

FKH- / VSE-Fachtagung

11. November 2008

Überspannungen und Isolationskoordination im Hochspannungsnetz

Auswirkung des Schaltprinzips auf Überspannungen in MS-Verteilstationen

Ing. FH Hansruedi Luternauer
ewz, Zürich

1978 – 1981 Studium Energietechnik; FH Muttenz
1981 – 1985 Projektierungs- und Inbetriebsetzung, BBC Schweiz, Baden
seit 1985 bei ewz
Sektorleiter Projektierung, Bau und Betrieb Verteilnetz
Leiter Projektierung Anlagen
Leiter Netzdesign (Planung) Verteilnetz

Dr. Reinhold Bräunlich

1982 / 1993 Diplom als Elektroingenieur und Dissertation an der ETH Zürich
1982 bis 1983 Versuchsingenieur bei Brown Boveri & Cie in Baden
1983 bis 1990 Wiss. Mitarbeiter in der Fachgruppe für Hochspannungstechnik der ETH Zürich
seit 1990 Ingenieur bei der FKH, Fachkommission für Hochspannungsfragen in Zürich
seit 2000 Geschäftsleiter der FKH

Einsitz in diversen Fachgremien

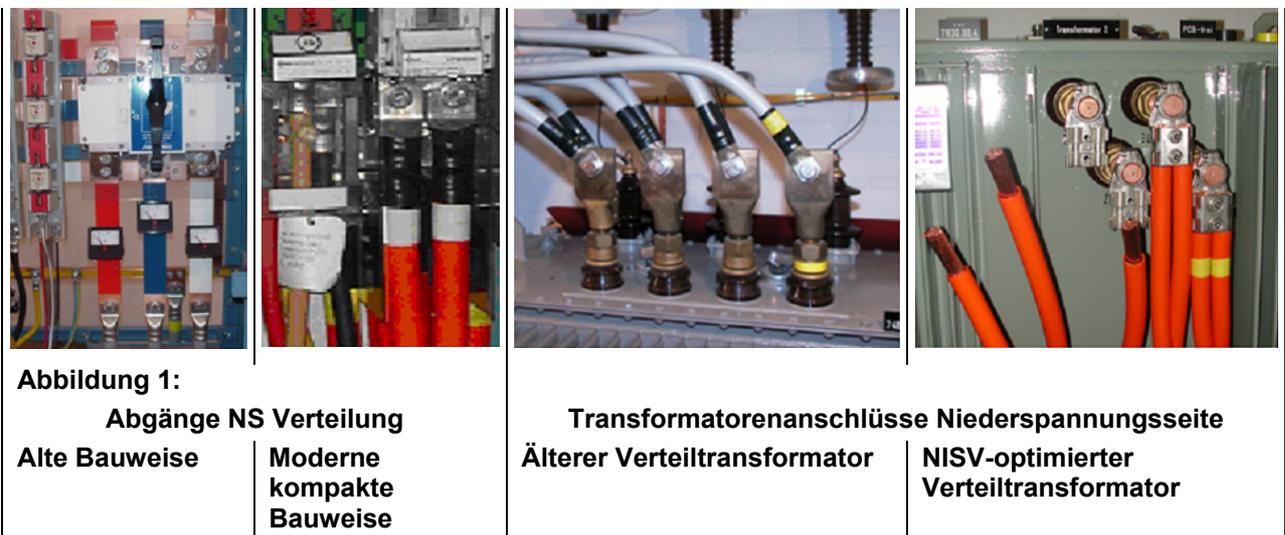
Auswirkung des Schaltprinzips auf Überspannungen in MS-Verteilstationen

Hansruedi Luternauer
ewz, Zürich

Reinhold Bräunlich
FKH, Zürich

1. Einleitung

Beim Schalten in Transformatorstationen mit Hoch- und Niederspannungsschaltern treten Überspannungen auf. Fallbeispiele aus der Praxis haben gezeigt, dass insbesondere auf der Niederspannungsseite der Verteiltransformatoren mit hohen Schaltüberspannungen von mehreren kV zu rechnen ist. Die Gefahr, dass diese Überspannungen zu Überschlägen führen könnten, hat sich angesichts moderner kompakter Bauweisen und damit reduzierter Schlagweiten in den letzten Jahren verschärft. Insbesondere im Rahmen der Bemühungen zur Reduktion der magnetischen Streuflussdichte von Transformatorstationen wird angestrebt, die Phasenabstände möglichst gering zu halten (Abbildung 1).



Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich hat diesbezüglich Untersuchungen in Auftrag gegeben, welche die kritischen Schalthandlungen identifizieren und die wichtigsten Einflüsse auf die Höhe der Überspannungen abklären sollten. Die diesbezüglich interessierenden Fragen betrafen folgende Einflussgrößen:

1. Die Höhe der Belastung (ggf. Leerlauf) des Transformators
2. Art der Schalthandlung bzw. des Schaltzustands (optimale Schaltreihenfolge)
3. Die Höhe der Betriebsspannung auf der Mittelspannungsebene
4. Der verwendete Schaltertyp (Einfluss des Löschmediums)

Für die Versuche wurde eine Transformatorstation ausgesucht, welche sowohl vom 11-kV-Netz wie auch vom 22-kV-Netz gespeist werden kann, wobei die Transformatoren für den Betrieb mit beiden Spannungen umgeschaltet werden können. Ferner war es in dieser Transformatorstation möglich, für die Schaltversuche verschiedene Mittelspannungsschalter mit unterschiedlichen Löschmedien Öl, SF₆ und Vakuum (Abbildung 2) einzusetzen.



Abbildung 2:

ölarmierter Leistungsschalter

SF₆-Lasttrennschalter

Vakuum-Leistungsschalter

2. Durchgeführte Untersuchungen

Abbildung 3 zeigt ein einpoliges Ersatzschaltbild der Trafostation, in welcher einer der beiden Verteiltransformatoren für die Schaltversuche freigeschaltet wurde. Ein- und Ausschaltungen wurden mit dem Transformatorschalter auf der Mittelspannungsseite und auf der Niederspannungsseite durchgeführt.

Bei allen Schalthandlungen wurden die überspannungs- und unterspannungsseitigen Spannungen und Ströme mit breitbandigen Messteilern bzw. Messwandlern und Transientenrekordern aufgezeichnet.

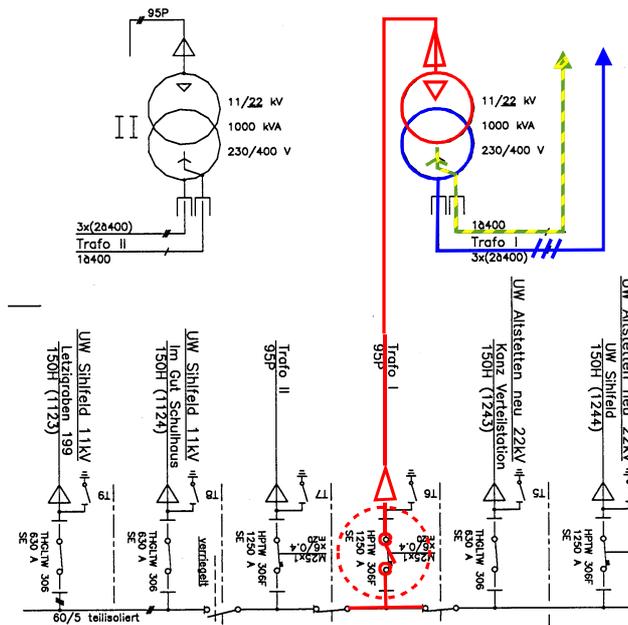


Abbildung 3: Trafostation Fellenbergstrasse, einpoliges Schaltbild Mittelspannungsschaltanlage und Transformatoren

Als Vorbereitung für die Schaltversuche wurden 6 Spannungsteiler zur Messung der transienten Spannungsverläufe an den drei Phasen auf der Primär- und der Sekundärseite des Transformators in die Transformatorzelle eingebaut (Abbildung 4). Diese Spannungsteiler weisen 3-dB-Bandgrenzen von 10 Hz bzw. 10 MHz auf und besitzen über 6 Frequenzdekaden hinweg einen nahezu flachen Frequenzgang. Es wurden dafür Stützisolatoren mit eingegossenen Elektroden eingesetzt, deren Kapazität von einigen pF als Primärkondensatoren eines kapazitiven Teilers verwendet wurden. Diese Stützisolatoren wurden mit niederinduktiven, gedämpft-kapazitiven Sekundärteilen versehen, die vorgängig im Labor der FKH für diesen Zweck optimiert worden waren.

Die Positionen und Bezeichnungen der Messstellen sind im Prinzipschema Abbildung 4 eingezeichnet.

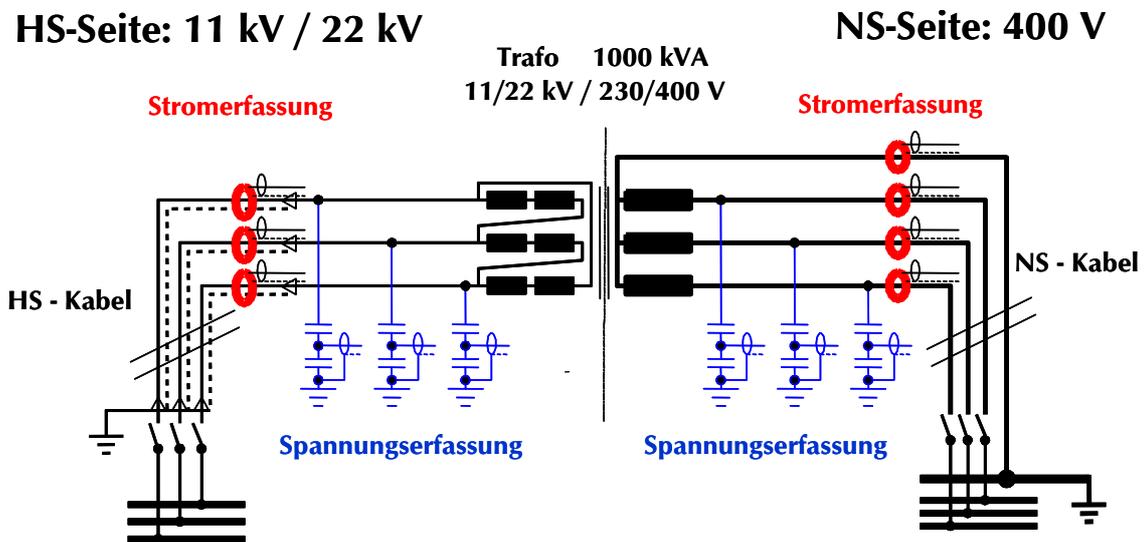


Abbildung 4: Anordnung der Breitbandstromwandler und der Spannungsteiler

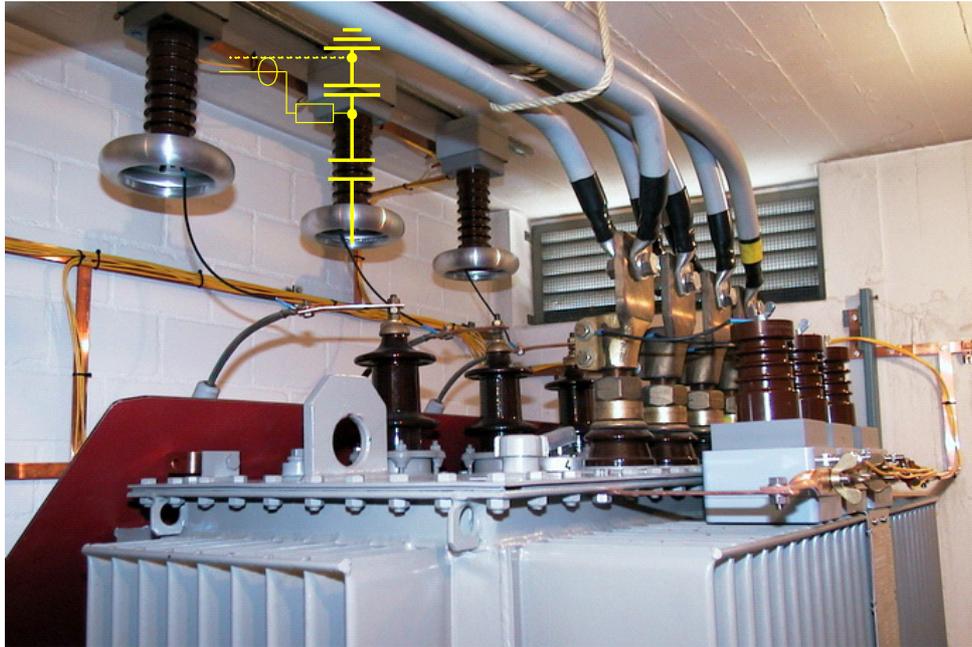


Abbildung 5: Spannungsteiler aus Isolatoren mit eingegossenen Mess-Elektroden auf der Primär- und Sekundärseite des Transformators

Für die Ströme wurden Spezialstromwandler der Firma PFIFFNER Messwandler AG beschafft, welche ein niedriges Übersetzungsverhältnis und eine eingebaute elektrostatische Abschirmung besitzen. In die Stromwandleranschlusskästchen wurden niederinduktive Mess-Shunts eingebaut (Abbildung 6). Mit diesen Strommesseinrichtungen wurde ähnlich wie bei den Spannungsteilern eine ausreichend hohe Bandbreite erreicht (3-dB-Frequenzbandgrenzen: 15 Hz und 5 MHz).

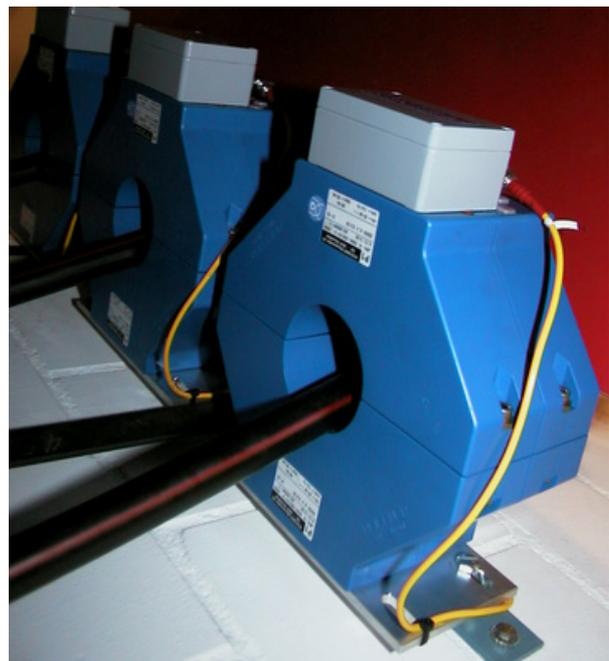


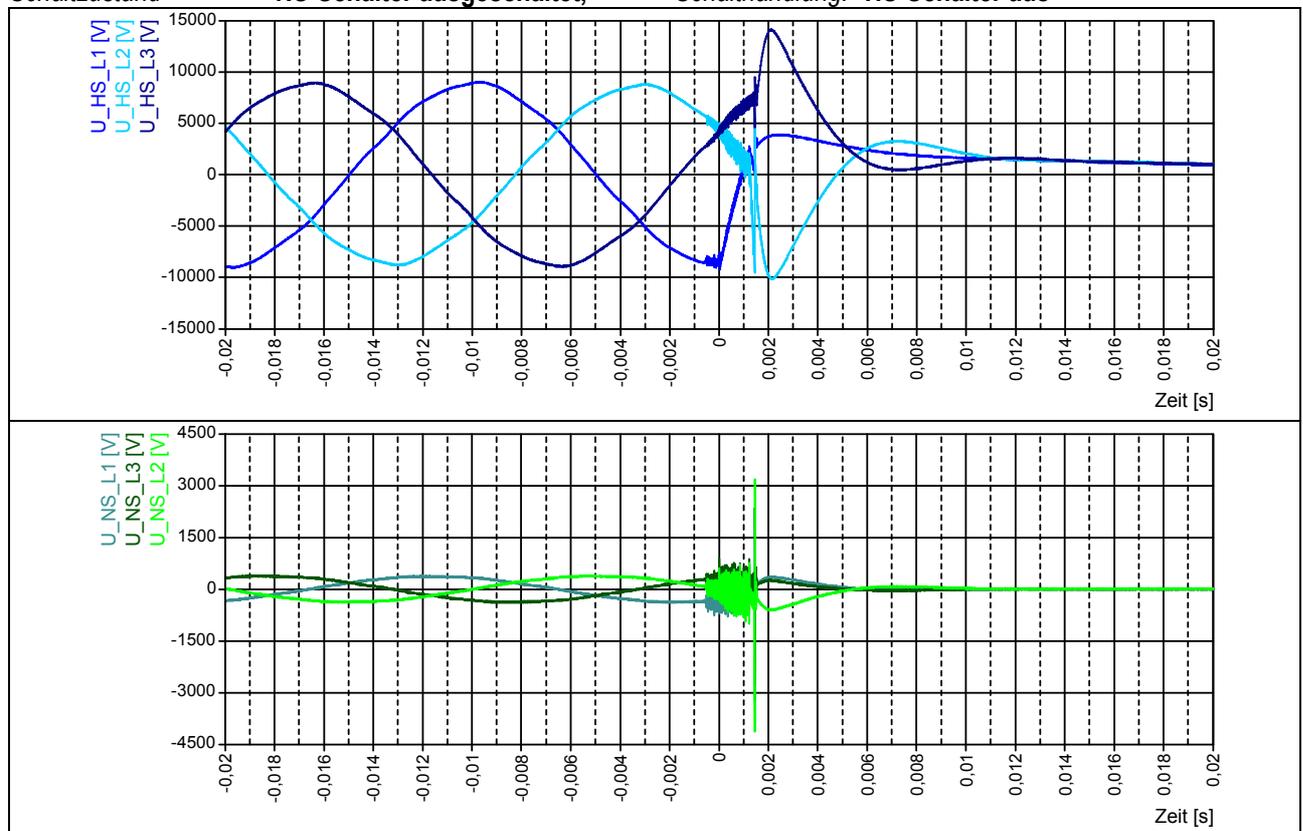
Abbildung 6 Montage der Spezialstromwandler auf der Unterspannungsseite (links) und der Oberspannungsseite (rechts)

3. Oszillographische Aufzeichnungen

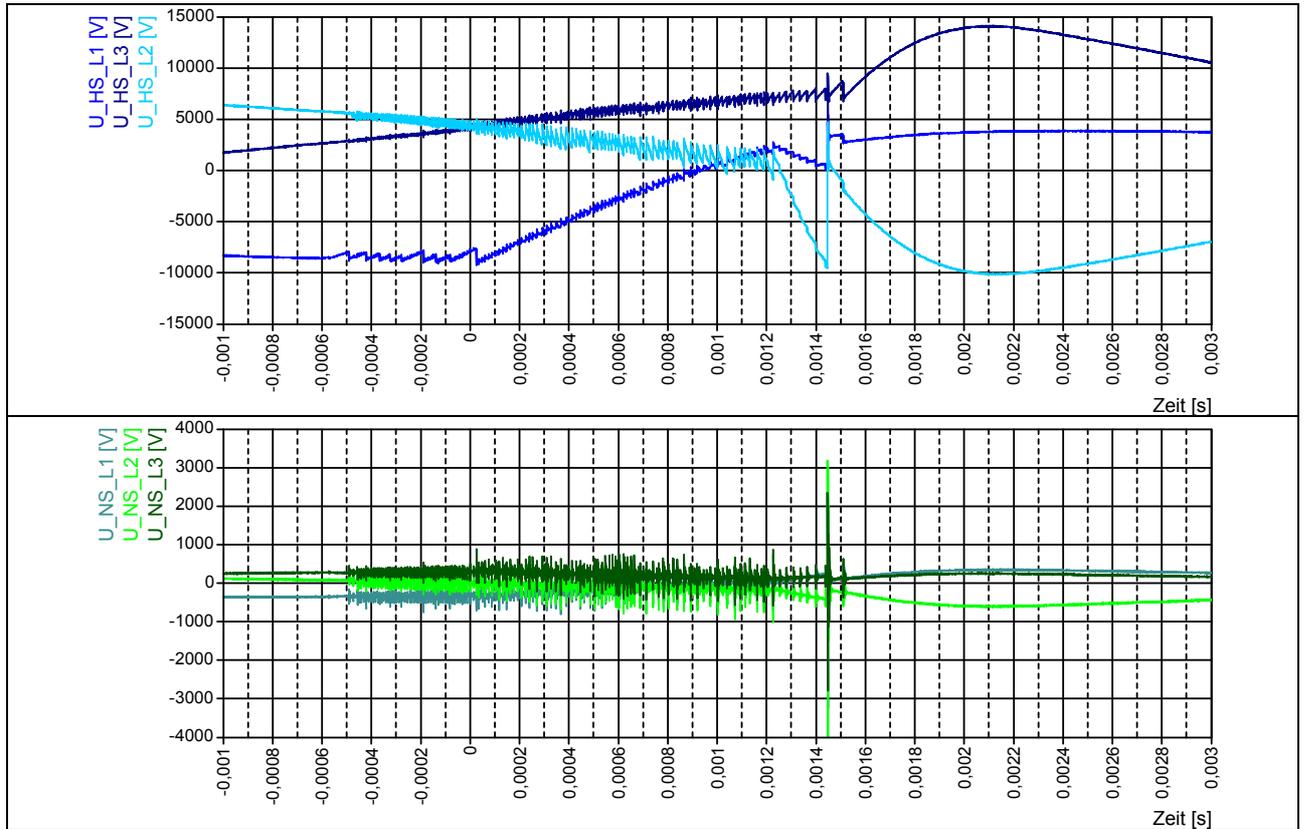
Für die drei Schalterlöschemdien Öl, SF₆ und Vakuum wurde je eine Transientenaufzeichnungen ausgesucht und in der folgenden Oszillogrammserie dargestellt. Um die langsamen, netzfrequenten und die hochfrequenten Vorgänge sichtbar zu machen, wurde bei der ersten Aufzeichnung (ölarmer Schalter) der Verlauf in drei zeitlichen Auflösungen dargestellt.

Jede Aufzeichnung zeigt in einer oberen Graphik die drei überspannungsseitigen Phasenspannungen gegen Erde (geerdetes Trafogehäuse). In der Graphik darunter sind jeweils im gleichen Zeitmassstab die niederspannungsseitigen Phasenspannungsverläufe dargestellt.

Schaltmedium: **ölarmer**, *HS-Spannung* **11 kV**,
 Schaltzustand **NS-Schalter ausgeschaltet**, *Schalthandlung* **HS-Schalter aus**



1. gedehnte Darstellung



2. gedehnte Darstellung

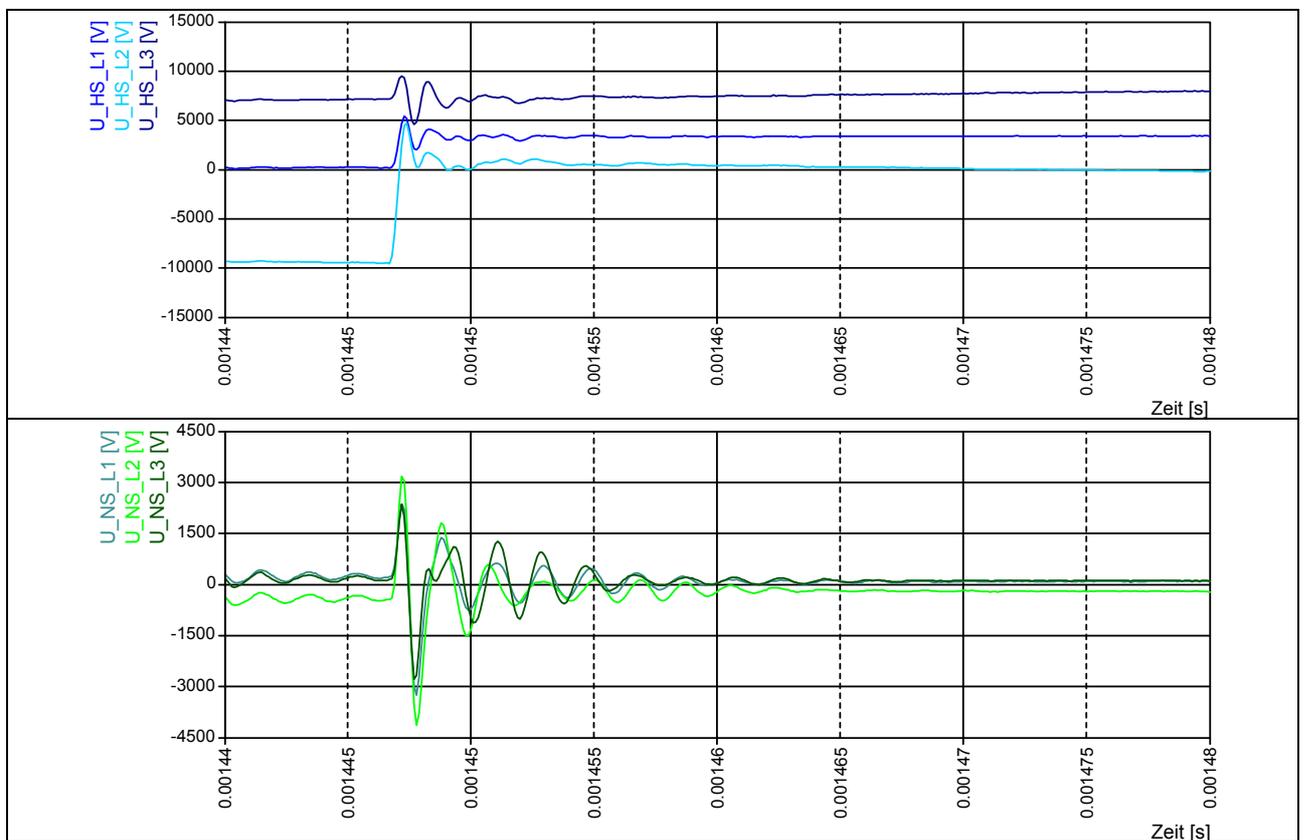


Abbildung 7 Spannungszoszillogramme ölarter Schalter

Schaltmedium: SF₆, HS-Spannung 11 kV,
Schaltzustand NS-Schalter ausgeschaltet, Schaltbehandlung: HS-Schalter aus

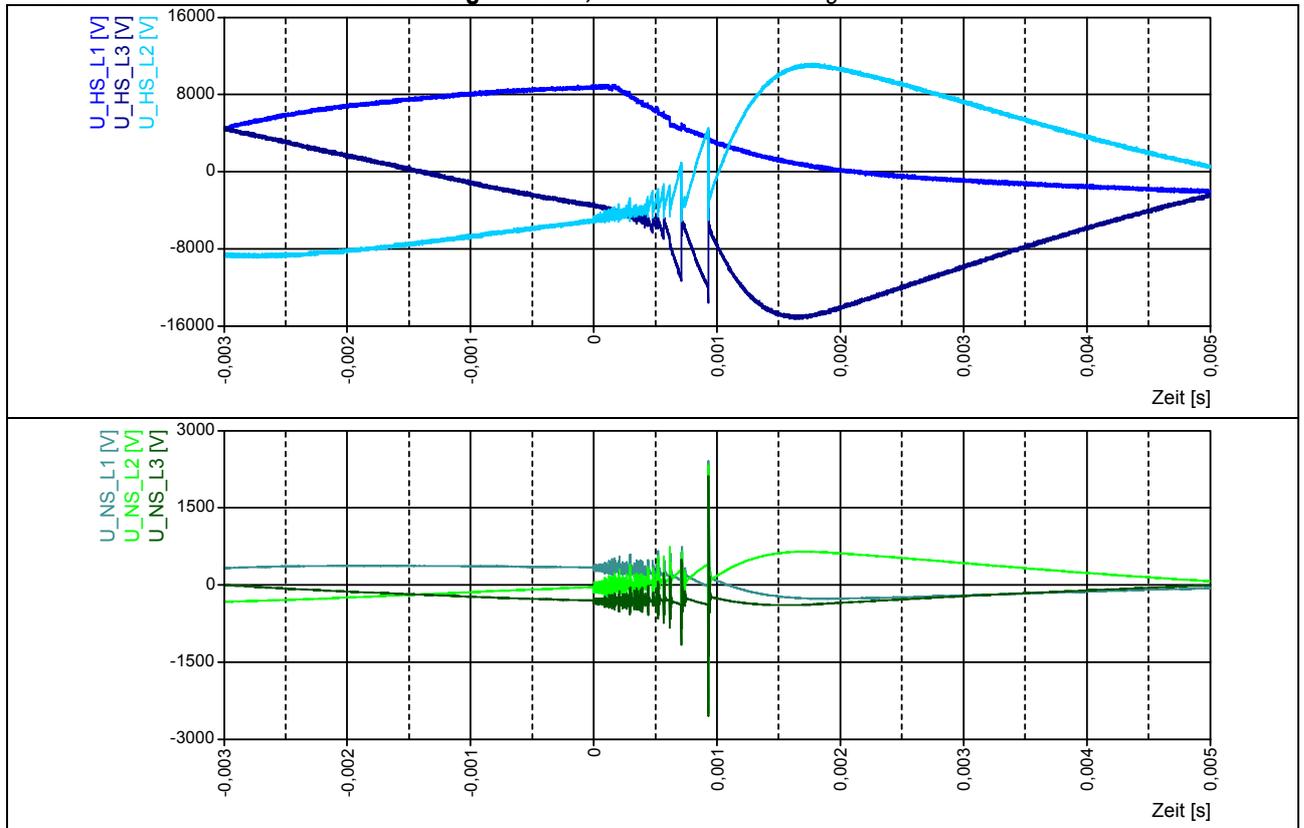


Abbildung 8 Spannungszillogramme SF₆-Schalter

Schaltmedium: **Vakuum, HS-Spannung 11 kV,**
 Schaltzustand **NS-Schalter ausgeschaltet, Schalthandlung: HS-Schalter aus**

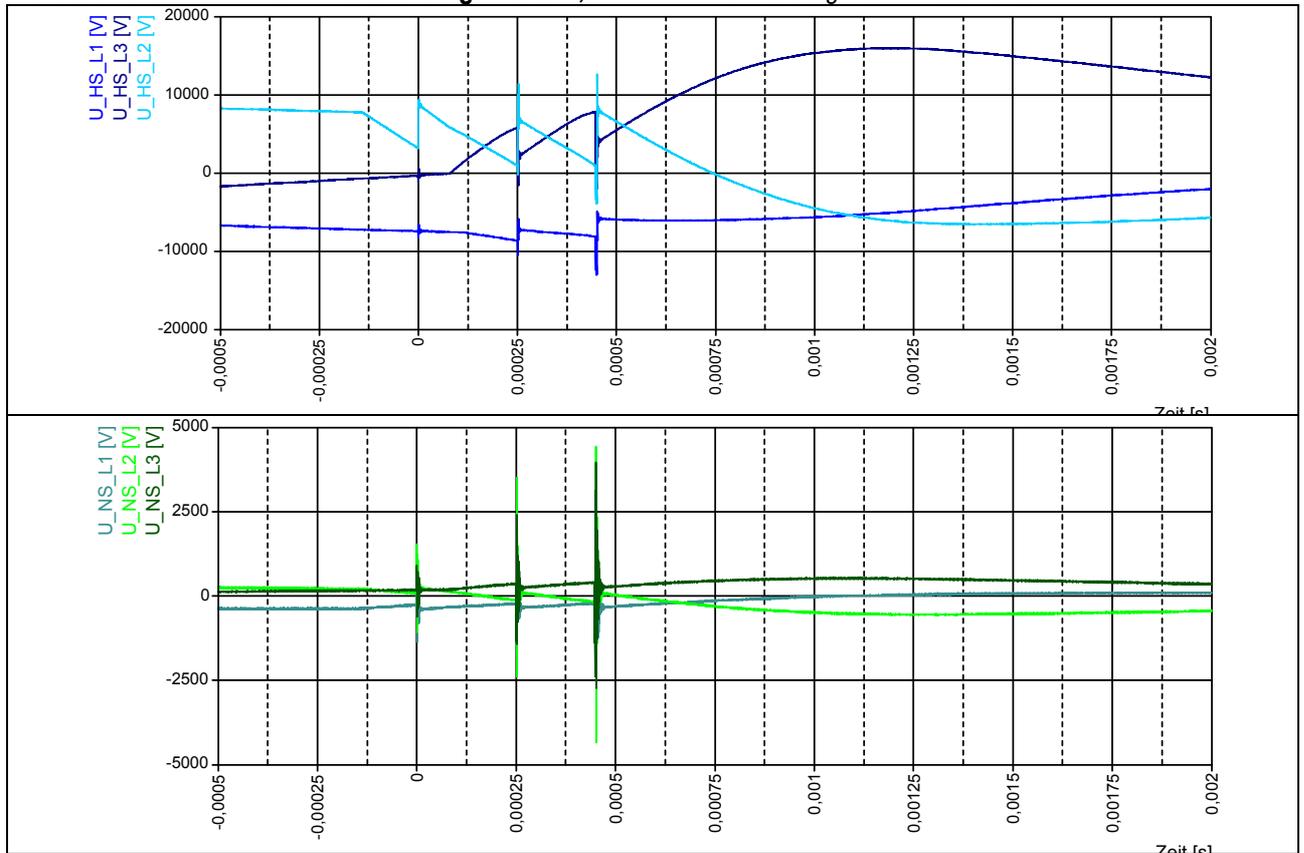
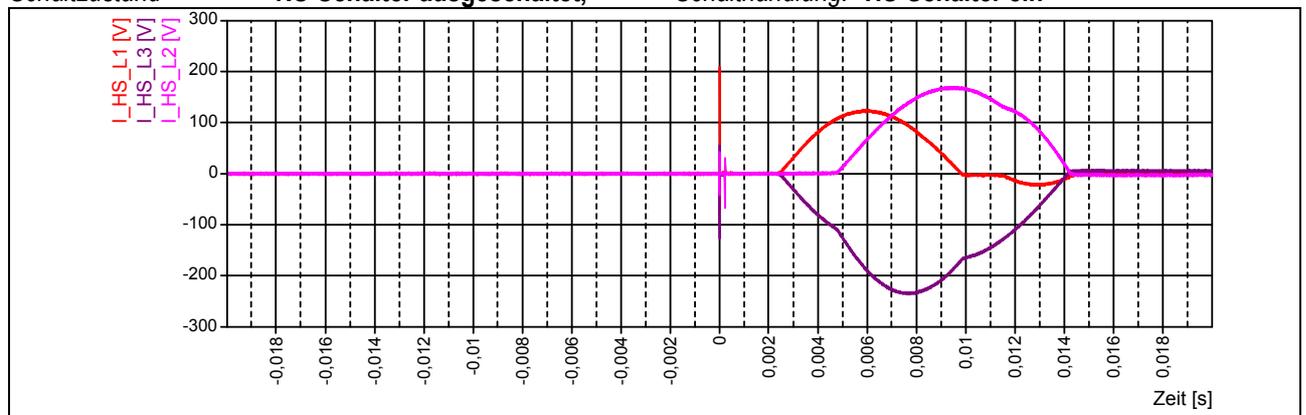


Abbildung 9 Spannungszillogramme Vakuum-Schalter

Schaltmedium: **Öl-Schalter, HS-Spannung** **22 kV,**
Schaltzustand **NS-Schalter ausgeschaltet, Schalthandlung: HS-Schalter ein**



Schaltmedium: **NS-Schalter, HS-Spannung** **22 kV,**
Schaltzustand **HS-Schalter ausgeschaltet, Schalthandlung: NS-Schalter ein**

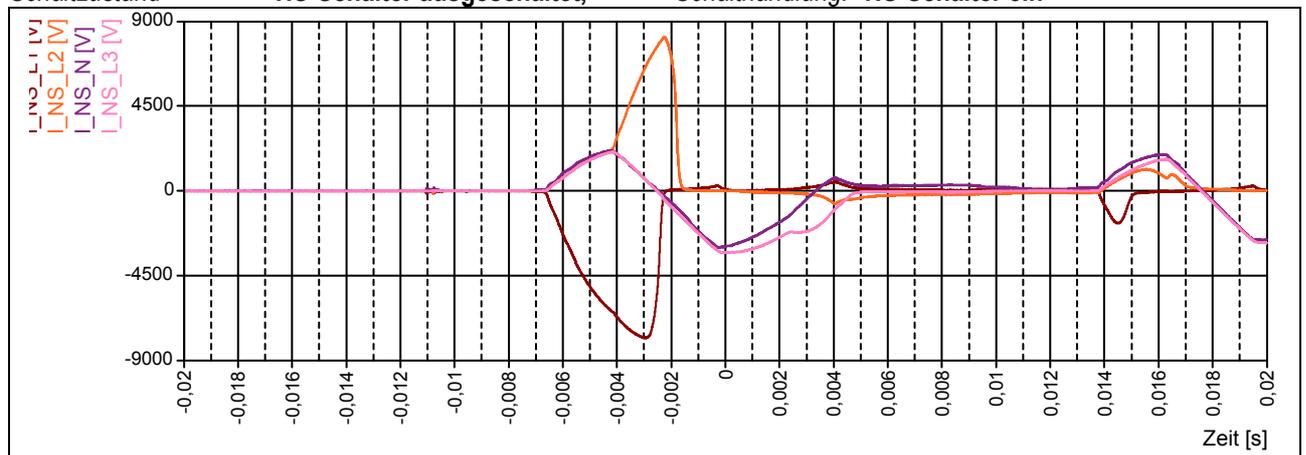


Abbildung 10 Stromoszillogramme beim Zuschalten des Transformators von der Oberspannungsseite her (oben: Strom Oberspannungsseite) und von der Unterspannungsseite her (unten: Strom Unterspannungsseite)

Zur Bewertung der Schaltreihenfolgen für das Ein- und Ausschalten der Transformatoren wurden die auftretenden Amplituden der Schalttransienten für die zwei möglichen Schaltreihenfolgen statistisch ausgewertet und die Ergebnisse in der folgenden Abbildung 11 zusammengestellt.

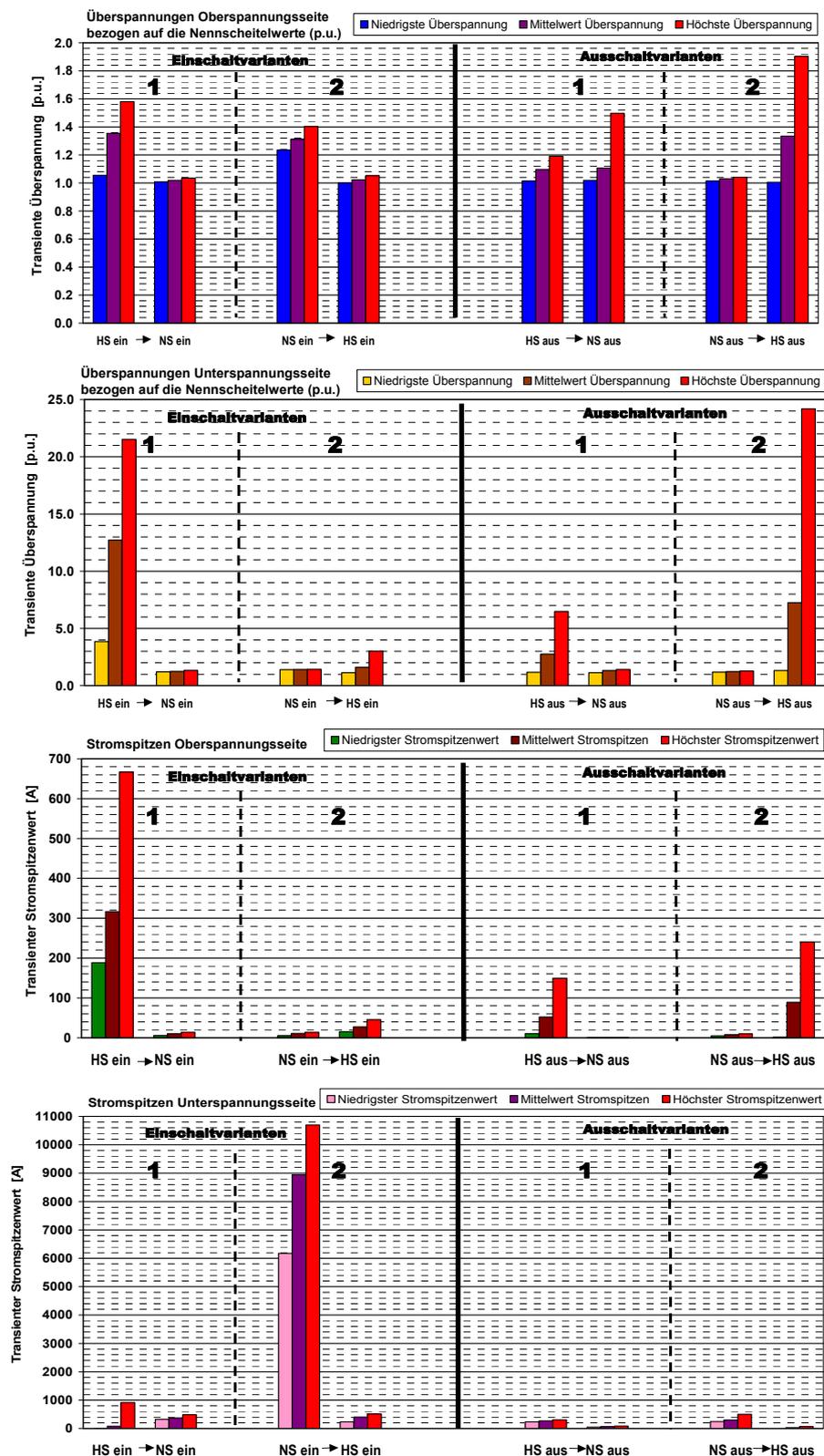


Abbildung 11: Minimalwert, Mittelwert und Maximalwert aller gemessenen Überspannungen und Stromspitzen (Ober- und Unterspannungsseite) bei Ein- und Ausschaltungen zur Gegenüberstellung der Schalterfolgen bei der Inbetriebnahme und der Ausserbetriebnahme eines Transformators. Für diese Auswertung wurden alle Schaltertypen einbezogen

3. Schlussfolgerung

Aus den Schalttransientenuntersuchungen in der Versuchstrafostation konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Auf der Oberspannungsseite des Transformators traten verhältnismässig geringe Überspannungen auf, die stets deutlich unter dem zweifachen Nennscheitelwert der Betriebsspannung lagen.
2. Auf der offenen Sekundärseite des Trafos waren vereinzelt Überspannungen bis zum 25-fachen des Nennscheitelwerts der Niederspannung festzustellen. Diese Überspannungen werden durch eine kapazitive Kopplung zwischen den Transformatorwicklungen übertragen. Bei einer Betriebsspannung auf der Oberspannungsseite von 11 kV erreichten die Überspannungen etwa 60 % derjenigen bei einer Betriebsspannung von 22 kV. Die höchsten Überspannungen ergaben sich generell bei Ein- und Ausschaltungen des leerlaufenden Transformators von der Oberspannungsseite her, d.h. bei ausgeschaltetem Niederspannungsschalter, wobei sich die Amplituden der Ein- und Ausschaltungen innerhalb der statistischen Streuung kaum unterschieden. Bei zugeschalteter NS-Sammelschiene erreichten die Überspannungen bei Ein- und Ausschaltungen auf der Oberspannungsseite noch den 6-fachen Nennscheitelwert (2000 V).
3. Die verschiedenen Schaltprinzipien unterscheiden sich deutlich im Ausschaltvorgang: Beim Ölschalter wurde meist eine sehr grosse Anzahl von Rückzündungen mit kleiner Amplitude festgestellt. Der Vakuumschalter weist weniger häufige Rückzündungen auf (typisch 5 bis 10), dafür zwangsläufig mit grösserer Amplitude des Spannungssprungs. Der SF₆-Schalter liegt diesbezüglich zwischen den beiden anderen Schaltprinzipien. Die letzten Rückzündungen erzeugen die höchsten Spannungstransienten. Bezüglich der Amplitude dieser grössten Rückzündungen unterscheiden sich die Schaltprinzipien nur wenig. Wobei der Vakuumschalter tendenziell höhere Überspannungen erzeugt, als die beiden anderen Schaltprinzipien. Die Streubereiche der Spitzenwerte überlappen sich aber weitgehend für die drei getesteten Schalter.
4. Die Schalthandlungen mit dem **Niederspannungsschalter** erzeugten auf der Niederspannungsseite keine nennenswerten Überspannungen.
5. Das Einschalten des Transformators kann hohe **Einschaltstromspitzen** zur Folge haben, die auf eine Kernsättigung des Transformators zurückzuführen sind (Inrush Current). Die Überströme traten statistisch und an den drei Phasen in unterschiedlicher Intensität auf. Entscheidend hierfür ist der Schaltwinkel. Ein Zuschalten im Spannungsnulldurchgang der Spannung, die über einer Trafowicklung anliegt, führt zu maximaler Sättigung und zu den grössten Überströmen. Der höchste Einschaltstrom von der Oberspannungsseite her betrug 670 A. Beim Einschalten von der Sekundärseite her traten Einschaltströme bis 10.7 kA auf.
6. Bezüglich der **Schaltreihenfolge** bei Inbetriebnahmen und Ausserbetriebnahmen von Vereilttransformatoren wird aufgrund der Transientenmessungen vorgeschlagen, stets die Oberspannungsseite vor der Unterspannungsseite zu schalten (siehe Abbildung 11):

Schaltziel	1. Schalthandlung	2. Schalthandlung	Begründung
Inbetriebnahme des Transformators	Einschaltung Oberspannungsseite	Einschaltung Unterspannungsseite	Vermeidung hoher Einschaltströme
Ausserbetriebnahme des Transformators	Ausschaltung Oberspannungsseite	Ausschaltung Unterspannungsseite	Vermeidung von Spannungstransienten

Trotz dieser Vorgehensweise können aber zumindest beim Einschalten des Transformators hohe Überspannungen auf der NS-Seite nicht vermieden werden. Wegen der grossen Inrush-Ströme wird aber dennoch von einer Zuschaltung von der Niederspannungsseite her abgeraten.