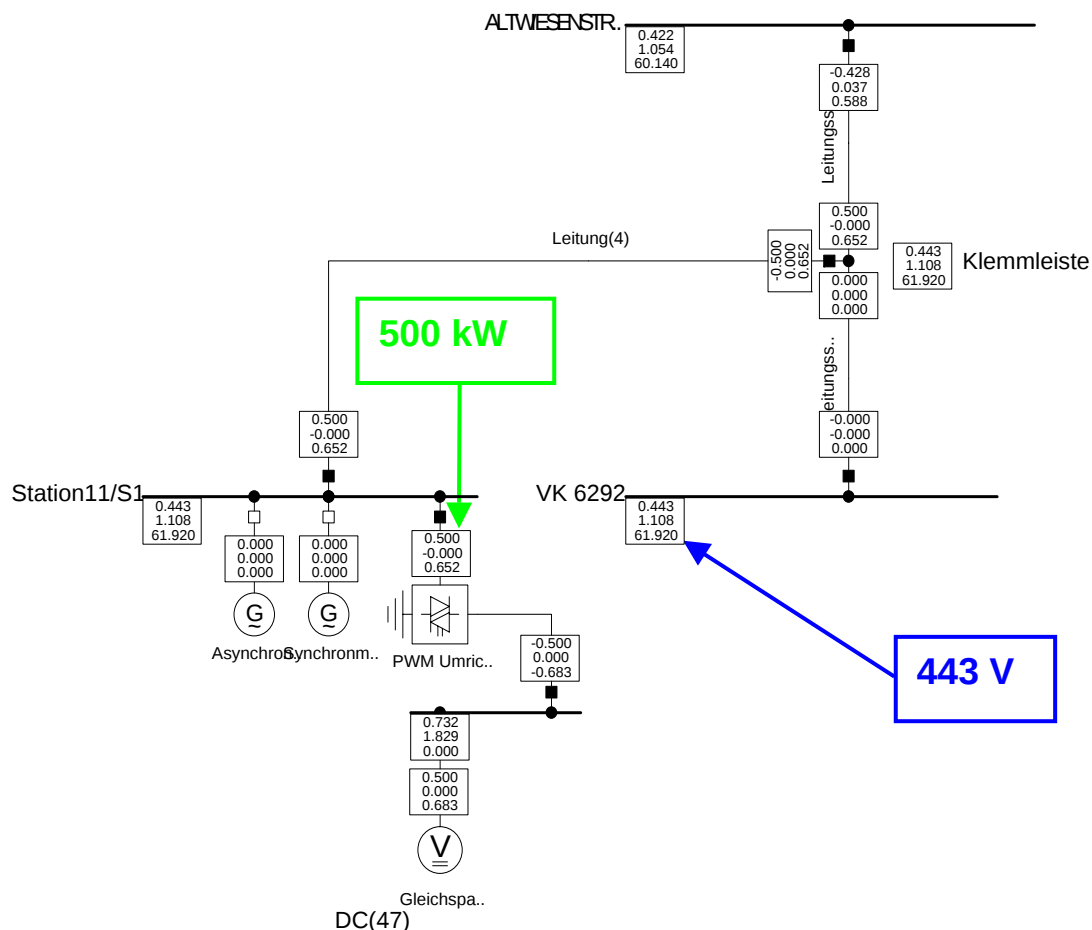


Abbildung 1: DEA ohne Blindleistungsbezug

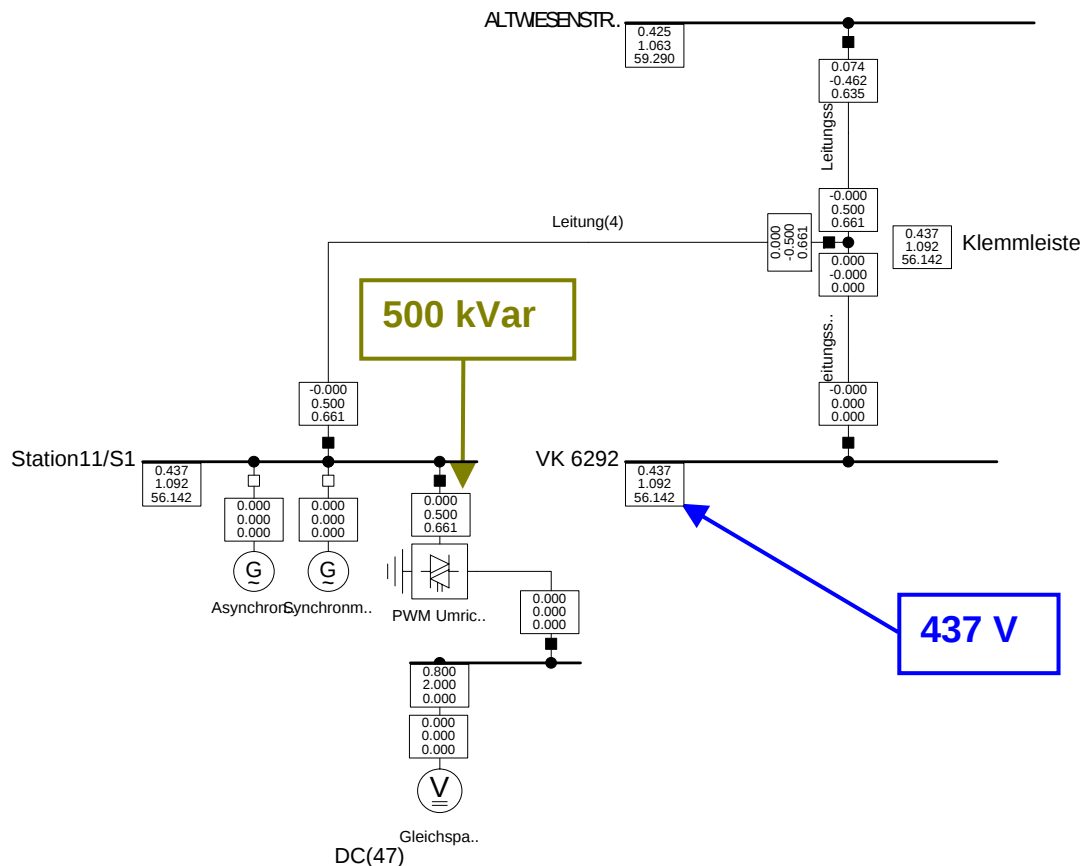


Abbildung 2: DEA mit Blindleistungsbezug

1.5. EIGENSCHAFTEN DER DEA

Das NS-Netz der Altwiesenstrasse wurde so aufbereitet, dass an allen Leitungen DEA angeschlossen wurden. Die Einspeiseleistung wurde den Lasten auf den Leitungen angepasst. Bei Lasten kleiner 20 kVA werden DEA angeschlossen, die 20 kW einspeisen. Bei Lasten grösser 20 kVA werden DEA eingesetzt, die über eine Leistung von 50 kW verfügen. An der Leitung L3 K2.3-3.3 (Abbildung 5) wird eine DEA mit 100 kW angeschlossen und simuliert eine Mikroturbine eines Schulhauses.

Man kann 6 dezentrale Anlagentypen unterscheiden, welche unterschiedlich in das Netz angebunden werden. Photovoltaik-Anlagen, Brennstoffzellen-Kraftwerke und Mikroturbinen werden über PWM-Umrichter angeschlossen, Wasser- und Windkraftwerke über Synchron- oder Asynchronmaschinen und Motor-WKK über Umrichter oder ASM.

Die Asynchronmaschinen nehmen immer Blindleistung auf und weisen einen $\cos(\varphi)$ von etwa 0.8 auf und werden meist bei kleineren Leistungen eingesetzt. Für grössere Anlagen werden eher Synchronmaschinen eingesetzt, bei denen der $\cos(\varphi)$ „beliebig“ eingestellt werden kann. Die Umrichter können mit oder ohne Spannungsregelung betrieben werden. Ohne Spannungsregelung heisst, dass nur Wirkleistung eingespeisen wird, womit sich ein $\cos(\varphi)$ von 1 ergibt. Mit der Spannungsregelung regelt der Umrichter auf die voreingestellte Spannung, was zum Beispiel bei Schwachlast zu einer starken Blindleistungsaufnahme führt. Damit wird wohl die Spannung auf den gewünschten Wert reduziert, die Leistungsgrenzen der

Maschinen werden aber nicht berücksichtigt. In den nachfolgenden Simulationen ist ersichtlich, dass die Blindleistungsaufnahme der DEA in den meisten Fällen zu hoch ist. Darum wurden die Umrichter in einer zusätzlichen Variante mit einem konstanten $\cos(\varphi)$ simuliert. Mit der Variante „U-Regelung“ wurde ermittelt, ob die DEA durch eine zu hohe Blindleistung überlastet sind und ob sie Blindleistung aufnehmen oder abgeben. Je nachdem werden die DEA auf einen $\cos(\varphi)$ von 0.8 kapazitiv oder induktiv eingestellt, wodurch die DEA vor Überlastung geschützt werden.

1.6. DIE VERSCHIEDENEN SIMULATIONSvarianten

Bei der folgenden Aufzählung werden die Eigenschaften der verschiedenen Varianten aufgeführt:

1.6.1. Ohne DEA

Hierbei handelt es sich um das Originalnetz, das heisst es sind keine dezentralen Erzeugungsanlagen angeschlossen.

1.6.2. U-Regelung

An jeder Leitung werden DEA (50 % Umrichter, 50 % SM) angeschlossen, wobei die Umrichter über eine Spannungsregelung verfügen. Dadurch können die Spannungen auch an vom Trafo weit entfernten Leitungen auf 1.03 p.u. gehalten werden. Die Simulation dieser Variante liefert nur teilweise brauchbare Resultate, weil die meisten Umrichter überlastet werden. Sie dient aber als Zwischenschritt, um die überlasteten Umrichter zu lokalisieren. Durch diese Variante ist anschliessend die Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ entstanden.

1.6.3. DEA bei Lasten >20 kW

Diese Variante wurde im folgenden Bericht nicht mehr weiter verfolgt. Sie war aber noch Bestandteil des Zwischenberichtes und wird daher der Vollständigkeit aufgeführt:

Nur an den Leitungen, die Lasten grösser 20 kW aufweisen, werden 50 kW DEA angeschlossen. Auch hier werden die meisten Umrichter überlastet, wodurch diese Variante auch nur als Zwischenschritt auf der Suche nach der richtigen Methode zu betrachten ist.

1.6.4. Ohne U-Regelung

Bei dieser Variante wird ohne Spannungsregelung gearbeitet. Die Einspeisewirkleistung ist konstant, die Blindleistung wurde auf 0 gesetzt. Dies bedeutet, dass der $\cos(\varphi)$ immer 1 bleibt. Durch die Wirkleistungseinspeisung steigen die Spannungen an den Knoten auf recht hohe Werte an. Für die Tagesverlaufsimulationen wurde diese Variante um 3 Untervarianten erweitert:

1. „Photovoltaik“
2. Nebst der normalen Charakteristik (volle Einspeisung von 8.00-18.00 Uhr) wurde etwa die Hälfte der Umrichter-DEA mit einer Photovoltaik-Charakteristik ausgestattet. Diese Variante nennt sich
3. „verschiedene Einspeisecharakteristiken“

4. Damit nicht alle DEA zur gleichen Zeit einschalten, werden sie gestaffelt ein- bzw. ausgeschaltet. Dies wurde mit 3 verschiedene Einspeisecharakteristiken, die um je eine Stunde verschoben sind, erreicht.
5. „Speicher“
6. Die Auswirkungen auf die Spannungsstabilität durch den Einsatz eines Speichers sind genauer untersucht worden

1.6.5. ASM/SM/Umrichter

Mit einer Durchmischung von Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen und Umrichter wird eine realistische Verteilung im betrachteten Ausschnitt erreicht. Dabei werden 50% Umrichter eingesetzt und je 25% Asynchron- und Synchronmaschinen eingesetzt. Die Wirkleistungseinspeisung ist auch hier konstant, die Blindleistung wurde bei den Umrichtern und Synchronmaschinen auf 0 gesetzt und die Asynchronmaschinen nehmen bedingt durch ihren Aufbau immer Blindleistung auf. Dies bedeutet, dass der $\cos(\varphi)$ der Umrichter und SM immer 1 bleibt und derjenige der ASM ca. 0.8 beträgt. Durch die Wirkleistungseinspeisung steigen die Spannungen an den Knoten an, was man aber durch die Blindleistungsaufnahme der ASM besser in den Griff bekommt.

1.6.6. Begrenzter $\cos(\varphi)$

In dieser Variante wird die Blindleistung der Umrichter begrenzt, damit sie vor einer Überlastung geschützt sind. Die Spannungshaltung ist nicht mehr so gut, wie wenn mit einer echten Spannungsregelung gearbeitet wird, es darf aber durchaus von einer spannungsregulierenden Massnahme gesprochen werden.

In der Praxis könnten die drei letztgenannten Varianten „ohne U-Regelung“, „ASM/SM/Umrichter“ und „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ eingesetzt werden. Ihnen ist daher im Folgenden am meisten Beachtung zu schenken.

1.7. KENNDATEN DER ALTWIESENSTR. 15

Die folgenden Tabellen sollen einen Überblick über den untersuchten Ausschnitt im ewz-Netz vermitteln:

1.7.1. Tabelle Lastdaten

Die nachfolgenden Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Planungslast (100%). Um die Werte der Höchst- (60%), Mittel- (48%), und Schwachlast (27%) zu erhalten muss man die Werte mit den entsprechenden Faktoren multiplizieren.

Daten der Lasten	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
Altwiesenstr. 15	1378	868	1649
Heerenwiesen	779	387	870
Herzogenmühlestr.	680	329	755
Hüttenkopfstrasse	513	248	570
Luchsweg	1032	516	1154
Stettbach Schulhaus	1515	753	1700
Wechselwiesen	1274	617	1415

Tabelle 1: Lastdaten

1.7.2. Tabelle der Umrichter

Bei der folgenden Tabelle handelt es sich um die Maximalwerte der Umrichter.

Daten der Umrichter	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
Altwiesenstr. 15 gesamt	700	525	875
Heerenwiesen	500	375	625
Herzogenmühlestr.	300	225	375
Hüttenkopfstrasse	300	225	375
Luchsweg	500	375	625
Stettbach Schulhaus	800	600	1000
Wechselwiesen	700	525	875

Tabelle 2: Umrichterdaten

1.7.3. Tabelle der Synchronmaschinen

Die Synchronmaschinen sind bei den folgenden Simulationen immer mit einem $\cos(\varphi)$ von 1 betrieben. Bezogen auf die folgenden Simulationen entspricht die Scheinleistung der Wirkleistung.

Daten der Synchronmaschinen	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
Altwiesenstr. 15 gesamt	400	0	400
Heerenwiesen	300	0	300
Herzogenmühlestr.	200	0	200
Hüttenkopfstrasse	200	0	200
Luchsweg	400	0	400
Stettbach Schulhaus	700	0	700
Wechselwiesen	600	0	600

Tabelle 3: Daten der Synchronmaschinen

1.7.4. Tabelle gesamte Wirkleistungseinspeisung der DEA

Die Wirkleistungseinspeisungen der verschiedenen Varianten unterscheiden sich kaum. Die Asynchronmaschinen senken die Spannungen an den Einspeiseknoten ab, was zu einer kleineren Einspeiseleistung führt.

Belastung	ohne DEA [MW]	ohne U-Regelung [MW]	ASM/SM/Umrichter [MW]	begrenzter $\cos(\varphi)$ [MW]
100%	0	2.94	2.78	2.94
60%	0	2.94	2.78	2.94
48%	0	2.94	2.78	2.94
27%	0	2.94	2.78	2.94

Tabelle 4: Wirkleistungseinspeisungen

1.7.5. Tabelle gesamte Blindleistungseinspeisung der DEA

Die Blindleistungs-Einspeisung variiert je nach angewendeten DEA-Typen ziemlich stark. Am meisten Blindleistung wird bei der Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ umgesetzt.

Belastung	ohne DEA [MVar]	ohne U-Regelung [MVar]	ASM/SM/Umrichter [MVar]	begrenzter $\cos(\varphi)$ [MVar]
100%	0	0	-1.29	-2.17
60%	0	0	-1.29	-2.44
48%	0	0	-1.29	-2.55
27%	0	0	-1.3	-2.77

Tabelle 5: Blindleistungs-Einspeisung / -Aufnahme

1.8. BEISPIEL ZUR BLINDLEISTUNGS-AUFNAHME

Die Spannung an der Altwiesenstrasse beträgt ohne DEA etwa 1.03 p.u. bei Mittellast. Die Spannung beim Umrichter wurde in diesem Beispiel auf 1.00 p.u. gesetzt. Der Umrichter verfügt über eine Spannungsregelung, was zur Folge hat, dass die DEA Blindleistung aufnehmen muss, um die Spannung auf 400 V zu halten. Das kann dazu führen, dass die DEA überlastet werden, denn aus der Lastflussberechnung ist ersichtlich, dass die DEA für dieses Beispiel 459 kVar Blindleistung aufnehmen muss, was für einen 50 kW-Umrichter etwa einer 7-fache Nennleistungsbelastung entspricht.

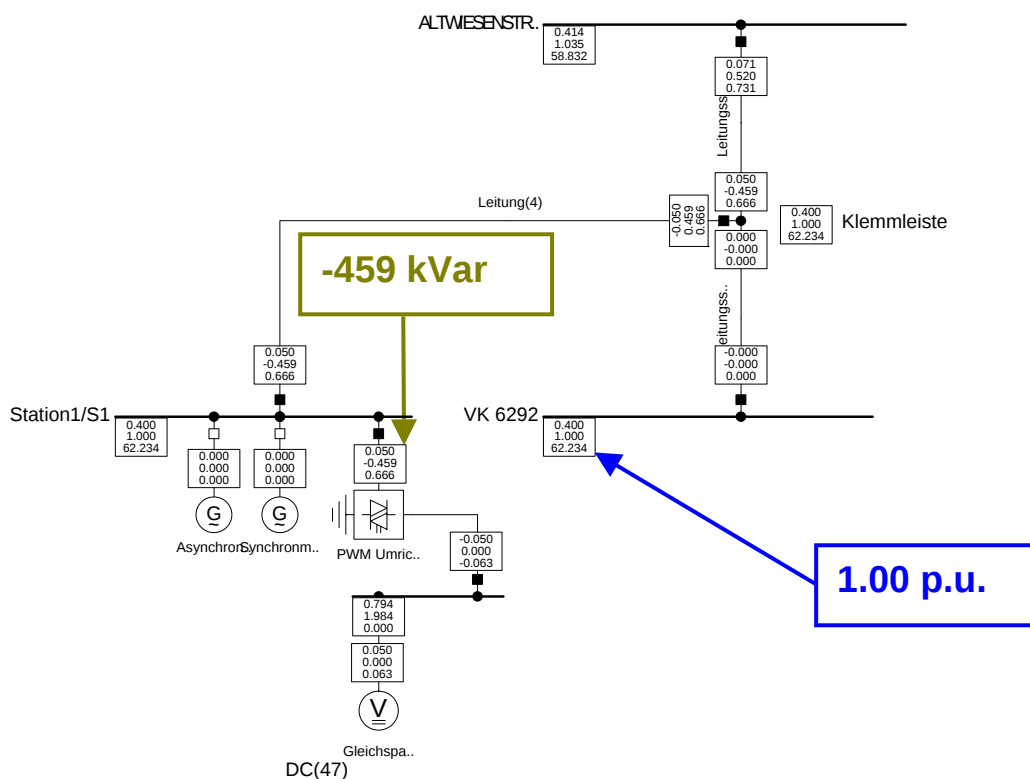


Abbildung 3: Spannungsregelung auf 1.0 p.u. mit Blindleistungsaufnahme

Bei der Abbildung 4 wurde die Spannung beim Umrichter auf 1.05 p.u. geregelt. Dies hat zur Folge, dass die DEA Blindleistung abgeben muss, um die Spannung auf 1.05 p.u. zu erhöhen. Im Normalfall setzt man die Regelspannung auf die Slackspannung, in diesem Fall also 1.03 p.u. Die Wirkleistung reicht nicht um die Spannung auf 420 V (1.05 p.u.) anzuheben. Darum wird zusätzlich zu den 50 kW Wirkleistung noch 29 kVar Blindleistung eingespiessen.

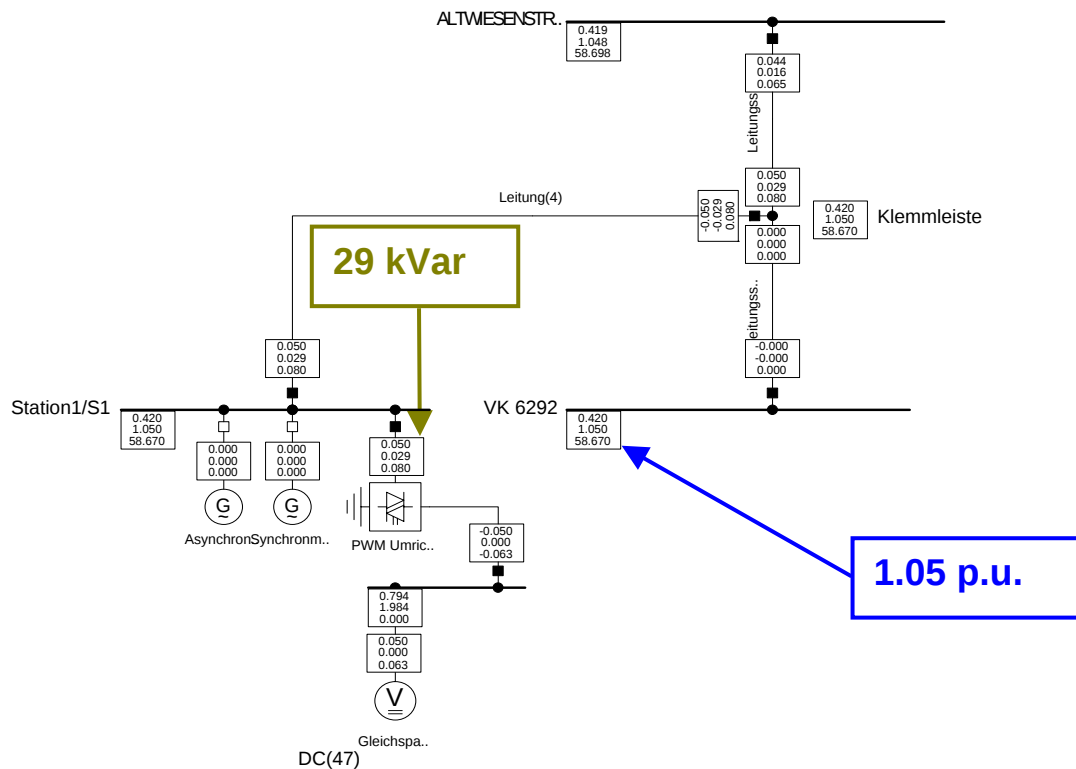


Abbildung 4: Spannungsregelung auf 1.05 p.u. mit Blindleistungsaufnahme

1.9. SIMULATIONSBEDINGUNGEN

Die Simulationen wurden mit dem Mittelspannungsnetz durchgeführt. Der Lastverlauf wurde soweit angepasst, dass die Ströme im Trafo 1 der Altwiesenstrasse mit den Daten eines typischen Tagesverlaufes des ewz übereinstimmen. Dabei handelt es sich um Abschätzungen, weil für die Abgleichung nur Grafiken zur Verfügung waren. Die Kurzschlussimulationen wurden in einem vereinfachten Netz durchgeführt, weil die HTA Biel für das Modul „Schutzfunktionen“ lediglich eine Lizenz für ein Netz bis zu 100 Knoten besitzt.

Die Lastflussberechnungen wurden mit Planungslast, Mittellast, Höchstlast und Schwachlast durchgeführt:

- Die Planungslast entspricht 100 % der maximalen Last.
- Die Mittellast entspricht 48 % der maximalen Last.
- Die Höchstlast entspricht 60 % der maximalen Last.
- Die Schwachlast entspricht 27 % der maximalen Last.

Die Spannung an der Altwiesenstr. 15 ohne DEA beträgt bei Mittellast 412 V, was 1.03 p.u. entspricht. Daher werden die DEA auf eine Spannung von 1.03 p.u. geregelt.

Für die Leitungen wurde ein einheitliches Kabel vom Typ NKBA 3X150/ 70 1kV-TN mit einem Nennstrom von 361 A verwendet. Dies entspricht einer Vereinfachung, denn aus den Netzplänen ist ersichtlich, dass nicht alle Leitungen vom gleichen Typ sind. Die 361 A entsprechen dem theoretischen Nennstrom, in der Praxis muss man mit einer Grenze von 260 A rechnen. Die Lasten der Haushalte sind als Streckenlasten auf den Leitungen an bestimmten Punkten angeschlossen.

1.10. NETZGRAFIK

Der folgende Netzausschnitt wird genauer betrachtet. Um das Netz übersichtlicher und einfacher zu gestalten, wurden den Sammelschienen und Leitungen eigene Namen vergeben. Die Sammelschiene K2.1 wird von einer anderen Strasse gespeist und in Folge dessen nicht weiter berücksichtigt.

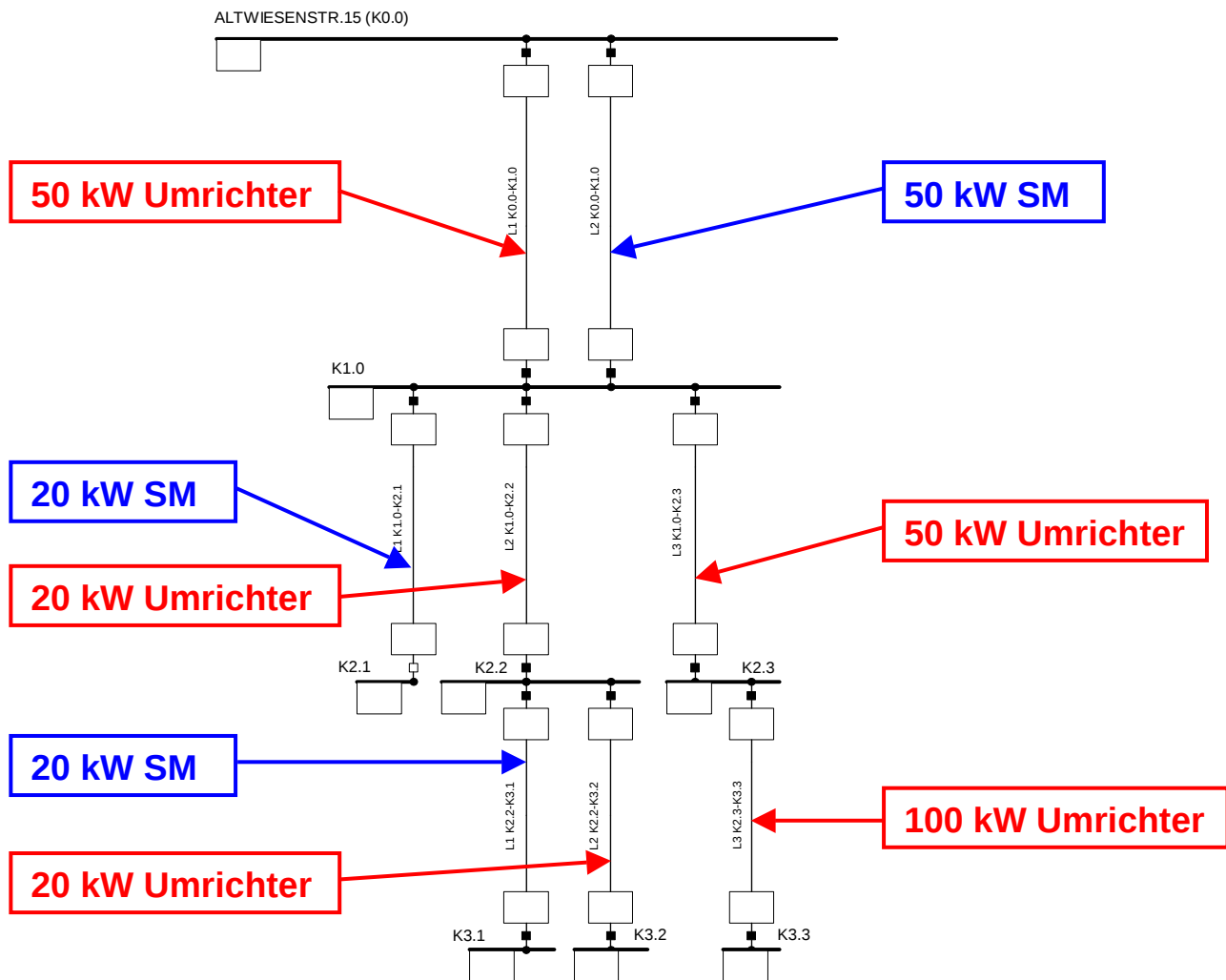


Abbildung 5: Netzgrafik mit DEA Einspeisungen

1.11. ZUSAMMENFASSUNG DER EINLEITUNG

Das Ziel der Simulationen mit dem Niederspannungsnetz des ewz besteht vor allem darin die Auswirkungen von vermehrter dezentraler Erzeugung in den regionalen und lokalen Verteilnetzebenen zu ermitteln und Lösungsansätze zu den technischen Problemstellungen zu finden.

Da bei der Anschlussimpedanz im NS-Netz eher die ohmschen Anteile dominieren, ist für den Spannungsabfall die Wirkleistung des Verbrauchs oder der Einspeisung der bestimmende Faktor. Durch Beispielsimulationen konnte gezeigt werden, dass Umrichter zum Teil sogar Blindleistung aufnehmen müssen um die Spannung am Anschlusspunkt auf dem gewünschten Wert zu halten. Bei tiefen Spannungen kann neben der Wirkleistung auch die Blindleistungsabgabe der DEA dazu verwendet werden, die Spannungen an den Knoten anzuheben.

Die Asynchronmaschinen nehmen bedingt durch ihren Aufbau immer Blindleistung auf und werden eher für kleinere Leistungen eingesetzt. Grössere Anlagen werden über Synchronmaschinen oder Umrichter an das Netz angeschlossen.

Die elektrischen Maschinen erhöhen die Kurzschlussleistung an den Anschlusspunkten im Vergleich zu den Umrichtern markant an.

Durch die Einspeisung von Wirkleistung steigt die Spannung an den Einspeiseknoten naturgemäss an. Man kann dem Spannungsanstieg entgegenwirken, indem man die DEA teilweise Blindleistung aufnehmen lässt. Es ist darauf zu achten, dass dabei die DEA nicht überlastet werden. Im Falle einer aktiven Spannungsregelung durch die DEA kann die berechnete Blindleistungsaufnahme der DEA sehr hoch werden. Wenn in der Praxis die Spannung geregelt sein sollte, müssten die Umrichter mit einer zusätzlichen Regelung ausgestattet werden.

Aus der Sicht der DEA-Betreiber ist es am sinnvollsten, wenn die DEA nur Wirkleistung ins Niederspannungsnetz einspeisen. Die Vorteile der Spannungshaltung an den vom Transformator weit weg gelegenen Leitungen und der besseren Energieverteilung im Netz mit dem damit verbundenen Rückgang der Verluste, werden damit voll ausgeschöpft.

Bei sehr grossen Leistungen von einigen 10kW ist jeder Anschlusspunkt einer DEA über Simulationen oder durch Erfahrungswerte zu überprüfen. Dabei ist insbesondere auf die Anschlussimpedanz und im Anschlusspunkt zu achten. Sehr grosse Anlagen können zu Problemen mit der Einhaltung der Spannungstoleranz führen.

Mit einer ausgewogenen Verteilung der DEA im NS-Netz können sehr gute Resultate bezüglich Spannungsstabilität und Netzverluste erreicht werden. Auch der DEA-Typ ist von entscheidender Bedeutung: Asynchronmotoren eignen sich besonders gut, dass die Spannung im Niederspannungsnetz nicht zu hoch wird, während Umrichter und Synchronmaschinen auch regulierende Aufgaben übernehmen können.

2. SPANNUNGSPROFILE

2.1. SPANNUNGSPROFIL BEI PLANUNGSLAST

Ohne DEA beträgt die Spannung an der Sammelschiene der Altwiesenstr. 15 406 V. An den von der Trafostation am weitesten entfernten Knoten (z.B. K3.3) fällt die Spannung bis auf 383 V ab. Bei der Variante „U-Regelung“ können die Spannungen an praktisch allen Knoten auf 412 V (1.03 p.u.) gehalten werden. Falls keine Spannungsregelung vorgenommen wird, bewegen sich die Spannungen zwischen 409 V und 415 V. Die Asynchronmaschinen bewirken eine Spannungsabsenkung durch die Blindleistungsaufnahme. Dies hat zur Folge, dass die Spannungen etwas tiefer sind, als bei den anderen Varianten mit DEA. Mit begrenztem $\cos(\varphi)$ pendeln sich die Spannungen um 410 V und sind praktisch auf dem gleichen Niveau wie mit Spannungsregelung.

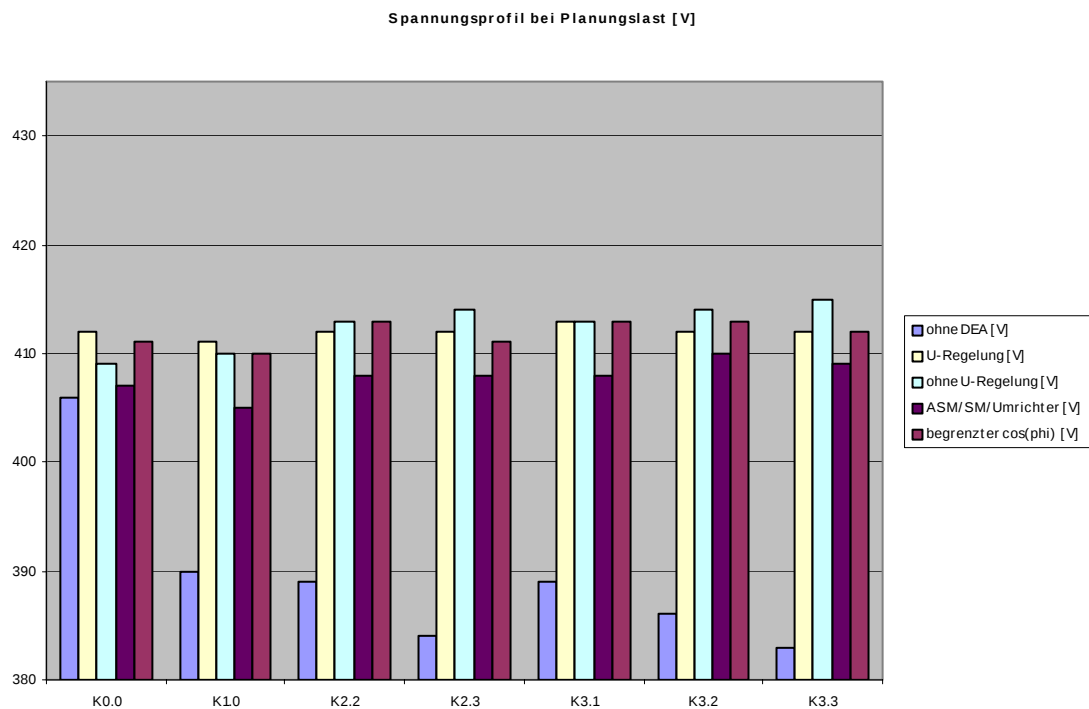


Abbildung 6: Spannungsprofil bei Planungslast

2.2. SPANNUNGSPROFIL BEI MITTELLAST

Ohne DEA ist die Spannung an der Sammelschiene der Altwiesenstr. 15 bei 412 V, das entspricht 6 V mehr, als wenn mit Planungslast simuliert wird. An den unteren Knoten fällt die Spannung nur noch bis auf 401 V ab. Auch hier kann mit der Spannungsregelung der DEA die Spannung an praktisch allen Knoten auf 412 V gehalten werden. Falls keine U-Regelung vorgenommen wird, treten Spannungen von 430 V auf. Bei dem begrenztem $\cos(\varphi)$ sind die Spannungen im Bereich von 411-417 V. Die ASM bewirken auch hier eine Spannungsreduktion von ca. 5 V gegenüber der Variante „ohne U-Regelung“.

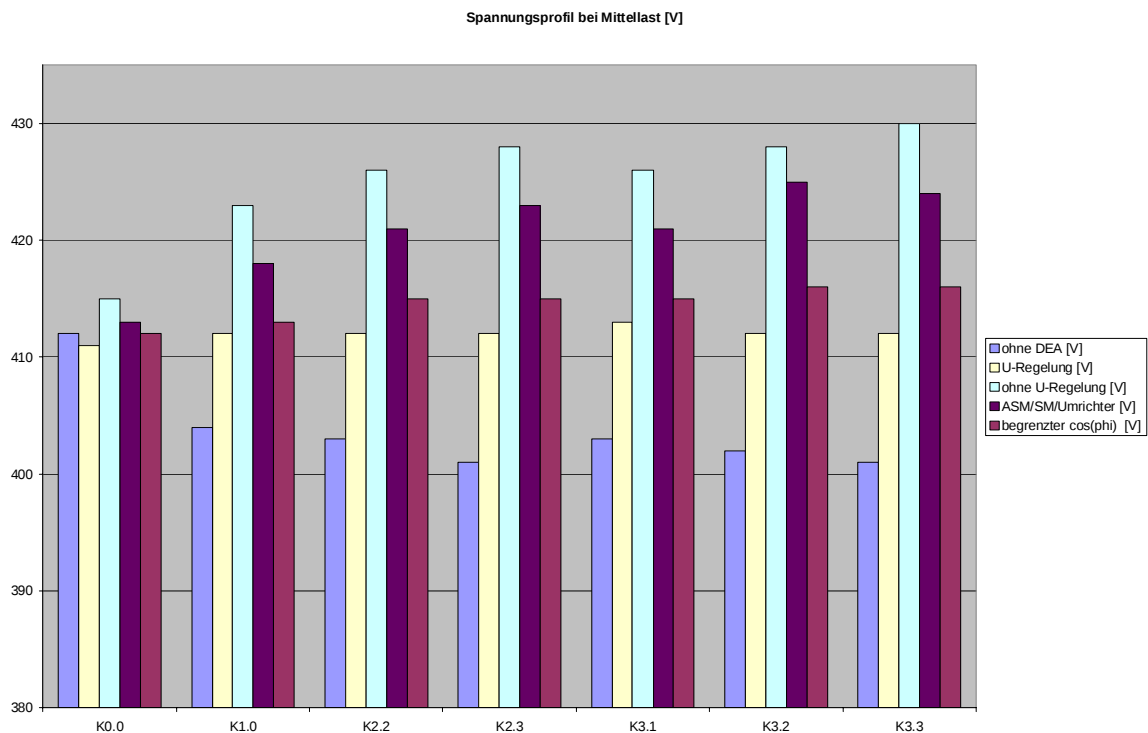


Abbildung 7: Spannungsprofil bei Mittellast

2.3. SPANNUNGSPROFIL BEI HÖCHSTLAST

Ohne DEA ist die Spannung an der Sammelschiene der Altwiesenstr. 15 bei 410 V, das sind 4 V mehr als bei Planungslast. An den unteren Knoten fällt die Spannung auf 397 V ab. Auch hier kann mit der U-Regelung der DEA die Spannung an praktisch allen Knoten auf 1.03 p.u. gehalten werden. Falls keine Spannungsregelung vorgenommen wird, treten Spannungen von bis zu 426 V auf, mit den ASM liegt man wieder etwa 5 V tiefer. Mit begrenztem $\cos(\varphi)$ der DEA liegt das Maximum bei 415 V.

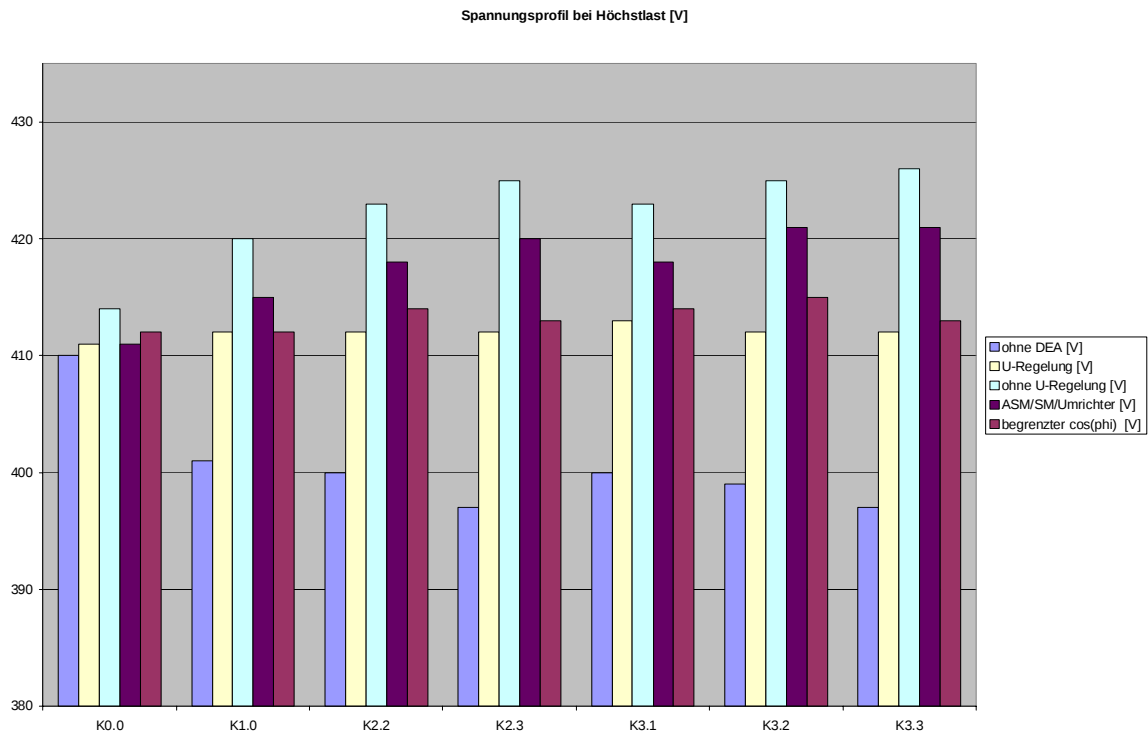


Abbildung 8: Spannungsprofil bei Höchstlast

2.4. SPANNUNGSPROFIL BEI SCHWACHLAST

Ohne DEA ist die Spannung an der Sammelschiene der Altwiesenstr. 15 bei 414 V, das sind 8 V mehr als bei Planungslast. An den unteren Knoten fällt die Spannung nur noch auf 408 V ab. Auch hier kann mit der Spannungsregelung der DEA die Spannung an praktisch allen Knoten auf 1.03 p.u. gehalten werden. Falls keine Spannungsregelung vorgenommen wird, treten Spannung von 435 V auf, welche durch den Einsatz von ASM auf 430 V reduziert werden kann. Mit begrenztem $\cos(\varphi)$ von 0.8 ist der höchste Wert bei 420 V.

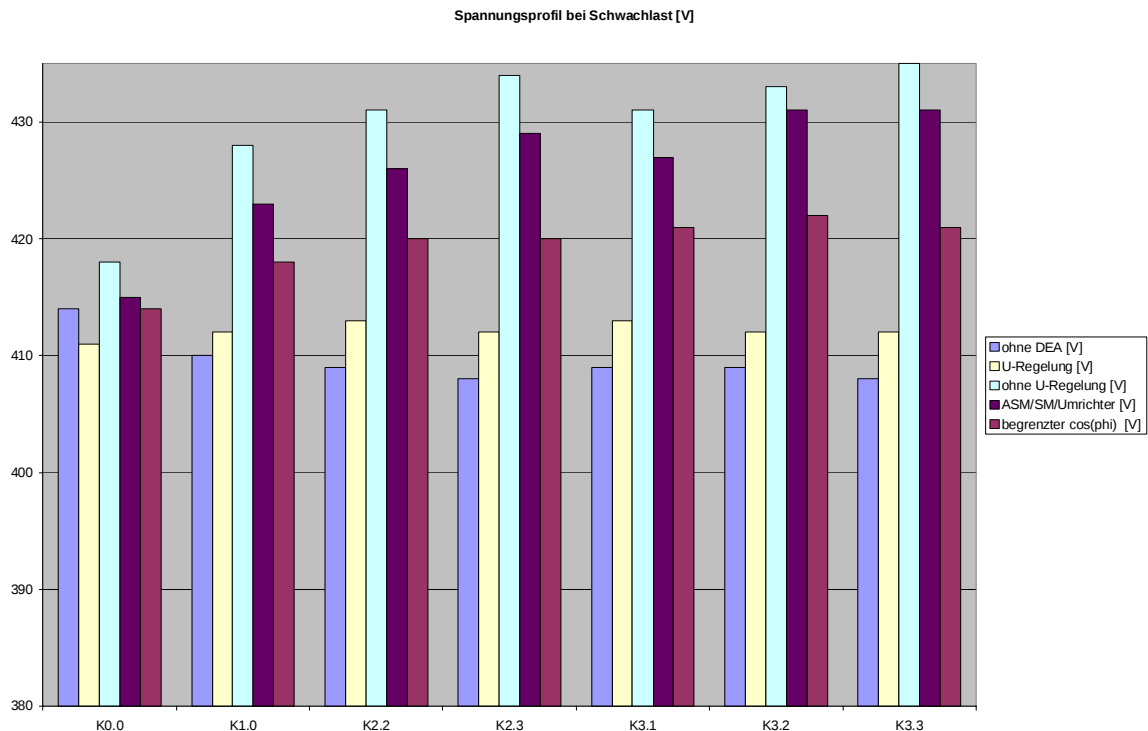


Abbildung 9: Spannungsprofil bei Schwachlast

2.5. SPANNUNGSPROFILE MIT RING BEI SCHWACHLAST

In Abbildung 11 wurde mit den Varianten „ohne DEA“ und „ohne U-Regelung“ mit und ohne Ring simuliert. Zwischen K3.2 und K3.3 wurde eine Leitung eingebaut, die zur Folge hat, dass die Spannungen an diesen Knoten ausgeglichen werden. Die Auswirkungen auf das Spannungsprofil sind bei beiden Varianten recht klein, aber trotzdem hilft ein Ring die Spannungen im Netz besser auszugleichen.

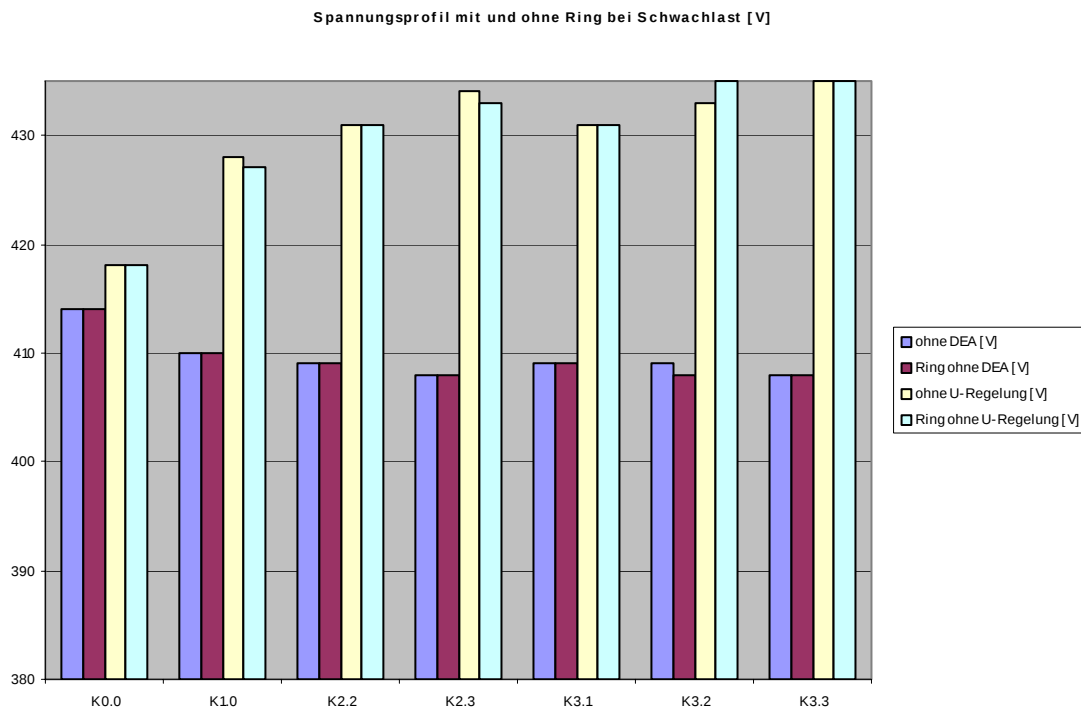


Abbildung 10: Spannungsprofil bei unterschiedlichen Netzverhältnissen

2.6. SPANNUNGSPROFIL MIT HOHER LAST, KLEINER EINSPEISUNG AN K3.2, KLEINER LAST UND HOHER EINSPEISUNG AN K3.3

Durch die starke Variation der Lasten bzw. Einspeisungen entstehen im betrachteten Netz extreme Spannungsunterschiede. An K3.3 wird mit einer Leistung von 300 kW eingespeisen bei einer kleinen Last von 35 kVA. Damit steigt die Spannung an diesem Knoten auf 444 V und sogar am Knoten 3.2 ergibt sich noch eine Spannung von 439 V. Die 444 V sind ausserhalb des zulässigen Toleranzbereiches.

Am Knoten 3.2 wurde mit einer Last von 300 kVA bei einer Einspeisung von 20 kW simuliert, wodurch die Spannung auf 395 V absinkt. Damit ergibt sich eine maximale Differenz von fast 50 V im Netz. Erlaubt sind +/- 10%, was Grenzen von 360 V und 440 V ergibt. Damit kann gezeigt werden, dass erst bei sehr grossen DEA Spannungen entstehen, die nicht mehr zulässig sind.

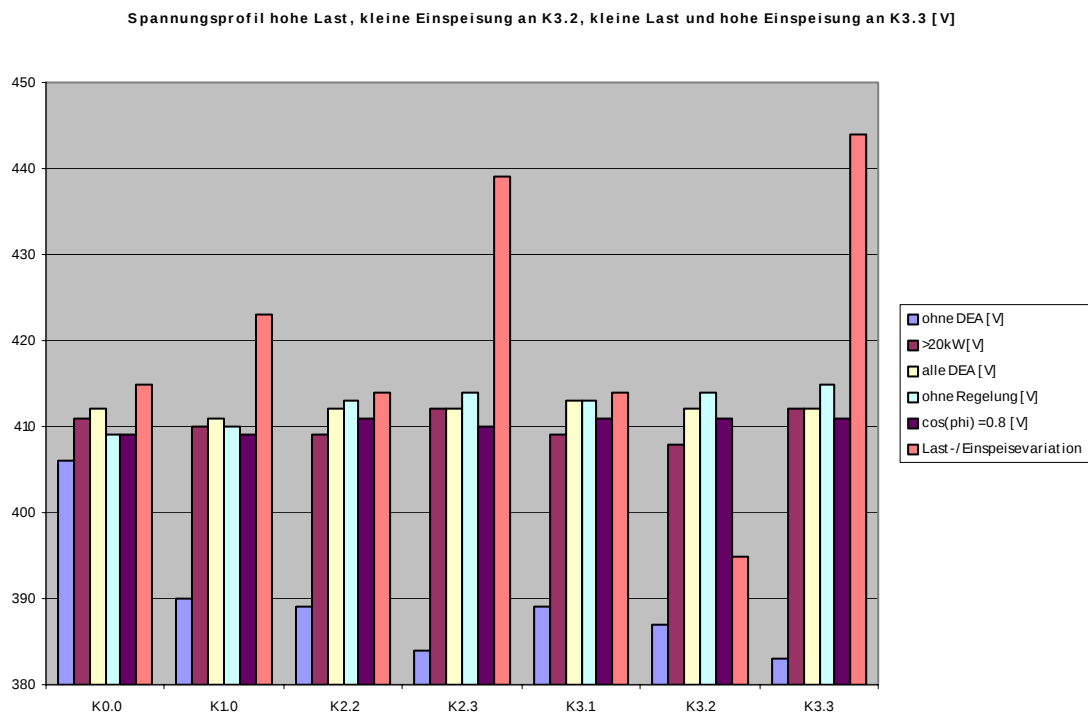


Abbildung 11: Spannungsprofile bei verschiedenen Lastverhältnissen

3. SPANNUNGSVERLÄUFE

3.1. SPANNUNGSVERLAUF ALTWIESENSTR.15 (K0.0) – K3.3 BEI PLANUNGSLAST

Ohne Einspeisungen fällt die Spannung von Knoten zu Knoten ab und erreicht an K3.3 383 V. Mit spannungsgeregelten Umrichtern hält sich die Spannung auf dem eingestellten Wert von 412 V (+1V). Ohne U-Regelung steigt die Spannung an den Knoten an und erreicht ihr Maximum am Knoten K3.3 mit 415 V. Durch den Einsatz von ASM kommt das Spannungsniveau etwas tiefer zu liegen und pendelt sich zwischen 405 V und 410 V ein. Mit begrenztem $\cos(\varphi)$ bewegt sich die Spannung zwischen 410 V und 413 V.

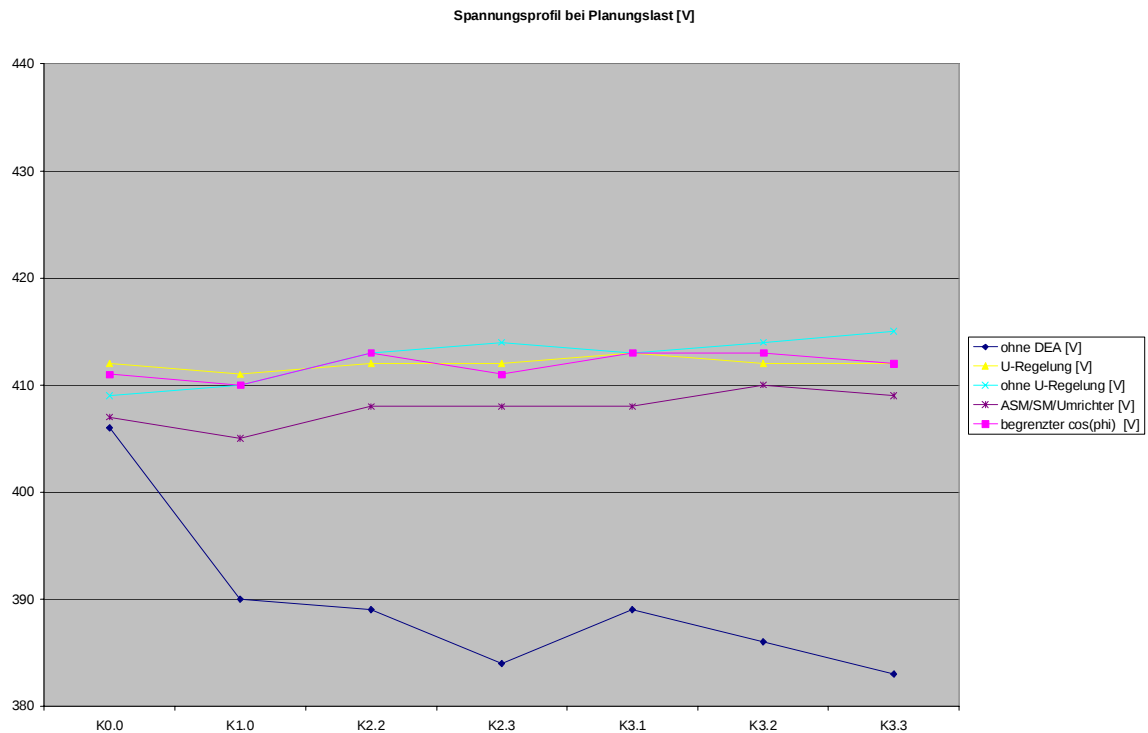


Abbildung 12: Spannungsprofil bei Planungslast

3.2. SPANNUNGSVERLAUF ALTWIESENSTR.15 (K0.0) – K3.2 BEI MITTELLAST

Ohne DEA wird ein Spannungsminimum von 401 V erzielt. Mit U-Regelung der Umrichter hält sich die Spannung ungefähr auf dem eingestellten Wert von 412 V. Ohne U-Regelung steigt sie und erreicht ihr Maximum am Knoten K3.3 mit 430 V. Dies sind immerhin 15 V mehr als bei Planungslast. Mit der Variante „ASM/SM/Umrichter“ kommt man auf Werte zwischen 413 V bis 425 V, während mit begrenztem $\cos(\varphi)$ ähnliche Resultate wie mit der Spannungsregelung erreicht werden.

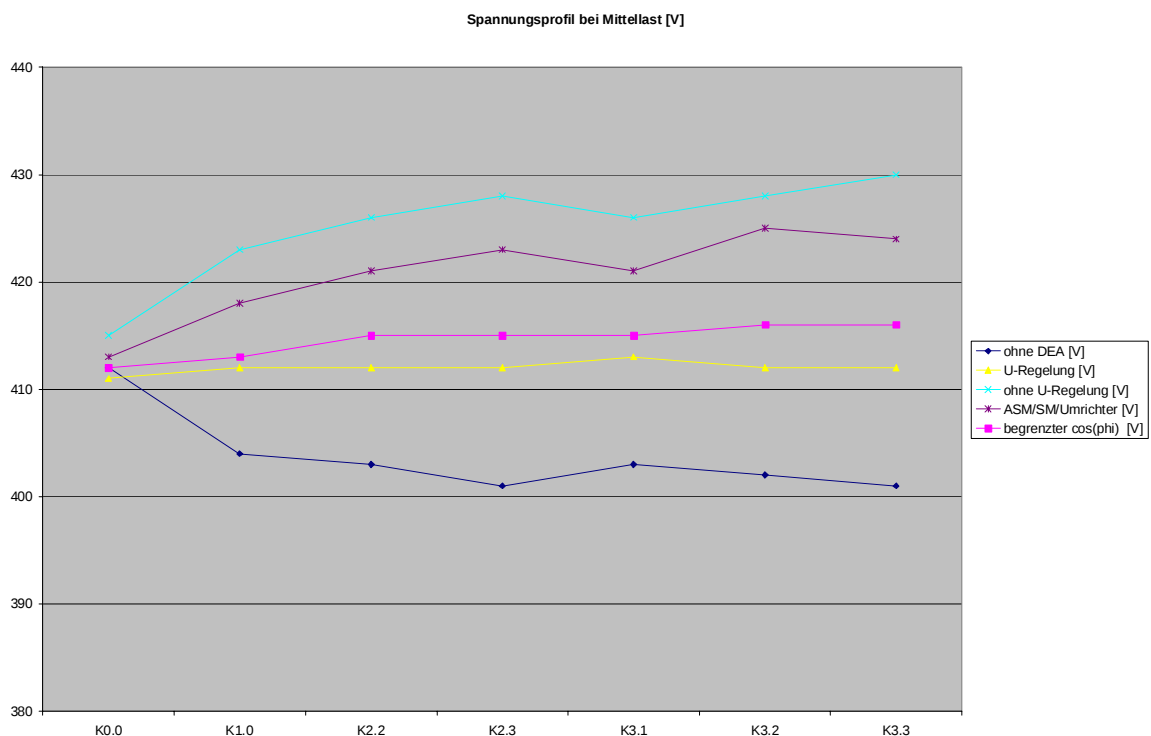


Abbildung 13: Spannungsprofil bei Mittellast

3.3. SPANNUNGSVERLAUF ALTWIESENSTR.15 (K0.0) – K3.2 BEI HÖCHSTLAST

Die Verläufe ähneln denjenigen der Mittellast, die Spannungsniveaus sind durch die höhere Last etwas tiefer.

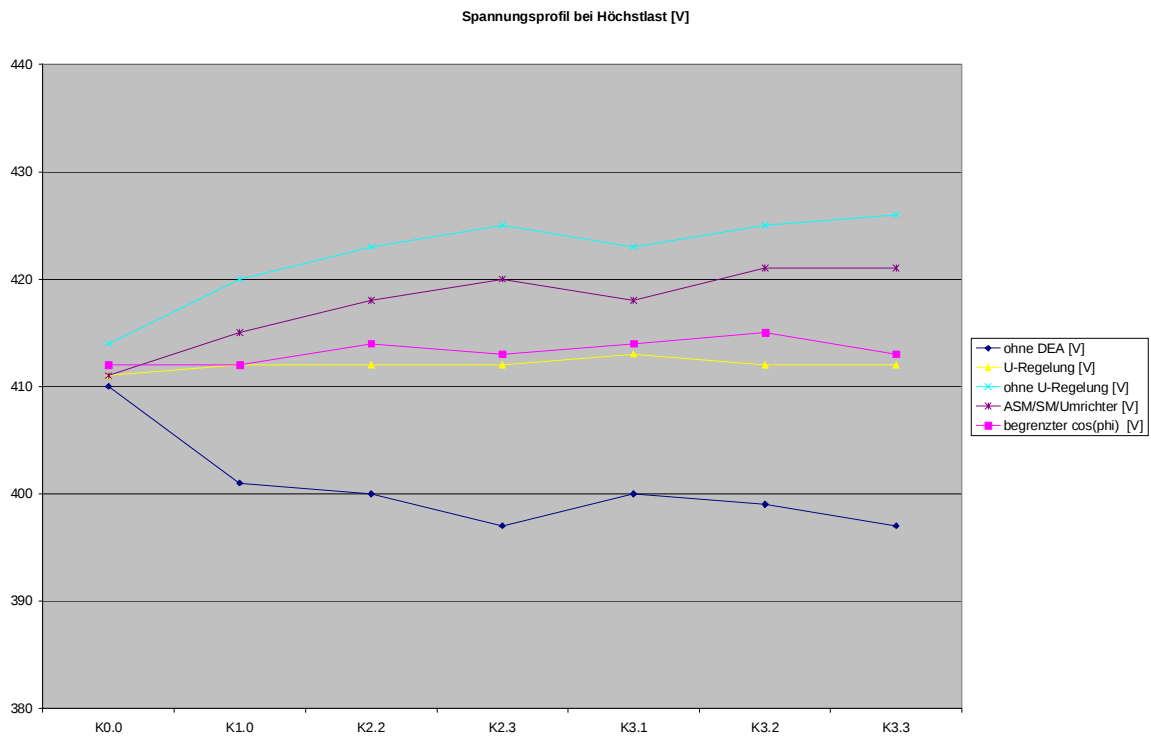


Abbildung 14: Spannungsprofil bei Höchstlast

3.4. SPANNUNGSVERLAUF ALTWIESENSTR.15 (K0.0) – K3.2 BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast fällt auf, dass ohne DEA schon ein recht konstanter Verlauf zu verzeichnen ist. Die Varianten mit DEA verursachen zum Teil eine massive Spannungserhöhung an den vom Trafo weit entfernten Knoten. „Ohne U-Regelung“ werden maximale Spannungen von 435 V erreicht, mit ASM liegt man ca. 5 V darunter und mit begrenztem $\cos(\varphi)$ pendeln sich die Spannungen bei 420 V ein. Die Variante mit der Spannungsregelung hält wohl die Spannung auf etwa 412 V, was aber nur mit der Überlastung der Umrichter erkauft werden kann.

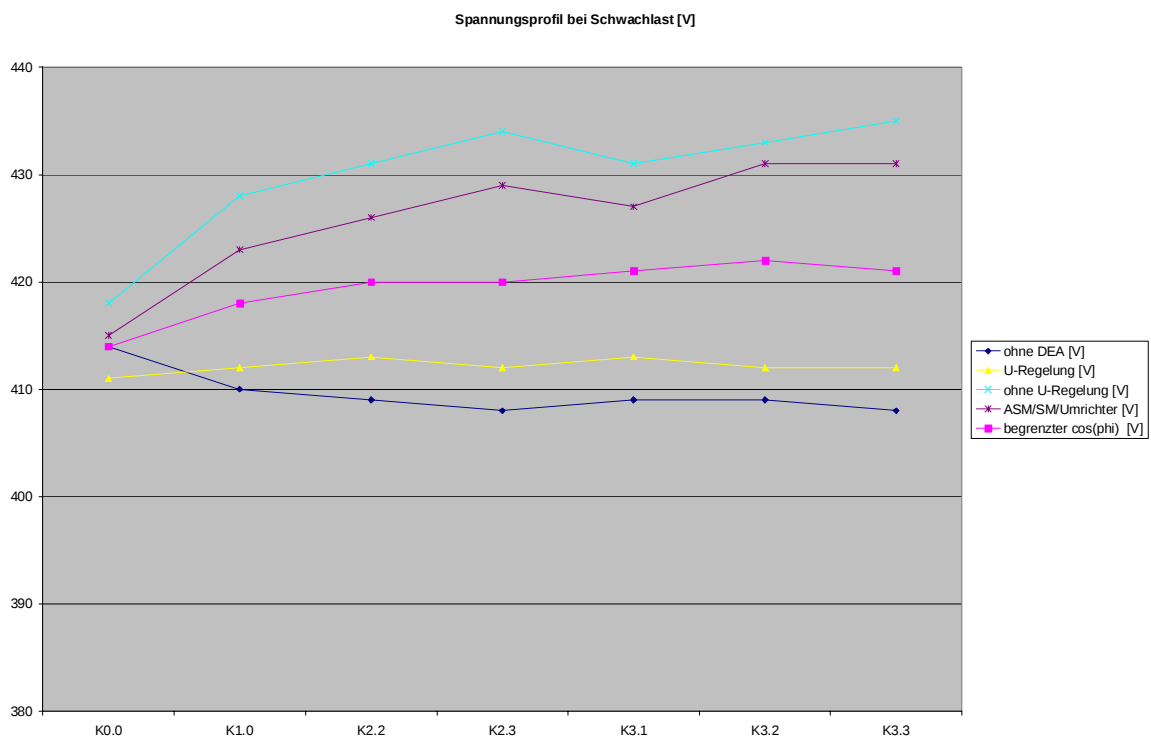


Abbildung 15: Spannungsprofil bei Schwachlast

3.5. SPANNUNGSVERLAUF K0.0 – K3.2 BEI SCHWACHLAST MIT UND OHNE RING

In Abbildung 16 werden die Varianten „ohne DEA“ und „ohne U-Regelung“ mit und ohne Ring gegenübergestellt. Die Ringleitung wurde zwischen dem Knoten K3.2 und K3.3 gelegt. Darum unterscheiden sich die Verläufe bis auf diese zwei Knoten kaum. Der Unterschied ist ziemlich gering und erreicht Werte von 2 V.

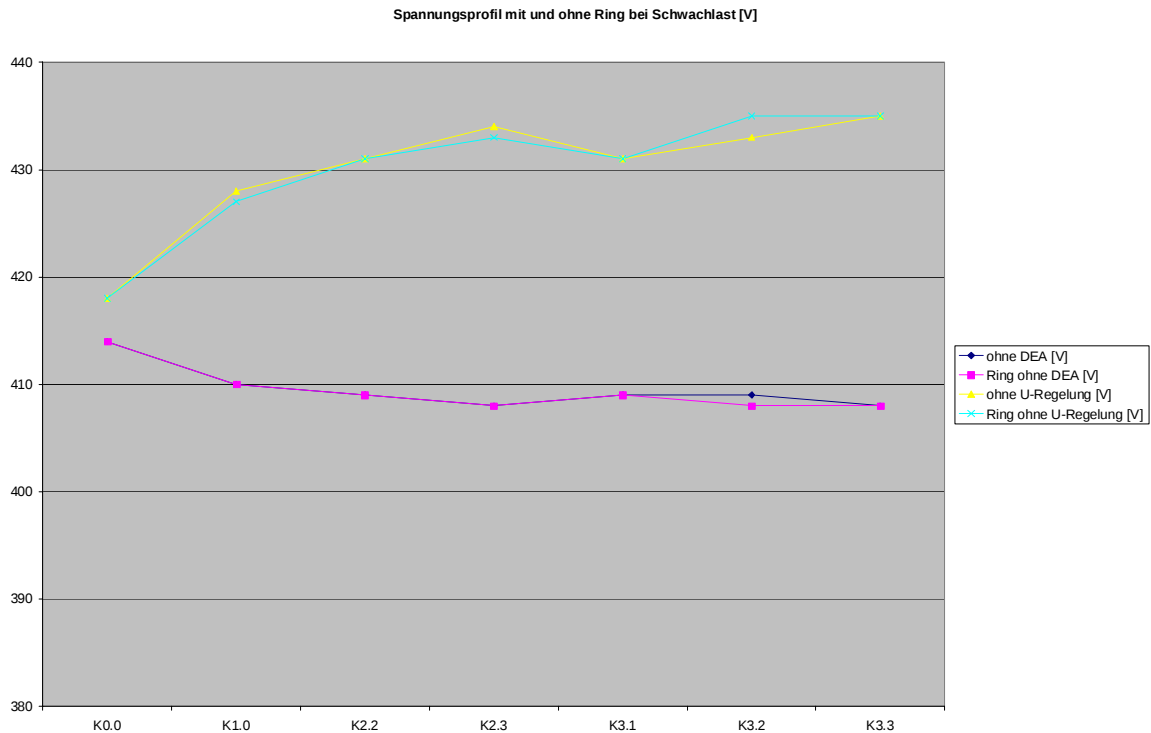


Abbildung 16: Spannungsprofil bei unterschiedlichen Netzverhältnissen

4. WIRKLEISTUNGSPROFILE

4.1. WIRKLEISTUNGSPROFIL BEI PLANUNGSLAST

Das Wirkleistungsprofil in den Leitungen ist bei den Varianten „U-Regelung“, „ohne Spannungsregelung“ und „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ praktisch gleich. Ohne DEA nehmen vor allem die nahe bei der Trafostation gelegenen Leitungen viel Leistung auf, weil sie zusätzlich die gesamte Leistung der nachgelagerten Leitungen transportieren müssen.

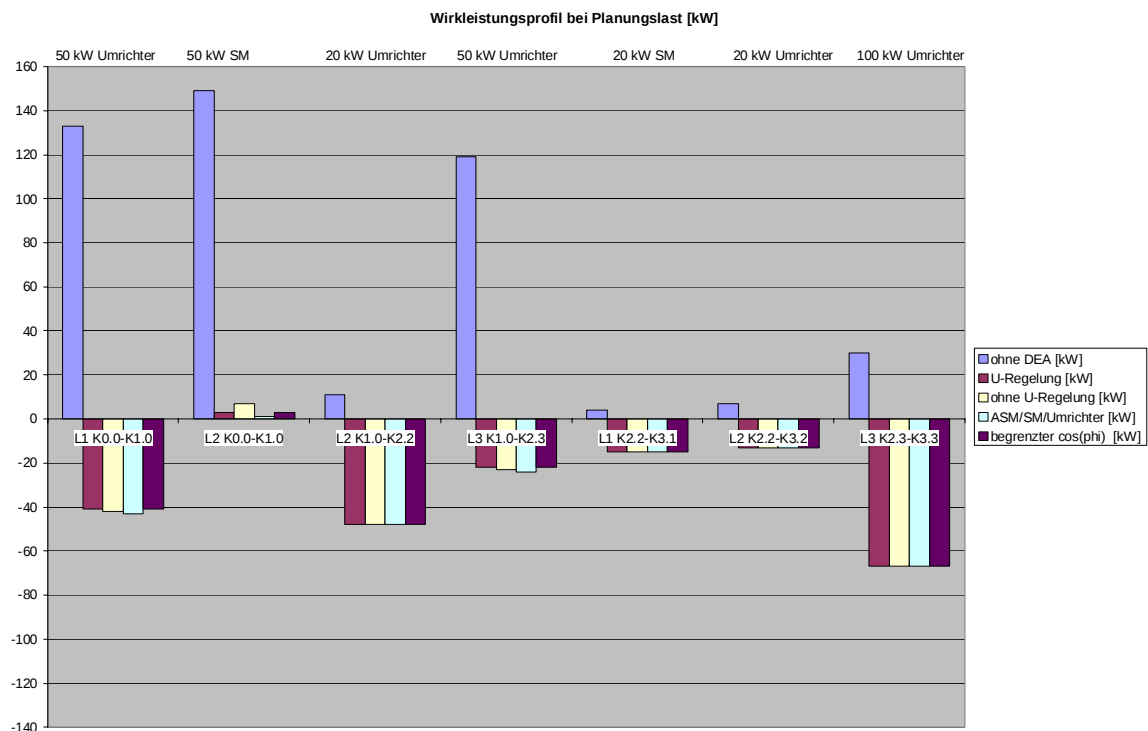


Abbildung 17: Wirkleistungsprofil bei Planungslast

4.2. WIRKLEISTUNGSPROFIL BEI MITTELLAST

Im Vergleich zur Simulation mit der Planungslast fällt auf, dass bei allen Varianten die Leistung der DEA meist ausreicht um die Lasten zu versorgen und dass zusätzlich auch noch Wirkleistung zurückgespiessen wird.

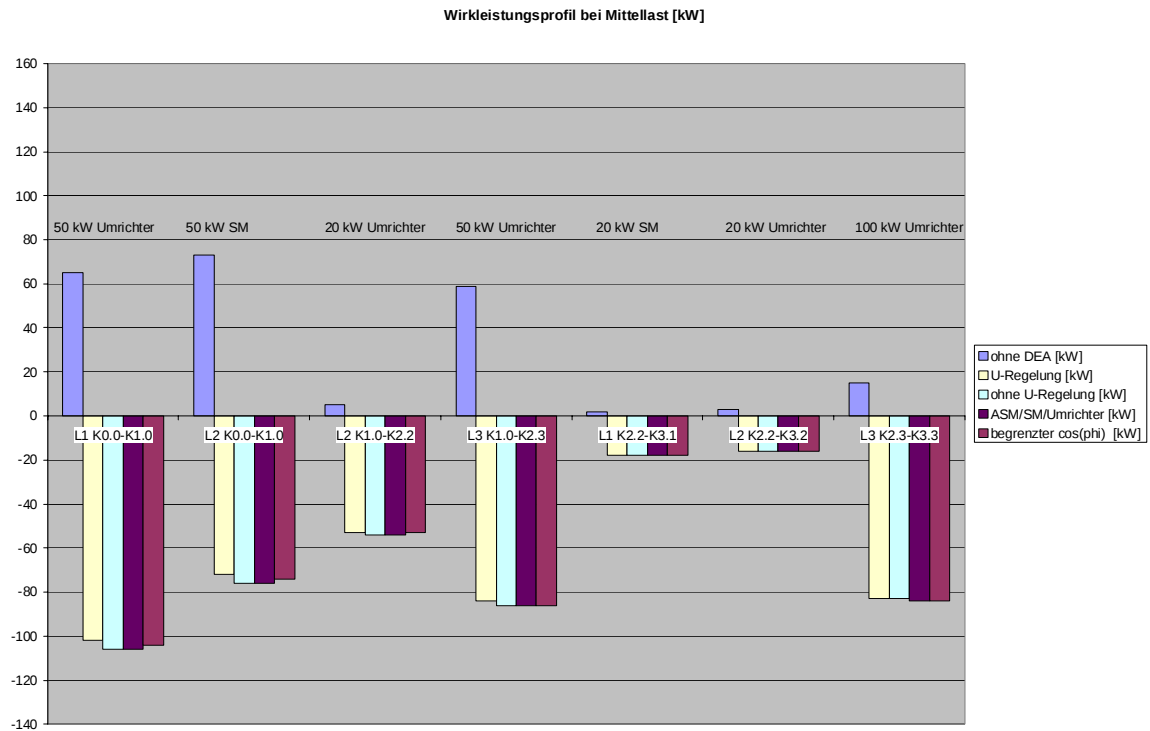


Abbildung 18: Wirkleistungsprofil bei Mittellast

4.3. WIRKLEISTUNGSPROFIL BEI HÖCHSTLAST

Bei Höchstlast geht die in der Leitung sichtbare Rückspeisung der DEA gegenüber Mittellast etwas zurück. Die Leistungsaufnahme ohne DEA steigt durch die höhere Belastung an.

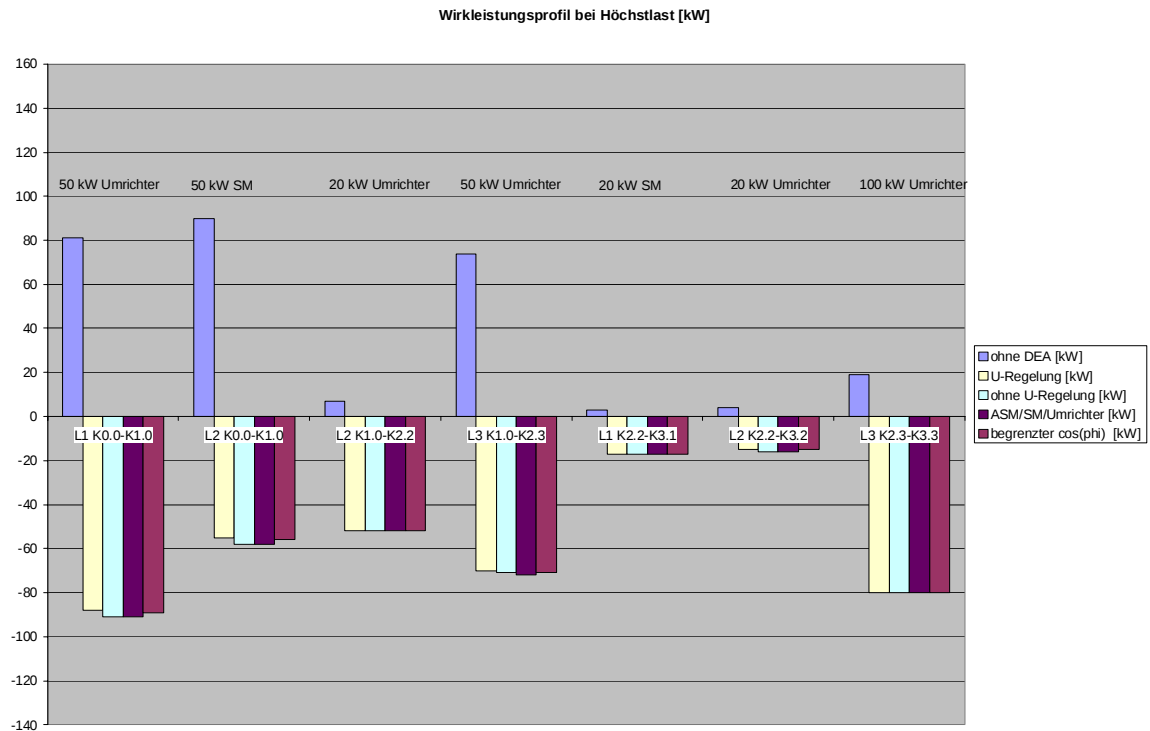


Abbildung 19: Wirkleistungsprofil bei Höchstlast

4.4. WIRKLEISTUNGSPROFIL BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast wird am meisten Wirkleistung zurückgespiessen und ohne DEA am wenigsten aufgenommen.

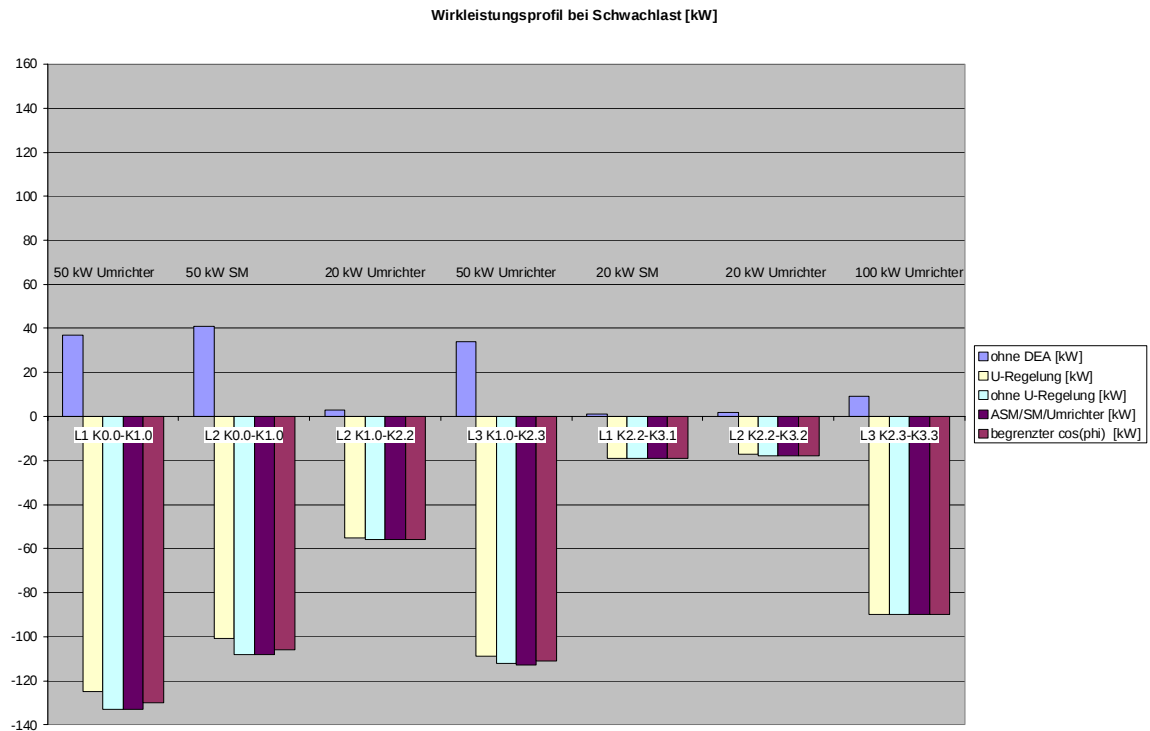


Abbildung 20: Wirkleistungsprofil bei Schwachlast

5. BLINDLEISTUNGSPROFILE

5.1. BLINDLEISTUNGSPROFIL BEI PLANUNGSLAST

Durch die Wirkleistung die eingespiesen wird, steigt die Spannung an den Leitungen an. Die Spannungsregelung bewirkt, dass die Spannung auf 1.03 p.u. gehalten werden kann, wodurch die DEA Blindleistung aufnehmen müssen. Je mehr Wirkleistung eingespiesen wird, desto mehr Blindleistung muss von den DEA aufgenommen werden.

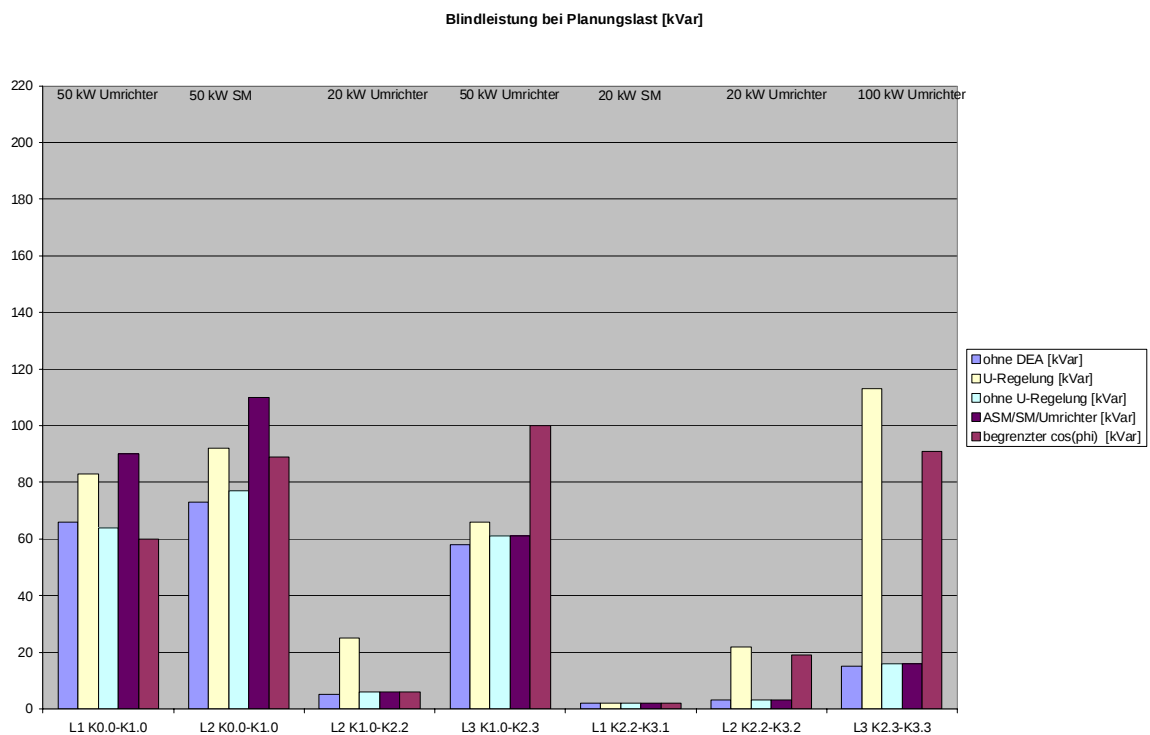


Abbildung 21: Blindleistung bei Planungslast

5.2. BLINDLEISTUNGSPROFIL BEI MITTELLAST

Es fällt auf, dass im Vergleich zu der Simulation mit Planungslast die Blindleistungsaufnahme höher ist. Der Grund liegt in der höheren Grundspannung durch die kleineren Lasten. Dadurch müssen die DEA mehr Blindleistung aufnehmen, um die Spannung auf 1.03 p.u. zu halten. Mit begrenztem $\cos(\varphi)$ werden bei dieser Simulation bessere Werte erzielt als mit einer Spannungsregelung. Dies ist wie schon einmal erwähnt, auf die überlasteten Umrichter zurückzuführen.

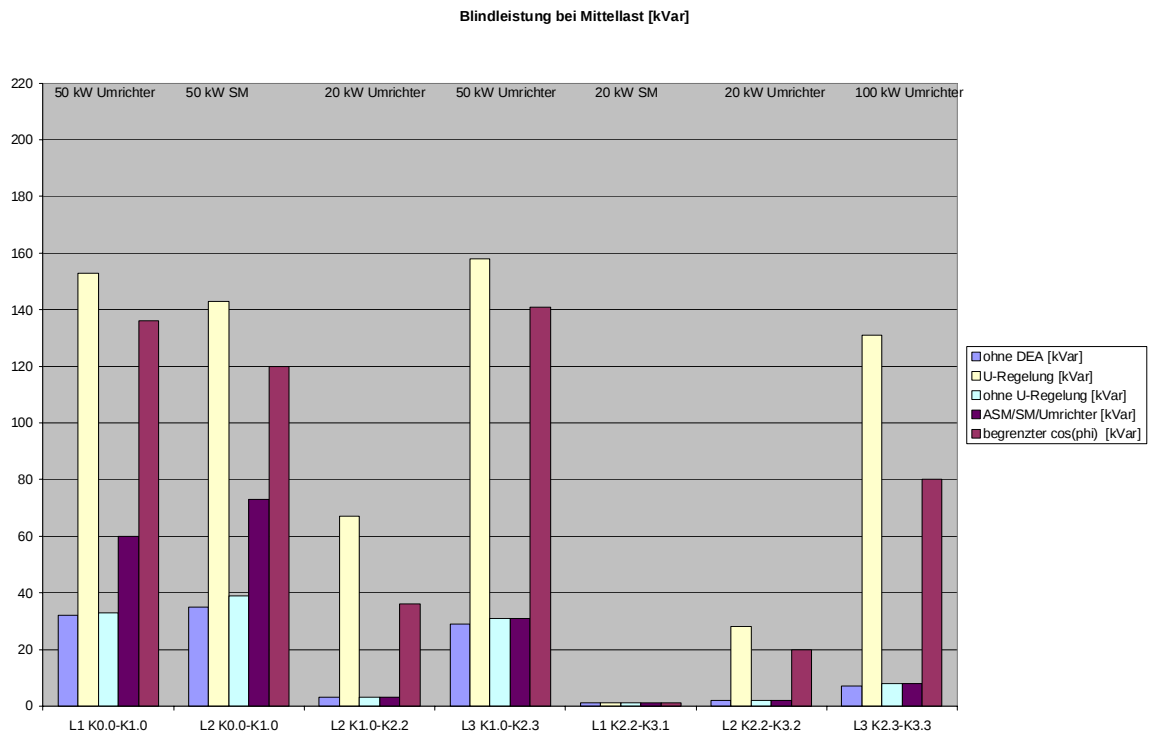


Abbildung 22: Blindleistung bei Mittellast

5.3. BLINDLEISTUNGSPROFIL BEI HÖCHSTLAST

Im Vergleich zur Mittellast sinkt die Blindleistungsaufnahme der DEA wieder etwas ab, weil die Spannung auch wieder leicht absinkt, im Gegensatz dazu steigt bei begrenztem $\cos(\varphi)$ die Blindleistung in einzelnen Leitungen an. Im Mittel wird aber in etwa die gleiche Blindleistung umgesetzt.

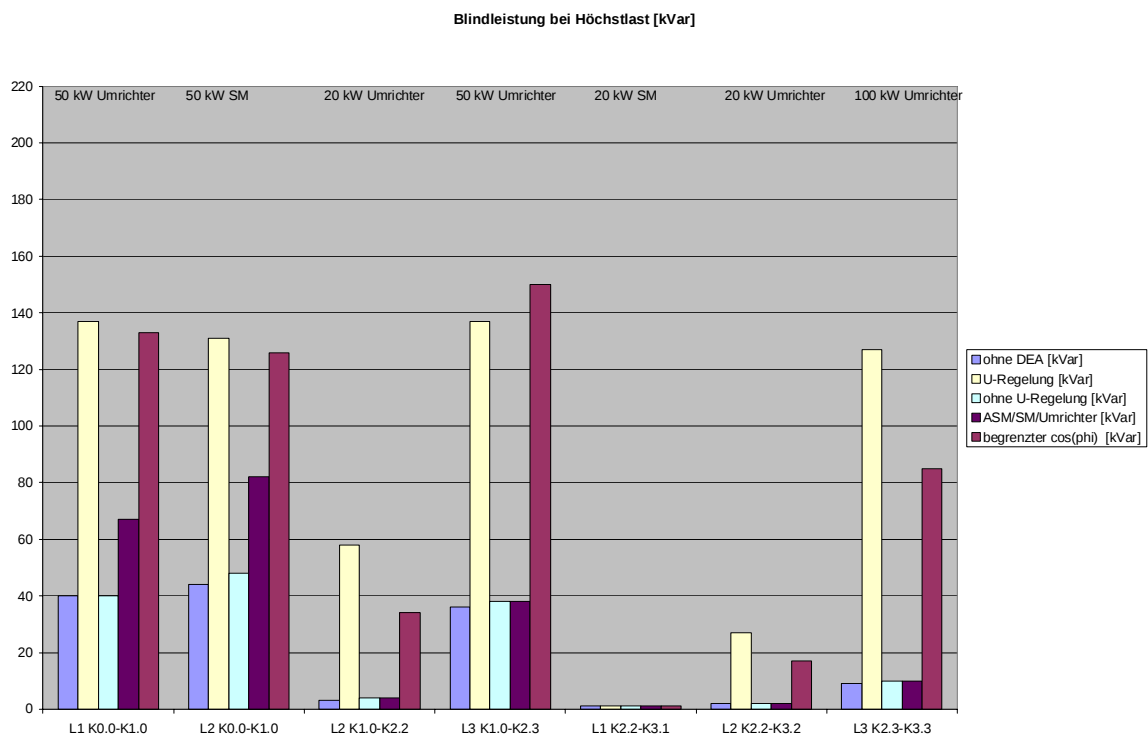


Abbildung 23: Blindleistung bei Höchstlast

5.4. BLINDLEISTUNGSPROFIL BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast tritt die höchste Grundspannung auf, was zum höchsten Blindleistungsbezug der Umrichter bei Spannungsregelung führt. Hier fällt die Begrenzung des $\cos(\varphi)$ am stärksten ins Gewicht, was in der deutlichen tieferen Blindleistung in den Leitungen als bei der Variante „U-Regelung“ zu sehen ist.

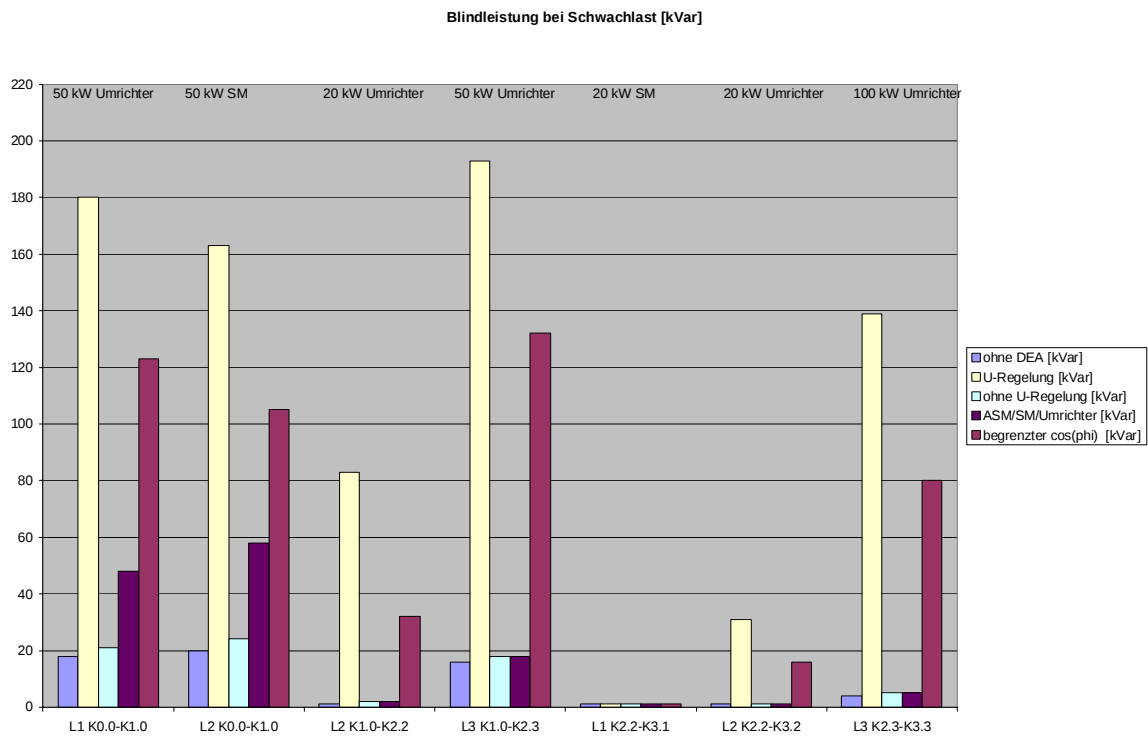


Abbildung 24: Blindleistung bei Schwachlast

6. STROMPROFILE

6.1. STROMPROFIL DER LEITUNGEN BEI PLANUNGSLAST

Der in der Praxis zulässige Nennstrom der Leitungen beträgt 260 A. Alle Ströme befinden sich unter diesem Grenzwert. Auffallend ist, dass die oberen Leitungen ohne DEA stärker belastet sind als mit. Der Grund liegt darin, dass alle Lasten über den Trafo von diesen Leitungen versorgt werden müssen. Mit DEA ist die Verteilung besser, weil ein grosser Teil der Lasten direkt von ihnen versorgt wird. Durch die Einspeisung der 100 kW DEA steigt die Strombelastung an der Leitung L3 K2.3-K3.3 stark an. Hier gilt es zu beachten, dass man nicht beliebig grosse DEA an das Niederspannungsnetz anschliessen kann. Ansonsten müsste man mit separaten Leitungen nahe am Trafo arbeiten.

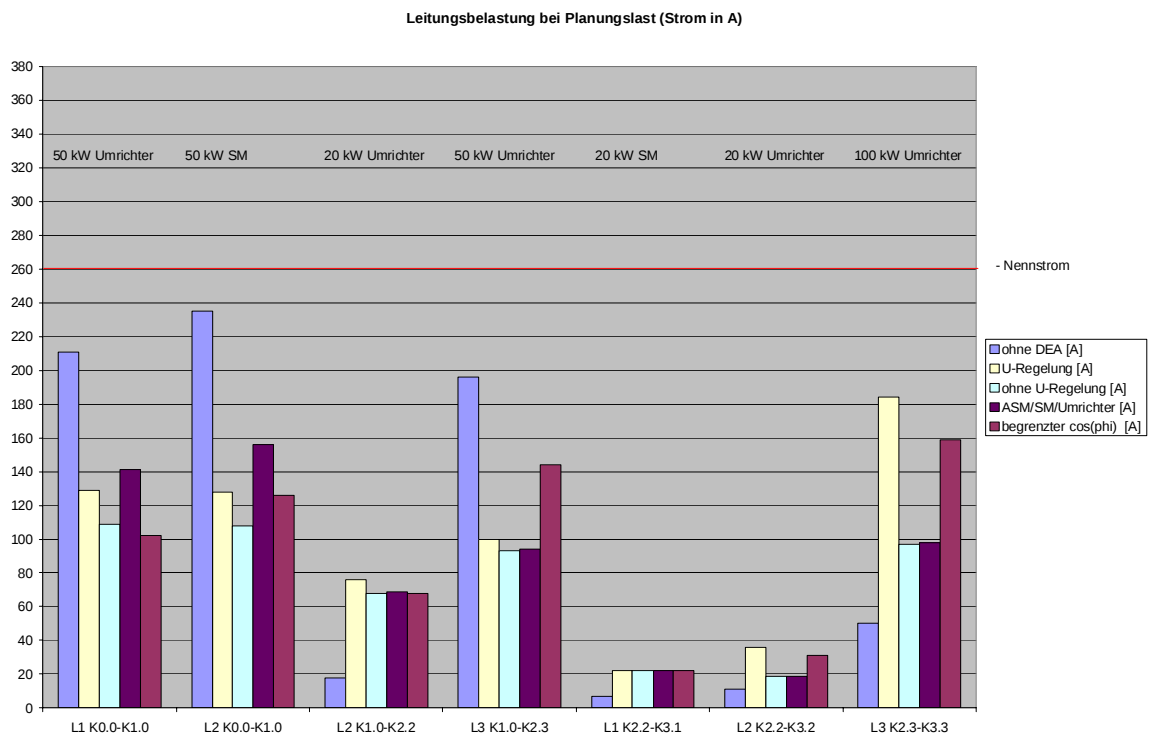


Abbildung 25: Leitungsbelastung bei Planungslast

6.2. STROMPROFIL DER LEITUNGEN BEI MITTELLAST

Es fällt auf, dass ohne DEA die Ströme etwa um die Hälfte absinken, was auf die kleineren Lasten zurück zu führen ist. An der Leitung L3 K1.0-K2.3 steigt die Strombelastung mit DEA massiv an und kommt nahe an den Grenzwert. Dies rührt vom extremen Blindleistungsbezug der DEA in diesem Strang. Durch die Wirkleistungseinspeisung des 50 kW-Umrichters an dieser Leitung und der 100 kW Microturbine an der unteren Leitung wird die Spannung wegen der kleineren Last massiv angehoben, was mit einem hohen Blindleistungsbezug kompensiert werden muss.

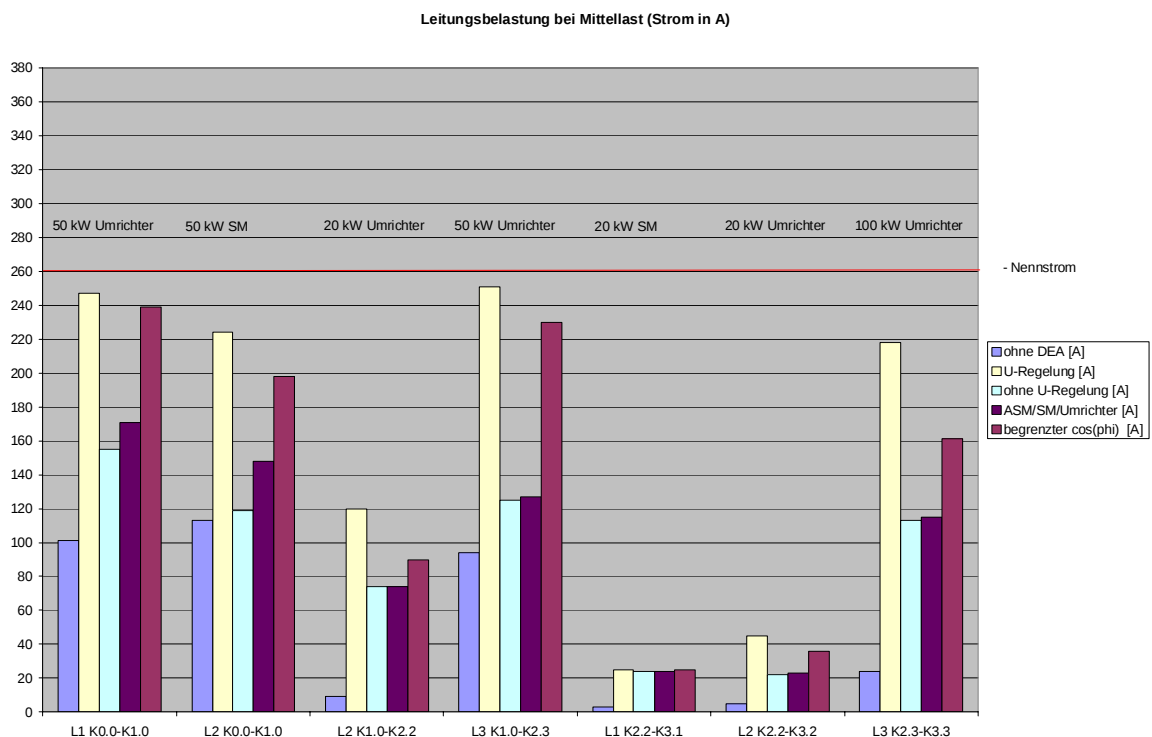


Abbildung 26: Leitungsbelastung bei Mittellast

6.3. STROMPROFIL DER LEITUNGEN BEI HÖCHSTLAST

Bei den Varianten mit DEA gehen bei Höchstlast alle Ströme zurück im Vergleich zur Mittel-
last.

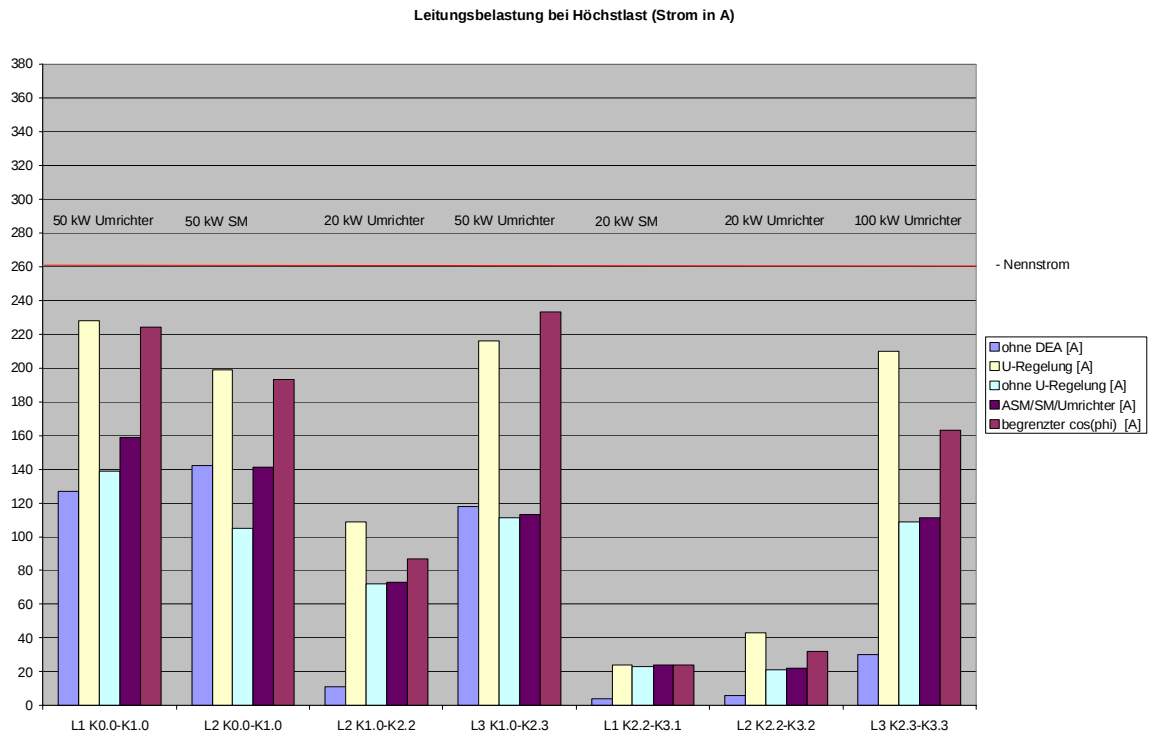


Abbildung 27: Leitungsbelastung bei Höchstlast

6.4. STROMPROFIL DER LEITUNGEN BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast steigen alle Ströme stark an und teilweise wird sogar die Grenze 260 A erreicht. Der Grund liegt in der höheren Rückspeisung der DEA, weil die Leitungslasten weniger aufnehmen. Auch der Blindleistungsbezug der DEA mit Spannungsregelung erhöhen den Strom. Die relevanten Varianten „ohne U-Regelung“, „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ und „ASM/SM/Umrichter“ bewegen sich im tolerierbaren Bereich.

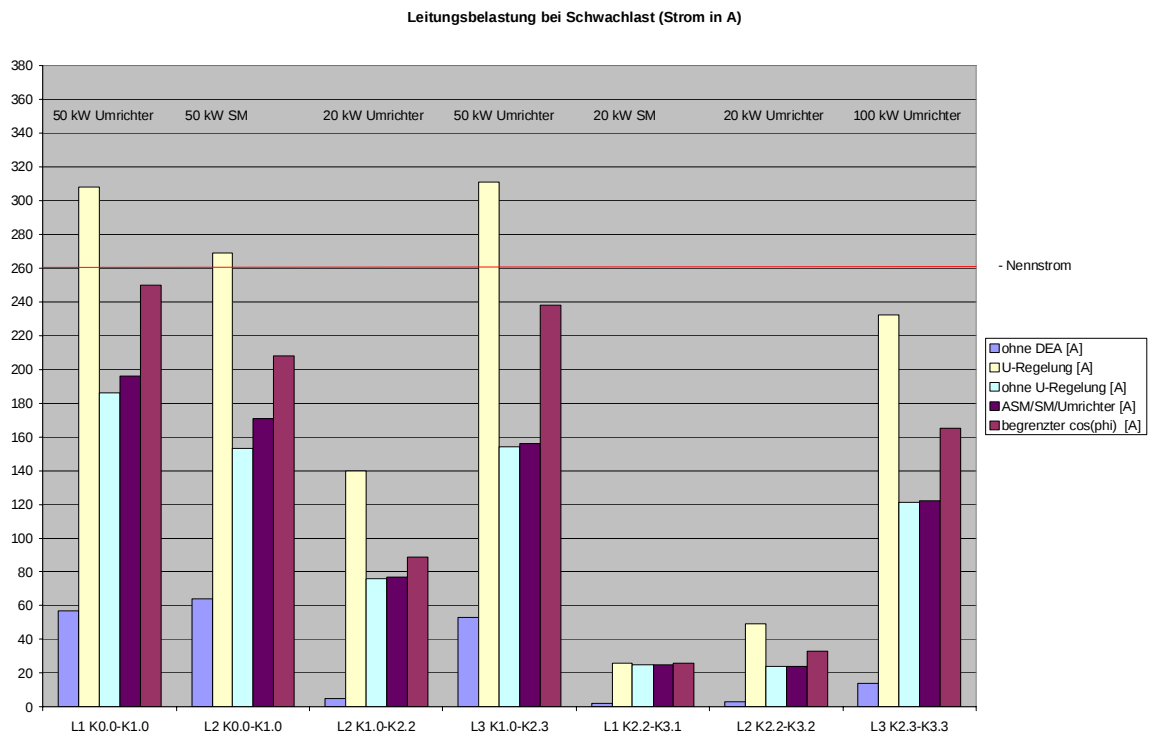


Abbildung 28: Leitungsbelastung bei Schwachlast

7. WIRK- UND BLINDLEISTUNGEN DER DEA

7.1. WIRKLEISTUNGEN DER DEA

Diese Grafik soll die Einspeiseleistung der verschiedenen DEA verdeutlichen. Sie variiert zwischen 20 und 100 kW und ist bei allen Varianten mit DEA gleich.

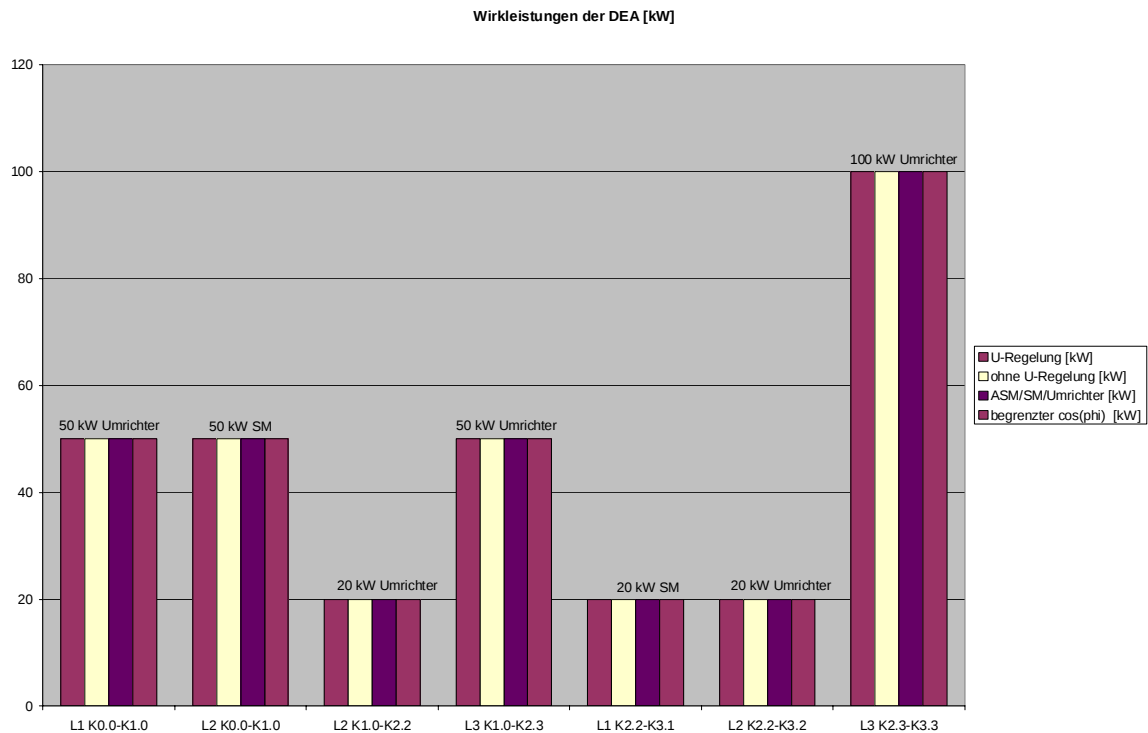


Abbildung 29: Wirkleistungen der DEA

7.2. BLINDLEISTUNGEN DER DEA BEI PLANUNGSLAST

Auffallend ist die markante Blindleistungsabgabe der DEA an der Leitung L3 K1.0-K2.3. An der Sammelschiene K2.3 tritt ohne DEA bei Planungslast eine Spannung von 384 V auf. Um die Spannung auf 412 V anzuheben muss viel Blindleistung eingespiessen werden. Hier wird das Problem der Spannungsregelung deutlich. Die DEA nehmen zu viel Blindleistung auf, was zur Überlastung führen würde. Mit der Blindleistungsbegrenzung ist die Spannungshaltung nicht mehr ganz so gut wie mit einer Spannungsregelung, dafür können die Umrichter ohne Überlastung betrieben werden. In untenstehender Grafik sieht man, dass an der Leitung L2 K0.0-K1.0 eine ASM angeschlossen ist, die immer Blindleistung aufnimmt.

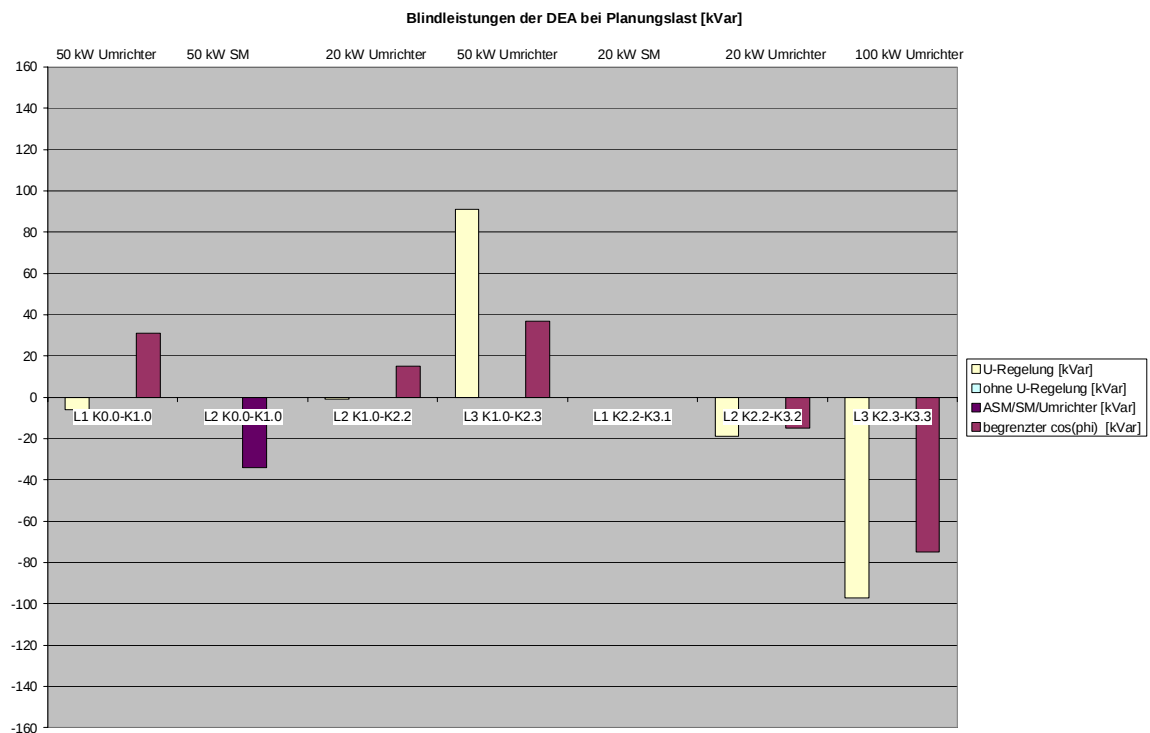


Abbildung 30: Blindleistungen bei DEA mit Planungslast

7.3. BLINDLEISTUNGEN DER DEA BEI MITTELLAST

Bei Mittellast ist zu erkennen, dass zum Beispiel der Umrichter an der Leitung L2 K1.0-2.3 nun Blindleistung aufnimmt im Gegensatz zur Planungslast. Schon bei mittlerer Last müssen praktisch alle Umrichter Blindleistung aufnehmen, um die Spannung auf dem gewünschten Niveau zu halten.

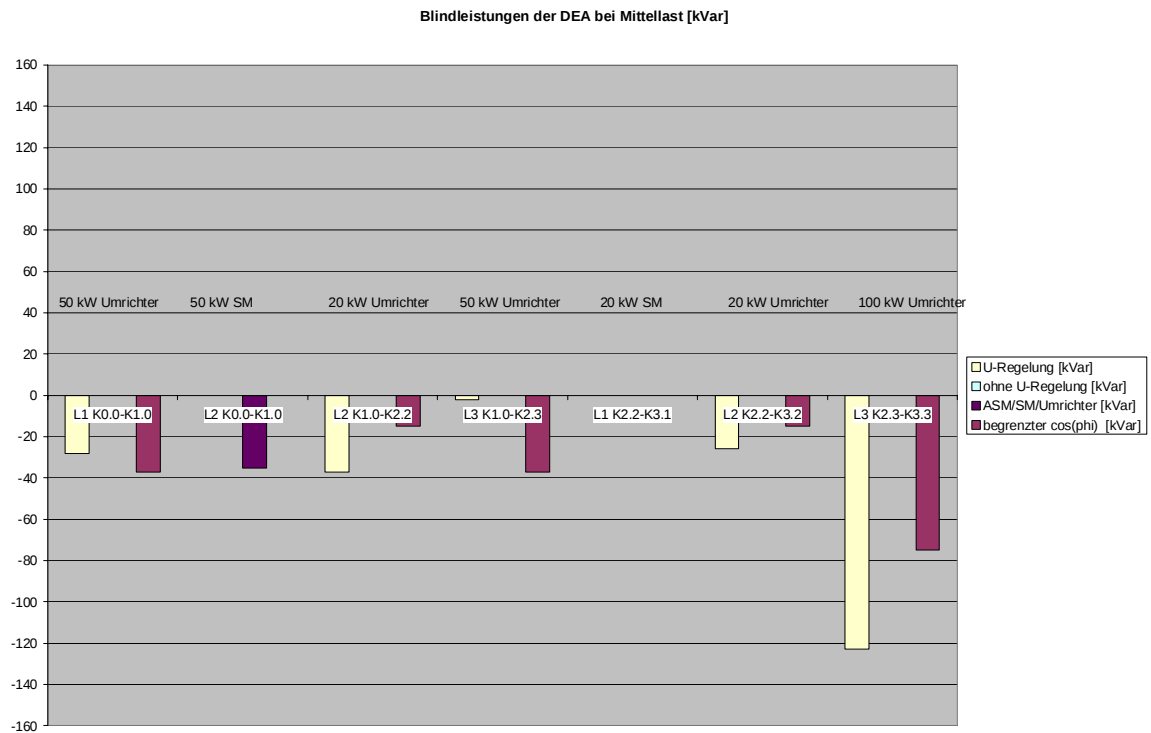


Abbildung 31: Blindleistungen der DEA bei Mittellast

7.4. BLINDLEISTUNGEN DER DEA BEI HÖCHSTLAST

Auch bei Höchstlast nehmen praktisch alle DEA Blindleistung auf. Es fällt auf, dass es an der Leitung L3 K1.0-K2.3 von der Variante „U-Regelung“ zur Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ eine Lastflussumkehr zu verzeichnen gibt. Durch die Begrenzung wird weniger Blindleistung umgesetzt, was zu einer Abweichung zur Variante mit Spannungsregelung führt.

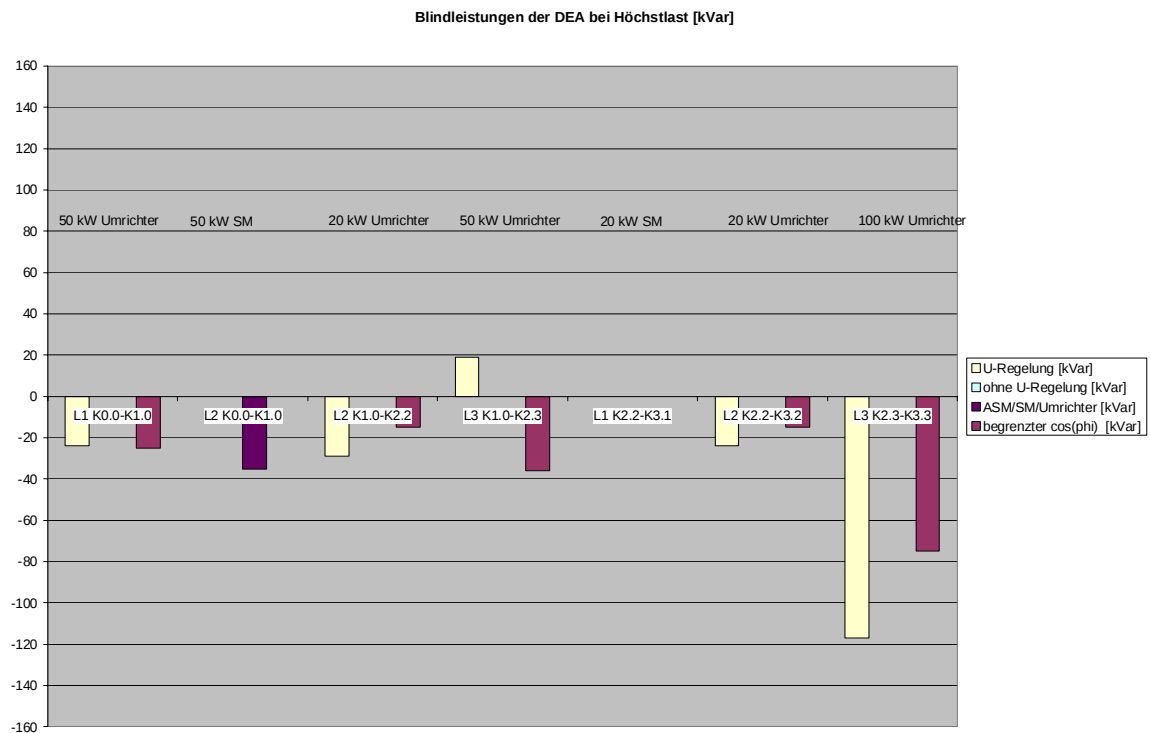


Abbildung 32: Blindleistungen der DEA bei Höchstlast

7.5. BLINDLEISTUNGEN DER DEA BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast sind die Spannungen ohne DEA praktisch gleich gross wie wenn DEA eingesetzt werden. Damit muss viel Blindleistung aufgenommen werden, um die Spannung auf dem gewünschten zu Wert halten.

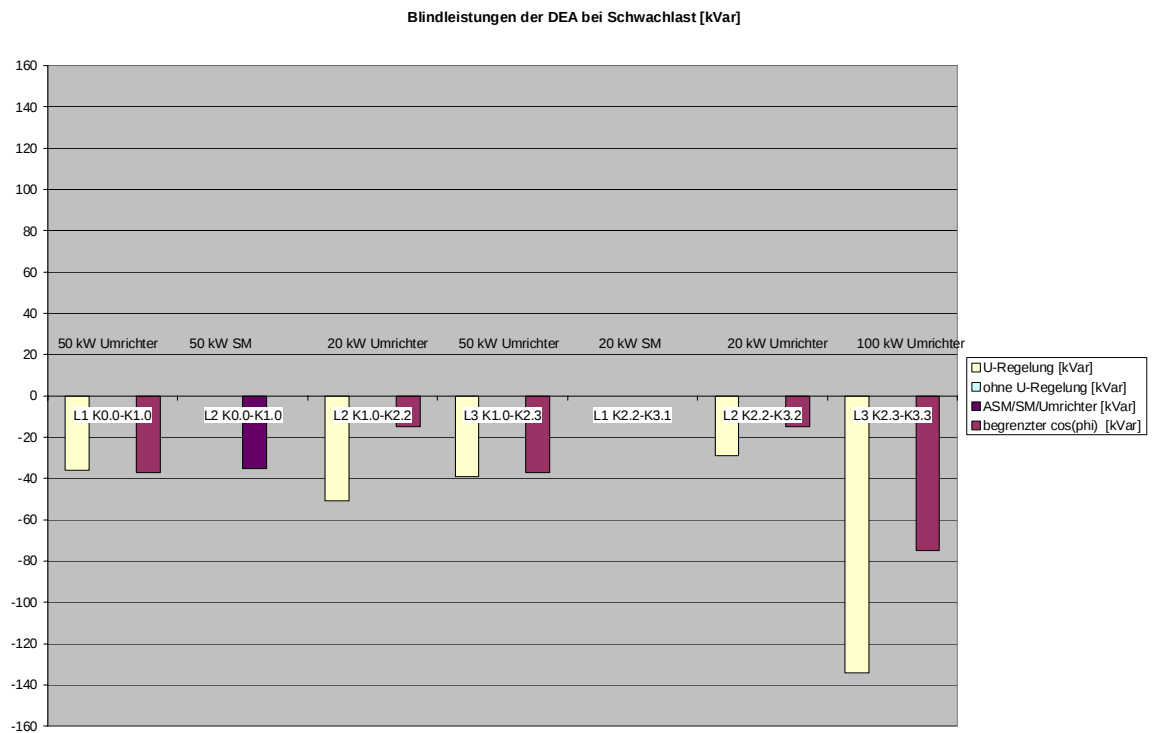


Abbildung 33: Blindleistungen der DEA bei Schwachlast

8. ZUSAMMENFASSUNG PROFILE

Durch den Einsatz von dezentralen Anlagen kann die Spannungsstabilität vor allem an den Sammelschienen mit einer grossen Entfernung zur Trafostation verbessert werden. Die Leitungsbelastung bleibt in praktisch allen Fällen mit DEA unterhalb der Grenzwerte.

Bei grösseren Einspeiseleistungen stösst man allerdings an die Grenzen des NS-Netzes. Zum einen steigt dann die Spannung an den Einspeiseknoten massiv an und zum anderen werden die Leitungen stark belastet.

In der Nähe der Trafos muss die Leitungsbelastung besonders genau betrachtet werden, weil es dort auch ohne Überschreitung der Grenzwerte zu lokalen thermischen Überlastungen kommen kann.

Anhand der Spannungsprofile ist feststellbar, dass DEA mit Leistungen von weniger als 100 kW im Normalfall keine Probleme darstellen. Im Gegenteil helfen DEA die Spannung vor allem an langen bzw. stark belasteten Leitungen zu stützen.

Die Grenzwerte wurden in den Simulationen mit DEA bei den Spannungen sowie den Strömen grösstenteils eingehalten. Erst bei grösseren Leistungen (300 kW) werden die Grenzwerte überschritten. Dabei ist immer die Anschlussimpedanz von grosser Bedeutung. Tendenziell werden die Spannungen nahe beim Trafo gelegenen und kurzen weniger stark angehoben, als bei langen und weit abgelegenen Leitungen.

Durch die Einspeisung von Wirkleistung wird die Spannungen an den Anschlusspunkten der DEA stark angehoben, dass die DEA mit Blindleistungsbezug entgegen wirken müssen, um die Spannung auf dem gewünschten Niveau zu halten. Die Asynchronmaschinen nehmen bedingt durch den Aufbau, Blindleistung auf und helfen, dass die Spannungen nicht zu hoch werden.

Bei kleinen Verbrauchern in der Nähe des Anschlusspunktes verursachen grosse Wirkleistungseinspeisungen hohe Spannungsanstiege, die wie schon erwähnt durch Blindleistungsaufnahme kompensiert werden müssen. Die Simulationen haben gezeigt, dass die DEA teilweise nicht in der Lage sind soviel Blindleistung aufzunehmen, dass die Spannung den gewünschten Wert erreicht. Von der Seite der Netzbetreiber her ist es nicht wünschenswert Blindleistung zu transportieren, nur damit die Spannungen an den Anschlusspunkten dem vorgegebenen Wert einhalten. Vielmehr wird mit der Anzahl der DEA der maximale Spannungsanstieg begrenzt oder mit einer ausgewogenen Mischung aus SM und Umrichter mit $\cos(\varphi) = 1$ und den ASM mit $\cos(\varphi) = 0.8$ die Spannungen in den tolerierbaren Bereich gebracht.

Die Auslastung der nahe am Trafo gelegenen Leitungen ist bedingt durch den Netzaufbau ohne DEA höher. Der Einsatz von DEA ermöglicht eine bessere Verteilung der Energieeinspeisung.

9. NETZBILANZEN

9.1. NETZBILANZ WIRKLEISTUNG BEI PLANUNGSLAST

Je mehr Wirkleistung von den DEA eingespiessen wird, desto kleiner wird der Bedarf vom Trafo. Es tritt aber bei keiner Variante eine Rückspeisung auf, weil von den Lasten alles aufgebraucht wird.

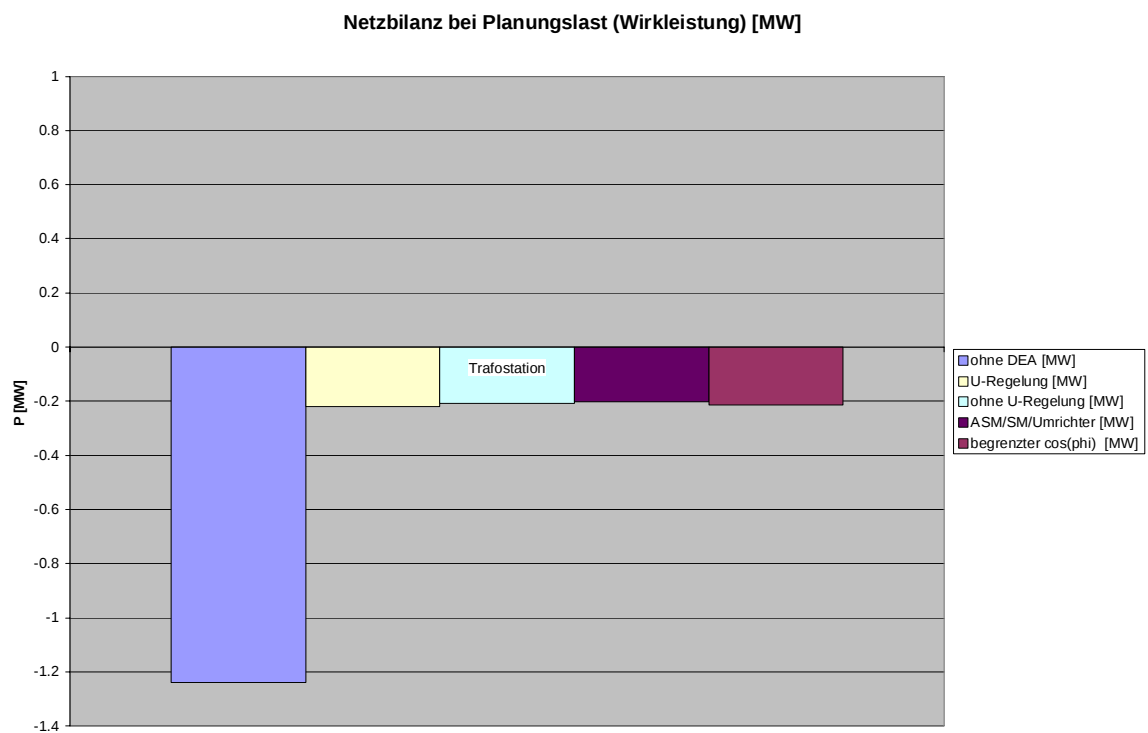


Abbildung 34: Netzbilanz bei Planungslast

9.2. NETZBILANZ WIRKLEISTUNG BEI MITTELLAST

Mit der Einspeisung der DEA tritt eine Rückspeisung zum Trafo auf. Wenn ohne Spannungsregelung gearbeitet wird, ist die Rückspeisung leicht höher als mit Regelung, was auf die höheren Spannungen an den Knoten zurück zu führen ist.

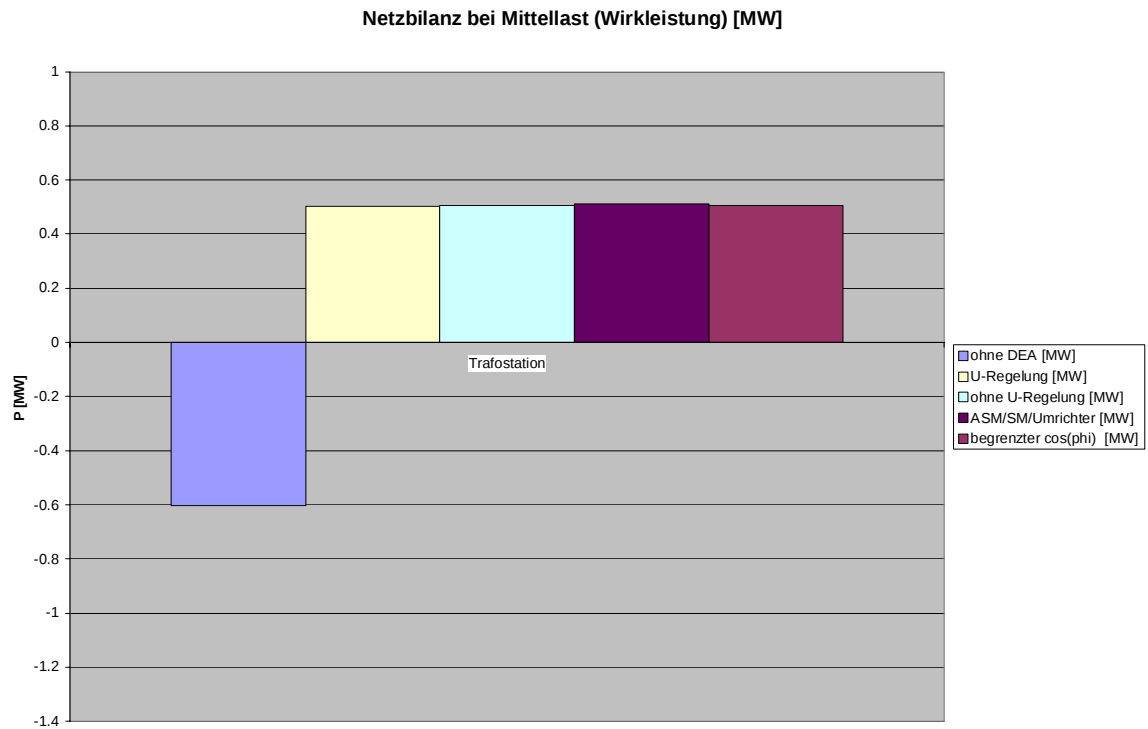


Abbildung 35: Netzbilanz bei Mittellast

9.3. NETZBILANZ WIRKLEISTUNG BEI HÖCHSTLAST

Bei Höchstlast reicht die Leistung der DEA immer noch um bei allen Varianten Wirkleistung zum Trafo zurück zu speisen. Dabei ist bei den Varianten mit DEA die Wirkleistung praktisch konstant.

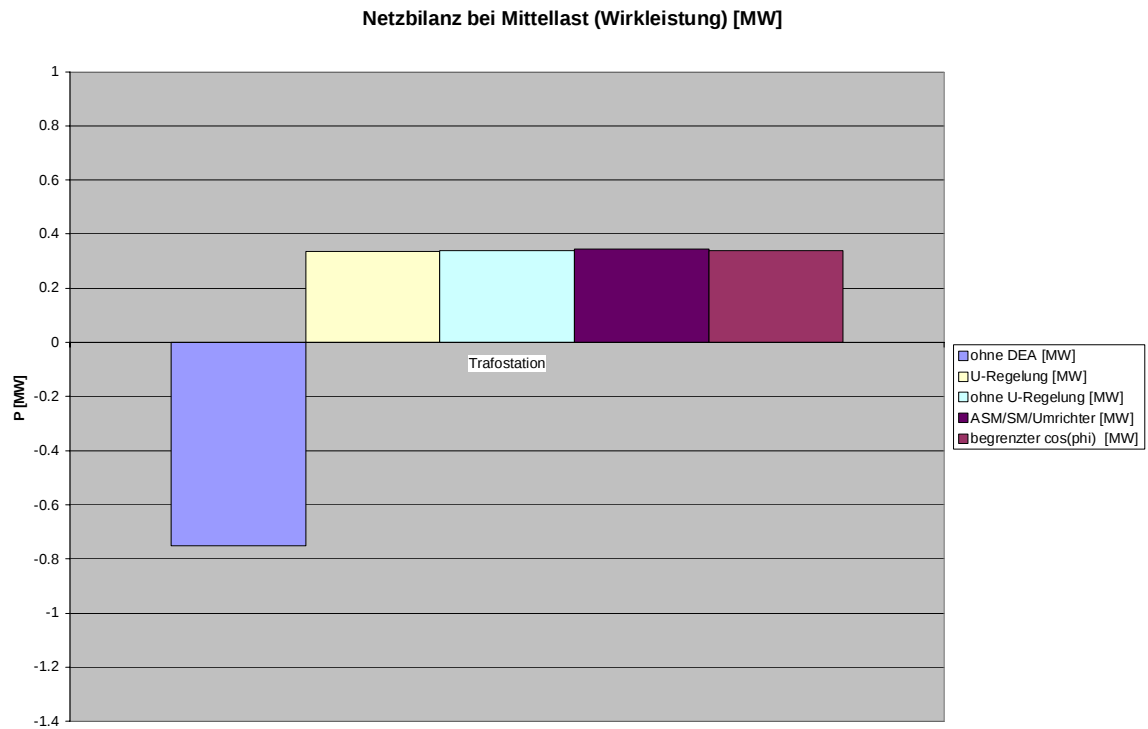


Abbildung 36: Netzbilanz bei Mittellast

9.4. NETZBILANZ WIRKLEISTUNG BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast ist die Rückspeisung logischerweise am höchsten.

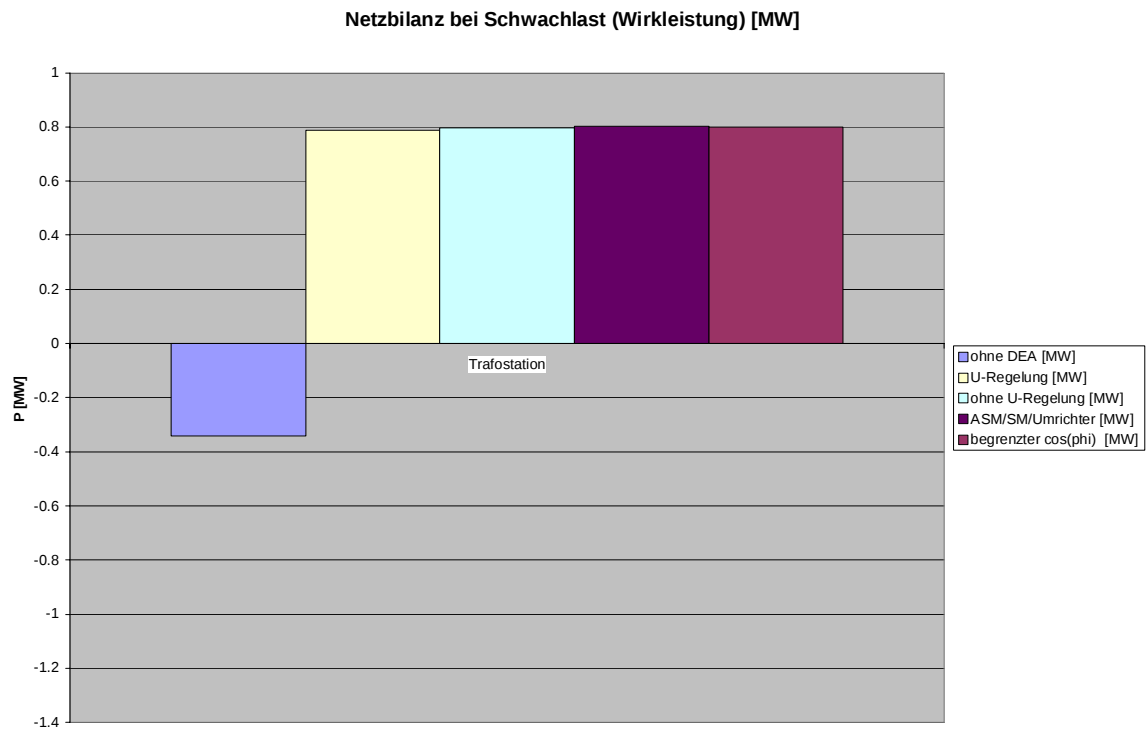


Abbildung 37: Netzbilanz bei Schwachlast

9.5. NETZBILANZ BLINDLEISTUNG BEI PLANUNGSLAST

Die Blindleistungsaufnahme steigt mit der Anzahl DEA, weil mehr Knoten auf 412 V geregelt werden müssen. Auffällig ist der tiefere Blindleistungsbedarf wenn mit Spannungsregelung gearbeitet wird. Durch die grossen Lasten (Planungslast ist ein Zustand, der in der Praxis kaum vorkommt) können die DEA nicht auf den gewünschten Wert anheben und müssen zusätzlich Blindleistung ins Netz speisen, was den Trafo entlastet. Auch mit einem begrenzten $\cos(\varphi)$ kann eine Reduktion des Blindleistungsbezugs im Trafo erreicht werden. Im Vergleich zu der Variante „U-Regelung“ können die DEA ohne Spannungsregelung keine Blindleistung aufnehmen oder abgeben, weil sie auf $\cos(\varphi) = 1$ gehalten werden. Dadurch sind die Werte von der Variante „ohne DEA“ mit der Variante „ohne U-Regelung“ zu vergleichen. Die Zunahme des Blindleistungsbedarfs rührt von den höheren Spannungen im Netz durch die Rückspeisung und dem damit verbundenen erhöhten Blindleistungsbedarf der Leitungen. Die Variante „ASM/SM/Umrichter“ bezieht am meisten Blindleistung vom Trafo, weil die Asynchronmaschinen immer Blindleistung aufnehmen.

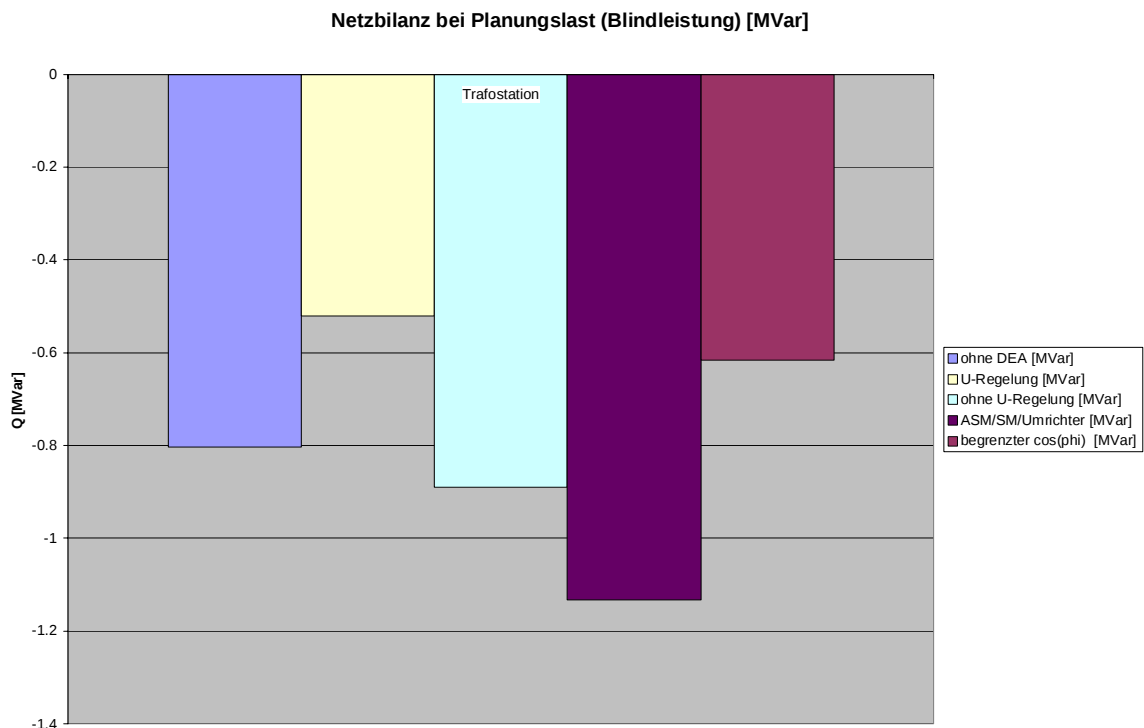


Abbildung 38: Netzbilanz bei Planungslast

9.6. NETZBILANZ BLINDLEISTUNG BEI MITTELLAST

Die Blindleistungsaufnahme bei der Variante mit Spannungsregelung steigt gegenüber der Simulation mit Planungslast an, was auf die höheren Spannungen wegen der Verbrauchsreduktion zurück zu führen ist. Bei Planungslast konnte man feststellen, dass die Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ Vorteile gegenüber der Variante „ohne DEA“ hat. In der Abbildung 39 ist dies nicht mehr der Fall und daraus lässt sich schliessen, dass die Blindleistungsbilanzen extrem von den Lasten abhängen. Der Unterschied zwischen „ohne DEA“ und „ohne U-Regelung“ ist kleiner geworden, weil die Spannungen nicht mehr so grosse Differenzen aufweisen.

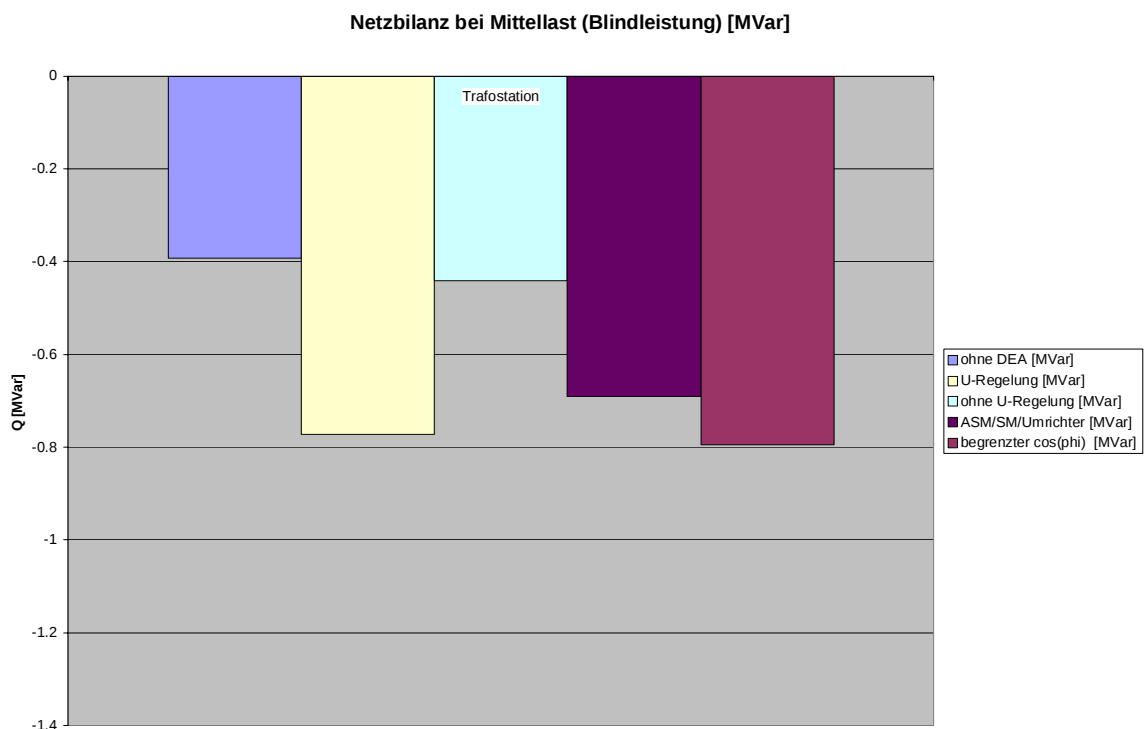


Abbildung 39: Netzbilanz bei Mittellast

9.7. NETZBILANZ BLINDLEISTUNG BEI HÖCHSTLAST

Bei Höchstlast steigt der Blindleistungsbedarf im Vergleich zur Mittellast leicht an. Auch hier ist ein Zuwachs der Blindleistung im Trafo zu verzeichnen, wenn DEA eingesetzt werden.

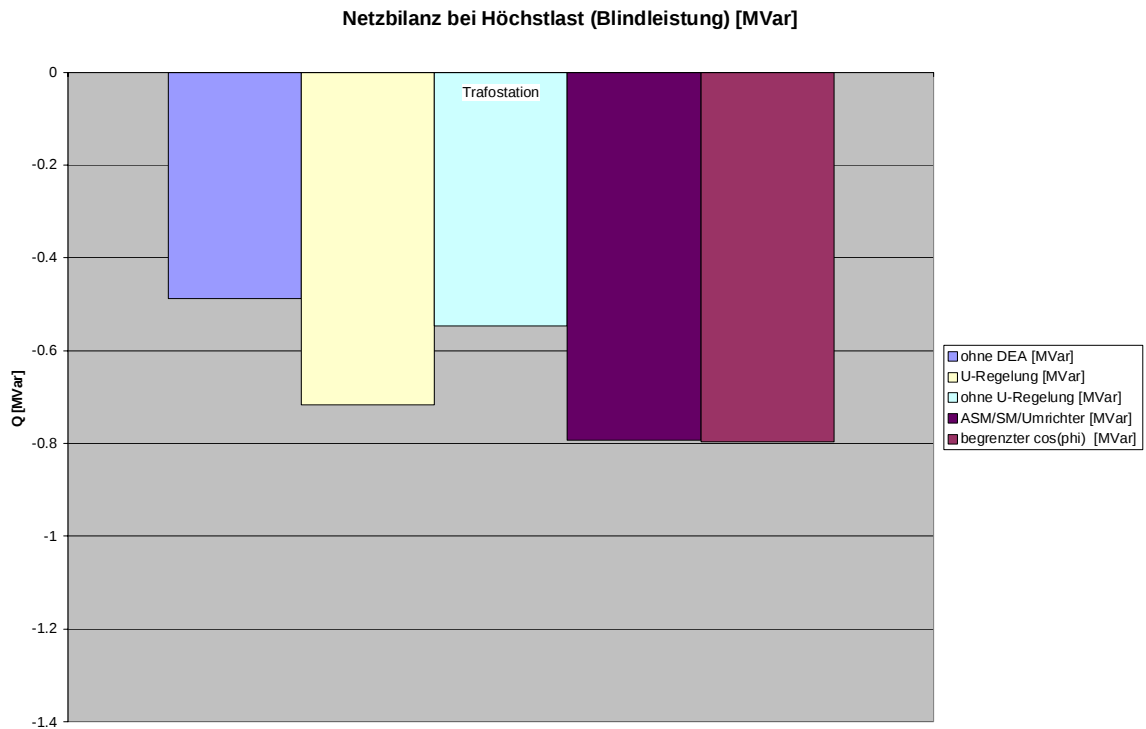
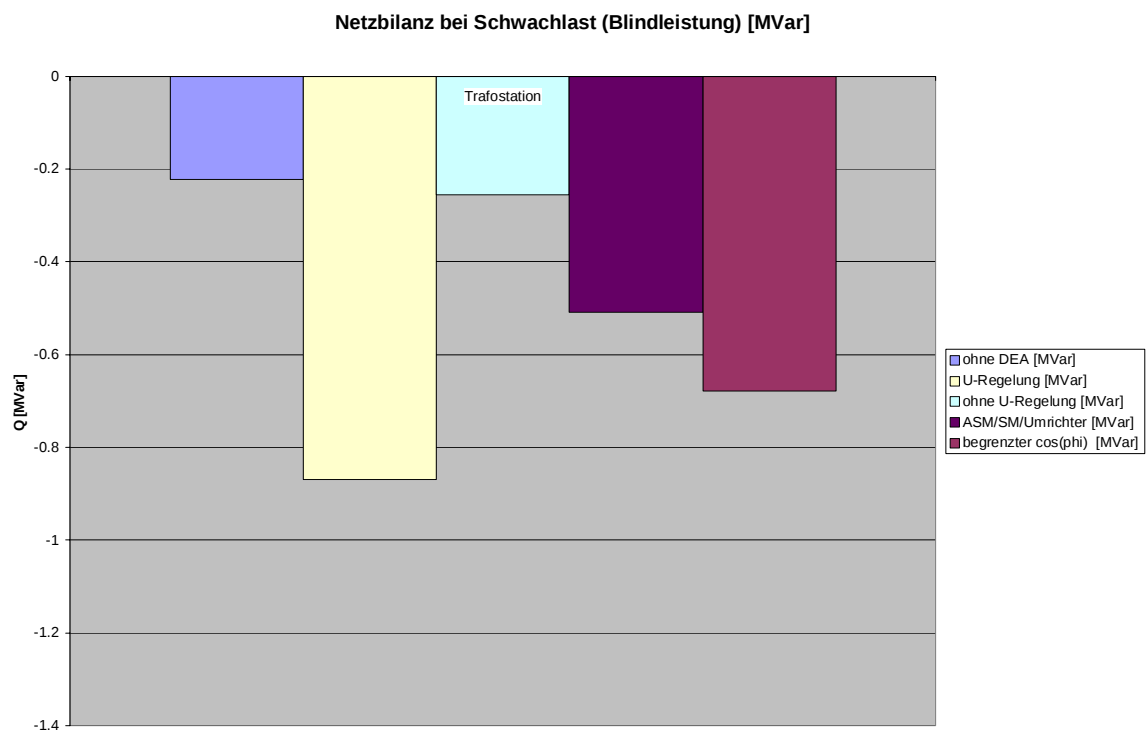


Abbildung 40: Netzbilanz bei Höchstlast

9.8. NETZBILANZ BLINDLEISTUNG BEI SCHWACHLAST

Weil das Spannungsniveau bei Schwachlast überall sehr hoch ist, müssen die DEA bei den Varianten „U-Regelung“ und „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ mehr Blindleistung aufnehmen um die Spannungen an den Anschlusspunkten konstant zu halten. Bei allen anderen Varianten geht die Blindleistungsaufnahme zurück im Vergleich zur Mittellast.



9.9. NETZVERLUSTE WIRKLEISTUNG BEI PLANUNGSLAST

Die Netzverluste können durch den Einsatz von DEA reduziert werden, weil die Energieverteilung im Netz besser ist. Die Variante „U-Regelung“ wurde bewusst weggelassen, weil es sich nicht um eine praxisgerechte Simulation handelt. Bei den Simulationen der Netzverluste handelt es sich um das gesamte Niederspannungsnetz. Die DEA wurden jedoch nur bei den umliegenden Strassen der Altwiesenstrasse berücksichtigt. Darum kann man davon ausgehen, dass sich die Verluste beim Einsatz von weiteren DEA noch mehr verringert. Bei Planungslast werden mit der Variante „ohne U-Regelung“ die besten Resultate erreicht, weil das Spannungsniveau am höchsten ist.

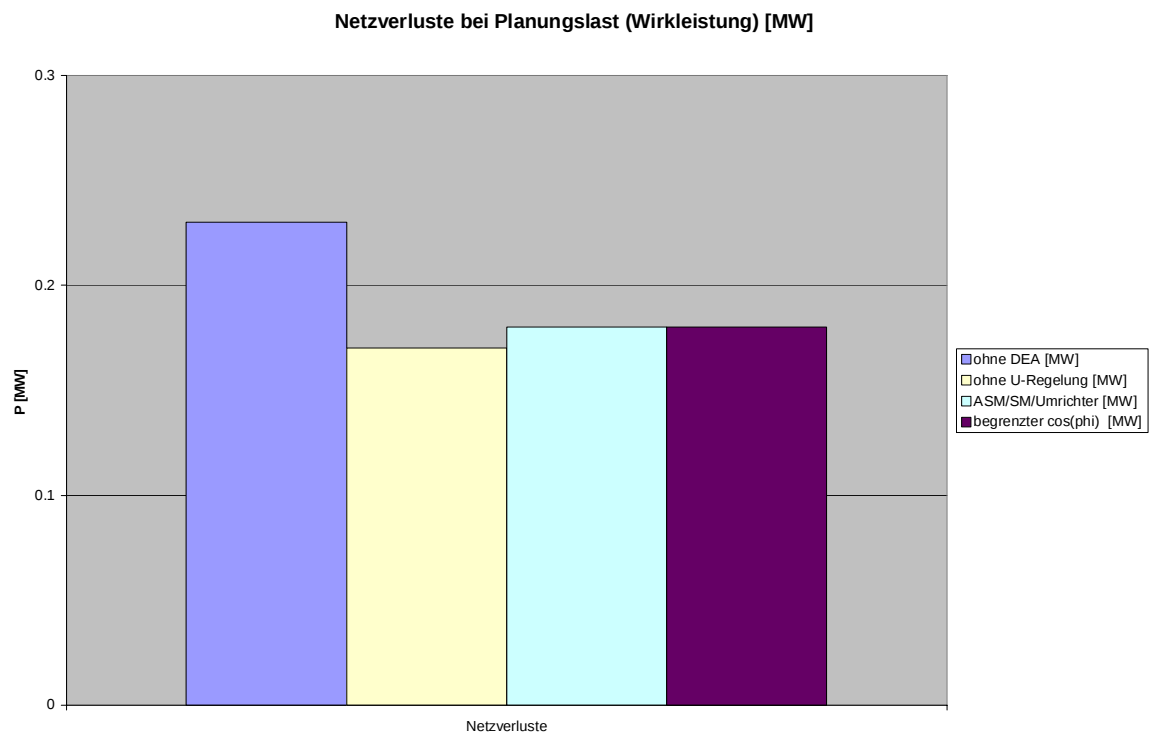


Abbildung 42: Netzverluste bei Planungslast

9.10. NETZVERLUSTE WIRKLEISTUNG BEI MITTELLAST

Auch bei Mittellast ist mit dem Einsatz von DEA gegenüber der Variante „ohne DEA“ eine Verbesserung zu verzeichnen. Die Bilanz fällt aber nicht mehr ganz so gut aus wie bei Planungslast. Auffällig ist bei der Grafik unten, dass die Varianten „ohne DEA“ und „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ praktisch gleich grosse Verluste aufweisen, was aber eher zufällig entstanden ist. Es gilt zu bedenken, dass die Spannungsniveaus und die Blindleistungsflüsse in den Leitungen ganz anders sind, wenn man die zwei Varianten vergleicht.

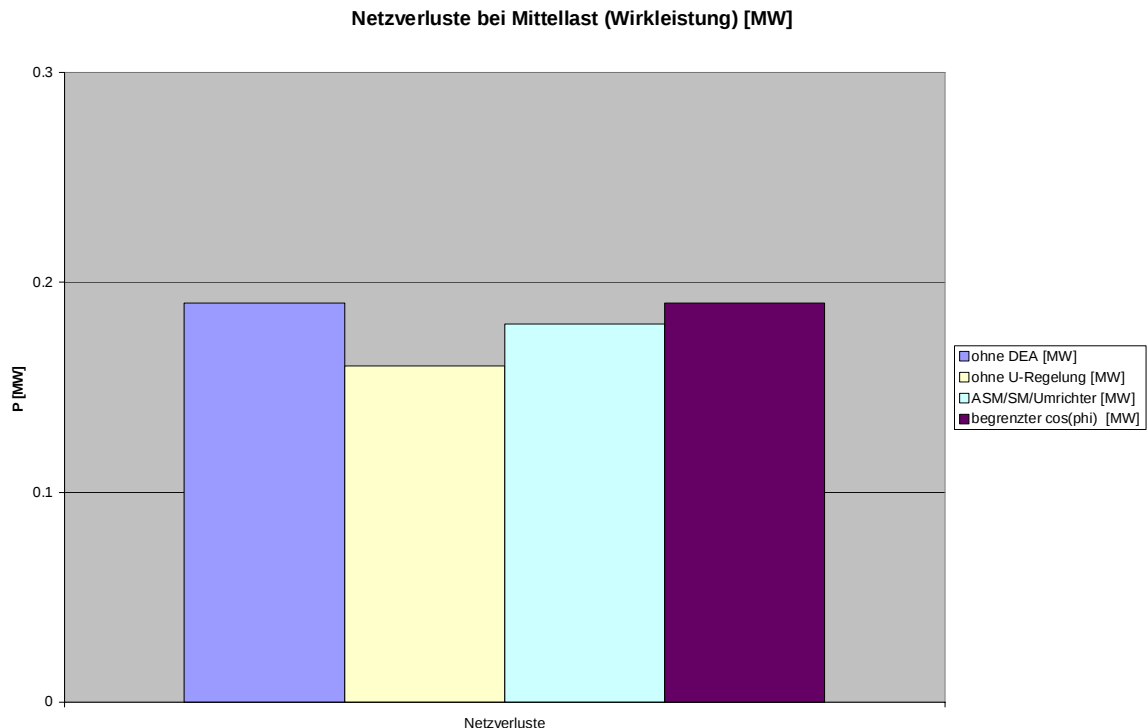


Abbildung 43: Netzverluste bei Mittellast

9.11. NETZVERLUSTE WIRKLEISTUNG BEI HÖCHSTLAST

Wird die Variante „ohne DEA“ als Referenz betrachtet, sinken die Netzverluste mit DEA auch bei Höchstlast.

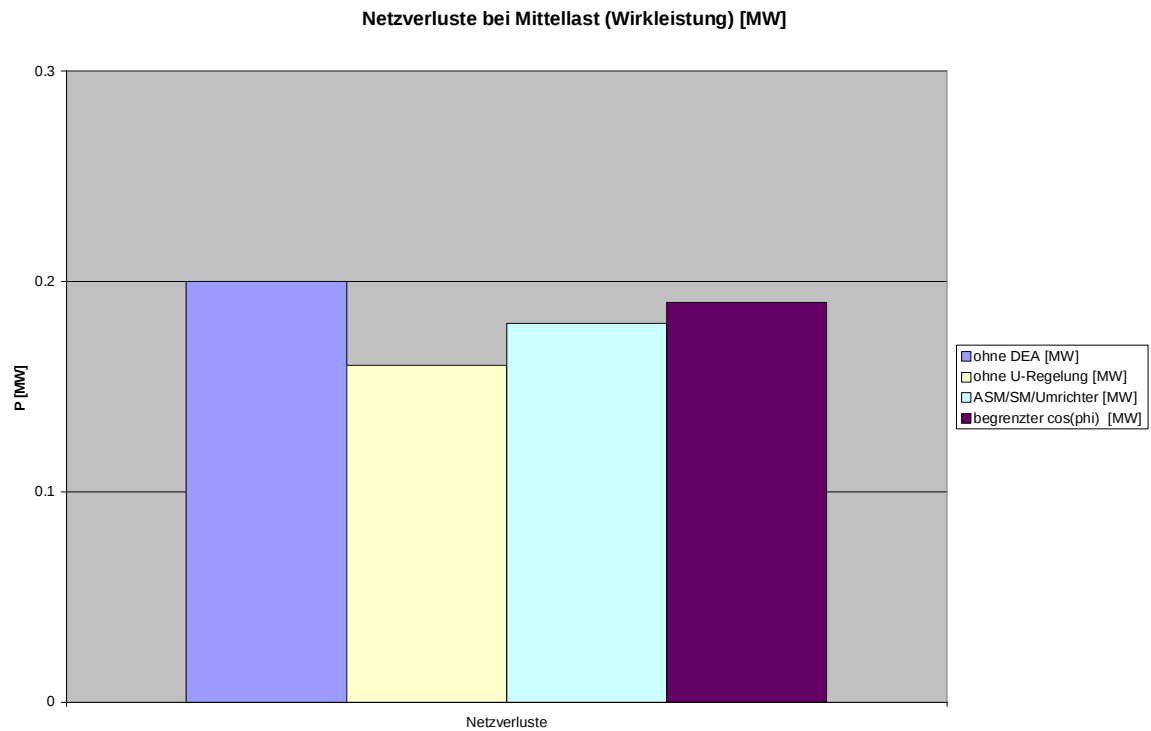


Abbildung 44: Netzverluste bei Mittellast

9.12. NETZVERLUSTE WIRKLEISTUNG BEI SCHWACHLAST

Bei schwacher Last übersteigen die Netzverluste der Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ diejenige „ohne DEA“. Die beiden anderen DEA-Varianten sind immer noch knapp darunter. Je tiefer die Belastung im Netz desto näher sind die Wirkleistungsverluste der verschiedenen Varianten zusammen, weil die Spannungen auch näher beisammen liegen. Grundsätzlich kann man sagen, je höher das Spannungsniveau ist, desto tiefer sind die Netzverluste. Mit der Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ wird versucht die Spannung tief zu halten, was zu höheren Verlusten führt.

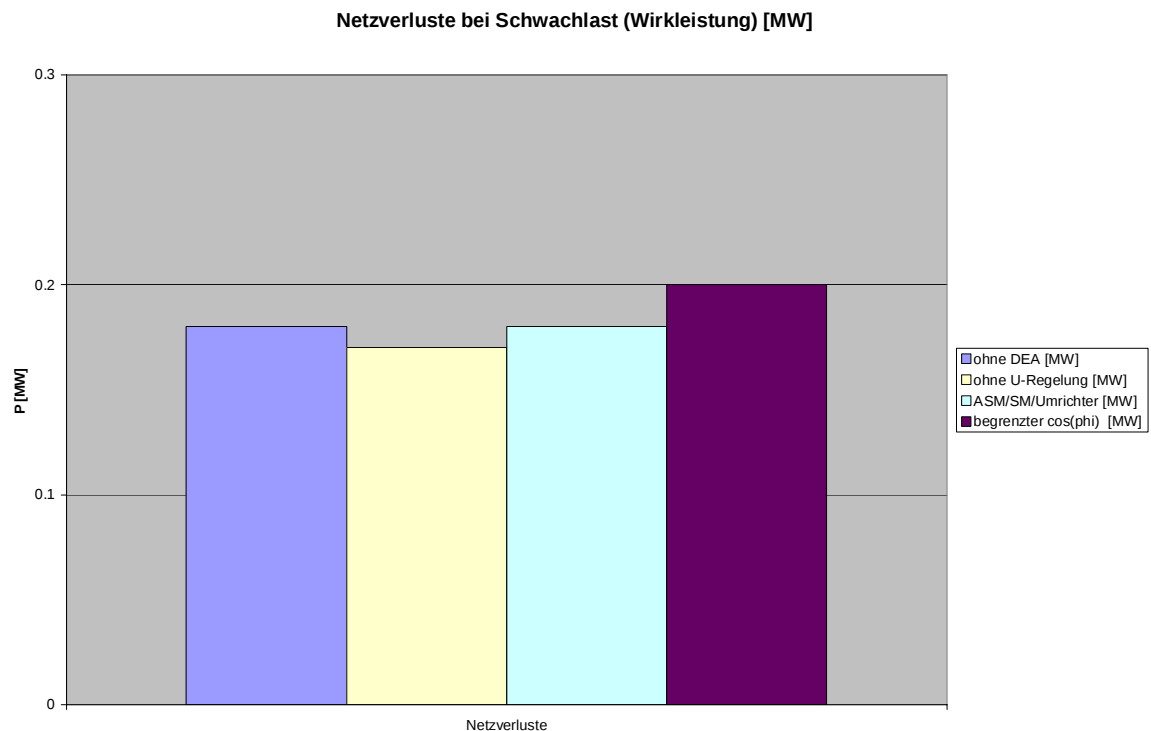


Abbildung 45: Netzverluste bei Schwachlast

9.13. NETZVERLUSTE BLINDLEISTUNG BEI PLANUNGSLAST

Auch die Blindleistungsnetzverluste können durch den Einsatz von DEA reduziert werden, weil die Energieverteilung im Netz besser wird. Die Variante „U-Regelung“ wurde bewusst weggelassen, weil es sich dabei nicht um eine praxisgerechte Simulation handelt. Bei Planungslast wird mit der Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ die besten Resultate erreicht. Es ist deutlich zu sehen, dass mit dem Einsatz von DEA bei grosser Last Verluste eingespart werden können.

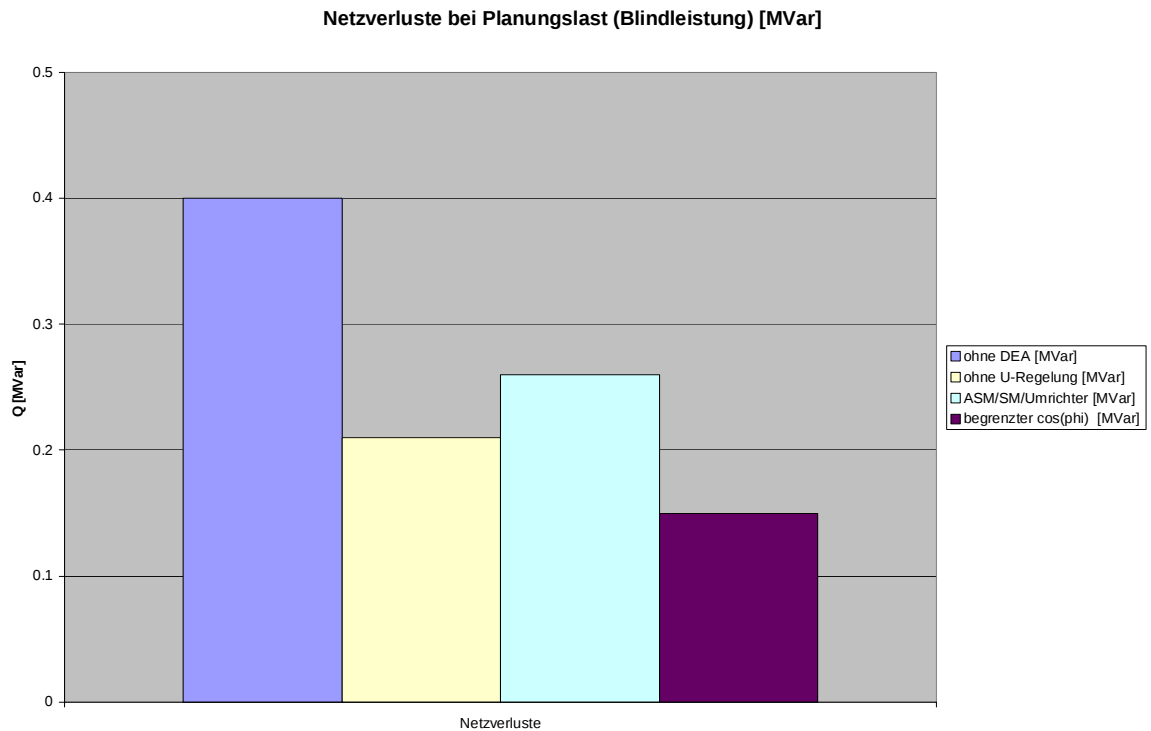


Abbildung 46: Netzverluste Blindleistung bei Planungslast

9.14. NETZVERLUSTE BLINDLEISTUNG BEI MITTELLAST

Auch bei Mittellast ist mit dem Einsatz von DEA gegenüber der Variante „ohne DEA“ eine Verbesserung zu verzeichnen. Die Bilanz fällt aber nicht mehr ganz so gut aus wie bei Planungslast. Auffällig ist bei der Grafik unten, dass nur bei der Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ ein Anstieg der Verluste zu verzeichnen ist.

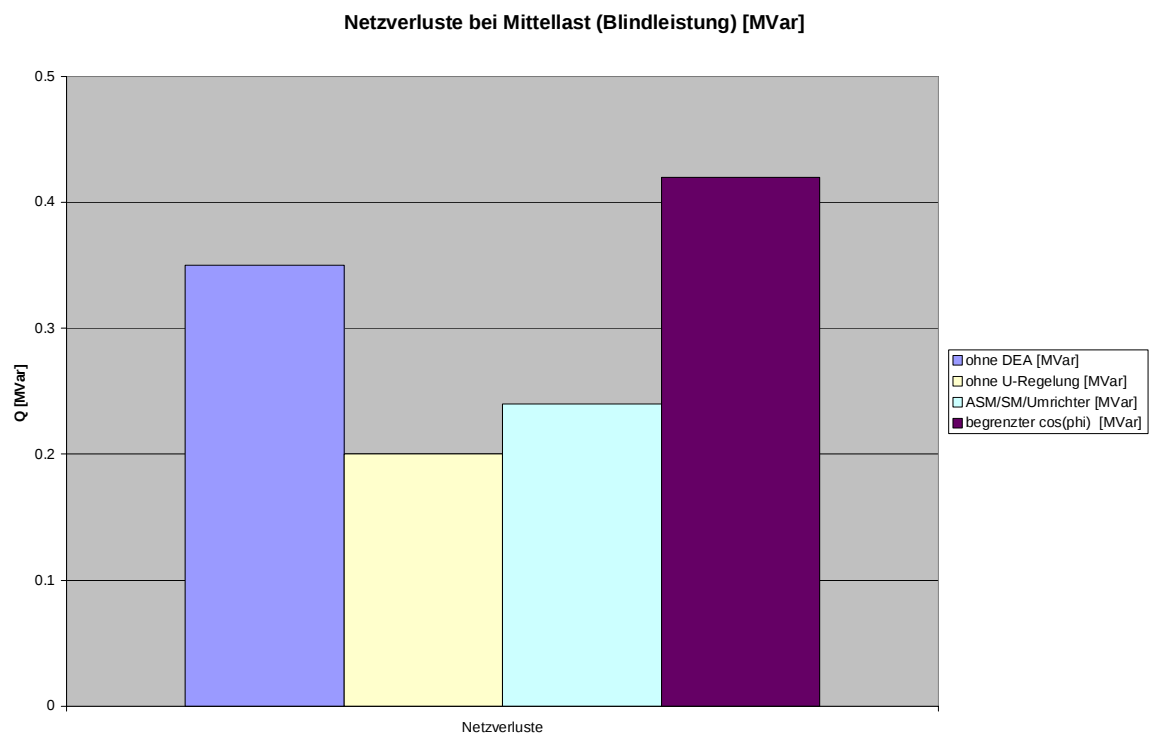


Abbildung 47: Netzverluste Blindleistung bei Mittellast

9.15. NETZVERLUSTE BLINDLEISTUNG BEI HÖCHSTLAST

Auffällig sind die höheren Blindleistungsverluste der Variante „begrenzter $\cos(\varphi)$ “. Dies lässt sich durch den erhöhten Blindleistungsfluss im Netz begründen.

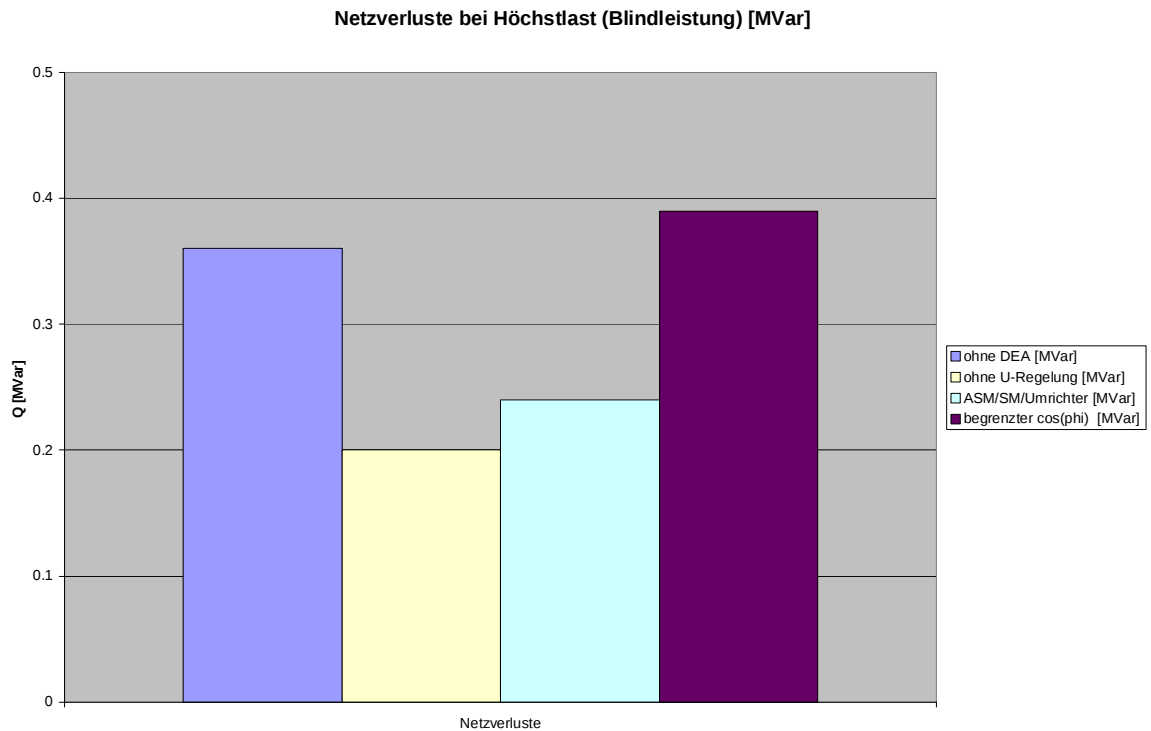


Abbildung 48: Netzverluste Blindleistung bei Höchstlast

9.16. NETZVERLUSTE BLINDLEISTUNG BEI SCHWACHLAST

Bei Schwachlast werden mit jeder Variante mit DEA bessere Resultate als ohne erreicht.

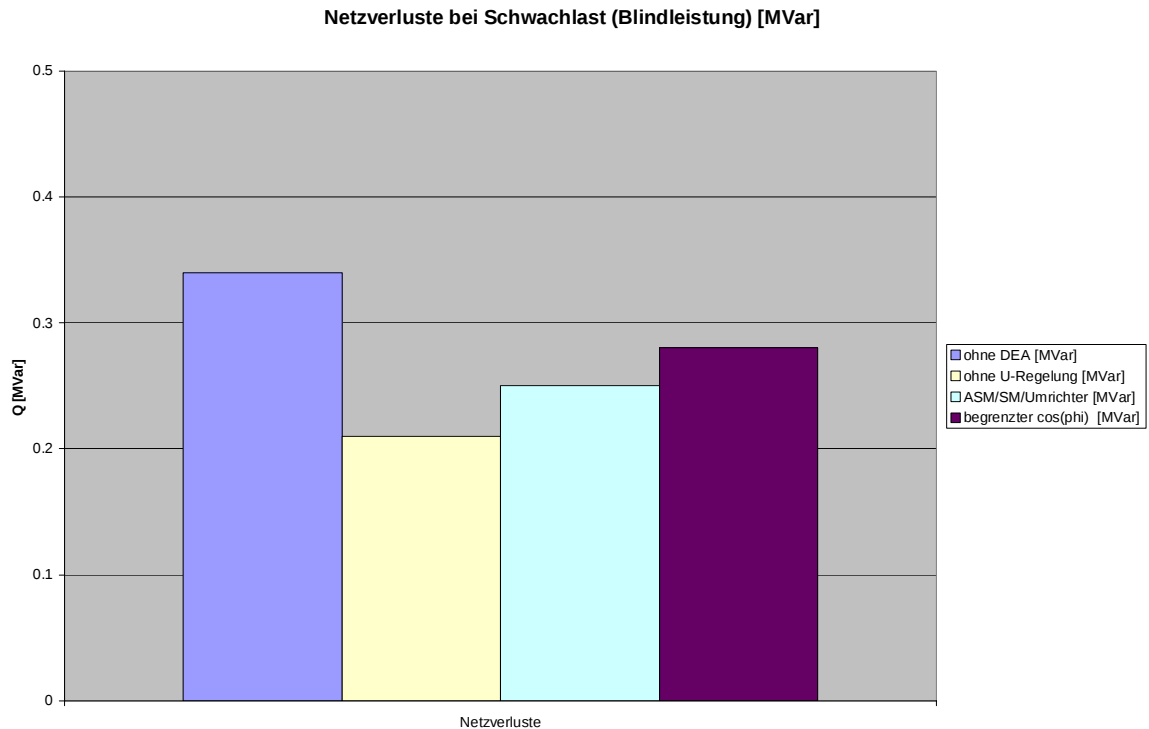


Abbildung 49: Netzverluste Blindleistung bei Schwachlast

9.17. ZUSAMMENFASSUNG NETZBILANZEN

Nicht nur die Lasten nehmen Einfluss auf den Blindleistungsfluss, sondern auch die Art der Ankopplung der DEA ist entscheidend. Je mehr Asynchronmaschinen eingesetzt werden, desto höher wird der Blindleistungsfluss. Werden Spannungsregelungen bei den Umrichtern vorgesehen, ergibt sich auch eine Zunahme des Blindleistungsflusses.

Ohne spannungsregulierende Massnahmen der Umrichter und der Synchronmaschinen – d.h. wenn keine Blindleistung bezogen oder eingespiessen wird – wird je nach Belastungszustand im Netz mehr Blindleistung umgesetzt als wenn keine DEA eingesetzt werden. Im Normalfall erhöhen spannungsregulierende DEA den Blindleistungsfluss im Netz.

Durch den Einsatz von DEA vor allem bei hoher Belastung des Netzes wird eine starke Reduktion der Netzverluste erreicht. Bei schwacher Belastung kommt es auf die Art der Einspeisung an.

Vor allem wenn viel Blindleistung bezogen werden muss, um die Spannung zu halten oder durch den Einsatz von Asynchronmaschinen, kann es sogar zu einer Erhöhung der Netzverluste kommen. Die Simulationen der Netzbilanzen lassen den Schluss zu, dass mit der richtigen Wahl der DEA-Ankopplung Netzverluste eingespart werden, weil die Energie besser im Netz verteilt ist. Weiter kann bei hohen Lasten auch der Blindleistungsfluss minimiert werden.

10. TAGESVERLÄUFE

Die Simulation der Tagesverläufe wurde mit dem Mittelspannungsnetz durchgeführt.

Die Spannungen sind blau dargestellt, die Ströme rot, die Wirkleistungen grün und die Blindleistungen braun. Die maximal auftretende Last beträgt 60 % der Planungslast, die minimale 27 %.

10.1. „OHNE DEA“

10.1.1. „Ohne DEA“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse

Der Stromverlauf über 24 Stunden wurde den Daten vom ewz angepasst. Zu sehen ist das Nachttal, die Mittagsspitze und die Abendsspitze. Die Spannung an der Sammelschiene Altwiesenstrasse bewegt sich in einem schmalen Band von ca. 3 V über den Tag betrachtet.

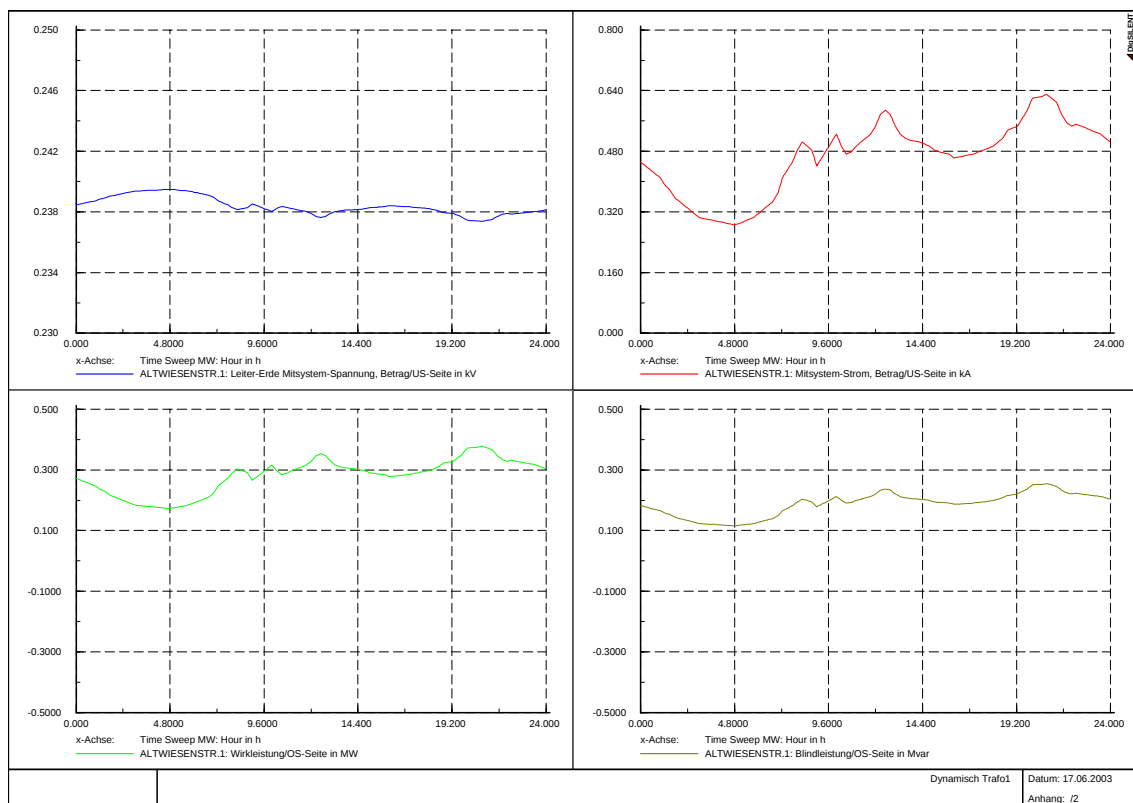


Abbildung 50: Tagesverlauf ohne DEA

10.1.2. „Ohne DEA“ Spannungen

Bei den 4 Grafiken in Abbildung 51 ist der Verlauf in etwa gleich, wobei die Spannung bei der Altwiesenstrasse am höchsten ist und gegen Ende abnimmt. Je weiter hinten die Spannung angeschaut wird, desto grösser ist die Spannungsschwankung.

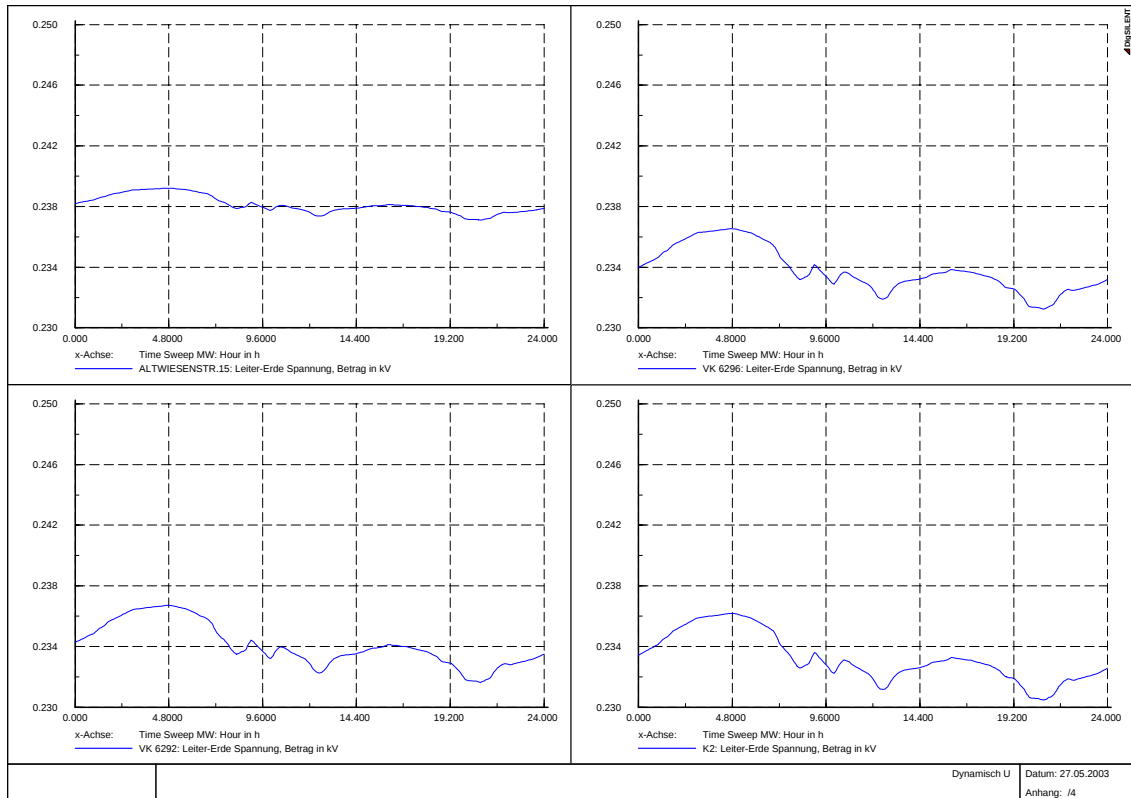


Abbildung 51: Spannungsverläufe ohne DEA

10.1.3. „Ohne DEA“ Leitungsströme

Die Ströme bewegen sich in einem unkritischen Bereich, wenn keine DEA einspeisen und folgen dem eingegebenen Profil. Die hellblaue Linie zeigt den maximal zulässigen Strom der Leitung.

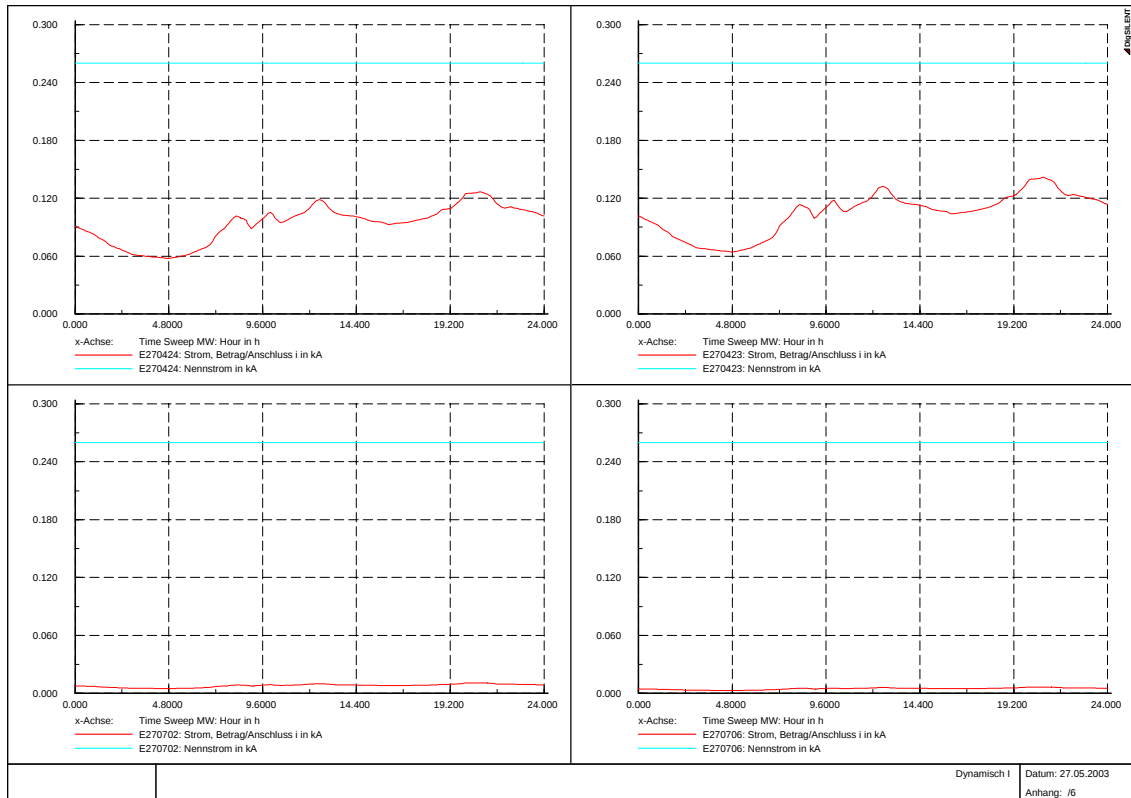


Abbildung 52: Stromverläufe ohne DEA

10.2. „OHNE U-REGELUNG“

10.2.1. „ohne U-Regelung“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse

Bei dieser Simulation wurde den DEA ein Profil hinterlegt, das folgendermassen aussieht: Über die Nacht sind alle DEA ausgeschaltet. Von 8.00 Uhr - 18.00 Uhr speisen alle DEA mit voller Leistung ein.

Wenn alle DEA im gleichen Zeitpunkt einschalten, erhöht sich die Spannung um ca. 2 V. Damit handelt es sich um eine Simulation, die in der Praxis kaum auftreten wird, weil die DEA zum Beispiel mit Rundsteuersignale gestaffelt ans Netz geschaltet werden können.

Die Wirkleistung geht ins Negative, das heisst es wird Wirkleistung in das Mittelspannungsnetz zurückgespielen.

Bei der Blindleistung sieht es etwas anders aus, weil die DEA keine Blindleistung liefern können bei einem eingestellten $\cos(\varphi)$ von 1. Der Verlauf der Blindleistung stammt daher nur von den Lasten.

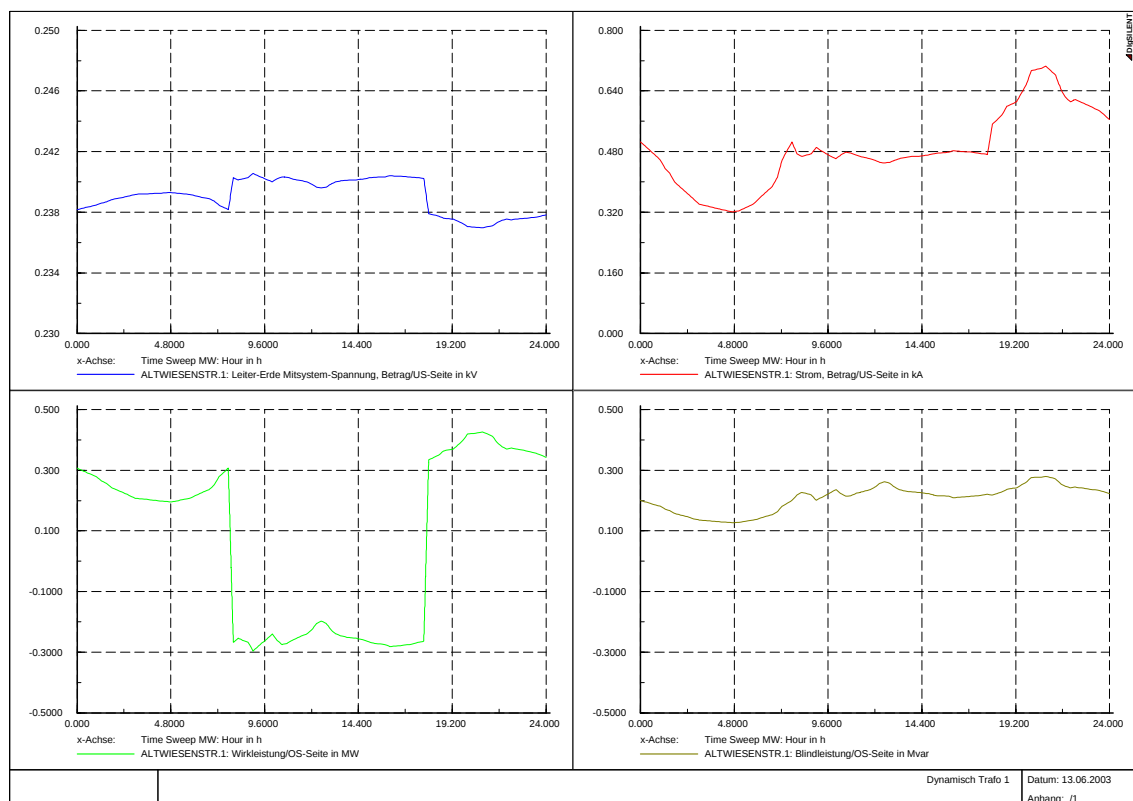


Abbildung 53: Tagesverläufe mit DEA ohne Spannungsregelung

10.2.2. „ohne U-Regelung“ verschiedene DEA

Hier wird einmal der Tagesverlauf einer 20 kW- und einer 50 kW-DEA dargestellt. Daraus ist zu sehen, dass die DEA weder Blindleistung aufnehmen noch abgeben.

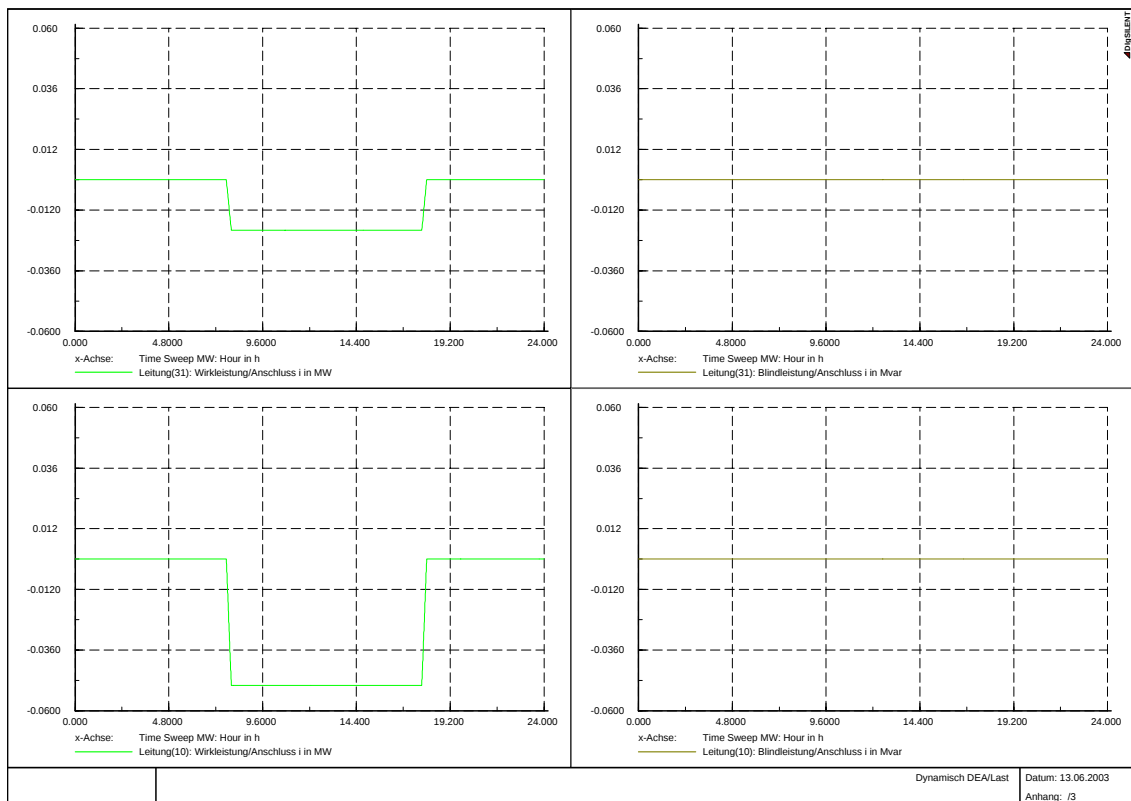


Abbildung 54: Tagesverläufe von DEA

10.2.3. „ohne U-Regelung“ Spannungen

Die Spannungserhöhung ist wieder damit zu erklären, dass durch die Wirkleistungseinspeisung der DEA die Spannung ansteigt. Je näher bei der Einspeisestelle, desto höher wird die Spannungsänderung beim Ein- oder Ausschalten der DEA. Dazu ist zu bemerken, dass in der Praxis nicht alle DEA genau im gleichen Moment einschalten, wie das in den Simulationen der Fall ist.

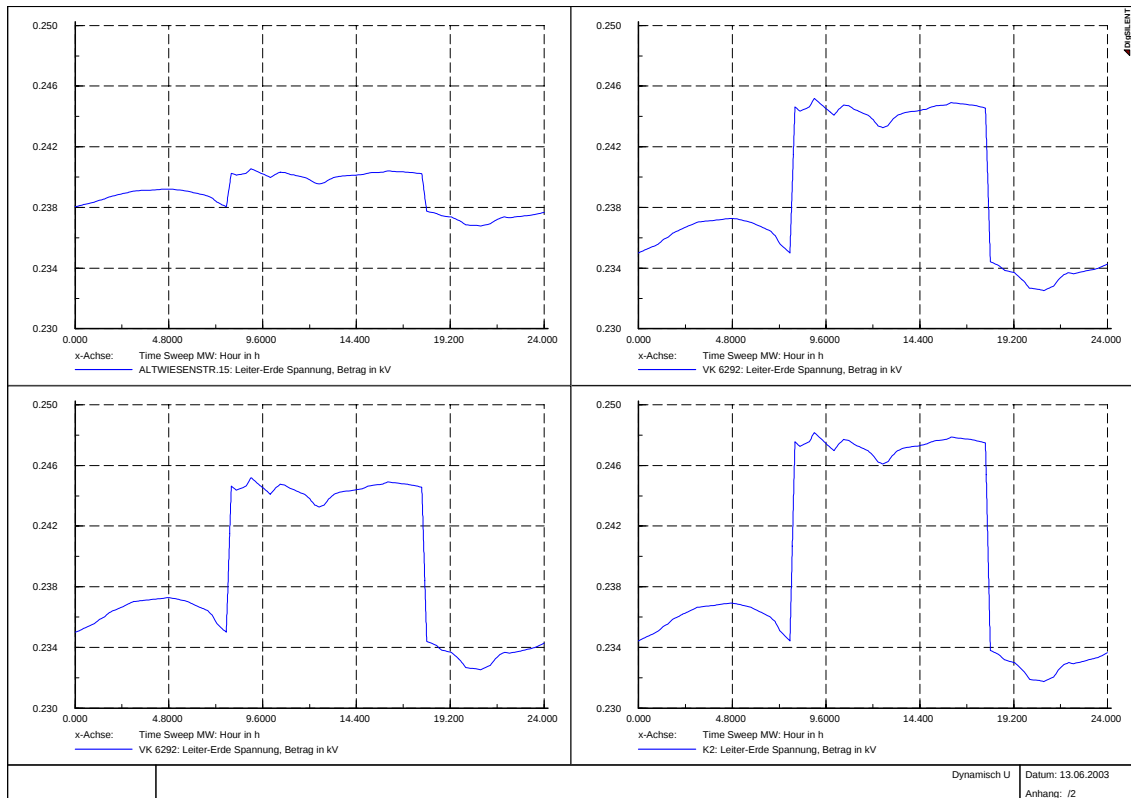


Abbildung 55: Spannungsverläufe mit DEA ohne Spannungsregelung

10.2.4. „ohne U-Regelung“ Leitungsströme

Wenn die DEA einschalten, steigt der Strom auf etwa 160 A bei den oberen Leitungen. Daraus folgt, dass keine der angeschauten Leitungen überlastet ist.

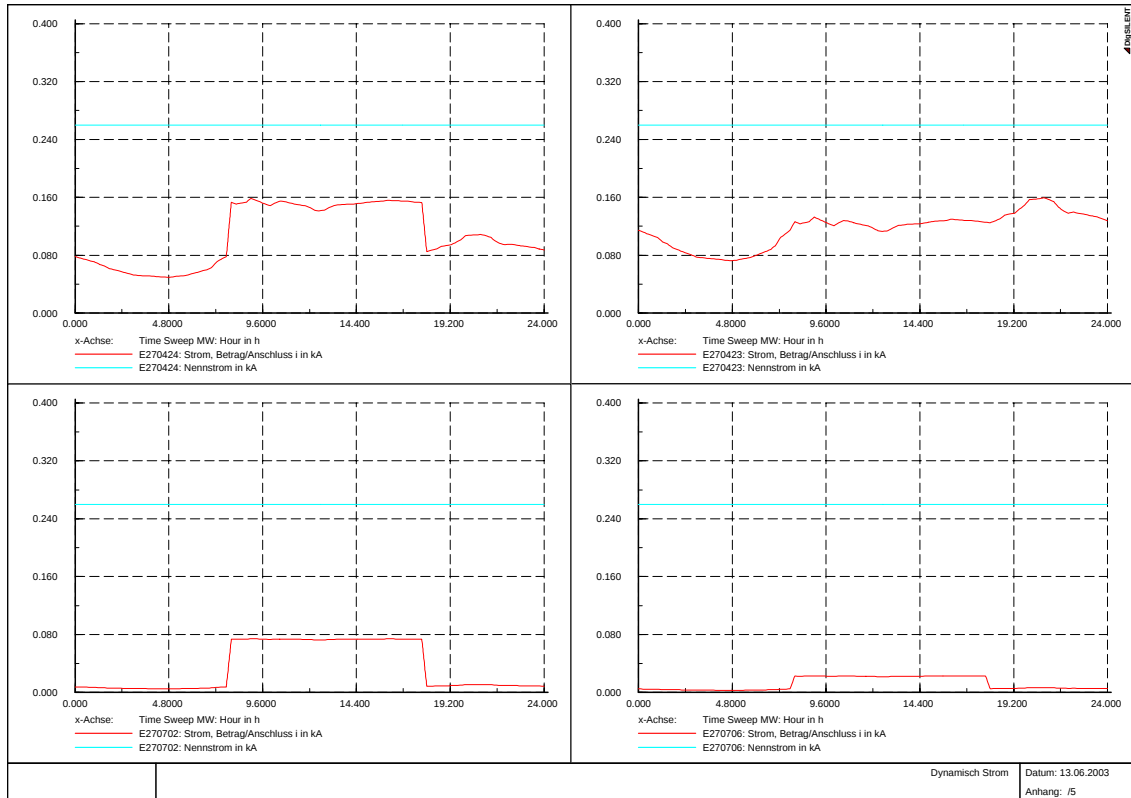


Abbildung 56: Stromverläufe mit DEA ohne Spannungsregelung

10.3. „PHOTOVOLTAIK“

Diese Untervariante der Variante „ohne U-Regelung“ wird in der Einleitung im Kapitel 0 beschrieben.

10.3.1. „Photovoltaik“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse

Im betrachteten Ausschnitt wurden drei Umrichter mit einer Photovoltaik-Charakteristik versehen. Damit ergeben sich etwas „rundere“ Kurven. Bei der Spannung ist der Spannungsanstieg bedingt durch das Einschalten der DEA nicht mehr gleich sprunghaft.

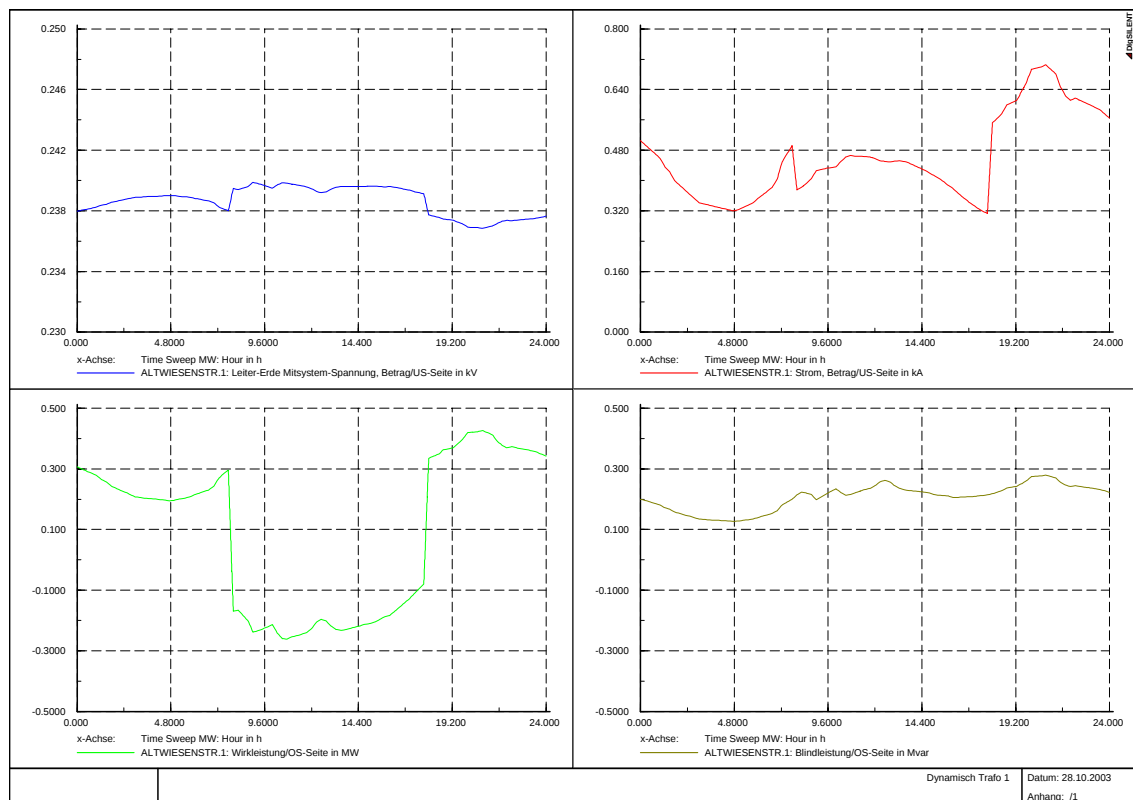


Abbildung 57: Tagesverläufe mit Photovoltaikanlage

10.3.2. „Photovoltaik“ verschiedene DEA

Die nachfolgende Grafik zeigt die unterschiedlichen Einspeisecharakteristiken von zwei Umrichtern. Die Photovoltaikanlagen weisen in etwa einen „Sinustagesverlauf“ auf, während Brennstoffzellen- oder WKK-Anlagen zum Beispiel, während des Tages einspeisen, wenn die Stromtarife am höchsten sind und der Wärmebedarf am grössten ist. Der Sinustagesverlauf ist eine grobe Annäherung an den wirklichen Tagesverlauf von Photovoltaikanlagen, der stark vom Wetter und Klima abhängt. Bei der Simulation ist von einem typischen Sommertag ausgegangen worden, d.h. am Morgen um 06.00 Uhr steigt die abgegebene Leistung sinusförmig an, erreicht am Mittag den Zenit und sinkt bis 18.00 Uhr wieder gegen Null.

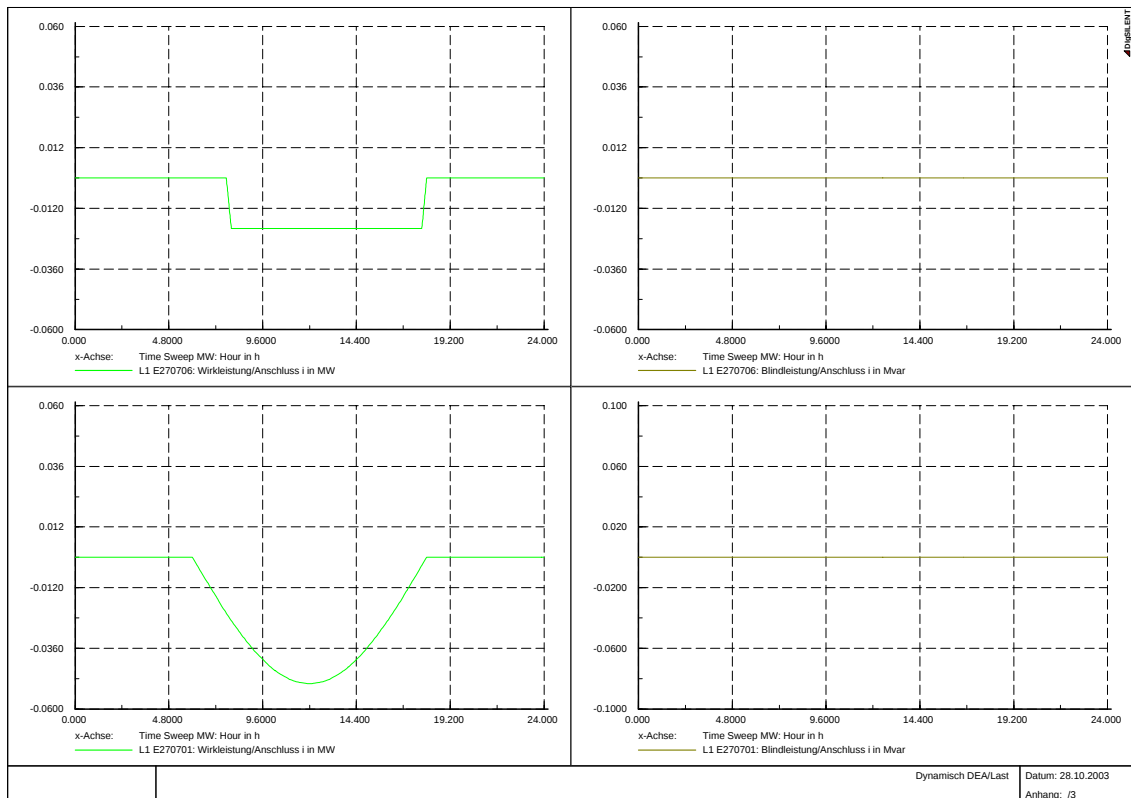


Abbildung 58: Tagesverläufe verschiedener DEA

10.3.3. Vergleich von verschiedenen täglichen Produktionsverläufen

Wie in Abbildung 59 zu sehen ist, variieren die Produktionsverläufe von Photovoltaikanlagen sehr stark. Sie sind einerseits von der Sonneneinstrahlung und von der Neigung der Sonne (Sommer/Winter) abhängig. Wie schon erwähnt wurde, handelt es sich bei der Simulation um eine grobe Annäherung an den wirklichen Tagesverlauf von Photovoltaikanlagen.

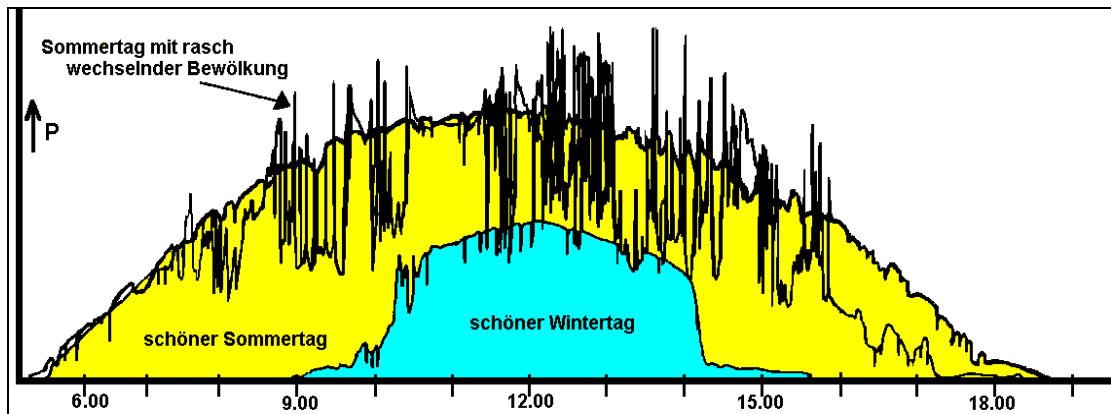


Abbildung 59: Produktionsverläufe von Photovoltaikanlagen

10.3.4. „Photovoltaik“ Spannungen

Im Vergleich zu den vorangegangenen Simulationen ohne Photovoltaik ist ein weniger markanter Spannungsanstieg zu erkennen. Die Verläufe werden durch den „Sinustagesverlauf“ der Photovoltaikanlagen abgerundet.

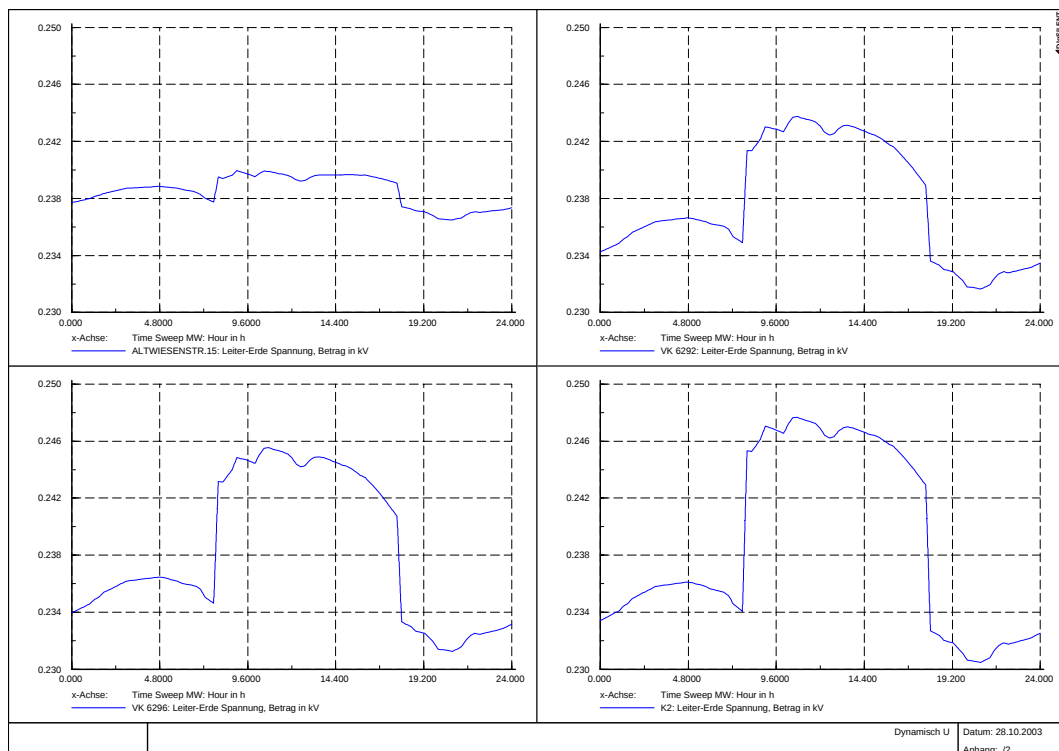


Abbildung 60: Spannungsverläufe mit Photovoltaikanlagen

10.3.5. „Photovoltaik“ Leitungsströme

Bei den Strömen der oberen zwei Leitungen ist ein runder Verlauf zu erkennen, während bei den unteren Leitungen eine sprunghafte Einspeisung zu erkennen ist.

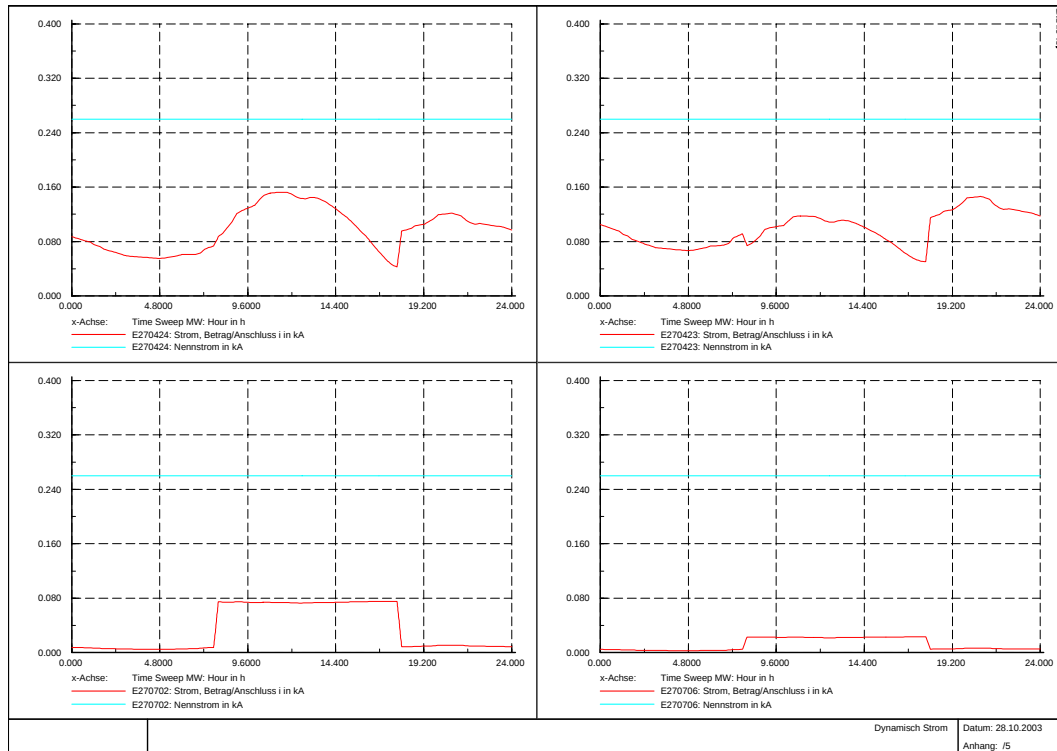


Abbildung 61: Stromverläufe mit Photovoltaikanlagen

10.4. „VERSCHIEDENE EINSCHALTCHARAKTERISTIKEN“

Diese Untervariante der Variante „ohne U-Regelung“ wird in der Einleitung im Kapitel 0 beschrieben.

10.4.1. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse

Die Einspeisungscharakteristiken der DEA wurden über die gesamte Altwiesenstrasse folgendermassen verteilt:

Anteil	Art der DEA	Einschaltdauer
25%	Photovoltaik	06.00-18.00 Uhr
25%	WKK oder Brennstoffzellen	08.00-18.00 Uhr
25%	WKK oder Brennstoffzellen	07.00-17.00 Uhr
25%	WKK oder Brennstoffzellen	06.00-16.00 Uhr

Tabelle 6: Einschaltzeiten verschiedener DEA

Daraus ergibt sich ein gestaffeltes Einschalten der DEA, was in Abbildung 62 vor allem bei der Wirkleistung (grün) gut ersichtlich ist.

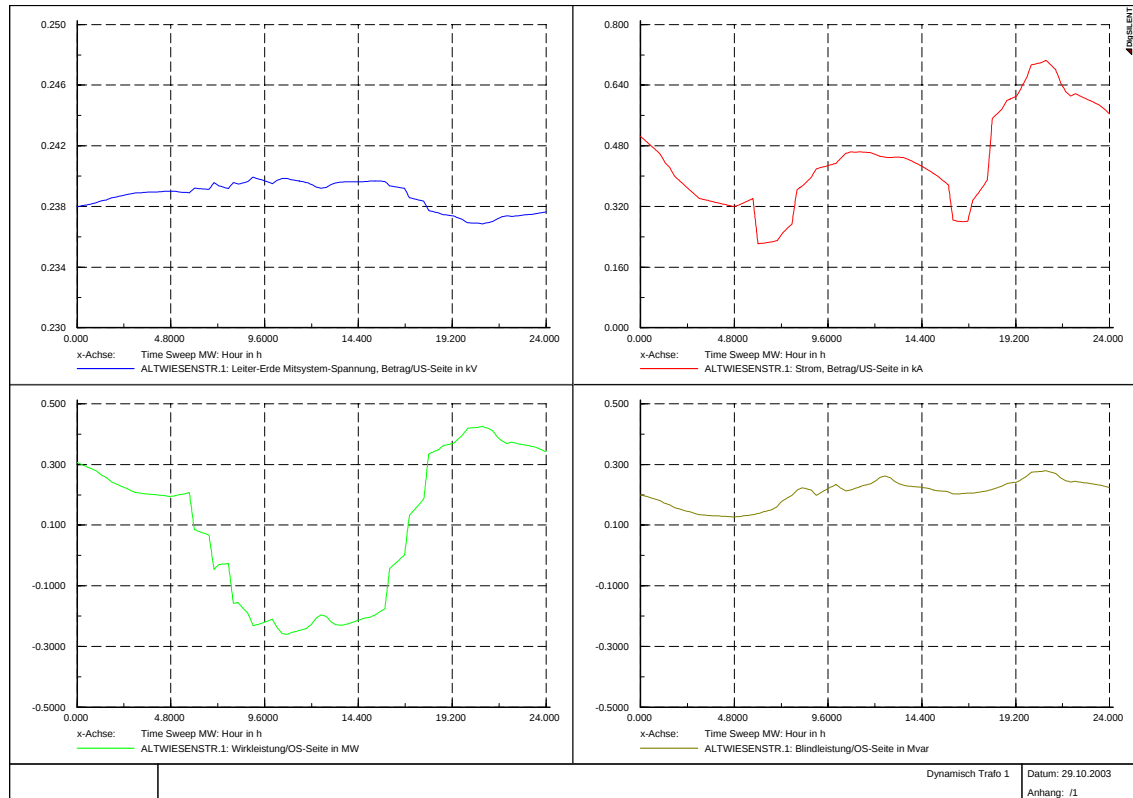


Abbildung 62: Tagesverläufe bei unterschiedlichen Einschaltzeiten der DEA

10.4.2. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ verschiedene Verläufe der DEA

Die folgenden vier Kurven zeigen die unterschiedlichen Charakteristiken der verschiedenen DEA auf. Sie variieren in der Ein- bzw. Ausschaltzeit, in der Kurvenform und der Einspeiseleistung.

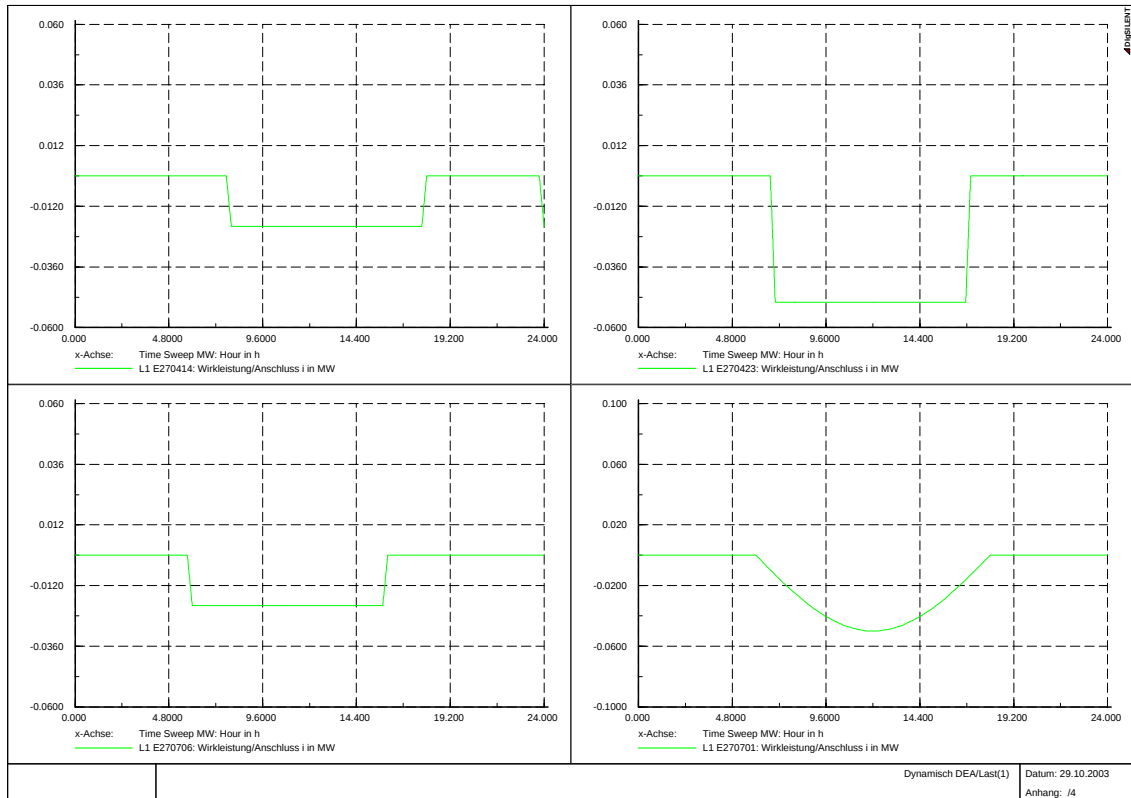


Abbildung 63: Tagesverläufe der DEA

10.4.3. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ Spannungen

Der grosse Spannungssprung um 8.00 Uhr und 18.00 Uhr an den Knoten ist praktisch nicht mehr zu sehen im Vergleich zu den vorangegangenen Simulationen mit nur einer Einschaltcharakteristik. Es ergeben sich bedingt durch die 4 verschiedenen Charakteristiken nur noch einige kleine Sprünge die sich besser über den Tag verteilen.

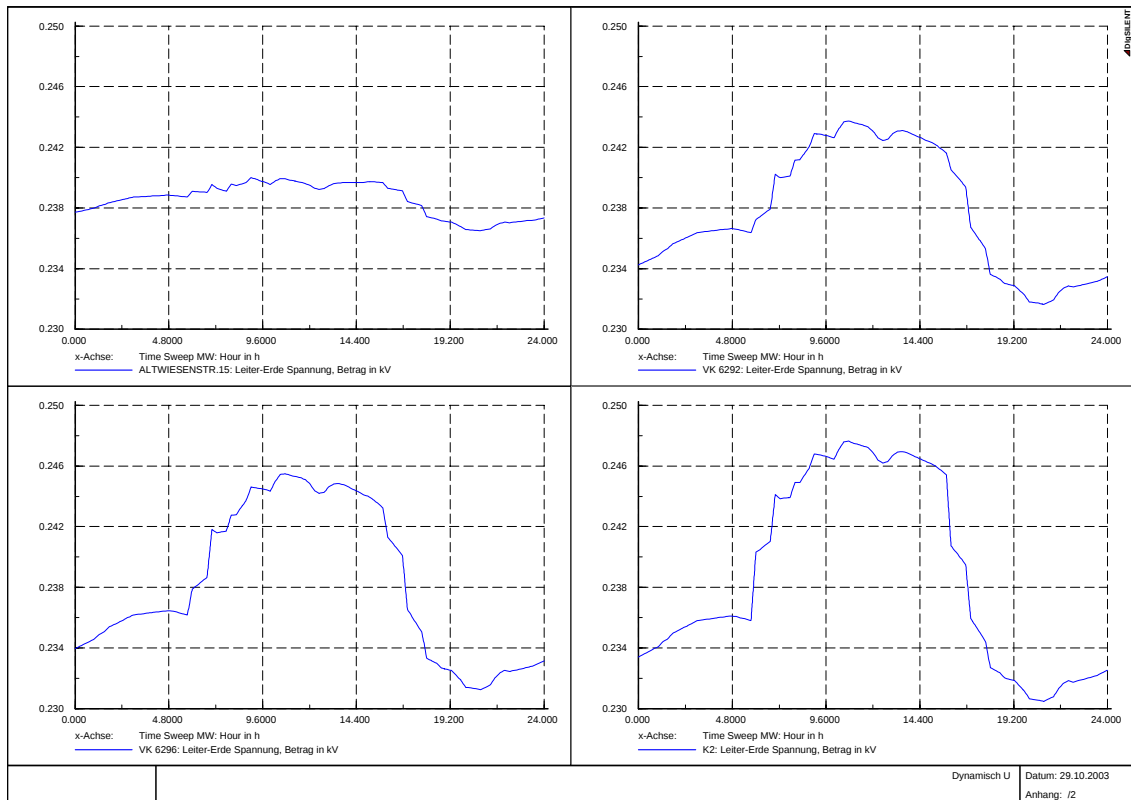


Abbildung 64: Spannungsverläufe bei unterschiedlichen Einschaltzeiten der DEA

10.4.4. „verschiedene Einschaltcharakteristiken“ Leitungsströme

Auch beim Strom ist klar zu sehen, dass mit unterschiedlichen Ein- und Ausschaltcharakteristiken deutlich kleinere Sprünge erwartet werden können. Damit wird klar, dass bei einem erhöhten Einsatz von DEA unbedingt darauf zu achten ist, dass nicht alle DEA zum gleichen Zeitpunkt ein- bzw. ausschalten.

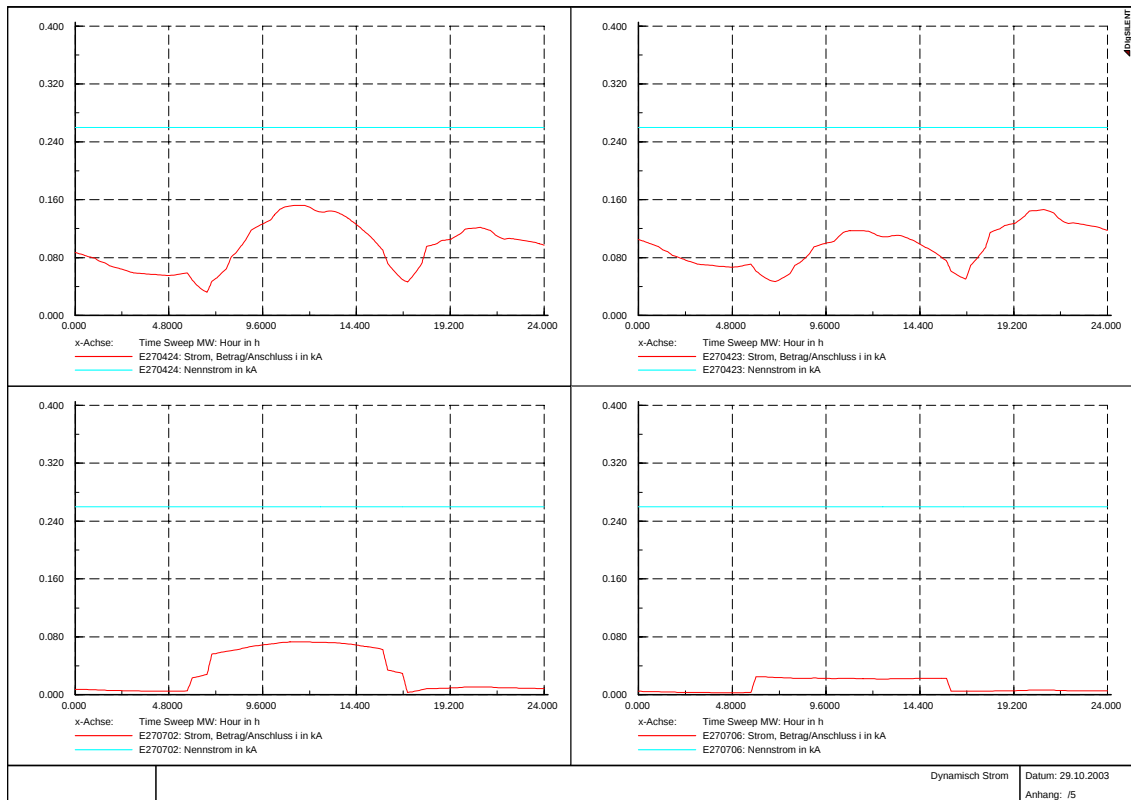


Abbildung 65: Stromverläufe bei unterschiedlichen Einschaltzeiten der DEA

10.5. „BEGRENZTER COS (ϕ)“

10.5.1. „begrenzter cos (ϕ)“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse

Mit der Variante „U-Regelung“ wird ermittelt, ob die einzelnen DEA Blindleistung aufnehmen oder abgeben. Dadurch lassen sich die Begrenzungen der einzelnen DEA dieser Variante einstellen.

Die Wirkleistung geht ins Negative, das heisst es wird Wirkleistung in das Mittelspannungsnetz zurückgespielen. Der auffallend konstante Strom (rot) lässt sich dadurch erklären, dass sich die negative Wirkleistung (Traforückspeisung ins MS-Netz) und der Blindleistungsbezug praktisch ganz aufheben.

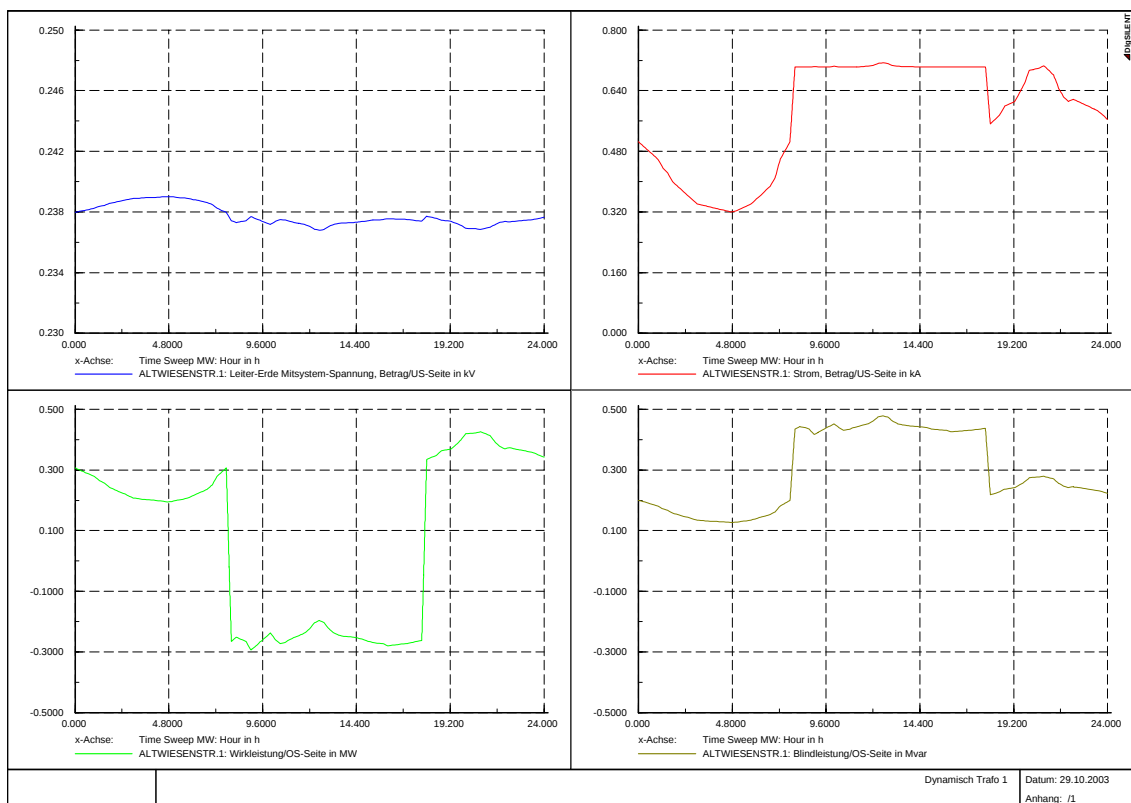


Abbildung 66: Tagesverläufe bei Blindleistungsbegrenzung

10.5.2. „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ verschiedene DEA

Hier wird einmal der Tagesverlauf einer 20 kW- und einer 50 kW DEA dargestellt. In diesem Beispiel nehmen beide DEA Blindleistung auf, was aber auf nicht an allen Einspeisestellen so sein muss.

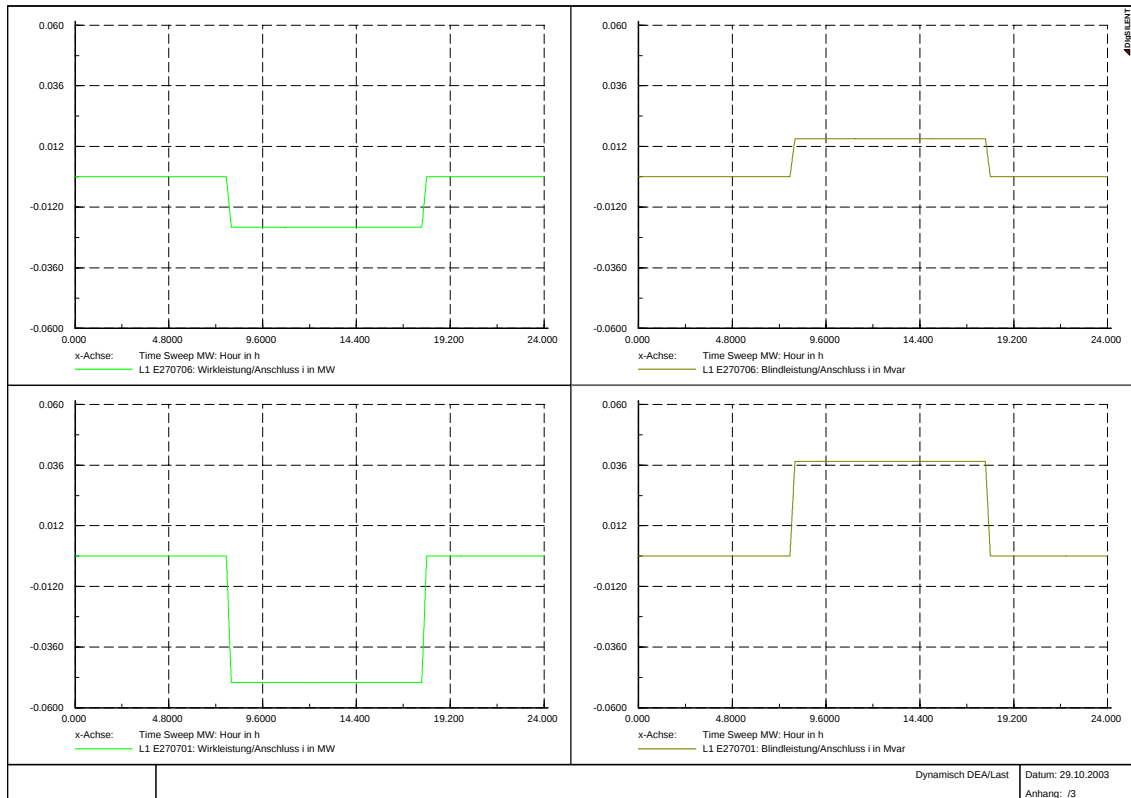


Abbildung 67: Tagesverläufe mit Blindleistungsbegrenzung bei verschiedenen DEA

10.5.3. „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ Spannungen

Die Spannungserhöhung ist wieder damit zu erklären, dass durch die Wirkleistungseinspeisung der DEA die Spannung ansteigt. Je weiter weg sich die Einspeisestelle von der Sammelschiene Altwiesenstrasse befindet, desto höher wird die Spannungsänderung beim Ein- oder Ausschalten der DEA. Die Spannungserhöhung ist weit weniger hoch, als wenn keine spannungsregulierenden Massnahmen ergriffen werden (Variante ohne U-Regelung).

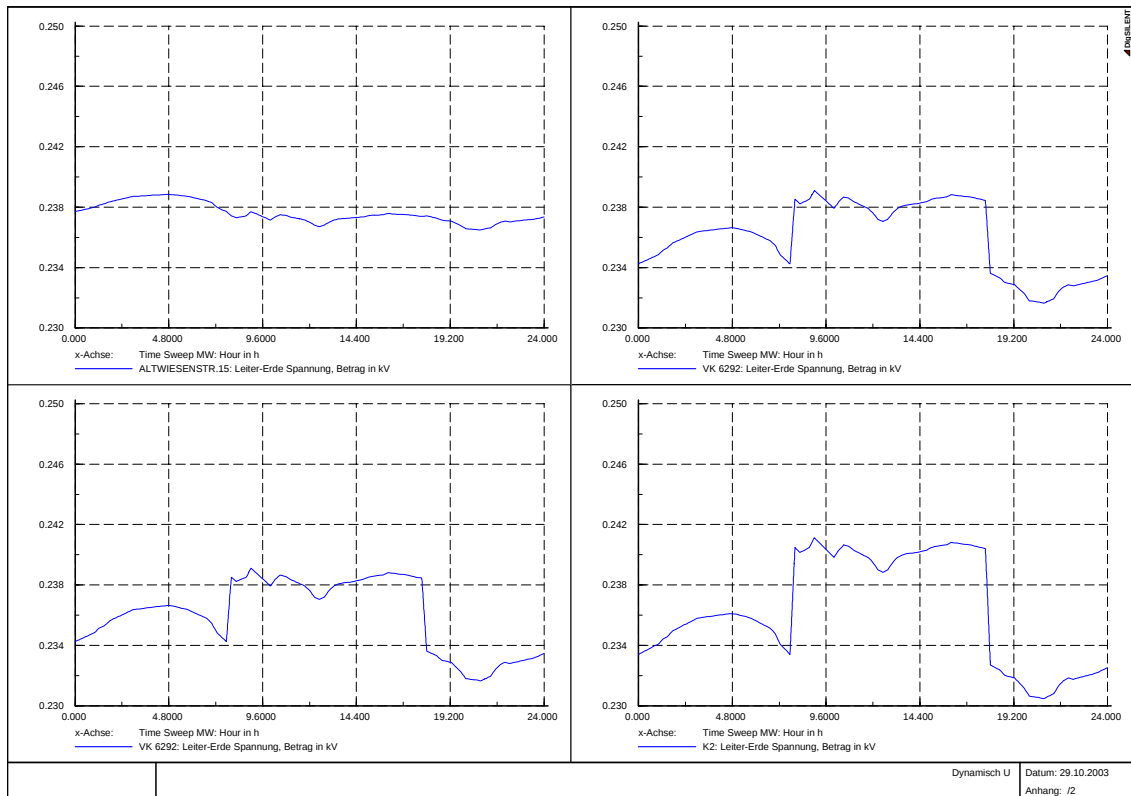


Abbildung 68: Spannungsverläufe bei Blindleistungsbegrenzung

10.5.4. „begrenzter $\cos(\varphi)$ “ Leitungsströme

Wenn die DEA einschalten, steigt der Strom auf etwa 240 A. Daraus folgt, dass keine der angeschauten Leitungen überlastet sind, einige bewegen sich jedoch nahe am Grenzwert.

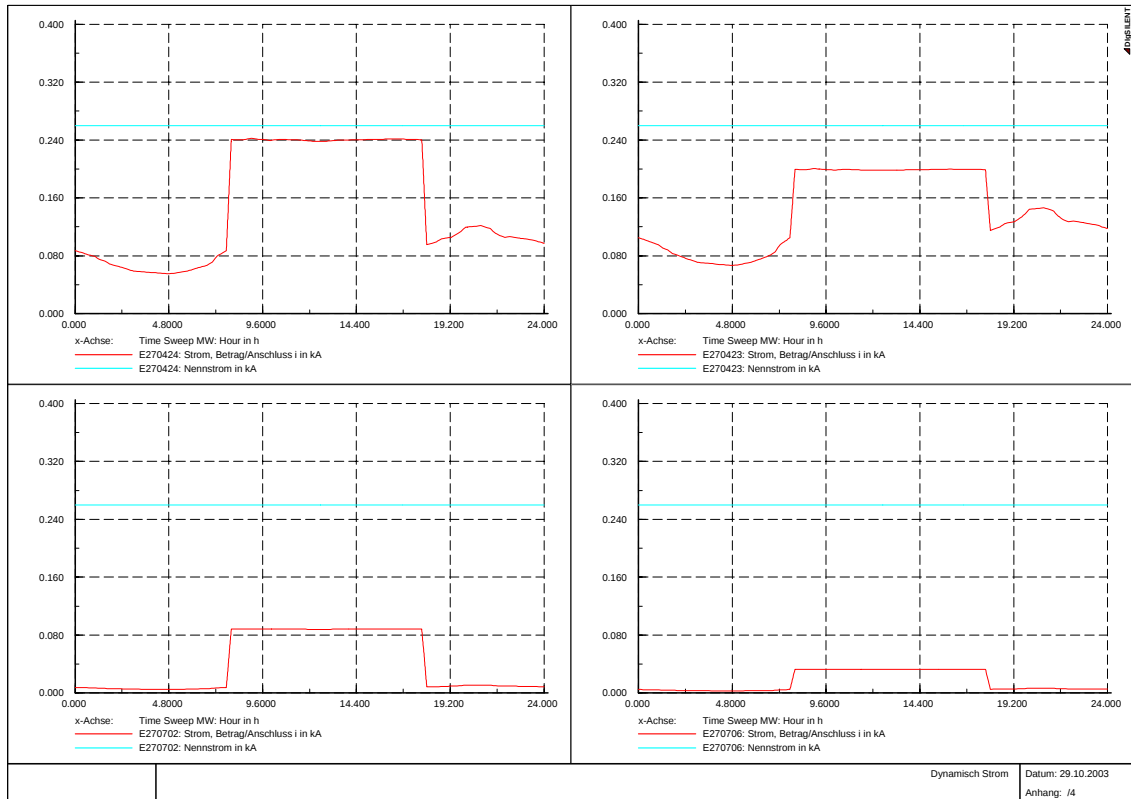


Abbildung 69: Stromverläufe mit Blindleistungsbegrenzung

10.6. „SPEICHER“

Um der Spannungsschwankung entgegen zu wirken, die durch die DEA-Einspeisung verursacht wird, wird ein Speicherelement eingesetzt, das die überschüssige Energie der DEA aufnimmt und anschliessend zwischen 18.00-8.00 Uhr ins Netz einspeist. Über einen Tag betrachtet muss die Energiebilanz Null sein, werden die Verluste vernachlässigt. Wie folgende Simulationen zeigen, liegt die maximal abgegebene bzw. aufgenommene Leistung bei ca. 800kW. Die Leistung stellt im Vergleich zur Energie kein grosses Problem dar und könnte zum Beispiel mit einer grossen Batterie oder Supercaps gelöst werden. Ein weit grösseres Problem stellt die speicherbare Energie dar, denn sie muss in diesem Simulationsbeispiel ca. 6 MWh betragen, was nur schwer mit Batterien oder anderen Speicherelementen abgedeckt werden kann.

10.6.1. „Speicher“ Trafo 1 der Altwiesenstrasse

Der Speicher wurde direkt an die Sammelschiene der Altwiesenstrasse angeschlossen und sorgt dabei für eine Glättung der Spannung. Der Trafo wird sehr stark entlastet und speist mit einer nahezu konstanten Wirkleistung ins NS-Netz ein. Würden zusätzlich zum Speicher auch noch Kondensatorbänke eingesetzt, könnte auch die Blindleistung weitgehend kompensiert werden und damit wäre auch der Strom nahezu konstant.

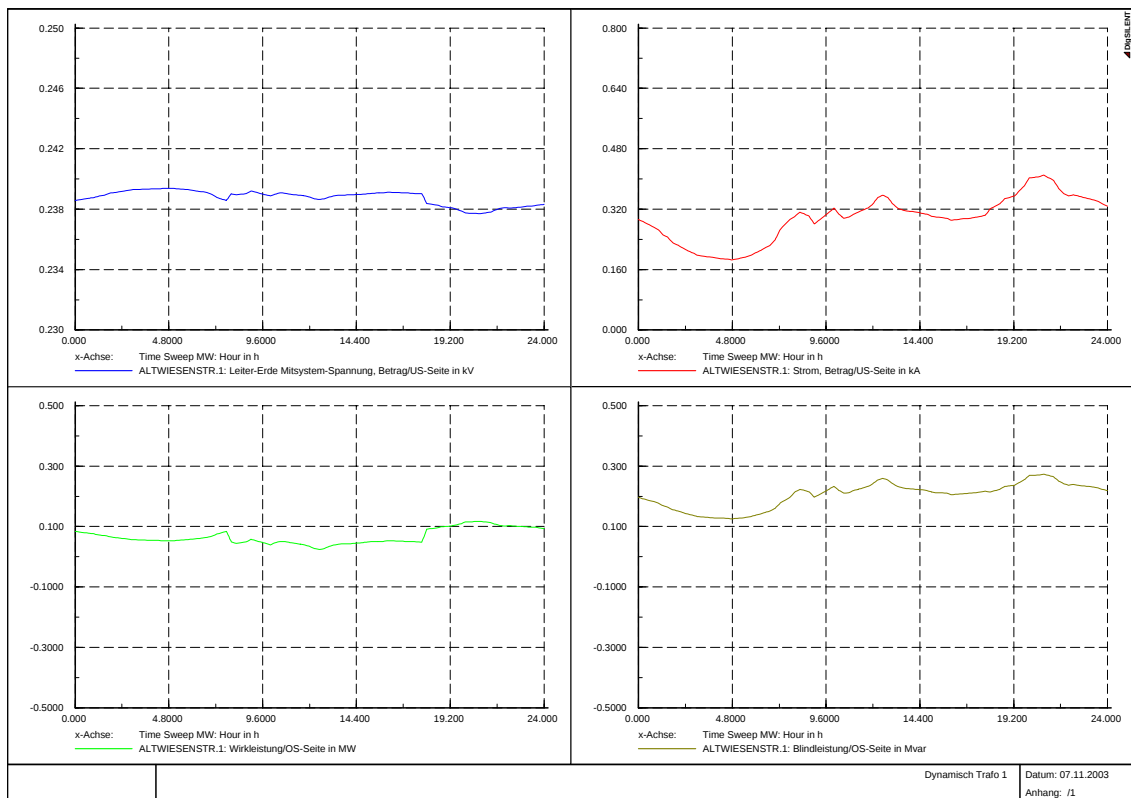


Abbildung 70: Tagesverläufe mit Speicher

10.6.2. „Speicher“ Spannungen

Eine sichtliche Verbesserung wird nur an dem Knoten erreicht an dem auch der Speicher angeschlossen ist. Auch an den anderen Knoten ist eine leichte Verbesserung der Spannungsstabilität zu erkennen im Vergleich zur Variante „ohne U-Regelung“.

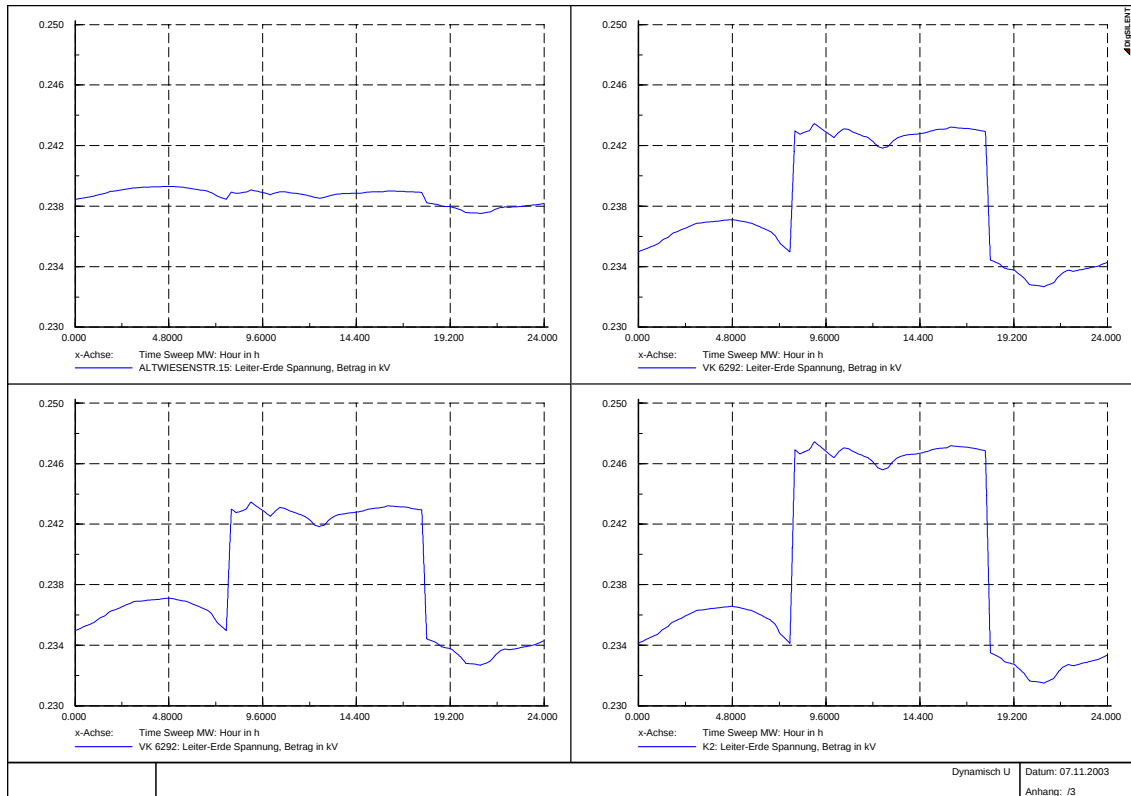


Abbildung 71: Spannungsverläufe mit Speicher

10.6.3. „Speicher“ Spannungen, Ströme und Leistungen am Speicherelement

Der Speicher gibt während der Nacht Wirkleistung ab und nimmt während des Tages solche auf.

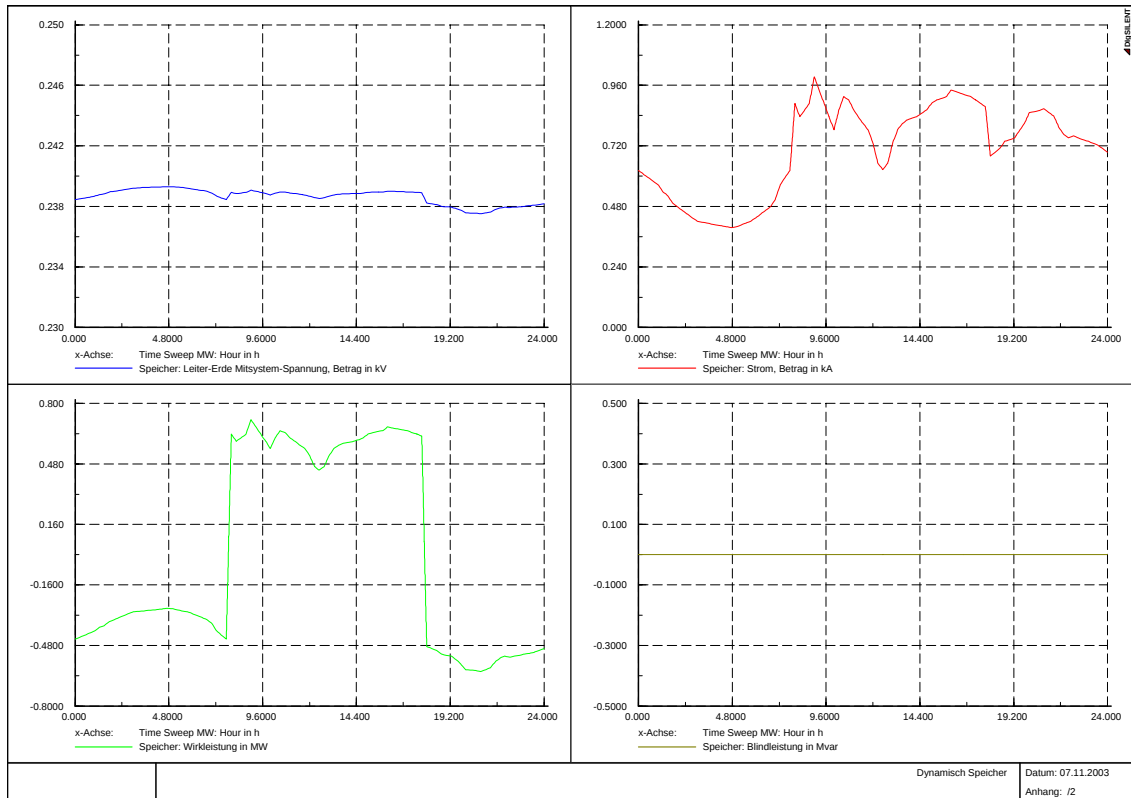


Abbildung 72: Tagesverläufe des Speicherelementes

10.6.4. „Speicher“ Leitungsströme

Die Leitungsströme sehen praktisch gleich aus, wie wenn kein Speicher eingesetzt wird. Damit wird bestätigt, dass der Speicher am Einspeiseort am meisten bringt und auf das gesamte Netz wenig Einfluss nimmt. Der Vorteil liegt eigentlich nur bei der Entlastung des Trafos.

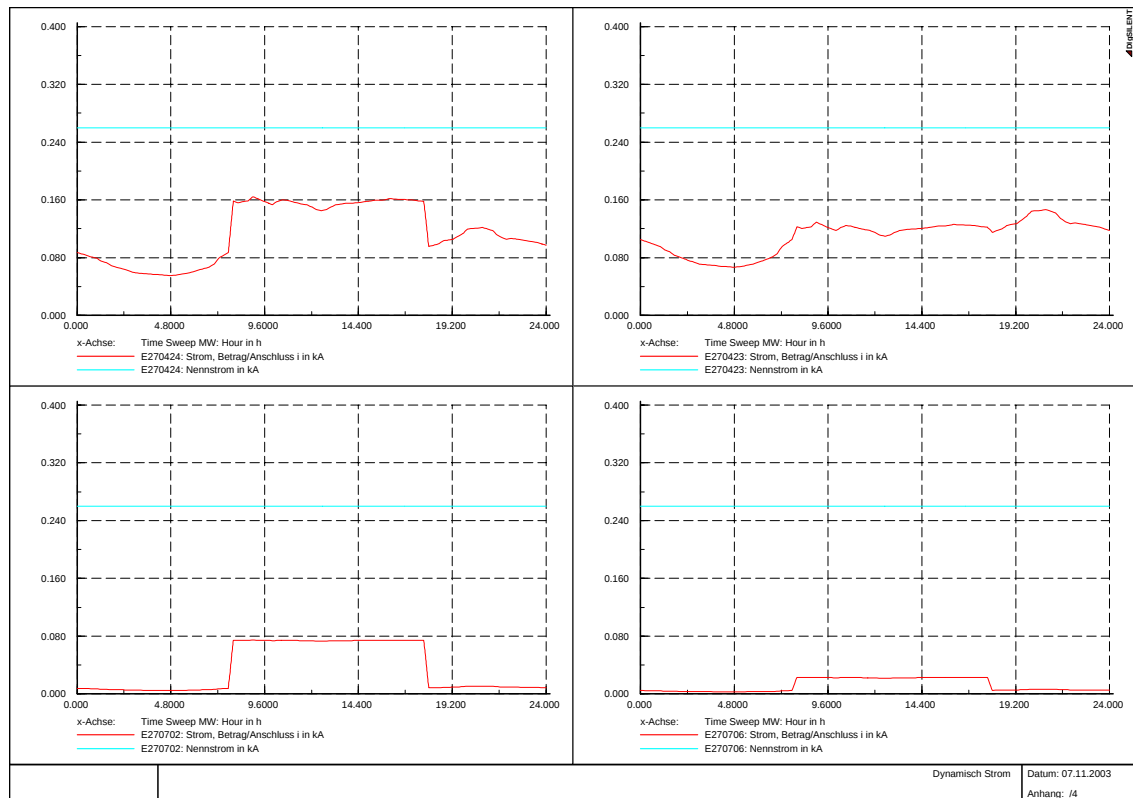


Abbildung 73: Stromverläufe mit Speicher

10.7. ZUSAMMENFASSUNG TAGESVERLÄUFE

Ohne DEA bewegt sich die Spannung an der NS-Sammelschiene Transformatorenstation Altwiesenstrasse über den Tag betrachtet in einem schmalen Band von ca. 3 V.

Je weiter weg von der Einspeisestelle die Spannung betrachtet wird, desto grösser ist die Spannungsschwankung.

Werden DEA ohne Spannungsregelung eingesetzt, speisen diese während des Tages von 8.00 Uhr - 18.00 Uhr mit maximaler Wirkleistung ein. Durch die gleichzeitigen Ein- und Ausschaltzeiten der DEA erhöht sich die Spannung an der NS-Sammelschiene der Trafostation um ca. 2 V und es findet eine Rückspeisung statt. Es werden keine der betrachteten Leitungen überlastet. Je näher die Spannungen bei der Einspeisestelle betrachtet werden, desto höher wird die Spannungsänderung beim Ein- oder Ausschalten der DEA. Dazu ist zu bemerken, dass in der Praxis nicht alle DEA genau im gleichen Moment einschalten, wie das in den Simulationen der Fall ist.

Wird ein grosser Teil der DEA als Photovoltaikanlagen betrieben, ergibt sich im Vergleich zu der vorangegangenen Simulation ohne Photovoltaik ein weniger markanter Spannungsanstieg beim Ein- oder Ausschalten der DEA. Die Variation der Einspeisecharakteristiken führt noch einmal zu einer Verbesserung der „sprunghaften“ Spannungsänderungen während der Ein- bzw. Ausschalzeit der DEA. Es ergeben sich bedingt durch die 4 verschiedenen Charakteristiken nur noch einige kleine Sprünge, die sich besser über den Tag verteilen. Mit der Anzahl verschiedener DEA-Typen mit unterschiedlichen Primärenergien kann sogar eine Glättung der Tagesverläufe erreicht werden. Damit wird klar, dass bei einem erhöhten Einsatz von DEA unbedingt darauf zu achten ist, dass nicht alle DEA zum gleichen Zeitpunkt ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Durch die Begrenzung der Blindleistung und die gezielte Blindleistungsaufnahme der Umrichter kann die Spannung über den Tag betrachtet stabilisiert werden. Die Spannungserhöhung an den DEA-Anschlusspunkten ist weit weniger hoch, als wenn keine spannungsregulierenden Massnahmen ergriffen werden. Wenn die DEA einschalten, steigt der Strom in einzelnen Leitungen bis knapp unter den Grenzwert, wobei die Blindleistungsaufnahme der Umrichter einen grossen Anteil dazu beitragen.

Eine weitere Möglichkeit, um ausgeglichene Tagesverläufe zu erhalten und den Transformator zu entlasten, ist der Einsatz von Speichern zusammen mit den DEA. Mit den Speichern werden auch die Spannung am Anschlusspunkt stabilisiert. Speicher haben aber nur in sehr grosser Ausführung einen Einfluss auf die Spannungsstabilität. Damit die überschüssige Energie am Tag aufgenommen werden kann, wären Speicher mit einer technisch kaum realisierbaren Kapazität einzusetzen.

11. KURZSCHLUSSWERTE

11.1. KURZSCHLUSSLEISTUNGEN

Dieser Teil ist auf dem Stand des Zwischenberichtes und hat daher noch die alten Bezeichnungen der Varianten. „Alle DEA nur SM“ bedeutet, dass an jede Leitung eine Synchronmaschine angeschlossen wurde. „Alle DEA“ heisst, dass eine Durchmischung der DEA aus Umrichtern und Synchronmaschinen besteht. Asynchronmaschinen weisen bei der Kurzschlussbetrachtung in etwa die gleichen Eigenschaften wie die Synchronmaschinen auf. Mit DEA steigen die Kurzschlussleistungen auf allen Leitungen an. Die Synchronmaschinen sind für den grössten Teil des Anstiegs verantwortlich.

Die Umrichter mussten beim Kurzschlussmodell auf konst. I und auf die Vereinfachung stromrichter-gespeister Antrieb umgestellt werden, um ein Resultat zu kriegen. In der Abbildung 74 ist ersichtlich, dass die Umrichter einen viel kleineren Einfluss auf die Kurzschlussleistung haben als die Maschinen.

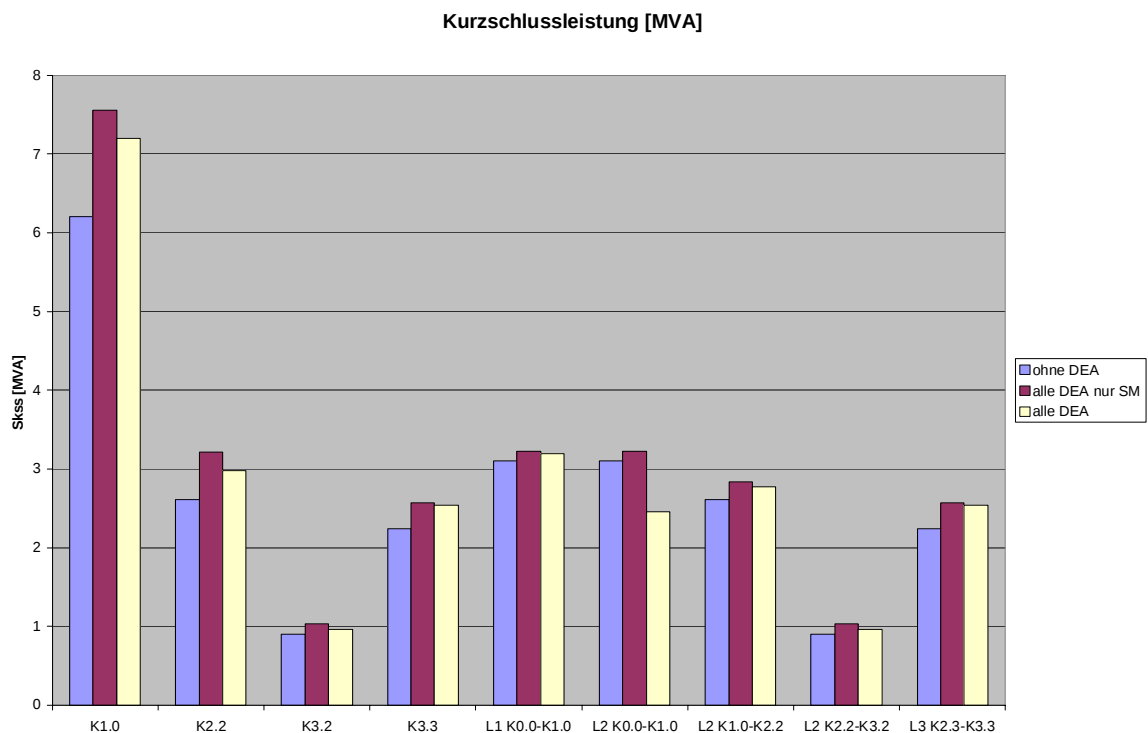


Abbildung 74: Kurzschlussleistungen

11.2. KURZSCHLUSSTRÖME

Mit den DEA steigen die Kurzschlussströme auf allen Leitungen an. Wenn man alle DEA als Synchronmaschinen betreibt, ist der Kurzschlussstrom höher, als wenn man je zur Hälfte mit Umrichtern und Synchronmaschinen arbeitet. Die Umrichter verhalten sich im Kurzschlussfall unkritisch. Einzig in der ersten Phase des Kurzschlusses liefern sie etwa den 1.5-2 fachen Nennstrom. Danach werden sie sofort vom Netz getrennt und haben also keinen weiteren Einfluss. Bei Inselbetrieb könnten eher Probleme durch zu kleine Kurzschlussströme auftreten, weil durch den zu kleinen Strom die Schutzelemente nicht mehr auslösen würden.

Zu beachten gilt der Kurzschlussstrom des Trafos, der mit DEA kleiner wird als ohne, weil die DEA auch ihren Anteil zum gesamten Kurzschlussstrom beitragen (in der Grafik nicht ersichtlich).

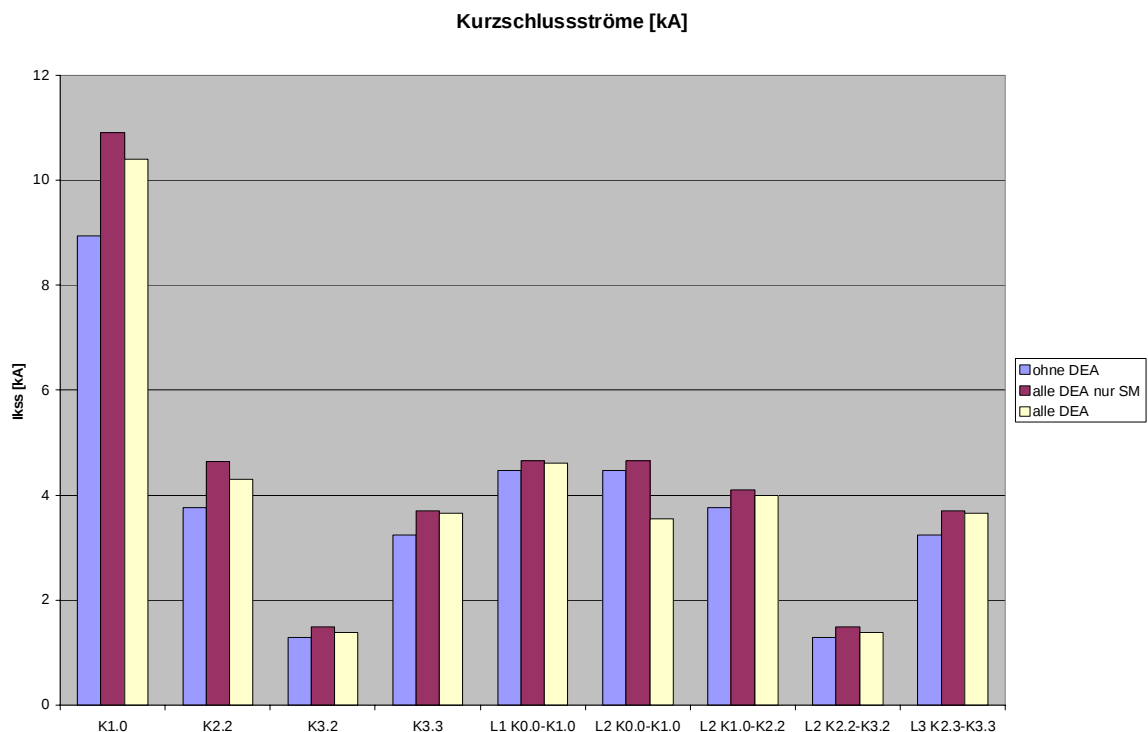


Abbildung 75: Kurzschlussströme

11.3. KURZSCHLUSSPITZENSTRÖME

Die Kurzschlusspitzenströme verhalten sich proportional zu den transienten Kurzschlussströmen.

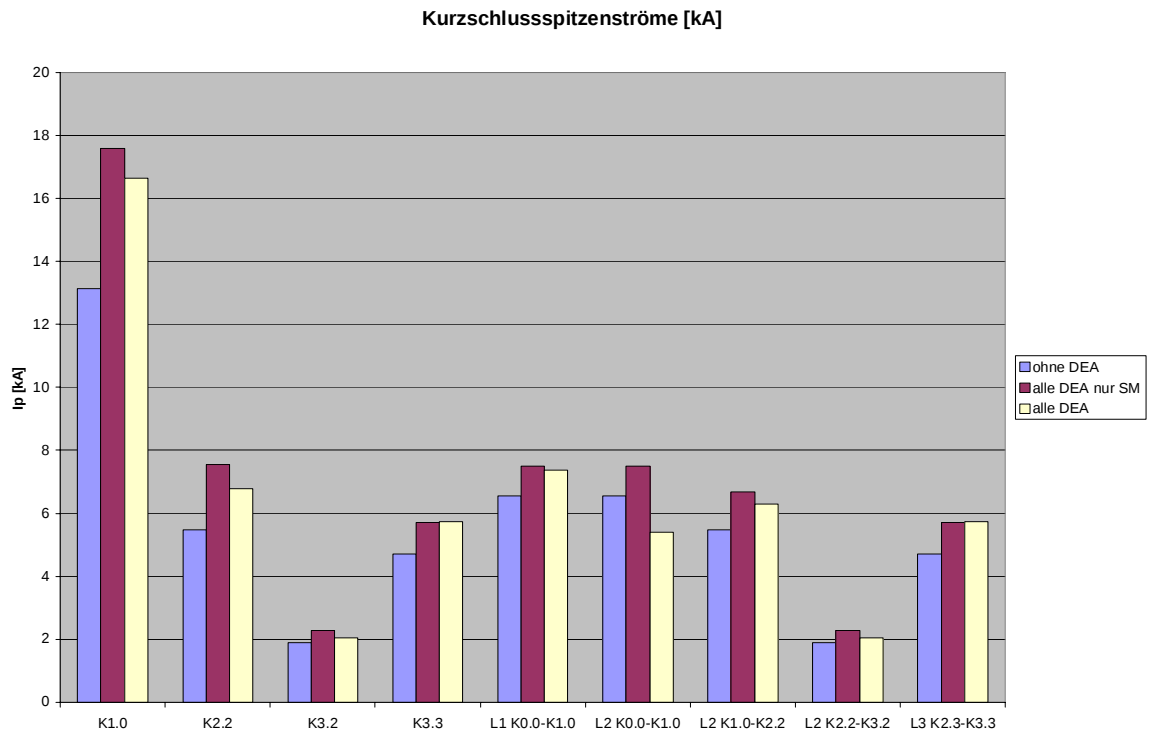


Abbildung 76: Kurzschlusspitzenströme

11.4. KURZSCHLUSSLEISTUNG AN DEN TRAFOS UND DER ALTWIESENSTRASSE

An der NS-seitigen Sammelschiene der Trafostation Altwiesenstrasse steigt die Kurzschlussleistung mit DEA um knapp 20 % an. Je nach Auslegung der Trafostation, kann man mit diesem Anstieg schon auf kritische Werte kommen.

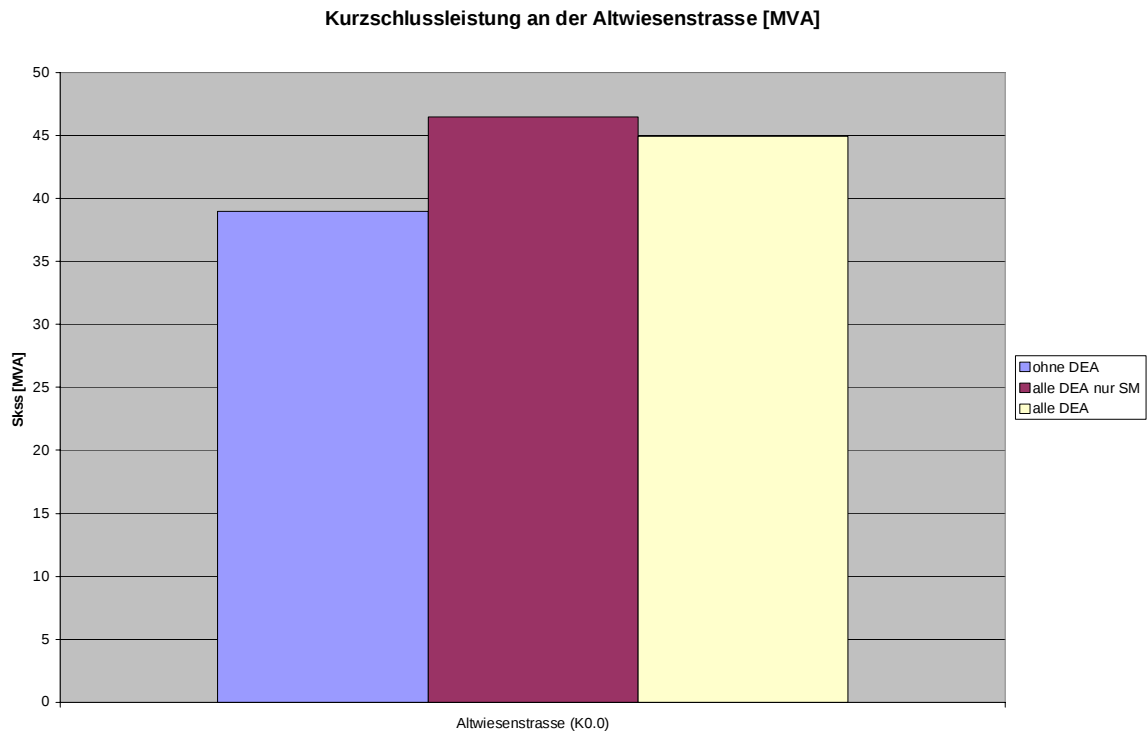


Abbildung 77: Kurzschlussleistungen Altwiesenstrasse

11.5. SCHMELZKURVE 400A SICHERUNG

Die y-Achse stellt die Zeit dar, die x-Achse den Strom. Bei einem Strom von 1000 A vergeht maximal eine Zeit von 600 s bei der maximalen Schmelzkurve und 50 s bei der minimalen Schmelzkurve bis die Sicherung auslöst.

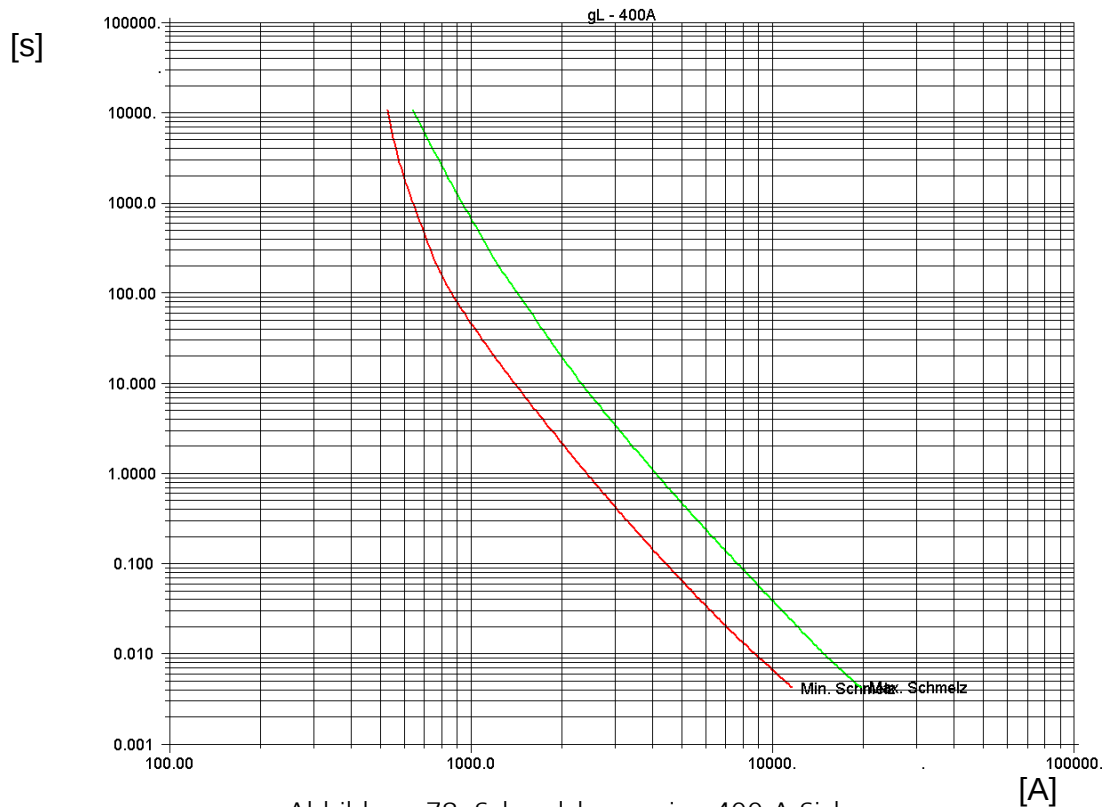


Abbildung 78: Schmelzkurve eine 400 A Sicherung

12. KURZSCHLUSSSIMULATIONEN

12.1. KURZSCHLÜSSE OHNE DEA AN DER LEITUNG L2 K2.2-3.2

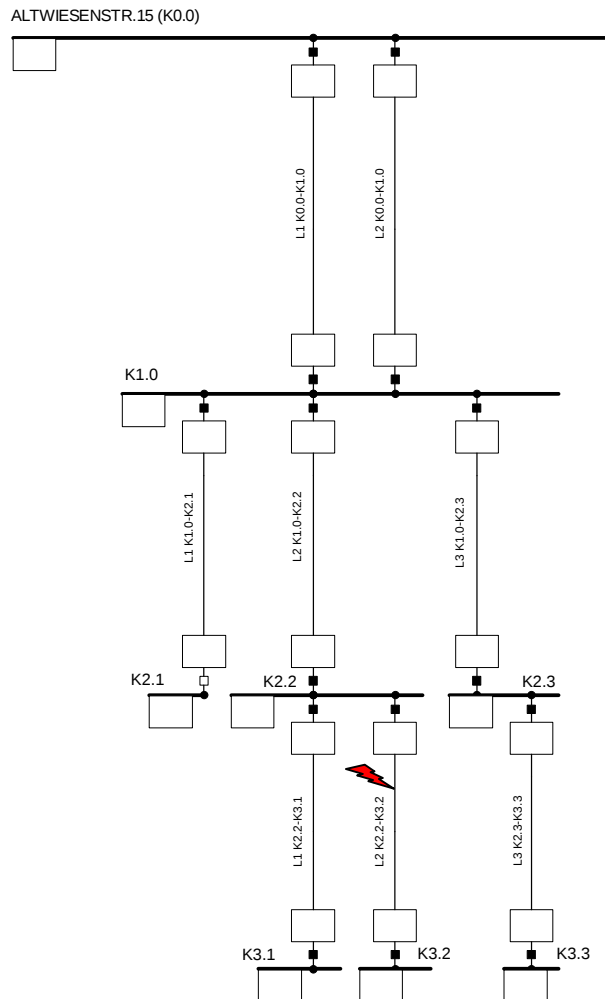


Abbildung 79: Kurzschlussort

Der Kurzschluss tritt an der Leitung L2 K2.2-K3.2 auf. Es wird mit minimaler und maximaler Schmelzkurve der Sicherung simuliert. Nebst dem 3-phasigen Kurzschluss wird auch der einphasige Erdschluss genauer analysiert.

Bei folgenden Simulationen sieht man den Spannungs- und Stromverlauf am Kurzschlussort. Die Spannung sinkt beim Auftreten eines Kurzschlusses auf etwa die Hälfte der Nennspannung, was mit den Leitungs- und Sicherungswiderständen zu begründen ist. Nach dem Auslösen der Sicherung ist der Strom und die Spannung 0.

Bei der Abbildung 80 handelt es sich um einen 3-phasigen Kurzschluss mit minimaler Schmelzkurve an der Leitung L2 K2.2-3.2.

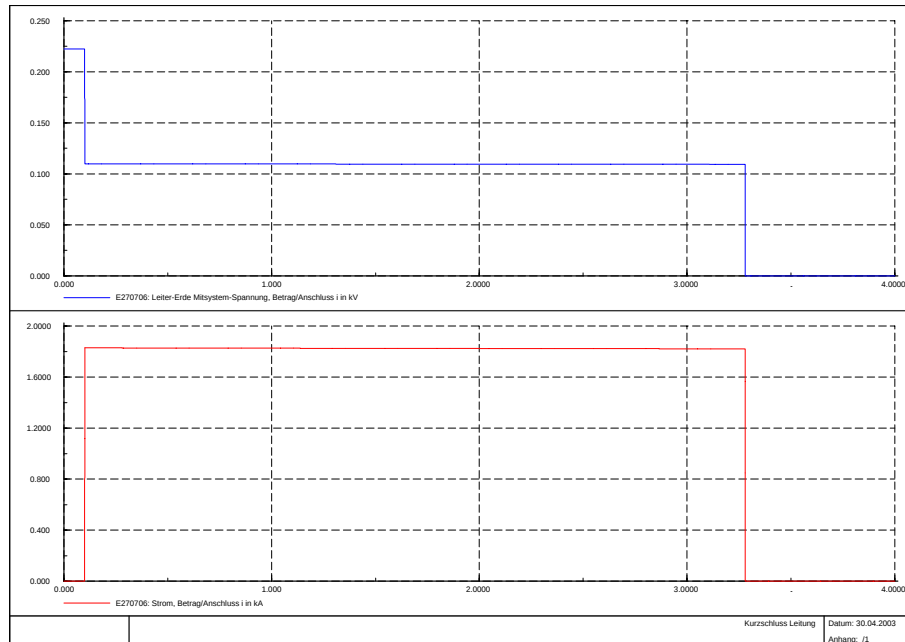


Abbildung 80: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit minimaler Schmelzkurve

Abbildung 81 zeigt einen 3-phasigen Kurzschluss mit maximaler Schmelzkurve. Der Unterschied zur Abbildung 80 ist die etwa 10 Mal höhere Auslösezeit der Sicherung.

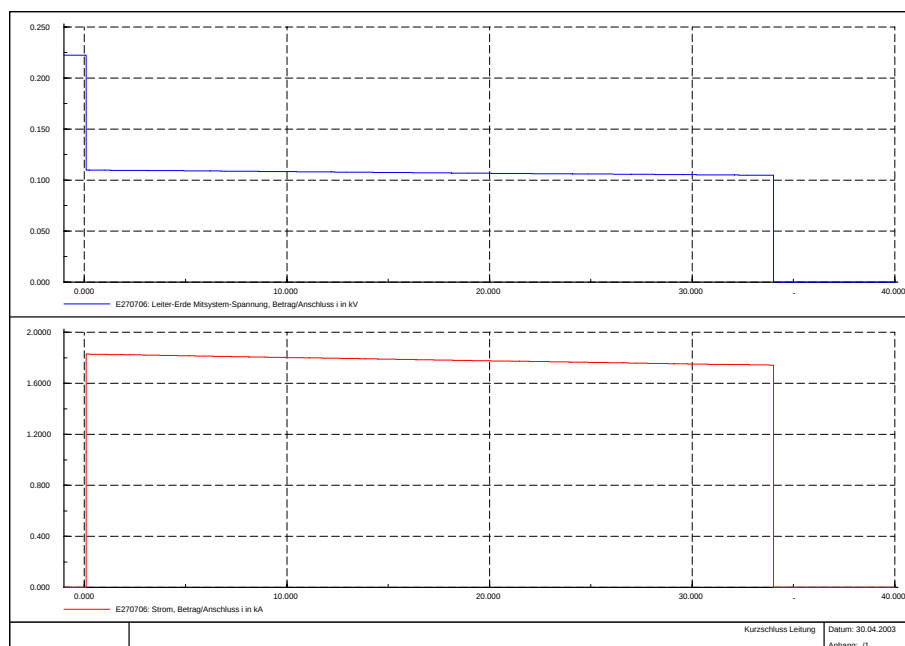


Abbildung 81: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit maximaler Schmelzkurve

Bei der Abbildung 82 handelt es sich um einen 1-phasigen Erdschluss an der Leitung L2 K2.2-K3.2. Die Auslösezeit ist etwa mit dem 3-phasigen Kurzschluss mit maximaler Schmelzkurve zu vergleichen.

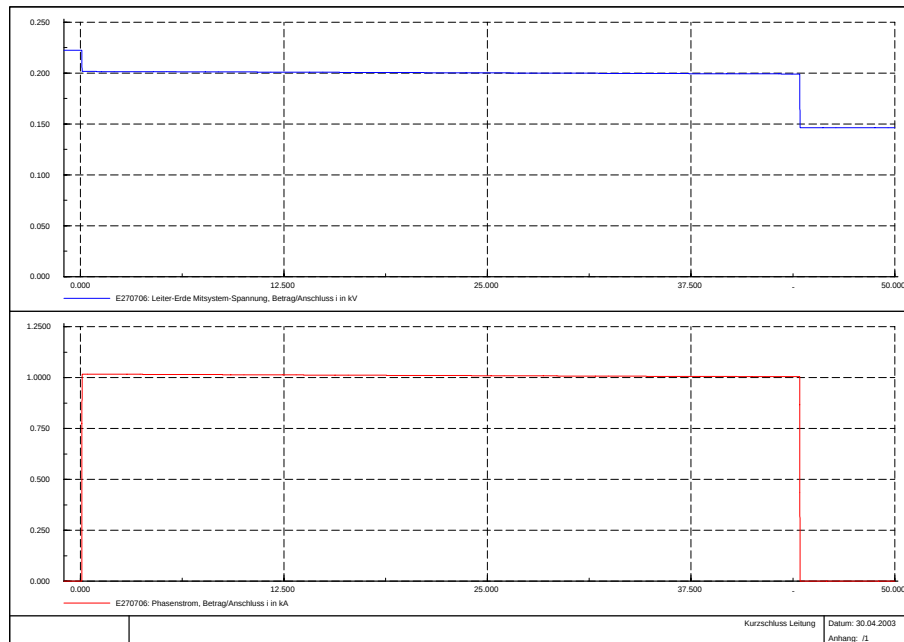


Abbildung 82: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit maximaler Schmelzkurve

Tabelle 7 zeigt die Kurzschlussströme im Vergleich zur Auslösezeit.

Kurzschlussart	Strom [A]	Auslösezeit [s]
3-phasiger Kurzschluss min. Schmelzkurve an der Leitung L2 K2.2-3.2	1850	3.2
3-phasiger Kurzschluss max. Schmelzkurve an der Leitung L2 K2.2-3.2	1850	34
1-phasiger Erdschluss min. Schmelzkurve an der Leitung L2 K2.2-3.2	1050	45

Tabelle 7

12.2. KURZSCHLÜSSE MIT DEA AN DER LEITUNG L2 K2.2-3.2

Falls Synchronmaschinen eingesetzt werden, sieht man einen kurzen Strompeak der anschliessend auf einen konstanten Wert abfällt. Die Ströme sind höher, als wenn keine DEA eingesetzt werden.

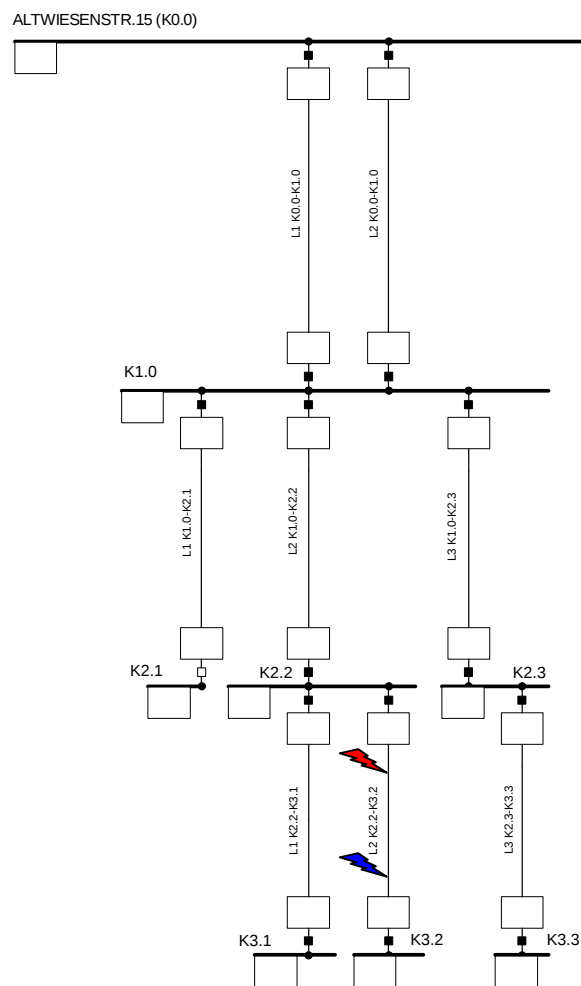


Abbildung 83: Kurzschlussorte

Der Kurzschluss (roter Pfeil) tritt bei der folgenden Simulation oberhalb der Einspeisung der DEA auf der Leitung L2 K2.2-3.2 auf. In diesem Fall ging man von der minimalen Schmelzkurve der Sicherung aus.

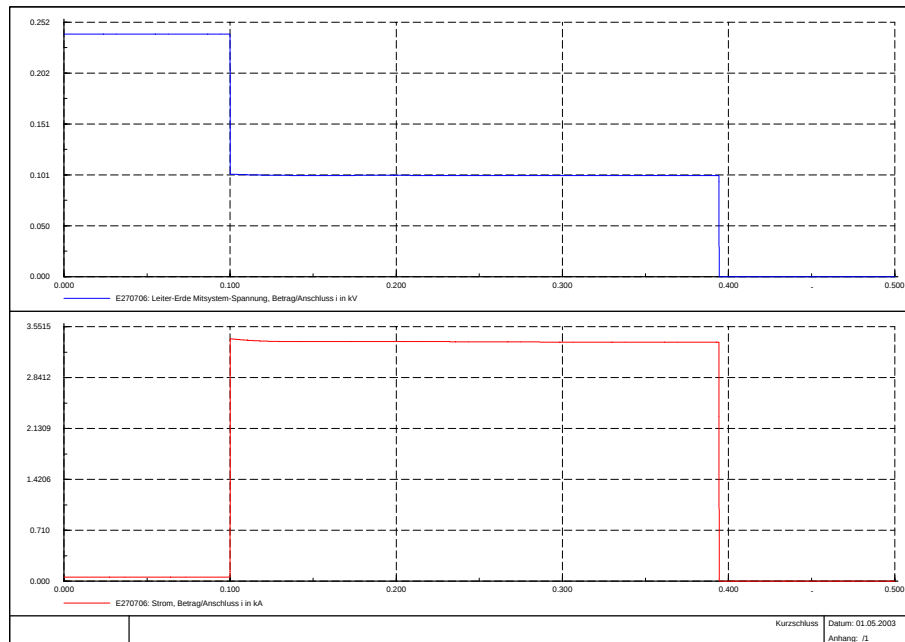


Abbildung 84: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit minimaler Schmelzkurve

Mit der maximalen Schmelzkurve ergibt sich aus der Simulation folgendes Resultat. Die Auslösezeit der Sicherung steigt auf ein Mehrfaches an.

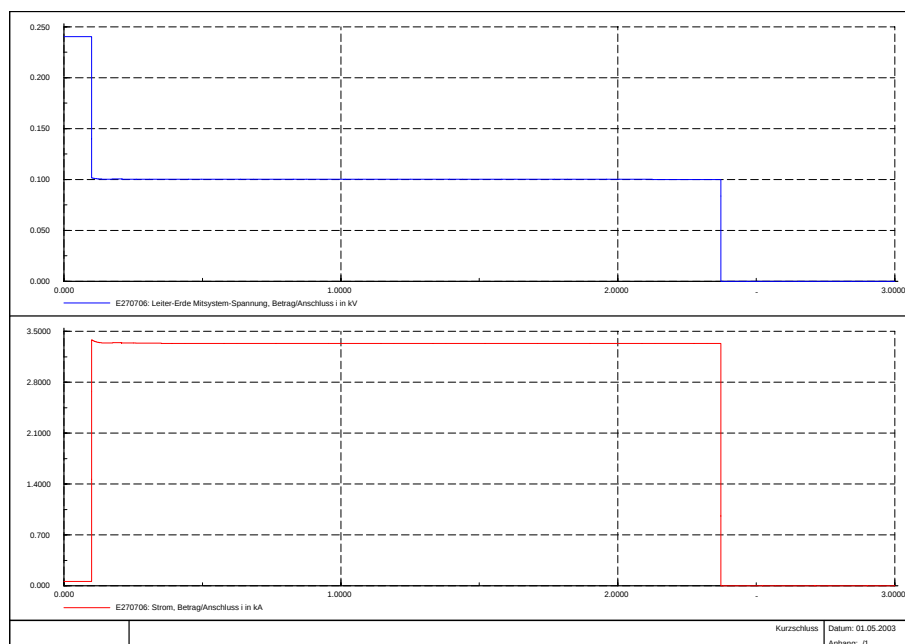


Abbildung 85: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit maximaler Schmelzkurve

Der Kurzschluss (blauer Pfeil in der Netzgrafik) tritt unterhalb der DEA-Einspeisung auf. Dies führt zu einer markant längeren Auslösezeit der Sicherung, weil der Strom von der DEA geliefert werden muss.

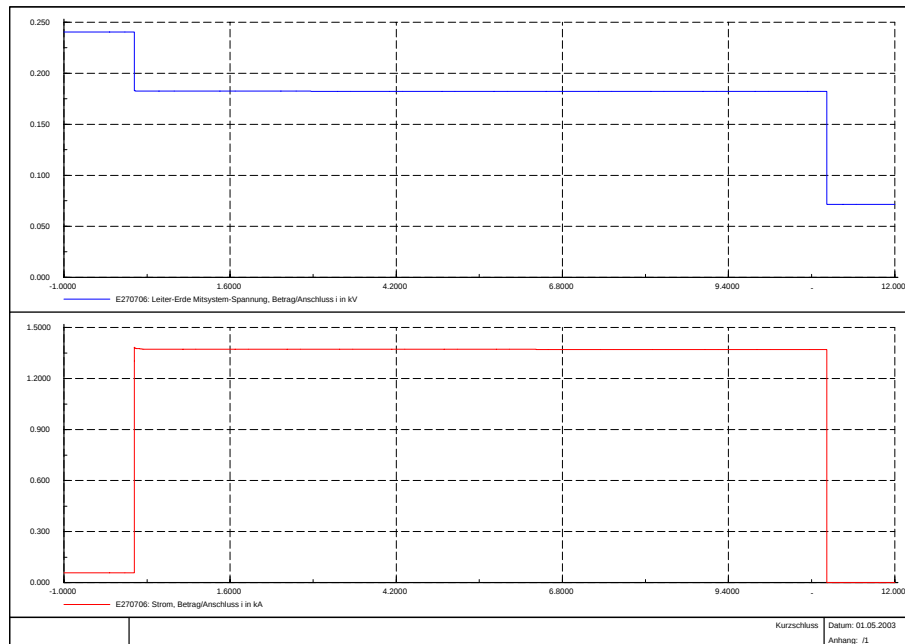


Abbildung 86: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit minimaler Schmelzkurve

Beim einphasigen Erdschluss oben an der Leitung (roter Pfeil) dauert es am längsten bis die Sicherung auslöst.

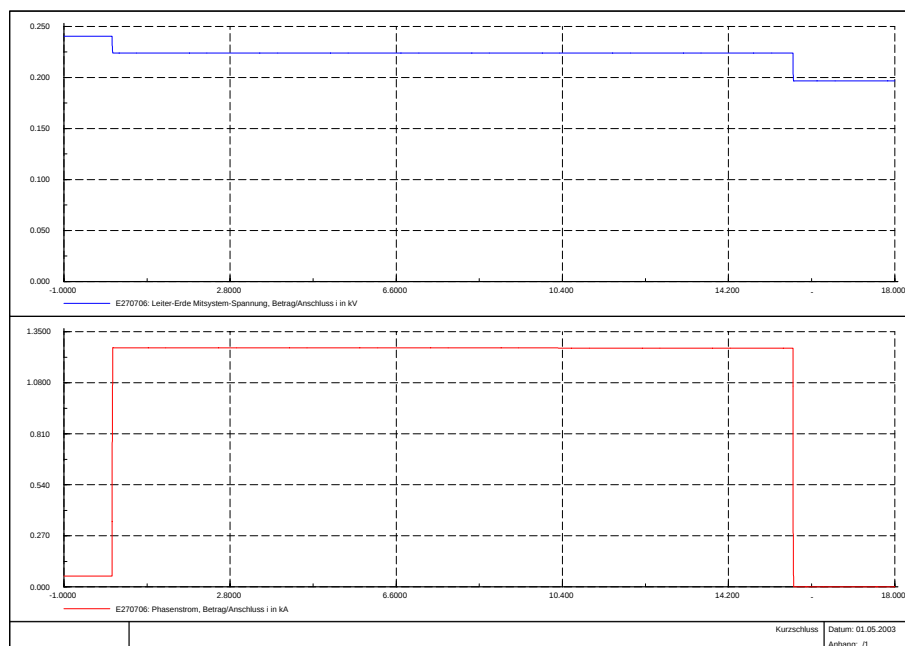


Abbildung 87: Spannungs- und Stromverlauf über der Schmelzsicherung mit minimaler Schmelzkurve

Folgende Tabelle zeigt die Kurzschlussströme im Vergleich zur Auslösezeit.

Kurzschlussart	Strom [A]	Auslösezeit [s]
3-phasiger Kurzschluss an der Leitung L2 K2.2-3.2 oberhalb der Einspeisung der DEA, min. Schmelzkurve	3400	0.29
3-phasiger Kurzschluss an der Leitung L2 K2.2-3.2 oberhalb der Einspeisung der DEA, max. Schmelzkurve	3400	2.3
3-phasiger Kurzschluss an der Leitung L2 K2.2-3.2 unterhalb der Einspeisung der DEA	1400	11
1-phasiger Erdschluss an der Leitung L2 K2.2-3.2 oberhalb der Einspeisung der DEA, min Schmelzkurve	1300	17

Tabelle 8: Kurzschlussart

12.3. ZUSAMMENFASSUNG KURZSCHLUSSANALYSE

Die Kurzschlussleistungen nehmen mit DEA leicht zu. Die Umrichter tragen allerdings nur einen geringen Teil dazu bei. Verantwortlich für den Anstieg sind vor allem die Maschinen, wobei SM und ASM bei der Kurzschlussbetrachtung keine relevanten Unterschiede ausmachen. Die Umrichter speisen in der ersten Phase des Kurzschlusses mit dem 1.5-2 fachen Nennstrom ein, bevor sie vom Netz getrennt werden. Schwierigkeiten können bei knapp dimensionierten Transformatoren oder NS-Verteilungen in den Transformatorstationen entstehen: Durch den Anschluss von grossen ASM und SM werden die Kurzschlussleistungen stark erhöht.

Allgemein lässt sich sagen, dass mit DEA die Kurzschlussleistungen auf allen Leitungen ansteigen. Die Synchron- und Asynchronmaschinen sind dabei für den grössten Teil des Anstiegs verantwortlich.

Bei Inselbetrieb können eher Probleme durch zu kleine Kurzschlussströme auftreten, weil durch den zu kleinen Strom die Schutzelemente nicht mehr auslösen würden.

13. OBERSCHWINGUNGSANALYSE

13.1. HINTERGRUND

Oberschwingungen entstehen durch Betriebsmittel mit nichtlinearer Kennlinie wie etwa Transformatoren, Leuchtstofflampen, Gleichrichter, Thyristoren usw. Umrichter gehören auch in diese Kategorie und erzeugen neben den harmonischen auch zwischenharmonische Oberwellen.

Die in den Energieversorgungssystemen auftretenden Spannungs- und Stromoverschwingungen führen zu Spannungsverzerrungen und zusätzlichen Verlusten. Zur Analyse der Oberschwingungen werden die Spannungen und Ströme in Fourierreihen zerlegt.

Bei periodischen Signalen erscheinen im Spektrum nur ganzzahlige Oberschwingungen. In Energieversorgungssystemen erscheinen Oberschwingungen nur als ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, solange diese durch Sättigungseffekte oder durch netzgeführte Umrichter verursacht werden. Allerdings treten bei modulierten Umrichtern (z. B. PWM-Umrichter) auch nicht ganzzahlige Oberschwingungsanteile (zwischenharmonische Oberschwingungen) auf.

Symmetrische Oberwellen haben keine geradzahligen Ordnungen. Deshalb ist in Energieversorgungssystemen der Anteil der geradzahligen Oberschwingungen normalerweise sehr gering. Diese findet man am häufigsten im Versorgungsstrom von Transformatoren, die Gleichstromkomponenten auf ihrer Lastseite haben.

Der geradzahlige Oberschwingungsanteil ist normalerweise sehr schwach, und alle Vielfachen der dritten Ordnung (3,6,9 usw.) treten nur im Nullsystem auf, was normalerweise durch Transformatoren in Dreieckschaltung unterdrückt wird. Deshalb ist der charakteristische Oberschwingungsgehalt in Energieversorgungssystemen durch Oberschwingungen der fünften, siebten, elften usw. Ordnung gegeben.

Die Effektivwerte der Zwischenharmonischen sind im allgemeinen kleiner als 5 %, bezogen auf den Grundschwingungsstrom und nehmen mit steigender Frequenz ab.

Die Grenzwerte für den gesamten Klirrfaktor (THD) betragen im Normalfall 8 % bis zur Ordnungszahl 40. Für die Frequenzen von 9 bis 95kHz sind die Werte noch in Beratung.

Auszug aus der Norm EN50160:

„Diese Norm legt für die Phänomene, für die das möglich ist, die üblicherweise zu erwartenden Wertebereiche fest, in denen sich die Merkmale der Versorgungsspannung ändern. Für die übrigen Merkmale liefert die Norm bestmögliche Anhaltswerte, mit denen in Netzen zu rechnen ist...

Obwohl diese Norm offensichtlich Bezüge zu den Verträglichkeitspegeln hat, ist es wichtig, ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass diese Norm sich auf die elektrische Energie im Sinne von Merkmalen der Versorgungsspannung bezieht. Sie ist keine Norm für Verträglichkeitspegel.“

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Nichtvielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung h	u_h in %	Ordnung h	u_h in %	Ordnung h	u_h in %
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.5	6	0.5
13	3.0	21	0.5	8	0.5
17	2.0			10	0.5
19	1.5			12	0.5
23	1.5			14	0.5
25	1.5			20	0.5
				22	0.5
				24	0.5

Tabelle 9: Werte einzelner Oberschwingungsspannungen an der Übergabestelle bis zur 25. Ordnung in Prozent der vereinbarten Versorgungsspannung U_c

Anmerkung: Für die Oberschwingungen oberhalb der 25. Ordnung werden keine Werte angegeben, da sie gewöhnlich sehr niedrig sind, allerdings weitgehend unvorhersehbar sind wegen Resonanzerscheinungen.

Quelle: EN 50160:1999 Seite 14, Tabelle 2

Aus der Norm EN 50160 darf nicht gefolgert werden, dass die angegebenen Werte und Häufigkeiten nicht bei einzelnen Kunden oder in bestimmten Netzteilen überschritten werden können.

Die nachfolgenden Simulationen zu den Oberschwingungen wurden alle bei Planungslast durchgeführt. Die Daten der Oberwellen stammen von einem typischen 3-Phasen PWM-Umrichter mit einer etwas höheren Anschlussleistung, der über einen Trafo an das Netz angekoppelt ist.

13.2. OBERSCHWINGUNGEN DER LASTEN

Die Oberschwingungsströme stammen aus einer Messung am Trafo der Altwiesenstrasse. Es wurde die Vereinfachung getroffen, dass alle Lasten mit den denselben Oberschwingungsströmen einspeisen.

13.2.1. Symmetrische Last

Der höchste Klirrfaktor tritt mit 2.8 % bei der 5. Harmonischen auf. Die 7., 11. und die 13. sind in etwa auf dem gleichen Niveau von knapp 0.5 %, bei den höheren Frequenzen nimmt der Klirrfaktor stark ab.

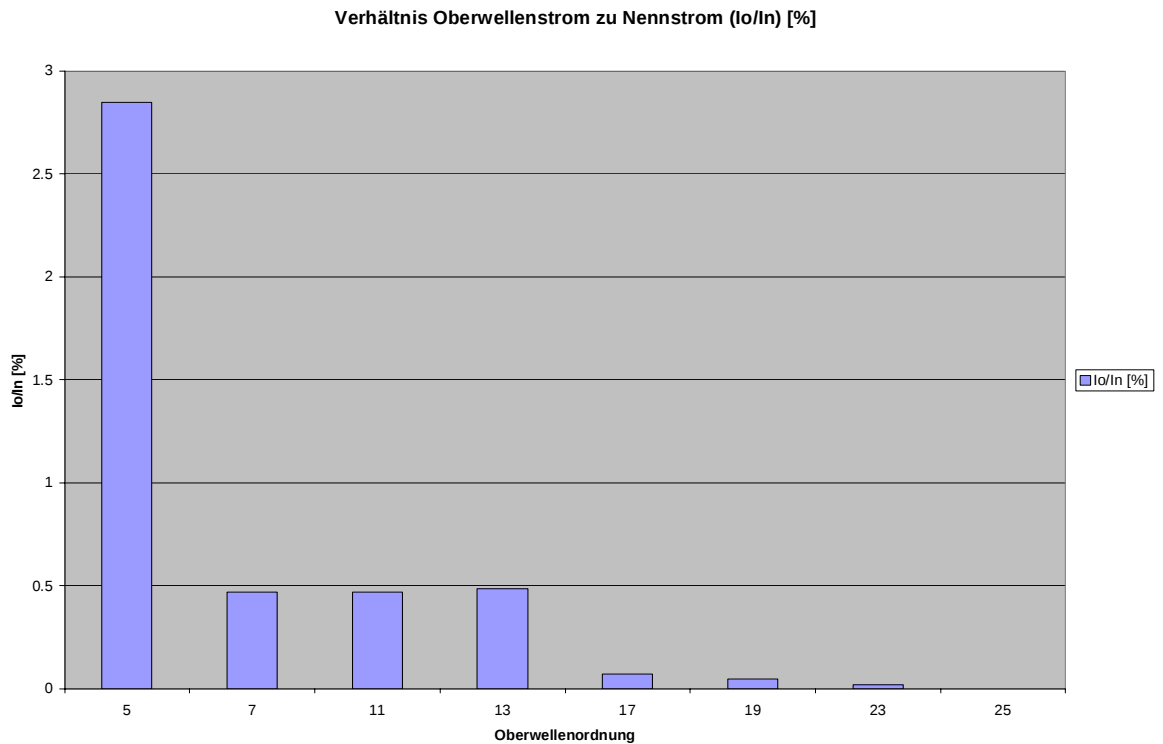


Abbildung 88: Oberswingungsströme bei symmetrischer Last

13.2.2. Unsymmetrische Last

Bei der unsymmetrischen Simulation ist vor allem die 3. Oberwelle markant. Sie erreicht je nach Phase Werte von 5.2-5.8 %. Mit steigender Frequenz sinken die Stromklirrfaktoren praktisch kontinuierlich ab.

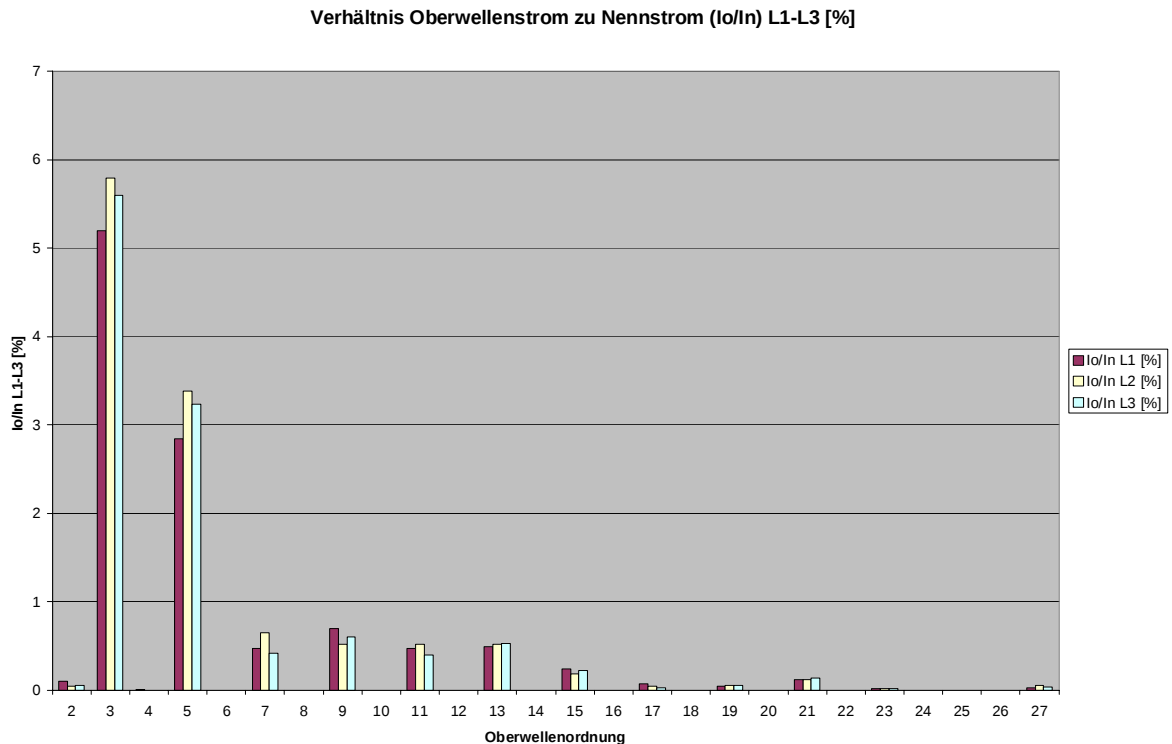


Abbildung 89: Oberschwingungsströme bei unsymmetrischer Last

13.3. BESCHREIBUNG UMRICHTER

Die Oberwellenströme der Umrichter können entweder symmetrisch oder unsymmetrisch ins Digsilent aufgenommen werden. Bei der symmetrischen Simulation treten nur die ungeraden Oberwellen auf, die nicht durch 3 teilbar sind. Die symmetrische Simulation entspricht im Bezug auf die Oberschwingungsanalyse vor allem im Zusammenhang mit Umrichtern einer starken Vereinfachung. Die Umrichter erzeugen neben den harmonischen auch sogenannte zwischenharmonische Oberwellenströme, die bei der Simulation auch berücksichtigt werden müssen.

13.3.1. Symmetrische Werte der Umrichteroberwellenströme

Das Spektrum der in Abbildung 90 dargestellten symmetrischen Umrichteroberwellenströme weisen bei der 11. Oberwelle ein Maximum auf und sinkt anschliessend mit steigender Frequenz. Der Umrichter wird mit einer Schaltfrequenz von ca. 2.55 kHz betrieben. Ab der 50. Harmonischen (2.5kHz) gibt es bedingt durch die Taktfrequenz der Umrichter wieder ein leichter Anstieg (in der Grafik durch den leichten Anstieg bei der 49. Oberwelle im Vergleich zur 47. zu sehen).

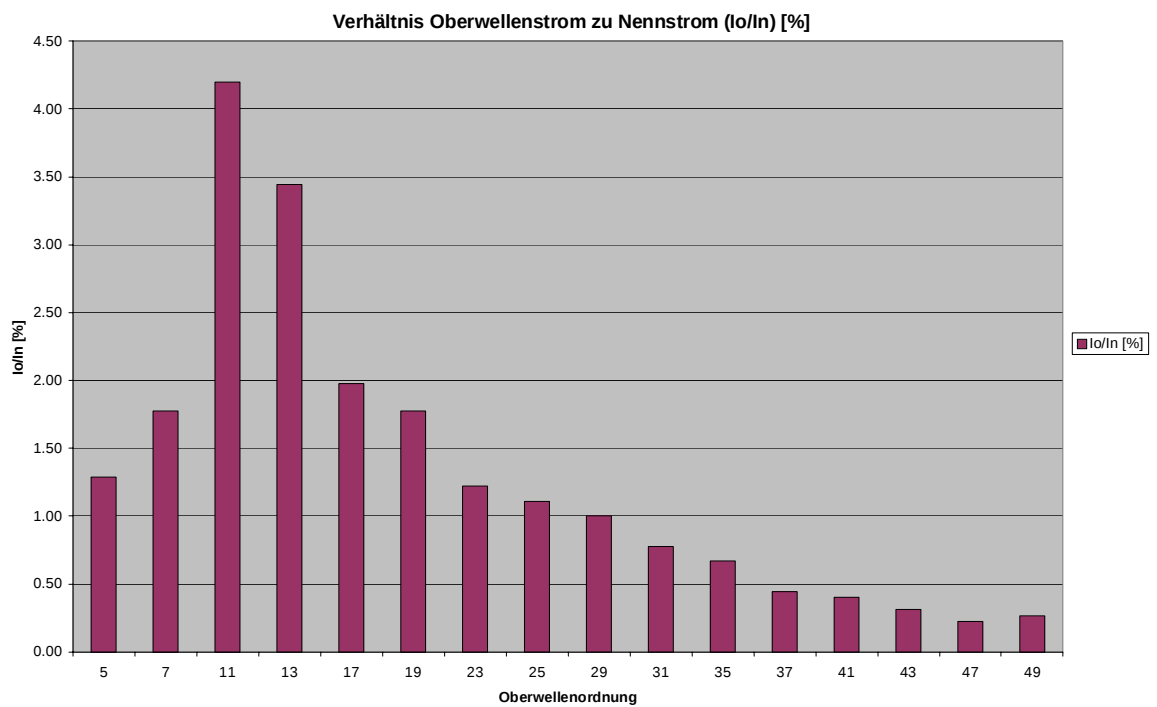


Abbildung 90: Symmetrische Oberschwingungsströme von Umrichtern

13.3.2. Unsymmetrische Werte der Umrichterüberwellenströme

Das unsymmetrische Spektrum der Überwellenströme wurde bewusst auf die ganzzahligen Ordnungen gelegt. Dies muss allerdings in der Praxis nicht so sein, im Gegenteil treten bei nicht netzgeführten Umrichtern auf jeden Fall zwischenharmonische Überwellen auf, die dann nicht mehr auf ganzzahlige Ordnungen zu liegen kommen. Mit der Wahl die Überwellenströme auf ganzzahligen Ordnungen zu legen, wird nur eine leichte Verschiebung des gesamten Spektrums erreicht, was auf die Resultate der Oberschwingungsanalyse praktisch keinen Einfluss hat. In Abbildung 91 ist zu sehen, dass das Maximum wie bei der symmetrischen Betrachtung bei der 11. Ordnung zu liegen kommt. Allerdings fällt das Spektrum anschliessend nicht mehr kontinuierlich ab. Zum Beispiel bei der 20. Oberwelle ist ein Anstieg im Vergleich zur 19. zu verzeichnen. Für die unsymmetrischen Simulationen wurde davon ausgegangen, dass sich alle Phasen der Umrichter gleich verhalten. Auch dies entspricht einer leichten Vereinfachung, was die Aussagen aber nicht beeinträchtigt.

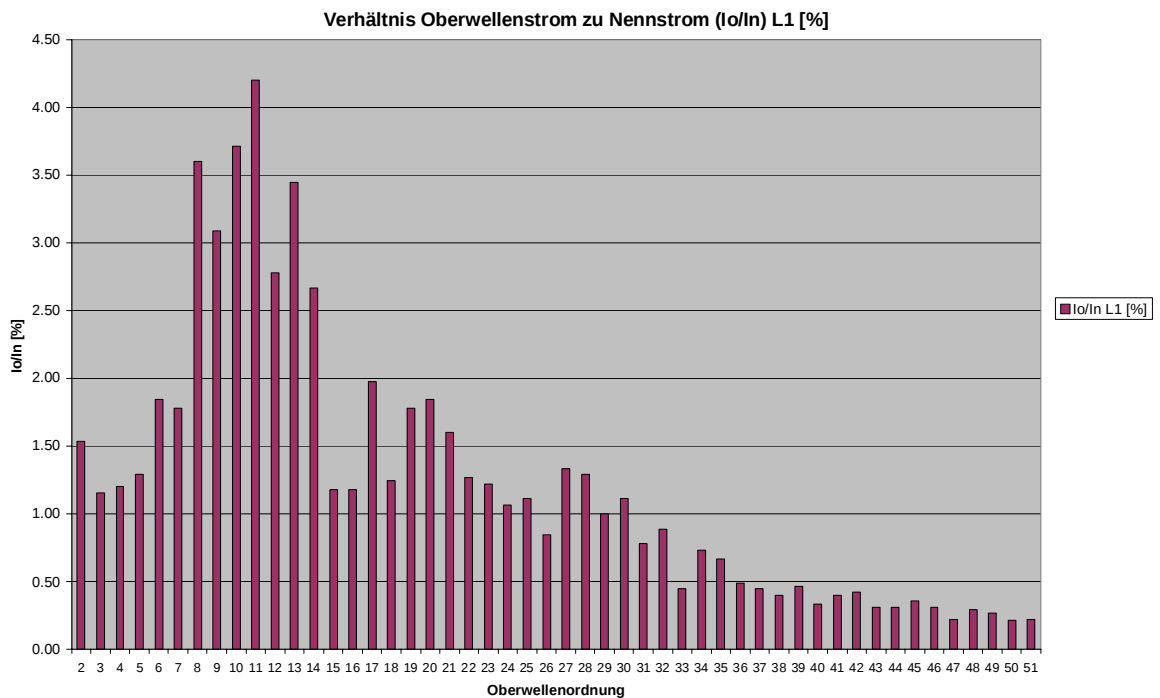


Abbildung 91: Unsymmetrische Oberschwingungsströme von Umrichtern

13.4. OBERSCHWINGUNGSPROFILE

13.4.1. THD an K0.0-K3.3 symmetrische Simulation

Die Anschlussbedingungen eines Umrichters geben vor, dass der gesamte Klirrfaktor des Stromes drei Prozent nicht überschreiten darf. Zusammen mit den Oberschwingungen der Lasten entstehen an einzelnen Knoten THD-Werte, die knapp unter 4 % zu liegen kommen. In Abbildung 92 ist der THD-Verlauf an den Knoten zu sehen, wobei der Klirrfaktor in Richtung des Trafos abnimmt. Durch die hohe Einspeiseleistung der DEA steigt der THD-Wert an allen Knoten markant an im Vergleich zur Variante „ohne DEA“. Die Grenzwerte, die bei 8 % liegen, werden an keinem der angeschauten Knoten überschritten.

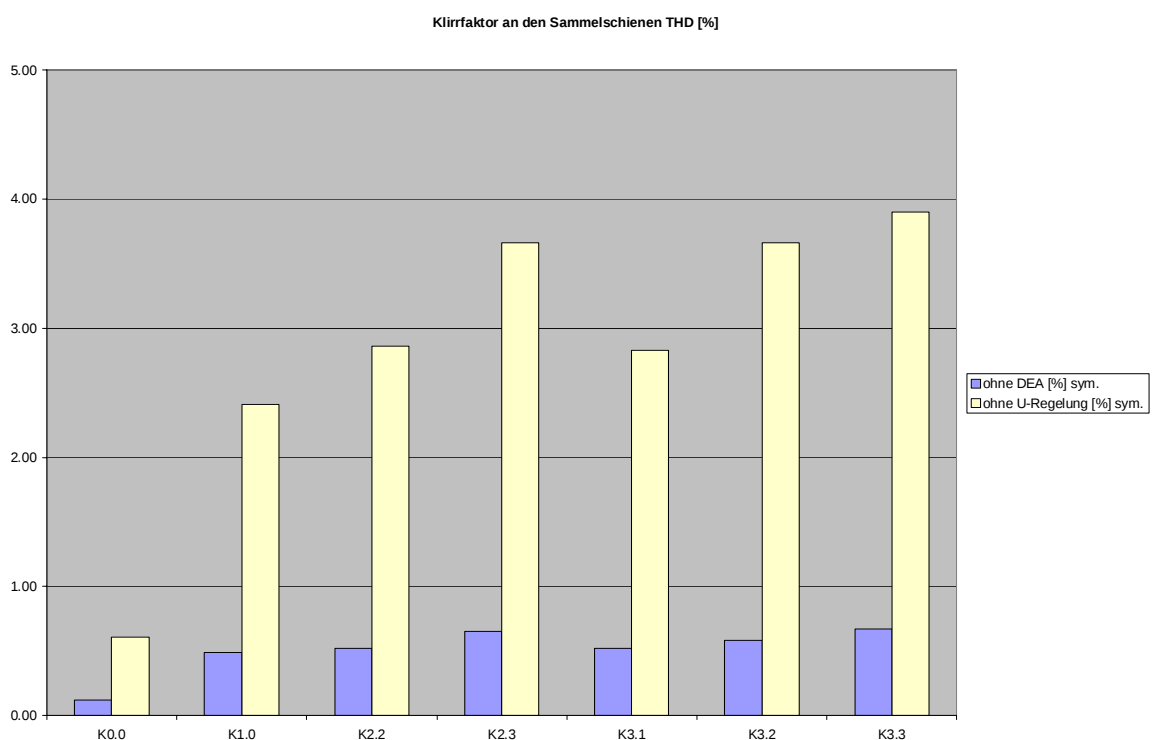


Abbildung 92: Klirrfaktoren der Spannung bei symmetrischen Oberschwingungen

13.4.2. THD an K0.0-K3.3 unsymmetrische Simulation

Mit den unsymmetrischen Simulationen werden bei grossen Anschlussleistungen der DEA die THD-Grenzwerte von 8 % überschritten. Es gilt jedoch zu bedenken, dass am Knoten K3.3 ein 100 kW-Umrichter in das Niederspannungsnetz einspeist und dass diese Leitung weit weg vom Trafo entfernt ist. Wird zum Beispiel dieser Umrichter mit 100 kW vom Netz getrennt, werden die Grenzwerte an allen Knoten eingehalten. Mit weniger DEA erreicht man also schon sehr gute Resultate.

Bei der symmetrischen Simulation wird nur mit dem Mitsystem simuliert. Bei der unsymmetrischen Simulation kommen die Komponenten des Gegen- und des Nullsystems dazu. Der markante Unterschied zwischen der symmetrischen und der unsymmetrischen Simulation lässt sich demnach durch die grösseren Nullsystem- als Mitsystemimpedanzen der Leitungen erklären. Das Verhältnis Z_0'/Z' beträgt bei den eingesetzten Leitungen knapp 5. Durch die eingprägten Ströme der Umrichter und der Lasten wird daher im Nullsystem eine markant höhere Spannung verursacht, was zu den höheren THD-Werten führt.

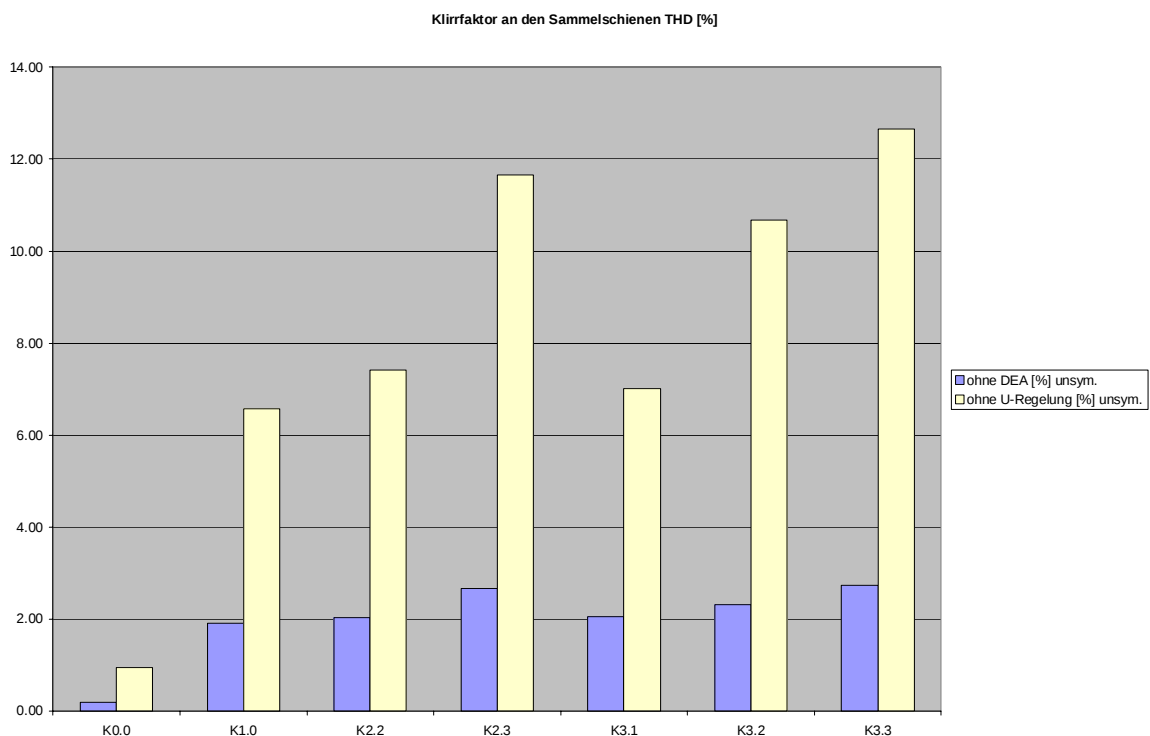


Abbildung 93: Klirrfaktoren der Spannung bei unsymmetrischen Oberschwingungen

13.5. OBERSCHWINGUNGSSPEKTREN

13.5.1. Ohne DEA K0.0-K3.3 symmetrische Simulation

Wie in Abbildung 94 zu sehen ist, werden nur die ungeraden nicht durch drei teilbaren Oberschwingungen dargestellt. Die Oberwellenströme sind direkt am Trafo der Altwiesenstrasse aufgenommen worden. Sie wurden dann entsprechend angepasst und dann den Streckenlasten beaufschlagt. Der Klirrfaktor sieht an allen Knoten gleich aus und nimmt in Richtung des Trafos ab.

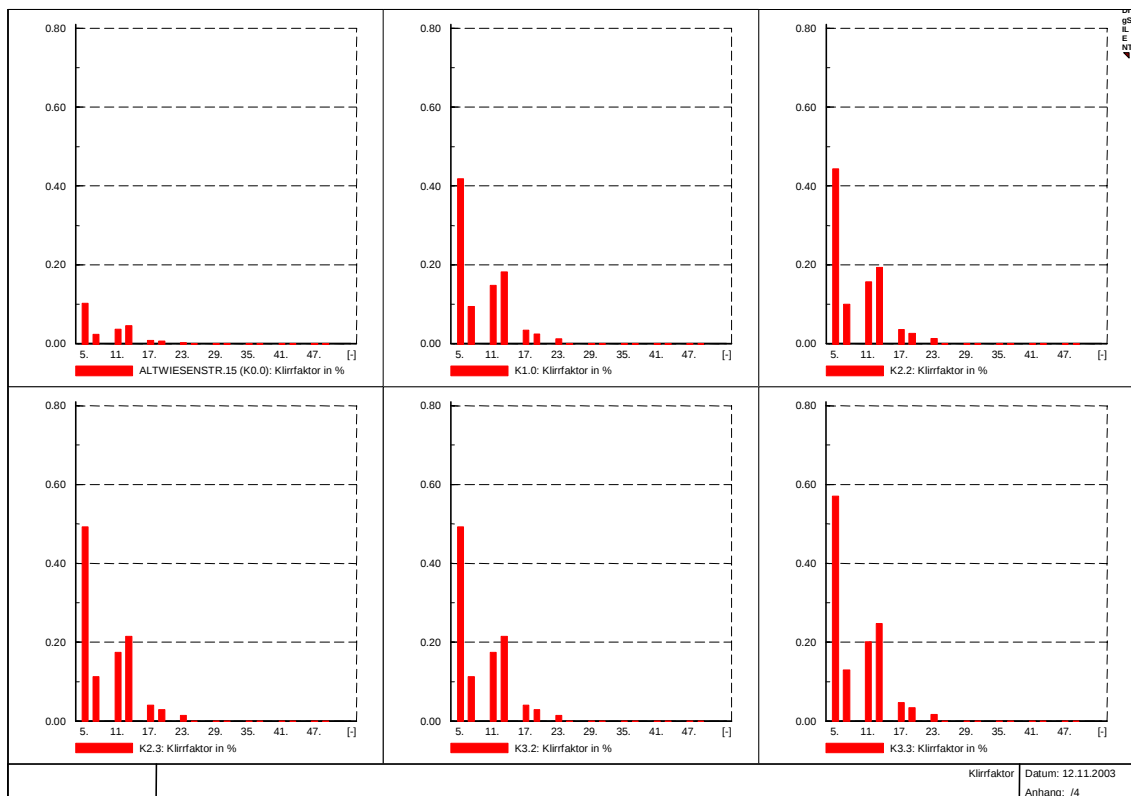


Abbildung 94: Oberschwingungsspektren

13.5.2. Ohne DEA K0.0-K3.3 unsymmetrische Simulation

Mit der unsymmetrischen werden auch die zwischenharmonischen Oberwellenströme mitberücksichtigt. Auch in Abbildung 95 ist der abzunehmende Verlauf des Klirrfaktors in Richtung des Trafos zu sehen.

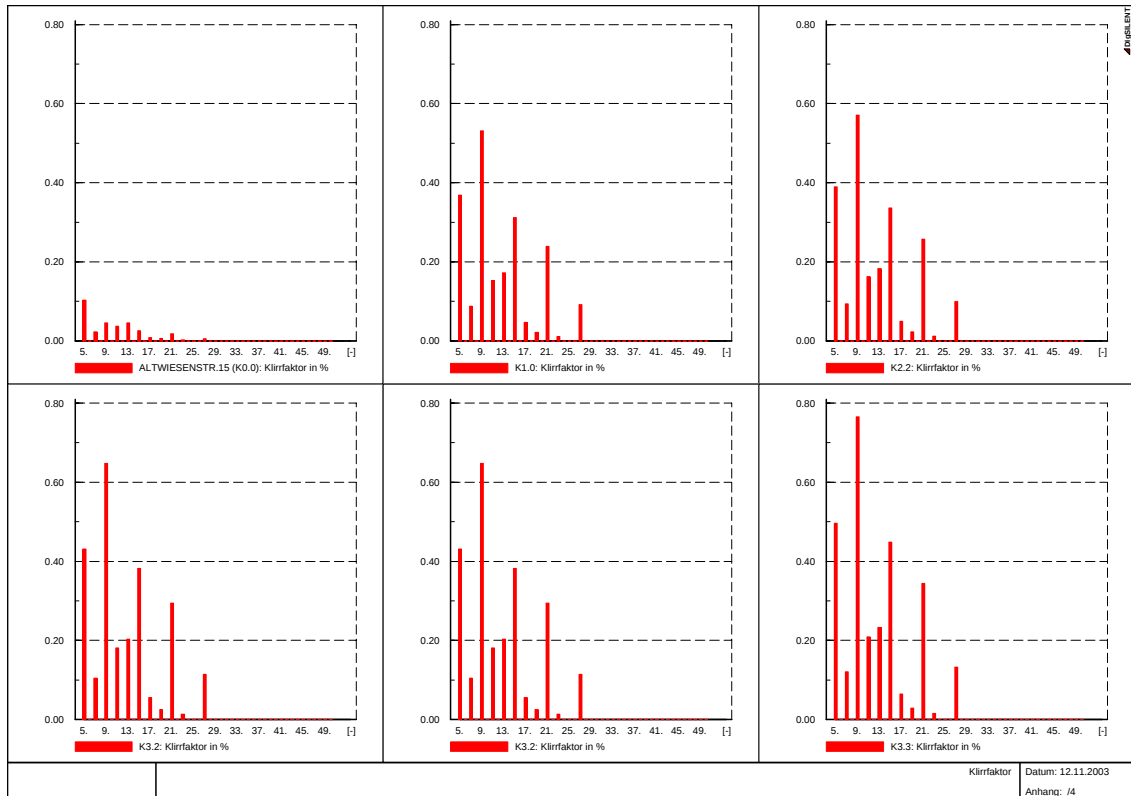


Abbildung 95: Oberschwingungsspektren bei unsymmetrischer Betrachtung

13.5.3. Mit DEA K0.0-K2.3 symmetrische Simulation

Die Daten der Oberwellen stammen von einem typischen 3-Phasen PWM-Umrichter mit einer etwas höheren Anschlussleistung. Die Ströme wurden für die Simulationen entsprechend runterskaliert. Der Umrichter wird mit einer Schaltfrequenz von ca. 2.55 kHz betrieben. Das Spektrum zeigt eine Spitze bei der 10-15 Harmonischen und nimmt danach kontinuierlich ab. Ab der 50. Harmonischen (2.5kHz) gibt es bedingt durch die Taktfrequenz der Umrichter ein leichter Anstieg. Über 2.5 kHz gibt es eigentlich keine Normen die Oberwellen beschränken, in den meisten Fällen sind sie auch unproblematisch). Die Interharmonischen können allerdings zu Problemen führen, weil sie die Rundsteuersignale stören können. Darum gibt es in der Schweiz eine Norm die besagt, dass innerhalb von 100 Hz eines Rundsteuersignals die Spannungszwischenharmonische nur 0.3 % betragen darf. Bei auftretenden Problemen mit grossen Umrichtern können die Ausgangsfilter soweit angepasst werden, dass die Rundsteuersignale nicht mehr gestört werden.

In Abbildung 96 ist der Verlauf des Klirrfaktors an den Knoten K0.0-K2.3 zu betrachten. Das Maximum liegt bei allen betrachteten Knoten bei der 11. Oberwelle.

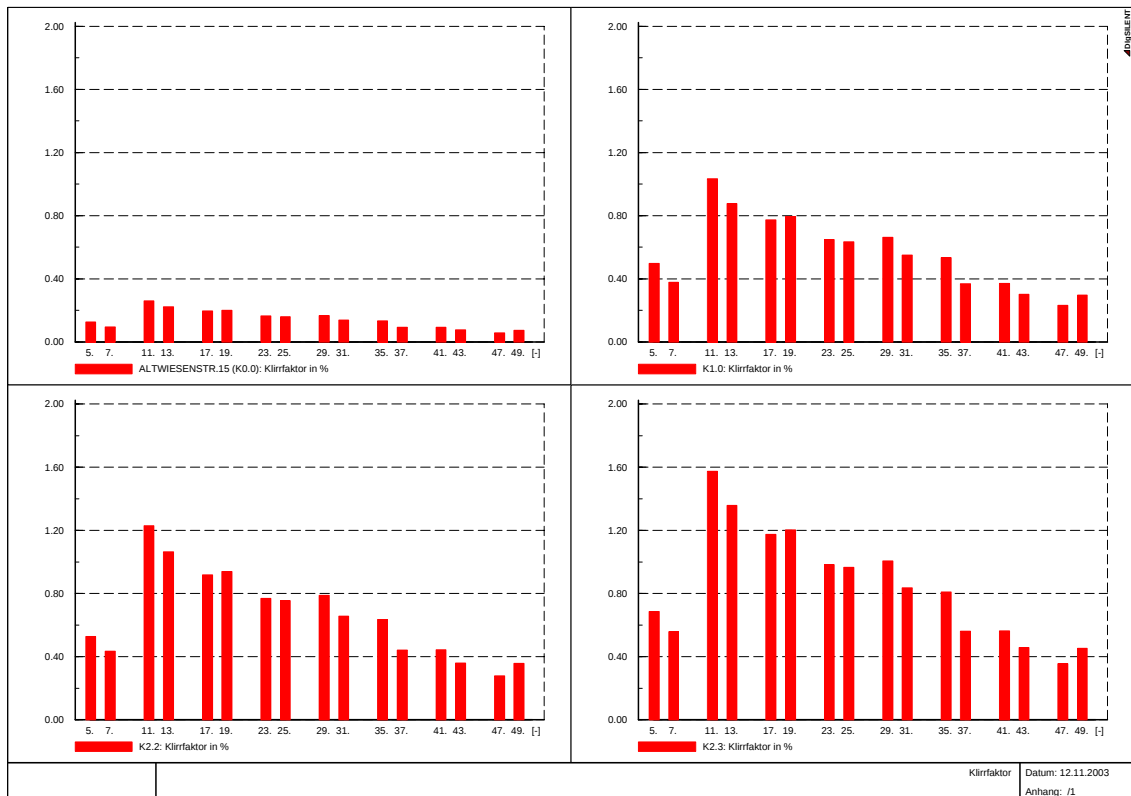


Abbildung 96: Klirrfaktoren

13.5.4. Mit DEA Knoten K3.1-K3.3 symmetrische Simulation

Die Knoten nahe bei den einspeisenden Umrichtern weisen die höchsten Klirrfaktoren auf, während nahe beim Trafo die kleinsten Spektren erreicht werden. Dies rührt von der kleinen Anschlussimpedanz des Trafos.

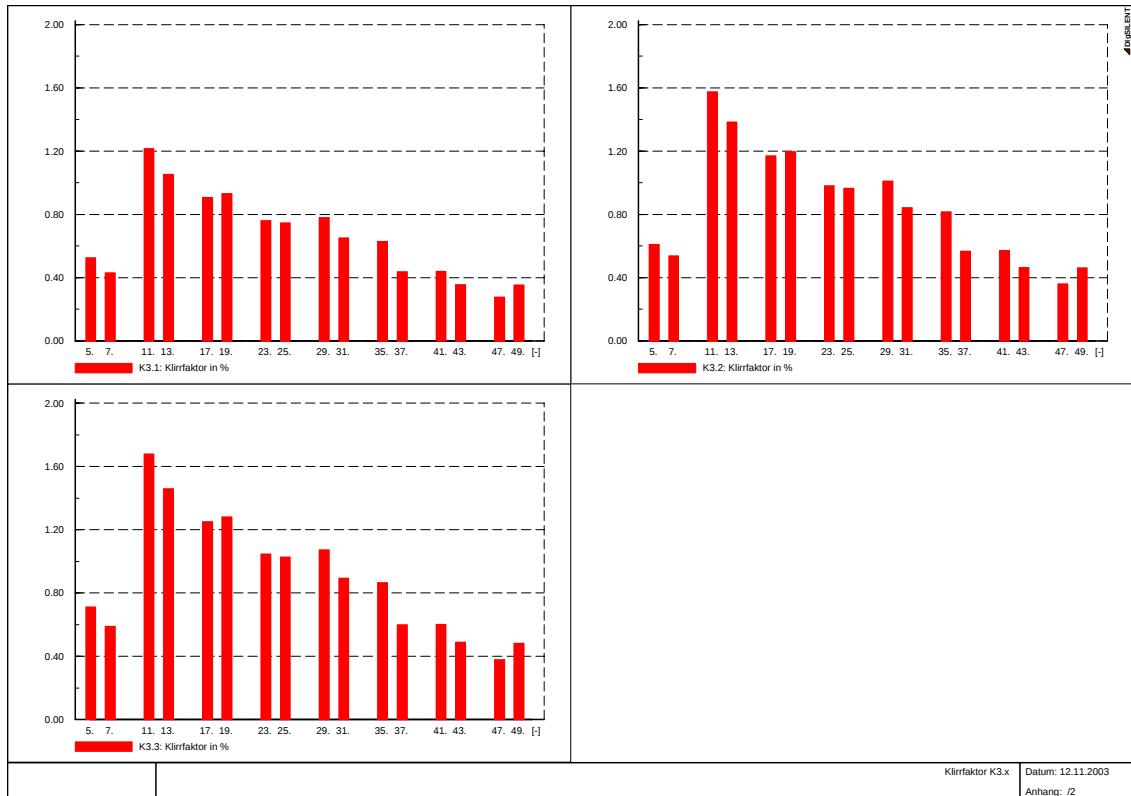


Abbildung 97: Klirrfaktoren

13.5.5. Mit DEA K0.0-K2.3 unsymmetrische Simulation

Die Skalierung der y-Achse ist verschieden mit den symmetrischen Simulationen, weil es bei der unsymmetrischen Simulation zu höheren Klirrfaktoren kommt. Da die unsymmetrischen Daten der Umrichterüberwellenströme nicht zur Verfügung standen, wurde die Vereinfachung getroffen, dass die Umrichter in jeder der 3 Phasen dieselben Ströme einspeisen.

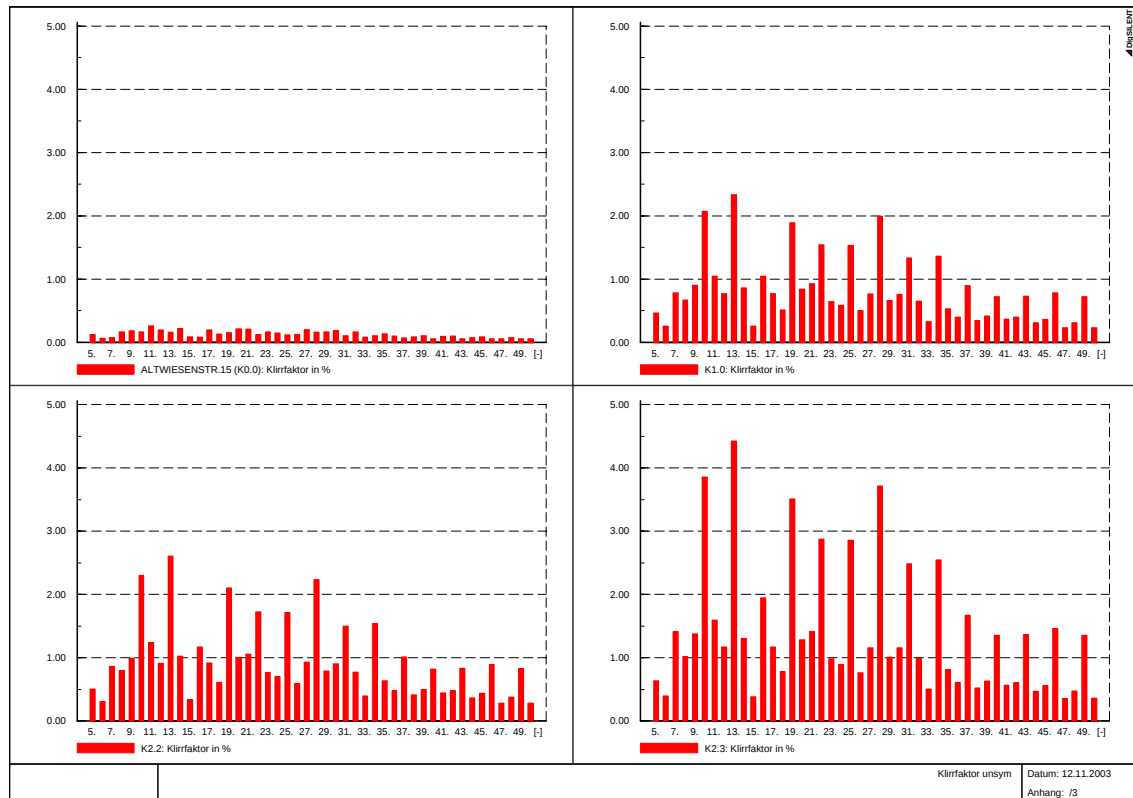


Abbildung 98: Klirrfaktoren bei unsymmetrischer Betrachtung

13.5.6. Mit DEA Knoten K3.1-K3.3 unsymmetrische Simulation

Bei den Einspeisungen weit weg vom Trafo treten die höchsten Klirrfaktoren auf. Die 13. Oberwelle erreicht fast 5 %

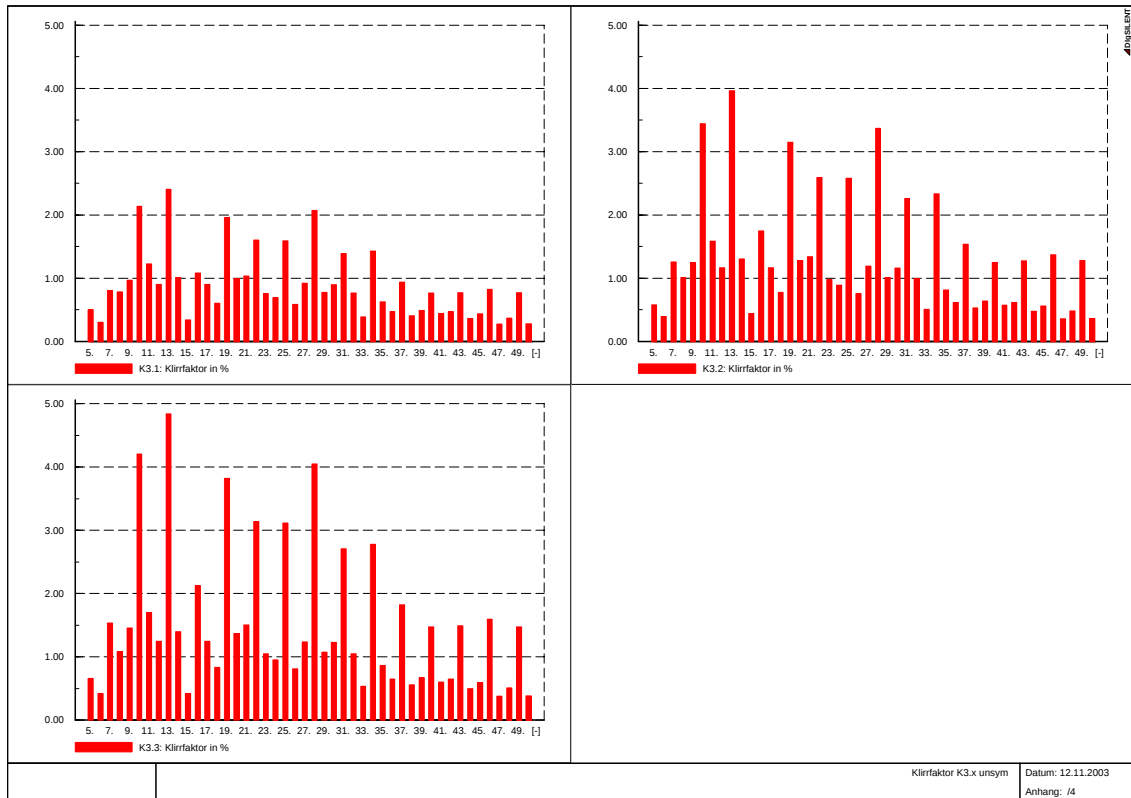


Abbildung 99: Klirrfaktoren bei unsymmetrischer Betrachtung

13.6. IMPEDANZVERLÄUFE OHNE DEA

Der Widerstand variiert an den verschiedenen Knoten von ca. 20-60 mOhm. Die Netzreaktanz und damit auch die Netzimpedanz steigt praktisch linear mit der Frequenz an. Die Netzimpedanz nimmt in Richtung der Netzeinspeisestelle tendenziell ab.

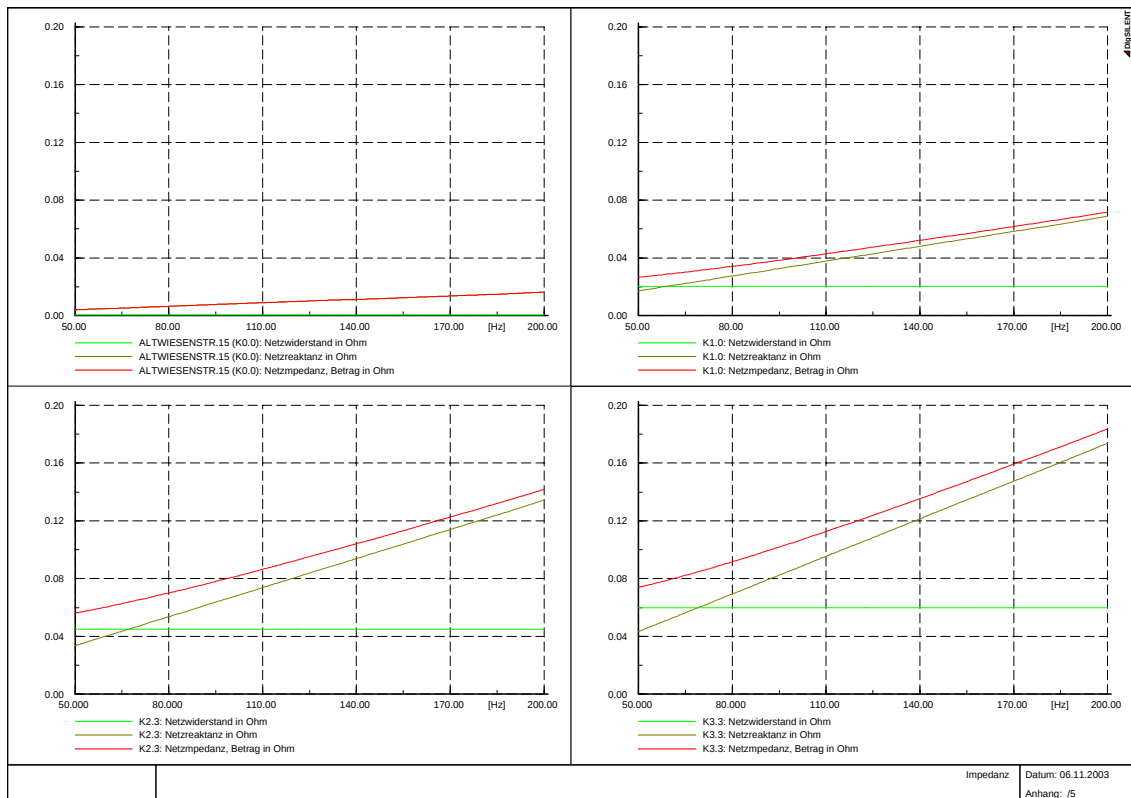


Abbildung 100: Impedanzverläufe ohne DEA

13.7. IMPEDANZVERLÄUFE MIT DEA

Vergleicht man die zwei Grafiken mit und ohne DEA, kann man feststellen, dass sich die Impedanzen an den verschiedenen Knoten kaum unterscheiden. Dazu muss angeführt werden, dass die Filter der Umrichter bei den Simulationen nicht berücksichtigt wurden.

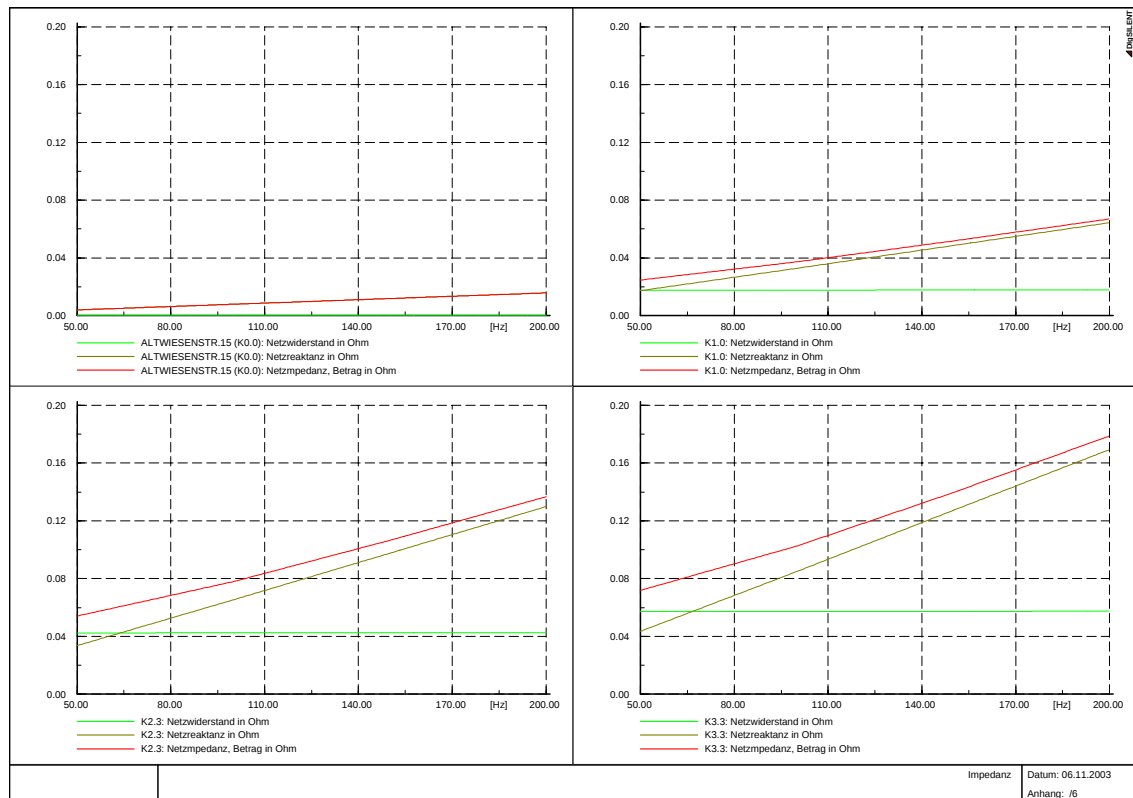


Abbildung 101: Impedanzverläufe mit DEA

13.8. OBERSCHWINGUNGEN DURCH 1-PHASIGE UMRICHTER

Der Anschluss von DEA im Verteilnetz kann grundsätzlich über drei Phasen oder über eine Phase erfolgen.

13.8.1. Dreiphasiger Anschluss

Der dreiphasige Anschluss ist für grössere Leistungen ($> \sim 5\text{kW}$) der Normalfall. In diesem Fall erfolgt eine symmetrische Einspeisung und alle Phasen werden gleich entlastet. Eine vollständige Symmetrie des Anschlusspunktes besteht trotzdem nicht, da im Verteilnetz in der Regel die Lasten stark unsymmetrisch sind. Ein Grossteil der Lasten werden nur über eine Phase angeschlossen. Ein Ausgleich über das ganze Verteilnetz erfolgt über eine möglichst gleichmässige Verteilung der einphasigen Lasten auf die drei Phasen. Was die Oberwellen anbelangt besteht grundsätzlich keine Symmetrie. Insbesondere bei Umrichtersystemen ändert die Pulsweitenmodulation innerhalb einer Netzperiode soweit, dass nicht mehr in allen drei Phasen die gleichen Oberwellenströme generiert werden. Die drei Phasen haben statistisch gesehen zwar das gleiche Spektrum. Die Frequenzen treten jedoch nicht gleichzeitig und nicht mit derselben Phasenlage auf.

13.8.2. Einphasiger Anschluss

Der einphasige Anschluss wird für kleinere Leistungen ($< \sim 5\text{kW}$) eingesetzt. Die Leistung ist limitiert durch Leiterquerschnitte (wenn zum Beispiel bestehende Hausinstallationen verwendet werden) und durch die Tatsache, dass zu grosse Lasten oder Quellen zu einer zu grossen Spannungs-Unsymmetrie führen, was für die anderen Lasten ungünstig ist. Eine einzelne einphasige DEA stellt für das Verteilnetz kein Problem dar. Die von der DEA generierte Unsymmetrie ist in der grösseren Unsymmetrie, welche von den Lasten generiert wird nicht relevant. Bei einer grösseren Anzahl von DEA ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass diese gleichmässig auf die einzelnen Phasen verteilt werden. Dann wirken sich die Unsymmetrien statistisch gesehen nur lokal aus und das Verteilnetz verhält sich immer noch mehr oder weniger symmetrisch. Das gleiche gilt für die Oberwellen. Einphasige DEA erzeugen wohl lokal stark unsymmetrische Oberwellen. Über das ganze Verteilnetz betrachtet gleicht sich das jedoch aus und die Oberwellen sehen dann ähnlich aus wie bei dreiphasigen Anlagen. Lokal macht es jedoch Sinn, einen allfälligen Rundsteuersignal Empfänger nicht auf derselben Phase zu platzieren wie eine DEA mit Umrichter.

13.8.3. Konsequenzen für die Simulation

In den Simulationen werden dreiphasige (symmetrische) DEA eingesetzt jedoch auch unsymmetrische Lasten. Auf die Simulation einphasiger DEA wird aus folgenden Gründen verzichtet:

- Einphasige DEA beschränken sich auf relativ kleine Leistungen. Ihr Einfluss ist somit grundsätzlich auch relativ beschränkt.
- Bei einer grösseren Anzahl von DEA im Netz werden diese in der Praxis systematisch auf die drei Phasen verteilt. Trotzdem resultierende Unsymmetrien (Lastfluss, Spannungsniveau, Betriebsmittelbelastung) werden durch die unsymmetrischen Lasten ausreichend berücksichtigt. Aus der Sicht der Lastflussberechnung ist demzufolge keine einphasige DEA Modellierung notwendig.

- Bei den Oberwellen Betrachtungen besteht kein Unterschied zu den dreiphasigen (Umrichter-) Anlagen, da auch diese unsymmetrische Oberwellen generieren. Die Berechnungen können deshalb auf dreiphasige Systeme beschränkt werden. Lokal ergeben sich natürlich Unterschiede, da am Anschlusspunkt der Einfluss des lokalen Umrichters grösser ist als der Einfluss einer weit entfernten Anlage. Lokale Oberschwingungsunterschiede sind deshalb zu erwarten, jedoch in einem Ausmass, welches keine Konsequenzen auf den Betrieb des Verteilnetzes hat.

13.9. ZUSAMMENFASSUNG OBERSCHWINGUNGEN

Oberschwingungen entstehen durch Betriebsmittel mit nichtlinearer Kennlinie wie etwa Transformatoren, Leuchtstofflampen, Gleichrichter, Thyristoren usw. Umrichter gehören auch in diese Kategorie und erzeugen neben den harmonischen auch zwischenharmonische Oberschwingungen. Die Effektivwerte der Zwischenharmonischen sind im allgemeinen kleiner als 5 %, bezogen auf den Grundschwingungsstrom und nehmen mit steigender Frequenz ab.

Die Grenzwerte für den THD – der gesamte Spannungsklirrfaktor – betragen im Normalfall 8 %, an einzelnen Anschlusspunkten darf dieser Grenzwert überschritten werden.

Die Anschlussbedingungen eines Umrichters geben vor, dass der gesamte Klirrfaktor des Stromes drei Prozent nicht überschreiten darf. Je nach Anschlussimpedanz können an einzelnen Knoten zusammen mit den Oberschwingungsströmen der Lasten THD-Spannungswerte entstehen, die bei der symmetrischen Simulation knapp unter 4 % zu liegen kommen. Der Grenzwert von 8 % wird im betrachteten Netzausschnitt nicht erreicht. Der Spannungsklirrfaktor an den Knoten nimmt in Richtung des Trafos ab.

Mit der unsymmetrischen Simulation werden die Grenzwerte überschritten, d.h. die THD-Werte liegen über 12 %. Dabei gilt zu beachten, dass grosse Einspeiseleistungen angesetzt worden sind. Wird weniger Leistung eingespeisen, geht damit der gesamte Spannungsklirrfaktor zurück und die Grenzwerte können eingehalten werden. Der Unterschied zwischen der symmetrischen und unsymmetrischen Simulation lässt sich durch die unterschiedlichen Impedanzen der Kabel im Null- und Mit- bzw. Gegensystem erklären. Die bei der symmetrischen Simulation nicht berücksichtigten Nullimpedanzen der Kabel sind im betrachteten Netz um den Faktor 5 grösser als im Mit- oder Gegensystem. Daraus lässt sich schliessen, dass sich mit der geeigneten Kabelwahl grosse Klirrfaktorwerte im Zusammenhang mit Umrichtern unter Umständen vermeiden lassen.

Der für die Simulationen eingesetzte Umrichter wurde mit einer Schaltfrequenz von ca. 2.55 kHz betrieben. Daraus ergeben sich maximale Oberschwingungsströme bei der 10. bis 15. Harmonischen. Die Oberschwingungsströme nehmen bei höheren Harmonischen kontinuierlich ab. Ab der 50. Harmonischen (2.5 kHz) gibt es bedingt durch die Taktfrequenz der Umrichter einen leichten Anstieg. Über 2.5 kHz gibt es keine Normen die Oberschwingungen beschränken, in den meisten Fällen sind sie auch unproblematisch. Die Interharmonischen können allerdings zu Problemen führen, weil sie die Rundsteuersignale stören können. Deshalb besteht in der Schweiz eine Norm die besagt, dass innerhalb von 100 Hz eines Rundsteuersignals die Spannungszwischenharmonischen nur 0.3 % betragen dürfen. Bei auftretenden Problemen mit grossen Umrichtern können die Ausgangsfilter soweit angepasst werden, dass die Rundsteuersignale nicht mehr gestört werden.