



Untersuchung zu Gesamtsystemen aus Ventilator- und Antriebstechnologie zur Lüftung von Strassentunneln und Fluchtwegen

Analyses liées aux systèmes issus de la technologie pour ventilateurs et pour entraînements, utilisés pour la ventilation des tunnels routiers et des galeries de sécurité des tunnels routiers

Analysis of systems formed by fan- and drive technology used for tunnel and safety tunnel ventilation

HBI Haerter AG
Simon Frey
Matthias Lempp
Christina Zimmermann

Brüniger + Co. AG
Stefan Herger (ab 01.09.2020)
Adrian Hartmann (bis 31.08.2020)

PARMELTEC Mess- und Elektrotechnik GmbH
Jürg Pargätzi

**Forschungsprojekt AGT 2015/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Untersuchung zu Gesamtsystemen aus Ventilator- und Antriebstechnologie zur Lüftung von Strassentunneln und Fluchtwegen

Analyses liées aux systèmes issus de la technologie pour ventilateurs et pour entraînements, utilisés pour la ventilation des tunnels routiers et des galeries de sécurité des tunnels routiers

Analysis of systems formed by fan- and drive technology used for tunnel and safety tunnel ventilation

HBI Haerter AG
Simon Frey
Matthias Lempp
Christina Zimmermann

Brüniger + Co. AG
Stefan Herger (ab 01.09.2020)
Adrian Hartmann (bis 31.08.2020)

PARMELTEC Mess- und Elektrotechnik GmbH
Jürg Pargätzi

**Forschungsprojekt AGT 2015/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Simon Frey

Mitglieder

Matthias Lempp

Christina Zimmermann

Adrian Hartmann / Stefan Herger

Jürg Pargätzi

Begleitkommission

Präsident

Diego Tschuppert

Mitglieder

Bernard Crausaz

Günter Hofer

Adrian Omlin

Frits Van Vemden

Michael Zraggen

Franz Zumsteg

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	13
Summary	19
1 Ausgangslage, Ziele und Vorgehensweise	25
2 Grundlagen Strömungstechnik	29
2.1 Das strömende Medium	29
2.2 BERNOULLIsche Gleichung	29
2.3 Kontinuitätsgleichung	30
2.4 Druckverluste	30
2.5 BERNOULLIsche Gleichung	30
3 Grundlagen Ventilortechnologie	31
3.1 Bauformen	31
3.2 Kennlinien und Betriebspunkt	32
3.3 Abluftventilatoren	34
3.3.1 Anwendung	34
3.3.2 Anforderungen an Abluftventilatoren	34
3.3.3 Aufbau der Abluftventilatoren	35
3.3.4 Variation des Betriebspunkts	36
3.3.5 Betrieb mehrerer Abluftventilatoren	39
3.3.6 Einflüsse auf die Anlaufzeit	41
3.4 Strahlventilator	42
3.4.1 Anwendung	42
3.4.2 Anforderungen an Strahlventilatoren	42
3.4.3 Aufbau der Strahlventilatoren	43
3.4.4 Variation der Betriebspunkte	46
3.4.5 Parallelbetrieb von Strahlventilatoren	46
3.4.6 Einfluss auf die Anlaufzeit	47
3.5 Zuluftventilatoren / Saccardo-Ventilatoren	47
3.6 Ventilatoren der Sicherheitsstollen	47
3.6.1 Anwendung	47
3.6.2 Anforderungen an SiSto-Ventilatoren	47
3.6.3 Aufbau der SiSto-Ventilatoren	48
3.6.4 Variation des Betriebspunkts	49
3.6.5 Parallelbetrieb von SiSto-Ventilatoren	50
3.6.6 Einfluss auf die Anlaufzeit	50
4 Grundlagen Strassentunnel	51
4.1 Fahrraumlüftung	51
4.1.1 Mögliche Lüftungssysteme	51
4.1.2 Wahl des Lüftungssystems	53
4.1.3 Abluft	54
4.1.4 Längslüftung	56
4.2 Lüftung der Sicherheitsstollen	63
5 Grundlagen Antriebstechnologie	67
5.1 Begriffe	67
5.2 Elektromotoren	69
5.2.1 Asynchronmotor mit Käfigläufer	70
5.2.2 Synchronmotor	71

5.2.3	Reluktanzmotor	71
5.2.4	Betriebsarten und Einschaltdauer von Elektromotoren	71
5.3	Anlassverfahren	72
5.3.1	Direktanlauf DOL	73
5.3.2	Stern-Dreieck-Schaltung	73
5.3.3	Dahlander-Schaltung	76
5.3.4	Sanftanlasser	77
5.3.5	Frequenzumrichter.....	78
6	Grundlagen Netzurückwirkungen	83
6.1	Allgemeiner Beurteilungsablauf	83
6.1.1	Basisparameter für Beurteilung	83
6.2	Spannungsänderungen.....	85
6.2.1	Lastbedingte Spannungsänderungen.....	85
6.2.2	Schaltbedingte Spannungsänderungen.....	85
6.2.3	Beurteilung des Anlaufverhaltens	85
6.2.4	Messungen und Erkenntnisse	87
6.3	Oberschwingungen	89
6.3.1	Grundlagen Oberschwingungen	89
6.3.2	Messergebnisse.....	92
6.4	Praktisches Vorgehen Netzverträglichkeit	94
7	Kombination der Ventilator- und Antriebstechnologien und deren Bewertung	97
7.1	Allgemeine Vorgehensweise.....	97
7.1.1	Morphologischer Kasten	98
7.1.2	Vorgehensweise bei der Evaluation der technisch möglichen Lösungen	102
7.1.3	Bewertung der technisch möglichen Lösungen und Kosten.....	102
7.2	Abluft.....	104
7.2.1	Auslegung des Abluftsystems.....	105
7.2.2	Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme	106
7.2.3	Untersuchung der Netzverträglichkeit.....	110
7.2.4	Bewertung der Lösungen	118
7.2.5	Fazit Abluft	124
7.3	Längslüftung	126
7.3.1	Auslegung Längslüftung und Auswahl Strahlventilator-Typ	127
7.3.2	Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme	128
7.3.3	Untersuchung der Netzverträglichkeit.....	132
7.3.4	Bewertung der Lösungen.....	145
7.3.5	Fazit Längslüftung.....	151
7.4	SiSto-Lüftung	153
7.4.1	Auslegung der Lüftung des Sicherheitsstollens und Auswahl Ventilatoren-Typ	153
7.4.2	Bestimmung der aerodynamisch geeigneten Lösung	154
7.4.3	Untersuchung der Netzverträglichkeit.....	157
7.4.4	Bewertung der Lösungen	157
7.4.5	Fazit SiSto-Lüftung	162
8	Auswahl und Auslegung Frequenzumrichter	165
	Anhänge.....	169
	Glossar	229
	Literaturverzeichnis.....	231
	Projektabschluss	233

Zusammenfassung

Bei der Auslegung und Definition der Lüftungssysteme von Strassentunneln und Fluchtwegen stellt sich sehr häufig die Frage nach den möglichen Kombinationen der Ventilator- und Antriebstechnologien und deren objektive Beurteilung hinsichtlich technischer Realisierung und Wirtschaftlichkeit. Eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Kombinationen ist nur teilweise vorhanden und soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes evaluiert werden. Hierbei werden die Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und Sicherheitsstollen-Lüftung (SiSto-Lüftung) detailliert betrachtet. Um das zentrale Forschungsziel, die Auswahl geeigneter Ventilatorstechnologie inkl. deren Antriebe, hinreichend klären zu können, wurden die verschiedenen Anforderungen an die Aerodynamik und an die Netzverträglichkeit hinsichtlich der jeweiligen Anwendung in Form eines Prozessdiagrammes (Synthese siehe Abb. 1) erarbeitet. Die verschiedenen Antriebe wurden nach spezifisch relevanten Kriterien gegenübergestellt und mit einem eingeführten Punktesystem verglichen. Die wesentlichen Erkenntnisse des Forschungsprojektes sind in der Tab. 1 zusammengefasst:

Tab. 1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Auswahl aerodynamisch

Abluftventilatoren

Es ist festzulegen, ob ein Abluftventilator bei unterschiedlichen Betriebspunkten betrieben wird. Weiter ist zu definieren, ob ein Anfahren gegen einen bestehenden Überdruck (z.B. durch einen bereits laufenden Abluftventilator) abgedeckt werden muss. Je nach Ventilator Kennlinie und Gegendruck kann der geforderte Betriebspunkt nur durch eine Variation der Ventilator Kennlinie erreicht werden.

Strahlventilatoren

Für die Längslüftung ist festzulegen, ob die Strömungsgeschwindigkeit im Brandfall geregelt werden muss. Falls keine Regelung erforderlich ist, sind alle Antriebssysteme zulässig. Falls eine Regelung erforderlich ist, so beträgt der Zielwert der Längsströmung 1 m/s mit einem zulässigen Bereich von 0.7 m/s – 1.3 m/s. Zur Klärung, inwiefern eine technische Lösung mit dieser Vorgabe kompatibel ist, ist der Einfluss eines Strahlventilators auf die Längsströmung des Tunnels zu ermitteln. Weiter ist der Gradient zu bestimmen, mit der die Längsströmung im Tunnel beim Einschalten eines Strahlventilators zunimmt.

Je nach Resultat der vorherigen Schritte können Strahlventilatoren mit Direktanlauf (DOL), Stern-Dreieck-Anlauf, Dahlander-Schaltung, Softstarter oder Frequenzumrichter (FU) zur Anwendung kommen.

Falls Strahlventilatoren ohne FU zulässig sind, ist die Anzahl verfügbarer Schaltungen (Anzahl Strahlventilatoren mal zulässige Anzahl Schaltungen/Stunde) mit der erforderlichen Anzahl Schaltungen/Stunde zu vergleichen.

SiSto-Ventilatoren

Die geeignete technische Lösung, bestehend aus Ventilator und Antriebssystem, wird durch das Verhältnis des Volumenstroms im Normalbetrieb zu dem Volumenstrom im Ereignisbetrieb bestimmt. Liegt dieses Verhältnis um die 50 %, so ist der Einsatz von Dahlander-Motoren zweckmässig. Beide Betriebspunkte werden energieeffizient abgedeckt. Weicht das Verhältnis der Betriebspunkte von 50% ab, so sind FU-Lösungen oder Lösungen mit einem zusätzlichen Normalbetriebsventilator eine effiziente Lösung.

Netzverträglichkeit

Abluftventilatoren, Strahlventilatoren

Bei 6-Puls-FU ist zu untersuchen, ob die Netzrückwirkungen innerhalb der zulässigen Grenzwerte der DACHCZ-Vorgaben [35] zu liegen kommen. Beim Einsatz von 12-Puls-FU und Active-Front-End-FU (AFE) werden DACHCZ-Vorgaben [35] in der Regel eingehalten. Weitere Massnahmen zur Einhaltung der Netzverträglichkeit sind nicht erforderlich, bedingen aber den Einsatz dieser aufwendigeren FU-Technologien. Messungen zur Überprüfung der Einhaltung der Vorgaben sind vorzunehmen.

Bei allen Antriebssystemen ausser bei FU ist zu untersuchen, ob der Spannungsabfall beim Start der Ventilatoren innerhalb der Grenzwerte nach der DACHCZ-Vorgaben [35] liegt.

SiSto-Ventilatoren

Nennleistungen von mehr als 20 kW werden in der Regel bei SiSto-Ventilatoren nicht überschritten. Der Einsatz dieser kleinen Motoren ist betreffend Netzverträglichkeit unkritisch. Sofern ein Motor dieser Leistungsklasse an einem grösseren Trafo von ca. 400 MVA betrieben wird, sind keine weiteren Abklärungen zur Netzverträglichkeit erforderlich.

Anlaufstrom I_A/I_N

Bei Messungen auf Anlagen konnten typische Werte ermittelt werden (weitere Daten in Tab. 14):

Schaltung	Empfehlung I_A/I_N
Direktanlauf	8 – 10
Y/D Umschaltung	4 – 6
Dahlanderschaltung (2-stufig)	8 – 10

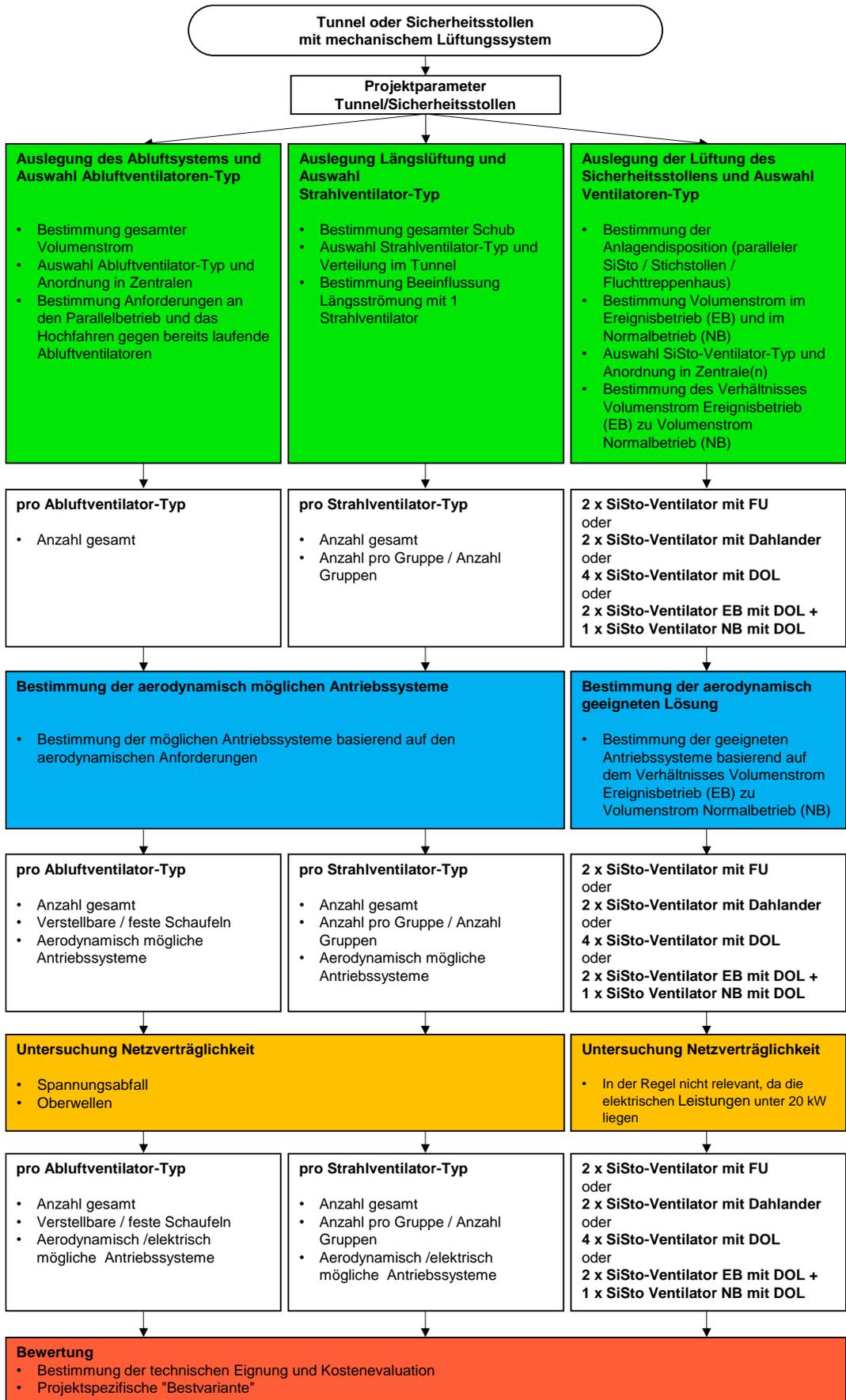


Abb. 1 Gesamtübersicht Auswahlprozess

Als Basis für diese Evaluation wurden notwendige Grundlagen beschafft und entsprechend aufgearbeitet. Die Themengebiete wurden in Strömungstechnik, Ventilator-technologie, Strassentunnel, Antriebstechnologie und deren Netzrückwirkungen unterteilt.

Die Grundlagen der Strömungstechnik wurden im Überblick ausgeführt, da ausreichend Literatur zu diesem Thema vorhanden ist.

Im Kapitel Grundlagen Ventilator-technologie werden die Ventilatoren entsprechend ihrer Anwendung im Strassentunnel eingeteilt und unterschieden. Für jeden Anwendungsfall werden die jeweiligen Anforderungen an den Ventilator, hinsichtlich Anlaufzeit und Variation des Betriebspunkts, aufgezeigt. Bei den Abluftventilatoren ist hervorzuheben, dass die Variation des Betriebspunktes sowohl mittels geeigneter Antriebstechnologien als auch durch eine hydraulische oder elektromechanische Verstellung des Schaufelwinkels realisiert werden kann. Bei der Auswahl des Abluftsystems mit 2 oder mehreren Ventilatoren im Parallelbetrieb sind die Ventilator-kennlinie und die Anlagenkennlinie entscheidend. Bei den Strahlventilatoren wurde gezeigt, dass die Beschleunigung der Tunnel-luft nicht sofort nach Anlauf des Strahlventilators einsetzt, sondern dass sich die Luftgeschwindigkeit kontinuierlich entwickelt. Die Zeitdauer, bis sich eine gewisse Strömungsgeschwindigkeit eingestellt hat ist dabei abhängig von verschiedenen Parametern wie z.B. der Tunnel-länge und dem Schub des Strahlventilators. Die Beschleunigungszeit spielt im aerodynamischen Prozessdiagramm hinsichtlich Längslüftung mit Regelung eine entscheidende Rolle. Die Ventilatoren der Sicherheitsstollen (SiSto) werden für eine kontinuierlich Druckerhöhung im SiSto gegenüber dem Fahr-raum benötigt. In der Regel werden diese im Normalbetrieb ohne Unterbrechung betrieben (Dauerbetrieb). Im Gegensatz zum System Abluft ist der Gegendruck beim Betrieb der SiSto-Ventilatoren verhältnismässig gering und führt somit zu keinen Problemen beim Anlauf.

Das Themengebiet Grundlagen Strassentunnel erläutert die Vorgehensweise bei der Auswahl der Lüftungssysteme im Fahr-raum und die Lüftung der Sicherheitsstollen. Entscheidend für die Wahl des Lüftungssystems im Fahr-raum - natürliche Lüftung, Lüftung ohne Absaugung im Ereignisfall und Lüftung mit Absaugung im Ereignisfall - sind die Faktoren Verkehrsart, Tunnel-länge und Längsneigung. Bei Systemen mit Absaugung im Ereignisfall bestimmen die benötigte Abluftmenge und die baulichen Rahmenbedingungen u.a. die Anzahl der Abluftzentralen und der Abluftventilatoren. Die jeweiligen Kennlinien und Betriebspunkte dieser Axialventilatoren sind entscheidend für die Wahl der Ventilator-technologie und sind unter «Grundlagen Ventilator-technologie» (Kapitel 3) zu finden. Bei einem Lüftungssystem ohne Absaugung wird eine mechanische Längslüftung vorgesehen. Je nach Verkehrsart muss die Strömungsgeschwindigkeit im Fahr-raum geregelt werden oder nicht. Die Regelungsvorgaben sind in nationalen Richtlinien (AT, CH, DE) inkonsistent und teilweise wenig präzise definiert. Diese Aussage bezieht sich auf die derzeit geltenden Vorgaben der genannten nationalen Richtlinien. Aus diesem Grund werden die Unter- und Obergrenze der Längsströmung theoretisch anhand der Beeinflussung der Rauchsichtung und anhand der Fluchtgeschwindigkeit der Tunnelnutzer ermittelt und festgelegt. Um eine zielgenaue Regelung mittels Strahlventilatoren realisieren zu können, wurde der Einfluss eines aktiven Strahlventilators auf die Längsströmung mit Hilfe eines Rechenmodelles erarbeitet und untersucht. Ziel ist es, bei Bedarf zur Regelung, die Zulässigkeit des getakteten Betriebs zu prüfen sowie zu klären, inwiefern eine bzw. zwei Drehzahlen ausreichend sind oder allenfalls eine kontinuierliche Drehzahlvariation notwendig ist. Im Forschungsbericht wird die Überdruckbelüftung eines parallelen Sicherheitsstollen zum Fahr-raum der Tunnelröhre betrachtet. Der Normalbetrieb der Sisto-Lüftung wird im Gegensatz zur Längslüftung und Abluft auf einen Dauerbetrieb ausgelegt. Im Ereignisbetrieb wird je nach Lüftungssystem im Fahr-raum eine definierte Mindestströmungsgeschwindigkeit durch die offenen Notausgangstüren benötigt. Dies muss bei der Auslegung der SiSto-Ventilatoren berücksichtigt werden.

Darüber hinaus werden bei den Grundlagen der Antriebstechnologie die verschiedenen Antriebsmöglichkeiten von Motoren vorgestellt. Dabei wird insbesondere der Asynchronmotor betrachtet, da dieser nach heutigem Stand in der Regel zum Einsatz kommt. Um die Stromspitzen beim Anlauf limitieren zu können, werden die unterschiedlichen Antriebssysteme betrachtet. Dabei wird der Direktanlauf (DOL), Stern-Dreieck-Schaltung, Dahlander-

Schaltung, Softstarter bzw. Sanftanlasser und Frequenzumrichter betrachtet. Die Komplexität der einzelnen Antriebe steigt dabei in der genannten Reihenfolge von DOL über Softstarter bis zum Frequenzumrichter. Im Kapitel Frequenzumrichter (FU) werden die unterschiedlichen Ausführungen vorgestellt. Es wird u.a. zwischen 6-, 12-Puls und Active-Front-End (AFE) FU unterschieden. Darüber hinaus gibt es noch bauliche Unterschiede, welche eine Rückspeisung von Energie beim elektrischen Bremsen erlauben. Bei den anderen Varianten wird beim elektrischen Bremsen die Energie in Form von Abwärme umgewandelt.

Für die Ausarbeitung einer Entscheidungsmatrix werden die einzelnen Antriebstechnologien bezüglich ihrer Netzverträglichkeit - Spannungsänderung beim Anlauf und Netzverträglichkeit der Oberschwingungen - unterteilt. Bei der Beurteilung der schaltbedingten Spannungsänderungen wird die Höhe des Spannungseinbruchs mit den entsprechenden Grenzwerten, gemäss den technischen Regeln [35], verglichen. Die Grenzwerte unterscheiden sich je nach Lage des Verknüpfungspunktes. Die Spannungsänderungen werden durch das Verhältnis Anlaufstrom I_A zu Nennstrom I_N dargestellt. Beim Direktanlauf (DOL) liegt dieses Verhältnis bei 8 bis 10-fach und bei einem FU bei 1.1-fach. Die Werte wurden in einer Messkampagne in verschiedenen Tunnel mit unterschiedlichen Ventilator-Typen und Antrieben verifiziert. Oberschwingungen beeinflussen die Netzqualität negativ und sind somit zu vermeiden. Frequenzumrichter und Softstarter erzeugen, je nach technischer Ausführungen, Oberschwingungen mit unterschiedlichen Oberschwingungsströmen. Eine Beurteilung der Oberschwingungen nach DACHCZ ist nur dann vorzunehmen, wenn Verbraucher auf der Anlage betrieben werden, welche Oberschwingungen verursachen. Die Oberschwingungsspektren einzelner Anlagen wurden innerhalb der durchgeführten Messkampagne gemessen und verglichen. Es wird festgehalten, dass eine 6-Puls FU ohne Netzdrossel höhere Oberschwingungsströme aufweist als ein 6-Puls FU mit Netzdrossel. Bei der Verwendung von 12-Puls FU oder sogar AFE FU fallen diese Effekte noch deutlich niedriger aus. Die Untersuchung der Netzverträglichkeit in der Praxis, wird im Kapitel 6.4 beschrieben.

Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen kann im 2. Schritt ein einzelner Axialventilator (ohne spezifischen Anwendungsbereich im Strassentunnel) mit den einzelnen Antriebstechnologien kombiniert werden. Hierbei werden verschiedene Kriterien, wie beispielsweise bauliche Massnahmen, Energieeffizienz, Kabelanlagen, etc. betrachtet und grob beurteilt. Für diese Vorbeurteilung wird die Methodik des morphologischen Kastens verwendet. Im morphologischen Kasten werden übersichtlich die Unterschiede betreffend der eingeführten spezifischen Kriterien herauskristallisiert. Die Antriebe DOL, Stern-Dreieck, Dahlander, Softstarter und FU werden dabei beurteilt. Eine weitere Unterklassifizierung einzelner FU-Typen erfolgt erst bei der weiteren detaillierten Betrachtung. Bereits im morphologischen Kasten werden die Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und SiSto unterschieden. Dies vor allem aufgrund der unterschiedlichen Hochlaufzeiten bezüglich Aerodynamik. Im Bereich Abluft werden zusätzlich noch Ventilatoren mit und ohne Schaufelverstellung unterschieden.

Die Strukturierung des morphologischen Kastens wird später für eine spezifische Untersuchung und Punktevergabe für die Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und SiSto verwendet. Um die technisch möglichen Lösungen evaluieren zu können, wird ein aerodynamisches Prozessdiagramm und ein weiteres Prozessdiagramm betreffend der Netzverträglichkeit eingeführt. Hierbei wird pro Lüftungssystem anhand verschiedener Parameter und Anwendungsbereiche entschieden, ob alle Antriebssysteme aus aerodynamischer Sicht möglich sind, oder nicht. Nach dieser Vorauswahl werden die verschiedenen Antriebssysteme auf ihre projektspezifische Netzverträglichkeit untersucht. Dies ist unter anderem abhängig vom zu betrachtenden Verknüpfungspunkt, dem Trafo und dessen Leistung, und ob noch andere Verbraucher am jeweiligen Verknüpfungspunkt angeschlossen sind. Das Resultat der Prozessdiagramme ergibt verschiedene technisch mögliche Lösungen, welche nun quantitativ nach spezifischen Kriterien bewertet werden. Die Kriterien werden dafür projektspezifisch gewichtet (Gewichtung pro Einflussgrösse). Das Produkt aus dieser Gewichtung und der generellen Beurteilung des jeweiligen Antriebssystems ergibt dann die gewichtete Beurteilung bzw. eine Punktezahl. Die Summe der gewichteten Beurteilungen wird final gebildet, um einen quantitativen Vergleich ermöglichen zu können. Für jede technisch mögliche Lösung werden noch entsprechende Kosten, bezüglich Investitions-,

Betriebs-, Wartungskosten, etc. betrachtet. Der Kostenvergleich der verschiedenen Lösungen fliesst in die Gesamtbetrachtung mit ein. In der Gesamtbetrachtung kann zwischen den unterschiedlichen Lüftungsvarianten, kombiniert mit verschiedenen Antriebssystemen, die Lösung mit der höchsten Punktzahl als die mutmasslich beste Lösung für diesen Anwendungsfall bestimmt werden.

Dieses Auswahlprozedere lässt sich am einfachsten auf Neubauprojekte anwenden. Bei Sanierungsprojekten oder anderweitig speziellen Projekten sind unter Umständen weitere Einflussgrössen in Betracht zu ziehen, welche hier nicht direkt abgebildet wurden. In Abb. 1 ist der Auswahlprozess zusammenfassend dargestellt.

Beim Lüftungssystem Abluft wurde festgestellt, dass aufgrund der Spannungseinbrüche beim Starten der Abluftventilatoren häufig ein gestaffelter Anlauf notwendig ist. Daraus ergeben sich erhöhte aerodynamische Anforderungen an die Ventilatoren (Hochfahren gegen vorherrschenden Gegendruck). Durch den Einsatz von Laufrädern mit Schaufelverstellung im laufenden Betrieb, kann dieser Anforderung begegnet werden. Die Einflussgrösse «Staffelung mehrerer Abluftventilatoren» wird in der Bewertungstabelle mit 1 bewertet, da diese Einflussgrösse bereits als Entscheidungskriterium im aerodynamischen Prozess abgefragt wird.

Bei der Beurteilung des Lüftungssystems Längslüftung spielt die Anforderung bezüglich Regelung der Strömungsgeschwindigkeit im aerodynamischen Prozessdiagramm eine entscheidende Rolle. Durch diese Abfrage können bereits vor der Untersuchung der Netzverträglichkeit bestimmte Antriebssysteme ausgeschlossen werden. Zusätzlich stellt sich die Frage, welche Lösungsvarianten, viele kleine Strahlventilatoren, oder wenige grosse Strahlventilatoren, für das jeweilige Tunnelobjekt sinnvoll sind. Diese Untersuchung wird anhand eines Beispiels, Tunnel Musterloch, veranschaulicht. Es zeigt sich im Beispiel, dass bei einer Regelung der Längsströmung FU-Lösungen bei der gewichteten Beurteilung, inkl. der Betrachtung der Kosten, eine höhere Punktzahl erzielen und somit favorisiert werden.

Die SiSto-Lüftung wird für eine dauerhafte Erzeugung eines Überdrucks im Fluchtstollen benötigt. Dadurch wird die Einflussgrösse «Energieeffizienz» höher gewichtet als bei den anderen Systemen. Die Betriebspunkte für Normal- und Ereignisbetrieb, resultieren aus dem jeweils benötigten Volumenstrom. Die theoretische Auslegung weist oftmals Abweichungen zur Situation vor Ort auf, da Leckagen im Bauwerk (Türen, Drainage, etc.) anders als angenommen ausfallen. Es ist daher unabdingbar, eine flexible Einstellung des Betriebspunkts im Normalbetrieb zu ermöglichen. Dies erfolgt entweder über eine Anpassung des Schaufelwinkel oder über eine Anpassung der Drehzahl. Die grösste Flexibilität betreffend Einstellung und Optimierung des Betriebspunkts kann durch eine FU-Lösung realisiert werden.

Mit der Einführung der oben genannten Vorgehensweise wurde eine Entscheidungshilfe für die Planung und Auswahl einer bestmöglichen und effizienten Anlage hinsichtlich der unterschiedlichen Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und SiSto-Lüftung evaluiert. Darüber hinaus wurde zu jeder technisch möglichen Lösung eine Kostenbetrachtung durchgeführt, welche einen monetären Vergleich der verschiedenen technischen Lösungen ermöglicht. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Gewichtung der unterschiedlichen Einflussgrössen je nach Projekt variieren kann. Hierdurch kann das Ergebnis der technisch besten Lösung noch beeinflusst werden und sollte somit nicht als allgemeingültiges Ergebnis verstanden werden. Die Entscheidung über die entsprechende Gewichtung und damit auch der Entscheid über ein geeignetes Antriebssystem liegt beim jeweiligen Projektverfasser mit entsprechender Fachkenntnis.

Die Differenzierung der verschiedenen Antriebssysteme hinsichtlich der Untersuchung Oberschwingungen ist bei der Verwendung 12-Puls FU und AFE marginal und nicht immer entscheidend für die bestmögliche technische Lösung. Die Wahl eines geeigneten Antriebssystems wird bereits im Prozessdiagramm mit einer Ja- oder Nein-Antwort abgefragt.

Die hier vorgestellte Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Kombinationen von Ventilator-Typ und Antriebssystem gibt daher für eine Vorbeurteilung eine erste Entscheidungshilfe. Sehr hilfreich bei der Budgetierung ist dabei auch die vorgestellte Kostenevaluation, welche in verschiedenen Projektstadien genutzt werden kann, beispielsweise bei einer Variantenstudie. Eine detaillierte Untersuchung und Abklärung im weiteren Projektverlauf und vor allem bei der Untersuchung der Aerodynamik und Netzverträglichkeit bleiben dabei allerdings unabdingbar.

Résumé

Lors de la conception et de la définition des systèmes de ventilation des tunnels routiers et des galeries de sécurité des tunnels routiers, des questions quant aux combinaisons possibles entre ventilateur et système d'entraînement, quant à l'évaluation des caractéristiques techniques et quant à l'intérêt économique se posent régulièrement. Une base de décision solide pour le choix de combinaisons appropriées n'est que partiellement disponible et sera évaluée dans le cadre de ce projet de recherche. Les systèmes de ventilation avec extraction, de ventilation longitudinale ainsi que les systèmes de ventilation des galeries de sécurité des tunnels routiers seront analysés en détail. Afin de pouvoir clarifier suffisamment l'objectif central de la recherche, à savoir le choix de la technologie du ventilateur et du système d'entraînement, les différentes exigences aérauliques et de compatibilité électrique dans les réseaux ont été élaborées pour chaque application sous forme d'un processus décisionnel (voir Abb. 2 pour une synthèse). Les différents systèmes d'entraînement sont comparés à l'aide de différents critères spécifiques pertinents et évalués l'aide d'un système de points. Les conclusions essentielles du projet de recherche sont résumées dans le Tab. 2.

Les bases requises à cette évaluation ont été collectées et élaborées lors de la recherche. Les domaines thématiques ont été divisés en mécanique des fluides, technologie des ventilateurs, tunnels routiers, technologie d'entraînement et leurs répercussions sur le réseau électrique.

Les bases de la mécanique des fluides liés à la présente recherche sont présentées de manière synthétique, plus d'informations sur ce sujet sont disponible dans littérature.

Dans le chapitre bases de la technologie des ventilateurs, les ventilateurs sont classés et différenciés en fonction de leur application dans les tunnels routiers. Pour chaque application, les exigences en termes de temps de démarrage et de variation du point de fonctionnement sont présentées. Pour les ventilateurs d'extraction, il est nécessaire de souligner que la variation du point de fonctionnement peut se faire soit par une technologie d'entraînement appropriées soit par une variation hydraulique ou électromécanique de l'angle des pales. Lorsqu'un système d'extraction soit muni de plusieurs ventilateurs en fonctionnement parallèle, la courbe caractéristique du ventilateur et celle de l'installation sont déterminantes pour le bon fonctionnement (démarrage séquentiel). Pour les ventilateurs de jet, il a été démontré que le flux d'air n'est pas instantanément accéléré lors du démarrage d'un ventilateur de jet. La durée d'accélération du courant d'air dépend de différents paramètres dont p.ex. la longueur de l'ouvrage ou la poussée aéraulique du ventilateur de jet. La durée d'accélération est très importante et décisive au sein du processus décisionnel aérodynamique relatif aux systèmes de ventilation longitudinales. Les ventilateurs des galeries de sécurité sont responsables pour l'augmentation permanente de la pression dans la galerie de sécurité par rapport à l'espace de circulation du tunnel routier. En règle générale, ces ventilateurs fonctionnent en continue en mode normal. Contrairement au système d'extraction, la contre-pression est relativement faible lors du fonctionnement des ventilateurs pour les galeries de sécurité. En conséquence, il est possible de démarrer les ventilateurs des galeries de sécurité de manière séquentielle, même si leurs courbes caractéristiques sont plutôt défavorables.

Tab. 2 Résumé des conclusions

Sélection aérodynamique

Ventilateurs d'extraction

Il convient de définir si un ventilateur d'extraction est opéré à différents points de fonctionnement et si ce dernier doit être démarré en présence d'une contrepression non négligeable (i.e. engendrée par un ventilateur d'extraction déjà en fonctionnement). Selon la courbe caractéristique du ventilateur et le niveau de contrepression, il peut s'avérer nécessaire de varier la caractéristique ventilateur pour atteindre le point de fonctionnement requis.

Ventilateurs de jet

La nécessité de contrôler les écoulements lors d'un sinistre est à évaluer. Si une régulation n'est pas nécessaire, tous les systèmes d'entraînement sont admissibles du point de vue aéraulique. Si une régulation est requise, la vitesse cible est de 1.0 m/s avec une bande de tolérance admissible de 0.7 m/s – 1.3 m/s. Afin de déterminer si une solution technique répond à cette exigence, l'influence d'un ventilateur de jet sur l'écoulement longitudinal en tunnel doit être déterminée. Ainsi, le gradient de la vitesse d'air lorsqu'un ventilateur de jet soit mis en marche.

En fonction des résultats des étapes précédentes, il est possible de prévoir des ventilateurs de jet avec démarrage direct (DOL), démarrage étoile-triangle, moteur à pôles commutables (moteurs Dahlander), démarreur progressif ou variateur de fréquence. Si des ventilateurs de jet sans variateur de fréquence sont admissibles, le nombre total de commutations/heure possible (nombre de ventilateurs de jet multiplié par le nombre de commutations/heure autorisé) doit être comparé au nombre de commutations/heure requis pour maintenir le courant d'air au sein des limites admissibles.

Ventilateurs des galeries de sécurité des tunnels routiers

La solution technique se détermine par le rapport entre le débit d'air en mode normal et le débit d'air en mode incendie. Si ce rapport se situe aux alentours de 50 %, des moteurs Dahlander sont appropriés car les deux points de fonctionnement sont respectés tout en maintenant une haute efficacité énergétique.

Si le rapport entre les points de fonctionnement diffère de 50 %, les solutions techniques avec variateur de fréquence ou une solution avec un ventilateur complémentaire destiné au mode normal s'avèrent comme les solutions les plus efficaces / intéressantes.

Perturbations électriques dans les réseaux

Ventilateurs d'extraction, ventilateurs de jet

Dans le cas des variateurs à 6 impulsions, il convient d'examiner si les perturbations électriques dans le réseau respectent les limites autorisées par les prescriptions DACHCZ [35].

En cas de variateurs de fréquence à 12 impulsions ou de variateurs à active front end (AFE), les prescriptions DACHCZ [35] sont en règle générale respectées. Par conséquent, il n'est pas requis de prévoir d'autres mesures pour respecter la compatibilité avec le réseau. Cependant, ces gammes de variateurs de fréquence est plus coûteuses. Même en cas d'utilisation de ce type de variateur, le respect des exigences quant aux perturbations électriques est à prouver à l'aide de mesures sur site lors de la mise en service.

Pour tout système d'entraînement hormis les variateurs de fréquence, il est requis d'analyser si la chute de tension au démarrage des ventilateurs respecte les limites fixées par les prescriptions DACHCZ [35].

Ventilateurs pour les galeries de sécurité

En règle générale, la puissance nominale des ventilateurs des galeries de sécurité des tunnels routiers est inférieure à 20 kW. En ce qui concerne la compatibilité avec le réseau, ces niveaux de puissance ne sont pas critiques. Lorsqu'un moteur de cette gamme de puissance nominale soit alimenté par un transformateur de puissance supérieure ou égale à 400 MVA, il n'est pas nécessaire de procéder à la vérification de la compatibilité avec le réseau.

Courant de démarrage I_D/I_N

Des valeurs typiques ont pu être déterminées à l'aide des mesures réalisés sur différentes installations de ventilation (pour plus de données : voir Tab. 14) :

Circuit	Recommandation I_D/I_N
Démarrage direct (DOL)	8 - 10
Démarrage étoile-triangle (Y/D)	4 - 6
Moteur à pôles commutables (moteur Dahlander)	8 - 10

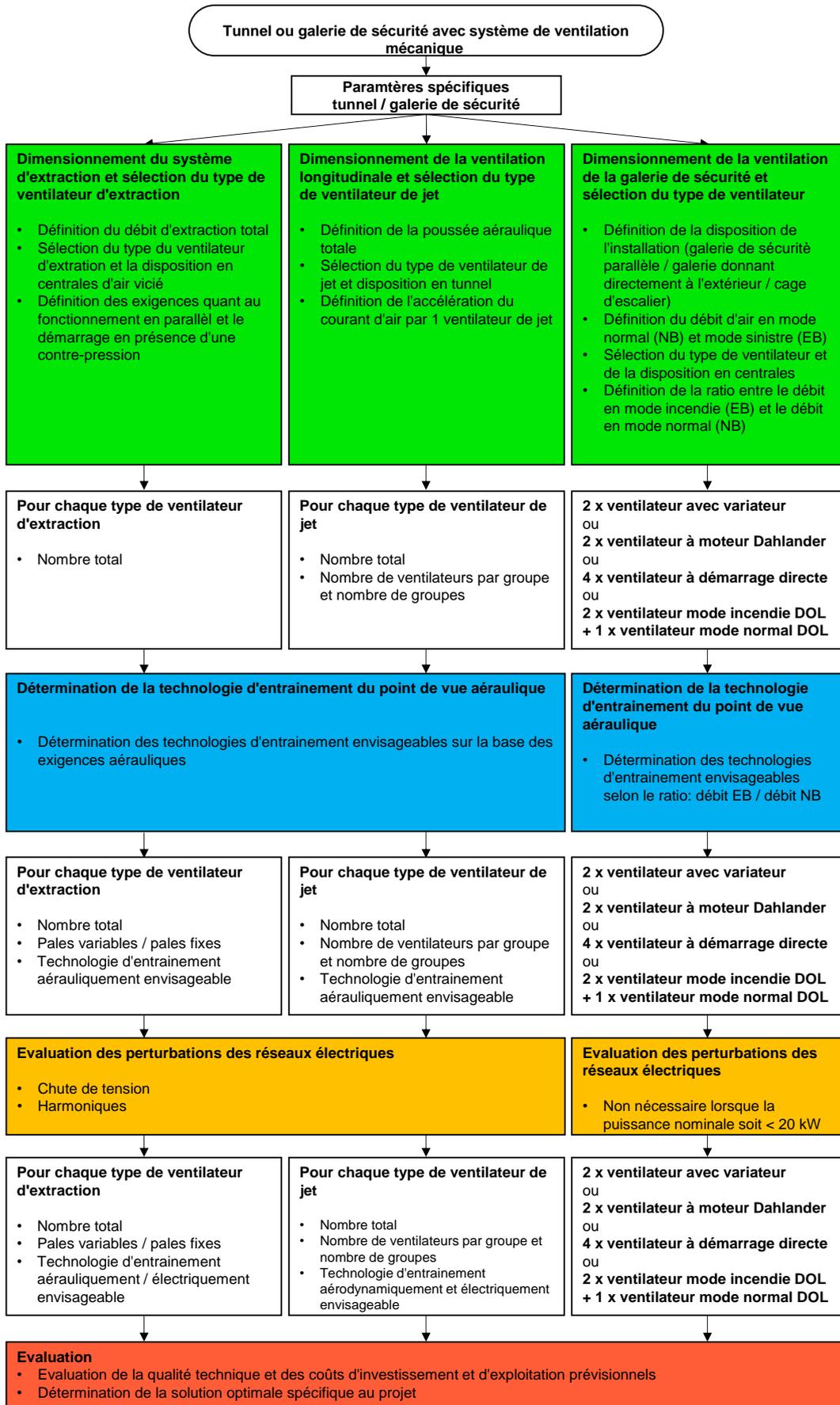


Abb. 2 Aperçu général du processus de sélection

Le chapitre bases des tunnels routiers explique la procédure de sélection des systèmes de ventilation dans l'espace de circulation et de la ventilation des galeries de sécurité. Les paramètres principaux déterminants le choix du système - ventilation naturelle, ventilation sans aspiration en cas de sinistre et ventilation avec aspiration en cas de sinistre – sont : le type de trafic, la longueur du tunnel et la déclivité longitudinale. Pour un système d'extraction, le débit d'air et caractéristiques constructifs de l'ouvrage déterminent entre autres le nombre de centrales et de ventilateurs d'extraction. Les courbes caractéristiques et les points de fonctionnement de ces ventilateurs axiaux sont déterminants et figurent dans le chapitre 3 : bases de la technologie des ventilateurs. Dans le cas d'un système de ventilation sans aspiration, une ventilation mécanique longitudinale est prévue. Selon le type de trafic, la vitesse l'écoulement doit être régulée ou non lors d'un sinistre. Parmi les directives / standards nationales (AT, CH, DE) actuellement en vigueur, les exigences quant au contrôle des écoulements sont moyennement cohérente et parfois peu précise. C'est pourquoi la limite inférieure et supérieure de la vitesse d'air longitudinal est déterminée dans le cadre de ce projet de recherche. La définition se base sur des considérations théoriques de l'interaction entre la vitesse d'air et la stratification des fumées et entre la vitesse de propagation des fumées et la vitesse de fuite des usagers du tunnel. Afin de pouvoir réaliser une régulation adéquate au moyen de ventilateurs de jet, l'influence d'un ventilateur de jet sur l'écoulement longitudinal a été déterminé et analysé à l'aide d'une modélisation. L'objectif de l'étude est d'évaluer, lorsque la régulation est requise, l'admissibilité d'un fonctionnement cadencé des ventilateurs de jet ainsi que la contrôlabilité du flux d'air par un ventilateur à une seule vitesse, à plusieurs vitesses voire à vitesse variable. En ce qui concerne la ventilation des galeries de sécurité des tunnels routiers, le projet de recherche focalise sur la ventilation d'une galerie de sécurité parallèle. La ventilation des galeries de sécurité est conçue, contrairement à la ventilation de l'espace trafic, pour le fonctionnement continu en mode normal. En cas de sinistre, une vitesse d'écoulement minimale est à instaurer à travers les portes d'issues de secours ouvertes (nombre en fonction du système de ventilation de l'espace de circulation). Ces deux modes de fonctionnement bien distincts doivent être pris en compte lors de la conception des ventilateurs des galeries de sécurité.

En outre, dans le chapitre bases de la technologie d'entraînement présente les différentes variantes d'entraînement. Le moteur asynchrone est particulièrement étudié car il est généralement utilisé suivant l'état de l'art. Afin de pouvoir limiter le pic de courant au démarrage, différents systèmes d'entraînement sont examinés et comparés. Il s'agit du démarrage direct (DOL), démarrage étoile-triangle, moteur à pôles commutables, démarreur progressif et variateur de fréquence. La complexité des différents entraînements augmente dans l'ordre cité, du DOL au démarreur progressif et au variateur de fréquence. Le chapitre consacré aux convertisseurs de fréquence présente les différentes gammes disponibles actuellement sur le marché. On distingue entre autres les variateurs de fréquence à 6 et à 12 impulsions et les variateurs à Active Front End (AFE). Au-delà, des différences existent quant à la récupération / réinjection de l'énergie électrique lié à la décélération. Si une réinjection n'est pas possible, l'énergie est dissipée en chaleur à travers une résistance électrique.

Pour l'élaboration d'une matrice de décision, les technologies d'entraînement différentes sont classées en fonction de leur compatibilité avec le réseau électrique - chute de tension au démarrage et perturbations électriques dans le réseau (harmoniques). Lors de l'évaluation des variations de tension dues à la commutation, la chute de tension est comparée aux valeurs limites selon les prescriptions techniques [35]. Les seuils diffèrent en fonction de la position du point de connexion examiné. La variation de tension est représentée par le ratio entre le courant de démarrage I_D et le courant nominal I_N . Pour le démarrage direct (DOL), ce ratio est de 8 à 10 et pour un variateur de fréquence, il est de 1.1. Les valeurs ont été déterminées et vérifiées lors d'une campagne de mesure dans différents tunnels avec différents types de ventilateurs et d'entraînement. Les harmoniques exercent une influence négative sur la qualité du réseau et doivent donc être empêchés. Les variateurs de fréquence et les démarreurs progressifs génèrent, en fonction de la gamme, des harmoniques avec des courants harmoniques différents. L'évaluation des harmoniques selon les prescriptions DACHCZ ne doit être effectuée en présence d'installations générant des harmoniques. Les spectres d'harmoniques de différentes installations ont été mesurés et comparés au cours de la campagne de mesure mené dans le cadre de la recherche. Il est constaté qu'un variateur de fréquence à 6 impulsions sans inductance de ligne présente

des courants harmoniques plus élevés qu'un variateur de fréquence à 6 impulsions avec inductance de réseau. En cas d'utilisation d'un variateur de fréquence à 12 impulsions ou même d'un variateur de fréquence AFE, ces effets sont nettement plus faibles. L'analyse de la compatibilité avec le réseau dans la pratique est décrite dans le chapitre 6.4.

Sur la base des principes élaborés, la deuxième étape de la recherche consiste à combiner un ventilateur axial (sans application spécifique dans le tunnel routier) avec les différentes technologies d'entraînement. Différents critères, tels que les mesures constructives, l'efficacité énergétique, le câblage etc. sont considérés et évalués sommairement. La méthodologie de la matrice morphologique est utilisée pour cette évaluation préliminaire. La matrice morphologique met en évidence les différences par rapport aux critères spécifiques introduits. Les entraînements de type DOL, étoile-triangle, Dahlander, démarreur progressif et FU sont ainsi évalués. Une sous-classification des différents types de variateurs de fréquence ne sera effectuée que lors d'un examen plus détaillé. La matrice morphologique distingue déjà les systèmes de ventilation par extraction, par ventilation longitudinale et par des galeries de sécurité. Ceci est surtout dû aux différentes durées de montée en puissance en ce qui concerne l'aérodynamique. Dans le domaine de l'extraction d'air, on distingue en outre les ventilateurs avec et sans position des pales.

La structure de la matrice morphologique est également utilisée pour l'étude spécifique et l'évaluation quantitative des systèmes de ventilation avec extraction, des systèmes de ventilation longitudinale et des systèmes de ventilation des galeries de sécurité. Afin de déterminer l'aptitude solutions techniques, un processus décisionnel aérodynamique et un processus décisionnel quant à la compatibilité avec les réseaux électriques sont élaborés. L'adéquation sur le plan aéraulique de différentes solutions techniques est évalué sur le plan de différents domaines et différents paramètres. Après cette première présélection, les variantes d'entraînement sont examinées en fonction de leur compatibilité avec le réseau électrique spécifique. La compatibilité est, entre autres, dépendant du point de connexion considéré, du transformateur, de la puissance totale installée, et du fait si d'autres consommateurs sont raccordés au même point de connexion. Le processus décisionnel permet d'évaluer la faisabilité des différentes solutions techniquement. Les solutions techniques envisageables sur le plan aéraulique et sur le plan électrique sont ensuite évaluées de manière quantitative. Pour ce faire, les critères d'évaluation sont pondérés spécifiquement au projet (pondération par grandeur d'influence). Le produit entre cette pondération et l'évaluation générale de la solution technique concernée correspond à l'évaluation pondérée et donc un nombre de points par critère. La note finale (le nombre de points total) se calcule par la somme des évaluations pondérées. Ceci permet la comparaison quantitative de la qualité technique des différentes solutions. Afin de valoriser l'aspect économique des solutions techniques, les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance sur toute la durée de vie sont estimés et comparés parmi les solutions envisageables. Le croisement de la qualité technique et les coûts d'une solution spécifique permet l'évaluation globale de la solution la plus intéressante.

Ce processus de sélection s'applique sans difficulté à des nouveaux ouvrages. Néanmoins, l'évaluation est également applicable pour des projets de rénovation voire pour d'autres projets particuliers. Cependant, il peut s'avérer nécessaire de prendre en compte des facteurs d'influence complémentaires, non considérés à l'instant. Le processus décisionnel global est résumé dans Abb. 2.

En ce qui concerne les systèmes de ventilation avec extraction, il doit être constaté qu'en raison des chutes de tension au démarrage des ventilateurs d'extraction, le démarrage échelonné des ventilateurs est souvent requis. Ceci résulte en des exigences aérodynamiques accrues (démarrage en présence d'une contre-pression importante). Des ventilateurs à angle de pales variables en fonctionnement permettent de répondre à cette exigence. A cause de la considération de ce fait au sein du processus décisionnel aéraulique, le facteur d'influence "échelonnement de plusieurs ventilateurs pas extraction" est d'office pondéré de manière faible dans le tableau d'évaluation.

Lors de l'évaluation des systèmes de ventilation longitudinale, l'exigence relative à la régulation de la vitesse longitudinale est décisive au sein du processus décisionnel aérodynamique. Cette évaluation exclue certains systèmes d'entraînement avant même d'examiner

la compatibilité avec le réseau. Lors de la planification, il faut fréquemment faire le choix entre une solution technique avec un nombre important de ventilateurs de jet moyennement puissant et une solution technique avec un nombre faible de ventilateurs de jet très puissants. Le processus décisionnel et l'évaluation des solutions techniques envisageables permettent de faciliter le choix grâce à la comparaison quantitative. Le processus est appliqué à l'exemple Tunnel Musterloch. Dans ce cas de figure, il s'avère que, les solutions avec variateur de fréquence sont d'une meilleure qualité technique. Ainsi, l'analyse des coûts de ces solutions favorise une solution technique à un nombre faible de ventilateurs puissants, munis de variateurs de fréquence.

La ventilation des galeries de sécurité crée une surpression permanente dans la galerie de fuite. Donc, le facteur d'influence "efficacité énergétique" est plus important dans ce cas de figure. Les points de fonctionnement pour l'exploitation normale et pour l'exploitation en cas de sinistre résultent du débit volumique nécessaire. Souvent, la conception présente des divergences par rapport à la situation sur site. Ceci car les fuites à travers le génie civil, à travers les portes et le système d'évacuation des eaux etc. sont différentes des hypothèses. Ceci amène soit à un surdimensionnement non nécessaire soit à des défauts de fonctionnement. Il est donc indispensable que les solutions techniques permettent la modification ultérieure du point de fonctionnement en mode normal. Ceci peut se faire soit par modification de l'angle des pales, soit par modification de la vitesse de rotation. Parmi ces deux variantes, le régime modifiable par variateur de fréquence offre la plus grande flexibilité et facilité de mise en œuvre.

L'évaluation grâce à l'outil susmentionnée est une d'aide à la décision lors de la planification des systèmes de ventilation d'extraction, des systèmes de ventilation longitudinale et de la ventilation des galeries de sécurité. Grâce au choix motivé, l'outil permet d'obtenir la meilleure installation possible sur le plan technique et ainsi la solution la plus efficace en ce qui concerne les coûts d'investissement. Il est néanmoins à noter que la pondération des différents facteurs d'influence peut varier en fonction du projet. L'auteur du projet, disposant des connaissances techniques nécessaires, doit vérifier lors de chaque application de cet outil la pondération des facteurs d'influence. Le résultat de la comparaison des variantes envisageables ne doit donc pas être considéré comme un résultat universel.

Parmi les variateurs de fréquence à 12 impulsions et les variateurs AFE, la différence concernant les harmoniques est faible et n'est donc pas impérativement décisive quant au meilleur choix.

La procédure présentée dans le cadre de ce projet de recherche sert donc d'aide à la décision pour une évaluation des solutions techniques. L'évaluation des coûts présentée ici peut être utilisée à différents stades du projet, par exemple lors d'une étude de variantes. Ainsi, l'outil permet l'établissement d'un budget approximatif. Néanmoins à travers l'avancement des études de projet, il est indispensable de confirmer les hypothèses considérées lors du choix de variantes, notamment les aspects aérauliques et les aspects de perturbation des réseaux électriques.

Summary

When designing and defining the ventilation systems of road tunnels and safety tunnels, the question of possible combinations of fan and drive technologies and their objective evaluation regarding technical realisation and economic efficiency very often arises. A well-founded decision-making basis for the selection of suitable combinations is only partially available and must be evaluated within the framework of this research project. The ventilation systems - exhaust air, longitudinal ventilation, and safety tunnel ventilation - will be analysed in detail. To sufficiently clarify the central research objective, the selection of suitable fans including their drives, the different requirements for aerodynamics and grid compatibility regarding the respective application were worked out in the form of a process diagram (synthesis see Abb. 3). The different drives were compared according to specific important criteria and compared with a point system. Further essential findings of the research project are summarised in Tab. 3:

Tab. 3 Summary of results

Aerodynamic selection

Exhaust air fans

It must be defined whether an extract air fan is operated at different operating points. Furthermore, it must be defined whether a start-up against an existing overpressure is required (e.g. by an already running exhaust fan). Depending on the fan curve and overpressure, the required operating point can only be achieved by varying the fan curve.

Jet fans

The requirement for controllability of the longitudinal flow must be defined. If no control is required, all drive systems are permissible. If control is required, the target value of the longitudinal flow is 1 m/s within a tolerance band of 0.7 m/s - 1.3 m/s. To clarify to what extent a technical solution is compatible with this target, the influence of a jet fan on the longitudinal flow of the tunnel must be determined. Furthermore, the gradient with which the longitudinal flow in the tunnel increases when a jet fan is switched on must be investigated.

Depending on the result of the previous steps, jet fans with direct starting (DOL), star-delta starting, Dahlander winding, soft starters, or variable frequency drive (VFD) can be used.

If jet fans without variable frequency drives are allowed, compare the number of available power switch operations (number of jet fans times allowed number of power switch operations/hour) with the required number of power switch operations/hour.

Safety tunnel fans

The appropriate technical solution is determined by the ratio of the volume flow in normal operation to the volume flow in event operation. If this ratio is around 50 %, the use of Dahlander motors is appropriate. Both operating points are covered in an energy-efficient manner.

If the ratio of the operating points deviates from 50%, VFD solutions or solutions with an additional normal operation fan are efficient solutions.

Assessment of grid disturbances

Exhaust air fans, jet fans

In the case of 6-pulse VFDs, it must be examined whether the grid disturbances are within the permissible limits of the DACHCZ specifications [35].

Using 12-pulse VFDs and Active-Front-End VFDs (AFE) the assessment of grid disturbances normally meet the DACHCZ specifications [35]. Further analysis won't be necessary with these drives. However, tests acceptance measurements need to be performed to ensure that the equipment complies with its specifications.

For all drive systems except for variable frequency drives, it must be checked whether the voltage drop at the start of the fans is within the limit values according to the DACHCZ specifications [35].

Safety tunnel fans

The rated power for safety tunnel fan motors usually does not exceed 20 kW and is therefore not critical regarding grid disturbances. If a motor of this power class is operated on a larger transformer of approximately 400 MVA, no further assessment of grid disturbances is required.

Start-up current I_A/I_N

Typical values could be determined from measurements on plants (further data in Tab. 14):

Connection	Recommended values I_A/I_N
Direct On Line	8 – 10
Star-delta circuit	4 – 6
Dahlander winding (2-stage)	8 – 10

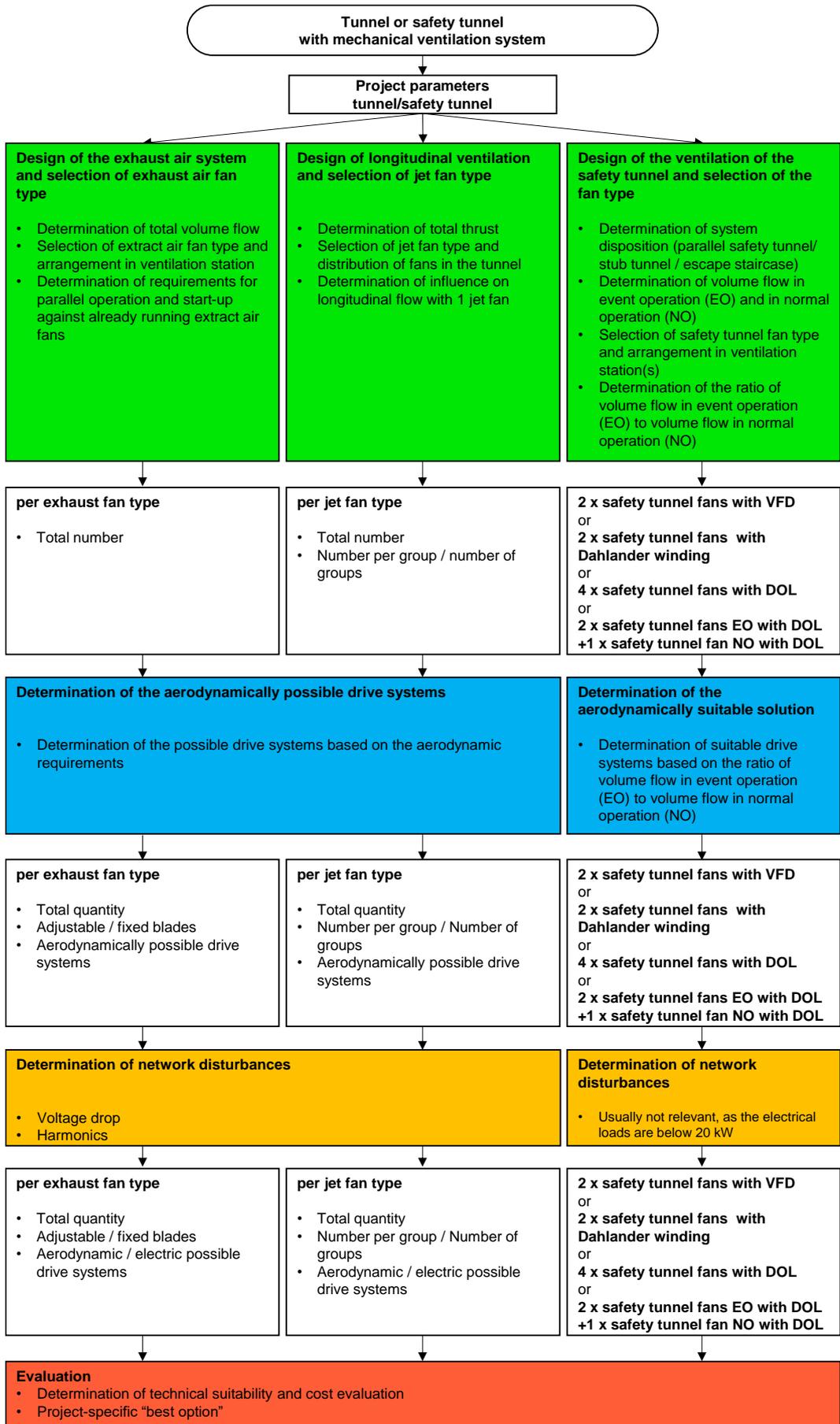


Abb. 3 General overview selection process

As a basis for this evaluation, the necessary basics were obtained and processed accordingly. The topics were divided into fluid mechanics, fan technology, road tunnels, drive technology and their grid disturbances.

The basics of fluid mechanics have been presented only as an overview, as sufficient literature is available on this topic.

In the chapter on fan technology basics, the fans are classified and differentiated according to their application in the road tunnel. For each application, the respective requirements on the fan regarding start-up time and variation of the operating point are shown. In the case of exhaust fans, the variation of the operating point can be realised both by means of suitable drive technologies and by a hydraulic or electromechanical adjustment of the blade angle. When selecting an air extraction system with two or more fans in parallel operation, the fan characteristic curve and the system characteristic curve are decisive. In the case of jet fans, it was shown that the acceleration of the tunnel air does not start immediately after the jet fan starts up, but that the air velocity develops continuously. The time taken for a certain flow velocity to develop depends on various parameters such as the tunnel length and the thrust of the jet fan. The acceleration time plays a decisive role in the aerodynamic process diagram regarding longitudinal ventilation with control. The fans of the safety tunnel are required for a continuous pressure increase in the safety tunnel compared to the driving space. In normal mode they are operating without interruption (continuous operation). In contrast to the exhaust air system, the counterpressure during operation of the safety tunnel fans is relatively low and thus does not lead to problems during start-up.

The subject area of road tunnel basics explains the procedure for selecting ventilation systems in road tunnels and ventilation systems of safety tunnels. The choice of ventilation system in the driving space, meaning either natural ventilation, ventilation without extraction in case of an incident, or ventilation with extraction in case of an incident depend on traffic type, tunnel length and longitudinal inclination. In systems with extraction in the case of an incident, the required exhaust air volume and the structural framework conditions determine, among other things, the number of ventilation stations and exhaust air fans. The respective characteristic curves and operating points of these axial fans are decisive for the choice of fan technology and can be found under "Basic fan technology" (chapter 3). In a ventilation system without extraction, mechanical longitudinal ventilation is provided. Depending on the type of traffic, the airflow velocity in the driving space may or may not have to be controlled. National guidelines (AT, CH, DE) are inconsistent and only partially describe the requirements regarding the control of airflow velocity. This statement refers to the currently valid specifications of the national directives mentioned in this report. For this reason, the lower and upper limits of longitudinal airspeed are theoretically determined and defined based on smoke stratification and escape velocity of tunnel users. To be able to realise precise control of air flow by means of jet fans, the influence of an active jet fan on the longitudinal airspeed was worked out and investigated with the help of a calculation model. The aim is to check the permissibility of sequential on/off operation and to clarify whether one or two speeds are sufficient or whether continuous speed variation is necessary. In this research report, the overpressure ventilation of a parallel safety tunnel to the tunnel driving space is considered. In contrast to longitudinal ventilation and exhaust air, the normal operation of the safety tunnel ventilation is designed for continuous operation. In event operation, depending on the ventilation system in the driving space, a defined minimum flow rate through the open emergency exit doors is required. This must be considered when designing the safety tunnel fans.

In addition, the various drive options for motors are presented in the fundamentals of drive technology. In particular, the asynchronous motor is considered, as this is the most common type of motor used today. To be able to limit the electrical current peaks during start-up, the following drive systems are considered: Direct On Line (DOL), star-delta connection, Dahlander winding, soft starter, and variable frequency drive (VFD). The complexity of the individual drives increases in the order from DOL through soft starter to VFD. In the chapter on variable frequency drives (chapter 5.3.5), the various VFD-designs are presented. A distinction is made between 6-pulse, 12-pulse and Active-Front-End (AFE)

drives. In addition, there are structural differences that allow energy to be regenerated during electric braking. In the other variants, the energy is converted into waste heat during electric braking.

For the elaboration of a decision matrix, the individual drive technologies are subdivided based on their grid compatibility: voltage change during start-up, and harmonic interference. When assessing the switching related voltage changes, the level of the voltage drop is compared with the corresponding limit values according to the technical rules [35]. The limit values differ depending on the position of the connection point. The voltage changes are represented by the ratio of the starting current I_A to the nominal current I_N . In the case of DOL this ratio is 8 to 10 times and in the case of a VSD, only 1.1 times. The values were verified within a measurement campaign in different tunnels with different fan types and drives. Harmonics have a negative impact on the power quality and should therefore be avoided. Depending on the technical design, frequency converters and soft starters generate harmonics with different harmonic currents. An assessment of the harmonics according to DACHCZ should only be carried out if loads that cause harmonic interference are operated on the system. The harmonic spectra of individual installations were measured and compared during the measurement campaign. It is noted that a 6-pulse VFD without mains choke has higher harmonic currents than a 6-pulse VFD with mains choke. When using 12-pulse VFDs or even AFE VFDs, these effects are significantly lower. The practical investigation of grid compatibility is described in chapter 6.4.

In a second step a single axial fan (without a specific area of application in the road tunnel) can be combined with the individual drive technologies, based on the principles developed. There, various criteria such as structural measures, energy efficiency, cable systems, etc. are considered and roughly assessed. For this preliminary assessment, the methodology of the morphological box is used. In the morphological box, the differences concerning the specific criteria are clearly shown. The DOL, star-delta circuit, Dahlander winding, soft starter and VFD drives are assessed. A further sub-classification of individual VFD types is only made in the further detailed examination. The ventilation systems air extraction, longitudinal ventilation and safety tunnel are already differentiated in the morphological box. This is mainly due to the different ramp-up times regarding aerodynamics. In the area of air extraction, a distinction is also made between axial fans with and without variable blade pitch during operation.

The structure of the morphological box will be used later for a specific examination and allocation of points for the ventilation systems exhaust air, longitudinal ventilation, and safety tunnel. To be able to evaluate the technically possible solutions, an aerodynamic process diagram and one concerning grid compatibility are introduced. There decisions are made for each ventilation system based on various parameters and application areas as to whether all drive systems are possible regarding aerodynamics. After this pre-selection, the various drive systems are examined for their project-specific grid compatibility. This depends—among other things—on the connection point to be considered, the transformer and its system power, and whether other consumers are connected to the respective connection point. The result of the process diagrams yields various technically possible solutions, which are now evaluated quantitatively according to specific criteria. The criteria are weighted specifically for each project (weighting per influencing factor). The product of this weighting and the general assessment of the respective drive system then results in the weighted assessment, or a score. The sum of the weighted evaluations is calculated to enable a quantitative comparison. For each technically feasible solution, the corresponding costs are considered in terms of investment, operating and maintenance costs, etc. The cost comparison of the various solutions flows into the evaluation. The cost comparison of the different solutions is included in the overall assessment. In the overall assessment, a choice can be made between the different ventilation variants combined with different drive systems; the solution with the highest score is presumably the best solution for this application.

This selection procedure is most easily applied to new construction projects. In the case of refurbishment projects or other special projects, further influencing factors may have to be considered, which are not directly illustrated here. Abb. 3 summarises the selection process.

In the case of the air extraction ventilation system, it was found that a staggered start-up is often necessary due to the voltage dips when starting the air extraction axial fans. This results in increased aerodynamic requirements for the fans (start-up against prevailing back pressure). These requirements can be met by using impellers with variable blade pitch during operation. The influencing factor "staggering of several exhaust fans" is given a value of 1 in the evaluation table, as this influencing factor is already queried as a decision criterion for the aerodynamic process.

In the evaluation of the longitudinal ventilation system, the requirement for flow velocity control in the aerodynamic process diagram plays a decisive role. Through this query, certain drive systems can be excluded even before the investigation of grid compatibility. In addition, the question arises as to which solution—many small jet fans, or few large jet fans—makes sense for the respective tunnel object. This investigation is illustrated by an example, the Musterloch tunnel. It is shown that in the example with flow velocity control, VFD solutions achieve a higher score in the weighted assessment, including consideration of the costs, and can thus be favoured as a technically possible solution.

The safety tunnel ventilation is required for the permanent generation of overpressure in the escape tunnel. This means that the influencing factor "energy efficiency" is given a higher weighting than with the other systems. The operating points for normal and event operation result from the volume flow required in each case. The theoretical design often deviates from the situation on site because leakages in the structure, doors, drainage, etc. turn out differently than assumed. It is therefore essential to allow flexible adjustment of the operating point during normal operation. This is done either by adjusting the blade angle or by adjusting the speed. The highest flexibility regarding the adjustment and optimisation of the operating point can be realised by an VFD solution.

With the introduction of the above-mentioned procedure, a decision-making aid for the planning and selection of the best possible and efficient system was evaluated regarding the different ventilation systems of exhaust air, longitudinal ventilation, and safety tunnel ventilation. In addition, a cost analysis was carried out for each technically possible solution, which enables a monetary comparison of the different technical solutions. However, it must be pointed out that the weighting of the different influencing factors can vary depending on the project. The result of the technically best solution can still be influenced and should therefore not be understood as a generally valid result. The decision on the appropriate weighting and thus also the decision on a suitable drive system lies with the respective project author with the corresponding expertise.

The differentiation of the various drive systems regarding the investigation of harmonics is marginal when using 12-pulse- and AFE VFDs and is not always decisive for the best possible technical solution. The choice of a suitable drive system is already queried in the process diagram with a yes or no answer.

The procedure presented here for selecting suitable combinations of fan type and drive system therefore serves as an initial decision-making aid for a preliminary assessment. The cost evaluation presented here is also very helpful for budgeting and can be used at various stages of the project, for example in a variant study. However, a detailed investigation and clarification in the further course of the project and especially in the investigation of aerodynamics and grid compatibility remain indispensable.

1 Ausgangslage, Ziele und Vorgehensweise

Die Lüftung von Strassentunneln hat zur Aufgabe, die Luftqualität des Fahrraums im laufenden Betrieb sicherzustellen (Normalbetriebslüftung). Des Weiteren sorgt die mechanische Lüftung, im Falle eines (Brand-) Ereignisses, für die bestmöglichen Voraussetzungen für die Flucht der Tunnelbenutzer und für die Intervention der Rettungs- und Ereignisdienste (Ereignislüftung).

Generell wird die mechanische Lüftung mit Axialventilatoren realisiert. Die geläufigen Systeme dazu sind: Längslüftung mittels Strahlventilatoren, konzentrierte oder verteilte Absaugung mittels Abluftventilatoren, verteilte oder konzentrierte Zuluft mittels Zuluftventilatoren und Belüftung von Fluchtwegen (Sicherheitsstollen) mittels SiSto-Ventilatoren.

Im Wandel der Zeit, bedingt durch Entwicklungen in der Fahrzeugtechnik sowie durch die Erkenntnisse aus grösseren Tunnelbränden, erfuhr die Lüftung dabei einen Wechsel von einer beinahe reinen Betriebsausrüstung zu einer Sicherheitsausrüstung. Dadurch veränderten sich sowohl die Vorgaben für die Auslegung der Anlagen als auch die Anforderungen an die Verfügbarkeit und die Redundanz. Die Taupunktlüftung, welche in Gegenverkehrstunneln dazu dient, beschlagene Scheiben zu verhindern, bildet dabei eine Ausnahme, da es sich sowohl um eine Betriebs- als auch um Sicherheitsausrüstung handelt.

Zudem erfuhren auch die Ventilatoren und deren Antriebe im Laufe der Zeit einige massgebliche Weiterentwicklungen. So wurden für einen effizienteren Betrieb und für die Regelung der geförderten Luftmenge Systeme eingeführt, welche es erlauben, den Anstellwinkel der Beschaukelung im laufenden Betrieb zu ändern. Dadurch ist es möglich, bei gleicher Drehzahl verschiedene Betriebszustände abzudecken. Durch die Einführung von Frequenzumrichter ist es möglich geworden, die Drehzahl der Asynchronmotoren zu steuern und dadurch mit festem Schaufelwinkel unterschiedliche Betriebspunkte zu erreichen. Für das Anfahren der teilweise sehr leistungsstarken Elektromotoren (bis zu 3 MW elektrische Leistung) können nebst den vorgängig erwähnten Lösungen weitere Anfahrssysteme zum Einsatz kommen mit dem Ziel, Anlaufströme und thermische Lasten zu reduzieren.

Basierend auf dem Stand der Technik und den geltenden Vorgaben ([1] - [11]) gilt es, im Rahmen der Planung und Ausführung einer Lüftung (Abluft- / Zuluft, Längslüftung, Lüftung von Sicherheitsstollen) Systementscheide zu treffen. Diese betreffen insbesondere die Ventilator-technologie und das Antriebssystem.

Im vorliegenden Forschungsprojekt werden die aerodynamischen Anforderungen an die Ventilatoren und Antriebssysteme, die daraus resultierenden Anforderungen an die Energieversorgung und die baulichen Gegebenheiten aufgezeigt. Anhand der aufgezeigten Kriterien und Hintergrundinformationen soll dem fachkundigen Nutzer die Möglichkeit gegeben werden, projektspezifische Entscheide zur einzusetzenden Technologie zu treffen.

Zu Beginn werden die notwendigen Grundlagen gesammelt und zusammengefasst. Die Grundlagen Strömungstechnik, Ventilator-technologie und Grundlagen Strassentunnel dienen zur Auslegung der Lüftung bzw. des Lüftungssystems. Dies ist Schritt 1 bei der Evaluation der technisch möglichen Lösungen (vgl. Abb. 4). Ziel dieses Schrittes ist es, die geeigneten Ventilator-Typen bzw. die verschiedenen Varianten von Kombinationen an Ventilator-Typen zu definieren.

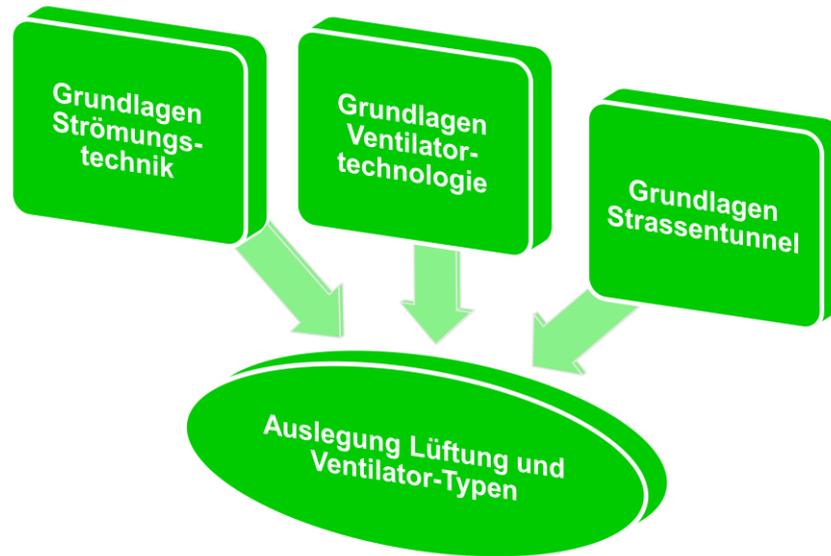


Abb. 4 Vorgehensweise Evaluation technisch mögliche Lösung – Schritt 1

Ziel von Schritt 2 ist es, die technisch möglichen Antriebssysteme aufzuzeigen, welche die aerodynamischen Anforderungen des Lüftungssystems erfüllen (vgl. Abb. 5). Zur Überprüfung der aerodynamischen Anforderungen wurde ein Prozessdiagramm entwickelt (vgl. Kapitel 7). Für die verschiedenen Lüftungssysteme, Abluft, Längslüftung und SiSto-Lüftung existiert jeweils ein eigener aerodynamischer Prozess. Anhand der zuvor ermittelten Parameter, welche als Eingangsgrösse dienen, werden die Ergebnisse, die technisch möglichen Antriebssysteme, ermittelt.

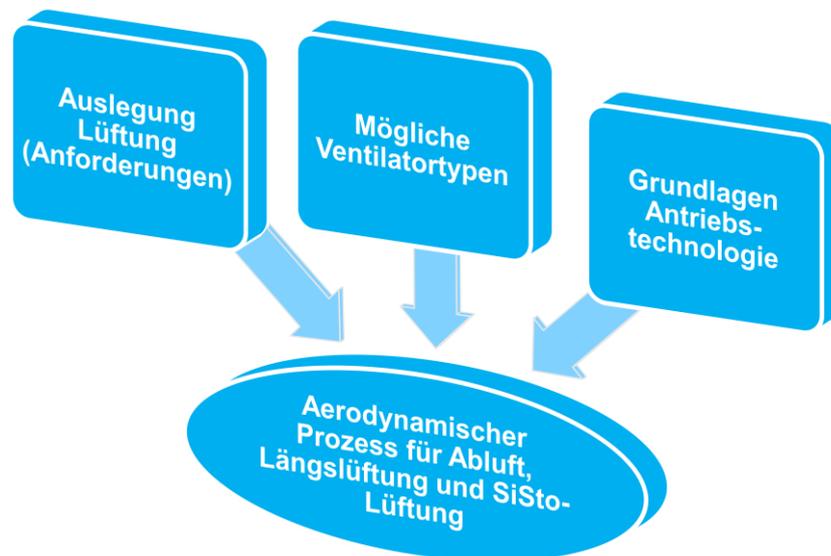


Abb. 5 Vorgehensweise Evaluation technisch mögliche Lösung – Schritt 2

Basierend auf der Grundlagen Antriebstechnologie, der Erarbeitung spezifischer Eigenschaften innerhalb des morphologischen Kastens und der Untersuchung Netzverträglichkeit werden im Schritt 3 (vgl. Abb. 6) die technisch möglichen Lösungen (bezogen auf die Aerodynamik) auf Netzverträglichkeit untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung Netzverträglichkeit ergeben abschliessend alle technisch möglichen Lösungen (bezogen auf die aerodynamischen und elektrischen Anforderungen).

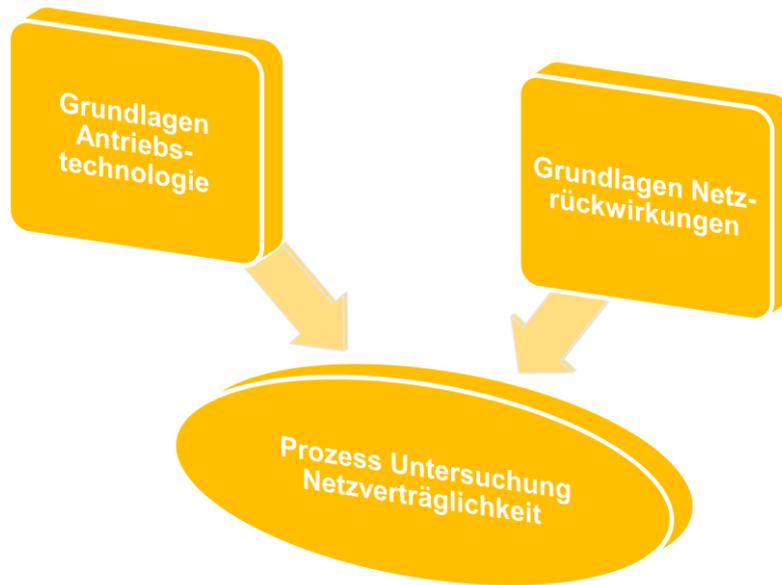


Abb. 6 Vorgehensweise Evaluation technisch mögliche Lösung – Schritt 3

Abschliessend können diese Lösungen bewertet werden. Diese Bewertung wird im Kapitel 7.1.2 aufgezeigt. Nach der Bewertung erfolgt die Kostenevaluation der verschiedenen Lösungen und Kombinationen. In der Gesamtbewertung kann die beste Lösung, gemäss dieser Evaluation, ermittelt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Bewertung der technisch möglichen Lösungen jeweils projektspezifisch erfolgt, so dass es je nach Projekt unterschiedliche Ergebnisse geben kann.



Abb. 7 Vorgehensweise Evaluation technisch mögliche Lösung – Zusammenfassung

2 Grundlagen Strömungstechnik

Die Strömungstechnik beschreibt das Verhalten von Fluiden. Bei der Lüftung von Strassentunnel bzw. bei der Ventilator-technologie spielt das Fördermedium Luft eine zentrale Rolle. Es gibt dabei verschiedene Gesetzmäßigkeiten bei Strömungsvorgängen, welche das Lösen von Strömungsproblemen in der Auslegung von durch- bzw. umströmten Bauteilen sowie der Überwachung von Strömungen dienen.

In den folgenden Unterkapiteln wird das strömende Medium als solches betrachtet. Darauf basierend werden die Bernoullische Gleichung und die Kontinuitätsgleichung eingeführt. Diese werden zu Beginn noch reibungsfrei betrachtet. Nach Einführung der möglichen Druckverluste wird die Bernoullische Gleichung für verlustbehaftete Strömungen vorgestellt.

2.1 Das strömende Medium

Bei den in Tunneln vorherrschenden Drücken und Temperaturen, wird Luft hinreichend genau durch das Modell eines idealen Gases beschrieben. Die allgemeine Gasgleichung beschreibt dann die Abhängigkeit der Zustandsgrößen voneinander:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

mit den Zustandsgrößen

- Temperatur T [K]
- Druck p [Pa]
- Dichte ρ [kg/m³]

und der Spezifischen Gaskonstante R [Nm/kg K].

Für Luft bei Standardbedingungen gilt:

- $R = 287$ Nm/kg K
- $T = 273$ K
- $P = 101325$ Pa.

Somit erhält man für die Dichte bei Standardbedingungen

$$\rho_0 = \frac{101325}{287 \cdot 273} = 1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

In der Lüftungstechnik ist die Druckabhängigkeit der Dichte beim Medium Luft zu vernachlässigen, d.h. Luft wird als inkompressibles Medium angenommen. Wohingegen die Temperaturabhängigkeit der Luftdichte zu berücksichtigen ist. Darüber hinaus ist auch die unterschiedliche Luftdichte auf verschiedenen Höhenlagen (Höhe über Meer) zu berücksichtigen.

2.2 BERNOULLISCHE Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung gilt für stationäre, reibungsfreie und inkompressible Fluide. Sie besagt, dass die spezifische Energie von Teilchen in einer Stromröhre nach dem Energieerhaltungssatz konstant bleibt, d.h. die Summe aus potenzieller Energie, kinetischer Energie und Druckenergie ist konstant.

$$\frac{\rho}{2} \cdot c^2 + p_s + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstant}$$

Wobei ρ der Luftdichte in kg/m³, c der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in m/s, p_s dem statischen Druck in Pa, g der Erdbeschleunigung 9.81 m/s² und h der geodätischen Höhe in m entspricht.

Bei Lüftungssystemen bzw. Luftströmungen kann das Gewicht der Luftsäule, d.h. der Term $\rho \cdot g \cdot h$ vernachlässigt werden [13].

Damit ergibt sich folgende vereinfachte Gleichung:

$$\frac{\rho}{2} \cdot c^2 + p_s = \textit{konstant}$$

Wobei der Term $\frac{\rho}{2} \cdot c^2$ den Geschwindigkeitsdruck bzw. dem dynamischen Druck p_d entspricht. Die Summe aus dynamischem und statischem Druck ergibt den Gesamtdruck p_t .

$$p_t = p_d + p_s$$

2.3 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung der Strömungslehre besagt, dass bei stationären oder inkompressiblen Strömungen durch einen Volumenkörper der Massenstrom konstant bleibt, d.h. die Summe der eintretenden und der austretenden Massenströme ist identisch.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Der Massenstrom ist dabei das Produkt aus der Dichte ρ und dem Volumenstrom \dot{V}

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2$$

2.4 Druckverluste

In realen Strömungen kommt es zu Druckverlusten, welche wie folgt unterschieden werden [13]:

Reibungswiderstand (Formel für Kreisrohre)

$$\Delta p_v = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot p_d$$

Mit:

- λ Reibungsbeiwert (dimensionslos)
- l Länge in m
- d_h hydraulischer Durchmesser in m
- p_d dynamischer Druck in Pa

Formwiderstand (z.B. Umlenkungen, Verzweigungen, Querschnittsänderungen, etc.)

$$\Delta p_v = \zeta \cdot p_d$$

Wobei ζ der Widerstandsbeiwert ist, welcher für spezifische Geometrien aus der Literatur entnommen werden kann.

2.5 BERNOULLISCHE Gleichung

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Druckverluste ergibt sich die Bernoulli-Gleichung für verlustbehaftete Strömungen wie folgt:

$$\frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 + p_1 = \frac{\rho}{2} \cdot c_2^2 + p_2 + \sum_{i=1}^n \zeta \cdot p_{di} + \sum_{i=1}^m \lambda \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot p_{di}$$

3 Grundlagen Ventilorttechnologie

Bei der Grundlagenbeschreibung wird der aktuelle Stand der Technik der Ventilatoren erarbeitet und dokumentiert. Der Fokus wird auf die Anwendung im Tunnel gelegt.

Zu Beginn werden alle möglichen Bauformen der Ventilatoren vorgestellt. Diese werden dann hinsichtlich ihrer Anwendung im Strassentunnel auf die axiale Bauart eingegrenzt. Jeder Ventilator besitzt dabei eine typische Kennlinie und Betriebspunkte. Der von einem Ventilator geförderte Volumenstrom respektive die erzeugte Druckerhöhung stehen dabei in einem spezifischen Zusammenhang (vgl. Kapitel 3.2).

Gemäss ihrer spezifischen Anwendung im Strassentunnel werden die Axialventilatoren klassifiziert. Es werden dabei Strahl-, Abluft-, Zuluft- und Saccardoventilatoren unterschieden. Für die Belüftung der Sicherheitsstollen werden sogenannte SiSto-Ventilatoren verwendet.

3.1 Bauformen

Ventilatoren können anhand ihrer Bauform und Funktion unterschieden werden. Im Folgenden wird ein Überblick über die Bauformen, die Kennlinien respektive die Betriebspunkte, sowie die einzelnen technischen Lösungen geben.

Im Wesentlichen gibt es vier verschiedene Bauformen von Ventilatoren, deren Bezeichnung sich nach dem Verlauf der Flusslinie durch das Laufrad richtet [13]:

Tab. 4 Bauformen von Ventilatoren

Bauform	Beschreibung
axiale Bauart	die Flusslinie verläuft in axialer Richtung gerade durch das Laufrad
radiale Bauart mit Spiralgehäuse	die Flusslinie verläuft in radialer Richtung gerade durch das Laufrad
halbaxiale Bauart	die Flusslinie verläuft gekrümmt durch das Laufrad
radiale Bauart ohne Spiralgehäuse	die Flusslinie verläuft ähnlich wie bei der radialen Bauart mit Spiralgehäuse

Sowohl Radialventilatoren als auch Ventilatoren der Bauart halbaxial werden aufgrund ihres grösseren Raumbedarfs und der wenig geeigneten Charakteristiken (Verhältnis Volumenstrom und Druckerhöhung) in Europa nicht als Tunnelventilatoren eingesetzt. Der Hauptfokus dieser Untersuchung liegt somit bei den Axialventilatoren. Die anderen Bauformen werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Aufbau Axialventilatoren

Der allgemeine Aufbau der Axialventilatoren besteht aus den folgenden Komponenten:

Tab. 5 Aufbau und Funktion Axialventilator

Komponente	Funktion
Einströmdüse mit Gehäuse	Erzeugung einer gleichmässigen Geschwindigkeitsverteilung vor dem Laufrad
Vorleitwerk	Umlenkung der Strömung → Reduktion des Dralls in der Strömung
Laufrad	Energieumsetzung → Druckerzeugung
Antriebsmotor	Antrieb
Nachleitwerk	Umlenkung der Strömung → Reduktion des Dralls in der Strömung Abströmung hinter dem Ventilator ist axial

Die Leitwerksanordnung kann darüber hinaus bei Axialventilatoren variieren. Folgende Leitwerksanordnungen sind in der Lüftungstechnik zu finden:

- Axialventilator ohne Leitwerk
- Axialventilator mit Vorleitwerk
- Axialventilator mit Nachleitwerk

Je nach Leitwerksanordnung wird die absolute Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst.

Die Laufschaufelanordnung hat Einfluss auf die Kennlinie des Ventilators. Es gibt zwei unterschiedliche Ausführungen der Laufschaufelanordnung:

- Starre, nicht im Betrieb verstellbare Laufschaufeln
- Im Betrieb verstellbare Laufschaufeln

Innerhalb der Gruppe Axialventilatoren wird in der Tunnellüftung zwischen Abluftventilatoren, Zuluftventilatoren, Strahlventilatoren, Saccardo-Ventilatoren und Sicherheitsstollen-Ventilatoren (SiSto-Ventilatoren) unterschieden.

In diesem Bericht wird der Begriff «Axialventilator» nur in Zusammenhang mit der Bauform eines Ventilators verwendet. Die spezifische Anwendung des Axialventilators im Strassentunnel bestimmt dessen Bezeichnung.

3.2 Kennlinien und Betriebspunkt

Der von einem Ventilator geförderte Volumenstrom respektive die erzeugte Druckerhöhung stehen in einem spezifischen Zusammenhang. Dieser Zusammenhang wird als Ventilator-kennlinie bezeichnet. Die Form und Position der Kennlinie ist abhängig von der Bauform des Ventilators sowie von dessen Auslegung und Betriebszustand. In Abb. 8 ist eine typische Kennlinie eines Radial- und eines Axialventilators dargestellt. Hat ein Ventilator die Möglichkeit, seine Kennlinie in Form und / oder Lage zu verändern, spricht man von einem Kennfeld, gebildet aus allen möglichen Kennlinien.

Beim Axialventilator wird zwischen dem stabilen und dem instabilen Bereich der Kennlinie unterschieden. Der stabile und der instabile Bereich werden durch ein lokales Maximum der Kennlinie voneinander getrennt. Steigt die nötige Druckerhöhung über diesen Wert an (kritischer Punkt), liegt die Strömung nicht länger an den Laufschaufeln des Ventilators an (Strömungsabriss). Damit sinken die geförderte Luftmenge sowie auch der erzeugte Druck. Dieser Strömungsabriss führt zu zusätzlichen und längerfristig unzulässigen mechanischen Belastungen der Schaufeln. Aufgrund des dynamischen, instabilen Verhaltens in diesem Bereich der Kennlinie kommt es zum so genannten Pumpen, einer zyklischen Veränderung des Betriebspunktes. Entsprechend sollte ein Ventilator stets mit einem ausreichenden Abstand zwischen Betriebspunkt und dem kritischen Punkt betrieben werden.

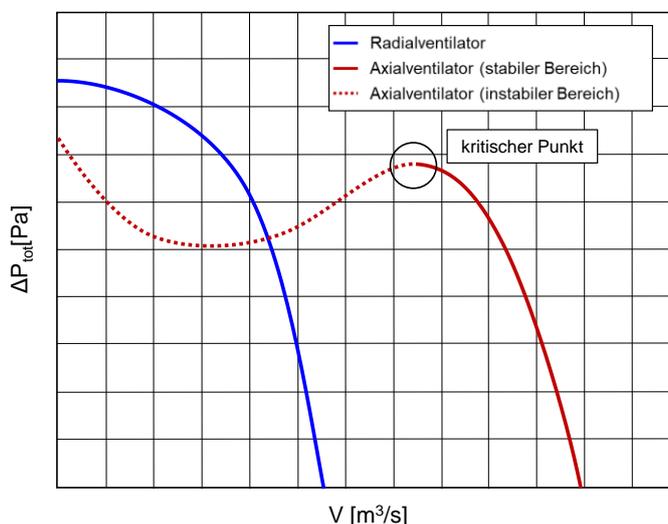


Abb. 8 Ventilator-kennlinie Radialventilator und Axialventilator (lineare Darstellung)

Werden zwei oder mehr Ventilatoren seriell oder parallel betrieben, so addieren sich deren Kennlinien entweder bezüglich des Drucks (serieller Betrieb) oder bezüglich des Volumenstroms (paralleler Betrieb). Hinsichtlich der Bildung der Kennlinie im Parallelbetrieb gilt es zu beachten, dass im instabilen Bereich der Kennlinie für eine spezifische Druckerhöhung mehrere Betriebspunkte mit unterschiedlichen Volumenströmen vorhanden sind. Die Ermittlung des instabilen Bereichs ist Kapitel 3.3.5 beschreiben.

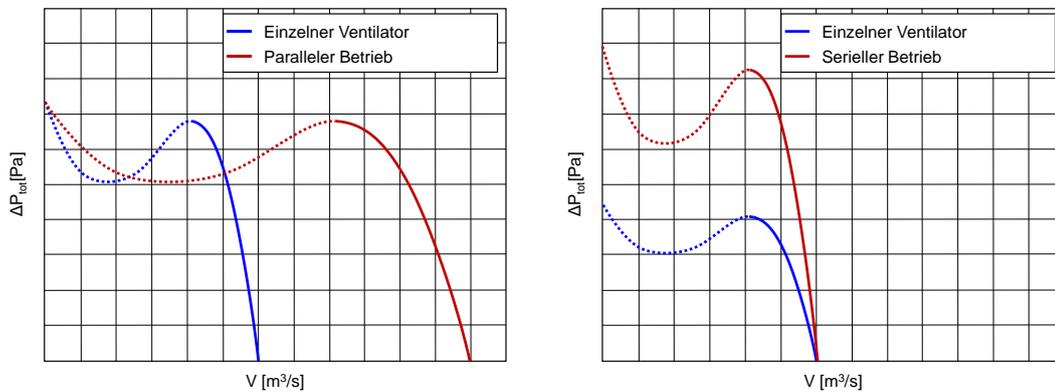


Abb. 9 Ventilator Kennlinien im Einzelbetrieb und im parallelen Betrieb von 2 Ventilatoren (links): Addition Volumenstrom bzw. im Einzelbetrieb und im seriellen Betrieb von 2 Ventilatoren (rechts): Addition Druckerhöhung.

Die Energie, die aufgebracht werden muss, um eine bestimmte Strömung zu erzeugen, hat den Druckverlusten zu entsprechen. Entsprechend den Grundgleichungen aus Kapitel 2.4 und 2.5 ist der Zusammenhang quadratischer Natur. Der Zusammenhang zwischen den Volumenströmen und den Druckverlusten einer Anlage wird somit durch eine quadratische Parabel, die so genannte Anlagenkennlinie beschrieben. Bei veränderbarer Geometrie (z.B. je nach Position der Absaugung im Strassentunnel) ändert sich die Form der Anlagenkennlinie entsprechend den grösseren oder kleineren Druckverlusten. In Abb. 10 sind exemplarische Anlagenkennlinien dargestellt, einmal in linearer Darstellung (links), einmal in doppelt logarithmischer Darstellung (rechts). Eine Veränderung des Strömungswiderstands entspricht einer Parallelverschiebung der Geraden mit Steigung 2.

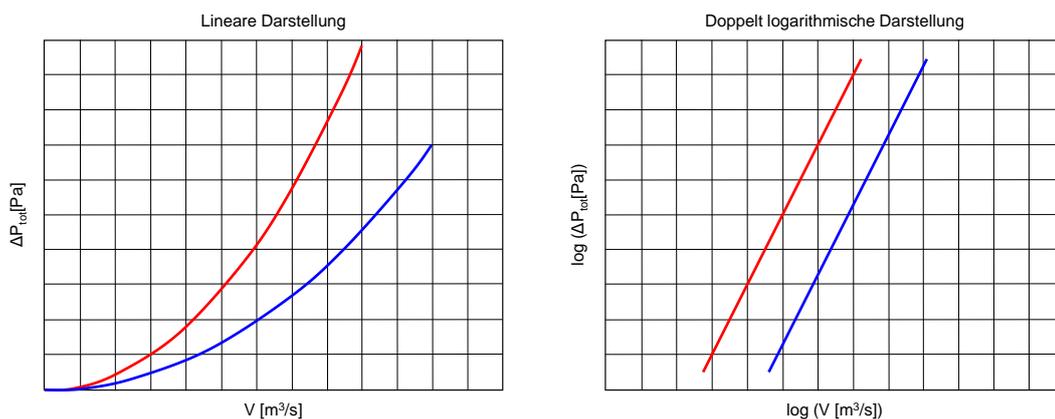


Abb. 10 Exemplarische Anlagenkennlinien im linearen pV -Diagramm (links) und im doppelt logarithmischen pV -Diagramm

Der Schnittpunkt aus Ventilator Kennlinie und Anlagenkennlinie ergibt den Betriebspunkt des Ventilators und damit den effektiv geförderten Volumenstrom. Bei Veränderung der Anlagenkennlinie (z.B. Veränderung der Absaugstelle entlang des Tunnels) verschiebt sich der Betriebspunkt auf der Ventilator Kennlinie. Besitzt ein Ventilator die Möglichkeit, seine Kennlinie in Form / Lage anzupassen, so verschiebt sich der Betriebspunkt entlang der Anlagenkennlinie.

3.3 Abluftventilatoren

3.3.1 Anwendung

Abluftventilatoren werden verwendet, um Luft resp. Rauch aus dem Tunnelfahrraum abzusaugen. Die Abluft wird dabei verteilt über kleinere Öffnungen (Abluftschlitze oder Abluftklappen in Zwischenstellung) oder konzentriert über wenige offene Abluftklappen abgesaugt.

Durch den Betrieb eines oder mehrerer Abluftventilatoren wird im Fahrraum des Tunnels ein Unterdruck erzeugt. Dadurch wird die Luft durch einen vorhandenen Abluftkanal oder direkt abgesaugt. Die abgesaugte Luft resp. der Rauch wird mittels eines Kamins an die Umgebung abgegeben.

3.3.2 Anforderungen an Abluftventilatoren

An die Abluftventilatoren werden Anforderungen gemäss *Tab. 6* gestellt, wobei die primäre Anforderung die Förderung eines Abluftvolumenstroms ist.

Tab. 6 Überblick Anforderungen an Abluftventilatoren

Anforderung	Übliche technische Lösung
Förderung einer Mindestabluftmenge nach [1]	Berücksichtigung der Abluftmengen im Ereignisfall je nach Verkehrssituation, der Temperaturanforderung und der geforderten Redundanz
Temperaturfestigkeit 250°C resp. 400°C (gemäss [1]) für die Absaugung im Ereignisbetrieb	Der gesamte Abluftventilator muss während 2 Stunden bei 250°C resp. 400°C betrieben werden können. Dies bedingt eine entsprechende Konstruktion (z.B. Schaufelspalte) und die Ausstattung mit einem temperaturfesten Motor. Lösungen mit Fremdkühlung sind in der Schweiz nicht mehr üblich. In anderen Ländern, wie z.B. Österreich, kommt Fremdkühlung zum Einsatz.
Nutzungsdauer von 30 Jahren (gemäss [1])	Die Abluftventilatoren inkl. der Antriebsmotoren genügen in der Regel bei jährlicher Wartung dieser Anforderung.
Kennlinie / stabile Betriebspunkt	Der Abluftventilator muss für die geforderten Betriebspunkte ablösungsfrei zu betreiben sein.
Anfahren	<p>Normalbetrieb: Das Anfahren kann langsam erfolgen unter Optimierung des Anlaufstroms. In der Regel ist es für die Funktion des Abluftsystems ausreichend, wenn die Abluftmenge nach ca. 120 s erreicht wird.</p> <p>Ereignisbetrieb: Das Anfahren soll grundsätzlich möglichst schnell erfolgen, um die Rauchgase abzusaugen zu können. Unter Berücksichtigung des Anlaufs des Abluftventilators und der notwendigen Beschleunigung der Luftsäule (siehe [16]) wird der Nennvolumenstrom typischerweise ca. 50 – 90 s nach Start des Abluftventilators erreicht (siehe auch Abb. 17).</p>
Abbremsen	<p>Normalbetrieb: Ein Abluftventilator kann, aber muss nicht aktiv abgebremst werden. Nachdem der Antriebsmotor abgeschaltet wurde, läuft der Abluftventilator so lange aus, bis die Drehzahl unter eine vorgegebene Grenze abgesunken ist oder eine gewissen Zeit überschritten wurde. Danach wird die Ventilatorabsperrklappe geschlossen.</p> <p>Ereignisbetrieb: Ein Abluftventilator kann, aber muss nicht aktiv abgebremst werden, solange es nach einem Ereignisbetrieb zu einem geregelten Abschalten des Abluftsystems kommt. Nachdem der Antriebsmotor abgeschaltet wurde, läuft der Abluftventilator so lange aus, bis die Drehzahl unter eine vorgegebene Grenze abgesunken ist oder eine gewissen Zeit überschritten wurde. Danach wird die Ventilatorabsperrklappe geschlossen.</p>

3.3.3 Aufbau der Abluftventilatoren

Das, was gemeinhin als Ventilator bezeichnet wird, besteht eigentlich aus mehreren Teilen. Diese Teile werden gesamthaft Ventilatorstrecke genannt. Die Bestandteile einer typischen Ventilatorstrecke eines Abluftsystems sind (Aufzählung in Strömungsrichtung, Reihenfolge entspricht der gängigen Praxis):

- Gitter Schutzgitter vor der Einströmdüse
- Einlaufdüse Einströmdüse
- Übergang Flexibles Band / Manschette / Kompensatoren
- Aktivteil (VME) Gehäuse, Motor, Laufrad, Leitwerk, Sensorik, etc.
- Übergang Flexibles Band / Manschette / Kompensatoren
- Auslauf Diffusor
- Absperrklappe Absperrklappe druckseitig mit Antrieb

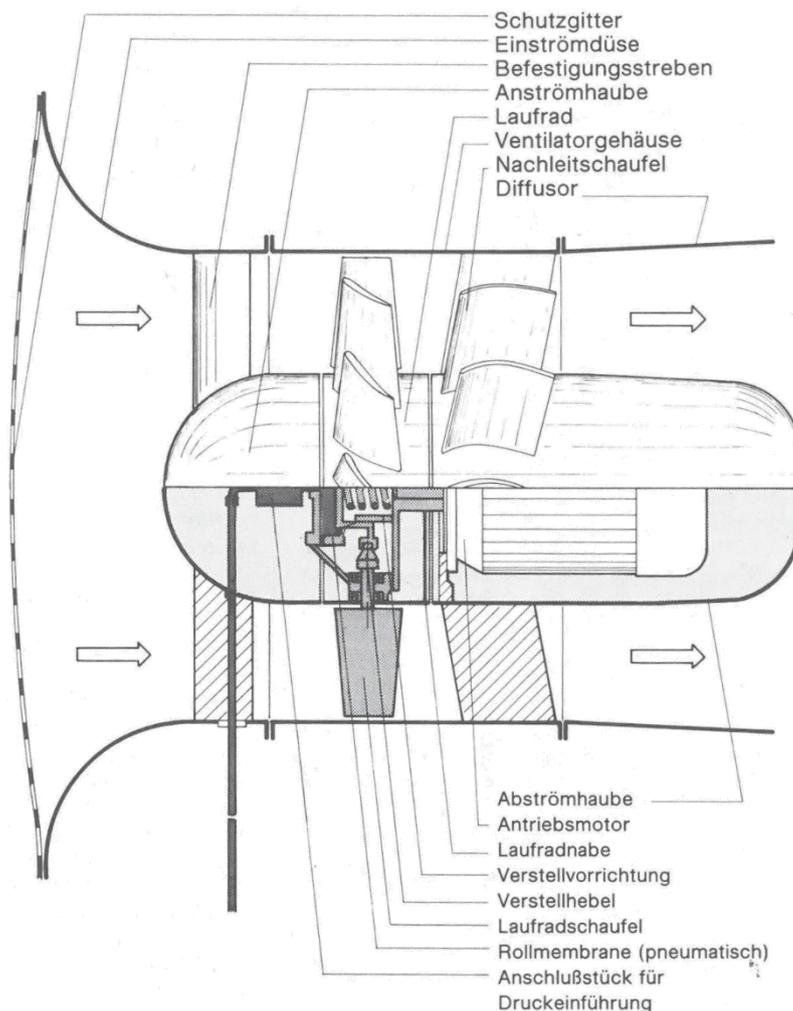


Abb. 11 Aufbau Abluftventilator mit verstellbaren Laufschaufeln (nach Voith Getriebe KG, Bereich Lufttechnik,[14])

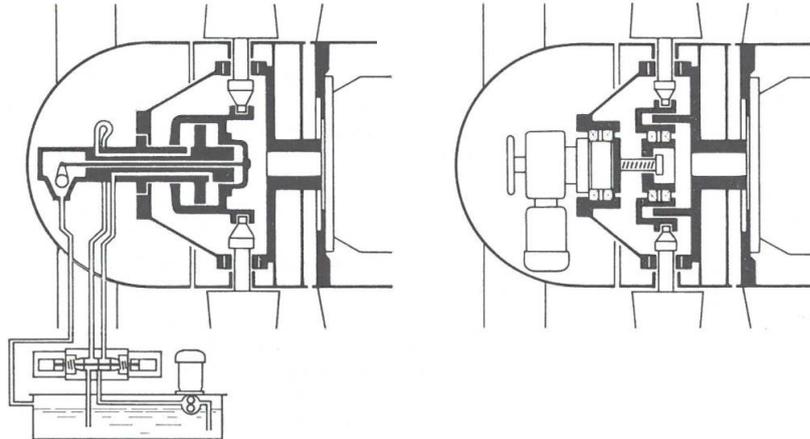
Bei den Abluftventilatoren unterscheidet man 2 verschiedenen Bauarten von Laufrädern:

- Laufrad mit festen Laufschaufeln
- Laufrad mit verstellbaren Laufschaufeln

Je nach Einsatzgebiet, Anlauf und Ventilator Kennlinie kommen unterschiedliche technische Lösungen zum Einsatz. Die Laufschaufeln der Laufräder mit verstellbaren Laufschaufeln können dabei im Betrieb hydraulisch oder elektromechanisch verstellt werden, vgl. Abb. 12.

Tab. 7 Bauarten von Laufrädern

Beschreibung	Eigenschaften
Laufrad mit festen Laufschaufeln	Die Laufschaufeln können nicht oder nur im Stillstand manuell zur Anlagenoptimierung verstellt werden. Die Form der Ventilatorkehlennlinie ist unveränderlich.
Laufrad mit verstellbaren Laufschaufeln	Die Laufschaufeln resp. deren Anstellwinkel werden (auch im laufenden Betrieb) durch einen hydraulischen oder elektromechanischen Verstellmechanismus während des Betriebs verstellt. Die Form und die Lage der Ventilatorkehlennlinie verändert sich in Abhängigkeit des eingestellten Schaufelwinkels.



Laufrad mit in Betrieb hydraulisch gemeinsam verstellbaren Schaufeln

Laufrad mit in Betrieb elektromechanisch gemeinsam verstellbaren Schaufeln

Abb. 12 Aufbau der Nabe bei hydraulischer resp. elektromechanischer Schaufelverstellung (nach Voith Getriebe KG, Bereich Lufttechnik,[14]).

In der dargestellten Bauweise ist der Stellantrieb bei der elektromechanischen Schaufelverstellung der Temperatur des Fördermediums ausgesetzt. Es bestehen technische Lösungen mit aussenliegendem Antrieb, bei welchen der Antrieb einfacher temperaturschützt werden kann.

3.3.4 Variation des Betriebspunkts

Der Bedarf zur Variation des Betriebspunktes von Axialventilatoren ergibt sich aus dessen Einsatz in unterschiedlichen Betriebsarten (Normalbetrieb, Ereignisbetrieb, vgl. Kapitel 4). In Tab. 8 sind die gängigsten Methoden zur Variation des geförderten Volumenstroms zusammengefasst. Im Strassentunnel finden davon die Drehzahländerung und die Schaufelverstellung im Betrieb Anwendung.

Tab. 8 Möglichkeiten zur Variation des Volumenstroms von Axialventilatoren, [13]

Art	Beschreibung
Drosselung	<p>Via verstellbare Drossel/Blende kann der Druckverlust der Anlage und somit die Anlagenkennlinie beeinflusst werden.</p> <p>Vorteile: Günstige Lösung durch Einbau einer Drosselung z.B. in Form einer (ggf. zusätzlichen) Klappe</p> <p>Nachteile: Durch die Drosselung wird durch den zusätzlichen Widerstand der Drossel Energie «vernichtet». Zudem verschiebt sich bei starker Drosselung der Betriebspunkt des Ventilators in Bereiche mit reduziertem Wirkungsgrad.</p>
Drehzahländerung	<p>Drehzahlvariation mittels Frequenzumrichter oder durch Einsatz eines mehrstufigen Motors.</p> <p>Durch die Änderung der Drehzahl des Elektromotors (z.B. mittels Frequenzumrichter oder durch Einsatz eines mehrstufigen Motors) wird die Lage der Ventilator-kennlinie verändert. Der aerodynamische Wirkungsgrad bleibt hierbei unverändert.</p> <p>Vorteile: Die Anlage kann bedarfsgerecht betrieben werden (Energieeinsparung)</p> <p>Nachteile: Investition für Frequenzumformer oder Motoren mit mehreren Drehzahlen</p>
Schaufelverstellung im Betrieb	<p>Durch Änderung des Schaufelwinkels im Betrieb (hydraulisch / elektromechanisch angetrieben) wird die Ventilator-kennlinie in ihrer Form und Lage verändert. Der Wirkungsgrad des Ventilators (Wirkungsgrad Muschelkurven des Ventilators) verändert sich hierbei.</p> <p>Vorteile: Veränderung des Betriebspunkt ohne grössere antriebsseitige Verluste. Bietet zudem erweiterte Möglichkeiten zum Anfahren des Ventilators gegen einen bestehenden Gegendruck.</p> <p>Nachteile: Investitionskosten und Wartung der Schaufelverstellung.</p> <p>Wird der Betriebspunkt entlang ein und derselben Anlagenkennlinie verschoben, so verändert sich dadurch der aerodynamische Wirkungsgrad des Ventilators.</p>
Drallregler	<p>Verstellbare Vorleitwerke ändern die Anströmung der Laufradschaufeln und damit den relativen Anstellwinkel der Laufradschaufeln.</p> <p>Vorteile: Eher geringe Investitionskosten.</p> <p>Nachteile: Rapide Verschlechterung des Wirkungsgrads, wenn grosse Verstellbereiche gefordert werden. Daher bei grösseren Volumenstromänderungen am besten mit einem mehrstufigen Motor oder Frequenzumrichter zu kombinieren.</p>

In Abb. 13 werden Drehzahländerung und Schaufelverstellung im Betrieb hinsichtlich der resultierenden Kennfelder miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass der instabile Bereich im Fall des Ventilators mit Schaufelverstellung im Betrieb deutlich kleiner ausfällt als bei Drehzahlregelung und festen Schaufeln. In der Praxis macht sich dieser Unterschied insbesondere beim Anfahren der Ventilatoren bemerkbar. Der Ventilator mit Drehzahlregelung muss stets auch Volumenstrom fördern, um eine Druckerhöhung erreichen zu können. Der Ventilator mit Schaufelverstellung kann im Gegensatz dazu bereits bei minimalem Volumenstrom eine grosse Druckerhöhung erzielen. Somit kann der Ventilator gegen einen bestehenden Gegendruck angefahren werden, ohne Gefahr von Strömungsabriss oder Rückströmung. Ausserdem zeigt Abb. 13 den Einfluss der Änderung von Drehzahl oder Schaufelwinkel auf den Wirkungsgrad.

Dabei wird deutlich, dass bei Verschiebung des Betriebspunkts entlang der Anlagenkennlinie der Wirkungsgrad des Ventilators mit Frequenzumrichter im Gegensatz zur Lösung mit Schaufelverstellung, unverändert bleibt.

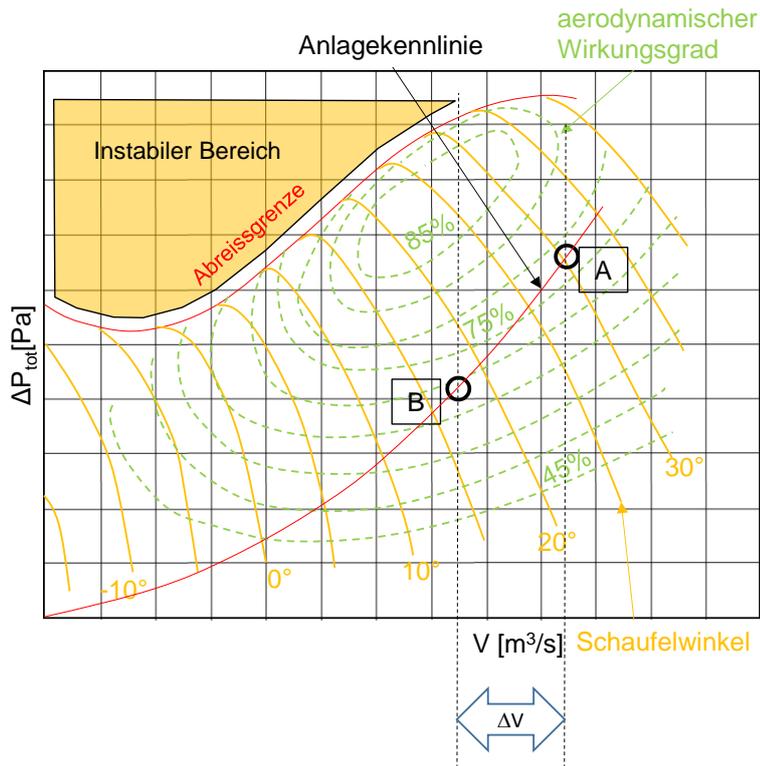
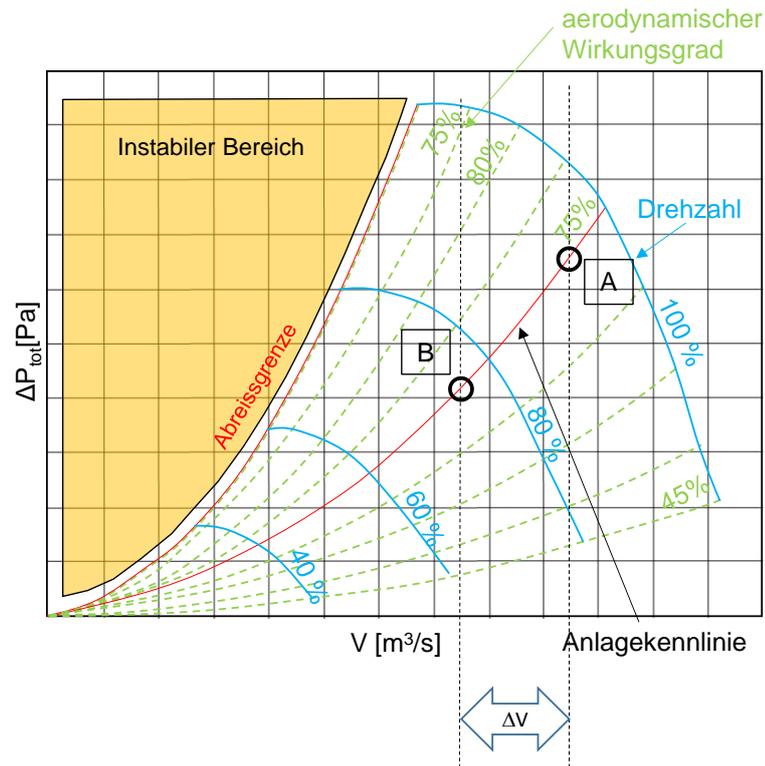


Abb. 13 Veränderung des Betriebspunkt von A nach B entlang der Anlagenkennlinie für einen Axialventilator mit stufenloser Drehzahlregelung und festen Schaufeln (obere Graphik) resp. konstanter Drehzahl und Schaufelverstellung unter Betrieb (untere Graphik).

Hochfahren

Im Ereignisbetrieb müssen häufig zwei oder mehrere Abluftventilatoren zeitgleich oder hintereinander gestartet werden. Es werden folgende Szenarien unterschieden:

- paralleles Hochfahren / zeitgleicher Start beider Abluftventilatoren
- sequenzielles Hochfahren zu einem bereits laufenden beziehungsweise zu einem kurz zuvor gestarteten Abluftventilator

Für ein sequenzielles Hochfahren, welches bei allen Anlassverfahren ausser FU zum Tragen kommt, bedarf es einer entsprechenden Ventilator Kennlinie, da der als zweites zu startende Abluftventilator unter Berücksichtigung der vorherrschenden Druckverhältnisse angefahren werden muss (gegen den Druck, welcher vom anderen Ventilator erzeugt wird). Temporär kann es hier zu Strömungsablösungen am Laufrad kommen. Treten diese Strömungsablösungen länger auf, so kann der Ventilator beschädigt werden.

Bei der Auswahl des Abluftventilators für ein Abluftsystem mit 2 oder mehreren Ventilatoren im Parallelbetrieb muss daher ein ausreichender stabiler Betrieb sichergestellt werden.

Als Faustformel wird häufig eine Druckreserve des höchstgelegenen Betriebspunkts zum Ablösepunkt von 15 % gefordert. Die Anwendung der Faustformel ist ausreichend, wenn bei einer Anlage ein Zuschalten eines Ventilators (sequenzielles Anfahren) zwingend gefordert wird. Eine detaillierte Untersuchung ist erforderlich. Dabei ist insbesondere der instabile Bereich zu betrachten, welcher sich durch die Addition der Ventilator Kennlinien ergibt. Dabei sind für den Bereich der Druckerhöhung DP, für welchen pro Druckerhöhung mehrere Volumenströme möglich sind (Punkte A, B, C in Abb. 15), bei der Addition der Kennlinie alle Kombinationen der Volumenströme zu bilden, um den instabilen Bereich der Kennlinie im Parallelbetrieb korrekt zu ermitteln.

Die nachfolgende Abbildung zeigt, wie sich aus der Kennlinie eines einzelnen Ventilators die Kennlinie im Parallelbetrieb zweier identischer Ventilatoren ergibt. Die Kennlinie des einzelnen Ventilators ist dabei gepunktet dargestellt, die zweifarbig gepunkteten Linien entsprechen den unterschiedlichen Kombinationen und die durchgezogene Linie entspricht der Verdoppelung der Volumenströme. Abb. 15 zeigt den deutlich ausgeprägteren instabilen Bereich gegenüber der verdoppelten Kennlinie. Je nach Grösse und Form sowie je nach Anlagenkennlinie kann ein weiterer Ventilator nicht sequenziell hochgefahren werden, da dessen Betriebspunkt im Laufe des Hochfahrens in diesen instabilen Bereich zu liegen kommt.

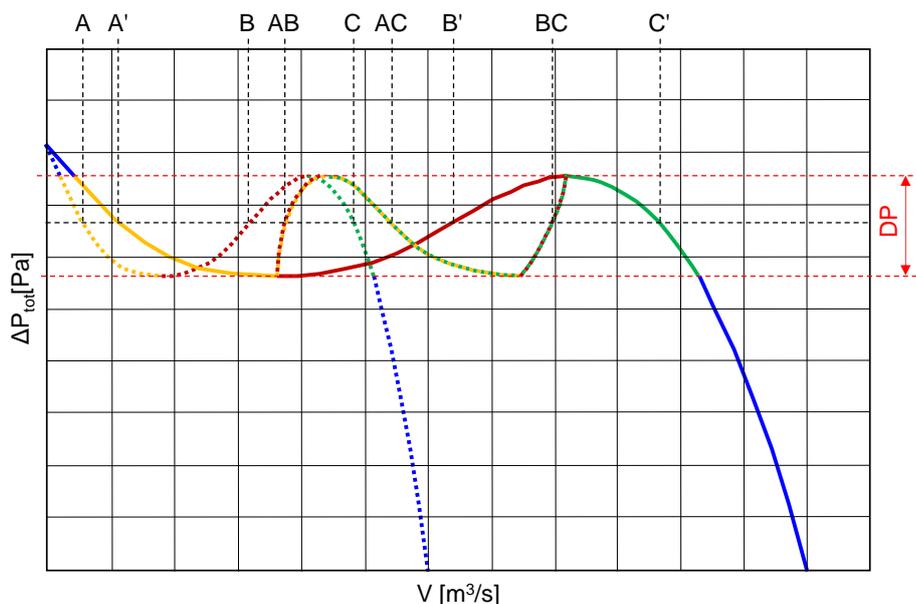


Abb. 15 Konstruktion der kombinierten Kennlinie im Parallelbetrieb. Diese wird gebildet durch alle Tupel der Volumenströme.

In Abb. 16 überschneiden sich die Ventilator-kennlinie der zwei parallelen Ventilatoren und die Anlagenkennlinie des sequenziell gestarteten Ventilators. Aufgrund der Ablösung der Strömung am hochfahrenden Ventilator wird dieser den angestrebten Betriebspunkt «X» nicht erreichen können und muss ausgeschaltet werden, um nicht nachhaltig beschädigt zu werden. Eine Reduktion des Anfangsdrucks z.B. durch die Reduktion der Drehzahl des bereits betriebenen Ventilators führt zur Senkung des Druckniveaus der Anlagenkennlinie für den sequenziell gestarteten Ventilator. So kann es u.U. trotz ungünstiger Kennlinie möglich sein, den Ventilator sequenziell zu starten.

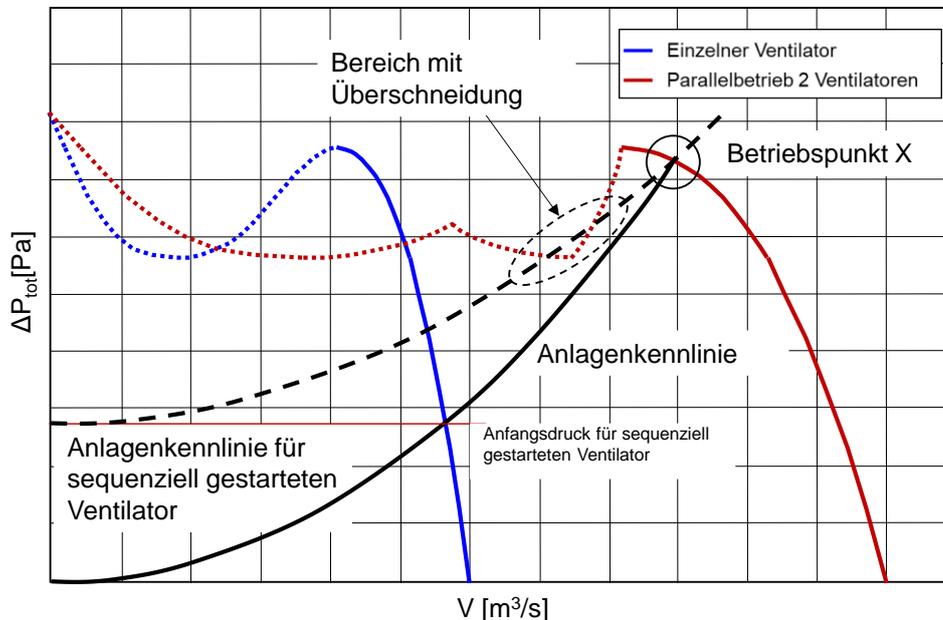


Abb. 16 Überschneidung der Anlagekennlinie des sequenziell gestarteten Abluftventilators (schwarz, gestrichelt) mit dem instabilen Bereich der Ventilator-kennlinie bei Parallelbetrieb (rot, gepunktet).

3.3.6 Einflüsse auf die Anlaufzeit

Die Anlaufzeit eines Abluftventilators wird durch das jeweilige Antriebssystem, die geometrischen Rahmenbedingungen (Tunnel- / Kanallänge) und die Stellzeit der Hilfsantriebe (bei Laufschaufelverstellung) beeinflusst. Nachfolgend wird der Einfluss der geometrischen Rahmenbedingungen sowie der Einfluss der Laufschaufelverstellung erläutert. Der Einfluss des Antriebssystems wird in Kapitel 7 erläutert.

Die Tunnelgeometrie beeinflusst die Anlaufzeit über die Masse der zu beschleunigenden Luft. In einem Tunnel von 2000 m Länge, 50 m² Fahrraumquerschnitt und 12 m² Abluftkanalfläche sind insgesamt ca. 148'800 kg Luft zu beschleunigen. Der Grossteil (Luft im Fahrraum) ist zwar nur auf tiefe Geschwindigkeiten (typ. 2 – 4 m/s) zu beschleunigen, der andere Teil (Luft im Abluftkanal) dafür auf umso höhere Geschwindigkeiten (15 – 20 m/s). Die zur Verfügung stehende Energiemenge ist durch die Leistung des Ventilators und die Effizienz der Energieübertragung an das strömende Medium limitiert. Diese ist insbesondere vom allfälligen Strömungsabriss an den Laufschaufeln abhängig.

Bei Ventilatoren ohne Schaufelverstellung tritt zwangsläufig beim Anfahren ein Strömungsabriss auf. Bei Ventilatoren mit Laufschaufelverstellung (Annahme: ideale Einstellung) kann der Strömungsabriss durch das stetige Erhöhen des Schaufelwinkels (Verhinderung Strömungsabriss) vermieden werden. Somit steht im Falle von Ventilatoren mit Laufschaufelverstellung stets der grösstmögliche Druck für die Beschleunigung der Luftsäule zur Verfügung.

Die Thematik des Anlaufvorgangs und der Anlaufzeit wird in [16] betrachtet. Abb. 17 zeigt als Ergebnis den Zusammenhang zwischen Kanallänge, Anlaufzeit und Laufradtyp. Dabei wurde angenommen, dass der Ventilator innert 10 s seine Nenndrehzahl erreicht. Es zeigt sich, dass insbesondere bei langem Abluftkanal / Tunnel ein signifikanter Unterschied zwischen Ventilator mit / ohne Laufschaufelverstellung besteht.

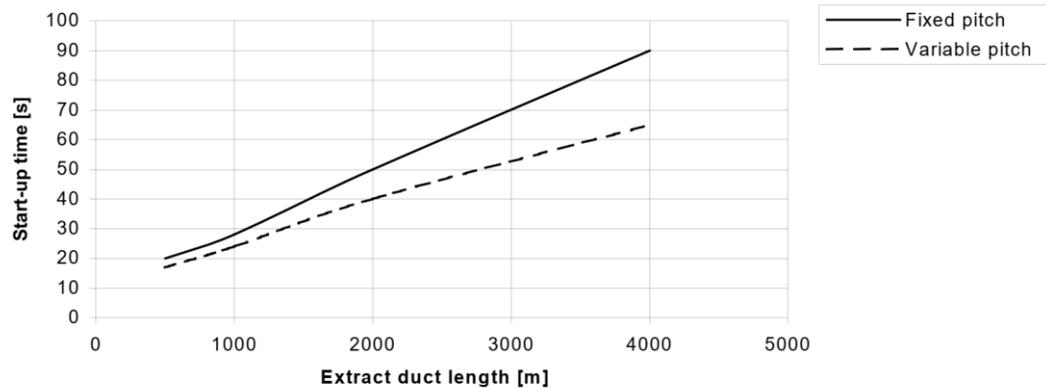


Abb. 17 Einfluss der Länge des Abluftkanals auf die Anfahrzeit von Abluftventilatoren [16]

Die Technologie / Stellzeit des Antriebs der Laufschaufelverstellung ist in der Regel irrelevant bezüglich Anlaufzeit. Diese wird primär durch die Masse / Trägheit der zu bewegenden Luftmasse bestimmt. Im Falle einer Schaufelverstellung wird der Schaufelwinkel so angefahren, dass dabei aerodynamische Ablösung vermieden wird. Die typischen Stellzeiten der Antriebe (siehe Tab. 10) entspricht den aerodynamisch sinnvollen Rampen und verlängern so die Hochlaufzeit nicht zusätzlich.

Tab. 10 Typische Stellzeiten für Stellantriebe der Laufschaufelverstellung

Hydraulischer Antrieb	Elektromechanischer Antrieb
Stellzeit 5 – 30 s	30 – 60 s

3.4 Strahlventilator

3.4.1 Anwendung

Als Strahlventilatoren werden Axialventilatoren bezeichnet, welche im Fahrraum des Tunnels installiert sind und die Längsströmung zu beeinflussen (antreiben / bremsen). Mittels der Übertragung des Impulses von der Ventilatorströmung (Strahl) auf die Tunnelströmung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel verändert.

Die Strahlventilatoren können sowohl im Normalbetrieb als auch im Ereignisbetrieb eingesetzt werden.

3.4.2 Anforderungen an Strahlventilatoren

An Strahlventilatoren werden relativ wenige Anforderungen gestellt. Primäre Anforderung ist die Erzeugung des Nennschubs im Tunnel zur Beeinflussung der Längsströmung. Weiter Anforderungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 11 Anforderungen an Strahlventilatoren

Anforderung	Technische Lösung
Temperaturfestigkeit 250°C / 2 h (gemäss [1])	Der gesamte Strahlventilator muss während 2 Stunden bei 250°C betrieben werden können. Dies bedingt eine entsprechende Konstruktion (z.B. Schaufelspalt) und ein entsprechend temperaturfester Antriebsmotor.
Temperaturfestig 450°C / 30 min (gemäss [34])	Die Strahlventilatoren inklusive Befestigung sind so auszuführen, dass diese bei 450°C während 30 Minuten statisch nicht versagen. Insbesondere die Aufhängung inklusive Anker müssen dafür ausgelegt sein.
Nutzungsdauer von 20 resp. 20-25 Jahren (gemäss [1] resp. [34])	Die Strahlventilatoren und Motoren genügen in der Regel bei jährlicher Wartung dieser Anforderung mit einer Teilrevision nach ca. 10 - 15 Jahren.
Materialien für Strassentunnel geeignet (gemäss [8] und [12])	Es werden entweder ausreichend korrosionsbeständige Grundwerkstoffe (Edelstahl) eingesetzt oder aber ein entsprechender Korrosionsschutz appliziert. Besonderes Augenmerk ist auf die Materialwahl / den Korrosionsschutz der Laufränder zu richten.

3.4.3 Aufbau der Strahlventilatoren

Ein Strahlventilator besteht in der Regel aus einer Ventilator-Motor-Einheit, zwei Schalldämpfern und einer Aufhängung. Die Ventilator-Motor-Einheit ihrerseits besteht aus dem Gehäuse, der Motorhalterung, dem Antriebsmotor und dem Laufrad. Die konstruktive Ausbildung der einzelnen Elemente ist herstellerspezifisch und trägt mehr oder weniger zur Effizienz bei. Der Aufbau eines Strahlventilators ist schematisch in Abb. 18 gezeigt.

Strahlventilatoren im Tunnelfahrraum werden ohne Schaufelverstellung im Betrieb ausgeführt. Dabei werden die Schaufeln meist kraftschlüssig mit der Nabe verbunden oder sind auf die Nabe aufgeschweisst. Die Schaufeln bestehen entweder aus einer (Aluminium-) Gusslegierung oder aber aus Hohlprofilen (Edelstahlbleche). Aufgrund von Schadenfällen im Zusammenhang mit Korrosion und diesbezüglich ungünstiger Konstruktion wird seit 2020 vom ASTRA eine entsprechend Materialwahl und / oder Oberflächenschutz gefordert. Ausnahmen sind zulässig, sofern die Eignung mittels Versuches nachgewiesen ist (vgl. [8])

Die Schalldämpfer haben in der Regel eine Länge von 1 bis 2 Nenndurchmesser. Die effektive Länge ist dabei abhängig von den Anforderungen und der effektiven Konstruktion. Gegebenenfalls wird zusätzlich ein Innenkonus in schalldämmender Ausführung eingesetzt. Insbesondere bei Baugrössen < 1000 mm versperren diese Innenkonusse jedoch den Zugang zum Laufrad für Inspektions- und Wartungsarbeiten.

Es kann zwischen zwei verschiedene Typen von Strahlventilatoren unterschieden werden, welche je nach Anforderungen an die Beeinflussung der Längsströmung im Tunnel, unterschiedliche Vorteile bringen:

- Symmetrische Bauart
- Asymmetrische Bauart

Die symmetrische Bauart erlaubt die Umkehr der Blasrichtung (Reversierbetrieb) bei nahezu gleichbleibendem Schub. Symmetrische Strahlventilatoren sind besonders geeignet für Tunnel mit Regelung der Längsströmung und Tunnel mit Gegenverkehr (unterschiedliche Lüftungsrichtung im Normalbetrieb).

Bei asymmetrischer Bauart ergibt sich ein höherer Schub in Hauptblasrichtung zu Ungunsten des Schubs im Reversierbetrieb. Diese Bauart ist speziell geeignet für Tunnel mit Richtungsverkehr (RV) mit stark ausgeprägten Schubanforderungen in einer Blasrichtung respektive Tunnel mit Richtungsverkehr ohne Bedarf zur Regelung der Längsströmung.

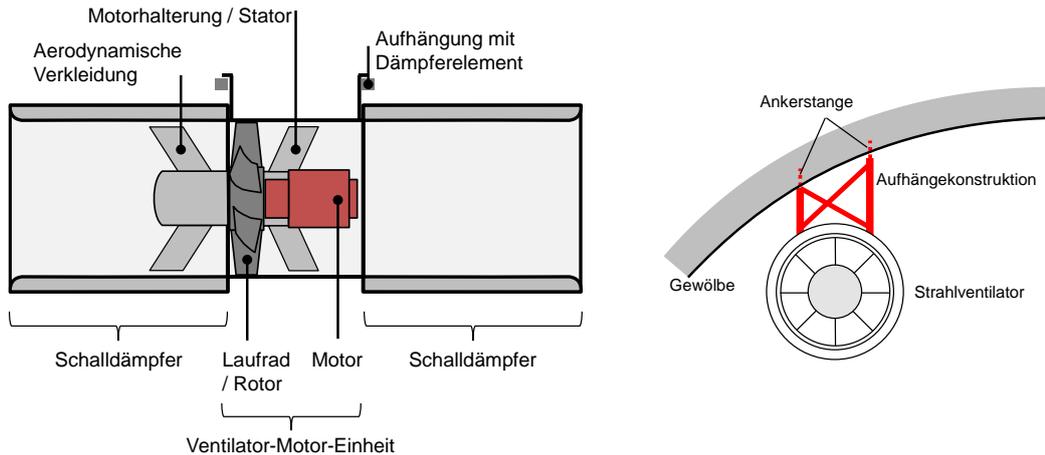


Abb. 18 Aufbau eines Strahlventilators [43]

Strahlventilatoren werden konstruktiv häufig so ausgeführt, dass der maximal mögliche Motordurchmesser eingebaut wird. Dies erlaubt es, einen möglichst grossen Schub bei minimalem Aussendurchmesser zu erreichen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Effizienz eines Strahlventilators bei hohen Austrittsgeschwindigkeiten stark sinkt. Typische Ausblasgeschwindigkeiten von Strahlventilatoren sind im Bereich von ca. 27 bis 45 m/s.

Ein Mass für die Effizienz ist die Motorleistung, welche erforderlich ist, um einen gewissen Standschub zu erreichen. Übliche Bereiche sind hier ca. 25 bis 50 N/kW bei unidirektionalen resp. ca. 20 bis 47 N/kW bei reversiblen Strahlventilatoren [15].

Die Kühlung des Antriebsmotors der Strahlventilatoren erfolgt über die geförderte Luft. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Volumenstroms zur Kühlung wird generell eine Mindestdrehzahl des Strahlventilators von 30% der Motornenddrehzahl vorgegeben.

Bei der Auswahl des Strahlventilators ist der effektive Schub und das Schub-/Leistungsverhältnis von Bedeutung. Letzteres muss speziell beachtet werden, wenn bei vielen Betriebsstunden/Jahr die Energieeffizienz relevant wird.

Für Strahlventilatoren gilt betreffend den Wirkschub F_T :

$$F_T = V_s \cdot (c_s - c_T) \cdot \zeta \cdot k_1 \cdot k_2$$

Dabei sind:

- V_s geförderter Volumenstrom [m³/s]
- c_s mittlere Ausblasgeschwindigkeit [m/s]
- c_T mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel [m/s]
- ζ Luftdichte [kg/m³]
- k_1 Minderungsfaktor 1 (bauartbedingt) [-]
- k_2 Minderungsfaktor 2 / Einbaufaktor (Wand-/Deckenentfernung) [-]

Aus der obigen Beziehung und dem linearen Zusammenhang aus Drehzahl und gefördertem Volumenstrom / Ausblasgeschwindigkeit folgt, dass der Schub eines Strahlventilators quadratisch proportional zu seiner Drehzahl ist, d.h.: bei 50% der Nenndrehzahl entwickelt der Strahlventilator 25% seines Nennschubs.

Die Minderungsfaktoren quantifizieren bauartbedingte Verluste (Minderungsfaktor 1) sowie diejenigen Verluste, welche sich durch den wandnahen Einbau im Tunnel ergeben (Minderungsfaktor 2). Der Abstand zur Tunnelwand / -decke beeinflusst den Minderungsfaktor 2, welcher häufig auch als Einbaufaktor bezeichnet wird. Durch den Einbau im Tunnel wird der Schub aufgrund der Reibung des Strahls an der Tunneldecke reduziert. Abb. 19 zeigt die Wandverluste in Abhängigkeit vom Decken- und Wandabstand.

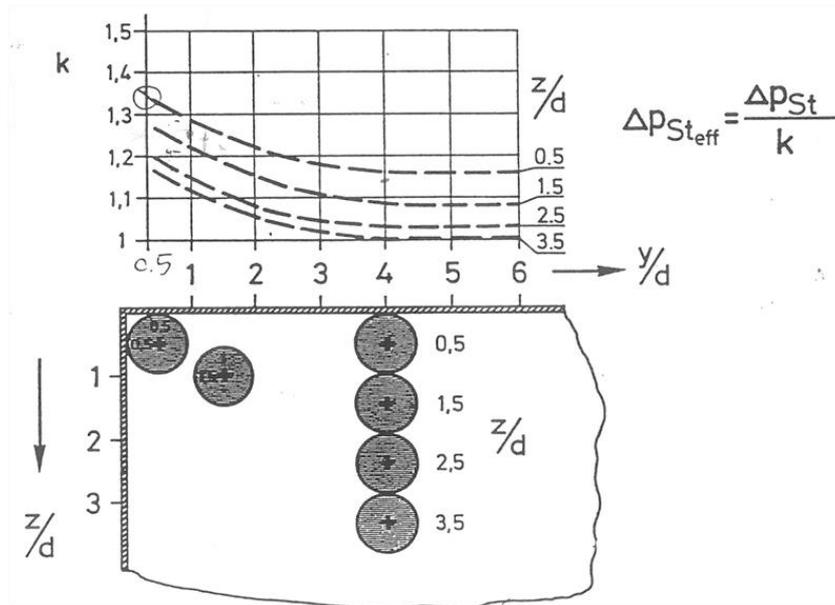


Abb. 19 Einfluss der Wandverluste auf den Schub eines Strahlventilators im Tunnel [43]

Der Abstand der Strahlventilatoren untereinander in einer Gruppe beeinflusst einerseits die Effizienz (Schub im Tunnel), andererseits die Zugänglichkeit für Installation, Inspektion und Wartung. Beträgt der Abstand zwischen zwei Strahlventilatoren mindestens dessen Durchmesser, so kann davon ausgegangen werden, dass der Schub nicht wesentlich durch die Interaktion der Lüfter reduziert wird [41]. Aus Gründen der Zugänglichkeit wird ein minimaler Abstand von 80 cm zwischen zwei Ventilatoren empfohlen.

Die Übertragung des Schubs auf die Tunnelluft erfolgt über eine bestimmte Distanz. Diese sogenannte Mischlänge ist in Abb. 20 gezeigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass mindestens 90% des Schubs nach ca. 8 x die Tunnelhöhe umgesetzt ist.

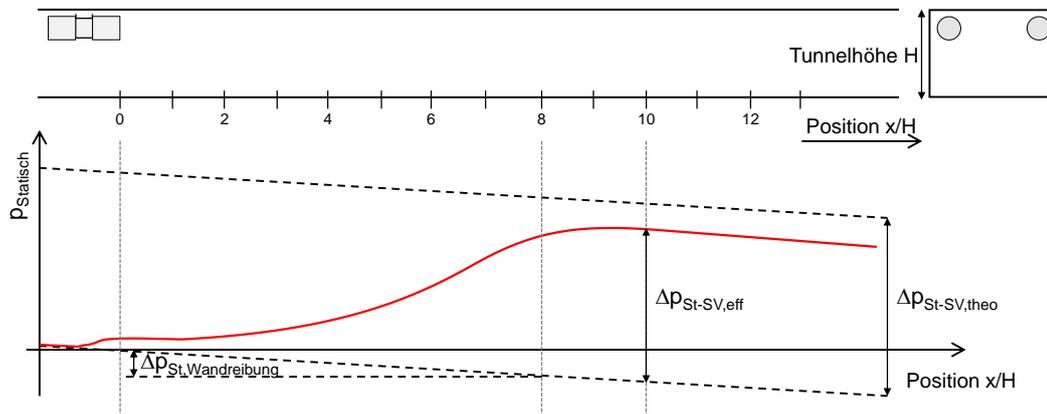


Abb. 20 Mischlänge für die Schubübertragung im Dimensionslosen Abstand zum Strahlventilator. H bezeichnet die Tunnelhöhe, x den Abstand zum Strahlventilator [43]

Der Schub eines Strahlventilators wirkt sich zeitlich verzögert auf die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel aus. Erst nachdem sich die Strömung um den Strahlventilator ausgebildet hat, wird die Tunnelluft beschleunigt. Abb. 21 zeigt, dass die Beschleunigung der Tunnelluft im Tunnel Mosi im Kanton Schwyz erst ca. 60 s nach dem Anlauf des Strahlventilators beziehungsweise ca. 30 s nach Erreichen der Nenndrehzahl einsetzt.

Diese beobachtete Zeitverzögerung ist von der Tunnellänge, dem Tunnelwiderstand (Querschnittsfläche, Oberflächen) und der Einbausituation der Strahlventilatoren abhängig. Bei der Beurteilung der Zeitverzögerung auf Basis von Messungen ist stets auch die allfällige Mittelungszeit der Strömungsgeschwindigkeit zu berücksichtigen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wird diese Zeitverzögerung nicht näher betrachtet, da es sich um ein generelles Phänomen handelt und nicht in Zusammenhang mit der Kombination aus Ventilator- und Antriebstechnologie steht.

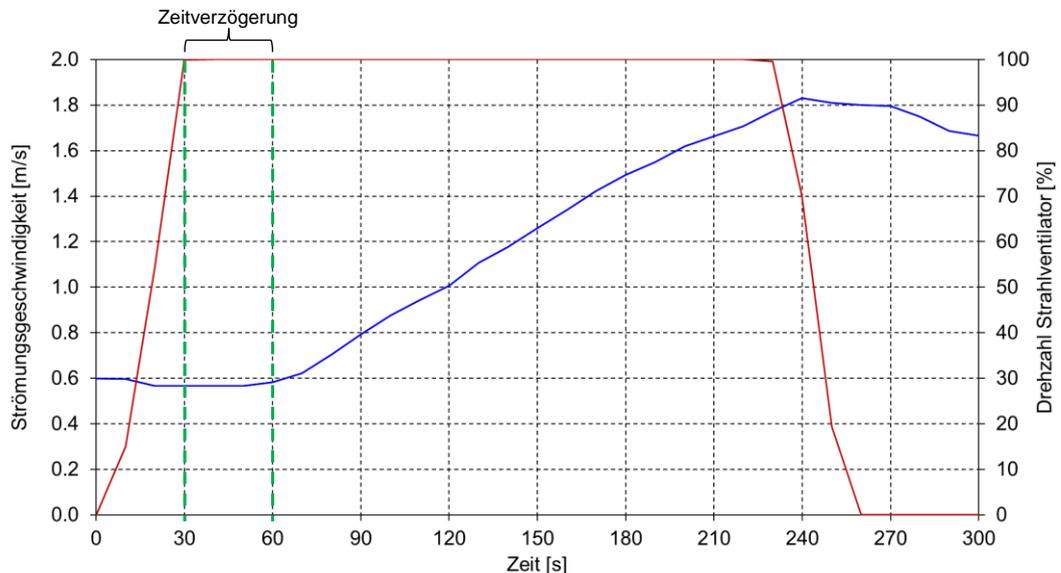


Abb. 21 Zeitlicher Verlauf der Längsströmung im Tunnel aufgrund der Einwirkung eines Strahlventilators. Gezeigt sind die Resultate der Versuche im Tunnel Mosi, Kanton Schwyz.

3.4.4 Variation der Betriebspunkte

Der Betriebspunkt resp. der Schub kann in der Regel nur mit der Variation der Drehzahl verändert werden. Dies kann mittels Ein- und Ausschaltung, durch den Einsatz von Frequenzumformern (Drehzahlbereich 30 % – 100 %, resp. Standschub 9 % bis 100 %) oder durch DahlanderMotoren mit 50 % resp. 100 % Drehzahl bewerkstelligt werden (siehe Kapitel 5).

Zur Gewährleistung eines Mindestvolumenstroms über den Motor wird generell eine Mindestdrehzahl des Ventilators von 30% der Motorenndrehzahl vorgegeben. Bei Unterschreitung dieser Mindestdrehzahl kann die Motorkühlung unzureichend sein.

3.4.5 Parallelbetrieb von Strahlventilatoren

Eine spezifische Betrachtung des Parallelbetriebs von Strahlventilatoren kann vernachlässigt werden, da diese sich im Betrieb nicht gegenseitig beeinflussen (keinen instabilen Betriebszuständen). Dies gilt sowohl für den Parallelbetrieb in einer Gruppe als auch für den Parallelbetrieb aller Strahlventilatoren einer Tunnelröhre.

Beim Parallelbetrieb in einer Gruppe ergeben sich aber Schubverluste [41]. Diese sind umso grösser, je geringer der Abstand zwischen den Strahlventilatoren ist.

Beim gleichzeitigen Einschalten von Strahlventilatoren, insbesondere bei DOL-Antrieben, ist wegen Überlast der Energieversorgung (Spannungsabfall beim Einschalten) eine Kaskadierung zu berücksichtigen (siehe Kapitel 6.2).

3.4.6 Einfluss auf die Anlaufzeit

Aerodynamische Effekte haben keinen Einfluss auf die Anlaufzeit eines Strahlventilators. Die Zeitspanne zwischen Startvorgang, Erreichen der Nenndrehzahl und Erreichen des Nennschubs ist primär vom Antriebssystem abhängig. Dies wird in Kapitel 5.3 sowie in Kapitel 7 betrachtet. Aufgrund der Trägheit der Tunnelluft erfolgt die Beschleunigung der Längsströmung mit einer Verzögerung (siehe Kapitel 3.4.3), verursacht durch die örtliche Rezirkulation beim Strahlventilator.

3.5 Zuluftventilatoren / Saccardo-Ventilatoren

Zuluftventilatoren werden verwendet, um Aussenluft in den Tunnelfahrraum einzublasen und so den Frischluftbedarf zu decken. Von der Luftfassung wird die Aussenluft durch die Zuluftventilatoren in den Fahrraum befördert (entweder verteilt oder konzentriert). In Neubauprojekten kommen Zuluftventilatoren nur zur Anwendung, wenn der Frischluftbedarf des Tunnels nicht ausreichend mittels einer Längslüftung resp. Absaugung und der dadurch resultierenden Nachströmung von Aussenluft durch die Portale abgedeckt werden kann.

Zuluftventilatoren können als Ersatz von Strahlventilatoren dienen, sofern die Zuluft einblausung stark konzentriert, gerichtet und impulsbehaftet ist. Diese spezielle Form von Zuluftventilator wird als Saccardo-Ventilator bezeichnet [41]. An Aufbau und Funktionsweise des Zuluftventilators ändert sich grundsätzlich nichts, ausser, dass dieser eine grössere Bandbreite an Betriebspunkten zu beherrschen hat (Regelung der Längsströmung).

Da sich Zuluftventilatoren in der Bauart, ausser durch die fehlenden Temperaturanforderungen, nicht von den Abluftventilatoren unterscheiden, wird hier nicht weiter auf das Thema eingegangen.

Bei Saccardo-Ventilatoren erfolgt die Luftenblasung in den Fahrraum mit einer Düse. So wird die für die Wirkung erforderliche hohe Strömungsgeschwindigkeit erreicht. Da diese Düse nicht direkt mit dem Aufbau des Ventilators in Verbindung steht, wird hier jedoch nicht näher darauf eingegangen.

3.6 Ventilatoren der Sicherheitsstollen

3.6.1 Anwendung

Ventilatoren der Sicherheitsstollen (SiSto-Ventilatoren) werden dazu verwendet, im Sicherheitsstollen¹ einen höheren Druck als im Tunnelfahrraum zu erzeugen. Dazu wird Aussenluft über eine Luftansaugung mittels der SiSto-Ventilatoren in den Stollen gefördert. Die Höhe des Überdrucks respektive die geförderte Luftmenge unterscheiden sich je nach Betriebszustand (Normalbetrieb, Ereignis) und je nach Anzahl / Position der gleichzeitig geöffneten Notausgangstüren (siehe dazu Kapitel 0).

3.6.2 Anforderungen an SiSto-Ventilatoren

Die Anforderungen an die Ventilatoren der Sicherheitsstollen und die gängigsten technischen Lösungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

¹ Als Sicherheitsstollen werden gemäss [2] parallele Sicherheitsstollen mit 2 oder mehr Verbindungen zum Tunnelfahrraum, direkt nach aussen führende (Stich-) Stollen und Treppenhäuser bezeichnet.

Tab. 12 Anforderungen an SiSto-Ventilatoren

Anforderung	Technische Lösung
Mindestluftmenge nach [2]	Berücksichtigung der Luftmenge je nach Art des Stollens unter Berücksichtigung der geforderten Redundanz
Kennlinie / Betriebspunkt (stark variierend zwischen Normal- und Ereignisbetrieb)	In der Auslegung / Auswahl des Ventilators ist dies mit einer Reserve von mindestens 15% zur maximal geforderten Totaldruckerhöhung [10] zu berücksichtigen. In der Praxis haben sich insbesondere Ventilatoren mit Kennlinien ohne instabilen Bereich (ablösungsfrei) bewährt. Die Reserve zur Totaldruckerhöhung ist dann nicht erforderlich.
Parallelbetrieb [2].	Dadurch, dass nominell 2 Ventilatoren parallel (wenn auch ggf. örtlich getrennt) betrieben werden, ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Kennlinie. Bei ablösungsfreien Kennlinien ist der Parallelbetrieb generell unproblematisch. Eine ablösungsfreie Kennlinie ermöglicht den Betrieb eines Ventilators zwischen null und dem maximalen Volumenstrom mit stets stabilem Betrieb.
Nutzungsdauer von 20 Jahren	Die Ventilatoren und Motoren genügen dieser Anforderung in der Regel.
Geeignet für Dauerbetrieb	Da üblicherweise im Dauerbetrieb gefahren wird (Normalbetrieb), werden die vorhandenen Ventilatoren wechselweise in Teillast betrieben. Jeder dieser Ventilatoren ist entsprechend während 4380 h/a in Betrieb. Lager L10 von mindestens 50'000 Betriebsstunden werden gefordert [10] um diese erst nach ca. 10 Jahren ersetzen zu müssen.

3.6.3 Aufbau der SiSto-Ventilatoren

Bestandteile einer typischen Ventilatorstrecke eines SiSto-Ventilators sind folgende (Aufzählung in Strömungsrichtung, Reihenfolge entspricht der gängigen Praxis):

- Wetterschutzgitter Wetterschutzgitter bei Luftansaugung
- Einlauf Einströmdüse
- Übergang Flexibles Band / Manschette / Kompensatoren
- Aktivteil Gehäuse, Motor, Laufrad, Leitwerk, Sensorik, etc.
- Übergang Flexibles Band / Manschette / Kompensatoren
- Auslauf Diffusor
- Absperrklappe Absperrklappe druckseitig mit Antrieb
- Überdruckklappe Überdruckklappe zwischen Stollen und Aussenumgebung

Schalldämpfer werden je nach Anordnung der Ventilatorstrecke saugseitig vor oder nach der Einlaufdüse eingebaut. Druckseitig können die Schalldämpfer vor oder nach der Ventilatorabsperrklappe zum Einsatz kommen.

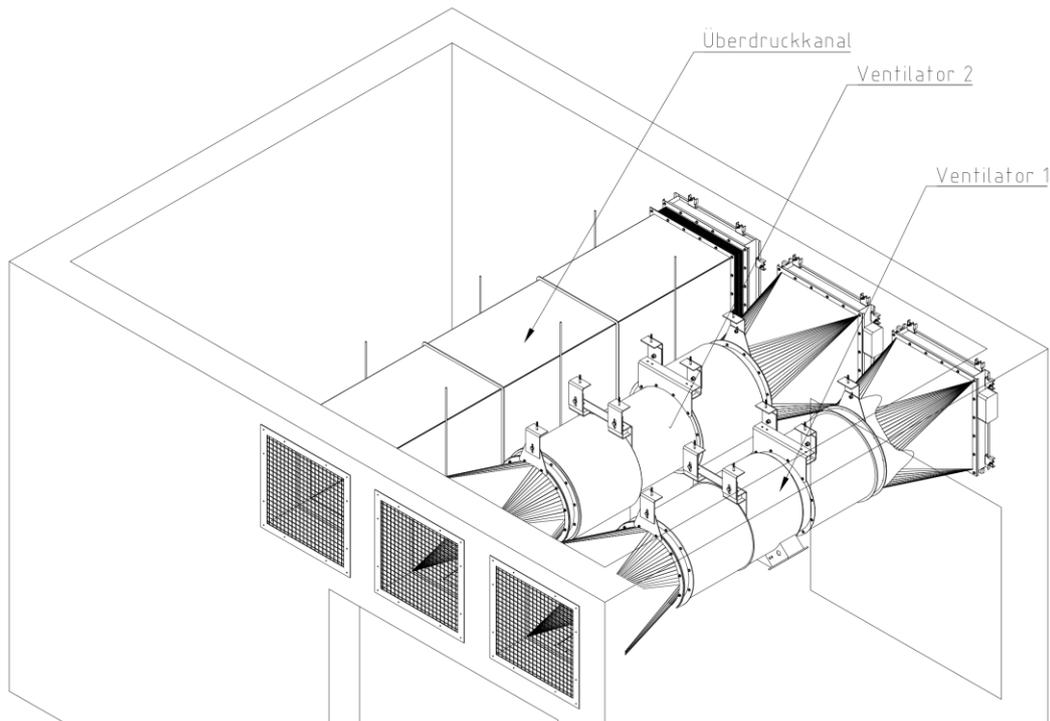


Abb. 22 Aufbau SiSto-Ventilatorstrecke mit parallelem Überdruckkanal, Tunnel Chlus [42]

Bei den Laufrädern kommen in der Regel feste Laufschaufeln zum Einsatz. Bei den üblichen Baugrößen zwischen 800 mm bis 1'600 mm Laufraddurchmesser wäre eine Laufschaufelverstellung im Vergleich zum Nutzen zu aufwendig und kostspielig. Ausnahmen sind sehr grossen Bauwerke wie z.B. der Gotthard Strassentunnel.

3.6.4 Variation des Betriebspunkts

Aufgrund unterschiedlicher Betriebspunkte im Normal- und im Ereignisbetrieb (siehe Kapitel 0) hat die Lüftung der Sicherheitsstollen mehreren Betriebspunkten gerecht zu werden. Je nach technischer Lösung folgt daraus, dass die SiSto-Ventilatoren mehrere, (deutlich) unterschiedliche Betriebspunkte besitzen.

Der Betriebspunkt kann aufgrund des Aufbaus der Ventilatoren einerseits mit der Variation der Drehzahl verändert werden. Diese kann entweder mittels Frequenzumformer oder durch einen Dahlander motor bewerkstelligt werden (vgl. Kapitel 5.3). Der Frequenzumformer bietet den Vorteil, den Normalbetriebspunkt optimal einstellen zu können und den Ereignisbetriebspunkt bei der Verfügbarkeit beider Ventilatoren zu reduzieren, um den Überdruck auf die Fluchttüren zu reduzieren (Türöffnungskräfte). Andererseits ist der Einsatz unterschiedlicher Ventilatoren für den Normal- resp. den Ereignisbetrieb möglich, um unterschiedliche Betriebspunkte abzudecken. Der Vorteil dieser Lösung liegt bei der optimalen Auslegung der Ventilatoren, sofern die Leckagemengen bekannt sind. Der Nachteil liegt in den grösseren Investitionen und dem erhöhten Raumbedarf.

Zur Gewährleistung eines Mindestvolumenstroms über den Motor wird generell eine Mindestdrehzahl des Ventilators von 30% der Motornenn Drehzahl vorgegeben. Bei Unterschreitung dieser Mindestdrehzahl kann die Motorkühlung unzureichend sein.

3.6.5 Parallelbetrieb von SiSto-Ventilatoren

Im Normalbetrieb wird ein Ventilator bei reduzierter Drehzahl betrieben. Im Ereignisbetrieb werden nominell mehrere Ventilatoren betrieben (siehe Kapitel 0). Diese sind saugseitig alle mit der Umgebung verbunden (Umgebungsdruck) und druckseitig ebenfalls zusammengeschlossen (Druckniveau im Sicherheitsstollen). Somit werden die Ventilatoren, auch wenn diese u.U. örtlich voneinander getrennt sind, parallel betrieben. Beim Wechsel vom Normal- in den Ereignisbetrieb wird ein Ventilator sequenziell gestartet.

Im Fall eines Sicherheitsstollens ist der Gegendruck in aller Regel verhältnismässig gering. Selbst bei einem Ventilator mit eher ungünstiger Kennlinie gelingt das sequenzielle Anfahren – insbesondere dann, wenn dies so erfolgt, dass erst alle Ventilatoren den Betriebspunkt des Normalbetriebs anfahren und erst dann, gemeinsam, in den Ereignisbetrieb wechseln. Besitzt der Ventilator eine ablösefreie Kennlinie, ist das sequenzielle Anfahren per se unproblematisch. Aufgrund der geringen Grösse im Vergleich zu Abluftventilatoren und den hierfür günstigeren Betriebspunkten (Verhältnis Volumenstrom / Druckerhöhung) ist es in der Regel möglich, einen Ventilator mit ablösefreier Kennlinie zu selektionieren.

3.6.6 Einfluss auf die Anlaufzeit

Aufgrund der kleinen Baugrössen und des druckseitigen Anschlusses an das System liegt die Hochlaufzeit eines typischen SiSto-Ventilators zwischen 5 bis 20 s. Da in der Regel feste Laufschaufeln verwendet werden, wird die Anlaufzeit primär durch das gewählte Antriebssystem bestimmt.

Eine Optimierung der Anlaufzeit ergibt jedoch keinen substanziellen Sicherheitsgewinn, da der Überdruck, welcher im Normalbetrieb herrscht, bereits für eine partielle Rauchfreihaltung des SiSto sorgt.

Bei Systemen ohne permanenten Normalbetrieb (Abweichung zur Anforderung nach ASTRA 13 002) ist eine Optimierung der Anlaufzeit zielführend und kann z.B. durch den Einsatz eines schnellen Klappenantriebs erreicht werden.

4 Grundlagen Strassentunnel

Die Lüftungsanlagen dienen im Strassentunnel der Einhaltung der Schutzziele gemäss [1] und [2]:

- die ausreichende Versorgung des Fahrraums mit Frischluft bei normalem Verkehr
- die Minimierung der Ausbreitung und der Konzentration der bei einem Ereignis entstehenden Schadstoffe im Fahrraum und auf den Fluchtwegen.
- die Vermeidung übermässiger Schadstoffbelastungen in der Umgebung des Tunnels.

Die ausreichende Versorgung des Fahrraums mit Frischluft dient dazu, dass die Tunnelbenutzer das Bauwerk sicher passieren können: Eine reduzierte Sicht z.B. aufgrund von Reifenabrieb oder eingeschränkte kognitive Fähigkeiten aufgrund von Schadstoffbelastungen können zu Unfällen führen und sind somit unbedingt zu vermeiden. Die ausreichende Versorgung des Fahrraums mit Frischluft kann ebenfalls dazu dienen, die Luftfeuchte im Tunnel und damit die Gefahr von plötzlichem Scheibenbeschlag zu reduzieren.

Bei einem Fahrzeugbrand im Tunnel soll die Lüftung die Selbstrettung der Tunnelbenutzer unterstützen, indem die Verrauchung der Fluchtwege (Weg vom Fahrzeug aus dem Bauwerk nach draussen respektive in Ausnahmefällen in einen sicheren Bereich) minimiert wird. Für die Intervention der Rettungskräfte sind stabile Lüftungszustände gefordert und wenn möglich die Zugangswege frei von Rauch zu halten. Nach der Ereignisbewältigung hat die Tunnellüftung den Rauch aus dem Tunnel abzuführen und diesen so für die Wiederaufnahme des Betriebs vorzubereiten. Aufgrund der Verbrennungsprozesse wird je nach Grösse einer Brandquelle eine bedeutende Menge Gase freigesetzt. Bei kleineren Bränden, d.h. bei einem Pkw Brand (Brandleistung ca. 5 MW), ist von einer Freisetzungsrate von ca. 20 m³/s auszugehen und im Fall eines Lkw Brands (Brandleistung: 30 MW) beträgt die Rauchgasfreisetzung ca. 80 m³/s (gemäss [1]).

Entstehen durch die aus einem Tunnelportal freigesetzten Schadstoffe unzulässige Umweltbelastungen auf, so hat die Tunnellüftung zur Aufgabe, die Schadstoffbelastung zu mindern. Dies erfolgt durch das Absaugen von Tunnelluft beim Ausfahrtsportal und dem Ausstoss dieser Luft über einen Kamin mit hoher Austrittsgeschwindigkeit. Die Schadstoffe werden so in höhere Luftschichten befördert, die Schadstoffkonzentration in Portalnähe wird reduziert.

Das nachfolgende Kapitel zeigt einen kurzen Überblick über die verschiedenen Lüftungssysteme sowohl im Fahrraum (Kapitel 4.1) als auch für die Sicherheitsstollen (Kapitel 0) und präsentiert für das vorliegende Forschungsprojekt relevante Aspekte.

4.1 Fahrraumlüftung

4.1.1 Mögliche Lüftungssysteme

Nach [1] werden drei verschiedene Hauptgruppen von Lüftungssysteme unterschieden:

- System der natürlichen Lüftung
- Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall
- Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall

Bei einer natürlichen Lüftung werden keine mechanischen Lüftungskomponenten installiert. Der Luftaustausch im Normalbetrieb erfolgt über die Tunnelportale und wird durch die Druckwirkung des Verkehrs und/oder durch temperaturbedingte respektive meteorologisch bedingte Druckdifferenzen getrieben. Im Ereignisfall breiten sich Rauch und Schadstoffe gemäss der bereits vorliegenden Strömung und gemäss der Auftriebswirkung aus.

Bei Lüftungssystemen ohne Absaugung im Ereignisfall handelt es sich vorwiegend um eine so genannte Längslüftung. Bei einer solchen kann mittels Lüftungskomponenten die

Längsströmung im Tunnel beeinflusst werden und so sowohl Frischluftzufuhr im Normalbetrieb als auch die Rauch- / Schadstoffausbreitung bei Ereignissen kontrolliert werden. Zur Minderung der Schadstoffbelastung an Ausfahrtsportalen kann die Tunnelluft gegebenenfalls mit einem Portalabluftsystem abgesaugt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch ein Lüftungssystem ohne Absaugung im Ereignisfall und die möglichen Zustände auf.

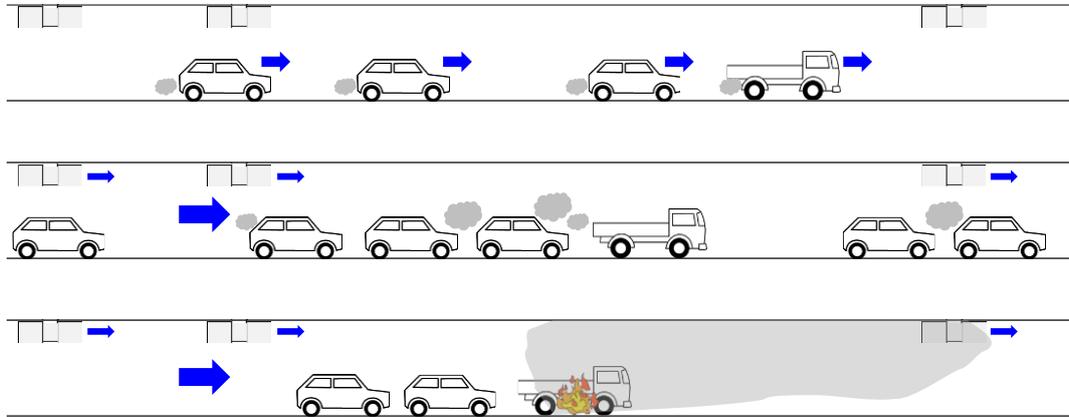


Abb. 23 *Oben: Frischluftzufuhr über das Einfahrtsportal im Normalbetrieb durch Druckwirkung der Fahrzeuge, Mitte: Frischluftzufuhr im Normalbetrieb über das Einfahrtsportal durch mechanische Längslüftung, Unten: Beeinflussung der Rauchausbreitung im Ereignisbetrieb mit mechanischer Längslüftung.*

Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall erlauben es, gezielt schadstoffbelastete Tunnelluft oder Rauch aus dem Fahrraum abzusaugen. Dazu verfügt ein solches System in der Regel über steuerbare Abluftklappen. Die abgesaugte Luft wird über einen Abluftkanal (meist vom Fahrraum durch eine Zwischendecke abgetrennt) zu zentral angeordneten Ventilatoren geführt (eine oder mehrere Lüftungszentralen). Die Strömung zur Absaugstelle hin wird mittels mechanischen Lüftungskomponenten (Längslüftung) wunschgemäss beeinflusst. Sofern die Umstände es zulassen, wird die Luftqualität im Normalbetrieb mit einer Längslüftung von Portal zu Portal sichergestellt. Zur Vermeidung von übermässigem Energieverbrauch und/oder übermässig hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrraum kann der Tunnel im Normalbetrieb mittels konzentrierter Absaugung auch in zwei Abschnitte mit Längslüftung unterteilt werden (siehe Abb. 24).

Bei einem Ereignis werden der Rauch / die freigesetzten Gase konzentriert in unmittelbarer Nähe zum Ereignisort abgesaugt. Zur besseren Kontrolle der Ausbreitung im Fahrraum wird die Strömung zur Absaugstelle mittels der Komponenten der Längslüftung beeinflusst. In Abb. 25 ist die Funktion einer solchen mechanischen Lüftung mit Absaugung im Ereignisfall skizziert. Die Ausdehnung des Absaugbereichs sowie die exakte Lage in Bezug auf den Brandort sind dabei nur schematisch dargestellt.

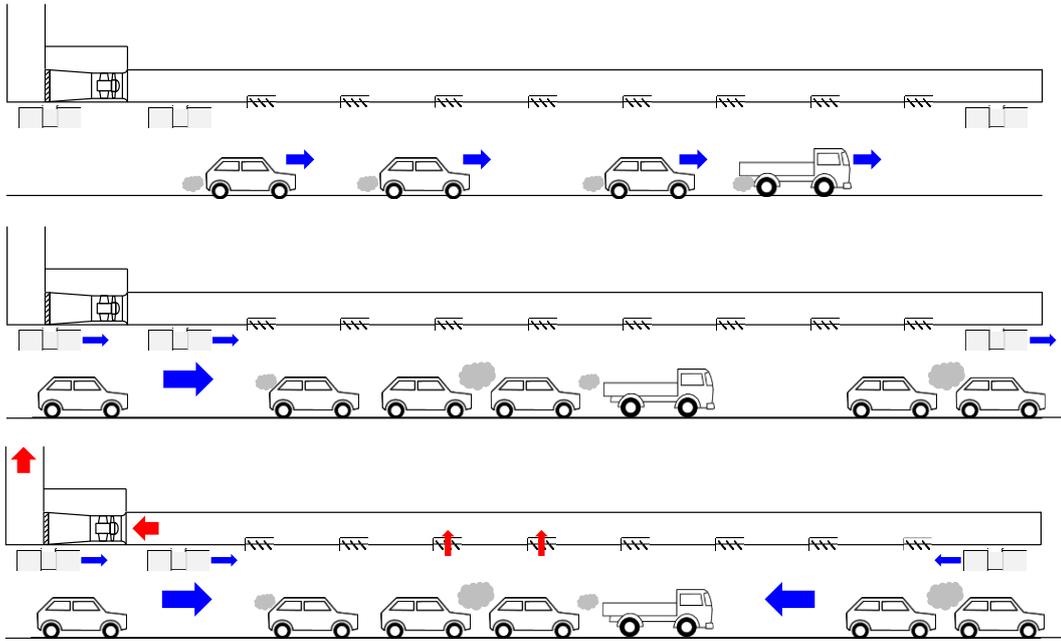


Abb. 24 Oben: Frischluftzufuhr über das Einfahrtsportal im Normalbetrieb durch Druckwirkung der Fahrzeuge, Mitte: Frischluftzufuhr über das Einfahrtsportal im Normalbetrieb durch mechanische Längslüftung ohne Absaugung, Unten: Frischluftzufuhr über das Ein- und das Ausfahrtsportal im Normalbetrieb durch mechanische Längslüftung (2 Abschnitte) mit Absaugung.

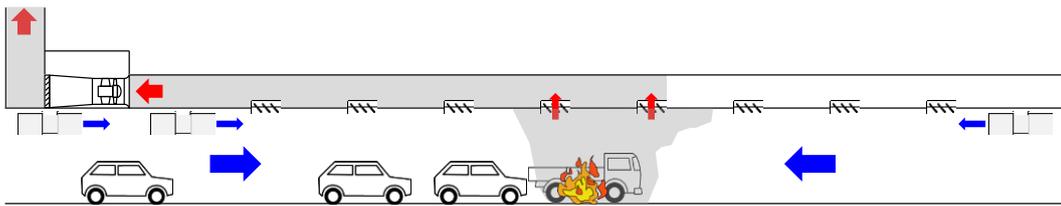


Abb. 25 Brandbetrieb einer Lüftung mit Absaugung im Ereignisfall: Konzentrierte Rauchabsaugung und Kontrolle der Strömung zur Absaugstelle im Fahrraum mittels Strahlventilatoren.

Kann die Frischluftzufuhr nicht mittels einem oder zwei Längslüftungsabschnitten gelöst werden, so ist zusätzlich eine Frischluftzufuhr vorzusehen. Dazu wird ein separater Zuluftkanal verwendet. So kann Frischluft entlang des Tunnels auf Strassenniveau eingeblasen werden. Alternativ kann Zuluft auch punktuell eingeblasen werden. Die restlichen Komponenten des Systems mit mechanischer Lüftung mit Absaugung im Ereignisfall bleiben erhalten. Im Normalbetrieb kann die Lüftung je nach Bedarf als natürliche oder mechanische Längslüftung, mit konzentrierter Absaugung, als Halbquerlüftung (verteilte Zuluft) oder als Querlüftung (verteilte Zu- und Abluft) betrieben werden.

4.1.2 Wahl des Lüftungssystems

Die Wahl des Lüftungssystems erfolgt gemäss der Richtlinie «Lüftung der Strassentunnel» [1] in erster Linie für den Ereignisbetrieb und wird im Bedarfsfall durch Zuluft und / oder eine Portalluftabsaugung komplettiert. Die Wahl des Lüftungssystems hängt von verschiedenen Faktoren ab. Hauptfaktoren für die Wahl sind:

- Verkehrsart (RV1, RV2, GV)
- Tunnellänge
- Längsneigung (mittlere Längsneigung über 800 m)

Im Übergangsbereich von Lüftungssysteme erfolgt eine Art Risikobeurteilung. Dabei ergibt sich die Zuordnung in die Bereiche A, B oder C auf Basis der Verkehrsmenge, der Schwerverkehrsmenge und der Längsneigung.

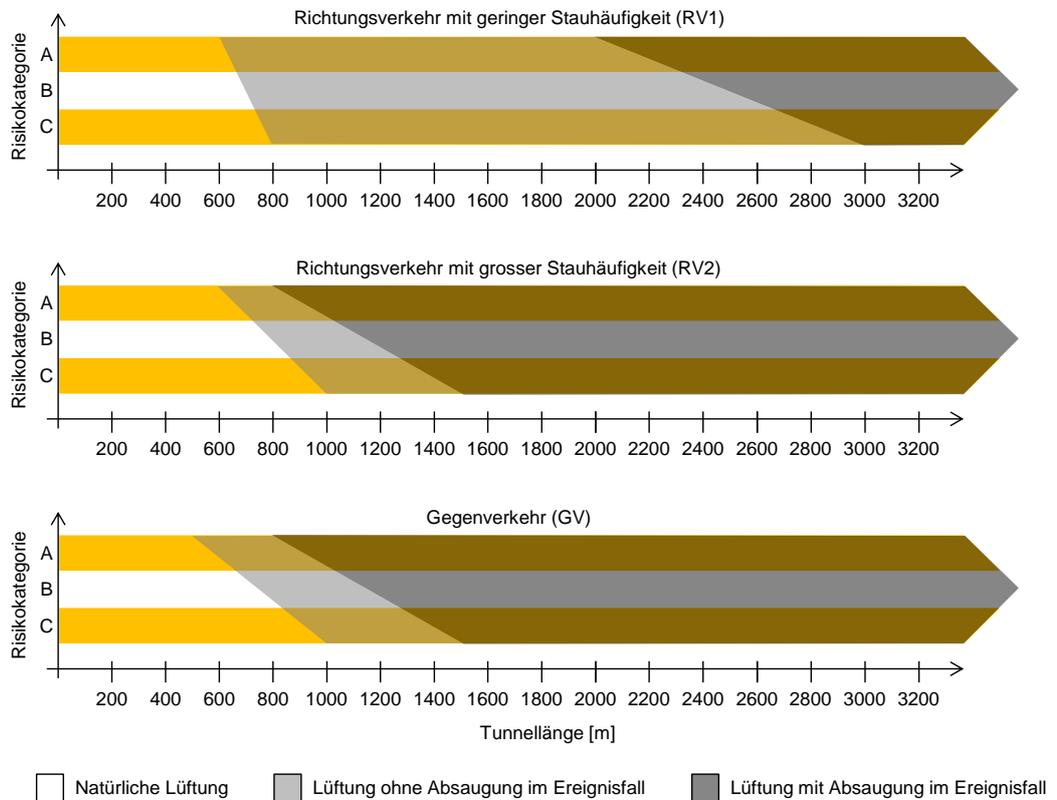


Abb. 26 Wahl des Lüftungssystems gemäss [1] für Tunnel mit Längsneigung < 5%

4.1.3 Abluft

Das System zur gezielten Rauchabsaugung besteht, in der typischen Variante aus ferngesteuerten Klappen (Abluftklappen), einem Abluftkanal und einer oder mehreren Lüftungszentralen mit Axialventilatoren (vgl. Abb. 25). Pro Lüftungszentrale sind wiederum ein oder mehrere Axialventilatoren möglich, welche die verbrauchte Luft aus dem Fahrraum via Abluftkanal absaugen und durch einen Kamin ins Freie ausstossen. Die gezielte Rauchabsaugung wird durch die Längslüftung beeinflusst. Ziel ist eine geregelte Strömung im Fahrraum zur Absaugstelle bzw. zum detektierten Ereignisort hin.

Im Normalbetrieb kann das Abluftsystem genutzt werden, um Luft mit hoher Schadstoffkonzentration im Tunnel abzusaugen, statt in Längsrichtung abzutreiben. Der für einen solchen Fall eingesetzte Volumenstrom ist meist deutlich geringer als der Volumenstrom des Brandbetriebs.

Abluftmenge

Die Abluftmenge definiert sich in erster Linie über den Fahrraumquerschnitt respektive die Längsströmung vor und nach der Absaugzone. Für Tunnel mit Richtungsverkehr ohne Staugefahr beträgt die Absaugmenge mindestens $3.1 \text{ m/s} \cdot A_{\text{Fahrraum}}$, für Tunnel mit Richtungsverkehr und Staugefahr, sowie für Tunnel mit Gegenverkehr mindestens $4.0 \text{ m/s} \cdot A_{\text{Fahrraum}}$. Für den Fall, dass mit einer deutlich erhöhten Lufttemperatur bei den Abluftventilatoren gerechnet werden muss (Distanz Abluftventilator – erste Abluftklappe < 50 m), so ist die Abluftmenge zusätzlich um $1 \text{ m/s} \cdot A_{\text{Fahrraum}}$ zu erhöhen. Für einen typischen Strassentunnel mit $50 - 55 \text{ m}^2$ Fahrraumquerschnitt liegt die nominelle Abluftmenge am Absaugort im Bereich von $150 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $220 \text{ m}^3/\text{s}$. Durch Leckage (Bauwerksleckage und Leckage von geschlossenen Klappen) erhöht sich die Abluftmenge, welche effektiv von den Ventilatoren zu fördern ist, um ca. 10 %.

Gemäss [1] hat die Anlage nebst dem Abluftvolumenstrom im Nominalfall bei Ausfall einer Abluftklappe (Absaugung über 2 statt 3 klappen) 90% des Nominalwerts zu betragen und bei Ausfall eines Abluftventilators 65% der nominalen Abluftmenge. Diese Werte sind am, für das Abluftsystem ungünstigsten Ort (in der Regel der am weitesten von den Abluftventilatoren entfernten Absaugbereich) zu erreichen.

Somit ergeben sich 3 Betriebspunkte mit den mutmasslich höchsten Anforderungen hinsichtlich Volumenstrom und Druckerhöhung.

A: Nominalfall (nominelle Anzahl Abluftventilatoren, Absaugung über drei Abluftklappen)

B: Klappenausfall (Absaugung über 2 statt 3 Abluftklappen)

C: Ventilatorausfall (Absaugung mit reduzierter Anzahl Abluftventilatoren)

In Abb. 27 zeigt eine typische Lage dieser drei theoretischen Betriebspunkte im Ventilator-kennfeld. Dabei wurde angenommen, dass das Abluftsystem über insgesamt zwei Ventilatoren verfügt. Im vorliegenden Fall definiert der Punkt C die Kennlinie und damit den Ventilator und es ergeben sich die auf die effektive Kennlinie (100% Drehzahl) projizierten Punkte A' und B'.

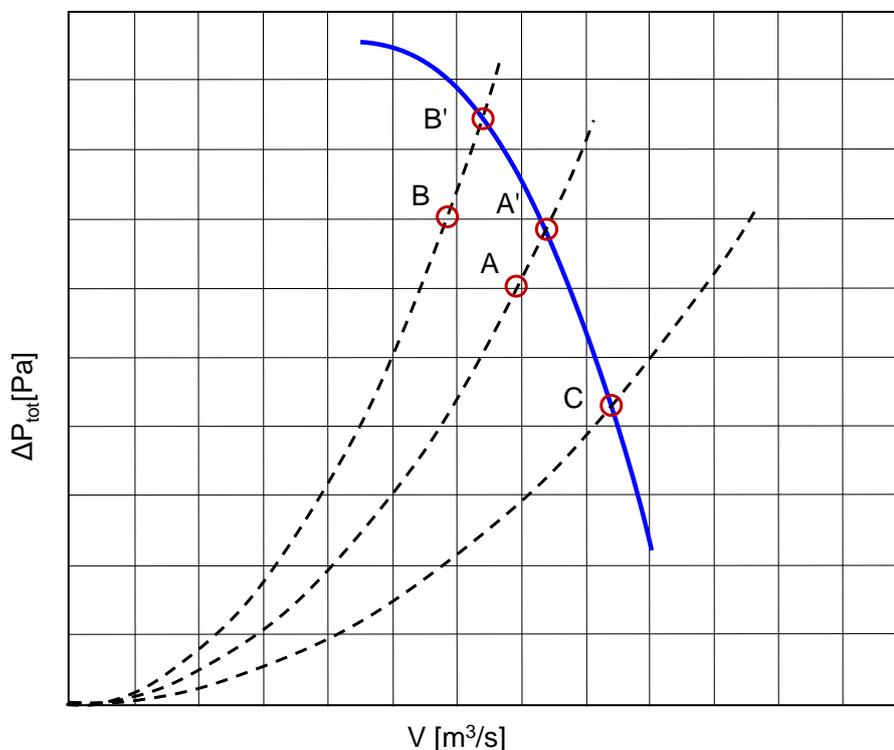


Abb. 27 Typische Lage der theoretischen Betriebspunkte A, B und C im Kennfeld sowie auf die Kennlinie projizierte Betriebspunkte A', B' und C'. Der Punkt C definiert die Lage der Kennlinie und somit die Auswahl des Ventilators.

Abluftkanal

Die aerodynamischen Anforderungen an den Abluftkanal (Fläche, Rauigkeit Kanaloberfläche) ergeben sich aus der zulässigen Druckerhöhung gemäss [1]. Die Druckverluste entlang des Kanals sollen 2'500 Pa nicht übersteigen. So lässt sich sicherstellen, dass:

- die Gesamtdruckverluste den für Abluftventilatoren typischen Bereich nicht übersteigen,
- die Leckagemenge (Bauwerksleckage, Leckage durch nicht geöffnete Klappen) nicht unnötig gross wird und
- keine aerodynamisch bedingten Rahmenbedingungen an die Statik der Zwischendecke resultieren.

Druckverluste

Die vom Abluftventilator zu überwindenden Druckverluste ergeben sich vereinfacht aus:

- den Strömungsverlusten vom Tunnelportal zur Absaugzone,
- den Strömungsverlusten durch die Abluftklappen (inklusive Umlenkungen, Einschnürung etc.),
- den Strömungsverlusten entlang des Abluftkanals (inklusive Effekten bei den geöffneten Klappen) und
- den Strömungsverlusten in der Lüftungszentrale (inklusive Umlenkungen, Ein-/Ausströmverluste des Ventilators und den Ausströmverlusten am Kamin).

Anzahl Abluftzentralen / Abluftventilatoren

Die Anzahl Abluftzentralen ergibt sich durch die Tunnellänge und die baulichen Rahmenbedingungen: Ab einer bestimmten Tunnellänge respektive Abluftmenge / Grösse des Abluftkanals übersteigen die Druckverluste entlang des Kanals die technischen Grenzen von einfachen Abluftventilatoren. In so einem Fall ist statt einer einzelnen Portalzentrale eine Lüftungszentrale entlang des Tunnels (Mittenzentrale) oder zwei Portalzentralen nötig. Die von einer zentrale bedienbare Abschnittlänge ist typischerweise bis ca. 3 km. Für Tunnel zwischen ca. 3 km bis ca. 5 km sind somit mit zwei Portalzentralen oder einer Mittenzentrale vorzusehen.

Ein Strassentunnel hat über mindestens 2 Abluftventilatoren zu verfügen. Die effektive Anzahl Abluftventilatoren bestimmt sich aus der Anzahl Zentralen, der technischen Grenzen von Axialventilatoren, insbesondere betreffend die elektrische Leistung (typ. Maximal 1 MW), dem Volumenstrom (max. 200 m³/s) und dem angestrebten Redundanzniveau.

Abluftklappen

Als Abluftklappen werden in der Regel: Lamellenklappen eingesetzt. Diese sind ferngesteuert und werden in Ereignisnähe bzw. oberhalb des Ereignisses geöffnet. Die Grösse der Abluftklappen (freie Fläche) bestimmt sich durch den abzusaugenden Volumenstrom, wobei die Luftgeschwindigkeit 15 m/s nicht überschreiten sollte².

4.1.4 Längslüftung

Der Rauch, welcher bei einem Brand entsteht, breitet sich durch dessen thermischen Auftrieb entlang der Tunneldecke aus. Bei einem Tunnel ohne Längsneigung und ohne Längsströmung geschieht dies in beide Richtungen symmetrisch (vgl. Abb. 28, a). Aufgrund des Wärmeaustauschs mit der Umgebung (insb. der Tunneldecke) und durch Durchmischung mit Frischluft verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen Rauch und Tunnelluft. Die thermisch geschichtete Strömung zerfällt. Der Rauch verbreitet sich über den gesamten Tunnelquerschnitt und strömt zum Brand zurück (vgl. Abb. 28, b). Turbulenzen, respektive Scherkräfte, welche durch Änderung der Strömungsgeschwindigkeit oder -richtung hervorgerufen werden, führen ebenfalls dazu, dass eine verstärkte Vermischung von Rauch mit rauchfreier Luft erfolgt. Dies sollte vermieden werden.

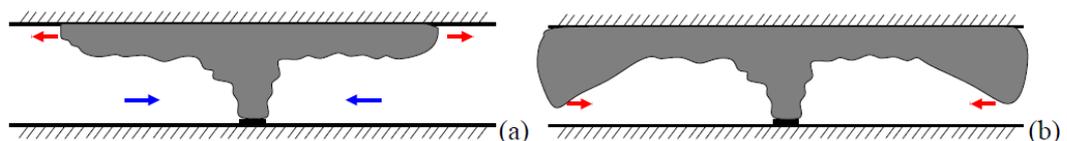


Abb. 28 Rauchausbreitung im Tunnel ohne Längsneigung bzw. Längsströmung, aus [18]

² Bezogen auf den minimalen Abluftvolumenstrom von 3 m/s · Fahrraumquerschnitt

Bei vorhandener Längsströmung oder Längsneigung ergibt sich ein ähnliches, wenn auch asymmetrisches Bild der Rauchausbreitung. Die Rauchausbreitung entgegen der Längsströmung, respektive entgegen der Längsneigung, wird dabei durch die Druckwirkung der Längsströmung und/oder durch die Auftriebskräfte (Kamineffekt) gehemmt. Breitet sich Rauch entgegen der Hauptströmung aus, so spricht man von sog. Backlayering. Je nach Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel ist dieses Backlayering mehr oder weniger stark ausgeprägt. Die Abhängigkeit des Backlayering ist in Abb. 29, (a) und (b) gezeigt. Ebenfalls zeigt Abb. 29 die Situation (c), bei welcher sich der Rauch vollständig zu einer Seite des Ereignisorts bewegt. Dies geschieht, sobald die Längsströmung im Tunnel die so genannte kritische Geschwindigkeit übersteigt. Die kritische Geschwindigkeit ist insbesondere abhängig von der Geometrie des Bauwerks (Längsneigung, Querschnittsfläche und Höhe des Fahrtraums) und der freigesetzten Wärmemenge. Für einen typischen Strassentunnel liegt die kritische Geschwindigkeit bei circa 2.3 m/s, kann aber für Tunnel mit grosser Steigung durchaus auch bei mehr als 2.5 m/s liegen.

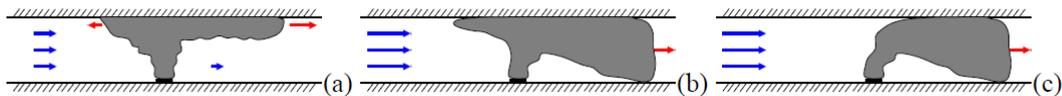


Abb. 29 Zusammenhang zwischen Längsströmung Rauchausbreitung: a) und b) mit Backlayering, c) einseitiger Rauchabtrieb bei kritische Geschwindigkeit, aus [18]

Für Tunnel mit Richtungsverkehr mit geringer Staugefahr befinden sich die Verkehrsteilnehmer im Ereignisfall nur auf einer Seite des Ereignisses. Die Längslüftung hat zur Aufgabe, die entstehenden Brandgase vollständig in Fahrtrichtung abzutreiben. Ohne Kenntnis der effektiven kritischen Geschwindigkeit [3] hat die Strömungsgeschwindigkeit in solchen Fällen mindestens 3 m/s zu betragen. Wir empfehlen, auf eine aktive Regelung der Strömungsgeschwindigkeit zu verzichten und lediglich deutlich zu grosse Strömungsgeschwindigkeiten zu vermeiden.

Für den Fall, dass sich Tunnelnutzer zu beiden Seiten des Ereignisses aufhalten (Tunnel mit Gegenverkehr oder mit Richtungsverkehr mit Stau), gilt es, die Rauchausbreitung zu kontrollieren und allen Personen so eine Möglichkeit zu geben, sich aus dem Gefahrenbereich zu entfernen. In [3] wird als Zielgeschwindigkeit 1 m/s erwähnt. Maximal zulässige Abweichungen sind jedoch nicht vorgegeben. Gemäss den österreichischen Richtlinien und Vorschriften für das Strassenwesen [19] ist eine Längsströmung von 1.0 m/s bis 1.5 m/s anzustreben. Die in Deutschland geltenden Empfehlungen für die Ausstattung und Betrieb von Strassentunneln [20] erwähnt denselben Geschwindigkeitsbereich als Zielzustand für die Selbstrettungsphase. Der Welt-Strassenverband PIARC kommt in seinen Arbeiten [21] zum Schluss, dass eine Längsströmung von 1.2 m/s +/- 0.2 m/s anzustreben sei.

Gemäss [21] führt eine Längsströmung kleiner als 0.5 m/s zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen (mangelnde Verdünnung, sauerstoffarme Verbrennung) und zu erhöhten Temperaturen in unmittelbarer Ereignisnähe. Zusätzlich bietet dieser Wert keine ausreichende Sicherheit gegenüber einem Strömungsstillstand respektive einer Strömungsumkehr. Daher soll die theoretische Untergrenze der Längsströmung bei Regelung mind. 0.5 m/s betragen.

Die theoretische Obergrenze der Längsströmung lässt sich mittels zwei Betrachtungsweisen herleiten: Einerseits gilt es die Rauchsichtung in Strömungsrichtung gesehen nach dem Brand so gut als möglich aufrecht zu erhalten. Dabei liegt gemäss [18] die Längsströmung, ab welcher die Rauchsichtung negativ beeinflusst wird, bei 1.5 m/s bis 2 m/s (Lastwagenbrand). Bei geringeren Brandleistungen liegt diese Geschwindigkeit entsprechend tiefer. Hinsichtlich Rauchsichtung soll die Längsströmung somit nicht mehr als 1.5 m/s betragen. Andererseits soll die Rauchausbreitungsgeschwindigkeit nicht schneller als die typische Fluchtgeschwindigkeit von Tunnelnutzern sein. Die durchschnittliche Fluchtgeschwindigkeit in einem nicht verrauchten Tunnel beträgt ca. 1.5 m/s, wird aber stark von der lokalen Steigung im Fahrtraum beeinflusst. Sollen flüchtende Personen nicht von Rauch eingeholt werden, so sollte die Längsströmung auf 1.5 m/s begrenzt werden.

Bei der Umsetzung in die Praxis ist dieser Bereich durch die Messunsicherheit der Eingangsgrößen (Luftstrommessung) einzuschränken. Für die typisch in der Schweiz eingesetzten Geräte liegt die Messgenauigkeit bei mindestens ± 0.1 m/s. Zur Berücksichtigung der Trägheit der Luftmasse im Tunnel, respektive der zeitlichen Verzögerung durch Datenverarbeitung (zeitliche Mittelung, Verarbeitungszyklen der Regelungsprozess), wird vorgeschlagen den gewünschten Zielbereich der Strömungsgeschwindigkeit zusätzlich um 0.1 m/s zu minimieren. Somit ergibt sich für die Regelung der Längsströmung ohne Absaugung ein zulässiger Geschwindigkeitsbereich für die Praxis von 0.7 m/s (0.5 m/s + 0.2 m/s) bis 1.3 m/s (1.5 m/s – 0.2 m/s). Der absolute Zielwert für die Längsströmung (Soll-Geschwindigkeit) liegt bei 1.0 m/s.

Nebst dem zulässigen Bereich erscheint es angebracht, einen maximalen Gradienten für Geschwindigkeitsänderungen festzulegen. Dadurch kann Turbulenz und somit die Durchmischung von Rauch und rauchfreier Luft reduziert werden. In der Literatur finden sich keine Angaben zu einem Grenzwert. Mangels Grundlagen wird 0.5 m/s / Minute respektive $1/120$ m/s² gefordert.

Regelung der Längslüftung

Das Prinzip der Regelung basiert auf einem Soll-Ist-Wertvergleich der Strömung, wobei vom Regler der notwendige Schub für das Erreichen des Sollzustandes ermittelt wird. Die Regelung der Längsströmung kann beispielsweise mittels Model-Predictive-Control (MPC), PI(D)-Regler realisiert werden. Der PI-Regler hat sich hierbei in der Praxis aufgrund seiner Einfachheit und Robustheit bewährt. Der PI-Regler ermittelt auf Basis der aktuellen Strömungsgeschwindigkeit respektive des zeitlichen Verlaufs die Leistung der Lüftungsanlage (die Anzahl / Blasrichtung und ggf. Drehzahl der Strahlventilatoren) den notwendigen Schub der Strahlventilatoren zum Erreichen des Sollwerts.

Ein geeigneter Regler antizipiert das Verlassen des zulässigen Geschwindigkeitsbereichs und verändert so bereits frühzeitig die aktuell eingesetzte Energie der Lüftungsanlage, um die Strömungsgeschwindigkeit möglichst nahe an der Soll-Geschwindigkeit zu behalten. Sind unnötige Schaltvorgänge bei den Strahlventilatoren zu vermeiden, so treten zwangsläufig höhere Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit auf.

In Abhängigkeit des Systemwiderstandes (Reibungsverluste im Fahrraum), der Störgrößen, wie meteorologische Druckverhältnisse, Druckwirkung von fahrendem Verkehr oder aufgrund eines Brandereignisse, etc. und des Nennschubs eines Strahlventilators wird die Luftströmung im Tunnelfahrraum unterschiedlich stark beeinflusst. Je kleiner der Schub je Schaltstufe, desto kann der Wert der Längsströmung im Tunnel beeinflusst werden. Alternativ kann der Schub durch häufiges Ein-/Ausschalten (Pulsweiten-Modulation) im zeitlichen Mittelwert reduziert werden. Dies ist aber insofern ungünstig, da jeder Schaltvorgang zu einer thermischen Belastung des Motors führt. Dies kann zu einer thermischen Überbelastung des Motors führen (siehe 5.2.4).

Zur Untersuchung, inwiefern die Längsströmung im Fahrraum ohne permanente Schaltvorgänge eines Strahlventilators gehalten werden kann, wird der Einfluss eines Strahlventilators auf die Geschwindigkeitserhöhung im Tunnel untersucht (objekt-/ventilatorspezifisch). Wie oben festgehalten, wird vom Regler ein Strahlventilator zugeschaltet, sobald der Fehler zwischen Ist- und Soll-Geschwindigkeit einen definierten Wert erreicht hat. Bestenfalls führt der zusätzlich aufgebrachte Schub dazu, dass die Regelabweichung vernachlässigbar klein ist.

Liegt die Geschwindigkeitserhöhung aufgrund eines einzelnen Strahlventilators im Bereich von $2/3$ des zulässigen Toleranzbandes (66% der Differenz von $U_{\text{soll,max}}$ und $U_{\text{soll,min}}$), so kann dieser zugeschaltet werden ohne dass der zulässige Geschwindigkeitsbereich aufgrund der Wirkung dieses Strahlventilators langfristig (ohne zusätzliche Störungen) verlassen wird. Aufgrund der vorhergehenden definierten zulässigen Geschwindigkeitsbereich, folgt, dass ein System mit einer vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeit von 0.7 m/s, durch eine Veränderung der Längsströmung von maximal 0.4 m/s (66% von 1.3-0.7 m/s) mittels Strahlventilator stabil regelbar ist (vgl. Abb. 30).

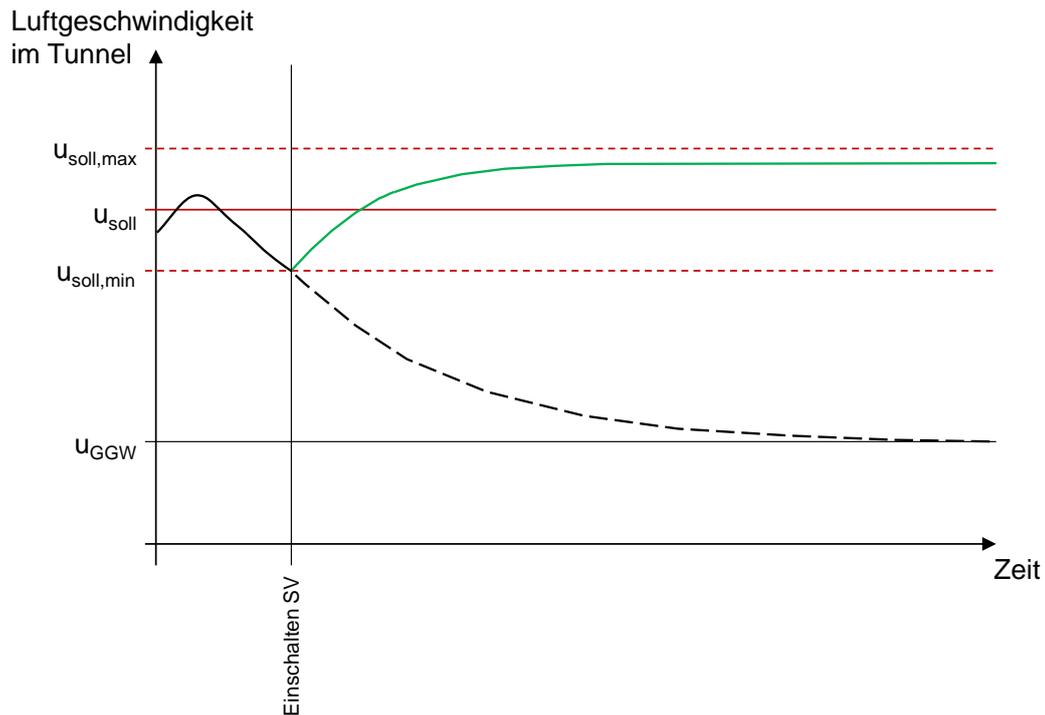


Abb. 30 Theoretischer, zeitlicher Verlauf der Längsströmung im Tunnel aufgrund der Krafteinwirkung eines Strahlventilators ohne Überschreitung der zulässigen Längsströmung $u_{soll,max}$.

Die schwarze, durchgezogene Linie zeigt den Geschwindigkeitsverlauf im zulässigen Geschwindigkeitsbereich vor dessen Unterschreitung von $u_{soll,min}$. Die schwarze gestrichelte Linie zeigt den hypothetischen Geschwindigkeitsverlauf ohne Einschalten eines Strahlventilators – es würde sich nach einer gewissen Zeit der Gleichgewichtszustand u_{GGW} einstellen. Die grüne Linie zeigt den effektiven Geschwindigkeitsverlauf durch Einschalten des Strahlventilators. Die Abbildung ist so weit idealisiert, dass Effekte wie die Zeitdauer zum Erreichen der Nenndrehzahl und Zeitdauer bis zur Schubumsetzung vernachlässigt wurden.

Führt der Schub eines Strahlventilators ausgehend von der Untergrenze $u_{soll,min}$ zu einer Geschwindigkeit grösser als die Obergrenze $u_{soll,max}$ (siehe Abb. 31), so muss der Schub des Strahlventilators entweder in seiner Stärke oder aber in der Wirkdauer (zeitlich) beschränkt werden.

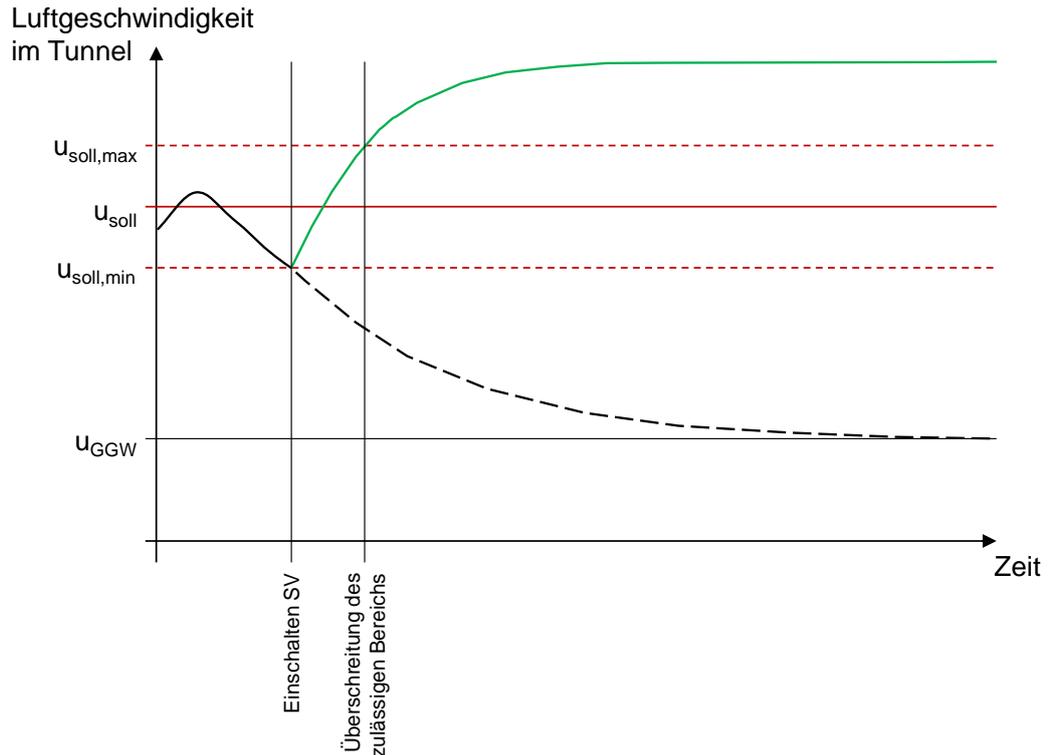


Abb. 31 Theoretischer, zeitlicher Verlauf der Längsströmung im Tunnel aufgrund der Krafteinwirkung eines Strahlventilators mit Überschreitung der zulässigen Längsströmung $u_{soll,max}$.

Mögliche Lösungen, um das Regelziel zu erreichen:

- Drehzahlvariation des Strahlventilators
- Getakteter Betrieb (Ein- /Ausschalten) des Strahlventilators

Drehzahlvariation

Mit der Drehzahlvariation kann der Schub eines Strahlventilators in Stufen oder stufenlos verstellt werden.

Im ersten Fall kommt eine Dahlanderschaltung mit den Drehzahlstufen 0, 50, 100% zum Einsatz oder Motoren mit zwei festen Drehzahlen z.B. bei 1'000 1/Minute und 3'000 1/Minute. Da der Schub eines Strahlventilators bei kleinen Drehzahlen sehr stark zurückgeht (bei 30% Drehzahl ergibt sich ein Standschub von 9 % bis 10 %; siehe Kapitel 3.4.4), ist der Einsatz von Motoren mit sehr kleinen Drehzahlen in der ersten Stufe meist nicht zielführend. Bei Stufenschaltungen gelten grundsätzlich die gleichen Themen wie beim getakteten Betrieb.

Beim Einsatz von Frequenzumformern kann die Drehzahl im Drehzahlbereich zwischen 30 bis 100% stufenlos variiert werden.

Getakteter Betrieb

Hierbei wird der Strahlventilator so lange betrieben bis der Istwert den zulässigen Geschwindigkeitsbereich überschreitet. Nach dem Ausschalten des Strahlventilators fällt der Istwert wieder ab, bis dieser die untere Grenze des zulässigen Bereichs erreicht hat und ein Strahlventilator erneut eingeschaltet werden muss. Durch diesen getakteten Betrieb kann die Längsströmung zwischen der oberen und unteren Grenze des zulässigen Geschwindigkeitsbereichs gehalten werden. Ein Nachteil hierbei ist, dass keine konstante Strömung im Tunnel erreicht werden kann. Geschwindigkeitsvariationen sind für die Erhaltung einer Rauchsichtung ungünstig. Bis dato gibt es keine qualifizierten Aussagen dazu,

wie stark die Rauchschiebung aufgrund der Geschwindigkeitsvariation negativ beeinflusst wird. Allerdings nehmen die Scherkräfte am Rand einer Rauchschiebung zu, wodurch lokal die Turbulenz steigt und damit eine Durchmischung zwischen Rauchschiebung und rauchärmerer Schicht erhöht wird.

Zur Klärung der Frage, ob ein getakteter Betrieb die Anforderungen an eine Längslüftung erfüllt, werden folgende zwei Kriterien untersucht:

- zeitliche Veränderung der Geschwindigkeit
- etwaige thermische Überbelastung der Strahlventilatoren aufgrund häufiger Einschaltvorgänge

Für das Kriterium der zeitlichen Veränderung der Längsströmung dient der maximale Gradient für Geschwindigkeitsänderungen, wie bereits zuvor definiert: Beträgt die Beschleunigung der Strömung aufgrund des Ventilators mehr als $1/120 \text{ m/s}^2$, so wird diese als übermässig beurteilt. Die entsprechende technische Lösung erfüllt die Anforderungen an die Regelung der Längsströmung nicht.

Wird vereinfacht von konstanten Kräfteverhältnissen ausgegangen, so wiederholt sich der Zyklus aus Beschleunigung und Abbremsen laufend und die Strömungsgeschwindigkeit kann mittels Schaltens von einem Strahlventilator innerhalb des zulässigen Bereichs gehalten werden. Dabei gilt: je grösser die Zykluszeit Δt_{zyk} , umso sanfter entwickelt sich die Längsströmung und umso weniger Schaltvorgänge pro Zeit sind nötig. Eine grosse Zykluszeit ist somit günstig für die Regelung der Längsströmung.

Die Zeitspanne Δt_{acc} (Zeitdauer zum Durchlaufen des zulässigen Geschwindigkeitsbereichs bei Beschleunigung mittels Strahlventilator) ist durch das Bauwerk (Tunnelgeometrie, Anzahl Fahrzeuge im Tunnel) und den Strahlventilator (Schub) charakterisiert: je länger der Tunnel ist und/oder je mehr Fahrzeuge im Tunnel sind, umso länger ist die Zeitspanne Δt_{acc} ; je grösser der Schub des Strahlventilators, umso kürzer ist Δt_{acc} .

Die Zeitspanne Δt_{dec} (Zeitdauer zum Durchlaufen des zulässigen Geschwindigkeitsintervalls beim natürlichen Abbremsen der Strömung) ist durch das Bauwerk (Geometrie, Füllungsgrad) und den natürlichen Gleichgewichtszustand (u_{GGW}) charakterisiert: je länger der Tunnel und/oder je mehr Fahrzeuge im Tunnel, umso kürzer Δt_{dec} ; je tiefer der Gleichgewichtszustand, umso kürzer Δt_{dec} . In Abb. 32 ist eine solche zyklische Entwicklung der Luftgeschwindigkeit im Tunnel gezeigt. Dabei handelt es sich analog zu den vorherigen Abbildungen um idealisierte Verläufe der Luftgeschwindigkeit.

Als Annahme für den natürlichen Gleichgewichtszustand u_{GGW} kann hierbei diejenige Geschwindigkeit angesetzt werden, welche um den Betrag der Geschwindigkeitserhöhung eines Strahlventilators unterhalb von $u_{soll,min}$ liegt. Wäre der Gleichgewichtszustand weiter von $u_{soll,min}$ entfernt, so wäre die Abbremszeit Δt_{dec} zwar geringer, der zulässige Geschwindigkeitsbereich wird durch das Einschalten eines Strahlventilators aus dem Gleichgewichtszustand heraus nicht erreicht – das zyklische Ein- / Ausschalten wäre also noch nicht erreicht. Wäre der Gleichgewichtszustand höher, so würde zwar der zulässige Geschwindigkeitsbereich erreicht, die Zeitdauer Δt_{dec} ist aufgrund der geringeren Geschwindigkeitsdifferenz aber grösser. Damit ergibt sich eine längere Zykluszeit Δt_{zyk} und dadurch ein (unzulässig) optimistisches Ergebnis betreffend der Kontrolle der Längsströmung.

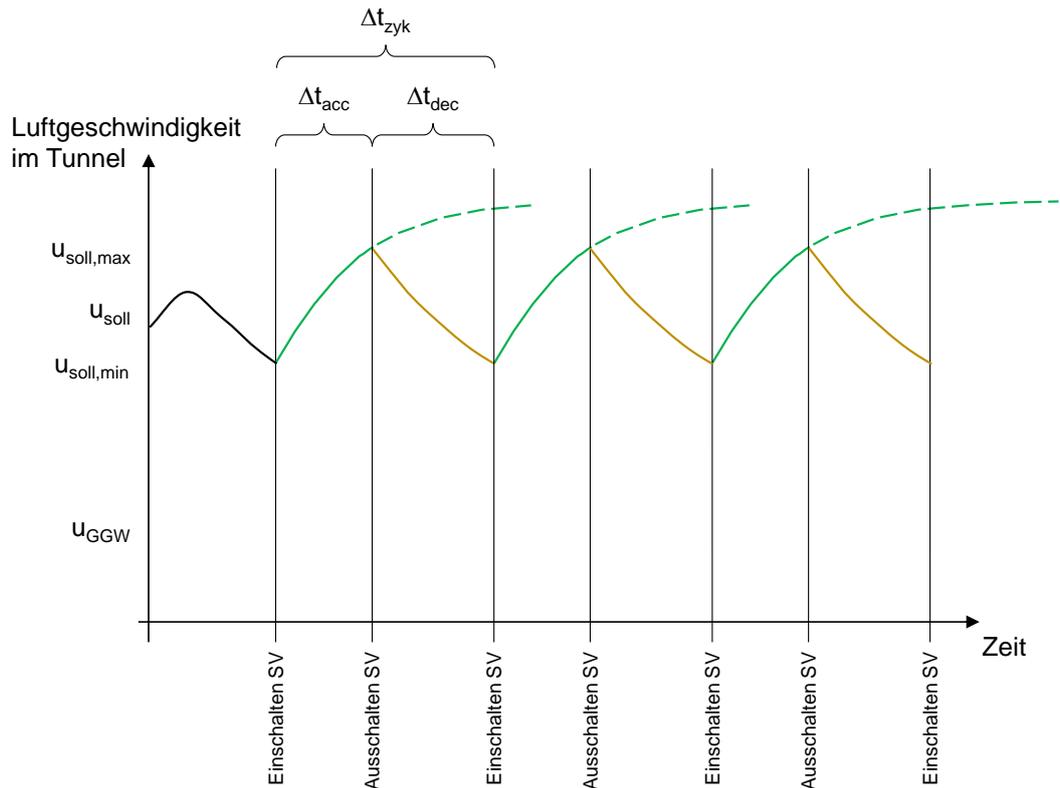


Abb. 32 Zeitlicher Verlauf der Längsströmung im Tunnel aufgrund der Krafteinwirkung eines Strahlventilators mit zyklischen Ein-/Ausschaltvorgängen

Um eine thermische Überbelastung des Motors zu verhindern, ist die Anzahl der Einschaltvorgänge (inkl. Drehrichtungsänderung) auf typischerweise 6 Vorgänge innerhalb von 60 Minuten zu beschränken. Beträgt also die spezifische Zykluszeit 10 Minuten oder mehr, so kann mittels eines einzigen Strahlventilators während unbestimmter Zeit die Längsströmung im zulässigen Bereich gehalten werden, ohne Risiko einer thermischen Überlastung. Beträgt die Zykluszeit Δt_{zyk} zwischen 5 und 10 Minuten, so kann die Regelung der Längsströmung mittels zweier Strahlventilatoren erfolgen usw.

Es kann festgehalten werden, dass für einen gegebenen Tunnel die Längsströmung mit "vielen kleinen" Strahlventilatoren einfacher zu kontrollieren ist als mit "wenigen grossen" Strahlventilatoren. Dies da einerseits die Zykluszeit bei "schwachen" Strahlventilatoren vorteilhafter ist, andererseits mehr Strahlventilatoren vorhanden sind und somit mehr Schaltvorgänge pro Zeit vorgenommen werden können, ohne die Antriebsmotoren übermässig zu belasten.

Modelle zur Berechnung der Veränderung der Längsströmung im Tunnel unter Berücksichtigung eines Strahlventilators sowie zur Bestimmung der Zykluszeit sind in Anhang I vorgestellt.

4.2 Lüftung der Sicherheitsstollen

Der Sicherheitsstollen ist ein überdruckbelüftetes Bauwerk, welches dem Tunnelbenutzer erlaubt, sich im Ereignisfall aus der Gefahrenzone (Tunnelfahrraum) zu entfernen.

Im Sinne der Richtlinie 13002 [2] wird unter dem Begriff Sicherheitsstollen derjenige Teil des Fluchtwegs bezeichnet, welcher zwischen der Notausgangstüre und der Umgebung (Schleuse, Türe ins Freie) liegt. Dies kann sowohl ein paralleler Sicherheitsstollen mit Querverbindungen zum Fahrraum, ein direkt nach aussen führender Fluchtstollen / Treppenhaus oder auch eine als Fluchtweg genutzte Tunnelröhre (diese ist nicht direkt vom Ereignis betroffen) sein. Eine als Fluchtweg genutzte Tunnelröhre verfügt über keine zusätzliche Ausrüstung gegenüber der ohnehin vorgesehenen mechanischen Lüftungsanlage. Diese wird bestmöglich zur Erzeugung eines Überdrucks eingesetzt. Diese Art von Fluchtweglüftung wird im vorliegenden Forschungsprojekt jedoch nicht näher betrachtet.

In Abb. 33 ist schematisch der Aufbau eines Sicherheitsstollens gezeigt. Der Sicherheitsstollen ist über Querverbindungen mit dem Fahrraum verbunden. Die Querverbindungen sind mit zwei Türen, den Notausgangstüren und der Zwischentüren, ausgestattet. Der eigentliche Sicherheitsstollen und die Querverbindungen sind über Öffnungen, oberhalb der Zwischentüren, aerodynamisch miteinander verbunden. Gegenüber der Umgebung ist der Sicherheitsstollen mittels Schleuse aerodynamisch getrennt. Details zu den unterschiedlichen Anlagenteilen und den unterschiedlichen technischen Lösungen finden sich in [2] und [10].

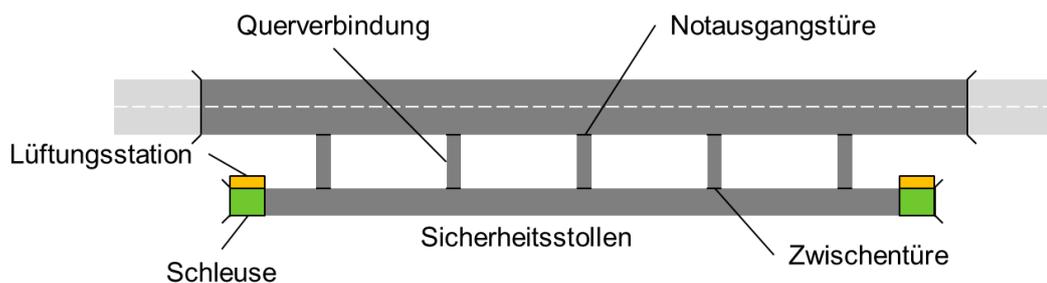


Abb. 33 schematische Darstellung Tunnel – Fahrraum mit Sicherheitsstollen

Die aerodynamischen Anforderungen aus [2] und [10] können folgendermassen zusammengefasst werden:

1. Im Normalbetrieb wird mittels der mechanischen Lüftung im Sicherheitsstollen ein minimaler Überdruck gegenüber dem Verkehrsraum eingestellt und permanent gehalten (keine Regelung).
2. Im Fall eines (Brand-) Ereignisses im Tunnelfahrraum (nachfolgend; Ereignisbetrieb) hat die mechanische Lüftung des Sicherheitsstollens eine Mindestströmung durch die ggf. geöffneten Notausgangstüren sicherzustellen. Abhängig von der Art des Sicherheitsstollens (Sicherheitsstollen oder direkt nach Aussen führender Fluchtstollen) liegt diese Strömung entweder bei 1 m/s oder bei 2 m/s. Abhängig vom Lüftungssystem des Fahrraums sind für die Auslegung entweder 3 oder 5 gleichzeitig offene Notausgangstüren zu berücksichtigen.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich, objektspezifisch ein Betriebspunkt für den Normalbetrieb und ein massgeblicher Betriebspunkt für den Ereignisbetrieb³. Die mögliche Lage dieser Betriebspunkte im p-V Diagramm ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

³ Der massgebliche Betriebspunkt ergibt sich aus den zwei zu untersuchenden Fällen: nominelle Anzahl Notausgangstüren offen und ungünstigste zwei Notausgangstüren offen. Und unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Redundanz.

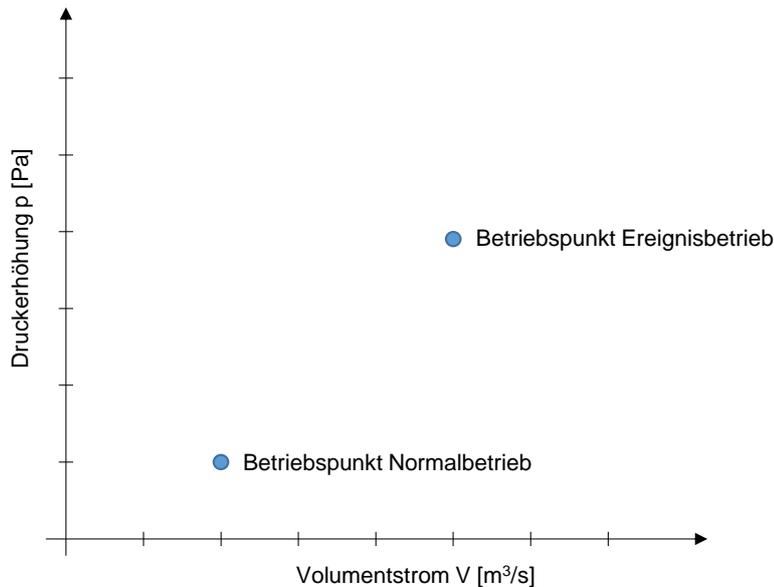


Abb. 34 Typische Betriebspunkte im p - V Diagramms eines Sicherheitsstollens

Die Volumenströme im Normalbetrieb und im Ereignisbetrieb hängen von der Anzahl Notausgänge, der Position der Lüftungszentralen sowie vom Lüftungssystem des Tunnelfahr-raums ab. Die entsprechende Druckerrhöhung ist abhängig von den räumlichen Gegebenheiten und entsprechen den aerodynamischen Systemverlusten beim entsprechenden Volumenstrom. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung von Druckverhältnissen und Volumenstrom ist eine iterative Berechnungsmethode nötig, welche eine entsprechend komplexe Modellierung erfordert.

In der Planung der Lüftungsanlage kann die Leckagemenge nur abgeschätzt, nicht aber exakt bestimmt werden, da ausser der effektiven Leckage über die Notausgangstüren zusätzliche Bauwerksleckagen (z.B. Entwässerungsleitungen, Risse / Spalten, Bauleranzen etc.) vorhanden sind. Der genaue Umfang ist erst nach Fertigstellung des Bauwerks bekannt. Bereits kleine Unterschiede zwischen angenommenen Werten und Realität führen zu einer ungünstigen Auslegung und damit entweder zur Nicht-Einhaltung der Anforderungen oder zu einem ineffizienten Betrieb der Anlage. Dem wird in der Praxis durch eine Anpassung des Betriebspunktes nach Inbetriebnahme begegnet. Dies kann entweder durch Anpassung der Drehzahl des Normalbetriebs (Bedingung: Frequenzumrichter) oder durch Anpassung des Schaufelwinkels erfolgen (sofern die Kennlinie und die Anforderung aus dem Ereignisbetrieb des zulassen).

Vereinfacht kann der Volumenstrom in Normalbetrieb wie folgt abgeschätzt werden:

$$V_N = (n_T + 1.0) \cdot L_N$$

V_N	Volumenstrom Normalbetrieb
n_T	Anzahl Türen des Sicherheitsstollens zum Fahrraum
L_N	Leckagemenge Normalbetrieb je Tür

Die Luftmenge im Ereignisfall lässt sich mit folgender Formel abschätzen:

$$V_E = n_{T,o} \cdot L_E + (n_T - n_{T,o} + 1) \cdot L_{N,e}$$

V_E	Volumenstrom Normalbetrieb
$n_{T,o}$	Anzahl der gleichzeitig offenen Notausgangstüren
L_E	Luftmenge durch offene Notausgangstür
n_T	Anzahl Türen des Sicherheitsstollens zum Fahrraum
$L_{N,e}$	Leckagemenge Ereignisbetrieb je Tür

Aufgrund von Erfahrungen aus der Praxis kann als Wert für die Leckagemenge im Normalbetrieb pro Tür 0.4 m^3/s angenommen werden. Dieser Wert beinhaltet neben der reinen Leckage über die Notausgangstür zusätzliche Bauwerksleckagen. Die Leckagemenge im

Ereignisbetrieb ist aufgrund des höheren Druckniveaus im Sicherheitsstollen grösser als diejenige im Normalbetrieb. Als groben Anhaltswert kann 0.8 bis 0.9 m³/s angesetzt werden. Die Luftmenge durch offene Notausgangstüren entspricht der geforderten, mittleren Luftströmung multipliziert mit der Öffnungsfläche der Tür.

Abb. 35 zeigt für unterschiedliche Konfiguration (Variation des Lüftungssystems im Fahrraum, Variation der Anzahl Notausgangstüren) den Volumenstrom im Normal- und im Ereignisbetrieb. Je nach Anzahl Notausgänge und nach Fahrraumlüftung bewegt sich das Verhältnis aus Volumenstrom im Normalbetrieb und Volumenstrom im Ereignisbetrieb zwischen circa 20% und 60%.

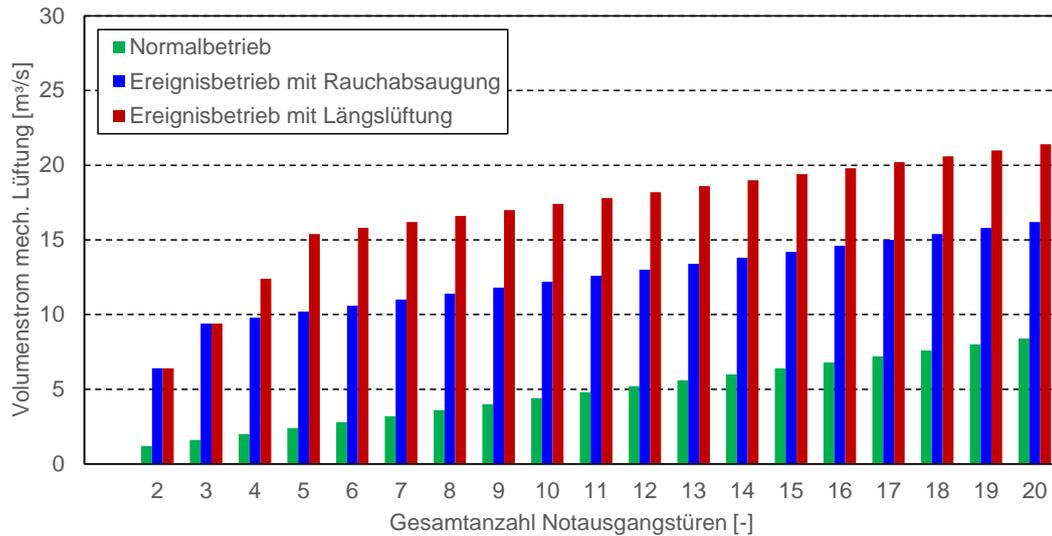


Abb. 35 Abgeschätzter Volumenstrom der unterschiedlichen Betriebspunkte in Abhängigkeit der Anzahl Notausgänge des Sicherheitsstollens.

Abb. 36 zeigt die detailliert berechneten Betriebspunkte, die entsprechenden Anlagen und Ventilatorcharakteristiken eines SiSto-Ventilators bei 30 % und 100 % der maximalen Drehzahl. Die angegebenen Betriebspunkte ergeben sich, wenn nur ein Ventilator betrieben wird und sind:

1. Normalbetrieb alle Türen geschlossen.
2. Ereignisbetrieb, die drei am weitesten vom Ventilator entfernten Fluchttüren sind offen, die Überdruckklappe ist geschlossen.
3. Ereignisbetrieb, die dem Ventilator am nächsten sowie die am weitesten entfernte Fluchttür sind geöffnet, die Überdruckklappe ist geschlossen.
4. Ereignisbetrieb, alle Türen geschlossen, Überdruckklappe offen

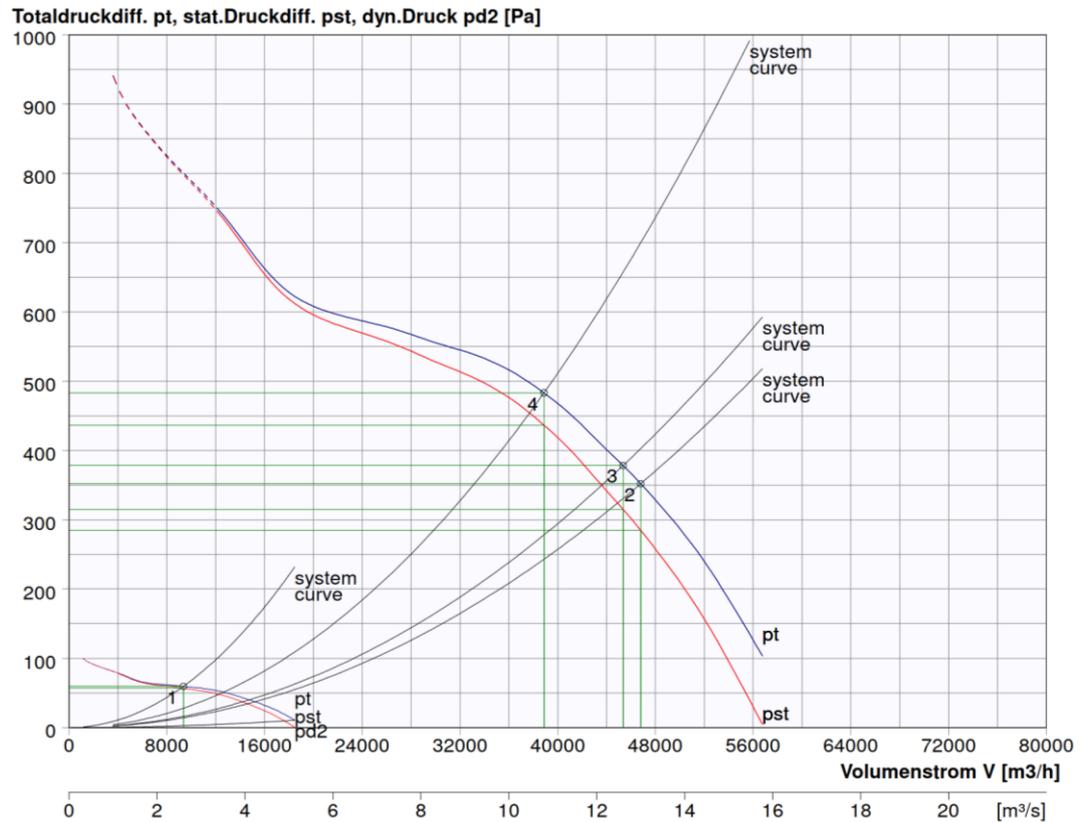


Abb. 36 Ventilator Kennlinie für den SiSto Tunnel Küblis, CH [42]

Die Unterschiedlichen Anforderungen aus Normal- und Ereignisbetrieb können durch unterschiedliche technische Lösungen abgedeckt werden. Die gängigsten Lösungen sind:
Betrieb des Ventilators für den Ereignisbetrieb mit reduzierter Drehzahl:

- Frequenzumrichter
- polumschaltbarer Motor (Dahlander)
- 2-stufiger Motor mit zwei separaten Wicklungen)

Verwendung von mehreren Ventilatoren:

- Separater, zusätzlicher Ventilator für den Normalbetrieb
- Einsatz von vier identischen Ventilatoren (Betrieb von einem im Normalbetrieb, Betrieb aller im Ereignisbetrieb)

5 Grundlagen Antriebstechnologie

Im Kapitel Grundlagen Antriebstechnologien werden nebst wichtigen elektronischen Grössen und die Unterteilung der Elektromotoren, gängigen Anlassverfahren für Ventilatoren im Bereich der Strassentunnel betrachtet. Im Allgemeinen versteht man unter Antrieb den Motor und das entsprechende Anlassverfahren. Es werden folgenden Anlassverfahren betrachtet: Direktanlauf DOL, Stern-Dreieck-Schaltung, Dahlander-Schaltung, Sanftanlasser und Frequenzumrichter. Die Besonderheiten, Vor- und Nachteile der Anlassverfahren werden herausgearbeitet. Diese Ergebnisse werden im Kapitel 7, bei der Erarbeitung und Bewertung des morphologischen Kasten, verwendet. Ein wichtiges Unterscheidungskriterien ist u.a. der jeweilige Spannungsabfall und die Erzeugung von Oberschwingungen im Netz. Diese spezifischen Netzzrückwirkungen werden im Kapitel 6 betrachtet.

5.1 Begriffe

Leistungsfaktor λ

Der Leistungsfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen Wirk- und Scheinleistung und bezieht sich ausschliesslich auf Leistung im Wechselstrom. Er liegt zwischen 0 und 1. Ist er gleich 1, wird das Netz nicht mit Blindleistung belastet. Deshalb sollte er möglichst nahe bei 1 liegen.

$$\lambda = \frac{|P|}{S}$$

λ	Leistungsfaktor
P	Wirkleistung
S	Scheinleistung (gesamte Scheinleistung unter Berücksichtigung der Oberschwingungen)

Bei ausschliesslich sinusförmigen Strömen und Spannungen wird aus dem Leistungsfaktor der Wirkfaktor $\cos \varphi$. Der Wirkfaktor beschreibt das Verhältnis zwischen Wirk- und Scheinleistung [26].

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$\cos \varphi$	Wirkfaktor in [-]
P	Leistung in [W]
S	Scheinleistung in [VA]

Der Wirkfaktor ist immer grösser wie der Leistungsfaktor. Z. B. hat ein Motor mit FU hat einen $\cos \varphi$ von ca. 0.93 und einen Leistungsfaktor von ca. 0.85. Der Wirkfaktor bezieht sich immer auf die Grundschwingung 50 Hz. Ist nur diese vorhanden (sinusförmige Grössen), so ist der Leistungsfaktor = Wirkfaktor.

Das Vorzeichen des Wirkfaktors $\cos \varphi$ wird aus dem Vorzeichen der Wirkleistung bestimmt und sagt nichts darüber aus, ob das System induktiv oder kapazitiv ist. Der Leistungsfaktor ist eine Betragsgrösse und ist vorzeichenlos.

Diode

Die Diode ist ein Zweischicht-Halbleiterelement, das elektrischen Strom leitet, sobald die anliegende elektrische Spannung zwischen Anode A und Kathode K positiv ist. Der Strom kann nur in eine Richtung fließen und ist in die andere Richtung gesperrt. In der Regel befindet sich innerhalb der Diode an der Anoden-Seite eine p-Typ dotierte Schicht und an der Kathode eine n-Typ dotierte Schicht. Die Halbleiter-Diode besteht meist aus Silizium, welche ab einer Spannung von ca. 0.6 - 0.7 V leitend ist.

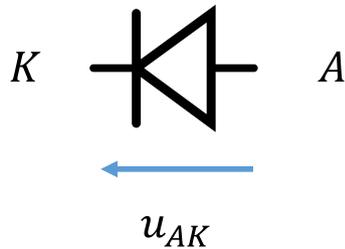


Abb. 37 Diode

K	Kathode
A	Anode
u_{AK}	Spannung zwischen Anode-Kathode in [V]

Thyristor

Der Thyristor ist eine steuerbare Diode und hat die Anschlüsse Anode A, Kathode K und Gate G. Der Thyristor hat zwei Zustände – leitend oder nicht leitend. Durch einen Stromimpuls am Steueranschluss «Gate» kann der Thyristor gezielt eingeschaltet werden und funktioniert dann wie eine Diode. Der Stromfluss durch den Transistor lässt sich allerdings nicht gezielt ausschalten. Es gibt abschaltbare Transistoren, welche über einen negativen Gatestrom abgeschaltet werden können. Diese erlauben nur niedrige Schaltfrequenzen. Dafür sind grosse Ströme möglich.

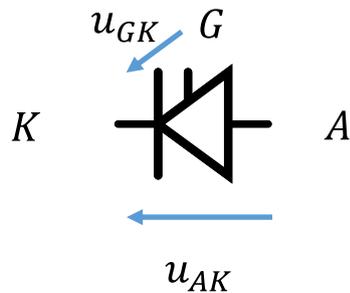


Abb. 38 Thyristor

K	Kathode
A	Anode
u_{AK}	Spannung zwischen Anode-Kathode in [V]
u_{GK}	Gatespannung in [V]

Schaltthyristor

Der Schaltthyristor ist ein Dreischicht-Halbleiter-Bauelement und hat drei Anschlüsse – Emitter E, Collector C und Gate G. Gate G wird auch sehr häufig als Basis B bezeichnet. Schaltthyristoren werden auch als IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) bezeichnet. Sie können gezielt ein- und ausgeschaltet werden.

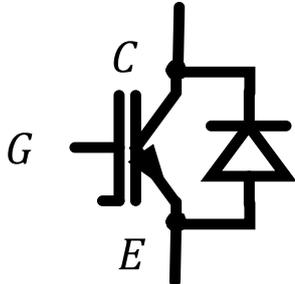


Abb. 39 Schaltthyristor [25]

Schutz des Motors

Hauptschutz bzw. Motorschutz sollen Elektromotoren vor Überlast schützen. Die kritischen Teile des Motors sollen so im zulässigen Temperaturbereich bleiben. Dies kann durch unterschiedliche Mechanismen ausgelöst werden:

- Thermischer Überlastschutz
- Elektronischer Überlastschutz

5.2 Elektromotoren

Der Elektromotor wird hier als ein rotatorischer, elektromechanischer Energiewandler verstanden, welcher elektrische Energie aus dem elektrischen Netz entnimmt und in mechanische Energie umformt [24].

Allgemein lassen sich Elektromotoren wie folgt unterteilen:

Tab. 13 Übersicht Elektromotoren

Typ	Anwendung
Gleichstrommaschine	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinmotoren mit Permanentmagneterregung • Drehzahlveränderbare Antriebstechnik: Einsatz im höheren Leistungsbereich meist in Kombination mit Stromrichter
Wechselstrommaschinen	Betrieb direkt am Einphasen-Wechselstromnetz (z.B. 230 V, 50 Hz) <ul style="list-style-type: none"> • Kleinmotoren • Universalmotoren (mit einfachem Stromrichter) als drehzahlveränderbarer Antrieb • Einphasen-Asynchronmaschinen und Spaltpol-Asynchronmaschinen • Grossmaschinen
Drehstrommaschinen - Synchronmotor	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinmotoren - Schrittmotor mit Permanentmagnet-Läufer oder Reluktanzläufer • Stromerzeuger
Drehstrommaschinen - Asynchronmotor	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinmotoren • Asynchronmotor mit Schleifringläufer • Asynchronmotor mit Käfigläufer (Standard-Industriemotor) • Stromerzeuger

Nachfolgend werden der Vollständigkeit halber ausgewählte Motortypen kurz beschrieben. Aufgrund der gängigen Praxis werden im weiteren Forschungsprojekt aber nur Drehstrom-Asynchronmotoren mit Käfigläufer berücksichtigt.

5.2.1 Asynchronmotor mit Käfigläufer

Der Asynchronmotor (ASM) ist eine Induktionsmaschine und gehört zu den Drehfeldmaschine. Der ASM besteht aus einem stillstehenden Ständer bzw. Stator und einem sich darin befindenden rotierenden Läufer (Rotor). Dazwischen befindet sich ein kleiner Luftspalt. Das im Stator umlaufende Magnetfeld induziert über den Luftspalt eine Spannung im Rotor. Da die Wicklungen über den Ring kurzgeschlossen sind, fliessen Kurzschlussströme. Gemeinsam mit dem Drehfeld bauen diese Kräfte auf und bilden ein Drehmoment, dass im Rotor die Drehbewegung erzeugt [27].

Aufbau

Beim Kurzschlussläufer- oder Käfigläufermotor besteht die Läuferwicklung aus einem Aluminium- oder Kupferkäfig. Bei kleinen bis mittleren Leistungen werden die Läufernuten mit Aluminium ausgegossen. Die entstehenden Stäbe sind an beiden Enden durch sogenannte Kurzschlussringe verbunden. Bei grossen Leistungen werden in die Läufernuten rechteckförmige Kupferstäbe eingeschoben.

Im Asynchronmotor werden die Wirkungen des magnetischen Drehfeldes ausgenutzt: Die Spannungen und Ströme im Läufer werden durch das Drehfeld induziert. Der Asynchronmotor wird deshalb auch als Induktionsmotor bezeichnet.

Der Läufer bewegt sich asynchron zum magnetischen Drehfeld. Hierbei entsteht Schlupf.

Die Synchrondrehzahl ist wie folgt definiert:

$$n_s = f_n / p$$

n_s Synchrondrehzahl in [1/min]
 f_n Nennfrequenz in [Hz]
 p Polpaarzahl in [-]

Schlupf

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

s Schlupf in [-]
 n_s Synchrondrehzahl in [1/min]
 n Läuferdrehzahl in [1/min]

Polpaarzahl

Magnetische Pole treten nur paarweise auf, daher wird die Polzahl mit $2 \cdot p$ bezeichnet. Der Abstand zwischen zwei Nachbarspulen wird als Polteilung bezeichnet. Je höher die Polpaarzahl ist, umso enger liegen die Spulen beieinander. Dies hat u.a. einen Einfluss auf das Verhalten des Luftspaltfeldes.

Wicklungsanordnung

Ein Drehfeld entsteht bei einer Anordnung von 3 Spulen, die gleichmässig um 120° versetzt im Stator untergebracht sind und von einem entsprechenden Drehstrom durchflossen werden. Die Stränge der dreisträngige Wicklung werden mit U, V, W bezeichnet. Jedes Polpaar hat sechs Zonen, bestehend aus drei Zonen +U, +V, +W und -U, -V, -W. Dies wird Sechszonenwicklung genannt.

5.2.2 Synchronmotor

Die Synchronmotor ist wie der Asynchronmotor eine Drehfeldmaschine, allerdings kann der Synchronmotor nur bei einer synchronen Drehzahl betrieben werden, welche durch Netzfrequenz und Polpaarzahl bestimmt ist.

Aufbau

Der Rotor bzw. Läufer des Synchronmotors läuft im Gegensatz zum Asynchronmotor synchron zum Drehfeld. Es bedarf daher eines zusätzlichen Erregerfeldes, welches durch eine Erregerwicklung oder Permanentmagnet am Läufer (Innenpolmaschine) oder am Stator (Aussenpolmaschine) realisiert werden kann.

Bei den Innenpolmaschinen mit einem zusätzlichen Erregerfeld werden 2 Ausführungsformen des Läufers, Vollpol-Läufer und Schenkelpol-Läufer, unterschieden. Wird diese Erregung durch einen Permanentmagneterregung ersetzt, spricht man von permanentmagneterregten Synchronmotoren. Bei dieser Ausführung kann auf Erregerspannungsquelle, Erregerwicklung und Stromzuführung über Schleifringe oder Bürsten verzichtet werden [39].

Die Synchrondrehzahl ist wie folgt definiert:

$$n_1 = f_1/p$$

n_1 Synchrondrehzahl in [1/min]

f_1 Netzfrequenz in [Hz]

p Polpaarzahl in [-]

Synchronmotoren sind u.a. aufgrund der beseitigten Schlupfverluste deutlich effizienter als Asynchronmotoren.

Nachteilig ist allerdings der Anlaufvorgang. Synchronmaschinen sind durch ihr physikalisches Prinzip mit ihrer Drehzahl starr an die Frequenz des Luftspaltfeldes und damit an die Netzfrequenz gebunden. Sie werden in der Regel mit Frequenzumrichter betrieben.

5.2.3 Reluktanzmotor

Das Prinzip eines Reluktanzmotors beruht auf eine Änderung des magnetischen Widerstands, wodurch die Reluktanzkraft oder auch Maxwellsche Kraft entsteht. Bei den Reluktanzmotoren wird zwischen geschalteten Reluktanzmotor (SRM) und Synchron-Reluktanzmotor (SynRM) unterschieden.

Stator und Rotor bestehen beim geschalteten Reluktanzmotor aus ausgeprägten Polen, wobei sich die Anzahl der Pole im Stator und Rotor unterscheidet. Geschaltete Reluktanzmotoren sind für sehr hohe Drehzahlen geeignet.

Der Aufbau des Stators von Synchron-Reluktanzmotoren ist vergleichbar zu dem des ASM. Der Rotor besteht aus einem Blechpaket mit magnetischen Flussbarrieren. Bei einem Synchron-Reluktanzmotor ist der Einsatz eines Frequenzumrichters zwingen.

Der Synchron-Reluktanz-Motor hat einen höheren Wirkungsgrad als andere Motoren und die Erwärmung von Läufer und Lager fällt geringer aus.

5.2.4 Betriebsarten und Einschaltdauer von Elektromotoren

Gemäss DIN EN 60034-1 [32] liegt die Angabe der Betriebsart in der Verantwortung des Käufers. Wenn der Käufer keine Betriebsart angibt, wird vom Hersteller die Betriebsart S1 (Dauerbetrieb) angenommen.

Gemäss [32] werden die folgenden zehn Betriebsarten unterschieden:

- S1 Dauerbetrieb
- S2 Kurzzeitbetrieb
- S3 Periodischer Aussetzbetrieb
- S4 Periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorganges
- S5 Periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorganges und Aussetzbetrieb ohne Einfluss des Anlaufvorganges
- S6 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung
- S7 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Anlauf und elektr. Bremsung
- S8 Ununterbrochener periodischer Betrieb mit periodischer Drehzahländerung
- S9 Betrieb mit nicht periodischer Last- und Drehzahländerung
- S10 Betrieb mit einzelnen konstanten Belastungen

Für Ab-/Zuluftventilatoren und für SiSto-Ventilatoren im Normalbetrieb ist als Betriebsart S1 zu wählen, da die Ventilatoren ohne massgebliche Änderung des Betriebspunkts betrieben werden.

Für Strahlventilatoren in Systemen mit Regelung der Längsströmung ist als Betriebsart S4 oder S9 zu wählen. Für Strahlventilatoren von Lüftungsanlagen ohne Regelung ist die Betriebsart S1 zu wählen.

5.3 Anlassverfahren

Unter Anlassen wird der Prozess vom Stillstand bei stromloser Maschine zu einer bestimmten stationären Drehzahl mit oder ohne Last verstanden.

Je nach Anlassverfahren kann der Anlaufstrom beim Hochfahren des Motors ein bis zu 10-faches betragen wie der Nennstrom des jeweiligen Motors. Diese hohen Stromspitzen im Anlauf können aufgrund des damit einhergehenden Spannungseinbruch das Netz belasten. Vor allem bei schwachen Netzen sind grosse Spannungseinbrüche unerwünscht. Um Spannungseinbrüche bzw. Stromspitzen beim Anlauf zu reduzieren, können verschiedene Antriebstechnologien zum Einsatz kommen.

Darüber hinaus kann es noch weitere Anforderungen an den Betrieb des Motors bzw. Ventilators geben, welche einen Betrieb bei unterschiedlicher Drehzahl erfordert (vgl. Kapitel 4.1.2.).

Zu den gängigen Antriebstechnologien gehören:

- Direktanlauf (DOL)
- Stern-Dreieck-Anlauf
- Anlasstransformator
- Dahlander-Motor
- Sanftanlasser
- Frequenzumrichter (FU)
 - 6-Puls FU
 - 12-Puls FU
 - Active-Front-End – Umrichter

Anlasstransformatoren werden im Rahmen von aktuellen Projekten nicht mehr eingesetzt und werden entsprechend hier nicht weiter betrachtet.

5.3.1 Direktanlauf DOL

Direktanlauf bedeutet Anlassen durch direktes Einschalten, d.h. die volle Spannung des Netzes liegt direkt am Verbraucher an. Der Anlaufstrom erreicht in der Regel ein 8 bis 10 – faches des Nennstroms. Trotz der hohen Stromspitzen wird nur ein kleines Anzugsmoment entwickelt, was auf das Nacheilen des Anzugstroms gegenüber der Netzspannung zurückzuführen ist [25].

Der Direktanlauf oder kurz DOL (Direct online) genannt, besteht aus einem Hauptschütz (KM1) und einem thermischen oder elektronischen Überlastrelais (FR).

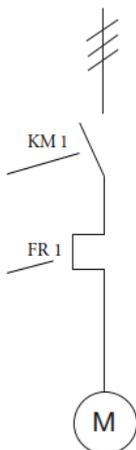


Abb. 40 Aufbau einer DOL-Schaltung [22]

Vorteile DOL

Vorteile des DOL sind die einfache Bauweise, niedrige Kosten und geringer Platzbedarf.

Nachteile

Der Anlaufstrom kann ein bis zu 10-fache des Nennstroms des Motors betragen und führt zu entsprechenden Spannungseinbrüchen. Diese schaltbedingten Spannungsänderungen (vgl. Kapitel 6.2) 85 müssen gem. DACHCZ [35] auf ihre Netzverträglichkeit beurteilt werden.

Die Drehzahl des Motors ist bei einem Betrieb mit DOL auf 0 oder 100% festgelegt und ist somit nicht variabel.

5.3.2 Stern-Dreieck-Schaltung

Bei der Stern-Dreieck-Schaltung wird die Maschine für eine Dreiecksschaltung dimensioniert und in Sternschaltung angelassen. Das Drehmoment in Sternschaltung ist bei gleichem Schlupf 1/3 des Wertes bei Dreieckschaltung.

Somit nimmt der Verbraucher in Dreieckschaltung die dreifache Leistung im Vergleich zur Sternschaltung auf, obwohl die Strangwiderstände ihre Werte nicht verändern. Dies wird in den folgenden Gleichungen dargestellt.

Der Anlaufstrom beträgt beim Umschalten von Stern- auf Dreiecksschaltung ein 4 – 6fache. Diese Werte wurden durch Messungen (vgl. 6.3.2) verifiziert.

Die Sternschaltung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Strangströme in einen Knotenpunkt zusammenfließen.

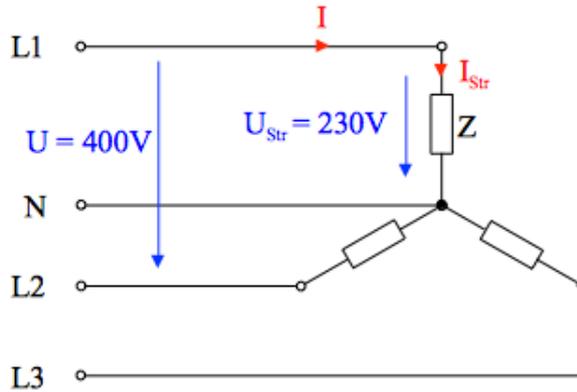


Abb. 41 Aufbau Sternschaltung [28]

Basierend auf dem Maschensatz (Kirchhoffsche Regel) resultieren für die Sternschaltung die folgenden Gleichungen:

$$I_{Str} = I_{Aussenleiter}$$

$$U_{Str} = \frac{U_{Aussenleiter}}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V}$$

$$P_{Yges} = 3 * P_{Strang} = 3 * \frac{U_{Str}^2}{Z} = \frac{U_{Aussenleiter}^2}{Z}$$

Die Dreieckschaltung ist folgendermassen aufgebaut:

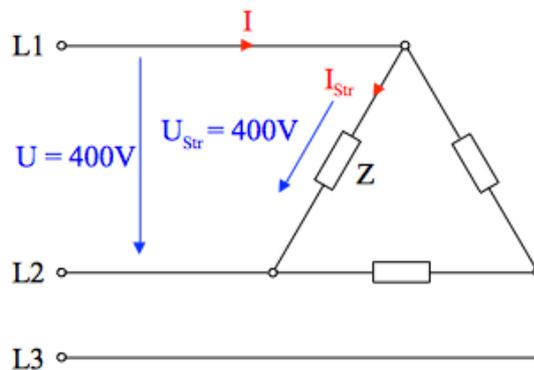


Abb. 42 Aufbau Dreieckschaltung [28]

Basierend auf dem Maschensatz (Kirchhoffsche Regel) resultieren für die Dreieckschaltung die folgenden Gleichungen:

$$I_{Str} = \frac{I_{Aussenleiter}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{Str} = U_{Aussenleiter}$$

$$P_{\Delta ges} = 3 * P_{Strang} = 3 * \frac{U_{Str}^2}{Z} = 3 * \frac{U_{Aussenleiter}^2}{Z}$$

In der Regel werden die Stern-Dreieck-Starter mit einem Hauptschütz, einen Stern- und Dreieckschütz versehen. Das Motorschutzrelais Stern / Dreieck wird in der Regel ein Zeitrelais angesteuert. Die Umschaltdauer zwischen Stern und Dreieck sollte dabei grösser als die Dauer des Lichtbogens und kleiner als ein Abfall der bereits erreichten Antriebsdrehzahl sein. Ein zu langer Betrieb in Stern sollte vermieden werden, da der Strangstrom höher ist als im Dreieck. Bei längerem Betrieb in Stern kann es daher zu einer Überhitzung im Motor kommen.

Bei der Installation von Stern-Dreieck-Starter sollte weiterhin beachtet werden, dass die Motorklemmen nach der Vorzugsschaltung richtig verbunden sind, dadurch kann die Stromspitze beim Umschalten von Stern auf Dreieck klein gehalten werden. Während der stromlosen Umschaltpause bleibt der Rotor gegenüber dem Drehfeld zurück. Sein magnetisches Feld induziert eine abklingende Restspannung. Beim Einschalten auf Dreieck wird diese Restspannung führende Statorwicklung an die Netzspannung U_{L1-L3} gelegt. Die Differenzspannung ΔU ist dank der günstigen Vektorlage der Restspannung $U_{L1'-N}$ und der Netzspannung U_{L1-L3} , welche annähernd gleichgerichtet sind, relativ klein. Somit wird die von dieser resultierende Spannung herrührende Stromspitze ebenfalls klein bleiben [40].

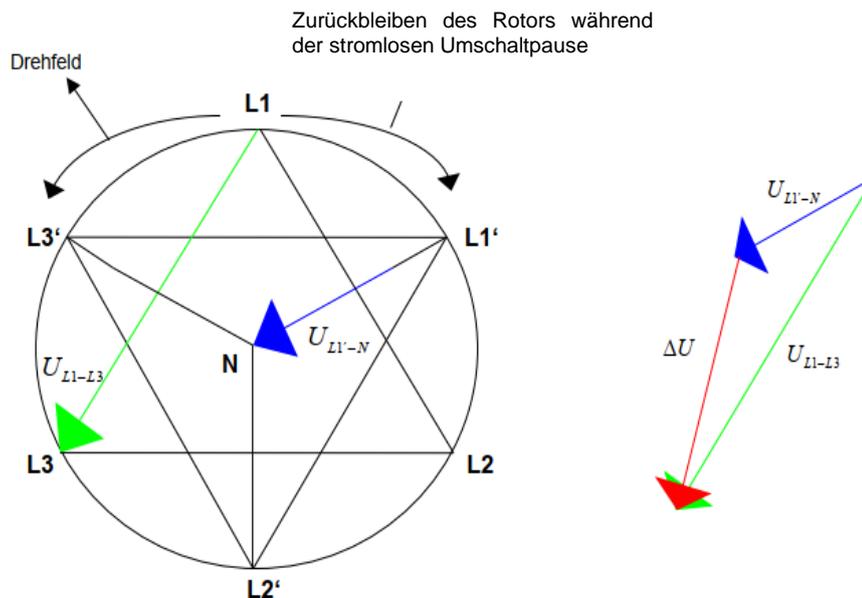


Abb. 43 Zeigerdiagramm für Stern-Dreieck-Umschaltung bei Rechtslauf mit richtigen Verbindungen der Motorphasen [40]

Zudem ist bei der Einstellung des Umschaltrelais folgendes zu berücksichtigen:

Bei der Inbetriebnahme von Axialventilatoren (meist Abluftventilatoren) muss dringend auf einen geeigneten Schaltzeitpunkt von Y auf D geachtet werden. Es ist ein Umschaltrelais mit ausreichend präzisiertem Einstellbereich einzusetzen. Die Wartezeit zwischen dem Schalten von Y auf D ist dabei unabhängig von der Aerodynamik (Start mit Segelstellung bei verstellbaren Schaufelwinkeln). Falls dies nicht berücksichtigt wird, kann dies zu einem hohen Verhältnis beim Anlaufstrom I_A / I_N führen (bis zu ein 4-faches höher). Dies konnte durch Messungen bestätigt werden (vgl. Anhang 0)

Vorteile Stern-Dreieck-Schaltung

Eine Stern-Dreieck-Anlaufschaltung dient dazu, grössere Drehstrom-Asynchronmotoren mit Kurzschlussläufer mit einem reduzierten Anlaufstrom gegenüber Direkteinschaltung zu starten. Der Anlaufstrom reduziert sich ca. auf 1/3 des Stromes gegenüber Direkteinschaltung.

Nachteile

Beim Umschalten von Stern- auf Dreieck-Schaltung ergeben sich transiente Ausgleichsströme, welche besonders gross sein können, falls die Umschaltung zu rasch erfolgt und so die im Läufer abklingenden Käfigströme nach dem Ausschalten der Sternschaltung noch nicht Null sind [24].

Dies kann zu folgenden Problemen führen [40]:

- Kurzschlusseinrichtungen lösen aus
- Das Dreieckschütz verschweisst bzw. unterliegt hohem Kontaktabbrand
- Der Motor unterliegt einer hohen dynamischen Beanspruchung

5.3.3 Dahlander-Schaltung

Mit der Dahlanderschaltung kann die Polzahl der Asynchronmaschine (polumschaltbare Motoren) im Verhältnis 1:2 erhöht und somit deren Drehzahl im Verhältnis 2:1 verändert werden. Sonderwicklungen können mit nur einer Wicklung zwei unterschiedliche Polzahlen erzeugen.

Bei der Dahlander-Schaltung werden für die niedrige Polzahl die Spulengruppen gegenseitig in Serie geschaltet, so dass eine Sechszonenwicklung entsteht.

Werden die Spulengruppen mit gleichem Wicklungssinn in Serie geschaltet, sind je Polpaar nur noch drei Zonen (+U, +V, +W) vorhanden. Man spricht auch von der Dreizonen-Wicklung. Für jede Polzahl steht die volle thermische Leistung zur Verfügung, da die gesamte Ständerwicklung mit Strom beaufschlagt wird.

Der Anlaufstrom beträgt gemäss Literatur ca. das 5-fache des Nennstromes.

Die Wicklungen bei der Dahlander-Schaltung sehen wie folgt aus:

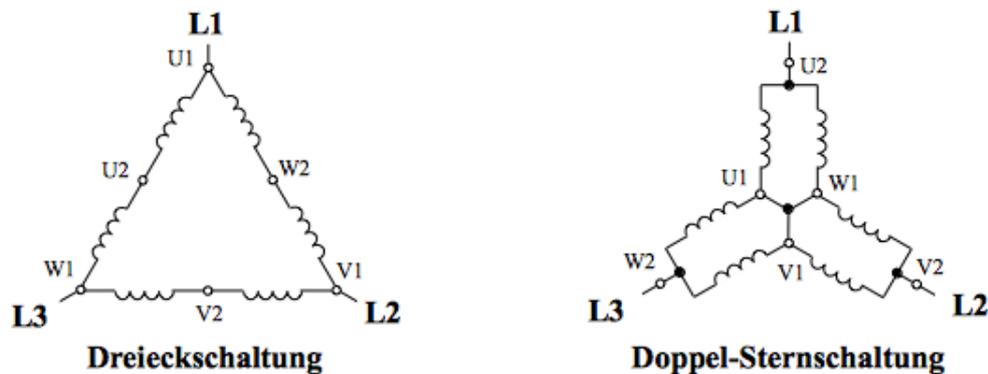


Abb. 44 Aufbau Dahlander-Schaltung [39]

Vorteile Dahlander-Schaltung

Die Maschine kann mit zwei unterschiedlichen Drehzahlen (50% und 100%) betrieben werden.

Nachteile

Der Motor muss mit 6 einzelnen Kabeln (+ Null-Leiter) erschlossen werden, da die Umschaltung im Schaltschrank erfolgt. Weiter muss ein Motor beschafft werden, welcher für eine Dahlanderschaltung geeignet ist. Dies schränkt die Anzahl verfügbarer Motoren ein.

5.3.4 Sanftanlasser

Die Sanftanlasser werden auch Softstarter genannt. Der Sanftanlasser verfügt im Hauptschaltkreis über Thyristoren. Mit der Thyristorschaltung je Strang wird aus der sinusförmigen Netzspannung u_1 durch Anschnittsteuerung ein Teil der Spannungs-Zeit-Fläche herausgeschnitten. Je Halbschwingung zündet der mit positiver Spannung beaufschlagte Thyristor nach der Zeit t nach dem jeweiligen vorausgegangenen Spannungsnulldurchgang und leitet den Ständerstrom. Wobei t wie folgt definiert ist:

$$t = \frac{\alpha}{2\pi f_s}$$

α Anschnittswinkel
 t Zündungszeit
 f_s Frequenz

Der Motor erhält eine nichtsinusförmige Spannung u_2 mit verringerter Spannungs-Zeit-Fläche, deren Grundschiwingung gegenüber der Netzspannung verringert ist, was ebenfalls die Stromaufnahme und die Drehmomententwicklung verringert. Während des Hochlaufs sind der Strom und die Spannung nicht sinusförmig, so dass das Drehmoment nicht mehr zeitlich konstant ist, sondern Pulsationen mit einer dominanten Amplitude bei der sechsfachen Ständerfrequenz aufweist [9]. Nach dem Startvorgang wird der Softstarter in der Regel überbrückt und der Motor direkt am Netz betrieben.

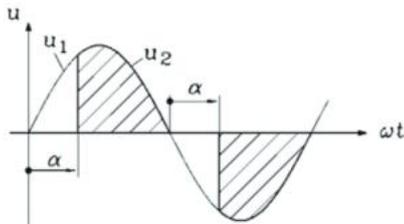


Abb. 45 Sanftanlasser: Netzspannung u_1 und Klemmenspannung u_2 mit schraffierter Spannungs-Zeit-Fläche je Strang [24]

Der Sanftanlasser besteht aus einem Hauptschütz (KM1), einem thermischen oder elektronischen Überlastrelais (FR) und dem Sanftanlasser, welcher wiederum aus Thyristoren besteht. In der Darstellung ist keine Bypass dargestellt, um den nach dem Startvorgang direkt am Netz zu betreiben.

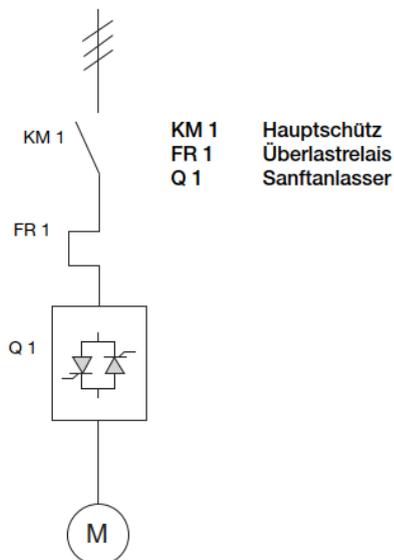


Abb. 46 Aufbau Sanftanlasser [22], ohne Bypass für einen Betrieb am Netz nach dem Startvorgang

Vorteile Sanftanlasser

Aufgrund der reduzierten Anlaufströme fällt die Motorerwärmung geringer aus als bei Direktstart oder Stern-Dreieckstart [38]. Der Anlaufstrom kann auf ein ca. 4-faches des Nennstroms gesenkt werden. Nach dem Anlauf wird der Softstarter in der Regel überbrückt und direkt am Netz betrieben.

Nachteile

Nachteil des Softstarters sind die zusätzlichen Verluste, welche durch die Verzerrung der Kurvenformen von Spannung und Strom entstehen. Diese können sich durch den Anstieg der Wicklungstemperatur während des Anlaufs weiter erhöhen. Zum Hochfahren des Motors steht ein kleineres Drehmoment zur Verfügung.

Für das Anfahren von Ventilatoren ist das vorhandene Drehmoment des Sanftanlassers normalerweise ausreichend. Während des Anfahrens kommt es zu einer netzseitigen Spannungsänderung, welche die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten darf. Zudem können während des Anfahrens die Grenzwerte der Oberwellen überschritten werden und somit die Netzseite kurzfristig negativ beeinflusst werden. Da der Startvorgang von kurzer Dauer ist, muss dies nicht zu Überschreitungen der Grenzwerte führen, da für den Vergleichswert nach Norm eine längere Mittelungszeit zur Anwendung kommt.

5.3.5 Frequenzumrichter

Frequenzumrichter richten das Drehspannungssystem des Netzes gleich und erzeugen über einen maschinenseitigen Wechselrichter ein neues Drehspannungssystem mit variabler Frequenz und variabler Spannungsamplitude [24]. Ein idealer Umrichter erzeugt eine sinusförmige Ausgangsspannung, welche in Amplitude und Frequenz veränderbar ist. In der Realität entstehen durch das Schalten Verzerrungen.

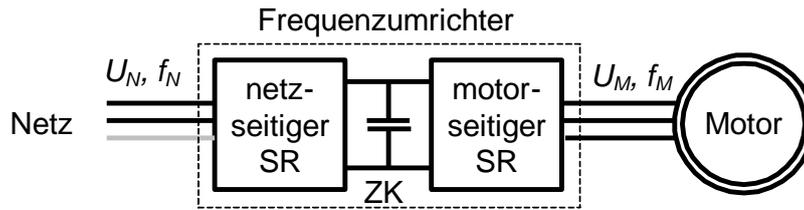
Es wird zwischen zwei Ausführungen unterschieden:

- **Spannungszwischenkreis-Umrichter**
Der Zwischenkreisrichter glättet über einen Zwischenkreiskondensator C die Gleichspannung U_d
- **Stromzwischenkreis-Umrichter**
Der Zwischenkreisrichter glättet über eine grosse Zwischenkreisinduktivität L den Gleichstrom I_d .

Die Spannungszwischenkreis-Umrichter sind universell einsetzbar und haben sich v.a. im unteren und mittleren Leistungsbereich durchgesetzt. Im Folgenden wird daher nur auf die Frequenzumrichter mit Spannungs-Zwischenkreis eingegangen.

Ein Spannungszwischenkreis-Umrichter besteht aus den folgenden Komponenten:

- netzseitiger Stromrichter SR
- Zwischenkreis ZK
- motorseitiger Stromrichter SR



- U_N : Netzspannung, ein- oder dreiphasig, mit konstanter Frequenz f_N
- U_M : Maschinenspannung mit einstellbarer Frequenz f_M
- SR: Stromrichter
- Motor: Asynchron- oder Synchronmaschine
- ZK: Zwischenkreis

Abb. 47 Aufbau Frequenzumrichter [26], [24]

Der Gleichrichter ist am speisenden Netz angeschlossen und hat die Aufgabe, aus der dreiphasigen Wechselspannung die Zwischenkreis-Gleichspannung zu bilden.

Der Zwischenkreis besteht insbesondere aus einem Kondensator, der die Zwischenkreis-Gleichspannung glättet und so den motoren- vom netzseitigen Teil entkoppelt [26].

Die Bauform des Gleichrichters und der Aufbau des Zwischenkreises bestimmen darüber hinaus auch, ob Bremsenergie ins Netz zurückgespeist werden kann oder nicht.

Es werden dabei folgende Varianten unterschieden (vgl. Abb. 49):

- Diodengleichrichter
- Diodengleichrichter mit Brems-Chopper
- Umkehrgleichrichter
- Aktive Netzseite mit Wechselrichter, auch als Aktive Frontend (AFE) oder Low Harmonic bezeichnet

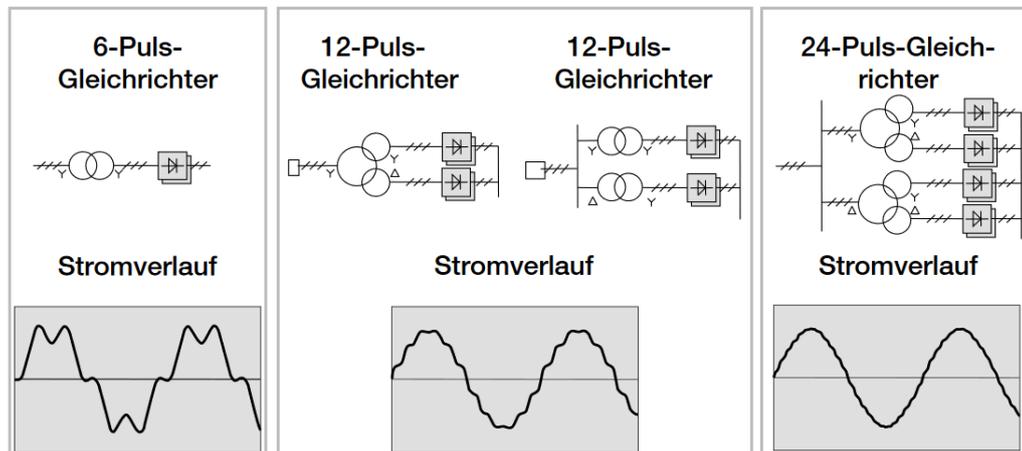


Abb. 48 Oberschwingungen des Netzstroms bei verschiedenen Gleichrichtern [23]

Der 6-Puls-Gleichrichter besteht aus sechs Dioden und einer Induktivität. Aufgrund des einfachen Aufbaus ist er preiswert, erzeugt aber einen hohen Anteil an Oberschwingungen im Bereich der niedrigen Ordnungszahlen.

Nebst dem 6-pulsigen FU gibt es auch eine Variante mit einer 12-Puls Einspeisung. Es werden dabei zwei 6-Puls-Gleichrichter mittels eines Transformators mit 30°-Phasenverschiebung verbunden. Aufgrund der Phasenverschiebung können einige Oberschwingungen eliminiert werden, allerdings ist dies Ausführung komplexer und mit höheren Kosten verbunden als der 6-Puls-Gleichrichter.

Eine Kombination aus zwei 12-Puls-Gleichrichtern wird als 24-Puls-System bezeichnet. Je grösser die Anzahl der Pulse im Gleichrichter, desto niedriger der Oberschwingungsstrom.

Darüber hinaus gibt es noch die Möglichkeit der Verwendung einer IGBT-Brücke. IGBT ist die Abkürzung von Bipolartransistor mit isolierter Gateelektrode (vgl. Kapitel 5.1). Die IGBT-Brücken gehören der Leistungselektronik an und haben somit viele Vorteile, wie insbesondere die Ausgabe eines nahezu sinusförmigen Stroms bei geringem Oberschwingungsanteil. Hauptnachteil sind die hohen Kosten [11].

Die Ausgabe unterschiedlicher Ausgangsspannungen erfolgt über den Wechselrichter entweder über Blockspannungsbetrieb oder Pulsweitenmodulation (PWM). Es wird hauptsächlich die Pulsweitenmodulation anstelle des Blockspannungsbetriebs eingesetzt.

Durch Pulsweitenmodulation (PWM) der Umrichterausgangsspannung kann eine Grundschwingungsspannung mit variabler Amplitude und Frequenz erzeugt werden, ohne dass die Zwischenkreisspannung U_d verändert werden muss.

Bei der Pulsweitenmodulation kommt es zu unerwünschten Oberschwingungen, da der Motorstrom kein Sinusstrom ist.

In der verketteten Spannung (Spannung zwischen zwei Aussenleitern) sind nur die Oberschwingungsanteile mit etwa doppelter Schaltfrequenz f_r sichtbar. Bei hohem f_r/f_s sind alle Oberschwingungen klein, wobei f_s die Statorfrequenz der Maschine ist.

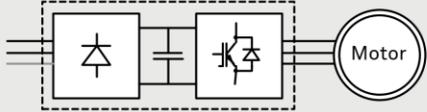
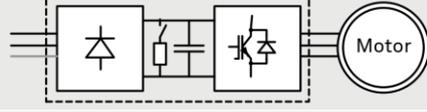
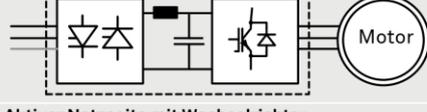
FU mit	Elektrisches Bremsen	cos φ	Harmonische im Netzstrom
Diodengleichrichter 	Nein	Sehr gut	Alle Ungeraden. Wenn dreiphasig, fehlen die Harmonischen der Vielfachen von drei.
Diodengleichrichter mit Brems-Chopper 	Ja, Bremsenergie wird im Bremswiderstand des Brems-Choppers verheizt.	Sehr gut	Wie Diodengleichrichter ohne Brems-Chopper.
Umkehrgleichrichter 	Ja, mit Rückspeisen der Bremsenergie ins Netz.	Gut	Ähnlich wie Diodengleichrichter. Bedingt durch die Glättungsinduktivität im Zwischenkreis etwas kleiner.
Aktiver Netzseite mit Wechselrichter 	Ja, mit Rückspeisen der Bremsenergie ins Netz.	Sehr gut, einstellbar, sogar Kompensation möglich.	Je höher die Taktfrequenz, desto kleiner.
Symbolerklärung  Diode. Sie symbolisiert hier einen ein- oder dreiphasigen Gleichrichter mit Dioden.  Thyristor. Die beiden antiparallelen Thyristoren symbolisieren hier einen Umkehrgleichrichter mit Thyristoren, der Energie in beide Richtungen führen kann.  IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) mit antiparalleler Diode. Der IGBT ist ein abschaltbarer Leistungshalbleiter. Mit sechs IGBTs und dazugehöriger Diode kann ein dreiphasiger Wechselrichter aufgebaut werden.  Netzanschluss, ein- oder dreiphasig			

Abb. 49 Vergleich der verschiedenen Frequenzumrichter in Bezug auf ihr Netzverhalten [26]

Vorteile Frequenzumrichter

Vorteile des Frequenzumrichters sind v.a. die Reduzierung des Anlaufstroms im Vergleich zu anderen Anlassverfahren und die variable Einstellung der Drehzahl.

Nachteile

Frequenzumrichter haben Eigenverluste und können sich somit negativ auf die Energieeffizienz auswirken. Die Eigenverluste müssen in Form von Abwärme, Richtwert 3 – 5 % der FU-Leistung, abgeführt werden. Meist erfolgt dies über Luft als Kühlmittel. Hier besteht entweder die Möglichkeit die Wärmeleistung mit grossen Luftmengen oder mit kleineren Luftmengen aber mit vorgekühlter Luft abzuführen. Alternativ können FU wassergekühlt ausgeführt werden, wobei diese Lösung eine sichere Kühlwasserversorgung voraussetzt.

Darüber hinaus haben Frequenzumrichter, je nach Ausführung, Netzrückwirkungen wie Oberschwingungen zur Folge. Frequenzumrichter verfügen über einen grossen Anteil an elektronischen Komponenten, welche wartungsintensiv sein können.

Wirkungsgrad Frequenzumrichter (aus [26])

Die genauen Zahlenwerte des Wirkungsgrads eines FU sind davon abhängig, wie der FU aufgebaut ist. Generell kann gesagt werden, dass ein FU mit Diodengleichrichter auf der Netzseite kleinere Verluste und somit den besseren Wirkungsgrad hat als ein vergleichbarer FU, bei dem auf der Netzseite ein Wechselrichter zum Einsatz kommt. Der Unterschied beträgt bei Nennbetrieb typischerweise ein bis zwei Prozentpunkte. Ein FU mit Umkehrgleichrichter liegt wirkungsgradmässig dazwischen.

Einfluss der Taktfrequenz

Die Taktfrequenz, d. h. die Frequenz, mit der die Halbleiter eines Wechselrichters geschaltet werden, hat ebenfalls einen Einfluss auf den Wirkungsgrad.

Je höher die Taktfrequenz des motorseitigen Wechselrichters ist,

- desto höher sind die Schaltverluste in den Halbleitern.
- desto kleiner sind die Harmonischen im Motorenstrom.
- desto kleiner sind die Verluste durch die Harmonischen im Motor.

Je höher die Taktfrequenz des netzseitigen Wechselrichters – falls ein solcher eingesetzt wird – ist,

- desto höher sind die Schaltverluste in den Halbleitern.
- desto kleiner sind die Harmonischen im Netzstrom.
- desto kleiner sind die Verluste in Transformator und Netz.

Die Wahl der Taktfrequenz ist also ein Kompromiss zwischen den Verlusten im FU und den Verlusten in Netz und Motor, die durch die Oberschwingungen verursacht werden. In der Regel wird vom FU-Hersteller eine geeignete Taktfrequenz vorgegeben. Bei gewissen FU kann sie mit den oben beschriebenen Konsequenzen über einen Parameter eingestellt werden. Durch die maximal zulässigen Schaltverluste sind der Taktfrequenz nach oben Grenzen gesetzt.

Die Taktfrequenz ist auch massgebend für die Geräuschentwicklung eines Motors. Bei Antrieben im kW-Bereich werden deshalb Taktfrequenzen zwischen 4 kHz und 16 kHz verwendet, damit die durch die Harmonischen Oberwellen im Strom verursachten Geräusche möglichst oberhalb des hörbaren Bereichs liegen. Je grösser die Leistung eines Umrichters, desto tiefer die mögliche Taktfrequenz. Umrichter mit Leistungen um 1 MW takten typischerweise mit 2 kHz, Umrichter für mehrere MW mit wenigen 100 Hz.

Der Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern und elektrischen Motoren ist im Nennbetrieb bei 100 % Drehmoment und 100 % Drehzahl relativ hoch. Abb. 50 zeigt den Vergleich des Wirkungsgrades bei Nennlast eines IE2-Motors im Netzbetrieb und im FU-Betrieb, eines FU (Effizienzklasse 1) und des gesamten Antriebssystems in Abhängigkeit der Nennleistung des Motors.

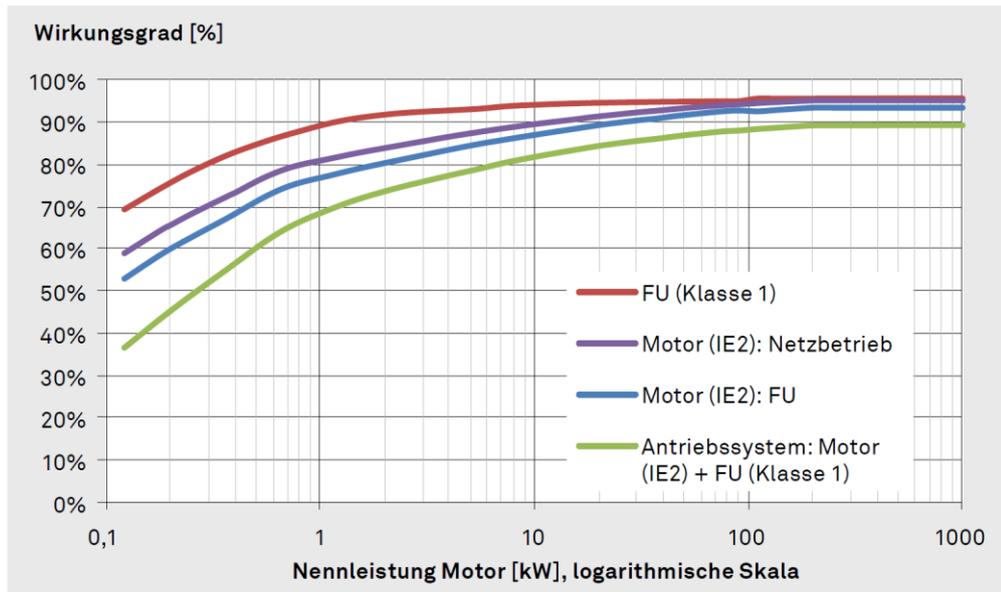


Abb. 50: Wirkungsgrade von Motor, FU und Antriebssystem bei Nennleistung [26]

Abb. 51 zeigt die starke Abhängigkeit des Teillastwirkungsgrades des FU von der Leistung: unterhalb von 10 kW werden die Wirkungsgrade bei Teillast, z. B. 50 % Drehzahl und 50 % Drehmoment (entspricht 25 % Teillast), bereits stark abgemindert. Es sind fünf verschiedene Belastungsfälle zwischen Nennleistung (100 % Last) bei Drehzahl 100 % und Drehmoment 100 %, sowie 12,5 % der Nennleistung, bei Drehzahl 50 % und Drehmoment 25 % dargestellt.

Fällt die Leistung weit unter den Nennbetriebspunkt (< 30 %), nimmt der Wirkungsgrad stark ab. Wichtig ist also eine auf die geforderte Antriebsleistung richtig abgestimmte Frequenzumrichter- und Motorenennleistung.

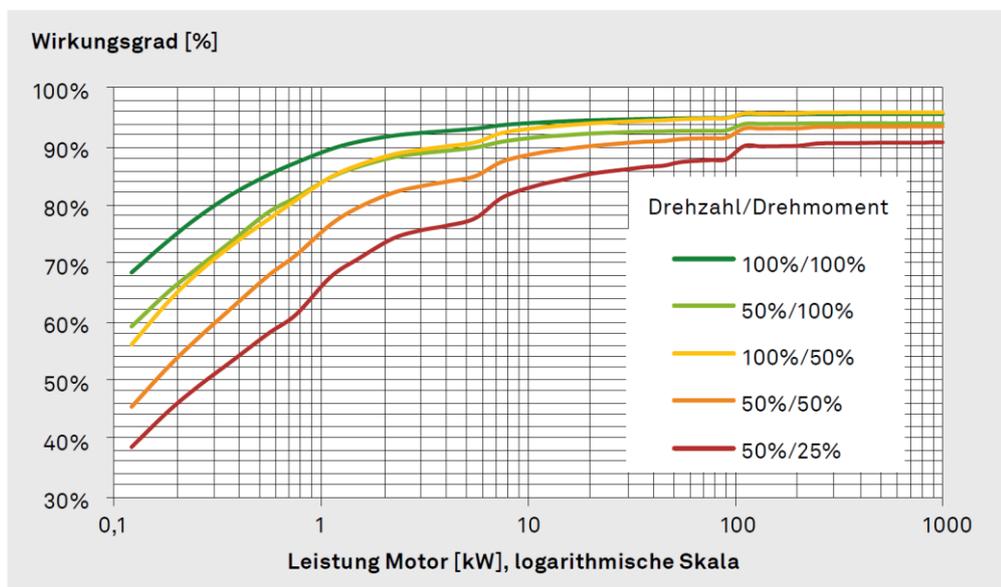


Abb. 51: Wirkungsgrade des FU in Abhängigkeit von der Motoren- und FU-Grösse bei fünf verschiedenen Belastungsfällen [26].

Die Abbildung zeigt, dass ein FU bei tiefer Drehzahl beziehungsweise tiefem Drehmoment einen deutlichen Abfall des Wirkungsgrades, gegenüber des Wirkungsgrades bei Nennleistung, erleidet. Es ist der Wirkungsgradverlauf von FU mit 0,12 bis 1000 kW in Abhängigkeit des Drehmomentes M (Newtonmeter, Nm) und der Drehzahl (Umdrehungen pro Minute, U/min) an der Welle des Motors dargestellt. 100 % entspricht dem Nenndrehmoment respektive der Nenndrehzahl [26]

6 Grundlagen Netzurückwirkungen

Jede Antriebstechnik verursacht Netzurückwirkungen. Durch den verstärkten Einsatz von Leistungselektronik und die damit verbundene Zunahme an nichtlinearen Verbrauchern in allen Netzebenen entstehen in wachsenden Masse Rückwirkungen auf die Netze. Die gegenseitige Beeinflussung elektrischer Verbraucher im Netz können sich in unerwünschten Änderungen der Höhe, der Kurvenform und / oder der Frequenz der Versorgungsspannung bemerkbar machen [35].

Diese Netzurückwirkungen müssen aus eigenem Interesse (anlageninterne Betrachtung) aber auch aus dem Interesse des Netzbetreibers (Auswirkungen auf andere Kunden) beschränkt werden.

6.1 Allgemeiner Beurteilungsablauf

Jede Beurteilung nach den technischen Regeln DACHCZ basiert auf folgenden Schritten:

1. Verknüpfungspunkt V definieren
 - a. Gegenüber Netzbetreiber
 - b. Anlagenintern zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebes
2. Minimale Netzkurzschlussleistung S_{KV} an den Verknüpfungspunkten
3. Anlagenleistung S_A
 - a. Gegenüber Netzbetreiber gilt die vertraglich vereinbarte Bezugsleistung
 - b. Anlagenintern sind die Anlagenleistungen festzulegen
4. Beurteilen
 - a. Spannungsänderungen
 - b. Oberschwingungsströme
5. Massnahmen
 - a. Spannungsänderungen
 - i. Anlaufstrom reduzieren mit Technologiewechsel
 - ii. Kurzschlussleistung erhöhen – grösserer Trafo
 - iii. Verknüpfungspunkt verschieben – separater Trafo
 - b. Oberschwingungsströme
 - i. Oberschwingungsströme reduzieren – Drossel oder Filter
 - ii. Verknüpfungspunkt verschieben – separater Trafo
 - iii. Technologiewechsel → 12-Puls → Low Harmonic FU

Die detaillierte Bestimmung der Parameter V, S_{KV} und S_A geschieht nach Kapitel 6.1.1. Erst wenn diese Basisparameter bestimmt sind, kann eine Beurteilung der Netzurückwirkungen nach den technischen Regeln DACHCZ erfolgen.

6.1.1 Basisparameter für Beurteilung

Verknüpfungspunkt V

Die Allgemeine Formulierung lautet:

Der Verknüpfungspunkt ist derjenige Punkt in einem Netz, an den andere Netznutzer angeschlossen sind, welche durch die anzuschliessende Anlage nicht unzulässig beeinflusst werden dürfen. Dabei ist derjenige Schaltzustand zu wählen, welcher aus der Sicht des Netzes die schwächste Kurzschlussleistung bereitstellt, in welcher die Anlage noch ordnungsgemäss betrieben werden muss.

Folgende Praxisfälle helfen bei der Festlegung des Verknüpfungspunktes:

- *Verknüpfungspunkt gegenüber Netzbetreiber.* In der Regel ist dies die Übergabestelle (Messung) in der Einspeisestation
- *Verknüpfungspunkt, wenn andere Verbraucher auf gleichem Trafo angeschlossen sind.* In der Regel ist der Verknüpfungspunkt die Verteilung, an welcher andere Verbraucher angeschlossen sind.
- *Verknüpfungspunkt wenn separater Trafo für Antrieb zur Verfügung steht.* In der Regel befindet sich der Verknüpfungspunkt auf der Mittelspannungsebene der entsprechenden Zentrale

Unter gewissen Umständen (lange Zuleitungen) muss der Beurteilungspunkt bzw. die zulässigen Grenzwerte für den «eigenen» Betrieb speziell betrachtet werden. Mit der Beurteilung am Verknüpfungspunkt geht es lediglich darum, störende Einflüsse auf andere Anlagen zu verhindern.

Minimale Netzkurzschlussleistung S_{kV} am Verknüpfungspunkt

Die minimale Netzkurzschlussleistung S_{kV} am Verknüpfungspunkt V ist für sämtliche Berechnungen beim Netzbetreiber anzufragen. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Es ist die minimale dreipolige Kurzschlussleistung anzugeben, normalerweise berechnet nach IEC-60909 [33].
- Es ist der Schaltzustand zu berechnen, in welchem die Anlage noch störungsfrei betrieben werden muss.

Für die anlageninterne Beurteilung kann die Kurzschlussleistung entweder durch Berechnung bestimmt oder abgeschätzt werden. Bei einem Verknüpfungspunkt auf der Niederspannungsebene gilt erfahrungsgemäss mit genügender Genauigkeit:

$$S_{kV} = \frac{\text{Trafoleistung } S_{r \text{ Trafo}}}{\text{Kurzschlussspannung } u_k}$$

Anlagenleistung S_A

Die Anlagenleistung S_A dient bei der Beurteilung nach den technischen Regeln dazu, den maximalen lastbedingten Spannungsabfall und die Menge der zulässigen Oberschwingungsemissionen in das vorgelagerte Netz zu beschränken.

Folgende Praxisfälle helfen bei der Festlegung der Anschlussleistung S_A :

- *Verknüpfungspunkt gegenüber Netzbetreiber:* Es ist die vertraglich vereinbarte max. Bezugsleistung gemäss Netzanschlussvertrag einzusetzen.
- *Verknüpfungspunkt wenn andere Verbraucher auf gleichem Trafo angeschlossen sind:* Es ist die Leistung aus der Sicherung des Anlagenabganges einzusetzen

$$S_A = \text{Sicherungsnennstrom} \cdot \text{Nennspannung} \cdot \sqrt{3}$$

- *Verknüpfungspunkt wenn separater Trafo für Antrieb zur Verfügung steht:* In der Regel kann die Leistung des Transformators als S_A eingesetzt werden.

Beurteilungskriterien

Gemäss den technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen sind folgende Beurteilungskriterien zu überprüfen:

- Langsame – lastbedingte Spannungsänderungen
- Schnelle – schaltbedingte Spannungsänderungen
- Oberschwingungsemissionsgrenzwerte

Dabei stellt sich die Frage, ob immer alle drei Kriterien beurteilt werden müssen. Letztendlich ist es eine Frage der eingesetzten Technologie, welche für Netzurückwirkungen verantwortlich ist. In der Praxis ist der Beurteilungsprozess deshalb des Öfteren eine «Schleife», welche zum Ziel hat, eine Technologie zu bestimmen, welche die prozesstechnischen Anforderungen und die Anforderungen nach den technischen Regeln DACHCZ einzuhalten.

6.2 Spannungsänderungen

6.2.1 Lastbedingte Spannungsänderungen

Bei der Beurteilung der lastbedingten Spannungsänderung geht es darum, den Spannungsabfall einer Teilanlage am Verknüpfungspunkt zu beurteilen.

Gemäss den technischen Regeln [35] gilt dabei ein Grenzwert von 6% auf der Niederspannungsebene bzw. 3% auf der Mittelspannungsebene.

Bei langen Zuleitungen ist durch das ASTRA festzulegen, welcher zulässige Wert an den Motorklemmen einzuhalten ist, damit ein sicherer Betrieb der Anlage gewährleistet werden kann. In der Praxis empfiehlt es sich, den Wert von -10% nicht zu unterschreiten. Die Summe der lastbedingten Spannungsänderungen aller gleichzeitig in Betrieb stehenden Anlagen soll dabei einen Grenzwert von 10% nicht überschreiten (EN50160).

6.2.2 Schaltbedingte Spannungsänderungen

Schaltbedingte Spannungsänderungen treten in der Regel beim Start von Motoren auf. Die Höhe des Spannungseinbruchs ist dabei u.a. abhängig vom jeweiligen Antriebssystem.

Gemäss den technischen Regeln [35] gilt dabei ein Grenzwert von 6% auf der Niederspannungsebene bzw. 3% auf der Mittelspannungsebene bei seltenen Schaltvorgängen. Bei häufigen Schaltvorgängen sind die Grenzwerte von 3% auf der Niederspannungsebene bzw. 2% auf der Mittelspannungsebene einzuhalten.

Im Normalfall werden Lüftungsantriebe selten geschaltet. Aus diesem Grunde können in der Praxis 6% auf der Niederspannungsebene bzw. 3% auf der Mittelspannungsebene angewendet werden.

Liegt der Verknüpfungspunkt auf der Mittelspannungsebene, so ist auf der Niederspannungsebene ein eigener Grenzwert zu definieren. Es wird empfohlen 10% auf der Niederspannungsebene unter keinen Umständen zu überschreiten.

6.2.3 Beurteilung des Anlaufverhaltens

Die Messungen (vgl. Anhang III) Die Messungen bestätigen, dass die Richtwerte gemäss Tab. 14 angewendet werden sollten.

Die Abluftanlage des Tunnel Flüelens erlaubte es, sowohl Messungen mit Frequenzumrichter durchzuführen als auch Messungen mit Direktanlauf. So kann die Beeinflussung der Anlaufströme durch den Frequenzumrichter eins zu eins veranschaulicht werden.

Tab. 14 Zusammenfassung: empfohlener Werte

Schaltung	Objekt	Messwert I_A/I_N	Empfehlung I_A/I_N
Direktanlauf	Tunnel Flüelen, Abluftventilator	7.5	8 – 10
	Tunnel Flüelen, Strahlventilator	7.9	
	Tunnel Islisberg, Strahlventilator	11.3	
Y/D Umschaltung	Tunnel Sachseln, Abluftventilator	4.1	4 – 6
	Tunnel Islisberg, Abluftventilator	4.6	
	Tunnel Gubrist, Abluftventilator	4.1	
	Tunnel Uetliberg, Abluftventilator	4.0	
Dahlanderschaltung (2-stufig)	Tunnel Sachseln, SiSto-Ventilator	5.7 (1. Stufe)	8 – 10
		9.5 (2. Stufe)	
Softstarter	Tunnel Kirchenwald, Abluftventilator	4.0	3 – 5
	Tunnel Lopper, Abluftventilator	4.3	
Frequenzumrichter	Tunnel Flüelen, Abluftventilator	1.04	1.0 – 1.5
	Tunnel Saas, Abluftventilator	1.27	
	Tunnel Crap Teig, Abluftventilator	1.03	

Die Beurteilung der Spannungsänderungen erfolgt gemäss den technischen Regeln DACHCZ [35] mit nachfolgender Formel:

$$d = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi)$$

Dabei gilt:

d = Spannungsänderung

ΔS_A = Leistungsänderung im Anlauf = $I_{Anlauf} \cdot U_{Nenn} \cdot \sqrt{3}$

S_{kV} = Netzkurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt

ψ_{kV} = Netzwinkel

φ = Lastwinkel im Anlauf

Der Netzwinkel ist aus der Netzimpedanz zu bestimmen bzw. zu berechnen. Der Lastwinkel im Anlauf ist vom Lieferanten anzugeben, in der Praxis ist dieser Wert in der Regel nicht bekannt. Grundsätzlich darf die Formel vereinfacht werden, wenn der Netz- oder der Lastwinkel nicht bekannt ist, da dies den schlimmsten Fall darstellt.

Somit gilt für die Grobbeurteilung folgende Formel:

$$d_{max} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}}$$

Generell gilt, dass Verbraucher, welche nicht mit FU gestartet werden, nicht gleichzeitig gestartet werden dürfen.

Folgendes Beurteilungsschema (siehe Abb. 52) kommt dabei zur Anwendung.

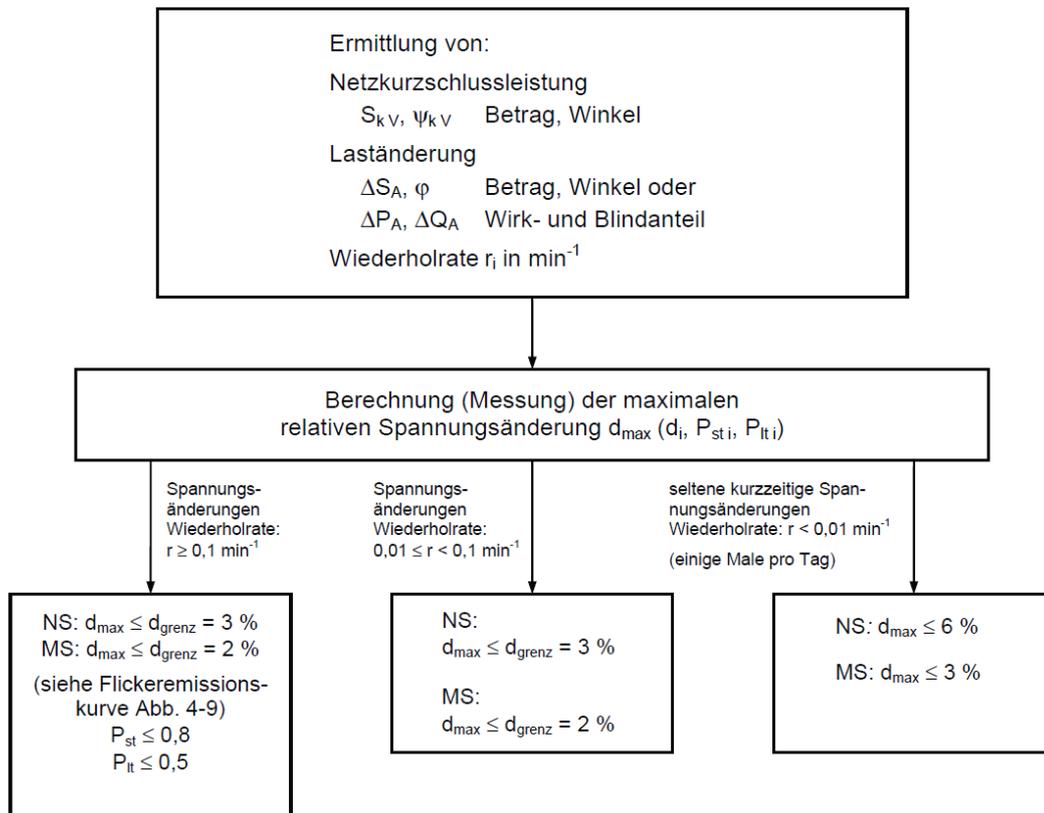


Abb. 52 Beurteilungsschema Spannungsänderung gem. DACHCZ [35]

6.2.4 Messungen und Erkenntnisse

Ziel der Messungen ist es genaue Erkenntnisse über die Höhe des Anlaufstroms der verschiedenen Antriebssysteme zu ermitteln. Die durchgeführten Messungen zeigen auf, dass in der Praxis bei Direkt-, Stern/Dreieck- und Dahlanderschaltungen realistische Werte für das Verhältnis Anlaufstrom/Nennstrom eingesetzt werden müssen. Gemäss den technischen Regeln DACHCZ [35] sind dazu die 10ms Effektivwerte (auch Halbwelleneffektivwerte) einzusetzen.

Nachfolgend sind die durchgeführten Messungen und die Resultate betreffend Verhältnis Anlaufstrom/Nennstrom aufgelistet. Als Ergänzung sind jeweils noch die entsprechenden Daten des Ventilators und Antrieb aufgeführt. Eine detaillierte Beschreibung ist Anhang III zu entnehmen.

Bei der Durchführung und Auswertung der Messungen ist zu beachten, dass die zulässige Spannungsänderung als 10 ms Effektivwert zu beurteilen ist. Bei der Berechnung des Verhältnis S_{kV}/S_A befindet sich der Verknüpfungspunkt auf der Niederspannungsseite des Transformators.

Die detaillierten Resultate befinden sich in Anhang III.

Übersicht Messungen Stern-Dreieck – Anlauf

Tab. 15 Ergebnisse Messungen: Ventilatoren mit Stern-Dreieck (Y/D)-Anlauf

TU Sachseln	Leistung Abluftventilator	250 kW
	Leistung Antriebstrafo	1250 kVA
	Verhältnis S_{KV}/S_A	$\frac{21100 \text{ kVA}}{300 \text{ kVA}} = 70$
27.11.2019	Spannungseinbruch d_{\max}	13.5 %
	Verhältnis I_A/I_N (Y → D)	8.5 ⁴
15.12.2020	Spannungseinbruch d_{\max}	4.6 %
	Verhältnis I_A/I_N	4.1
TU Isisberg	Leistung Abluftventilator	850 kW
	Leistung Antriebstrafo	1600 kVA
	Verhältnis S_{KV}/S_A	$\frac{27100 \text{ kVA}}{1000 \text{ kVA}} = 27$
17.12.2019 Ventilator 1	Spannungseinbruch d_{\max}	12.2 %
	Verhältnis I_A/I_N (Y → D)	3.9
17.12.2019 Ventilator 2	Spannungseinbruch d_{\max}	12.9 %
	Verhältnis I_A/I_N (Y → D)	4.6
15.12.2020	Spannungseinbruch d_{\max}	12.1 %
	Verhältnis I_A/I_N	4.05
TU Gubrist 08.12.2020	Leistung Abluftventilator	700 kW
	Leistung Antriebstrafo	1250 kVA
	Verhältnis S_{KV}/S_A	$\frac{22050 \text{ kVA}}{900 \text{ kVA}} = 24$
	Spannungseinbruch d_{\max}	7.4%
	Verhältnis I_A/I_N (Y → D)	4.06
TU Uetliberg 15.12.2020	Leistung: Abluftventilator	660 kW
	Leistung Antriebstrafo	
	Verhältnis S_{KV}/S_A	$\frac{22100 \text{ kVA}}{1250 \text{ kVA}} = 17$
	Spannungseinbruch d_{\max}	10.4 %
	Verhältnis I_A/I_N	4.04

⁴ Der hohe Wert konnte auf eine nicht optimale Zeitverzögerung bei der Umschaltung Stern-Dreieck zurückgeführt werden. Die Einstellung wurde korrigiert und die Verbesserung mittels Kontrollmessung dokumentiert

Übersicht Messungen der Antriebsvarianten DOL, Dahlander und FU

Tab. 16 Ergebnisse Messungen: Ventilatoren mit Stern-Dreieck (Y/D)-Anlauf		
TU Flüelen DOL AV	Leistung	500 kW
	Abluftventilator	
	Leistung	1250 kVA
	Antriebstrafo	
	Verhältnis S_{kv}/S_A	$\frac{18800 \text{ kVA}}{620 \text{ kVA}} = 30$
	Spannungseinbruch d_{\max}	22 %
	Verhältnis I_A/I_N	7.5
TU Flüelen FU AV	Leistung FU (6-Puls)	633 kVA
TU Flüelen FU SiSto	Leistung	500 kW
	Abluftventilator	
	Leistung	1250 kVA
	Antriebstrafo	
	Verhältnis S_{kv}/S_A	$\frac{18800 \text{ kVA}}{620 \text{ kVA}} = 30$
	Spannungseinbruch d_{\max}	22 %
	Verhältnis I_A/I_N	7.5
TU Sachseln 27.11.2019	SiSto-Ventilator Dahlander	Leistung: 25 kW Trafo: nicht bekannt

6.3 Oberschwingungen

6.3.1 Grundlagen Oberschwingungen

Alle Verbraucher, die einen nicht-sinusförmigen Strom aufnehmen, tragen zur Oberschwingungsbelastung des Stromnetzes bei – nicht nur an der Niederspannungsversorgung, sondern auch bei höheren Spannungsniveaus [29].

Oberschwingungen sind Ströme oder Spannungen, deren Komponenten ganzzahlige Vielfache der Grundschwingungsfrequenz der Netzspannungsversorgung sind [29]. Oberschwingungen verzerren durch Überlagerung den reinen Sinusverlauf.

- k-fache Grundfrequenz $k \cdot f_s$
- Erzeugen dreiphasige Oberschwingungsströme $I_{s,k}$ in der Ständerwicklung
- $I_{s,k}$ erregen je zusätzliche Luftspaltfelder mit Grundwelle (Polzahl $2p$) und Oberwellen
- Grundwellen rotieren mit k-facher Synchrongeschwindigkeit $n_{syn,k}$ und induzieren die Läuferwicklung $n_{syn,k} = k \cdot \frac{f_s}{p}$

Oberschwingungen können von elektrischen Geräten nicht genutzt werden, haben aber dennoch nachteilige Auswirkungen [29]:

- Einschränkungen der Versorgungs- und Netzleistung
- Höhere Verluste
- Zusatzerwärmung von Transformatoren, Motoren und Kabeln
- Reduzierung der Gerätelebensdauer
- Störungen der Mess- und Steuerungstechnik
- Pulsierendes und reduziertes Motordrehmoment
- Geräusche

Lösungen zur Reduzierung von Oberschwingungen (Lösungen sind in der Reihenfolge ihrer Priorität aufgelistet)

- Netzdrossel
- Passive Oberschwingungsfiler
- Aktive Oberschwingungsfiler
- Frequenzumrichter mit 12-Puls-Einspeisung
- Low Harmonic Drive

Die Begrenzung der Oberschwingungsströme hat gemäss den technischen Regeln DACHCZ [35] das Ziel, die über der Netzimpedanz verursachten Spannungen zu begrenzen. Allgemein ausgedrückt kann die Spannungsqualität als zu schützendes Gut bezeichnet werden, denn üblicherweise werden andere Verbraucher durch mangelnde Spannungsqualität gestört oder beschädigt.

Bei neueren Anlagen wird grundsätzlich die Einhaltung der EMV Normen EN 61000-2-2 (Niederspannung) bzw. EN 61000-2-12 (Mittelspannung) am Verknüpfungspunkt gefordert.

Bei passiven Gleichrichterschaltungen (6-Puls/12-Puls) zeigen Messungen, dass durch die Einhaltung der Oberschwingungsstromemissionsgrenzwerte in der Regel keine Verletzungen der EMV Normen zu erwarten sind.

Oberschwingungsemissionsgrenzwerte

Die Oberschwingungsemissionsgrenzwerte haben zum Ziel, die durch Oberschwingungsströme verursachten Oberschwingungsspannungen über der Netzimpedanz zu begrenzen. Dadurch werden Störungen an Verbraucheranlagen vermieden. Gleichzeitig werden Verluste in Betriebsmitteln (Kabel, Trafo etc.) reduziert.

Die Oberschwingungsemissionsgrenzwerte bzw. die zulässigen Oberschwingungsströme einer Kundenanlagen am Verknüpfungspunkt werden wie folgt bestimmt:

$$I_v = I_A \cdot \frac{p_v}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}}$$

- I_v Oberschwingungsstrom in A
- I_A Anlagenstrom in A
- p_v Proportionalitätsfaktor
- v Ordnungszahl der Harmonischen
- S_{kV} Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt in kVA
- S_A Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers in kVA

Tab. 6-3 Proportionalitätsfaktor p_v für ausgewählte Oberschwingungen

v	3	5	7	11	13	17	19	> 19
p_v	6 (18)*	15	10	5	4	2	1,5	1

* In Netzen mit Neutralleiter (Niederspannungsnetze) sind die Oberschwingungsströme ungeradzahlig, mit durch drei teilbarer Ordnungszahl in den drei Außenleitern nahezu gleichphasig, d. h. sie addieren sich im Neutralleiter arithmetisch. Es ist daher zu unterscheiden, ob der Oberschwingungsstrom mit dieser Ordnungszahl v im Außenleiter oder im Neutralleiter betrachtet wird. Der zwischen Klammern gesetzte Wert gilt für den Neutralleiter.

Abb. 53 DACHCZ – Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen [35]

Eine Oberschwingungsbeurteilung ist nur dann vorzunehmen, wenn in der Anlage auch Verbraucher betrieben werden, welche Oberschwingungen erzeugen. In der Praxis macht es jedoch Sinn die Grenzwerte unabhängig von den anzuschliessenden Verbrauchern für jede Anlage zu bestimmen.

Oberschwingungsspektren

Die diversen Messungen wurden dazu verwendet, um diverse Standardspektren für grobe Vorbeurteilungen zu definieren. Grundsätzlich dienen solche Standardspektren lediglich zu Abschätzung in der Vorabklärungsphase. Sollen genaue Berechnungen durchgeführt werden so sind die Spektren gemäss Herstellerangaben zu verwenden.

Oberschwingungsspektren werden in der Regel in % der Grundschiwingung angegeben. Für die Praxis ist eine Angabe in % des Nennstromes aber meist sinnvoller. Zudem beschränken sich die Spektralen Angaben in der Regel auf die 5./7./11./13./17./19. Harmonische.

Folgende Zusammenhänge gelten:

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=50} I_{Hn}^2}$$

Diese Formel gilt sowohl für den absoluten Strom in [A] als auch für den relativen Strom in [%].

6.3.2 Messergebnisse

Oberschwingungsspektren von 6-Puls Frequenzumrichtern

Tab. 17 Oberschwingungsspektren 6-Puls Umrichter ohne Netzdrossel (SISTO TUF)

Harmonische	Bezug auf Grundschiwingung I_{H1}	Bezug auf Gesamtstrom I_{RMS}
I_{RMS}	120.9%	100.0%
I_{H1}	100.0%	97.8%
I_{H3}	12.5%	1.1%
I_{H5}	57.0%	47.2%
I_{H7}	34.7%	28.7%
I_{H11}	5.1% (effektiver Messwert) 12% (erwarteter Wert)	5.3% (effektiver Messwert) 10% (erwarteter Wert)
I_{H13}	9.7%	8.0%
I_{H17}	5.3%	4.5%
I_{H19}	4.4%	3.6%
I_{H23}	3.5%	2.9%
I_{H25}	3.3%	2.7%

Die Messwerte bei der 11. Harmonischen I_{H11} fallen ungewöhnlich tief aus und entsprechen einem nicht praxisüblichen Wert für eine Vorbeurteilung. Es wird dementsprechend die Verwendung der in der obigen Tabelle erwähnten erwarteten Messwerte empfohlen.

Tab. 18 Oberschwingungsspektren 6-Puls Umrichter mit Netzdrossel (AV TUF)

Harmonische	Bezug auf Grundschiwingung I_{H1}	Bezug auf Gesamtstrom I_{RMS}
I_{RMS}	103.9%	100.0%
I_{H1}	100.0%	97.8%
I_{H3}	1.2%	1.1%
I_{H5}	26.5%	25.5%
I_{H7}	6.4%	6.2%
I_{H11}	5.1%	5.0%
I_{H13}	2.9%	2.8%
I_{H17}	1.6%	1.5%
I_{H19}	1.5%	1.4%
I_{H23}	1.0%	0.9%
I_{H25}	0.8%	0.7%

Oberschwingungsspektren von 12-Puls Frequenzumrichtern

Für den Betrieb von 12-Puls Umrichtern werden spezielle Transformatoren benötigt, welche zwei Sekundärwicklungen im unterschiedlichen Schaltgruppen $y5$ bzw. $d6$ aufweisen. Mit dieser Technologie kann erreicht werden, dass sich die 5./7. Und 17./19. Oberschwingung bei symmetrischer Belastung nicht auf die Oberspannung übertragen.

Auch eine sogenannte Quasi-12-Puls Schaltung wie im Kirchenwaldtunnel ist möglich. Bei dieser werden die 6-Puls Umrichter leistungsmässig jeweils zur Hälfte auf Transformatoren der Schaltgruppen $Dy5$ bzw. $Dd6$ aufgeteilt. Auch in dieser Anwendung werden die entsprechenden Oberschwingungen nicht auf die Hochspannung übertragen.

Achtung: die Sekundärnetze sind in solchen Fällen nicht synchron und dürfen auf der Niederspannungsseite unter keinen Umständen gekoppelt werden.

Tab. 19 Oberschwingungsspektren 12-Puls Umrichter mit Netzdrossel (AV Roveredo)

Harmonische	Bezug auf Grundschiwingung I_{H1}	Bezug auf Gesamtstrom I_{RMS}
I_{RMS}	100.01%	100.0%
I_{H1}	100.0%	99.9%
I_{H3}	1.14%	1.14%
I_{H5}	1.10%	1.10%
I_{H7}	2.27%	2.27%
I_{H11}	5.93%	5.93%
I_{H13}	1.83% (gemessener Wert) 4% (erwarteter Wert)	1.83% (gemessener Wert) 4% (erwarteter Wert)
I_{H17}	0.38%	0.38%
I_{H19}	0.31%	0.31%
I_{H23}	0.83%	0.83%
I_{H25}	0.55%	0.55%

Die Messwerte bei der 13. Harmonischen fallen «extrem» tief aus und entsprechen einem nicht praxistauglichen Wert für eine Vorbeurteilung. Es wird die Verwendung der angegebenen Ersatzwerte empfohlen.

Nach den technischen Regeln DACHCZ sind 12-Puls Schaltungen nicht als Oberschwingungserzeuger zu betrachten, da sie mit einer Stromverzerrung THDI < 10% betrieben werden. Trotzdem empfehlen wir die Oberschwingungsabklärung bei 12-Puls oder Quasi 12-Puls Schaltungen durchzuführen, da die Symmetrische Belastung der beiden Sekundärwicklungen eine Grundvoraussetzung bei der Anwendung ist.

Oberschwingungsspektren von Low-Harmonic bzw. Active-Front-End Frequenzumrichter

Low Harmonic oder Active-Front-End Frequenzumrichter gelten gemäss den technischen Regeln DACHCZ nicht als Oberschwingungserzeuger, da sie mit einer Stromverzerrung THDI < 10% betrieben werden. Trotzdem haben wir hier ein Spektrum aufgeführt. Dieses Spektrum zeigt auf, dass die Werte in der Praxis weit unter 10% liegen.

Tab. 20 Oberschwingungsspektren Low-Harmonic / Active-Front-End Frequenzumrichter (AV Crapteig)

Harmonische	Bezug auf Grundschiwingung I_{H1}	Bezug auf Gesamtstrom I_{RMS}
I_{RMS}	100.0%	100.0%
I_{H1}	100.0%	100.0%
I_{H3}	0.85%	0.85%
I_{H5}	0.86%	0.86%
I_{H7}	1.15%	1.15%
I_{H11}	1.91%	1.91%
I_{H13}	2.04%	2.04%
I_{H17}	0.77%	0.77%
I_{H19}	0.49%	0.49%
I_{H23}	0.50%	0.50%
I_{H25}	0.46%	0.46%

6.4 Praktisches Vorgehen Netzverträglichkeit

Um ein Bauprojekt «netzverträglich» realisieren zu können, ist es wichtig, sich früh in der Planung mit den entsprechenden Anforderungen auseinanderzusetzen. Dies bedeutet, dass sich der Bauherr selbst oder der Planer im Auftrag des Bauherrn dieser Aufgabe frühzeitig annehmen muss.

Empfehlung Ausschreibung

Mit dem Netzbetreiber ist zu vereinbaren, wie das Objekt und unter welchen netztechnischen Gegebenheiten (Redundanz etc.) mit ausreichender elektrischer Energie versorgt werden kann. Es ist ein entsprechender Netzanschlussvertrag zu erstellen, in welchem unter anderem auch folgendes geregelt ist:

Verknüpfungspunkt bei Normalversorgung	V_{Normal}
Netzkurzschlussleistung bei Normalversorgung	$S_{kV\text{normal}}$
Verknüpfungspunkt bei Notversorgung	V_{Minimal}
Netzkurzschlussleistung bei Notversorgung	$S_{kV\text{minimal}}$

Spätestens bei der Beschaffung müssen die einzuhaltenden Bedingungen bezüglich Netzverträglichkeit formuliert und mit dem Netzbetreiber vertraglich festgehalten sein. Werden die Komponenten der Gesamtanlage in verschiedenen Losen bei unterschiedlichen Unternehmen beschafft, obliegt es dem Planer, die Anforderungen für die Einzelkomponenten präzise zu formulieren und in der Ausschreibung festzuhalten. Die Anforderungen an die Einzelkomponenten müssen so formuliert sein, dass die Gesamtanlage netzverträglich wird.

Bedingungen am Verknüpfungspunkt V_{Minimal}

- Schaltbedingte Spannungsänderungen d_{max} müssen auf der Mittelspannungsebene < 3% sein.
- Bei Verknüpfungspunkt Niederspannungsebene müssen schaltbedingte Spannungsänderungen d_{max} in der Regel <6% sein
- Bei Tunneln mit reiner Längslüftung mittels Strahlventilatoren und keinen eigenen Trafostationen für die Lüftung und häufiger Schaltung der Strahlventilation beträgt $d_{\text{max}} < 3\%$

Zusätzlich sind die Oberschwingungsemissionsgrenzwerte gemäss den technischen Regeln DACHCZ [35] einzuhalten.

Bedingungen an den einzelnen Trafos bzw. Niederspannungsverteilungen

Um einen sicheren Betrieb der Anlage bzw. einzelner Anlagenteile zu gewährleisten sind aufgrund der Verantwortung als Arealnetzbetreiber eigenen Anforderungen innerhalb des Arealnetzes zu definieren. Bei Tunneln ist jeweils der gesamte Tunnel ab den Einspeisepunkten des Netzbetreibers als «Arealnetz» zu beurteilen. Wir empfehlen diese Anforderungen ebenfalls nach den Grundsätzen der technischen Regeln DACHCZ festzulegen.

Dabei gilt:

- Stehen für einzelne Anlagenteile eigene Trafos zur Verfügung, so ist der Verknüpfungspunkt auf der Mittelspannungsebene. Für schaltbedingte Spannungsänderungen kann in der Regel ein d_{max} von 3% zugelassen werden. Auf der Sekundärseite des Trafos soll ein d_{max} von 10% nicht überschritten werden.
- Sind am gleichen Trafo andere Anlagenteile angeschlossen, so gilt die «gemeinsame» Verteilung als Verknüpfungspunkt. Für schaltbedingte Spannungsänderungen ist unter diesen Voraussetzungen ein Grenzwert von max. 6% zulässig.

Zusätzlich zu den Bedingungen für schaltbedingte Spannungsänderungen sind an jedem einzelnen Trafo die Oberschwingungsemissionsgrenzwerte nach DACHCZ einzuhalten, welche auf Basis der vorhandenen Netzkurzschlussleistung und Teilanlagenleistung berechnet werden. Die Summe aller Emissionen sollte immer betrachtet werden.

Selbstverständlich sind auch lastbedingte Spannungsabfälle zu berücksichtigen, in der Regel max. 6%.

Im Rahmen der Ausschreibung sollen die Lieferanten die Netzverträglichkeit nachweisen und zusammen mit dem Netzbetreiber prüfen. Dies gilt bei der Beschaffung von Frequenzumformern, wobei in den Ausschreibungsunterlagen die entsprechenden Grundlagen für eine Beurteilung der Netzverträglichkeit ausgeführt werden müssen.

Nach Auftragsvergabe

Der Lieferant der Frequenzumformer soll das technische Anschlussgesuch unmittelbar nach Auftragsvergabe an den Netzbetreiber einreichen, damit die Anschlussbewilligung frühzeitig erteilt werden kann.

Nach erfolgter Umsetzung erfolgen in der Regel entsprechende Kontrollmessungen gemäss den formulierten Anforderungen des Bauherrn.

- Spannungsänderungen der Strahl- und Abluftventilatoren (typische Messungen reichen)
- Oberschwingungsemissionen in vordefinierten Szenarien (typische max. Lastfälle) wenn möglich im Schaltzustand minimaler Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt

7 Kombination der Ventilator- und Antriebstechnologien und deren Bewertung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen der Ventilorttechnologie und deren Anwendung in Strassentunnel erarbeitet. Darüber hinaus wurden die unterschiedlichen Antriebstechnologien und ihre jeweilige Netzurückwirkungen eingeführt. Ziel ist es nun, eine Vorgehensweise zu evaluieren, um alle möglichen Kombinationen zwischen den Ventilatoren und den verschiedenen Antrieben aufzuzeigen und objektiv bewerten zu können.

Mithilfe dieser Bewertung können dann im Rahmen der Planung und Ausführung einer Lüftung (Ab- / Zuluft, Längslüftung, Lüftung von Sicherheitsstollen) Systemscheide getroffen werden.

Im vorliegenden Kapitel werden u.a. die aerodynamischen Anforderungen an die Ventilatoren und die daraus resultierenden Anforderungen an die Energieversorgung. Anhand der aufgezeigten Kriterien und Informationen soll die Möglichkeit gegeben werden, effizient, fachkundig und projektspezifische Entscheide zu den einzusetzenden Technologien treffen zu können.

7.1 Allgemeine Vorgehensweise

Um die jeweiligen Eigenschaften der einzelnen Antriebe in Kombination mit einem Ventilator hervorzuheben, wird im 1. Schritt ein einzelner Ventilator, anstelle eines komplexen Gesamtsystems, betrachtet. Hauptunterschied der Ventilatoren in der Einzelbetrachtung ist nicht das jeweilige Lüftungssystem, welches im 2. Schritt betrachtet wird, sondern lediglich die Möglichkeit der Schaufelverstellung im Betrieb (vgl. Abb. 55 und Abb. 56).

Im 1. Schritt wird die Methode des morphologischen Kastens verwendet. Die verschiedenen Antriebstechnologien werden dabei anhand spezifischer Kriterien bewertet. Diese Bewertungskriterien wurden anhand der vorhandenen Fachhandbücher des ASTRA evaluiert (vgl. Kapitel 7.1.1).

Im 2. Schritt werden die unterschiedlichen Kombinationen der Lüftungssysteme erarbeitet und gem. der bereits erarbeiteten, spezifischen Kriterien bewertet. Die Betrachtung der unterschiedlichen Kombinationen kann dabei weiter unterteilt werden:

- a. Auslegung des Lüftungssystems
- b. Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme
- c. Untersuchung der Netzverträglichkeit
- d. Bewertung der technisch möglichen Kombinationen

Der Bewertungsprozess der Kombination aus Ventilator- und Antriebstechnologie wird für die Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und SiSto-Lüftung durchgeführt. Auf eine Betrachtung von Zuluft-Ventilatoren wird verzichtet.

Die Einteilung der Lüftungssysteme und deren Abgrenzung wird durch Die ASTRA 13 001 [1] aufgezeigt. Die in die Bewertung eingearbeiteten Vorgaben basieren auf die zum Zeitpunkt der Publikation aktuellen Richtlinien und Vorgaben. Anpassungen an diesen Richtlinien und Vorgaben wie z.B. ein Verzicht auf eine permanente Überdruckhaltung in Sicherheitsstollen haben unter Umständen einen Einfluss und bedingen eine Anpassung der Prozesse.

Die Detaillierungen und die Erklärungen hinsichtlich Anwendung der unterschiedlichen Lüftungssysteme im Strassentunnel ist im Kapitel 4.1 beschrieben.

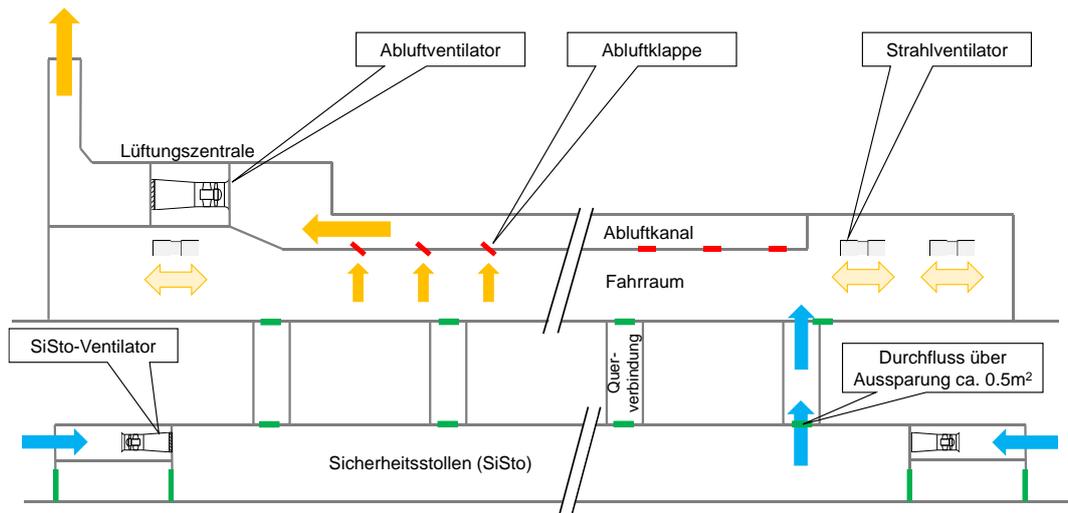


Abb. 54 Gegenverkehrstunnel mit Abluftsystem bestehend aus Abluftventilatoren und Abluftklappen, Längslüftung mittels Strahlventilatoren und parallelem Sicherheitsstollen mit SiSto-Ventilatoren

Das System Zuluft wird nicht betrachtet, da dieses nur selten projiziert wird und dem System der Abluft sehr stark ähnelt.

7.1.1 Morphologischer Kasten

Im 1. Schritt soll die jeweiligen Eigenschaften der unterschiedlichen Antriebstechnologie in Kombination mit einem Ventilator hervorgehoben werden.

Bei dieser Einzelbetrachtung wird zwischen Ventilatoren mit und ohne Schaufelverstellung im Betrieb unterschieden.

Für die Analyse der Antriebssysteme im morphologischen Kasten werden spezifische Kriterien anhand der Fachbereiche des ASTRAs erarbeitet. Durch diese Unterteilung bzw. Betrachtungsweise können alle relevanten Eigenschaften der Kombinationen systematisch erfasst und anschliessend bewertet werden.

Im morphologische Kasten werden in den Spalten die unterschiedlichen Antriebstechnologien, gem. Kapitel 5, und in den Zeilen die relevanten Kriterien aufgelistet.

Zur besseren Übersicht wird im 1. Schritt auf die Unterscheidung der unterschiedlichen FU-Typen (6-, 12-Puls, etc.) verzichtet. Die Differenzierung und die Analyse der unterschiedlichen FU-Typen wird im 2. Schritt, bei der Analyse der Lüftungssysteme, Abluft und Längslüftung, durchgeführt.

Für die Strukturierung der Kriterien des morphologischen Kastens wird die Unterteilung und Nummerierung der ASTRA Fachhandbücher als Grundlage verwendet [4] - [11]. Es werden nur die relevanten Kriterien aufgeführt, so dass die Nummerierung nicht durchgehend ist. Die Kriterien umfassen folgende Themen:

0 - Bauliche Massnahmen

- Bauliche Anforderungen Ventilatoren (Platzbedarf, Lasten)
- Anzahl Ventilatoren (unterteilt in zu erreichender Volumenstrom und zu erreichender Schub)
- Platzbedarf Schränke
- Notwendigkeit Blindstromkompensationsanlage und deren Platzbedarf

1 – Energieversorgung

- Netzurückwirkungen Oberwellen
- Anlaufstrom / Spannungseinbruch
- Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb, Testbetrieb und Ereignisbetrieb

3 – Lüftung

OHNE Schaufelverstellung im Betrieb

- Hochlaufzeit Antrieb bis 100%
- Hochlaufzeit Aerodynamik
- Optimierung/Variation Betriebspunkt möglich
- Anlaufstaffelung mehrerer AV erforderlich

MIT Schaufelverstellung im Betrieb (Einsatz bei Abluft- und Zuluftventilatoren)

- Hochlaufzeit Antrieb bis 100%
- Hochlaufzeit Aerodynamik
- Hochlaufzeit Schaufelverstellung
- Optimierung/Variation Betriebspunkt möglich
- Anlaufstaffelung mehrerer AV erforderlich

6 - Kommunikation u. Leittechnik

- Schnittstelle Steuerung – Antriebssystem
- Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung (hydraulische / elektromechanisch)

7 – Kabelanlagen

- Anzahl Kabel
- Kabeltyp / -durchmesser
- Kabellänge

8 – Nebeneinrichtungen

- Abwärme in der Zentrale (Bedarf nach Kühlung)

Weiteres

- Systemkomplexität

Nicht alle Themen sind für die Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und SiSto-Lüftung relevant. Daher wird im morphologischen Kasten in der 2. Spalte aufgezeigt, für welchen Ventilatorartyp (Abluftventilator - AV, Strahlventilator - SV, SiSto-Ventilator – SiSto) das jeweilige Kriterium eine Rolle spielt.

Ventilatoren ohne/mit Schaufelverstellung in Betrieb in Kombination mit verschiedenen Anlassverfahren								
Charakteristik	AV	SV	SiSto	DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	FU
0 bauliche Massnahmen								
bauliche Anforderungen Ventilatoren: -Platzbedarf Ventilator (-en) -Lasten	x	x	x	unabhängig von den einzelnen Antriebsvarianten, abhängig von der Baugrösse des Ventilatoren Lasten sind unabhängig von der Antriebsvariante, ausser bei Schaufelverstellung im Betrieb				
Anzahl Ventilatoren	x		x	zu erreichender Volumenstrom = Tunnel spezifisch --> Anzahl AV resp. SiSto-Ventilatoren ergibt sich aus deren Baugrösse				
Anzahl Ventilatoren		x		zu erreichender Schub = Tunnel spezifisch --> Anzahl SV ergibt sich aus deren Baugrösse				
Platzbedarf Schaltgerätekombination (Schaltschränke allgemein)	x	x	x	zunehmend				
Notwendigkeit einer Blindstromkompensation ist projektspezifisch zu prüfen	x	x	x	keine Blindstromkompensation erforderlich				
Platzbedarf Schaufelverstellung	x			unabhängig von den einzelnen Antriebsvarianten				
1 Energieversorgung								
Netzurückwirkungen Oberschwingungen	x	x	x	keine Netzurückwirkungen			aufgrund Phasenanschnitt --> Oberwellen treten nur beim Start auf	Oberschwingungen wirken ständig und müssen betrachtet werden: - Wert der THDI (Total Harmonic Distortion des Stroms) in % Option Bypass-FU
Anlaufstrom / Spannungseinbruch	x	x	x	8-fache des Nennstroms (Spannungseinbruch aufgrund hohen	8-fache des Nennstroms (Spannungseinbruch aufgrund hohen	4.5-fache des Nennstroms	ca. 3 bis 4-fache des Nennstroms, Anlaufstrom ist einstellbar	1.1-fache des Nennstroms, im stabilen Netz, weniger kritisch als bei anderen Antrieben
Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb	x	x	x	100%			ca. 99%	ca. 95 - 97%
Energieeffizienz Gesamtsystem bei Testbetrieb	x	x	x	100%			ca. 99%	ca. 95 - 97%
Energieeffizienz Gesamtsystem bei Ereignisbetrieb	x	x	x	100%			ca. 99%	ca. 95 - 97%
3 Lüftung: Ventilator OHNE Schaufelverstellung in Betrieb								
Hochlaufzeit Antrieb bis 100% Drehzahl	x	x	x	0.2 - 5s für den Antrieb bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist träger und daher massgebend	ca.15s für den Antrieb bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend	ca.15s für den Antrieb bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend	ca. 15 - 45s je nach Einstellung bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend	je nach Einstellung/ Startrampe, ca.15 - 60s die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend
Hochlaufzeit Aerodynamik	x			typisch sind 40 - 60s				
Hochlaufzeit Aerodynamik		x		typisch sind 15 - 30s				
Hochlaufzeit Aerodynamik			x	typisch sind 5 - 15s				
Optimierung/Variation Betriebspunkt möglich	x	x	x	nicht möglich				Nachstellen möglich
Anlaufstaffelung mehrerer AV erforderlich	x			ja, um den Spannungseinbruch zu reduzieren			evtl. ja	nein

Abb. 55 morphologischer Kasten – Ventilatoren, Teil 1

Ventilatoren ohne/mit Schaufelverstellung in Betrieb in Kombination mit verschiedenen Anlassverfahren								
Charakteristik	AV	SV	SiSto	DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	FU
3 Lüftung: Ventilator MIT Schaufelverstellung in Betrieb								
Hochlaufzeit Antrieb bis 100% Drehzahl	x			0.2 - 5s für den Antrieb bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist träger und daher massgebend	ca.15s für den Antrieb bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend		ca. 15 - 45s je nach Einstellung bis 100% Drehzahl die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend	je nach Einstellung/ Startrampe, ca.15 - 60s die Aerodynamik ist eher träger und daher meistens massgebend
Hochlaufzeit Aerodynamik	x			typisch sind 40 - 60s				
Hochlaufzeit Schaufelverstellung	x			unabhängig vom Hauptantrieb, abhängig vom Verstellmechanismus der Schaufelverstellung (hydraulisch / elektromechanisch) Schaufelverstellung Hydraulisch ca. 30s Schaufelverstellung elektromech. ca. 45s				
Optimierung/Variation Betriebspunkt	x			möglich				
Staffelung mehrerer AV erforderlich	x			ja, um den Spannungseinbruch zu reduzieren			evtl. ja	nein
6 Kommunikation u. Leittechnik								
Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem	x	x	x	potentialfreie Kontakte				grundsätzlich analog und/oder digital möglich; Tendenz klar zur digitalen Kommunikation (BUS) --> Einfluss auf Steuerung
Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung hydraulische/elektromechanisch	x	x	x	potentialfreie Kontakte				
7 Kabelanlagen								
Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	x	x	x	ungeschirmtes Kabel				geschirmtes Kabel (dreiphasige Leiter und ein konzentrischer Schirm oder symmetrischer PE-Leiter und ein Schirm), Biegeradien entscheidend
8 Nebeneinrichtungen								
Abwärme in der Zentrale (Bedarf nach Kühlung)	x	x	x	Keine Abwärme			Abwärme beim Starten	Abwärme Stand-by: ca. 1% Abwärme Betrieb: 3-5%
9 Weiteres								
Systemkomplexität	x	x	x	geringe Komplexität	mittlere Komplexität	mittlere Komplexität	mittlere Komplexität	hohe Komplexität, aufwendige Installation

¹Werte basieren auf Angaben von Hersteller, Abweichungen möglich; ²Spannung kann eingestellt werden, aber mit schlechten Wirkungsgrad

Abb. 56 morphologischer Kasten – Ventilatoren, Teil 2

7.1.2 Vorgehensweise bei der Evaluation der technisch möglichen Lösungen

Die im morphologischen Kasten erarbeiteten Kombinationen von Ventilator und Antrieb sollen im 2. Schritt als Lüftungssystem, unterteilt nach deren Anwendung (Abluftventilator, Strahlventilator, SiSto-Ventilator), analysiert und bewertet werden.

Um die technisch möglichen Kombinationen zu erhalten, werden alle Kombinationen hinsichtlich Anforderungen Aerodynamik und Netzverträglichkeit untersucht. Dafür werden die folgenden Schritte durchlaufen, wobei in der Regel einige Iterationen erforderlich sind:

1. Auslegung des Lüftungssystems hinsichtlich Abluftvolumenstrom oder erforderlichem Gesamtschub im Fahrraum:
Evaluierung der möglichen Lösungen aufgrund der Einbausituation, so gibt z.B. ein vorhandenes Tunnelprofil die maximal zulässige Baugrösse eines Strahlventilators vor. Weiter sind Vorgaben aus Richtlinien in diesem Schritt zu berücksichtigen.
2. Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme:
Zur Beurteilung der Aerodynamik wurden Prozessdiagramme für Abluftsysteme, Strahlventilatoren und Sisto-Ventilatoren entwickelt. Es wird geprüft, ob die möglichen Lösungen aus Schritt 1 die aerodynamischen Anforderungen erfüllen.
3. Untersuchung der Netzverträglichkeit
Es wurden Prüfschritte ausgearbeitet und im Prozessdiagramm festgehalten. Die aerodynamisch möglichen Lösungen aus Schritt 2 müssen hinsichtlich Netzverträglichkeit geprüft werden.
4. Evaluation der technisch möglichen Lösungen:
Alle Lösungen, welche sowohl die aerodynamischen Anforderungen als auch die Anforderungen an die Netzverträglichkeit erfüllen, werden in der nachfolgenden Bewertung berücksichtigt.

In den Kapiteln 7.2, 7.3 und 7.4 wird der Auswahlprozess spezifisch für Abluftventilatoren, Strahlventilatoren und SiSto-Ventilatoren beschrieben.

7.1.3 Bewertung der technisch möglichen Lösungen und Kosten

Im Anschluss an die Ermittlung der technisch möglichen Lösungen gemäss 7.1.2 gilt es, die projektspezifisch am besten geeignete Lösung zu identifizieren.

Für die Gesamtbewertung werden relevante Einflussgrössen aus dem morphologischen Kasten extrahiert und gewichtet. Einflussgrössen, welche für die jeweilige Antriebstechnologie nicht relevant sind, werden nicht berücksichtigt oder mit Null bewertet.

Es gilt, dass je höher die Gewichtung einer Einflussgrösse ist, umso wichtiger ist diese Einflussgrösse im Gesamtsystem. Als Skala wird eine Gewichtung zwischen 0 bis 10 eingeführt. Die Gewichtung der Einflussgrössen ist projektspezifisch und kann, falls notwendig, angepasst werden. Als Beispiel sei die «Regelgüte» als Einflussgrösse zu nennen. Diese ist für die Längslüftung eines Tunnels mit Richtungsverkehr ohne Staugefahr von untergeordneter Bedeutung. Hingegen ist die Einflussgrösse «Regelgüte» bei einem Tunnel mit Gegenverkehr ein entscheidendes Kriterium und ist entsprechend hoch zu gewichten. Mit der Variation der Gewichtung kann weiter die Sensitivität einzelner Einflussgrössen geprüft werden.

Die Beurteilung der verschiedenen Antriebssysteme bzw. Kombinationen erfolgt übergeordnet und projektunabhängig mittels einem Punktesystem von 1 bis 6, wobei eine grössere Anzahl Punkte eine bessere Lösung charakterisiert.

Das Produkt der beiden Faktoren, Gewichtung und Beurteilung, ergibt die Bewertung der jeweiligen Einflussgrösse. Die Gesamtbewertung berücksichtigt die spezifische Kombination aus Ventilator und Antriebssystem und erlaubt einen quantitativen Vergleich zwischen den Systemen.

Um eine deutliche Abstufung in der Bewertung zu erreichen, wird die erreichte Punktzahl auf 10 Punkte genau gerundet.

Einflussgrösse	Gewichtung	Beurteilung	
		generell	gewichtet
Technische Bewertung			
Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung	Beurteilung
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2	6
	Platzbedarf Schaufelverstellung (Hydraulik)	1	6
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1	6
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb (mit NB = 8, ohne NB = 1)	1	6
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Testbetrieb (falls NB = 1 -> TB = 2)	2	6
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Ereignisbetrieb	1	6
Lüftung	Hochlaufzeit Antrieb	3	6
	Hochlaufzeit mit/ohne Schaufelverstellung im Betrieb	3	6
	Staffelung mehrerer AV erforderlich ja/nein	1	2
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3	6
	Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung hydraulische/elektromechanisch	1	2
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1	6
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2	6
Weiteres	Komplexität Antrieb (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, komplexität Komponenten)	1	6
	Komplexität Ventilator	1	6
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl			131
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]		10	130
Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl			186%

Gesamtbeurteilung Ventilator inkl. Antriebssystem ohne Kosten: Absolute Punktzahl	Gesamtbeurteilung Ventilator inkl. Antriebssystem ohne Kosten: Absolute Punktzahl gerundet
	Gesamtbeurteilung Ventilator inkl. Antriebssystem ohne Kosten: Relative Bewertung zu anderen Systemen in %

Abb. 57 Bewertung der Einflussgrössen am Beispiel Strahlventilatoren

Bei der Kostenevaluation werden u.a. die reinen Investitionskosten, Kosten für die Wartung (Ventilator inklusive Antriebssystem) während der Nutzungsdauer und etwaige Ersatzteile während der Nutzungsdauer berücksichtigt. Es werden Kosten für den Ventilator, die Schaltschrankkombination und die Kabelanlagen ermittelt. Die Nutzungsdauern sowie auch die Wartungskosten richten sich nach den Angaben der Richtlinie 13001 [1].

Die in der Tabelle hinterlegten Referenzkosten wurden anhand der Kosten realisierter Projekte für die Ventilatoren, die Schaltgerätekombinationen und die Kabel ermittelt. Diese Kosten wurden auf typischen Kosten pro Leistung umgerechnet, welche in der Bewertungstabelle als Formel hinterlegt sind. Beispielsweise wurde für die Ermittlung der Investitionskosten Strahlventilator bereits ausgeführte Projekte analysiert und daraus Kosten pro kW Motornennleistung und Laufraddurchmesser ermittelt. Diese Vorgehensweise wurde für alle weiteren Kosten wiederholt. Alle Kostenangaben basieren somit auf Erfahrungswerte. Die Wartungskosten basieren auf die entsprechende Nutzungsdauer der Aggregate. Die Werte stammen aus bereits realisierten Projekten.

Nicht berücksichtigt wurden die Kosten, welche die Teuerung der Rohstoffpreis betreffen, als auch zusätzlichen Kosten bei der Beschaffung von terminkritischen Bauteilen.

Die Kostenevaluation beschränkt sich auf spezifische Kostenunterschiede zwischen den verschiedenen Kombinationen. Dabei werden sogenannte Ohnehin-Kosten nicht berücksichtigt, d.h. im Falle einer Längslüftung werden zwar die Kosten für das Antriebssystem (Motor, Kabelanlage, Antriebsschrank etc.) evaluiert, nicht aber die Kosten für den Transformator oder die Steuerung. Nicht enthalten sind zudem die Kosten für Ersatzteile. So müssen beim Vergleich einer Lösung mit 3 Abluftventilatoren à 50% Volumenstrom, also mit 50% fest installierter Redundanz zu einer Lösung mit 2 x 50% Volumenstrom, d.h. ohne fest installierte Redundanz, Kosten für Ersatzteile wie z.B. eine Reserve-Aktivteil durch den Projektierenden zusätzlich berücksichtigt werden.

Die ermittelten Kosten werden gerundet, um eine klarere Abstufung in den Resultaten zu erhalten.

Für eine finale Benotung werden die bewerteten technisch möglichen Lösungen und deren Kostenunterschieden verglichen (siehe Abb. 58). Durch die vorgenommene Rundung bei den Resultaten der Bewertung und den Kosten ergeben sich unter Umständen Klassen bei der Rangierung, wenn mehrere Lösungen den gleichen Rang erreichen. Dies ist bewusst so gewählt, da die Tiefe der Analyse eine falsche Genauigkeit vortäuschen würde, wenn bei Weglassen der Rundung kleinsten Unterschiede die Rangfolge bestimmen würden. Die Anwendung einer Rundung führt andererseits immer zu Grenzfällen, bei welchen ähnliche Resultate durch Auf- oder Abrunden in eine anderen Rang fallen. Es ist daher essenziell, dass die Resultate der Tabellen einer qualifizierten Prüfung unterzogen werden.

Kosten		
Investitionskosten Ventilatoren	Herstellung, FAT	
	Montage, IBS, Dokumentation: Preis pro kW elektrisch unter Berücksichtigung feste Schaufeln resp. Schaufelverstellung	
	Gesamtpreis pro Abluftventilator	
	Investitionskosten alle Abluftventilatoren	
Wartungskosten Ventilatoren	Durchschn. Wartungskosten pro Abluftventilator und pro Jahr	
	Wartungskosten Abluftventilatoren komplett = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten/AV)	
Investitionskosten Schaltgeräte-kombinationen	Durchschnittliche Kosten / kW Motornennleistung	
	Komplettes Anlasssystem inkl. Anteil an Schaltschrank, FAT Schaltschrank, Montage, IBS, Dokumentation pro Abluftventilator	
	Kosten Schaltgerätekombination komplett für alle Abluftventilatoren	
Wartungskosten Schaltgeräte-kombinationen	Durchschn. Wartungskosten pro Antriebssystem und pro Jahr	
	Wartungskosten Schaltgerätekombination über die Nutzungsdauer von 20 Jahren = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten)	
	Kosten vorzeitiger Ersatz	
	Wartungskosten Schaltgerätekombination komplett	
Investitionskosten Kabelanlage	Strom [A], 100% Drehzahl	
	Minimaler Kabelquerschnitt [mm ²], 100% Drehzahl	
	Kabel Normquerschnitt [mm ²]	
	Anzahl Kabel mit 3 x Normquerschnitt	
	Kosten [CHF] / [m], Kabel ungeschirmt inkl. Installation	
	Kosten [CHF] / [m], Kabel geschirmt inkl. Installation	
Investitionskosten Kabel		
Wartungskosten Kabelanlage	Wartungskosten Kabelanlagen über die Nutzungsdauer von 20 Jahren	
	Investitionskosten Total	
	Wartungskosten für 20 Jahre Total	
	Gesamtkosten	
	Gesamtkosten gerundet auf [CHF]	100'000.00
	Gesamtkosten relativ	

Abb. 58 Kosten am Beispiel Abluftventilatoren, wobei jeweils die Investitionskosten und die Wartungskosten für die Ventilatoren, die SGK und die Kabel berücksichtigt wurden

7.2 Abluft

Im folgenden Kapitel ist das Vorgehen zur Evaluation der technisch und finanziell besten projektspezifischen Lösung für Abluftventilatoren dargestellt. Der Prozess wird in den folgenden Teilschritten durchlaufen:

- Auslegung des Abluftsystems
- Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme
- Untersuchung der Netzverträglichkeit
- Bewertung der technisch möglichen Lösungen

Abb. 59 zeigt das Vorgehen zur Evaluation der technisch und finanziell besten projektspezifischen Lösung für Abluftventilatoren.

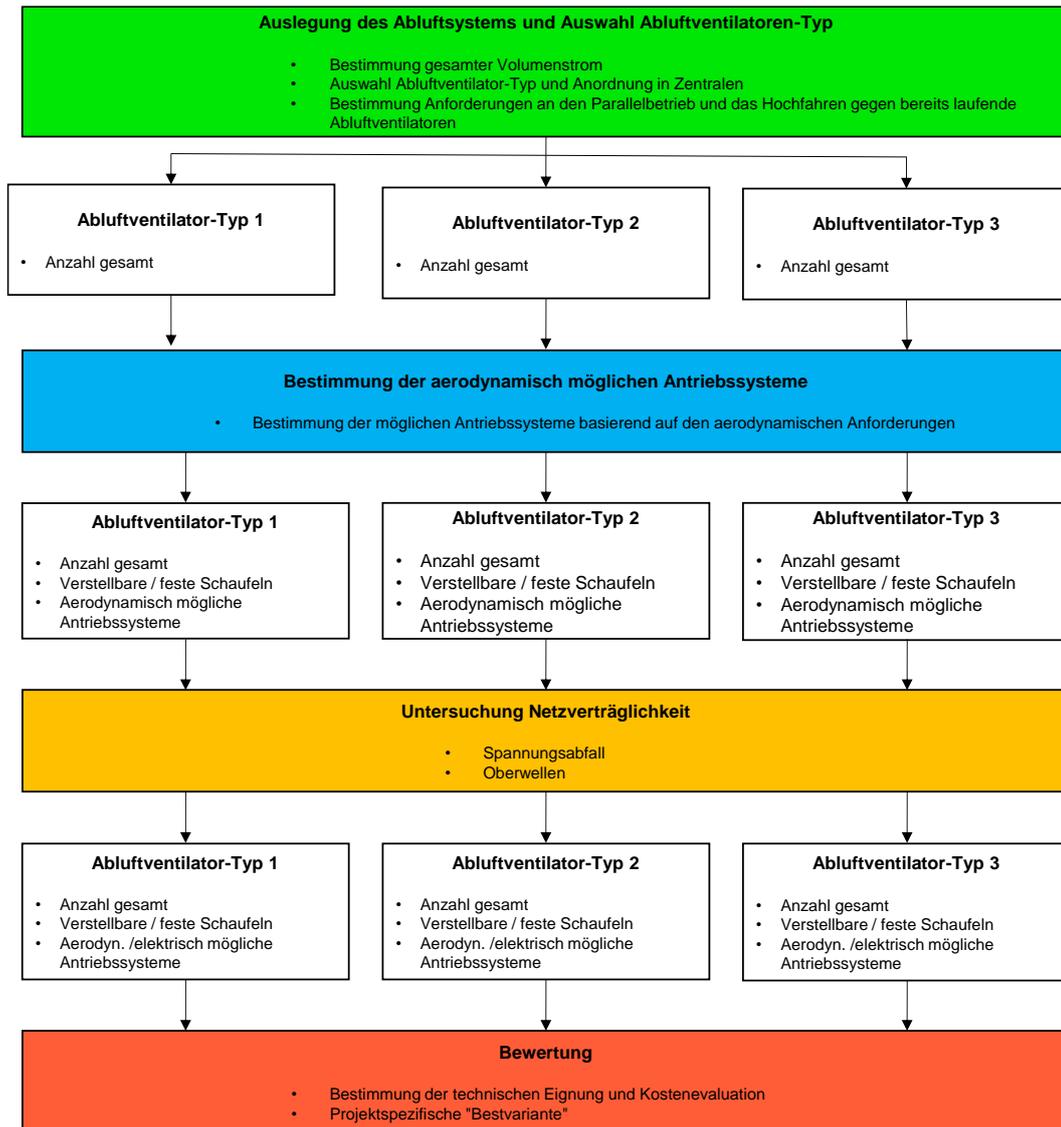


Abb. 59 Gesamtübersicht Auswahlprozess Abluftventilatoren

7.2.1 Auslegung des Abluftsystems

Das Abluftsystem wird anhand der geltenden Normen ausgelegt. In der Schweiz kommt die ASTRA 13001 [1] zur Anwendung, siehe Kapitel 4.1.3.

Ziel der Auslegung des Abluftsystems ist es eine Übersicht der möglichen Abluftventilator-Typen zu erhalten. Als Basis für die Auslegung werden Systeme mit ansteuerbaren Abluftklappen in der Zwischendecke pro Absaugstelle betrachtet. Dies ergibt einen Betriebspunkt, welcher durch den Gesamtvolumenstrom und die Totaldruckerhöhung bestimmt ist.

Die Bestimmung der möglichen Abluftventilatoren wird durch folgende Parameter bestimmt:

- Bestimmung gesamter Volumenstrom
- Auswahl Abluftventilator-Typ und Anordnung in Zentralen
- Bestimmung Anforderungen an den Parallelbetrieb und das Hochfahren gegen bereits laufende Abluftventilatoren

Bei der Auslegung des Abluftsystems sollen zudem die folgenden Punkte beachtet werden:

- Aufteilung Abluftventilatoren auf in der Regel 1 bis 2 Abluftzentralen pro Lüftungsabschnitt. Wenn 2 Abluftventilatoren eingesetzt werden, muss mit einem Abluftventilator 65% des Mindestvolumenstroms abgedeckt werden können.
- Bestimmung des Abluftventilator-Typs.
- Die Anlagen wirken immer nur auf eine Tunnelröhre. Die Anforderung von röhrengetrenten Systemen nach ASTRA-Vorgaben ist zu berücksichtigen.
- Bestimmen einer Ventilator Kennlinie, welche alle Betriebspunkte abdeckt, genügend Reserven zur Ablösegrenze aufweist und den Anforderungen hinsichtlich parallelen Hochfahrens resp. Hochfahren eines Ventilators gegen einen Gegendruck berücksichtigt (siehe Kapitel 3.3.5).
- Aerodynamisch günstige Anordnung der Abluftventilatoren in der Zentrale. Einhalten von ausreichend Abständen nach Umlenkungen speziell auf der Saugseite, um eine regelmässige Anströmung auf das Laufrad zu erreichen.
- Das Ein- und Ausbringen der Abluftventilatoren mit fest installierten Krananlagen oder mit einem Pneukran ist zu berücksichtigen. Dabei sollen Montageluken direkt zur Fahrbahn vermieden werden, um im Falle eines Ereignisses im Bereich der Lüftungszentrale keine Schwachstelle beim Brandschutz zu schaffen.
- Falls der Projektperimeter verschiedenen Tunnelobjekte umfasst, kann mit einem Standard-Abluftventilator für alle Tunnel die Ersatzteilhaltung optimiert werden. Dies ist projektspezifisch zu prüfen.

Beispiel Tunnel Musterloch II: Für das Beispiel Tunnel Musterloch II werden im Folgenden die einzelnen Überprüfungsschritte aufgezeigt. Die Untersuchungen werden für eine Lösung mit 2 und 3 parallelen Abluftventilatoren durchgeführt.

Tunnel Musterloch II: Auslegung Abluftsystem auf Betriebspunkt mit grösster Distanz zur Absaugstelle

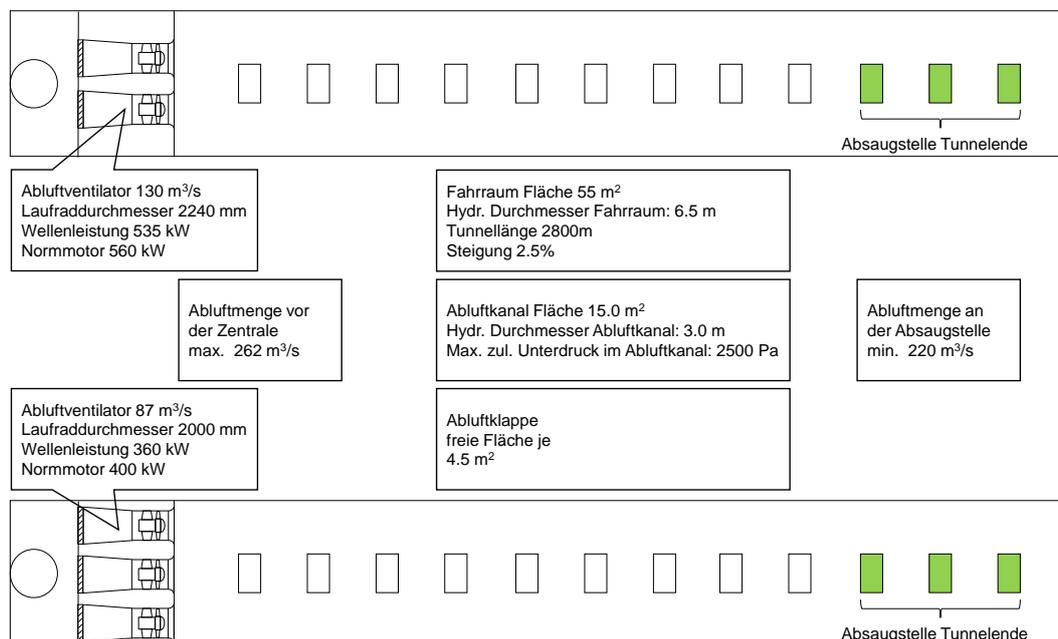


Abb. 60 Mögliche Lösungen für den Beispeltunnel «Musterloch II» mit 2 resp. 3 Abluftventilatoren in der Portalzentrale

7.2.2 Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme

Zur Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme muss geprüft werden, wie das Verhältnis zwischen den Betriebspunkten im Normal- und im Ereignisbetrieb ist und ob ein paralleles resp. sequenzielles Hochfahren von mehreren Abluftventilatoren gefordert ist. In Abb. 62 ist das entsprechende Flussdiagramm dargestellt.

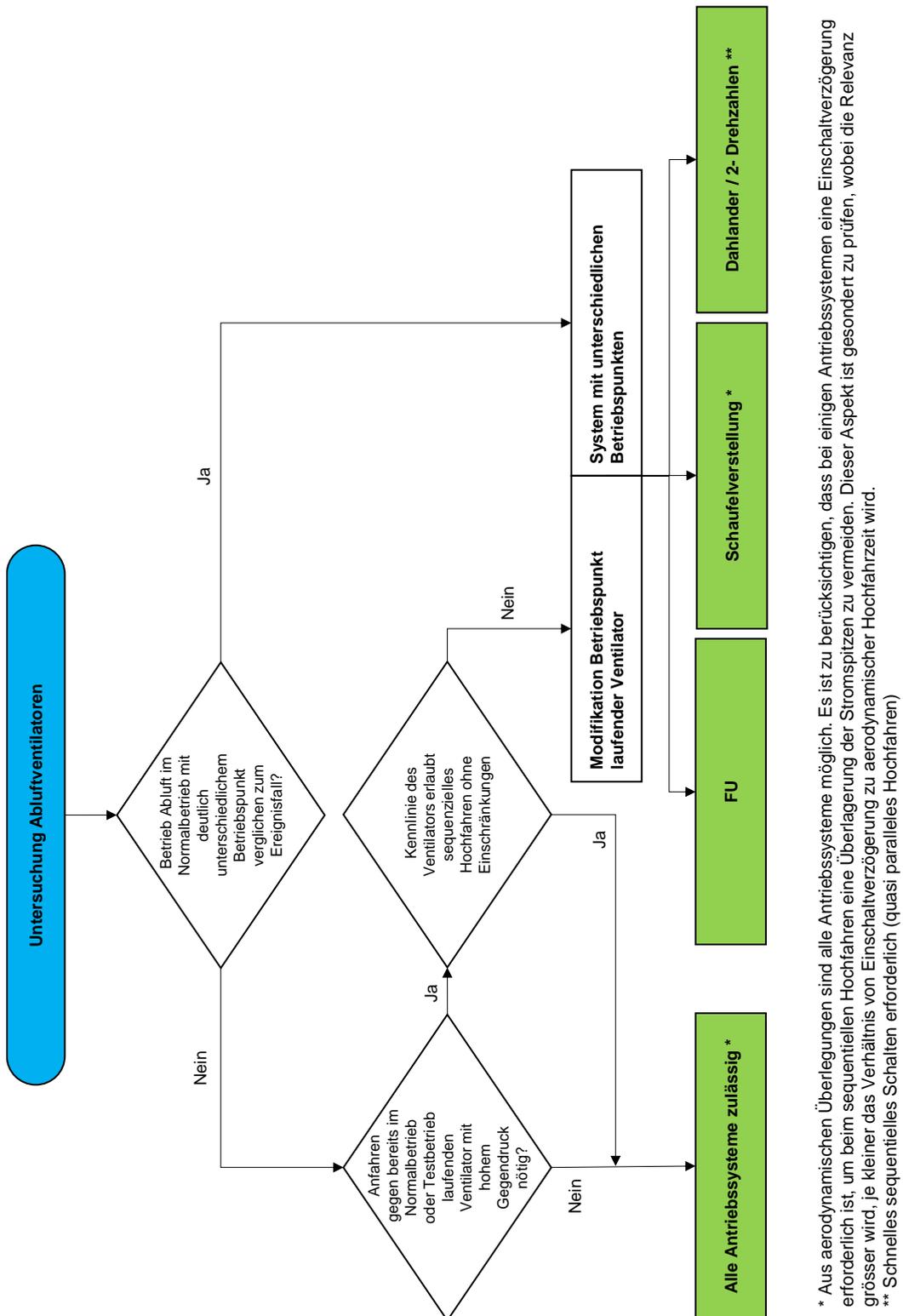


Abb. 61 Flussdiagramm zur Anforderung «Untersuchung Abluftventilatoren»

Die einzelnen Schritte aus dem Flussdiagramm (Abb. 62) werden im folgenden Abschnitt detailliert aufgeführt:

«Betrieb Abluft im Normalbetrieb mit deutlich unterschiedlichem Betriebspunkt verglichen zum Ereignisfall?»

Nach ASTRA 13001 [1] ist für die Dimensionierung des Abluftsystems in den allermeisten Fällen der Ereignisbetrieb massgebend, sodass der minimal abzusaugende Volumenstrom

durch den Ereignisbetrieb bestimmt wird. Das Abluftsystem kann auch bei Normalbetrieb zum Einsatz kommen, um die Luftqualität eines Tunnels unter Verkehr sicher zu stellen. Häufig besteht diese Anforderung bei Gegenverkehrstunneln, da dort der Kolbeneffekt durch die Fahrzeuge nicht ausgeprägt ist.

Die Abluftmenge für den Normalbetrieb ist oft kleiner als die Abluftmenge für den Ereignisbetrieb. Es ist daher abzuschätzen, welche Abluftmenge im Normalbetrieb häufig erforderlich ist und wie diese Abluftmenge effizient zur Verfügung gestellt werden kann. Weiter ist zu berücksichtigen, ob die Absaugstelle für den Normalbetrieb immer am gleichen Ort ist oder ob die Absaugstelle variabel ist und z.B. durch die örtlich höchste Sichttrübungskonzentration bestimmt ist. Je nach System resultieren ein oder mehrere Betriebspunkte im Normalbetrieb.

Wenn die projektspezifische Analyse zeigt, dass der Normalbetrieb relevant ist, muss ein Abluftventilator gewählt werden, welcher sowohl die Betriebspunkte im Normalbetrieb als auch die im Ereignisbetrieb abdecken kann.

«Anfahren gegen bereits im Normalbetrieb oder Testbetrieb laufenden Ventilator mit hohem Gegendruck nötig?»

Projektspezifisch muss definiert werden, ob die Anforderung besteht, einen Abluftventilator gegen den bereits vorherrschenden Gegendruck aus dem Betrieb anderer Abluftventilatoren anzufahren. Dies ist der Fall bei einem Abluftsystem mit häufigem Einsatz des Abluftsystems im Normalbetrieb oder, vermutlich mit reduzierter Wahrscheinlichkeit, bei laufenden Testbetrieb. Bei einem Ereignis werden dann die bereits laufenden Abluftventilatoren weiter betrieben und weitere Abluftventilatoren dazugeschaltet. Alternativ sind die bereits laufenden Ventilatoren auszuschalten und im Anschluss, mit entsprechendem Zeitverlust, alle Ventilatoren parallel zu starten. Eine Abwägung zwischen Eintrittswahrscheinlichkeit Betrieb von Abluftventilatoren durch Normal-/Testbetrieb bei einem Ereignis und möglicher Zeitverlust / -gewinn durch den Anfahrprozess ist durchzuführen. Dabei müssen allfällige Mehrinvestitionen gegenüber gestellt werden.

Die Anforderung «Anfahren gegen bereits laufenden Ventilator» kann auch bestehen, um im Ereignisfall einen zwischenzeitlich ausgeschalteten Abluftventilator nach einer Störung / Ausfall wieder in Betrieb zu nehmen. Die Wahrscheinlichkeit eines temporären Abschaltens und der anschliessenden Wiederverfügbarkeit resp. einem Neustart müssen projektspezifisch bestimmt werden. Wenn ein solcher Prozess gefordert ist, muss er in der Lüftungssteuerung entsprechend berücksichtigt werden (erster Einschaltbefehl, temporäre Abschaltung wegen Störung, erneuter Einschaltbefehl, nachdem die Störung weg ist). Zu bedenken ist, dass jede Veränderung im Abluft-Volumenstrom eine Auswirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel hat, welche durch die Strahlventilatoren geregelt wird.

«Kennlinie des Ventilators erlaubt sequenzielles Hochfahren ohne Einschränkungen»

Falls die Kombination aus Anlagenkennlinie und überlagerten Ventilator Kennlinien aller Abluftventilatoren immer stabile Betriebszustände zulässt, bestehen keine Einschränkungen bei der Wahl des Antriebssystems (siehe Kapitel 3.3.5). Es ist zu beachten, dass ein temporärer Betriebszustand mit Ablösungen der Strömung am Laufrad immer dann eintritt, wenn die Beschleunigung der Luftmasse träger ist als die Beschleunigung des Laufrads resp. die Erhöhung des Schaufelwinkels bei einer Laufradschaufelverstellung. Dies kann durch langsames Hochfahren mit FU oder mit einer langsamen Erhöhung des Schaufelwinkels mittels Schaufelverstellung verhindert werden.

«Modifikation Betriebspunkt laufender Ventilator»

Aus den Anforderungen ergibt sich, dass eine Modifikation des Betriebspunkts des Abluftventilators im laufenden Betrieb möglich sein muss. Dies kann durch den Einsatz eines

FUs, den Einsatz einer Laufradschaufelverstellung, die Variation der Drehzahl mittels Dahlander motor oder mehrstufigem Motor erfolgen. Eine Kombination beider Varianten ist möglich, wenn auch technisch und finanziell aufwendig und wird daher nicht weiter betrachtet.

«System mit unterschiedlichen Betriebspunkten»

Die aerodynamischen Anforderungen erfordern eine Variation des Betriebspunkts. Dies kann durch Änderung der Drehzahl (FU, Dahlander, mehrstufiger Motor) oder durch die Anpassung des Schaufelwinkels mittels einer Laufschaufelverstellung erfolgen (vgl. 3.4.4).

«Alle Antriebssysteme zulässig»

Aus aerodynamischen Gründen gibt es keine Einschränkung bei der Wahl des Abluftventilators (feste Laufschaufeln, Laufschaufelverstellung) und des Antriebssystems. Alle üblichen Systeme erfüllen die Anforderungen.

«FU»

Einsatz eines Frequenzumrichters (FU) zur stufenlosen Verstellung der Ventilatorendrehzahl. In der Regel wird die Drehzahl zwischen 30% bis 100% verändert. Bei tieferen Drehzahlen als 30% ist die Motorkühlung unter Umständen nicht mehr ausreichend gewährleistet. Bei Drehzahlen von mehr als 100% steigt die thermische Belastung des FU und des Motors aufgrund der höheren Ströme. Falls der Betrieb bei Überdrehzahl erforderlich sein sollte, so ist die Eignung der Komponenten (FU, Motor, Laufrad) und die Energieversorgung projektspezifisch zu prüfen.

«Schaufelverstellung»

Durch Änderung des Schaufelwinkels im Betrieb (hydraulisch / elektromechanisch angetrieben) wird die Ventilator Kennlinie in ihrer Form und Lage verändert (vgl. 3.4.4). Durch die Schaufelverstellung sind, aus aerodynamischer Sicht, wiederum alle Antriebssysteme zulässig.

«Dahlander / 2-Drehzahlen»

Einsatz eines Motors, welcher mittels Dahlanderschaltung mit 50% resp. 100% Drehzahl betrieben werden kann. Denkbar wäre auch der Einsatz von Motoren mit mehreren Wicklungen und somit mehreren fixen Drehzahlstufen. Allerdings ist diese Verwendung nicht marktüblich, insbesondere kombiniert mit der Temperaturanforderung an den Motor.

Beispiel Tunnel Musterloch II

Das Abluftsystem im Tunnel Musterloch II wird nur im Ereignisbetrieb genutzt. Zudem wird ein monatlicher Testbetrieb durchgeführt, bei welchem die Abluftventilatoren einzeln mit 100% Drehzahl während je 30 Minuten betrieben werden. Der Testbetrieb wird abends zu verkehrsarmen Zeiten durchgeführt. Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses während des Testbetriebs ist klein, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Daher wird eine Ventilator Kennlinie gewählt, welche sequenzielles Hochfahren ermöglicht.

Für den Tunnel Musterloch II ergibt die Anwendung des Prozessdiagramms die folgenden Resultate.

Tab. 21 Resultate Prozessdiagramm «Untersuchung Abluftventilatoren» für den Tunnel Musterloch II

Variante	Mögliche Antriebssysteme
Variante A, 2 Abluftventilatoren	Alle Antriebssysteme zulässig
Variante B, 3 Abluftventilatoren	Alle Antriebssysteme zulässig

7.2.3 Untersuchung der Netzverträglichkeit

Die aerodynamisch möglichen Lösungen müssen in einem zweiten Schritt betreffend ihrer Netzverträglichkeit untersucht werden. Dabei erfolgt für die FU-Lösungen eine Beurteilung der Oberschwingungen und für die Lösungen mit DOL, Stern-Dreieck-Anlauf, Dahlander-schaltung und Softstarter eine Beurteilung des Spannungsabfalls.

Abb. 62 zeigt im Überblick den Ablauf für alle technischen Lösungen.

Folgende Prozessschritte aus Abb. 62 gelten sowohl für die Untersuchung Oberschwin-gungen als auch die Untersuchung der Spannungsänderungen:

«Definition des Verknüpfungspunktes V»

Bei der Untersuchung für die Abluftventilatoren wird der Verknüpfungspunkt meist auf der Mittelspannungsseite des Trafos gewählt, da meist ein eigener Trafo in 690 V-Ausführung für die Lüftung eingesetzt wird.

«Bestimmen der Netzkurzschlussleistung am V, S_{KV} »

Die Netzkurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt wird bestimmt (siehe Kapitel 6.1.1).

«Frequenzumrichter»

Abfrage, ob der Einsatz von Frequenzumrichter (FU) erfolgt oder ob andere Technologien eingesetzt werden.

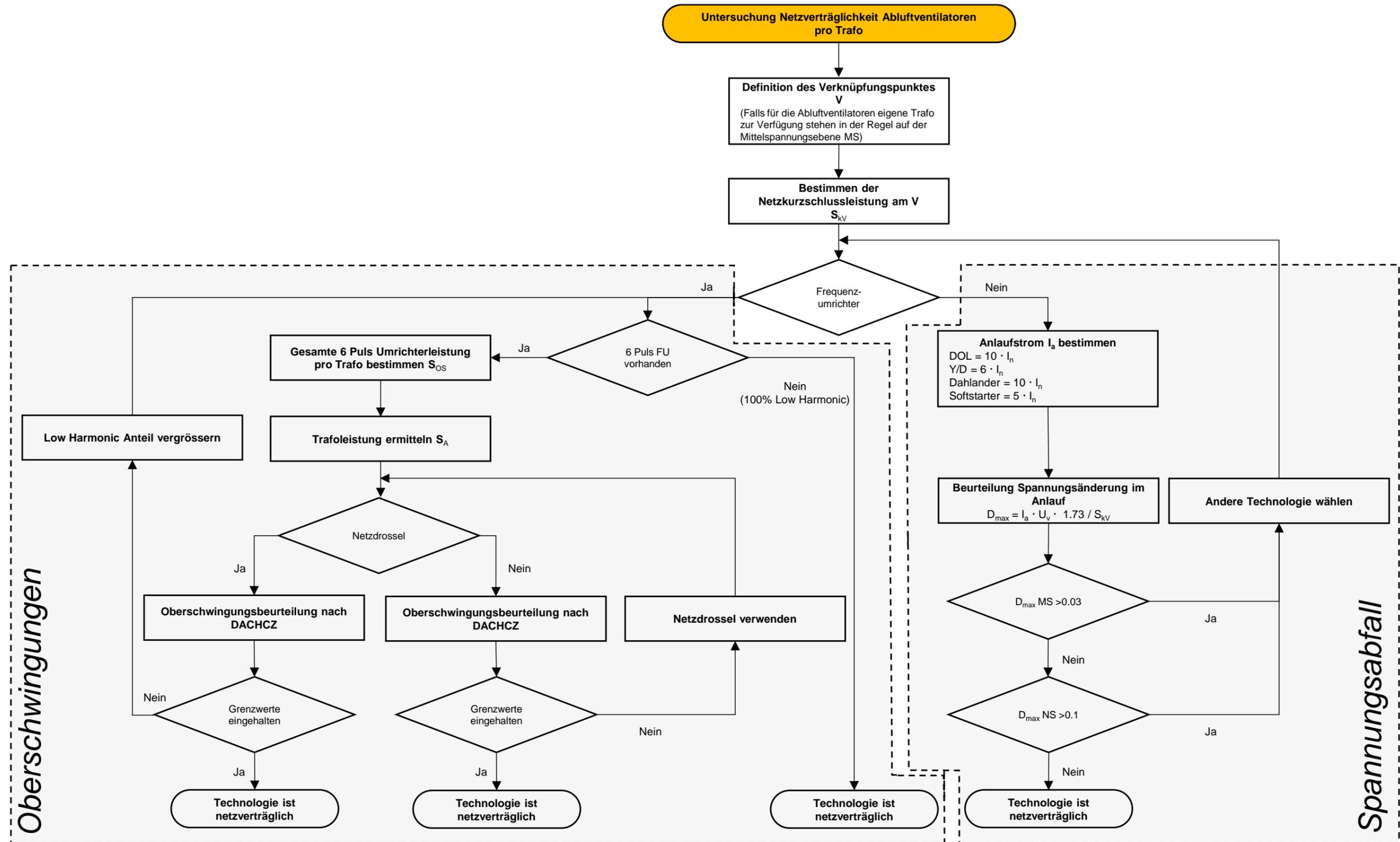


Abb. 62 Prozessdiagramm Netzverträglichkeit Abluftsystem. Die linke Diagrammhälfte bezieht sich auf die FU-Lösungen und die Thematik Oberschwingungen, die rechte Diagrammhälfte auf die Technologien, welche beim Start eines Abluftventilators einen Spannungsabfall bewirken.

Im Folgenden wird getrennt auf die Untersuchung der Oberschwingungen resp. den Spannungsabfall eingegangen.

Die Untersuchungen der Oberschwingungen sind in Abb. 63 dargestellt.

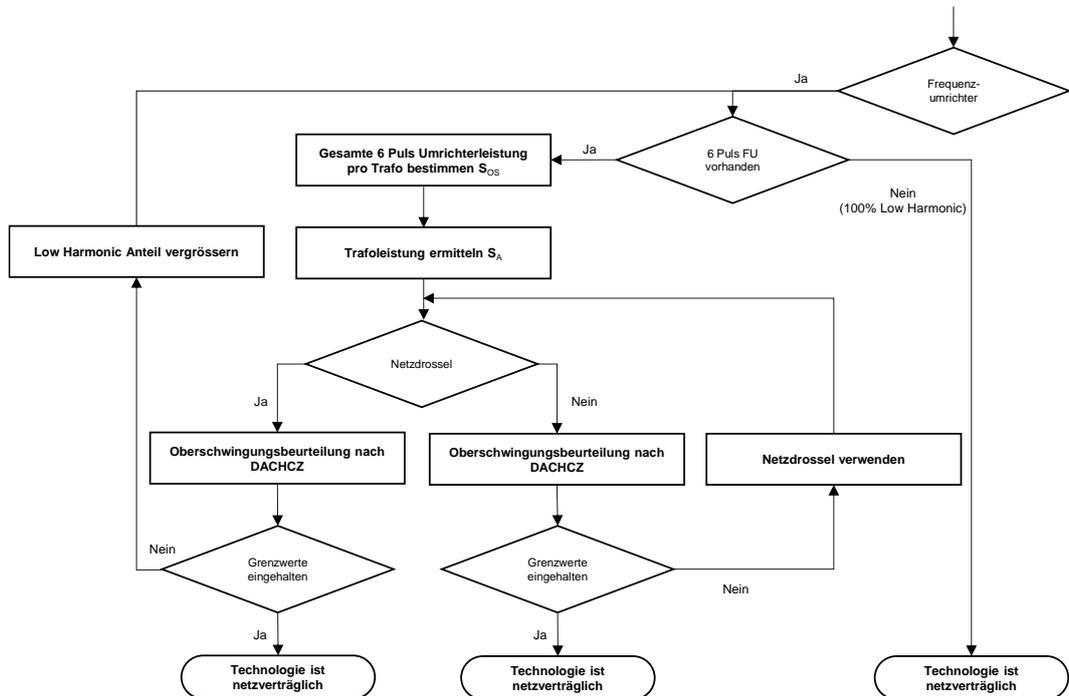


Abb. 63 Prozessdiagramm Netzverträglichkeit Abluftventilatoren für die FU-Lösungen

«6 Puls FU vorhanden»: Projektspezifisch zu beantworten, ob 6 Puls FU zum Einsatz kommen. Gemäss DACHCZ gelten nur 6 Puls FU als Oberwellenerzeuger.

«Gesamte 6 Puls Umrichterleistung pro Trafo bestimmen S_{0S} »: Die Oberschwingungslast S_{0S} umfasst die bestehenden und die neuen Oberschwingungserzeuger.

«Trafoleistung ermitteln S_A »: S_A gleich Bemessungsleistung des Trafos in kVA bestimmen. Trifft zu, wenn der Trafo allein für die Abluftventilatoren genutzt wird.

«Netzdrossel»: Bestimmen, ob eine Netzdrossel eingesetzt wird.

«Oberschwingungsbeurteilung nach DACHCZ»: Beurteilung nach DACHCZ wie in Kapitel 6.3 beschrieben.

«Grenzwert eingehalten»: Grenzwerte gemäss DACHCZ werden eingehalten

«Technologie ist netzverträglich»: Die gewählte Lösung erfüllt die Anforderungen an die Netzverträglichkeit und kann eingesetzt werden.

«Low Harmonic Anteil vergrössern»: FU mit Low Harmonic Technologie gelten gemäss DACHCZ nicht als Oberwellenerzeuger, da sie mit einer Stromverzerrung THDI < 10% betrieben werden (siehe Kapitel 6.3.2).

Die Untersuchung Spannungsänderung ist in nachfolgender Abbildung (Abb. 64) dargestellt.

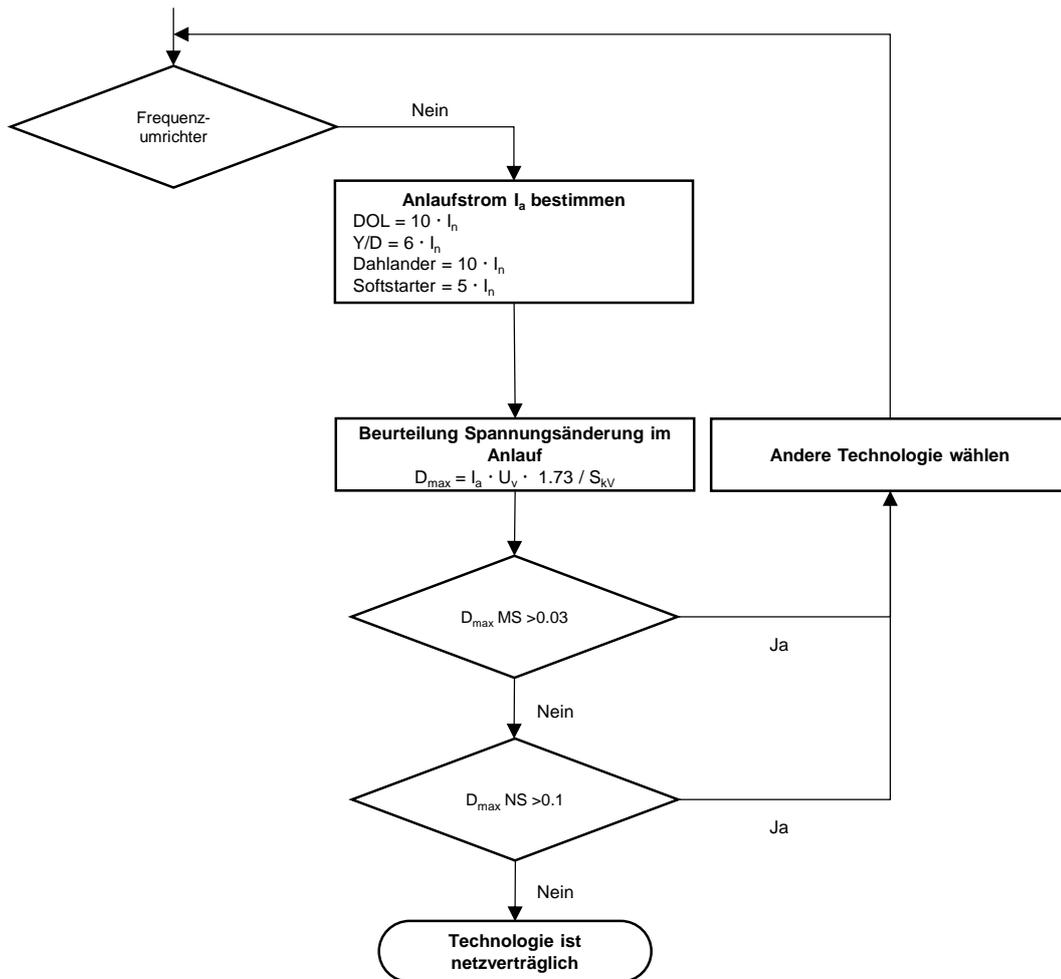


Abb. 64 Prozessdiagramm Netzverträglichkeit «zulässiger Spannungsabfall» Abluft für DOL, Stern-Dreieck-Anlauf, Dahlanderschaltung und Softstarter

«**Anlaufstrom I_a bestimmen**»: Der Anlaufstrom ist entweder mit einem Faktor auf den Nennstrom I_N zu bestimmen (vgl. Kapitel 6.2.4) oder aus projektspezifischen Datenblättern zu entnehmen.

«**Beurteilung Spannungsänderung im Anlauf**»: Die schaltbedingte Spannungsänderung ist zu bestimmen. Dabei wird die Leistungsänderung im Anlauf (ΔS_A) mit der Kurzschlussleistung des Trafos (S_{kV} , siehe Kapitel 6.1.1) verglichen.

« **$D_{max} MS > 0.03$** »: Vergleich der Spannungsänderung auf der Mittelspannungsseite im Anlauf mit dem Grenzwert $D_{max} = 3\%$ (siehe Kapitel 6.2.2).

« **$D_{max} NS > 0.1$** »: Vergleich der Spannungsänderung auf der Niederspannungsseite im Anlauf mit dem Grenzwert (siehe Kapitel 6.2.2). Liegt der Verknüpfungspunkt auf der Mittelspannungsebene, so wird empfohlen 10% auf der Niederspannungsebene unter keinen Umständen zu überschreiten (die technischen Regeln DACHCZ empfehlen 6%).

«**Andere Technologie wählen**»: Wenn der Grenzwert mit der vorgesehenen Technologie nicht eingehalten werden kann, so ist eine andere Technologie einzusetzen.

«**Technologie ist netzverträglich**»: Die gewählte Lösung erfüllt die Anforderungen an die Netzverträglichkeit und kann eingesetzt werden.

Wenn aus der Untersuchung keine netzverträgliche Technologie resultiert, so können der aerodynamische Prozess und die Untersuchung der Netzverträglichkeit unter Berücksichtigung anderer Baugrössen neu durchlaufen werden.

Beispiel Tunnel Musterloch II

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 22) sind die Motordaten der beiden Abluftventilator-Typen des Tunnel Musterloch aufgelistet. Da im Beispiel nach aerodynamischen Kriterien alle Antriebssysteme zulässig sind, wird die Netzverträglichkeit für alle Antriebssysteme untersucht.

Tab. 22 elektrische Angabe zu den Abluftventilatoren im Tunnel Musterloch II

Variante	Wellenleistung resp. Motornenn- leistung [kW]	Nennstrom (Wellenleistung resp. Nenn- leistung) [A]	Verhältnis I_A/I_N bei DOL bei Y/D bei Dahlander bei Sanftanl.	Anzahl Abluft- ventilatoren
Variante A, 2 Abluftventilatoren	535	531	10	2
	560	556	6	
			10	
			5	
Variante B, 3 Abluftventilatoren	360	357	10	3
	400	397	6	
			10	
			5	

Trafoleistung S_{Trafo} : 1600 kVA, Kurzschlussspannung 4.0%

cos φ / Powerfaktor (PF): 0.9 bei FU Betrieb

Spannung 690 V

Untersuchung der Netzverträglichkeit bei Einsatz von FU

Bei der Beurteilung der Netzverträglichkeit ist einerseits die tunnelinterne Betrachtung (gegenüber dem Tunnelbetreiber) und andererseits die Gesamtbetrachtung gegenüber dem Netzbetreiber vorzunehmen (siehe Gesamtbeispiel in Kapitel 7.3.3). Für die tunnelinterne Betrachtung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Der Trafo wird exklusiv für die Lüftung genutzt
- Der Verknüpfungspunkt ist mittelspannungsseitig
- Die Kurzschlussleistung kann mittelspannungsseitig mit typischerweise 50 – 100 MVA angenommen werden, sofern keine projektspezifischen Daten bekannt sind
- Der Frequenzumformer hat die gleiche Baugrösse wie der Motor, da die Wellenleistung kleiner als die Nennleistung ist
- 6-Puls FU ohne Netzdrossel

Variante A

Variante A

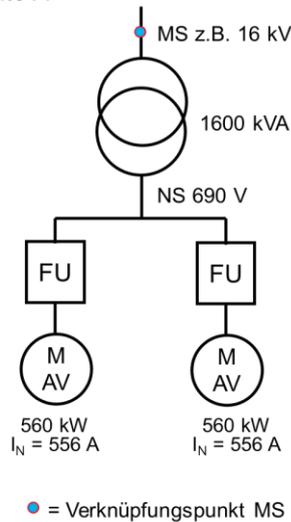


Abb. 65 Energieversorgung der beiden Abluftventilatoren aus Variante A. Die Netzverträglichkeit wird am Verknüpfungspunkt mittelspannungsseitig untersucht

$$S_{kV} = 50 \text{ MVA}$$

Es wird angenommen, dass die Kurzschlussspannung S_{kV} 50 MVA beträgt.

$$S_{A,Var A} = 1600 \text{ kVA} = \text{Trafoleistung, Verknüpfungspunkt mittelspannungsseitig}$$

$$S_{OS,Var A} = (2 \cdot 556 \text{ A} \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 1329 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var A}} = \frac{50000 \text{ kVA}}{1600 \text{ kVA}} = 31$$

$$\frac{S_{OS,Var A}}{S_{A,Var A}} = \frac{1329 \text{ kVA}}{1600 \text{ kVA}} = 0.83$$

→ gemäß Abb. 66: Massnahmen sind erforderlich resp. weitere Abklärungen sind notwendig. Der Einsatz eines 6-Puls FU ohne Netzdrossel ist nicht zulässig.

Variante B

$$S_{kV} = 50 \text{ MVA}$$

$$S_{A,Var B} = 1600 \text{ kVA} = \text{Trafoleistung, Verknüpfungspunkt mittelspannungsseitig}$$

$$S_{OS,Var B} = (3 \cdot 397 \text{ A} \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 1423 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var B}} = \frac{50000 \text{ kVA}}{1600 \text{ kVA}} = 31$$

$$\frac{S_{OS,Var B}}{S_{A,Var B}} = \frac{1423 \text{ kVA}}{1600 \text{ kVA}} = 0.89$$

→ gemäß Abb. 66: Massnahmen sind erforderlich resp. weitere Abklärungen sind notwendig. Der Einsatz eines 6-Puls FU ohne Netzdrossel ist nicht zulässig.

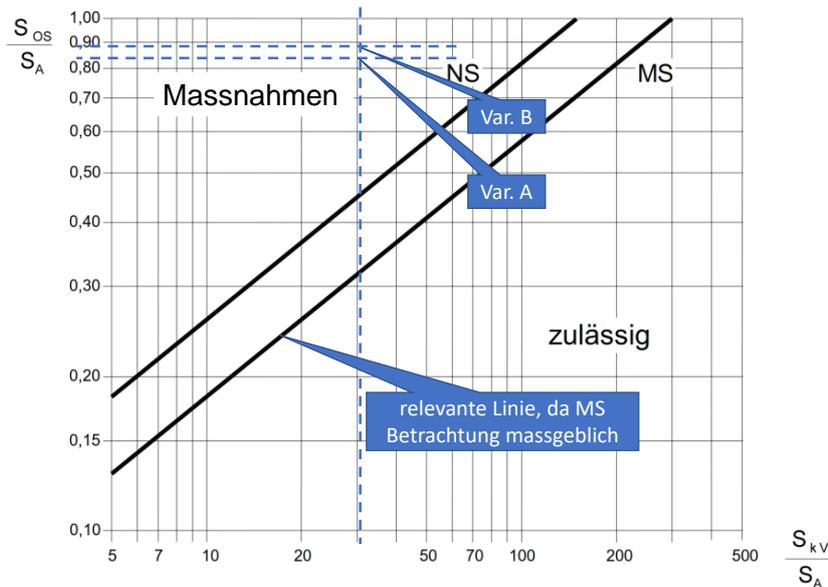


Abb. 66: Diagramm zur Bewertung des Oberschwingungsanteils (NS = Niederspannung, MS = Mittelspannung), gemäss [35], Abb.6-1

Die weiteren detaillierten Abklärungen zu den Oberschwingungen werden an einem Beispiel im Kapitel 7.3.3 exemplarisch aufgezeigt.

Untersuchung Spannungsänderung bei DOL und Dahlander

Bei nicht FU Lösungen sind die einzelnen Anlagen auf Spannungsänderungen zu prüfen. Der Spannungsabfall beim Start eines Abluftventilators via DOL oder Dahlanderschaltung wird im Nachfolgenden beurteilt. Das Verhältnis I_A/I_N wird mit dem Faktor 10 bewertet (vgl. Tab. 22). Es wird die vereinfachte, konservative Betrachtung ohne Berücksichtigung des Lastwinkels angewandt. Für die tunnelinterne Betrachtung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Der Verknüpfungspunkt ist mittelspannungsseitig
- Die Ventilatoren laufen in Sequenz an, es wird nur ein Ventilator betrachtet, da die Anlagen sequenziell gestartet werden
- Die Kurzschlussleistung kann mittelspannungsseitig mit typischerweise 50 – 100 MVA angenommen werden, sofern keine projektspezifischen Daten bekannt sind

Ein Beispiel zur Beurteilung der «Prüfen Netzverträglichkeit FU-Lösungen für den ganzen Tunnel» ist in Kapitel 7.3.3 beinhaltet.

Variante A

Variante A

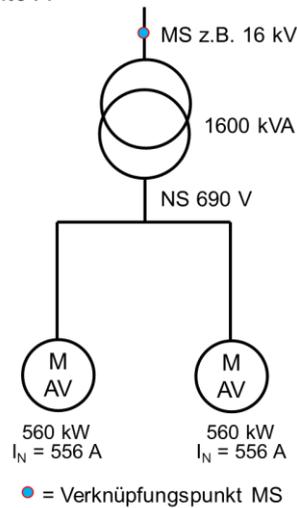


Abb. 67 Energieversorgung der beiden Abluftventilatoren aus Variante A. Die Netzverträglichkeit wird am Verknüpfungspunkt mittelspannungsseitig untersucht

$$S_{kV} = 100 \text{ MVA}$$

$$D_{max,Var A} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{556 \text{ A} \cdot 10 \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{100 \text{ MVA}} = \frac{6.6 \text{ MVA}}{100 \text{ MVA}} = 0.07$$

$$D_{max,Var A} = 0.07 > d_{max,zulässig} = 0.03 \implies \text{nok}$$

Variante B

$$S_{kV} = 100 \text{ MVA}$$

$$D_{max,Var B} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{397 \text{ A} \cdot 10 \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{100 \text{ MVA}} = \frac{4.7 \text{ MVA}}{100 \text{ MVA}} = 0.05$$

$$D_{max,Var B} = 0.05 > d_{max,zulässig} = 0.03 \implies \text{nok}$$

Untersuchung Spannungsänderung bei Y/D Umschaltung

Es gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie bei der Betrachtung wie bei DOL und Dahlander.

$$S_{kV} = 100 \text{ MVA}$$

Variante A

$$D_{max,Var A} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{556 \text{ A} \cdot 6 \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{100 \text{ MVA}} = \frac{4.0 \text{ MVA}}{100 \text{ MVA}} = 0.04$$

$$D_{max,Var A} = 0.04 > d_{max,zulässig} = 0.03 \implies \text{nok}$$

Variante B

$$D_{max,Var B} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{397 \text{ A} \cdot 6 \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{100 \text{ MVA}} = \frac{2.8 \text{ MVA}}{100 \text{ MVA}} = 0.028$$

$$D_{max,Var B} = 0.028 > d_{max,zulässig} = 0.03 \implies ok$$

Bemerkung: Zusätzlich ist sicherzustellen, dass der Spannungseinbruch NS-seitig 10% nicht überschreitet.

Untersuchung Spannungsänderung bei Sanft-Anlauf

Es gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie bei der Betrachtung wie bei DOL und Dahlander.

$$S_{kv} = 100 MVA$$

Variante A

$$D_{max,Var A} = \frac{\Delta S_A}{S_{kv}} = \frac{556 A \cdot 5 \cdot 690 V \cdot \sqrt{3}}{100 MVA} = \frac{3.3 MVA}{100 MVA} = 0.033$$

$$D_{max,Var A} = 0.033 > d_{max,zulässig} = 0.03 \implies nok$$

Variante B

$$D_{max,Var B} = \frac{\Delta S_A}{S_{kv}} = \frac{397 A \cdot 5 \cdot 690 V \cdot \sqrt{3}}{100 MVA} = \frac{2.4 MVA}{100 MVA} = 0.024$$

$$D_{max,Var B} = 0.024 > d_{max,zulässig} = 0.03 \implies ok$$

Tab. 23 Resultate Prozessdiagramm Netzverträglichkeit Abluft für den Tunnel Musterloch II

Variante	Netzverträglichkeit Oberschwingungen	Netzverträglichkeit Spannungsänderung
Variante A, 2 Abluftventilatoren	Für den 6-Puls FU sind detailliertere Abklärungen erforderlich *	DOL: nicht zul. Y/D Umschaltung: nicht zul. Dahlanderschaltung: nicht zul. Sanft-Anlauf: nicht zul.
Variante B, 3 Abluftventilatoren	Für den 6-Puls FU sind detailliertere Abklärungen erforderlich *	DOL: nicht zul. Y/D Umschaltung: zulässig Dahlanderschaltung: nicht zul. Sanft-Anlauf: zulässig

* Detailliertere Abklärungen heisst:

1. Berechnung der Grenzwerte nach DACHCZ
2. Gegenüberstellung der Oberschwingungsspektren (Messwerte gegenüber Grenzwerten)
3. Zusatzmassnahmen festlegen (Drossel oder Filter), allenfalls Technologiewechsel auf 12-Puls oder AFE

7.2.4 Bewertung der Lösungen

Die technische Bewertung und die Bewertung der Kosten kann mit der im folgenden beschriebenen Bewertungstabelle erfolgen. Dabei werden Daten für alle technisch möglichen Varianten in die Bewertungstabelle eingegeben. Die Varianten können dabei z.B. 2 unterschiedliche Abluftventilator-Typen mit 130 m³/s resp. 90 m³/s Volumenstrom beinhalten. Von der grösseren Baugrösse kommen 2 Abluftventilatoren zum Einsatz, von der kleineren Baugrösse 3 Stück.

Pro Variante und Antriebssystem wird eingegeben, ob die Anforderungen Aerodynamik und Netzverträglichkeit erfüllt sind. Wenn eine oder beide Fragen mit «Nein» beantwortet werden, so wird diese Lösung nicht weiter berücksichtigt.

In den Eingabefeldern (siehe Abb. 68) für die technischen Daten werden die folgenden Daten eingegeben.

Abluftventilator (AV)			
Schaufelverstellung	Nein	Eta aerodyn NB	75%
Anzahl	2	Eta aerodyn Testbetrieb	75%
Wellenleistung / AV	535 kW	Eta aerodyn EB	75%
Normmotor	560 kW		
Volumenstrom / AV	130 m ³ /s	Volumenstrom Anlage	260 m ³ /s
mittl. Distanz SGK bis AV	50 [m]		
Nutzungsdauer	20 [a]		
Zulässiger Spannungsabfall über das Kabel	3% [%]		
Betriebsspannung, 3-Phasen	690 [V]		
Motorwirkungsgrad	0.937 [-]		
cos phi	0.9 [-]		
Leitfähigkeit Kappa von Cu	56 [MS/m]		
Häufiger Normalbetrieb mit AV?	Nein		

Abb. 68 Eingabefelder für die technischen Daten (blau hinterlegt)

«**Schaufelverstellung**»: Angabe, ob die Abluftventilatoren über eine Laufschaufelverstellung verfügen. Bei «Nein» wird von festen Schaufeln ausgegangen.

«**Anzahl**»: Eingabe der Anzahl Abluftventilatoren. Die Anzahl wird in der Kostenermittlung berücksichtigt.

«**Wellen-Leistung / AV**»: Angabe zur Wellenleistung des Motors. Der Wert wird in der Kostenermittlung berücksichtigt.

«**Normmotor**»: Wahl des passenden Normmotors auf Basis der Wellenleistung. Diese Leistung wird bei der Beurteilung der Netzverträglichkeit berücksichtigt.

«**Volumenstrom / AV**»: Angabe zum Fördervolumen eines Abluftventilators bei einem der relevanten Betriebspunkte. Der Wert dient zusammen mit der Anzahl der Abluftventilatoren dazu, die Gesamtvolumenströme der untersuchten Varianten zu vergleichen.

«**mittl. Distanz SGK bis AV**»: Zur Ermittlung des Kabelquerschnitts und auch der Kabelkosten wird die mittlere Distanz zwischen einem Abluftventilator und der Schaltgerätekombination (SGK) berechnet.

«**Nutzungsdauer**»: Die «Nutzungsdauer» fließt in die Berechnung der Wartungskosten ein.

«**Zulässiger Spannungsabfall über das Kabel**»: Zur Berechnung des Kabelquerschnitts ist der zulässige Spannungsabfall erforderlich. Üblicherweise wird hier 3% angenommen, d.h. bei einer 690 V Installation darf die Spannung zwischen SGK und Abluftventilator um 21 V abfallen. Für die Kabellänge wird die «mittlere Distanz SGK bis SV» eingesetzt. Gemäss NIN ist der zulässige Spannungsabfall in der Installation (über das Kabel) mit 4% definiert.

«**Betriebsspannung, 3-Phasen**»: Der Wert, üblicherweise 400 V oder 690 V, wird bei der Berechnung des Nennstroms resp. des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**Motorwirkungsgrad**»: Der Wert, üblicherweise 0.90 bis 0.94, wird bei der Berechnung des Nennstroms resp. des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**cos phi**»: Der Wert, üblicherweise 0.82 bis 0.91, wird bei der Berechnung des Nennstroms resp. des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**Leitfähigkeit Kappa von Cu**»: Der Wert, üblicherweise 56 bis 58 MS/m resp. $m/(\Omega \times mm^2)$, wird bei der Berechnung des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**Häufiger Normalbetrieb mit AV?**»: Diese Angabe wird bei der Gewichtung der Energieeffizienz einer Anlage berücksichtigt.

Die Gewichtung der Einflussgrössen kann durch den Nutzer projektspezifisch eingegeben werden. Die Sensitivität der Gewichtungen auf die Resultate ist durch den Anwender projektspezifisch zu prüfen. Die entsprechenden Eingabefelder sind in Abb. 69 farblich hervorgehoben. Die generelle Bewertung ist vorgegeben und sollte vom Nutzer nicht verändert werden.

Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2
	Platzbedarf Schaufelverstellung (Hydraulik)	1
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb (mit NB = 8, ohne NB = 1)	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Testbetrieb (falls NB =1 --> TB = 2)	2
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Ereignisbetrieb	1
Lüftung	Hochlaufzeit Antrieb	3
	Hochlaufzeit mit/ohne Schaufelverstellung im Betrieb	3
	Staffelung mehrerer AV erforderlich ja/nein	1
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3
	Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung hydraulische/elektromechanisch	1
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2
Weiteres	Komplexität Antrieb (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, komplexität Komponenten)	1
	Komplexität Ventilator	1

Abb. 69 Eingabefelder für die Gewichtung der Einflussgrössen für Abluft

Die Gewichtung der Einflussgrössen und die generelle Bewertung der Antriebssystems lassen sich wie folgt beschreiben:

«**Bauliche Anforderungen, Platzbedarf Schaltgerätekombination**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Die Unterschiede im Platzbedarf resultieren aus den unterschiedlich grossen Antriebsschaltschränken je nach Antriebssystem. Die Gewichtung wird mit einem Wert von 2 auf der Skala von 0 – 10 für durchschnittliche Projekte vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die generelle Bewertung wird mit 6 Punkten für die kompakteren Systeme wie DOL und mit 1 Punkt für die aufwendigeren Systeme mit FU festgehalten.

«**Bauliche Anforderungen, Platzbedarf Schaufelverstellung**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Der Wert der Gewichtung wird auf 1 gesetzt. *Generelle Beurteilung*: Beim Vergleich von Varianten mit resp. ohne hydraulische Schaufelverstellung wird der Platzbedarf für das Hydraulikaggregat berücksichtigt.

«**Energieversorgung, Netzurückwirkungen – Oberschwingungen**» *Gewichtung Einflussgrösse*: Da in der Bewertung nur Systeme untersucht werden, welche netzverträglich sind, wird eine Gewichtung mit 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Während der 6 Puls FU nur mit 1 bewertet wird, werden den Lösungen 12 Puls FU und AFE 4 resp. 5 Punkte gegeben, da diese Lösungen nach DACHCZ nicht als Oberschwingungserzeuger gelten.

«**Energieversorgung, Netzurückwirkungen – Spannungseinbruch**» *Gewichtung Einflussgrösse*: Da in der Bewertung nur Systeme untersucht werden, welche netzverträglich sind, wird eine Gewichtung mit 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die grösste Auswirkung auf den Spannungseinbruch hat DOL, sodass hier 1 Punkt resultiert. Das beste Ergebnis resp. keinen Spannungseinbruch gibt es bei allen FU-Lösungen.

«**Energieversorgung – Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb**» *Gewichtung Einflussgrösse*: Der Wirkungsgrad eines Systems im Normalbetrieb wird berücksichtigt. Kommt ein Abluftsystem im Normalbetrieb häufig zum Einsatz, wird die Gewichtung auf 8 gesetzt. Bei seltenem Einsatz im Normalbetrieb liegt die Gewichtung bei 1. *Generelle Beurteilung*: Hinsichtlich Energieeffizienz bei 100% Drehzahl schneidet die FU-Lösungen am schlechtesten ab und werden mit 1 Punkt bewertet. Alle anderen Systeme, welche bei

100% Drehzahl ohne zusätzliche Verluste direkt am Netz betrieben werden, erhalten 6 Punkte.

«Energieversorgung – Energieeffizienz Gesamtsystem bei Testbetrieb» *Gewichtung Einflussgrösse:* Der Wirkungsgrad eines Systems im Testbetrieb wird berücksichtigt. Kommt ein Abluftsystem im Normalbetrieb häufig zum Einsatz, wird die Gewichtung für den Testbetrieb auf 1 gesetzt. Bei seltenem Einsatz im Normalbetrieb liegt die Gewichtung für den Testbetrieb bei 2. *Generelle Beurteilung:* Hinsichtlich Energieeffizienz bei 100% Drehzahl schneidet die FU-Lösungen am schlechtesten ab und werden mit 1 Punkt bewertet. Alle anderen Systeme, welche bei 100% Drehzahl ohne zusätzliche Verluste direkt am Netz betrieben werden, erhalten 6 Punkte.

«Energieversorgung – Energieeffizienz Gesamtsystem bei Ereignisbetrieb» *Gewichtung Einflussgrösse:* Der Wirkungsgrad eines Systems im Ereignisbetrieb wird berücksichtigt. Da der Ereignisbetrieb nur selten auftritt, wird eine Gewichtung von 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Hinsichtlich Energieeffizienz bei 100% Drehzahl schneidet die FU-Lösungen am schlechtesten ab und werden mit 1 Punkt bewertet. Alle anderen Systeme, welche bei 100% Drehzahl ohne zusätzliche Verluste direkt am Netz betrieben werden, erhalten 6 Punkte.

«Lüftung – Hochlaufzeit Antrieb» *Gewichtung Einflussgrösse:* Die Hochlaufzeit des Antriebs mit dem Laufrad wird bewertet. Eine Gewichtung mit 3 wird vorgeschlagen, da es im Ereignisfall wichtig ist, dass ein Abluftsystem schnell den Betriebspunkt erreicht hat. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Hochlaufzeit des Antriebs nur bei einer geringen Trägheit der Luftmasse resp. kurzen Luftsäulen vorteilhaft ist, da bei grossen Luftmassen die Beschleunigung der Luftmasse der entscheidende Faktor ist. *Generelle Beurteilung:* Bezüglich Hochlaufzeit ist der DOL Antrieb am schnellsten und wird entsprechend mit 6 Punkten bewertet.

«Lüftung – Hochlaufzeit mit/ohne Schaufelverstellung im Betrieb» *Gewichtung Einflussgrösse:* Eine Gewichtung mit 3 wird vorgeschlagen, wobei die gleichen Einschränkungen wie bei «Lüftung – Hochlaufzeit Antrieb» gelten. *Generelle Beurteilung:* Systeme mit festen Laufschaufeln sind schneller, da die Verfahrzeit der Laufschaufeln nicht dazu addiert werden müssen.

«Lüftung – Staffelung mehrerer AV erforderlich ja/nein» *Gewichtung Einflussgrösse:* Eine Gewichtung von 1 wird vorgeschlagen, da die grundsätzliche Eignung schon in der aerodynamischen Beurteilung erfolgt ist.

Generelle Beurteilung: Wenn der gestaffelte Anlauf mehrerer Abluftventilatoren erforderlich ist, weil z.B. direkt aus dem Normalbetrieb in den Ereignisbetrieb gewechselt werden soll, so bieten Antriebssysteme mit variabler Drehzahl Vorteile. Mit ihnen kann ohne Stromspitzen ein zusätzlicher Abluftventilator hinzugeschaltet werden. Weiter besteht die Möglichkeit, durch Reduktion der Drehzahl der bereits laufenden Abluftventilatoren die Anfahrbedingungen für die noch zu startenden Abluftventilatoren zu verbessern.

«Lüftung – Optimierung/Variation Betriebspunkt» *Gewichtung Einflussgrösse:* Für die Gewichtung wird 4 vorgeschlagen, wobei dieser Wert bei Abluftsystemen, welche nur im Ereignisbetrieb genutzt werden, reduziert werden kann. *Generelle Beurteilung:* Die Optimierung resp. Variation des Betriebspunkts ist vor allem beim Einsatz eines Abluftsystems im Normalbetrieb von Bedeutung. Sofern eine Laufschaufelverstellung angewendet wird, ist unabhängig vom Antriebssystem eine Variation des Betriebspunkts möglich und alle Antriebssysteme werden gleich bewertet. Bei festen Laufschaufeln ist eine Variation des Betriebspunktes nur mit FU möglich. Daher wird die FU-Lösungen höher bewertet.

«Kommunikation / Leittechnik – Schnittstelle Steuerung – Antriebssystem (Schaltgerätekombination)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Schnittstellen bei der Ablösung von Anlagen eine wichtige Rolle spielen, wird eine Gewichtung von 3 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Nach Erreichen der Nutzungsdauer einzelner Komponenten, können,

bedingt durch einen Technologiewandel, Anpassungen an den Schnittstellen zur Steuerung erforderlich sein. Je komplexer das Antriebssystem, desto grösser die Wahrscheinlichkeit, dass eine Anpassung der Schnittstelle nötig ist.

«Kommunikation / Leittechnik – Schnittstelle Steuerung Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung hydraulische/elektromechanisch» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Schnittstellen zu den Aktoren der hydraulischen Schaufelverstellung einfach sind, wird eine Gewichtung von 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Bei Abluftventilatoren mit Laufschaufelverstellung muss dies auch in die Steuerung eingebunden werden. Dies generiert zusätzliche Schnittstellen und auch Fehlerquellen. Systeme mit Schaufelverstellung werden mit 1 Systeme ohne Schaufelverstellung werden mit 2 bewertet.

«Kabelanlage – Kabelanlage» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Kabelanlagen kostenrelevant sind und die Anzahl der Leiter beim Platzbedarf in den Rohranlagen eine Rolle spielen, wird eine Gewichtung von 3 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Die Anzahl erforderlicher Leiter und Anforderungen an die Schirmung von Kabeln werden berücksichtigt. Die Dahlander-Lösung und die Stern-Dreieck-Lösungen mit 6 Leitern wird mit 1 Punkt bewertet. FU Lösungen mit geschirmten Kabeln mit 4 Punkten. Die höchste Punktzahl von 6 Punkten erhält DOL und die Softstarter-Lösung.

«Nebeneinrichtungen – Abwärme (Bedarf an Kühlung)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Eine Gewichtung von 2 wird vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Während bei DOL, Stern-Dreieck und Dahlander mit den eingesetzten Relaischaltungen keine nennenswerte Abwärme anfällt und die Abwärme bei Softstartern nur während der Hochlaufzeit von 15 bis 45 s anfällt, ist bei Lösungen mit FU von beim Betrieb des Strahlventilators mit einer dauerhaft anfallenden Abwärme von 3 bis 5 % der bezogenen Leistung zu rechnen. Die Abfuhr dieser Abwärme erfolgt mittels Aussenluft, vorgekühlter Luft oder Wasser mittels der Nebeneinrichtungen. Die Systeme werden mit 3 Punkten (FU) bis 6 Punkten (DOL) bewertet.

«Komplexität Antrieb (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Für die Gewichtung wird eine 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Die Antriebe unterscheiden sich in ihrer Komplexität was sich sowohl bei der Inbetriebnahme als auch bei etwaigen Fehlerbehebungen bemerkbar machen kann. Die Punkte wurden ausgehend von FU-Lösungen mit einer hohen Komplexität mit 1 Punkt bis zu DOL, bestehend aus 2 Schützen, mit 6 Punkten, bewertet.

«Systemkomplexität Ventilator» *Gewichtung Einflussgrösse:* Mit einer Gewichtung von 1 werden bei festen Laufschaufeln 6 Punkte vergeben und bei Laufschaufelverstellung 3 Punkte. *Generelle Beurteilung:* Ventilatoren ohne Schaufelstellung sind mechanisch weniger komplex als solche mit Laufschaufelverstellung.

Die Gewichtung der aufgeführten Einflussgrössen auf das Gesamtsystem werden mit der generellen Beurteilung der jeweiligen Antriebstechnologie multipliziert. Es ergibt sich eine gewichtete Beurteilung. Die Summe aller gewichteten Beurteilung führt zu absoluten Gesamtbewertung, exkl. Kosten / Anzahl. Werden diese Ergebnisse untereinander verglichen, erhält man eine relative Gesamtbewertung in Prozent.

Ergebnis Auswahlprozess			DOL	
	Anforderungen Aerodynamik erfüllt (Ja / Nein)		Ja	
	Anforderungen Netzverträglichkeit erfüllt (Ja / Nein)		Ja	
Technische Bewertung			Beurteilung	
Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung	generell	gewichtet
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2	6	12
	Platzbedarf Schaufelverstellung (Hydraulik)	1	6	6
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1	6	6
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1	1	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb (mit NB = 8, ohne NB = 1)	1	6	5
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Testbetrieb (falls NB =1 --> TB = 2)	2	6	9
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Ereignisbetrieb	1	6	5
Lüftung	Hochlaufzeit Antrieb	3	6	18
	Hochlaufzeit mit/ohne Schaufelverstellung im Betrieb	3	6	18
	Staffelung mehrerer AV erforderlich ja/nein	1	2	2
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3	6	18
	Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung hydraulische/elektromechanisch	1	2	2
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1	6	6
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2	6	12
Weiteres	Komplexität Antrieb (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1	6	6
	Komplexität Ventilator	1	6	6
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl				131
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]			10	130
Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl				186%

Abb. 70 Ausschnitt aus der Bewertungstabelle mit Einflussgrössen, Gewichtung und gewichteter Punktzahl für das Antriebssystem DOL. Im Beispiel erhält DOL gerundet 130 Punkte resp. 186% in der relativen Bewertung

In einem weiteren Schritt erfolgt die Bewertung der Kosten. Für diesen Teil der Bewertungstabelle sind typische Kosten hinterlegt. Die Kosten einer Variante resp. eines Antriebssystems werden aus den eingegebenen projektspezifischen Angaben und den hinterlegten Kosten ermittelt.

Beispiel Tunnel Musterloch II: Für den Tunnel Musterloch II wurde die Bewertung für die beiden Varianten durchgeführt, wobei die Variante A 2 grössere Abluftventilatoren und die Variante B 3 kleinere Abluftventilatoren beinhaltet. Aufgrund der Analysen zur «Bestimmung der aerodynamisch möglichen Lösungen» und der «Untersuchung der Netzverträglichkeit» entfallen einige Kombinationen. In Tab. 24 sind die Resultate der Bewertung zusammengefasst.

In der Bewertung wird jeweils eine Rundung bei der Gesamtbewertung und bei den Gesamtkosten eingeführt. Dadurch wird verhindert, dass Lösungen mit ähnlichen Punktzahlen sich im Rang unterscheiden.

Im Beispiel ist Variante A mit den 2 Abluftventilatoren in Kombination mit einem 12-Puls oder AFE-FU die Bestvariante. Variante B belegt den 2. Rang, welcher durch die hohen Kosten bedingt ist.

Tab. 24 Bewertung der verbleibenden Varianten der Abluftventilatoren nach der «Bestimmung der aerodynamisch möglichen Lösungen» und der «Untersuchung der Netzverträglichkeit»

Variante	Antriebssystem	Gesamtbewertung Einflussgrössen relativ ohne Kosten [%]	Gesamtbewertung Kosten relativ [%]	Gesamtbewertung Einflussgrössen und Kosten [Punkte]	Rang [-]
Variante A 2 AV Je 560 KW Abluftmenge je 130 m ³ /s Feste Laufschaufeln	DOL	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	Stern/Dreieck	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	Dahlander	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	Softstarter	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	FU 6-Puls	Ohne Zusatzmassnahmen nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	FU 12-Puls	114	100	1.14	1
	FU AFE	114	100	1.14	1
Variante B 3 AV Je 400 KW Abluftmenge je 87 m ³ /s Verstellbare Laufschaufeln	DOL	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	Stern/Dreieck	143	132	1.09	2
	Dahlander	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	Softstarter	143	142	1.01	3
	FU 6-Puls	Ohne Zusatzmassnahmen nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	FU 12-Puls	100	158	0.63	4
	FU AFE	100	158	0.63	4

7.2.5 Fazit Abluft

Bei Abluftventilatoren ist in vielen Fällen der Einsatz von Laufrädern ohne Schaufelverstellung zur Erfüllung der aerodynamischen Anforderungen ausreichend. Die Untersuchung der Netzurückwirkungen geben die zulässigen Antriebssysteme vor. Da einige Antriebssysteme durch den hohen Anlaufstrom einen Spannungsabfall erzeugen, wird es in der Regel erforderlich sein, den Anlauf zu staffeln, um die Auswirkungen zu reduzieren. Diese Staffelung bedingt wiederum, dass die überlagerten Ventilator Kennlinien zusammen mit der Anlagenkennlinie ein Hochfahren eines Abluftventilators gegen einen bereits vorherrschenden Gegendruck erfordern. Die geeignete Kombination muss projektspezifisch ermittelt werden.

Wie das Berechnungsbeispiel «Tunnel Musterloch II» zeigt, ist die Gesamtbewertung der Variante A mit 2 grösseren Abluftventilatoren für den Tunnel Musterloch II technisch und wirtschaftlich am besten geeignet. Hierbei kommen die Antriebe mit AFE-FU oder 12-Puls-FU in Frage.

Ergebnis Auswahlprozess		DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	Frequenzumrichter				
						6-Puls	12-Puls	AFE		
Anforderungen Aerodynamik erfüllt (Ja / Nein)		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
Anforderungen Netzverträglichkeit erfüllt (Ja / Nein)		Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja		
Technische Bewertung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		
Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung	generell	gewichtet	generell	gewichtet	generell	gewichtet	generell	gewichtet
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2							1	2
	Platzbedarf Schaufelverstellung (Hydraulik)	1							6	6
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1							4	4
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1							6	6
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Normalbetrieb (mit NB = 8, ohne NB = 1)	1							1	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Testbetrieb (falls NB = 1 --> TB = 2)	2							1	2
	Energieeffizienz Gesamtsystem bei Ereignisbetrieb	1							1	1
Lüftung	Hochlaufzeit Antrieb	3							3	9
	Hochlaufzeit mit/ohne Schaufelverstellung im Betrieb	3							6	18
	Staffelung mehrerer AV erforderlich ja/nein	1							5	5
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3							4	12
	Schnittstelle Steuerung zu Schaufelverstellung hydraulische/elektromechanisch	1							2	2
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1							3	3
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2							3	6
Weiteres	Komplexität Antrieb (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1							1	1
	Komplexität Ventilator	1							6	6
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl			-	-	-	-	-	-	83	84
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]		10	-	-	-	-	-	-	80	80
Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl			0%	0%	0%	0%	0%	0%	114%	114%
Kosten		DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	Frequenzumrichter				
Investitionskosten Ventilatoren	Herstellung, FAT	-	-	-	-	-	-	350'000.00	350'000.00	
	Montage, IBS, Dokumentation: Preis pro kW elektrisch unter Berücksichtigung feste Schaufeln resp. Schaufelverstellung	-	-	-	-	-	-	159'430.00	159'430.00	
	Gesamtpreis pro Abluftventilator	-	-	-	-	-	-	509'430.00	509'430.00	
	Investitionskosten alle Abluftventilatoren	-	-	-	-	-	-	1'018'860.00	1'018'860.00	
	Durchschn. Wartungskosten pro Abluftventilator und pro Jahr	-	-	-	-	-	-	5'462.83	5'462.83	
Wartungskosten Abluftventilatoren komplett = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten/AV)	-	-	-	-	-	-	238'513.33	238'513.33		
Investitionskosten Schaltgerätekombinationen	Durchschnittliche Kosten / kW Motornennleistung	-	-	-	-	-	-	324.05	329.64	
	Komplettes Anlasssystem inkl. Anteil an Schaltschrank, FAT Schaltschrank, Montage, IBS, Dokumentation pro Abluftventilator	-	-	-	-	-	-	173'364.93	176'355.88	
	Kosten Schaltgerätekombination komplett für alle Abluftventilatoren	-	-	-	-	-	-	346'729.85	352'711.77	
Wartungskostenen Schaltgerätekombinationen	Durchschn. Wartungskosten pro Antriebssystem und pro Jahr	-	-	-	-	-	-	250.00	250.00	
	Wartungskosten Schaltgerätekombination über die Nutzungsdauer von 20 Jahren = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten)	-	-	-	-	-	-	18'000.00	18'000.00	
	Kosten vorzeitiger Ersatz Wartungskosten Schaltgerätekombination komplett	-	-	-	-	-	-	231'153.23	235'141.18	
Investitionskosten Kabelanlage	Strom [A], 100% Drehzahl	-	-	-	-	-	-	531	531	
	Minimaler Kabelquerschnitt [mm2], 100% Drehzahl	-	-	-	-	-	-	36	36	
	Kabel Normquerschnitt [mm2]	-	-	-	-	-	-	50	50	
	Anzahl Kabel mit 3 x Normquerschnitt	-	-	-	-	-	-	1	1	
	Kosten [CHF] / [m], Kabel ungeschirmt inkl. Installation	-	-	-	-	-	-	---	---	
	Kosten [CHF] / [m], Kabel geschirmt inkl. Installation	---	---	---	---	---	---	30	30	
Investitionskosten Kabel	-	-	-	-	-	-	3'016	3'016		
Wartungskosten Kabelanlage	Wartungskosten Kabelanlagen über die Nutzungsdauer von 20 Jahren	-	-	-	-	-	-	-	-	
Investitionskosten Total		-	-	-	-	-	-	1'368'605.35	1'374'587.27	
Wartungskosten für 20 Jahre Total		-	-	-	-	-	-	487'666.57	491'654.51	
Gesamtkosten		-	-	-	-	-	-	1'856'271.92	1'866'241.78	
Gesamtkosten gerundet auf [CHF]		100'000.00	-	-	-	-	-	1'900'000.00	1'900'000.00	
Gesamtkosten relativ			0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	
		DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	Frequenzumrichter				
						6-Puls	12-Puls	AFE		
Gesamtbewertung Einflussgrössen und Kosten (relativ)		-	-	-	-	-	1.14	1.14		
Rang		-	-	-	-	-	1	1		

Abb. 71 Übersicht über die Bewertung des Abluftsystems Musterloch II, Variante A

7.3 Längslüftung

Im folgenden Kapitel ist das Vorgehen zur Evaluation der technisch und finanziell besten projektspezifischen Lösung für Strahlventilatoren dargestellt. Der Prozess wird in den folgenden Teilschritten durchlaufen:

- Auslegung Längslüftung und Auswahl Strahlventilator-Typ
- Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme
- Untersuchung der Netzverträglichkeit
- Bewertung der technisch möglichen Lösungen

Abb. 72 zeigt das Vorgehen zur Evaluation der technisch und finanziell besten projektspezifischen Lösung für Strahlventilatoren.

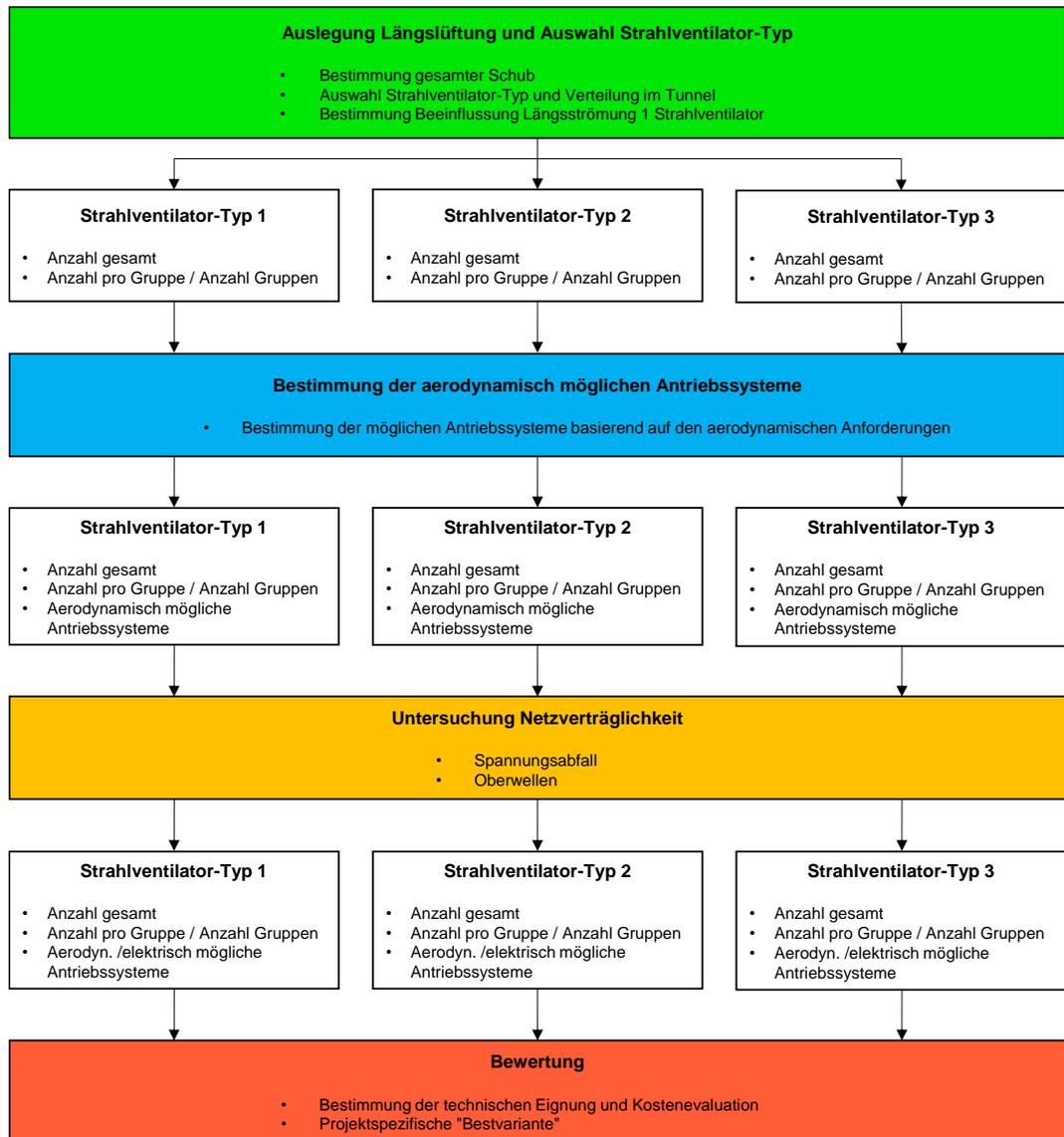


Abb. 72 Gesamtübersicht Auswahlprozess Strahlventilatoren

7.3.1 Auslegung Längslüftung und Auswahl Strahlventilator-Typ

Die Längslüftung wird anhand der geltenden Normen ausgelegt. In der Schweiz kommt die ASTRA 13001 [1] zur Anwendung, siehe Kapitel 4.1.3.

Aus der Auslegung resultiert der maximale erforderliche Schub. Dieser Gesamtschub wird, unter Berücksichtigung der Redundanz, auf mehrere Strahlventilatoren aufgeteilt. Bei dieser Aufteilung werden unterschiedliche Baugrössen von Strahlventilatoren berücksichtigt. Die Gesamtzahl der benötigten Strahlventilatoren wird auf Strahlventilator-Gruppen aufgeteilt, welche in der Regel aus je 1 bis 4 Strahlventilatoren bestehen. Bei der Ausarbeitung der technischen Lösungen sollen die folgenden Punkte beachtet werden:

- Anordnung der Strahlventilatoren im Tunnelprofil unter Berücksichtigung der einzuhaltenen Abstände zur Fahrbahn, zur Decke, zwischen den Strahlventilatoren und seitlich zur Wand.
- Resultierende Abstände zur nächstgelegenen Zentrale. Bei grösseren Abstände zwischen Strahlventilator und Schaltschrank sind grössere Kabelquerschnitte erforderlich, um den Spannungsverlust in Grenzen zu halten (in der Regel unter 3%). Weiter ist zu beachten, dass bei Antrieben mit FU-Lösungen max. 400 m Kabellänge zulässig sind. Bei zu langen Kabeln können Spannungsreflexionen die Impedanz des Netzkabels verändern. Im ungünstigen Fall wird die reflektierte Welle zu der vom Antrieb kommenden Grundwellenform addiert, was zu unzulässig hoher Spannung an den Motorklemmen führt (gemäss [31]).
- Die Anordnung der Strahlventilatoren muss bei parallelen Tunnelröhren, in welche Strahlventilatoren zur Überdruckbelüftung der Fluchtröhre eingesetzt werden, die Lage der Querverbindungen berücksichtigen.
- Bei der Wahl der geeigneten Lösungen ist der Abstand der Strahlventilatoren zu den nächstgelegenen Luftstrommessgeräten von 100 m einzuhalten und ebenfalls ein Abstand zum Portal von 80 m, wenn die Strahlventilatoren in beiden Blasrichtungen eingesetzt werden sollen.
- Falls der Projektperimeter verschiedene Tunnelobjekte umfasst, sollte mit einem Strahlventilator-Typ für alle Tunnel die Ersatzteilhaltung optimiert werden. Dies ist projektspezifisch zu prüfen.
- Bei der Aufteilung der erforderlichen Anzahl Strahlventilatoren auf Gruppen ist zu beachten, dass bei wenigen Gruppen mit einer grossen Anzahl von Strahlventilatoren der Bedarf an zusätzlichen Strahlventilatoren, um nach ASTRA 13 001 90% des Schubs beim brandbedingten Ausfall einer Gruppe zu gewährleisten, gross ist.

Beispiel Tunnel Musterloch: Für den Tunnel Musterloch wurde der erforderliche Schub für die Längslüftung ermittelt. Der Schub über die Tunnellänge ist in Abb. 73 aufgezeigt

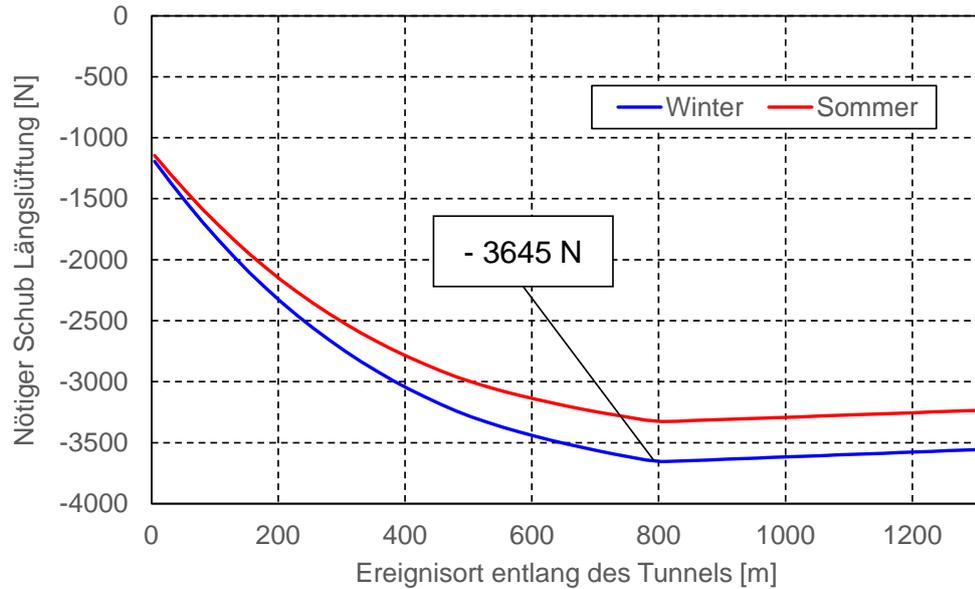


Abb. 73 Für den Tunnel Musterlosch maximal erforderlicher Schub von - 3645 N im Tunnel

In Abb. 74 sind 3 mögliche Kombinationen von Strahlventilatoren für den Beispeltunnel «Musterloch» aufgezeigt, welche alle drei den geforderten Schub liefern.

Tunnel Musterloch

1 Tunnelröhre
 Gegenverkehr
 Bedarf an die Regelung der Längsströmung: Ja
 Länge: 1'310 m
 Steigung: 2.5% (konstant)
 Querschnittsfläche: 55 m²; hydr. Durchmesser: 6.5 m
 MSV: 2'500 Fz/h; LkW-Anteil: 6%

Berechnung Δu im Tunnel: Annahme 20% Füllungsgrad

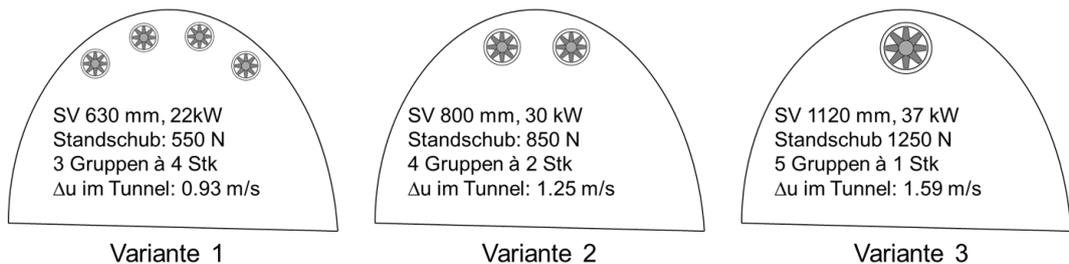


Abb. 74 Mögliche Lösungen für den Beispeltunnel «Musterloch»

7.3.2 Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme

Zur Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme muss in einem ersten Schritt definiert werden, ob eine Regelung der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum gefordert ist oder nicht. Hierzu sind in der Schweiz die Vorgaben der ASTRA 13001 [1] anzuwenden. Abb. 75 zeigt den Prozess.

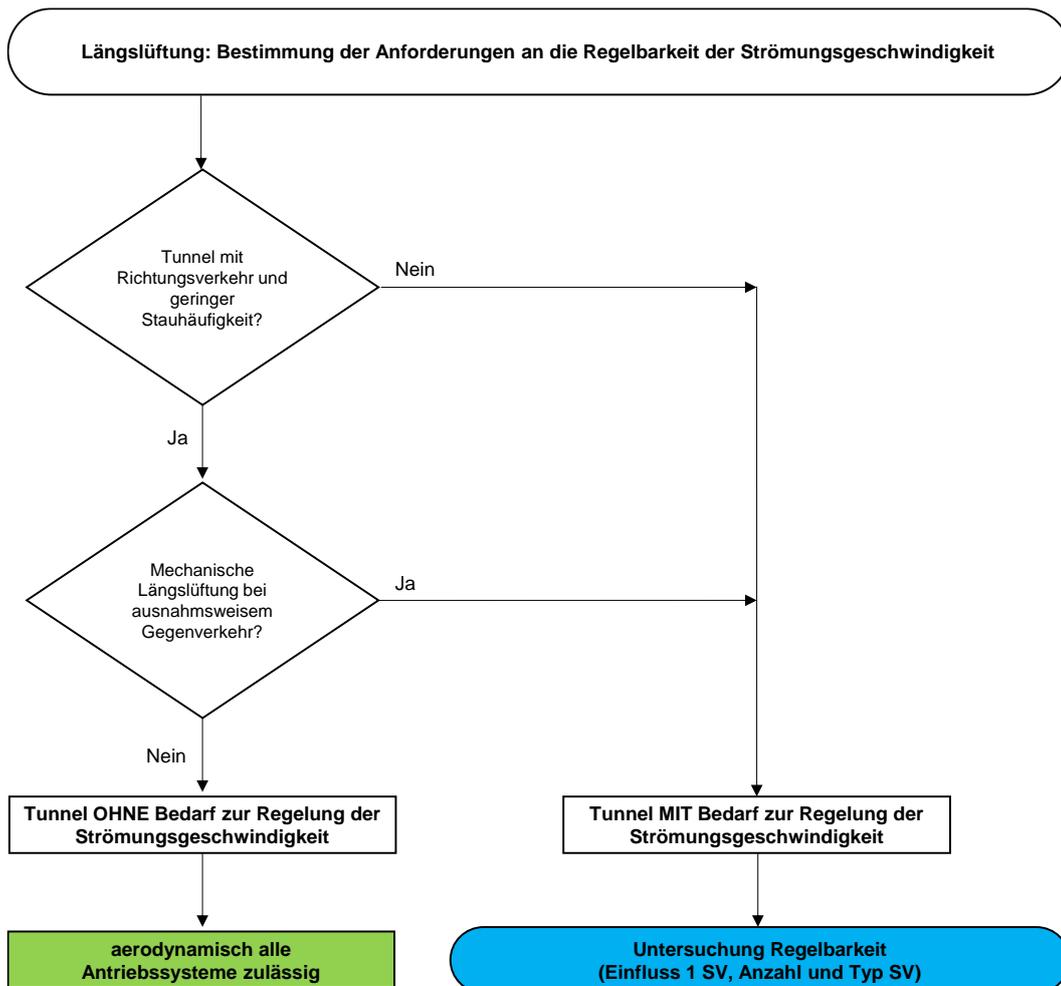


Abb. 75 Prüfen der Anforderung an die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit

Die einzelnen Schritte aus Abb. 75 sind im Folgenden erklärt:

«**Tunnel mit Richtungsverkehr und geringer Stauhäufigkeit?**»: Tunnel mit dieser Verkehrsart nach ASTRA 13001 können, sofern die Tunnellänge im zulässigen Bereich ist, mit einer Längslüftung ohne Regelung der Strömungsgeschwindigkeit gelüftet werden. Ohne eine Regelung der Strömungsgeschwindigkeit entfallen die aerodynamischen Anforderungen an die Antriebssysteme.

«**Mechanische Längslüftung bei ausnahmsweisem Gegenverkehr?**»: Es ist festzulegen, ob der Tunnel auf einen ausnahmsweisen Betrieb in Gegenverkehr ausgelegt werden soll. Falls ausnahmsweiser Betrieb in Gegenverkehr gefordert wird, kann entweder die Längslüftung ausgeschaltet werden oder der Tunnel wird im Ereignisfall mit einer geregelten Längsströmung belüftet.

«**aerodynamisch alle Antriebssysteme zulässig**»: Es besteht kein Bedarf zur Regelung der Strömungsgeschwindigkeit, daher gibt es keine aerodynamischen Anforderungen an die Antriebssysteme.

Beispiel Tunnel Musterloch: Da es sich um einen Gegenverkehrstunnel handelt, besteht ein Bedarf zur Regelung der Strömungsgeschwindigkeit, d.h. die Regelbarkeit muss untersucht werden. Dies wird im nächsten Schritt beschrieben.

Falls eine Regelung der Strömungsgeschwindigkeit erforderlich ist, wird gemäss Prozessdiagramm «Untersuchung Regelbarkeit» vorgegangen (siehe Abb. 76).

In den Prozessschritten wird der aerodynamische Einfluss eines Strahlventilators auf einen spezifischen Tunnel untersucht. Im Prozess wird dabei einerseits die Wirkung eines Strahlventilators und andererseits ein taktender Betrieb unter Einhaltung der maximal zulässige Anzahl der Starts pro Stunde untersucht.

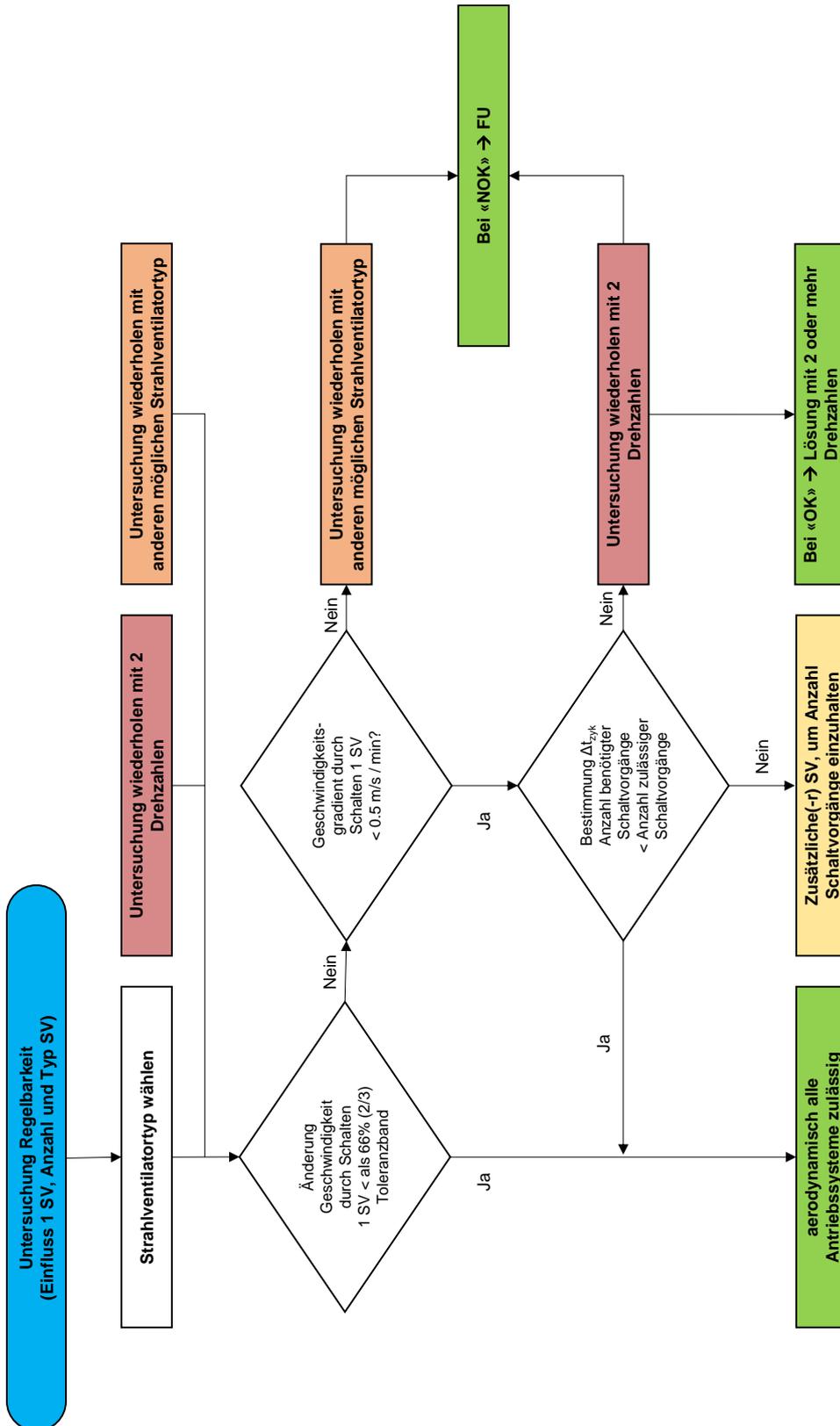


Abb. 76 Prozessdiagramm «Untersuchung Regelbarkeit» Strahlventilatoren

Die einzelnen Schritte aus Abb. 76 sind im Folgenden erläutert:

«**Strahlventilator typ wählen**»: Für jeden möglichen (siehe Kap. 0) Strahlventilator typ ist der Ablauf gemäss Prozessdiagramm durchzugehen, um alle möglichen Varianten definieren zu können.

«**Untersuchung wiederholen mit 2 Drehzahlen**»: Die Untersuchung wird wiederholt, wenn 2 Drehzahlen beim Antrieb zu Verfügungen stehen.

«**Untersuchung wiederholen mit anderen möglichen Strahlventilator typ**»: Falls im ersten Durchlauf kein geeigneter Strahlventilator gefunden wurde, muss der in der Auslegung ermittelte Gesamtschub neu auf einen anderen Strahlventilator typ und entsprechende die Gesamtanzahl erhöht oder erniedrigt werden.

«**Änderung Geschwindigkeit durch Schalten 1 SV < Toleranzband (0.4 m/s)?**»: Die Änderung der Geschwindigkeit u_2 nach Einschalten eines Strahlventilator berechnet sich gemäss Anhang I. Die resultierende Geschwindigkeitsänderung muss kleiner als 0.4 m/s (66% des Toleranzbandes) sein, das heisst durch das Einschalten eines Strahlventilators mit 100% Drehzahl beträgt die Geschwindigkeitserhöhung maximal 0.4 m/s. Nur in langen Tunneln und beim Einsatz von Strahlventilatoren mit wenig Schub kann dieser Wert eingehalten werden. Grundlagen der Regelung sind in Kapitel 4.1.2 beschrieben, die Herleitung der Formel für u_2 ist im Anhang I ausgeführt.

«**Geschwindigkeitsgradient durch Schalten 1 SV < 0.5 m/s / min?**»: Der Geschwindigkeitsgradient kann mittels einer zeitlich abhängigen Formel aus Anhang I ermittelt werden.

«**Bestimmung Δt_{zyk} Anzahl benötigter Schaltvorgänge < Anzahl zulässiger Schaltvorgänge**»: Erläuterungen siehe Kapitel 4.1.2, «getakteter Betrieb». Die Zykluszeit Δt_{zyk} resultiert aus der Summe der Beschleunigungszeit Δt_{acc} und der Abbremszeit Δt_{dec} . Um eine thermische Überbelastung des Elektromotors durch Ein-/Ausschaltvorgänge zu verhindern, ist die Anzahl Einschaltvorgänge (inkl. Drehrichtungsänderung) auf typischerweise maximal 6 Stück innerhalb von 60 Minuten zu beschränken.

«**aerodynamisch alle Antriebssysteme zulässig**»: Der Strahlventilator bewirkt auch bei 100% Drehzahl nur eine kleine Geschwindigkeitserhöhung im Tunnel. Daher sind alle Antriebssysteme zulässig.

«**Zusätzliche(-r) SV, um Anzahl Schaltvorgänge einzuhalten**»: Wenn alle anderen Kriterien erfüllt sind, und nur die zulässige Anzahl Schaltungen nicht eingehalten wird, kann die Anzahl Schaltungen bei Betrachtung aller Schaltvorgänge durch einen oder mehrere zusätzliche Strahlventilatoren erhöht werden.

«**Bei «OK» → Lösung mit 2 oder mehr Drehzahlen**»: Strahlventilatoren mit 2 oder mehr Drehzahlstufen sind zulässig. In der Praxis bedeutet dies den Antrieb mit Dahlanderschaltung oder FU zu realisieren.

Beispiel Tunnel Musterloch: Für den Tunnel Musterloch ergibt die Anwendung des Prozessdiagramms «Untersuchung Regelbarkeit» für die 3 Strahlventilator typen die folgenden Resultate.

Tab. 25 Resultate Prozessdiagramm «Untersuchung Regelbarkeit» für den Tunnel Musterloch

Variante	Mögliche Antriebssysteme
Variante 1, SV 630 mm	Alle Antriebssysteme zulässig
Variante 2, SV 800 mm	Alle Antriebssysteme zulässig
Variante 3, SV 1120 mm	Frequenzumformer erforderlich

7.3.3 Untersuchung der Netzverträglichkeit

Die aerodynamisch möglichen Lösungen müssen in einem zweiten Schritt betreffend ihrer Netzverträglichkeit untersucht werden. Dabei erfolgt für die FU-Lösungen eine Beurteilung der Oberschwingungen und für die Lösungen mit DOL, Stern-Dreieck-Anlauf, Dahlander-schaltung und Softstarter eine Beurteilung des Spannungsabfalls.

Abb. 77 zeigt im Überblick den Ablauf für alle technischen Lösungen.

Folgende Prozessschritte aus Abb. 77 gelten für die Untersuchung Oberschwingungen und die Untersuchungen zum Spannungsabfall:

«**Definition des Verknüpfungspunktes V (in der Regel Niederspannungsverteilung)**»: Bei der Untersuchung für die Strahlventilatoren wird der Verknüpfungspunkt meist auf der Niederspannungsseite des Trafos gewählt, da häufig auch noch andere Verbraucher am gleichen Trafo angeschlossen sind.

«**Bestimmen der Netzkurzschlussleistung am V, S_{KV}** »: Die Netzkurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt wird bestimmt (siehe Kapitel 6.1.1).

«**Frequenzumrichter**»: Abfrage, ob der Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) erfolgt oder ob andere Technologien eingesetzt werden.

Im Folgenden wird getrennt auf die Untersuchung der Oberschwingungen resp. den Spannungsabfall eingegangen.

Die Untersuchungen der Oberschwingungen sind in Abb. 78 dargestellt.

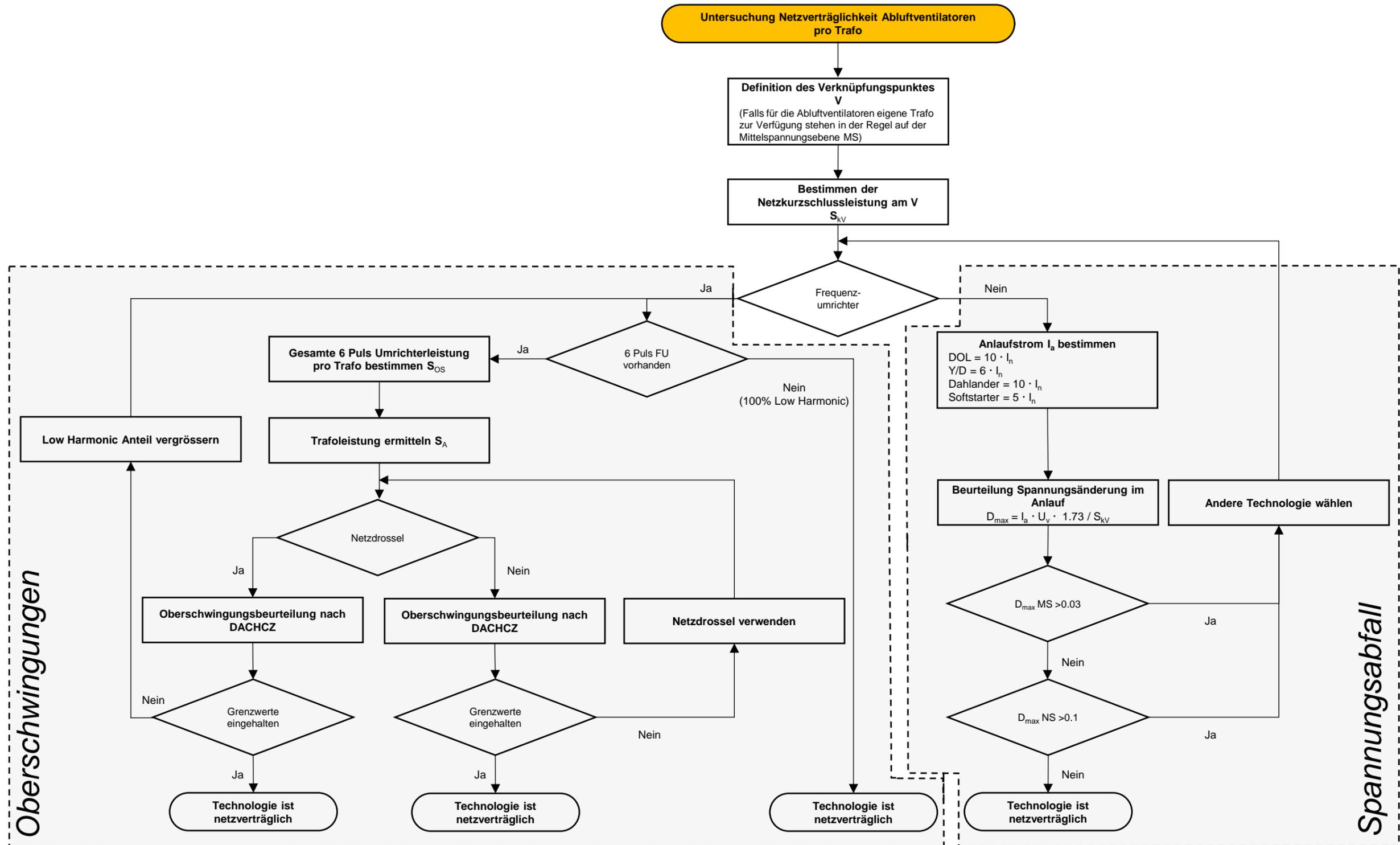


Abb. 77 Prozessdiagramm Netzverträglichkeit Längslüftung. Die linke Diagrammhälfte bezieht sich auf die FU-Lösungen und die Thematik Oberschwingungen, die rechte Diagrammhälfte auf die Technologien, welche beim Start eines Strahlventilators einen Spannungsabfall bewirken.

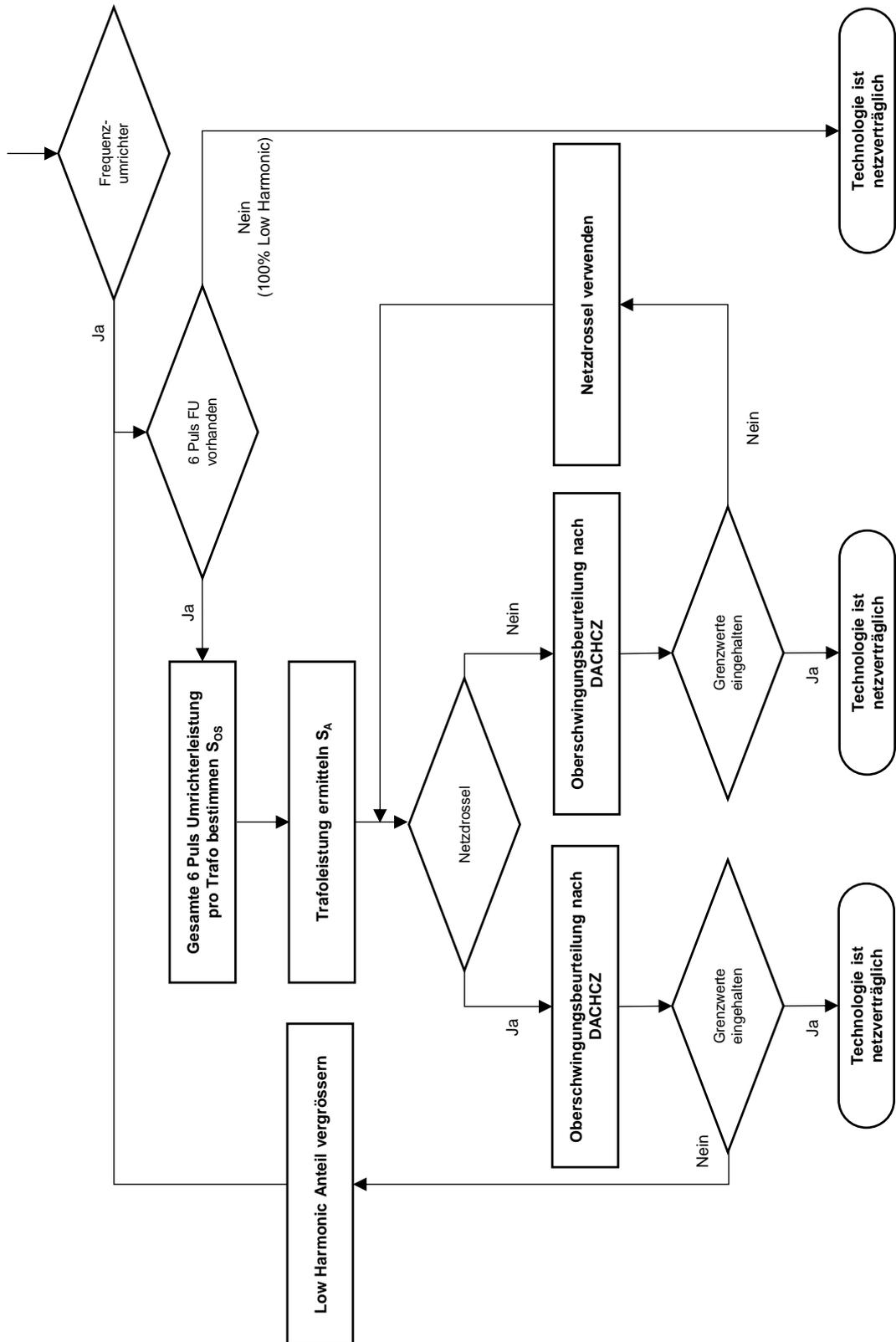


Abb. 78 Prozessdiagramm Netzverträglichkeit Längslüftung für die FU-Lösungen, wenn separater Trafo für Längslüftung

Die einzelnen Schritte aus Abb. 78 sind im Folgenden erläutert:

«**6 Puls FU vorhanden**»: Projektspezifisch zu beantworten, ob 6 Puls FU zum Einsatz kommen. Gemäss DACHCZ gelten nur 6 Puls FU als Oberwellenerzeuger.

«**Gesamte 6 Puls Umrichterleistung pro Trafo bestimmen S_{OS}** »: Oberschwingungslast S_{OS} umfasst die bestehenden und die neuen Oberschwingungserzeuger.

«**Trafoleistung ermitteln S_A** »: S_A gleich Bemessungsleistung des Trafos in kVA.

«**Netzdrossel**»: Bestimmen, ob eine Netzdrossel eingesetzt wird.

«**Oberschwingungsbeurteilung nach DACHCZ**»: Beurteilung nach DACHCZ wie in Kapitel 6.3 beschrieben.

«**Grenzwert eingehalten**»: Grenzwerte gemäss DACHCZ werden eingehalten

«**Technologie ist netzverträglich**»: Die gewählte Lösung erfüllt die Anforderungen an die Netzverträglichkeit und kann eingesetzt werden.

«**Low Harmonic Anteil vergrössern**»: FU mit Low Harmonic Technologie sind gemäss DACHCZ nicht als Oberwellenerzeuger, da sie mit einer Stromverzerrung THDI < 10% betrieben werden (siehe Kapitel 6.3.2).

Die Untersuchungen des Spannungsabfalls sind in Abb. 79 dargestellt.

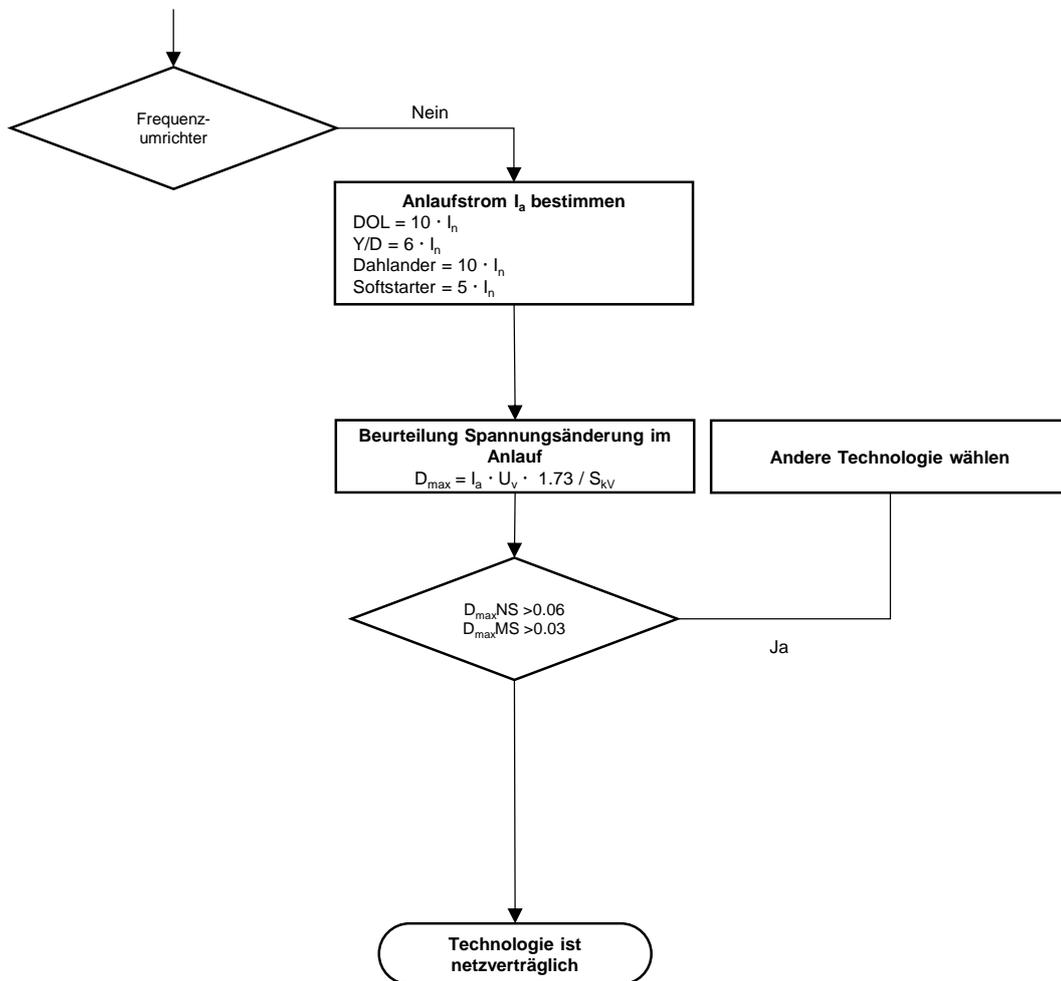


Abb. 79 Prozessdiagramm Netzverträglichkeit «zulässiger Spannungsabfall» Längslüftung für DOL, Stern-Dreieck-Anlauf, Dahlanderschaltung und Softstarter

Die einzelnen Schritte aus Abb. 79 sind im Folgenden erläutert:

«**Anlaufstrom I_a bestimmen**»: Den Anlaufstrom entweder mit einem Faktor auf den Nennstrom I_N bestimmen oder aus projektspezifischen Datenblättern entnehmen. Der einzusetzende Faktor ist je nach eingesetzter technischer Lösung zu wählen.

«**Beurteilung Spannungsänderung im Anlauf**»: Die schaltbedingte Spannungsänderung ist zu bestimmen. Dabei wird die Leistungsänderung im Anlauf (ΔS_A) mit der Kurzschlussleistung des Trafos (S_{kV} , siehe Kapitel 6.1.1) verglichen.

« **$D_{maxNS} > 0.06$** »: Vergleich der Spannungsänderung im Anlauf mit dem Grenzwert (siehe Kapitel 6.2.2). Zulässig ist ein Spannungseinbruch um 6% auf der Niederspannungsebene.

« **$D_{maxMS} > 0.03$** »: Zulässig ist ein Spannungseinbruch um 3% auf der Mittelspannungsebene.

«**Andere Technologie wählen**»: Wenn der Grenzwert mit der vorgesehenen Technologie nicht eingehalten werden kann, so ist eine andere Technologie einzusetzen.

«**Technologie ist netzverträglich**»: Die gewählte Lösung erfüllt die Anforderungen an die Netzverträglichkeit und kann eingesetzt werden.

Wenn aus der Untersuchung keine netzverträgliche Technologie resultiert, so können der aerodynamische Prozess und die Untersuchung der Netzverträglichkeit unter Berücksichtigung anderer Baugrößen neu durchlaufen werden.

Beispiel Tunnel Musterloch: Für den Tunnel Musterloch ergibt die Anwendung des Prozessdiagramms «Netzverträglichkeit» für die 3 Strahlventilatorarten, entsprechend den Variante 1 bis 3, die folgenden Resultate.

Tab. 26 Motordaten der Strahlventilatoren im Tunnel Musterloch

Variante	Motornennleistung [kW]	Nennstrom [A]	Verhältnis I_a/I_N bei DOL	Anzahl Strahlventilatoren
Variante 1, SV 630 mm, 12 Stck.	22	39	10	12
Variante 2, SV 800 mm, 8 Stck.	30	53	10	8
Variante 3, SV 1120 mm, 5 Stck.	37	67	10	5

Trafoleistung S_{Trafo} : 250 kVA, Kurzschlussspannung 3.95%

$\cos \varphi$ / Powerfaktor (PF): 0.9 bei FU Betrieb

Spannung 400V

Prüfen der Netzverträglichkeit FU-Lösungen (Trafo nur für Strahlventilatoren):

Bei der Beurteilung der Netzverträglichkeit ist einerseits die tunnelinterne Betrachtung (gegenüber dem Tunnelbetreiber) und andererseits die Gesamtbetrachtung gegenüber dem Netzbetreiber vorzunehmen (siehe Gesamtbeispiel am Ende des vorliegenden Kapitels). Für die tunnelinterne Betrachtung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Der Trafo wird exklusiv für die Lüftung genutzt
- Die Kurzschlussleistung kann mittelspannungsseitig mit typischerweise 50 – 100 MVA angenommen werden, sofern keine projektspezifischen Daten bekannt sind
- Der Verknüpfungspunkt ist mittelspannungsseitig
- Die Hälfte der Strahlventilatoren wird jeweils an einem der Tunnelportale installiert. Die Energieversorgung der Strahlventilatoren erfolgt jeweils ab der Portalzentrale. In der Variante 1 sind demnach 6 Strahlventilatoren an einen Trafo angeschlossen. Bei der Variante 2 sind es 4 Strahlventilatoren und bei der Variante 3 sind es 2 resp. 3 Strahlventilatoren, wobei der Fall mit 3 Strahlventilatoren betrachtet wird.
- Der Frequenzumformer hat die gleiche Baugröße wie der Motor, da die Wellenleistung kleiner als die Nennleistung ist

- 6-Puls FU sind nicht mit Netzdrossel ausgerüstet
- Nebst der tunnelinternen Betrachtung muss eine Gesamtbetrachtung gegenüber des Netzbetreibers durchgeführt werden

Variante 1

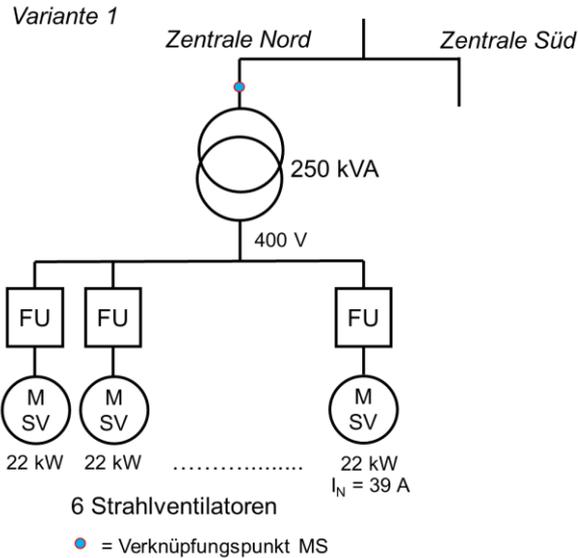


Abb. 80 Energieversorgung für Variante 1. Die tunnelinterne Netzverträglichkeit wird am mittelspannungsseitigen Verknüpfungspunkt untersucht

$$S_{kV} = 50 - 100 \text{ MVA}$$

$$S_{A,var 1} = 250 \text{ kVA} = \text{Trafoleistung}$$

$$S_{OS,var 1} = (6 \text{ Stck} \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 162 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,var 1}} = \frac{50000 \text{ kVA}}{250 \text{ kVA}} = 200$$

$$\frac{S_{OS,var 1}}{S_{A,var 1}} = \frac{162 \text{ kVA}}{250 \text{ kVA}} = 0.64$$

→ gemäss Abb. 81: für die tunnelinterne Betrachtung ergeben sich keine Massnahmen

Variante 2

$$S_{A,var 2} = 250 \text{ kVA} = \text{Trafoleistung}$$

$$S_{OS,var 2} = (4 \text{ Stck} \cdot 53 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 147 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,var 2}} = \frac{50000 \text{ kVA}}{250 \text{ kVA}} = 200$$

$$\frac{S_{OS,var 2}}{S_{A,var 2}} = \frac{147 \text{ kVA}}{250 \text{ kVA}} = 0.59$$

→ gemäss Abb. 81: für die tunnelinterne Betrachtung ergeben sich keine Massnahmen

Variante 3

$$S_{A,Var\ 3} = = 250\ kVA = \text{Trafoleistung}$$

$$S_{OS,Var\ 3} = (3\text{Stck} \cdot 67\ A \cdot 400\ V \cdot \sqrt{3}) = 139\ kVA$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var\ 3}} = \frac{50000\ kVA}{250\ kVA} = 200$$

$$\frac{S_{OS,Var\ 3}}{S_{A,Var\ 3}} = \frac{139\ kVA}{250\ kVA} = 0.56$$

→ gemäss Abb. 81: für die tunnelinterne Betrachtung ergeben sich keine Massnahmen

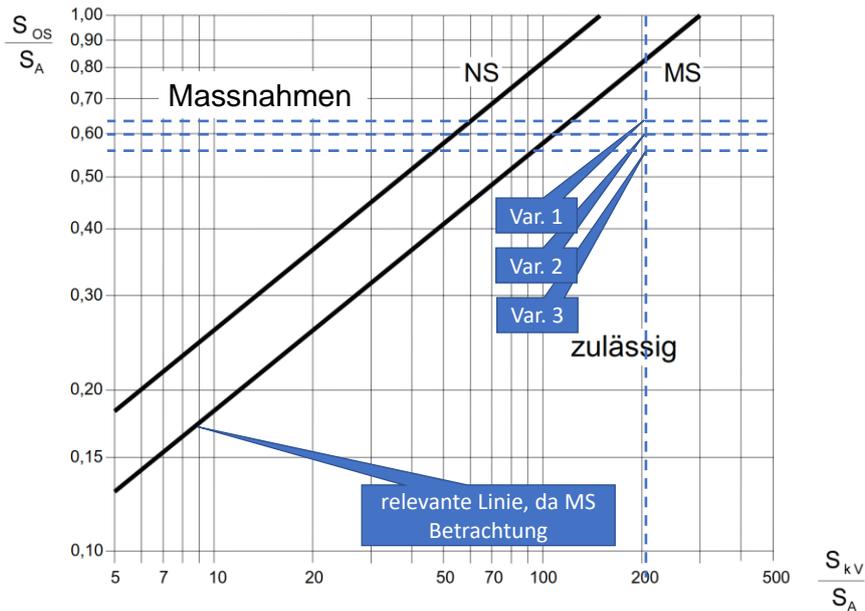


Abb. 81: Diagramm zur Bewertung des Oberschwingungsanteils (NS = Niederspannung, MS = Mittelspannung), gemäss [35], Abb.6-1

Eine detaillierte Abklärung zu den Oberschwingungen für die Variante 3, welche nach der Beurteilung aus Abb. 81 nicht zwingend erforderlich gewesen wäre, zeigen die folgenden Ausführungen unter Verwendung der Werte aus Tab. 17 für einen 6-Puls FU ohne Netz-drossel:

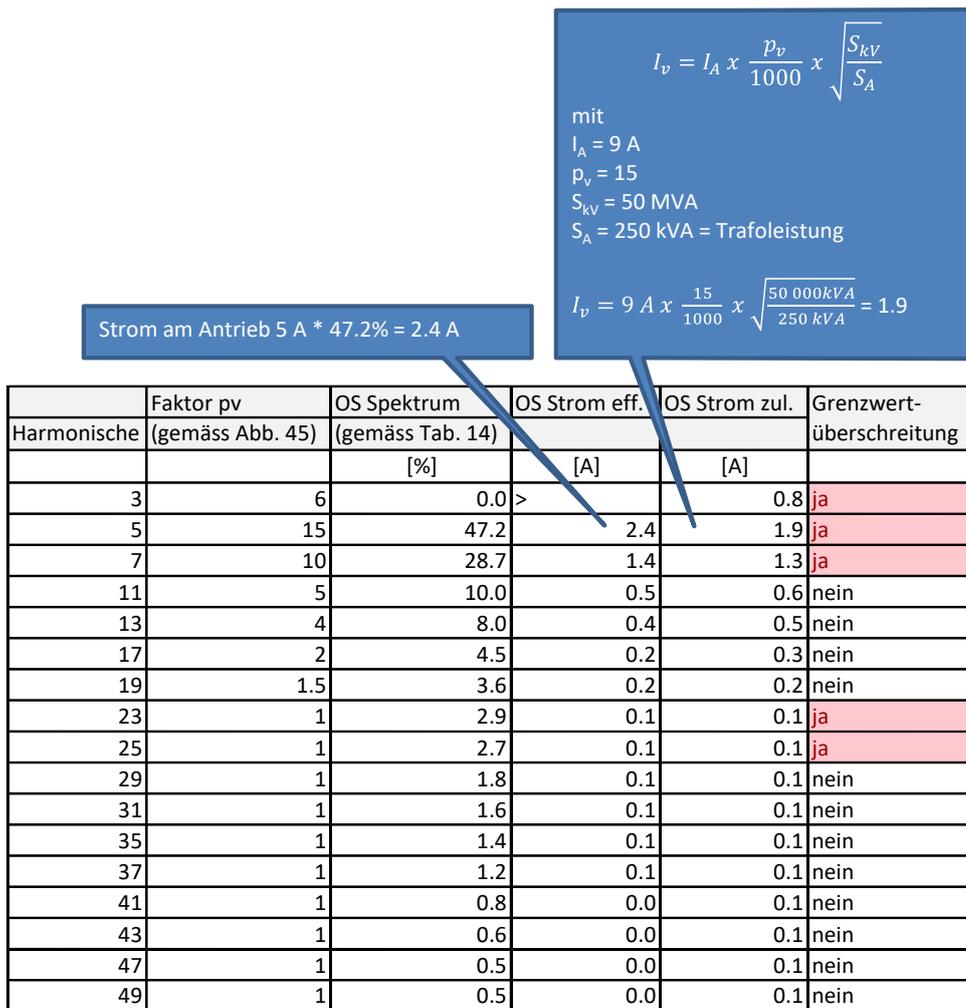


Abb. 82: Exemplarische detaillierte Abklärung zu den Oberschwingungen für Variante 3 für 3 Strahlventilatoren. Die Berechnung wurde mittelspannungsseitig durchgeführt. Die Grenzwerte werden bei einigen Harmonischen überschritten.

Im Beispiel zeigt sich, dass obwohl die einfache Beurteilung gemäss Abb. 81 keine weiteren Massnahmen ergeben hat, die Detailberechnung nach Abb. 82 eine unzulässige Lösung ergibt. In der Praxis ist es meist so, dass eine erste Beurteilung «Massnahmen» ergibt und in einem folgenden Schritt in einer Detailbeurteilung geprüft wird, ob ein 6-Puls FU, welcher mit einer Drossel ausgerüstet wird, die Anforderungen erfüllen kann.

Prüfen Netzverträglichkeit FU-Lösungen (Trafo NICHT exklusiv für die Lüftung):

Bei der Beurteilung der Netzverträglichkeit ist einerseits die tunnelinterne Betrachtung (gegenüber anderen Verbrauchern im Tunnel) und andererseits die Gesamtbetrachtung gegenüber dem Netzbetreiber vorzunehmen (siehe Abschnitt «Prüfen Netzverträglichkeit FU-Lösungen für den ganzen Tunnel» weiter unten). Für die tunnelinterne Betrachtung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Der Trafo wird für die Lüftung und für die Beleuchtung genutzt
- Der Verknüpfungspunkt ist niederspannungsseitig
- Die Kurzschlussleistung wird niederspannungsseitig angenommen
- Im Beispiel sind 6 Strahlventilatoren und die Beleuchtung an den Trafo angeschlossen.
- Der Frequenzumformer hat die gleiche Baugrösse wie der Motor, da die Wellenleistung kleiner als die Nennleistung ist
- 6-Puls FU sind nicht mit Netzdrossel ausgerüstet
- Die Gesamtheit der Anlage (12 FU) muss zusätzlich gegenüber dem Netzbetreiber betrachtet werden

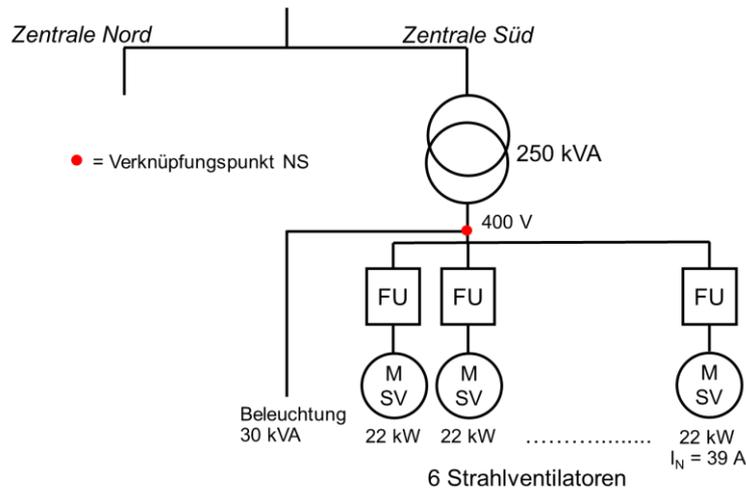


Abb. 83: Beispiel, wenn der Trafo NICHT exklusiv für die Lüftung genutzt wird. Dargestellt ist die tunnelinterne Überprüfung der Netzverträglichkeit

Betrachtung 1 (konservativ)

$$S_{kV} = \frac{\text{Trafoleistung } S_{r \text{ Trafo}}}{\text{Kurzschlussspannung } u_k} = \frac{0.250 \text{ MVA}}{0.0395\%} = 6.329 \text{ MVA}$$

$$S_{A,Var 1} = (6 \text{ Stck} \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 162 \text{ kVA}$$

$$S_{OS,Var 1} = (6 \text{ Stck} \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 162 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var 1}} = \frac{6.329 \text{ kVA}}{162 \text{ kVA}} = 39$$

$$\frac{S_{OS,Var 1}}{S_{A,Var 1}} = \frac{162 \text{ kVA}}{162 \text{ kVA}} = 1.00$$

Bemerkung: S_A wird gleich S_{OS} gesetzt, Da nur die Verbraucher betrachtet werden, welche Oberschwingungen erzeugen (vgl. Kapitel 6.3.1)

Betrachtung 2

$$S_{kV} = \frac{\text{Trafoleistung } S_{r \text{ Trafo}}}{\text{Kurzschlussspannung } u_k} = \frac{0.250 \text{ MVA}}{0.0395\%} = 6.329 \text{ MVA}$$

$$S_{A,Var 1 \text{ optl}} = (6 \text{ Stck} \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 162 \text{ kVA} + 30 \text{ kVA} \text{ Beleuchtung}$$

$$S_{OS,Var 1} = (6 \text{ Stck} \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 162 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var 1 \text{ optl}}} = \frac{6.329 \text{ kVA}}{192 \text{ kVA}} = 33$$

$$\frac{S_{OS,Var 1}}{S_{A,Var 1 \text{ optl}}} = \frac{162 \text{ kVA}}{192 \text{ kVA}} = 0.84$$

Bemerkung: Es wird angenommen, dass die Beleuchtung keine Oberwellen erzeugt. Die Leistung der Beleuchtung wird zur Leistung der Strahlventilatoren addiert.

Betrachtung 3 (progressiv)

$$S_{kV} = \frac{\text{Trafoleistung } S_{r \text{ Trafo}}}{\text{Kurzschlussspannung } u_k} = \frac{0.250 \text{ MVA}}{0.0395\%} = 6.329 \text{ MVA}$$

$$S_{A,Var 1 \text{ OptII}} = 250 \text{ kVA}$$

$$S_{OS,Var 1} = (6 \text{ Stck} \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 162 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var 1 \text{ OptII}}} = \frac{6.329 \text{ kVA}}{250 \text{ kVA}} = 25$$

$$\frac{S_{OS,Var 1}}{S_{A,Var 1 \text{ OptII}}} = \frac{162 \text{ kVA}}{250 \text{ kVA}} = 0.65$$

Bemerkung: Die Anlagenleistung S_A wird gleich der Trafoleistung gesetzt

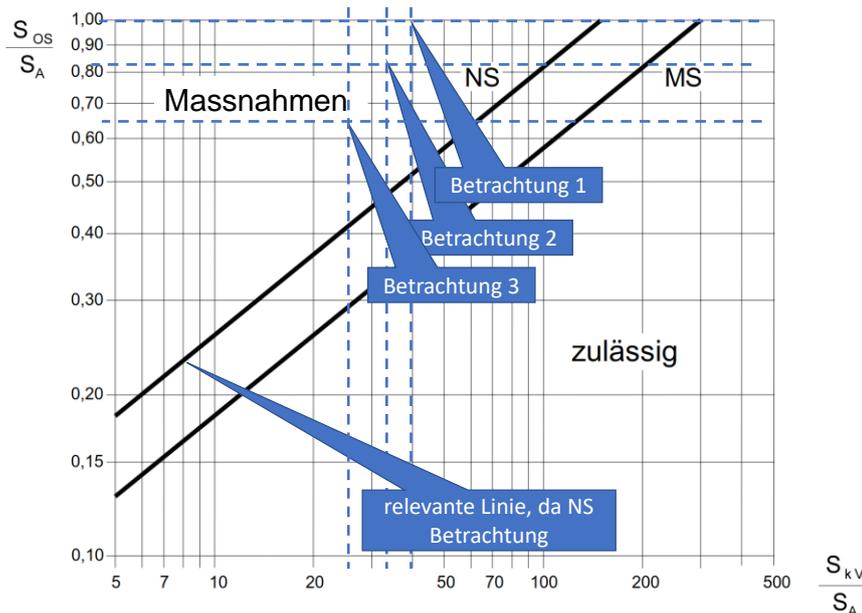


Abb. 84: Diagramm zur Bewertung des Oberschwingungsanteils (NS = Niederspannung, MS = Mittelspannung), gemäss [35], Abb.6-1

Obwohl der Anteil, der nicht oberwellenbehafteten Anlagenleistung zur Betrachtung 3 hin vergrössert wurde, sind im Beispiel immer noch Massnahmen erforderlich.

Prüfen Netzverträglichkeit FU-Lösung gegenüber Netzbetreiber

Im folgenden Beispiel wird eine Gesamtbetrachtung eines Tunnels zur Netzverträglichkeit mit unterschiedlichen Verbrauchern gegenüber dem Netzbetreiber (Technisches Anschlussgesuch TAG) durchgeführt. Es werden dabei 2 Varianten untersucht:

- Variante 1: alle eingesetzten FU für die Abluft- und die Strahlventilatoren sind 6 Puls FU ohne Netzdrossel
- Variante 2: die Abluftventilatoren sind mit AFE FU ausgerüstet, die Strahlventilatoren mit 6 Puls FU
- Folgendes wurde angenommen:
- Die vertragliche Anschlussleistung beträgt 1700 kVA. Dieser Wert wird als Anlagenleistung S_A angenommen
- schwächste Einspeisung wird betrachtet

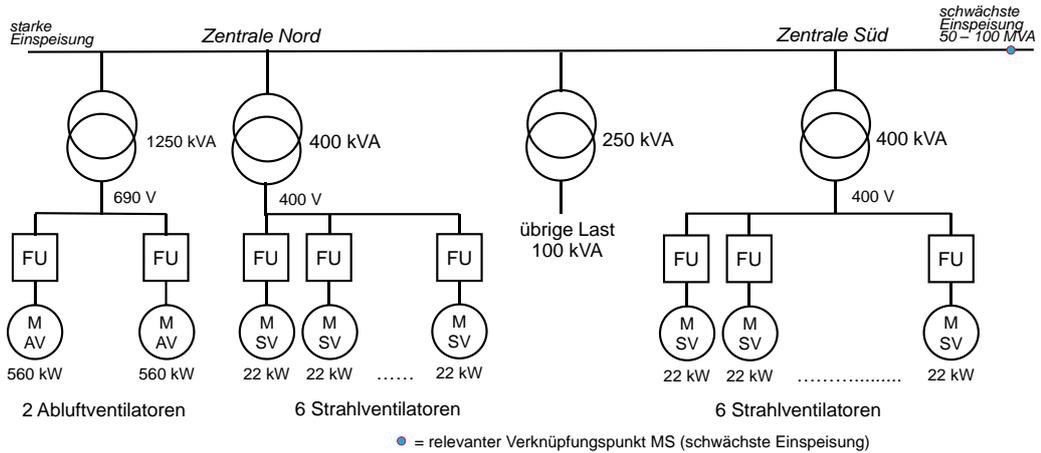


Abb. 85 Gesamtbetrachtung Tunnel

Variante 1: alle FU 6 Puls

$$S_{kV} = 50 - 100 \text{ MVA}$$

$$S_{A,Var 1} = 1700 \text{ kVA}$$

$$S_{OS,Var 1} = (2 \cdot 556 \text{ A} \cdot 690 \text{ V} \cdot \sqrt{3} + 12 \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 1653 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var 1}} = \frac{50000 \text{ kVA}}{1700 \text{ kVA}} = 29$$

$$\frac{S_{OS,Var 1}}{S_{A,Var 1}} = \frac{1653 \text{ kVA}}{1700 \text{ kVA}} = 0.97$$

Variante 2: FU der Abluftventilatoren AFE; FU der Strahlventilatoren 6 Puls

$$S_{kV} = 50 - 100 \text{ MVA}$$

$$S_{A,Var 2} = 1700 \text{ kVA}$$

$$S_{OS,Var 2} = (12 \cdot 39 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}) = 324 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_{A,Var 2}} = \frac{50000 \text{ kVA}}{1700 \text{ kVA}} = 29$$

$$\frac{S_{OS,Var 2}}{S_{A,Var 2}} = \frac{324 \text{ kVA}}{1700 \text{ kVA}} = 0.19$$

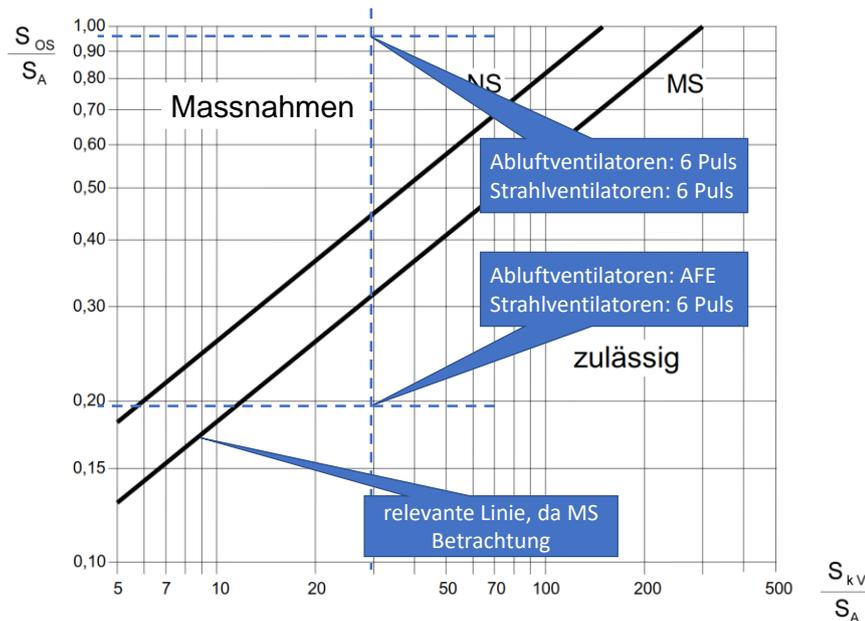


Abb. 86 Diagramm zur Bewertung des Oberschwingungsanteils

Bemerkung: Durch den Einsatz von AFE FU für die Abluftventilatoren wird der Einsatz von 6 Puls FU für die Strahlventilatoren zulässig. Da die 6 Puls FU über weniger Leistungselektronik verfügen, wird von einer höheren Verfügbarkeit ausgegangen. Zudem sind die Investitionskosten der 6 Puls FU geringer. Der Wirkungsgrad der 6 Puls FU ist bei Nennleistung ca. 2% höher als der von AFE FU [26].

Beurteilung Spannungsabfall bei DOL:

Der Spannungsabfall beim Start eines Strahlventilators mit DOL wird beurteilt, wobei das Verhältnis $I_A/I_N = 10$ beträgt. Es wird die vereinfachte, konservative Betrachtung ohne Berücksichtigung des Lastwinkels angewandt.

Annahme:

- Die Hälfte der Strahlventilatoren wird jeweils an einem der Tunnelportale installiert. Die Energieversorgung der Strahlventilatoren erfolgt jeweils ab der Portalzentrale. In der Variante 1 sind demnach 6 Strahlventilatoren an einen Trafo angeschlossen. Bei der Variante 2 sind es 4 Strahlventilatoren und bei der Variante 3 wird der Fall mit 3 Strahlventilatoren für die Beurteilung der Netzverträglichkeit untersucht.
- Der Verknüpfungspunkt ist mittelspannungsseitig
- Die Ventilatoren laufen in Sequenz an, es wird nur ein Ventilator betrachtet
- Die Kurzschlussleistung kann mittelspannungsseitig mit typischerweise 50 – 100 MVA angenommen werden, sofern keine projektspezifischen Daten bekannt sind

Variante 1

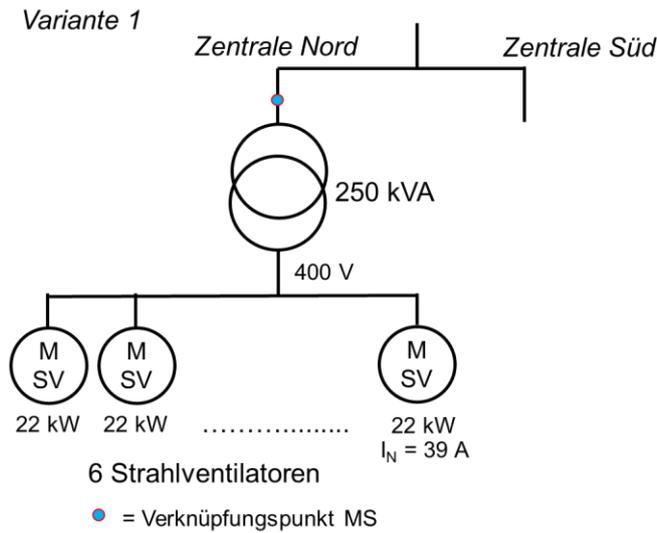


Abb. 87 Energieversorgung der 6 Strahlventilatoren aus Variante 1. Die Netzverträglichkeit wird mittelspannungsseitig Verknüpfungspunkt untersucht

$$S_{kV} = 50 \text{ MVA}$$

$$D_{max,Var 1} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{39 \text{ A} \cdot 10 \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{50 \text{ MVA}} = \frac{0.27 \text{ MVA}}{50 \text{ MVA}} = 0.005$$

$$D_{max,Var 1} = 0.005 < d_{max,zulässig} = 0.03 \rightarrow ok$$

Variante 2

$$S_{kV} = 50 \text{ MVA}$$

$$D_{max,Var 2} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{53 \text{ A} \cdot 10 \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{50 \text{ MVA}} = \frac{0.37 \text{ MVA}}{50 \text{ MVA}} = 0.006$$

$$D_{max,Var 2} = 0.006 < d_{max,zulässig} = 0.03 \rightarrow ok$$

Variante 3

$$S_{kV} = 50 \text{ MVA}$$

$$D_{max,Var 3} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} = \frac{67 \text{ A} \cdot 10 \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}}{50 \text{ MVA}} = \frac{0.46 \text{ MVA}}{50 \text{ MVA}} = 0.009$$

$$D_{max,Var 3} = 0.009 < d_{max,zulässig} = 0.03 \rightarrow ok$$

Tab. 27 Resultate Prozessdiagramm Netzverträglichkeit Längslüftung für den Tunnel Musterloch

Variante	Netzverträglichkeit FU-Lösungen	Netzverträglichkeit Spannungsabfall
Variante 1, SV 630 mm		
Variante 2, SV 800 mm	Für den 6-Puls FU sind detailliertere Abklärungen erforderlich *	DOL zulässig
Variante 3, SV 1120 mm		

* Detailliertere Abklärungen heisst:

1. Berechnung der Grenzwerte nach DACHCZ
2. Gegenüberstellung der Oberschwingungsspektren (Messwerte gegenüber Grenzwerten)
3. Zusatzmassnahmen festlegen (Drossel oder Filter), allenfalls Technologiewechsel auf 12-Puls oder AFE

7.3.4 Bewertung der Lösungen

Die technische Bewertung und die Bewertung der Kosten kann mit der im folgenden beschriebenen Bewertungstabelle erfolgen. Dabei werden Daten für alle untersuchten Varianten in die Bewertungstabelle eingegeben. Die Varianten können dabei zum Beispiel 3 unterschiedliche Strahlventilator-Baugrößen mit 1120 mm, 1000 mm und 800 mm Laufraddurchmesser sein.

Pro Variante und Antriebssystem wird eingegeben, ob die Anforderungen an die Regelung und die Anforderungen an die Netzverträglichkeit erfüllt sind. Wenn eine oder beide Fragen mit «Nein» beantwortet werden, so wird diese Lösung nicht weiter in der Bewertung berücksichtigt.

In den Eingabefeldern (siehe Abb. 88) werden die folgenden Daten eingegeben.

Beeinflussung u	1.6 [m/s]		
Laufraddurchmesser	1120 [mm]		
Stand Schub / Strahlventilator	1250 [N]		
Anzahl Strahlventilatoren	5 [Stck.]	Anzahl Gruppen	5 [Stck.]
Nennleistung Strahlventilatormotor	37 [kW]	Distanz Gruppe 1 / Zentrale	100 [m]
mittlere Distanz SGK bis SV	230 [m]	Distanz Gruppe 2 / Zentrale	200 [m]
Nutzungsdauer	20 [a]	Distanz Gruppe 3 / Zentrale	300 [m]
Zulässiger Spannungsabfall über das Kabel	3% [%]	Distanz Gruppe 4 / Zentrale	100 [m]
Betriebsspannung, 3-Phasen	400 [V]	Distanz Gruppe 5 / Zentrale	200 [m]
Motorwirkungsgrad	0.937 [-]	Distanz Gruppe 6 / Zentrale	[m]
cos phi	0.85 [-]	Distanz Gruppe 7 / Zentrale	[m]
Leitfähigkeit Kappa von CU	56 [MS/m]	Distanz innerhalb Zentrale	50 [m]

Abb. 88 Eingabefelder für die technischen Daten

«**Beeinflussung u**»: Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeit durch das Einschalten eines Strahlventilators. Bei der Einflussgrösse «Regelgüte» wird die «Beeinflussung u» gewichtet.

«**Laufraddurchmesser**»: Gibt den Laufraddurchmesser des Strahlventilators in Millimeter an. Der Wert wird bei der Kostenermittlung verwendet.

«**Stand Schub / Strahlventilator**»: Dieser Wert wird in der Bewertungstabelle nicht genutzt und dient nur der Information.

«**Anzahl Strahlventilatoren**»: Eingabe der Anzahl Strahlventilatoren. Der Wert wird in der Kostenermittlung berücksichtigt.

«**Nennleistung Strahlventilatormotor**»: Angabe der Nennleistung eines Strahlventilatormotors. Der Wert wird in der Kostenermittlung berücksichtigt.

«**mittlere Distanz SGK bis SV**»: Zur Ermittlung des Kabelquerschnitts und auch der Kabelkosten wird die mittlere Distanz zwischen einem Strahlventilator und der Schaltgerätekombination (SGK) berechnet. Die «Distanz innerhalb der Zentrale» wird mitberücksichtigt.

«**Nutzungsdauer**»: Die «Nutzungsdauer» fliesst in die Berechnung der Wartungskosten ein.

«**Zulässiger Spannungsabfall über das Kabel**»: Zur Berechnung des Kabelquerschnitts ist der zulässige Spannungsabfall erforderlich. Üblicherweise wird hier 3% angenommen, d.h. bei einer 400 V Installation darf die Spannung zwischen SGK und Strahlventilator um 12 V abfallen. Für die Kabellänge wird die «mittlere Distanz SGK bis SV» eingesetzt. Gemäss NIN ist der zulässige Spannungsabfall in der Installation (über das Kabel) mit 4% definiert.

«**Betriebsspannung, 3-Phasen**»: Der Wert, üblicherweise 400 V oder 690 V, wird bei der Berechnung des Nennstroms resp. des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**Motorwirkungsgrad**»: Der Wert, üblicherweise 0.90 bis 0.94, wird bei der Berechnung des Nennstroms resp. des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**cos phi**»: Der Wert, üblicherweise 0.82 bis 0.91, wird bei der Berechnung des Nennstroms resp. des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**Leitfähigkeit Kappa von CU**»: Der Wert, üblicherweise 56 bis 58 MS/m resp. $m/(\Omega \times mm^2)$, wird bei der Berechnung des minimalen Kabelquerschnitts berücksichtigt.

«**Anzahl Gruppen**»: Gibt an, auf wie viele Gruppen die Strahlventilatoren aufgeteilt sind. Bei 5 Strahlventilatoren und 5 Gruppen ergibt sich 1 Strahlventilator/Gruppe.

«**Distanz Gruppe X / Zentrale**»: Eingabe der Trasselänge des Kabels von der Gruppe X bis zur nächstgelegenen Zentrale. Die Kabellänge innerhalb der Zentrale wird durch den Wert «Distanz innerhalb der Zentrale» berücksichtigt. Nicht genutzte Felder sind leer zu lassen.

«**Distanz innerhalb der Zentrale**»: Berücksichtigt die durchschnittliche Kabellänge innerhalb der Zentrale(n).

Die Gewichtung der Einflussgrössen kann durch den Nutzer projektspezifisch eingegeben werden. Abb. 89 zeigt entsprechende Eingabefelder (blau hinterlegt). Die generelle Bewertung ist vorgegeben und sollte vom Nutzer nicht verändert werden.

Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem	1
	Cos phi Gesamtsystem	0
Lüftung	Regelgüte	10
	Regelzeit - Einregelzeit (--> verzögerter Anlauf)	6
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	5
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2
Weiteres	Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1

Abb. 89 Eingabefelder für die Gewichtung der Einflussgrössen für die Längslüftung

Die Gewichtung der Einflussgrössen und die generelle Bewertung des Antriebssystems lassen sich wie folgt beschreiben:

«**Bauliche Anforderungen, Platzbedarf Schaltgerätekombination**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Die Unterschiede im Platzbedarf resultieren aus den unterschiedlich grossen Antriebsschaltschränken je nach Antriebssystem. Die Gewichtung wird mit einem Wert von 2 auf der Skala von 0 – 10 für durchschnittliche Projekte vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die generelle Bewertung wird mit 6 Punkten für die kompakteren Systeme wie DOL und mit 1 Punkt für die aufwendigeren Systeme mit FU festgehalten.

«**Energieversorgung, Netzurückwirkungen – Oberschwingungen**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Da in der Bewertung nur Systeme untersucht werden, welche netzverträglich sind, wird eine Gewichtung mit 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Während der 6 Puls FU nur mit 1 bewertet wird, werden den Lösungen 12 Puls FU und AFE 4 resp. 5 Punkte gegeben, da diese Lösungen nach DACHCZ nicht als Oberschwingungserzeuger gelten.

«**Energieversorgung, Netzurückwirkungen – Spannungseinbruch**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Da in der Bewertung nur Systeme untersucht werden, welche netzverträglich sind, wird eine Gewichtung mit 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die grösste Auswirkung auf den Spannungseinbruch hat DOL, sodass hier 1 Punkt resultiert. Das beste Ergebnis resp. keinen Spannungseinbruch gibt es bei allen FU-Lösungen.

«**Energieversorgung – Energieeffizienz Gesamtsystem**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Die Energieeffizienz berücksichtigt den Wirkungsgrad eines Systems bei 100% Drehzahl,

bei welcher Strahlventilatoren im Normalbetrieb in der Regel betrieben werden. Unterschiede in der Energieeffizienz ergeben sich bei den Komponenten im Antriebsschaltschrank. Die Auswirkungen der Energieeffizienz können bedingt durch die meist geringen Betriebsstunden der Strahlventilatoren schwach gewichtet werden. Die Gewichtung wird daher mit 1 vorgeschlagen, kann aber projektspezifisch angepasst werden. Die Energieeffizienz im Ereignisbetrieb wird nicht bewertet, da dieser nur selten vorkommt.

Generelle Beurteilung: Hinsichtlich Energieeffizienz bei 100% Drehzahl schneidet die FU-Lösungen am schlechtesten ab und werden mit 1 Punkt bewertet. Alle anderen Systeme, welche bei 100% Drehzahl ohne zusätzliche Verluste direkt am Netz betrieben werden, erhalten 6 Punkte.

«Energieversorgung – Cos phi Gesamtsystem» *Gewichtung Einflussgrösse:* Die Auswirkungen des cos phi können bedingt durch die meist geringen Betriebsstunden der Strahlventilatoren vernachlässigt werden. Die Gewichtung wird daher mit 0 vorgeschlagen, kann aber projektspezifisch angepasst werden. *Generelle Beurteilung:* Die Netzrückwirkungen von Verbrauchern mit einem cos phi unter 1 sind ungünstig, da dem Energieversorger der erzeugte Blindstrom vergütet werden muss. Alle FU-Lösungen mit cos phi = 1 werden gut bewertet (6 Punkte). Am anderen Ende der Skala stehen DOL, Stern-Dreieck und Dahlander-Schaltung.

«Lüftung – Regelgüte» *Gewichtung Einflussgrösse:* Bei allen Tunneln, bei welchen die Längsströmung im Fahrraum im Ereignisbetrieb zu regeln ist, schlagen wir eine Gewichtung von 10 vor. *Generelle Beurteilung:* Obwohl alle bewerteten Lösungen die aerodynamischen Anforderungen erfüllen, ist doch festzuhalten, dass bei allen Tunneln mit einer Regelung der Strömungsgeschwindigkeit FU Lösungen besser zu bewerten sind, da die Qualität der Regelung hinsichtlich Geschwindigkeit und Stabilität die anderen Systeme übertrifft. FU-Lösungen wurden mit 6 Punkten, die anderen Lösungen mit 1 bis 2 Drehzahlen werden mit 1 Punkt bewertet.

«Lüftung – Regelzeit – Einregelzeit (--> verzögerter Anlauf)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Bei allen Tunneln, bei welchen die Längsströmung im Fahrraum im Ereignisbetrieb zu regeln ist, schlagen wir eine Gewichtung von 6 vor. *Generelle Beurteilung:* Bei allen Antriebssystemen mit einem hohen Anlaufstrom (gegenüber dem Nennstrom) werden die Strahlventilatoren meist gestaffelt in Betrieb genommen, um die Stromspitze zu brechen und den Spannungseinbruch zu reduzieren. Durch diese Staffelung von ca. 5 s zwischen dem Start einzelner Strahlventilatoren kommt wird der geforderte Schub erst zeitlich verzögert zu Verfügung gestellt. Das heisst der Regler der Lüftungssteuerung stellt eine Abweichung zum Sollwert fest und fordert Schub an, welcher verzögert zur Verfügung gestellt werden kann. Das heisst bis zum Zeitpunkt, wenn der letzte Strahlventilator in Betrieb ist, hat sich die Abweichung vom Sollwert unter Umständen nochmals vergrössert. Durch diesen Zeitversatz kann es sein, dass der Regler ins Schwingen kommt und die Sollgeschwindigkeit erst nach mehrfachem Überschwingen erreicht wird. FU-Lösungen wurden mit 6 Punkten, die anderen Lösungen mit hohem Anlaufstrom werden mit 2 bis 3 Punkt bewertet.

«Kommunikation / Leittechnik – Schnittstelle Steuerung – Antriebssystem (Schaltgerätekombination)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Schnittstellen bei der Ablösung von Anlagen eine wichtige Rolle spielen, wird eine Gewichtung von 3 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Nach Erreichen der Nutzungsdauer einzelner Komponenten, können, bedingt durch einen Technologiewandel, Anpassungen an den Schnittstellen zur Steuerung erforderlich sein. Je komplexer das Antriebssystem, desto grösser die Wahrscheinlichkeit, dass eine Anpassung der Schnittstelle nötig ist.

«Kabelanlage – Kabelanlage» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Kabelanlagen kostenrelevant sind und die Anzahl der Leiter beim Platzbedarf in den Rohranlagen eine Rolle spielen, wird eine Gewichtung von 3 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Die Anzahl erforderlicher Leiter und Anforderungen an die Schirmung von Kabeln werden berücksichtigt. Die Dahlander-Lösung und die Stern-Dreieck-Lösungen mit 6 Leitern wird mit 1 Punkt bewertet. FU Lösungen mit geschirmten Kabeln mit 4 Punkten. Die höchste Punktzahl von 6 Punkten erhält DOL und die Softstarter-Lösung.

«**Nebeneinrichtungen – Abwärme (Bedarf an Kühlung)**» *Gewichtung Einflussgrösse:* Eine Gewichtung von 2 wird vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Während bei DOL, Stern-Dreieck und Dahlander mit den eingesetzten Relaisschaltungen keine nennenswerte Abwärme anfällt und die Abwärme bei Softstartern nur während der Hochlaufzeit von 15 bis 45 s anfällt, ist bei Lösungen mit FU von beim Betrieb des Strahlventilators mit einer dauerhaft anfallenden Abwärme von 3 bis 5 % der bezogenen Leistung zu rechnen. Die Abfuhr dieser Abwärme erfolgt mittels Aussenluft, vorgekühlter Luft oder Wasser mittels der Nebeneinrichtungen. Die Systeme werden mit 3 Punkten (FU) bis 6 Punkten (DOL) bewertet.

«**Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)**» *Gewichtung Einflussgrösse:* Für die Gewichtung wird eine 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Die Antriebe unterscheiden sich in ihrer Komplexität was sich sowohl bei der Inbetriebnahme als auch bei etwaigen Fehlerbehebungen bemerkbar machen kann. Die Punkte wurden ausgehend von FU-Lösungen mit einer hohen Komplexität mit 1 Punkt bis zu DOL, bestehend aus 2 Schützen, mit 6 Punkten, bewertet.

Die Gewichtung der aufgeführten Einflussgrössen auf das Gesamtsystem werden mit der generellen Beurteilung der jeweiligen Antriebstechnologie multipliziert. Es ergibt sich eine gewichtete Beurteilung. Die Summe aller gewichteten Beurteilung führt zu absoluten Gesamtbewertung, exkl. Kosten / Anzahl. Werden diese Ergebnisse untereinander verglichen, erhält man eine relative Gesamtbewertung in Prozent.

Ergebnis Auswahlprozess		DOL		
	Anforderungen Regelung erfüllt (Ja / Nein)		Ja	
	Anforderungen Netzverträglichkeit erfüllt (Ja / Nein)		Ja	
Technische Bewertung		Beurteilung		
Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung	generell	gewichtet
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2	6	12
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1	6	6
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1	1	1
	Energieeffizienz Gesamtsystem	1	6	6
	Cos phi Gesamtsystem	0	1	0
Lüftung	Regelgüte	10	1	10
	Regelzeit - Einregelzeit (--> verzögerter Anlauf)	6	3	18
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3	6	18
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	5	6	30
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2	6	12
Weiteres	Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1	6	6
		Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl		119
		Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]		120
		Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl		133%

Abb. 90 Ausschnitt aus der Bewertungstabelle mit Einflussgrössen, Gewichtung und gewichteter Punktzahl für das Antriebssystem DOL. Im Beispiel erhält DOL 119 Punkte resp. 140% in der relativen Bewertung

In einem weiteren Schritt erfolgt die Bewertung der Kosten. Für diesen Teil der Bewertungstabelle sind typische Kosten hinterlegt. Die Kosten einer Variante resp. eines Antriebssystems werden aus den eingegebenen projektspezifischen Angaben und den hinterlegten Kosten ermittelt.

Kosten		
Investitionskosten Ventilator	Strahlventilator Herstellung, FAT SV, Montage, IBS, Dokumentation pro kW	
	Kosten pro Strahlventilator (Nennleistung Motor x CHF/kW)	
	Investitionskosten alle Strahlventilatoren (Nennleistung Motor x CHF/kW)	
Wartungskosten Ventilator	Durchschn. Wartungskosten pro Strahlventilator und pro Jahr	
	Wartungskosten Strahlventilatoren komplett = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten/AV)	
Investitionskosten Schaltgeräte-kombination	Durchschnittliche Kosten / kW Motornennleistung	
	Komplettes Anlasssystem inkl. Anteil an Schaltschrank, FAT Schaltschrank, Montage, IBS, Dokumentation pro Strahlventilator	
	Kosten Schaltgerätekombination komplett für alle Strahlventilatoren	
Wartungskosten Schaltgeräte-kombination	Durchschn. Wartungskosten pro Antriebssystem und pro Jahr	
	Wartungskosten Schaltgerätekombination über die Nutzungsdauer von 20 Jahren = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten)	
	Kosten vorzeitiger Ersatz Wartungskosten Schaltgerätekombination komplett	
Investitionskosten Kabelanlage	Strom [A], 100% Drehzahl	
	Minimaler Kabelquerschnitt [mm ²], 100% Drehzahl	
	Kabel Normquerschnitt [mm ²]	
	Anzahl Kabel mit 3 x Normquerschnitt	
	Kosten [CHF] / [m], Kabel ungeschirmt inkl. Installation	
	Kosten [CHF] / [m], Kabel geschirmt inkl. Installation	
	Investitionskosten Kabel	
Wartungskosten Kabelanlage	Wartungskosten Kabelanlagen über die Nutzungsdauer von 20 Jahren	
	Investitionskosten Total	
	Wartungskosten für 20 Jahre Total	
	Gesamtkosten	
	Gesamtkosten relativ gerundet auf [CHF]	50'000.00
	Gesamtkosten relativ	

Abb. 91 Ausschnitt aus der Bewertungstabelle zu den Kosten

Im Folgenden sind einige Erläuterungen zu den Kosten zusammengestellt:

«**Investitionskosten Strahlventilatoren**»: Diese Kosten wurde mit der Nennleistung eines Strahlventilators multipliziert. Zur Bestimmung der projektspezifischen Kosten für alle Strahlventilatoren werden die Kosten entsprechend der Anzahl Strahlventilatoren hochgerechnet.

«**Wartungskosten Strahlventilatoren**»: Die Baugrösser der Strahlventilatoren für die Wartungskosten ist nicht relevant. Relevant sind hingegen die Anzahl Strahlventilatoren und der Betrachtungszeitraum. Der Betrachtungszeitraum entspricht der «Nutzungsdauer».

«**Investitionskosten Schaltgerätekombination**»: Die relativen Kosten pro kW Motornennleistung werden mit der Motornennleistung und der Anzahl Strahlventilatoren multipliziert, um die Gesamtkosten zu erhalten.

«**Wartungskosten Schaltgerätekombination**»: Die Wartungskosten der SGK wird aus den durchschnittlichen Jahreskosten und einer Pauschale, multipliziert mit der Nutzungsdauer berechnet. Bei den FU wird zudem der Ersatz der FU mit 2/3 der Kosten bei der Erstinstallation eingerechnet, da von einem Ersatz des FU vor dem Erreichen der Nutzungsdauer der anderen Komponenten ausgegangen wird.

«**Investitionskosten Kabel**»: Zuerst werden mit dem Nennstrom und der Kabellänge der minimale Kabelquerschnitt errechnet. Dieser wird auf die nächstgrösseren Standard-Nenn-durchmesser aufgerundet. Mit der Anzahl Kabel, dem Kabeldurchmesser und den typischen Kosten pro mm² Kupferkabel werden die Investitionskosten der Kabel ermittelt.

«**Wartungskosten Kabel**»: Für die Kabelanlagen wurden keine Wartungskosten ermittelt, da davon ausgegangen werden kann, dass die Kabelanlagen keiner periodischen Wartung

bedürfen und die Nutzungsdauer der Kabel der anderen Komponenten bei weitem übersteigt.

Investitionskosten Total		242'978.99
Wartungskosten für 20 Jahre Total		95'000.00
Gesamtkosten		337'978.99
Gesamtkosten relativ gerundet auf [CHF]	50'000.00	350'000.00
Gesamtkosten relativ		100%

		DOL
Gesamtbewertung Einflussgrössen und Kosten	relativ	1.33
Rang		1

Abb. 92 Ausschnitt aus der Bewertungstabelle zur Bewertung der Kosten und der Gesamtbewertung Einflussgrössen und Kosten

Abb. 92 zeigt einen Ausschnitt aus der Bewertungstabelle. Hier werden die Investitions- und die Wartungskosten zu Gesamtkosten zusammengefasst. Diese Gesamtkosten pro Kombination werden relativ verglichen.

In einem weiteren Schritt wird die Bewertung der Einflussgrössen und der Kosten zu einer Gesamtbewertung kombiniert.

Beispiel Tunnel Musterloch: Für den Tunnel Musterloch wurde die Bewertung für die 3 Varianten durchgeführt. Auf Grund der Analysen zur «Bestimmung der aerodynamisch möglichen Lösungen» und der «Untersuchung der Netzverträglichkeit» wurden bereits einige der Varianten ausgeschlossen. In Tab. 28 sind die Resultate der Bewertung zusammengefasst. Als Bestvarianten wurde die Lösung mit den 5 Strahlventilatoren der grössten Baugrösse (Variante 3, SV 1120 mm, 1250 N, 37 kW) mit einem 12-Puls FU oder einem AFE FU ermittelt.

Tab. 28 Bewertung der verbleibende Varianten der Strahlventilatoren nach der «Bestimmung der aerodynamisch möglichen Lösungen» und der «Untersuchung der Netzverträglichkeit»

Variante	Antriebs-system	Gesamt-bewertung Einfluss-grössen relativ ohne Kosten [%]	Gesamt-bewertung Kosten relativ [%]	Gesamt bewertung Einfluss-grössen und Kosten [Punkte]	Rang [-]
Variante 1 SV 630 mm 550 N 22 kW 12 Stück	DOL	133	122	1.09	6
	Stern/Dreieck	100	122	0.82	10
	Dahlander	100	167	0.60	11
	Softstarter	122	133	0.92	9
	FU 6-Puls	Für den 6-Puls FU sind detailliertere Abklärungen erforderlich *			
	FU 12-Puls	167	156	1.07	7
	FU AFE	167	167	1.00	8
Variante 2 SV 800 mm 850 N 30 kW 8 Stück	DOL	133	100	1.33	3
	Stern/Dreieck	100	100	1.00	8
	Dahlander	100	100	1.00	8
	Softstarter	122	111	1.10	5
	FU 6-Puls	Für den 6-Puls FU sind detailliertere Abklärungen erforderlich *			
	FU 12-Puls	167	133	1.25	4
	FU AFE	167	133	1.25	4
Variante 3 SV 1120 mm 1250 N 37 kW 5 Stück	DOL				
	Stern/Dreieck	FU erforderlich für die Regelung			
	Dahlander				
	Softstarter				
	FU 6-Puls	Nicht zulässig wegen Netzverträglichkeit			
	FU 12-Puls	167	100	1.67	1
FU AFE	167	111	1.50	2	

* Detailliertere Abklärungen heisst:

1. Berechnung der Grenzwerte nach DACHCZ
2. Gegenüberstellung der Oberschwingungsspektren (Messwerte gegenüber Grenzwerten)
3. Zusatzmassnahmen festlegen (Drossel oder Filter), allenfalls Technologiewechsel auf 12-Puls oder AFE

7.3.5 Fazit Längslüftung

Sobald eine Regelung der Längsströmung gefordert ist, wie dies bei Tunneln mit Gegenverkehr oder grosser Stauhäufigkeit der Fall ist, ist der Einsatz von FU in vielen Fällen lohnend. Bei der Verwendung von Frequenzumrichter kann das Regelziele sicher erreicht werden und ein schnelles System für die Regelung steht zur Verfügung (keine Anlaufstafelung wegen hoher Anlaufströme). Auch die thermische Belastung der Motoren reduziert sich, da die Schaltreihenfolge und -häufigkeit der Strahlventilatoren nicht seitens Antriebstechnologie vorgegeben wird.

Auch Lösungen z.B. mit Direktanlauf (DOL) können interessant sein, sofern die Wirkung eines Strahlventilators auf die Längsströmung eine Regelung zulässt. Die Lösungen sind technisch robust und die Installationen sind einfacher (ungeschirmte Kabel) und weisen eine längere Nutzungsdauer auf (keine elektronischen Bauteile).

Ergebnis Auswahlprozess		DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	Frequenzumrichter		
						6-Puls	12-Puls	AFE
Anforderungen Regelung erfüllt (Ja / Nein)		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anforderungen Netzverträglichkeit erfüllt (Ja / Nein)		Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja

Technische Bewertung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		
Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung	generell	gewichtet	generell	gewichtet								
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2	6	12	5	10	4	8	5	10			1	2
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1	6	6	6	6	6	6	3	3			4	4
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1	1	1	3	3	1	1	3	3			6	6
	Energieeffizienz Gesamtsystem	1	6	6	6	6	6	6	6	6			1	1
	Cos phi Gesamtsystem	0	1	0	1	0	1	0	1	0			6	0
Lüftung	Regelgüte	10	1	10	1	10	1	10	1	10			6	60
	Regelzeit - Einregelzeit (-> verzögerter Anlauf)	6	3	18	2	12	3	18	3	18			6	36
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	3	6	18	6	18	5	15	6	18			4	12
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	5	6	30	1	5	1	5	6	30			4	20
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	2	6	12	6	12	6	12	5	10			3	6
Weiteres	Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1	6	6	5	5	4	4	3	3			1	1
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl				119		87		85		111			148	149
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]		10		120		90		90		110			150	150
Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl				133%		100%		100%		122%			167%	167%

Kosten		DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	Frequenzumrichter			
						6-Puls	12-Puls	AFE	
Investitionskosten Ventilator	Strahlventilator Herstellung, FAT SV, Montage, IBS, Dokumentation pro kW		932.10	932.10	932.10	932.10	-	932.10	932.10
	Kosten pro Strahlventilator (Nennleistung Motor x CHF/kW)		20'506.24	20'506.24	20'506.24	20'506.24	-	20'506.24	20'506.24
	Investitionskosten alle Strahlventilatoren (Nennleistung Motor x CHF/kW)		246'074.93	246'074.93	451'137.37	246'074.93	-	246'074.93	246'074.93
Wartungskosten Ventilator	Durchschn. Wartungskosten pro Strahlventilator und pro Jahr		650.00	650.00	650.00	650.00	-	650.00	650.00
	Wartungskosten Strahlventilatoren komplett = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten/AV)		176'000.00	176'000.00	176'000.00	176'000.00	-	176'000.00	176'000.00
Investitionskosten Schaltgerätekombination	Durchschnittliche Kosten / kW Motornennleistung		220.00	225.50	231.00	242.00	-	525.00	553.00
	Komplettes Anlasssystem inkl. Anteil an Schaltschrank, FAT Schaltschrank, Montage, IBS, Dokumentation pro Strahlventilator		4'840.00	4'961.00	5'082.00	5'324.00	-	11'550.00	12'166.00
	Kosten Schaltgerätekombination komplett für alle Strahlventilatoren		58'080.00	59'532.00	60'984.00	63'888.00	-	138'600.00	145'992.00
Wartungskosten Schaltgerätekombination	Durchschn. Wartungskosten pro Antriebssystem und pro Jahr		20.00	20.00	20.00	50.00	-	50.00	50.00
	Wartungskosten Schaltgerätekombination über die Nutzungsdauer von 20 Jahren = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten)		12'800.00	12'800.00	12'800.00	20'000.00	-	20'000.00	20'000.00
	Wartungskosten Schaltgerätekombination komplett		12'800.00	12'800.00	12'800.00	62'592.00	-	112'400.00	117'328.00
Investitionskosten Kabelanlage	Strom [A], 100% Drehzahl		40	40	40	40	-	40	40
	Minimaler Kabelquerschnitt [mm2], 100% Drehzahl		16	16	16	16	-	16	16
	Kabel Normquerschnitt [mm2]		25	25	25	25	-	25	25
	Anzahl Kabel mit 3 x Normquerschnitt		1	2	2	1	-	1	1
	Kosten [CHF] / [m], Kabel ungeschirmt inkl. Installation		15	30	30	---	---	---	---
	Kosten [CHF] / [m], Kabel geschirmt inkl. Installation		---	---	---	20	-	20	20
	Investitionskosten Kabel		33'035	66'070	66'070	43'566	-	43'566	43'566
Wartungskosten Kabelanlage	Wartungskosten Kabelanlagen über die Nutzungsdauer von 20 Jahren		-	-	-	-	-	-	-
Investitionskosten Total			337'189.91	371'676.89	578'191.33	353'528.43	-	428'240.43	435'632.43
Wartungskosten für 20 Jahre Total			188'800.00	188'800.00	188'800.00	238'592.00	-	288'400.00	293'328.00
Gesamtkosten			525'989.91	560'476.89	766'991.33	592'120.43	-	716'640.43	728'960.43
Gesamtkosten relativ gerundet auf [CHF]		50'000.00	550'000.00	550'000.00	750'000.00	600'000.00	-	700'000.00	750'000.00
Gesamtkosten relativ			122%	122%	167%	133%	0%	156%	167%

		DOL	Stern-Dreieck	Dahlander	Softstarter	Frequenzumrichter			
						6-Puls	12-Puls	AFE	
Gesamtbewertung Einflussgrössen und Kosten		relativ	1.09	0.82	0.60	0.92	-	1.07	1.00
Rang			6	10	11	9	-	7	8

Abb. 93 Übersicht über die Bewertung der Längslüftung, Tunnel Musterloch, Variante 1

7.4 SiSto-Lüftung

Im folgenden Kapitel ist das Vorgehen zur Evaluation der technisch und finanziell besten projektspezifischen Lösung für SiSto-Ventilatoren dargestellt. Der Prozess wird in den folgenden Teilschritten durchlaufen:

- Auslegung Längslüftung und Auswahl Strahlventilator-Typ
- Bestimmung der aerodynamisch möglichen Antriebssysteme
- Untersuchung der Netzverträglichkeit
- Bewertung der technisch möglichen Lösungen

Abb. 94 zeigt die Evaluationsschritte zur projektspezifischen Lösung im Überblick.

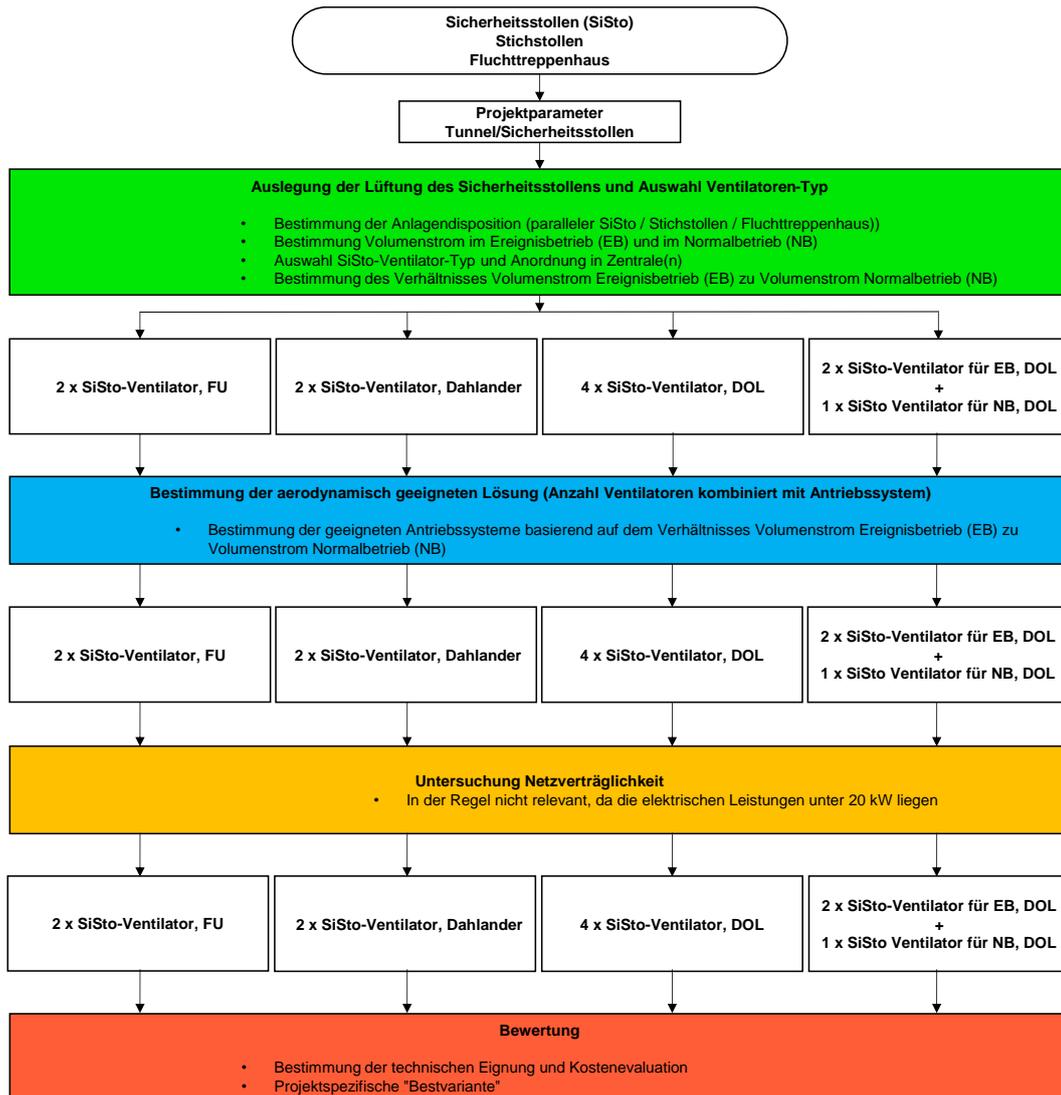


Abb. 94 Gesamtübersicht Auswahlprozess SiSto-Lüftung

7.4.1 Auslegung der Lüftung des Sicherheitsstollens und Auswahl Ventilatoren-Typ

Die Lüftung der Sicherheitsstollen wird anhand der geltenden Normen ausgelegt. In der Schweiz kommt die ASTRA 13 002 [2] zur Anwendung, siehe Kapitel 0.

Der geforderte Volumenstrom, welcher durch die maximal zu berücksichtigende Anzahl gleichzeitig offener Fluchttüren bestimmt wird, gibt den erforderlichen Betriebspunkt für den Ereignisbetrieb vor. Der Volumenstrom muss bei insgesamt 2 projektierten Ventilatoren im Falle eines Ausfalls auch durch nur einen Ventilator sichergestellt werden können. Das

System ist mit einer 100% Redundanz projektiert. Wenn eine Lösung mit 4 Ventilatoren gewählt wird, so müssen 3 Ventilatoren 100% des Volumenstroms im Ereignisbetrieb zur Verfügung stellen können. Bei der Ausarbeitung der technischen Lösungen sollen die folgenden Punkte beachtet werden:

- Anordnung der Ventilatoren in den Lüftungsstationen unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit für die Wartung und für einen Austausch von mindestens einen Aktivteil.
- Einblasen der Aussenluft/Zuluft in den Sicherheitsstollen mit geringen Geschwindigkeiten oder Positionierung der Einblasstelle abgesetzt vom Fluchtweg z.B. im Deckenbereich.
- Berücksichtigung von saug- und druckseitigen Schalldämpfern, um die Schallemissionen aussen im Normalbetrieb gemäss den Vorgaben der Lärmschutzverordnung einhalten zu können. Im Ereignisbetrieb sollen die Schallemissionen im SiSto reduziert sein. Als Erfahrungswert hat sich hier 85 dB(A) bewährt.

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Bestimmung des Betriebspunktes des Normalbetriebs ist es generell wünschenswert, die Charakteristiken des Ventilators im Rahmen der Inbetriebsetzung optimieren zu können. Für Ventilatoren, die typischerweise für die Belüftung der Sicherheitsstollen eingesetzt werden, heisst dies entweder im Stillstand verstellbare Schaufeln (Stand der Technik) und/oder Frequenzumrichter zur Optimierung der Drehzahl und damit des Volumenstroms. Der Aufwand bei der Anpassung der Schaufelwinkel des SiSto-Ventilators ist im Vergleich zur Anpassung der Drehzahl am Frequenzumrichter um einiges höher.

Beispiel Tunnel Musterloch III: Der Tunnel Musterloch III weist einen parallelen Sicherheitsstollen mit 6 Fluchttüren auf. Da der Tunnel über ein Abluftsystem verfügt, muss die SiSto-Lüftung so ausgelegt werden, dass die Mindestströmungsgeschwindigkeit von 1.0 m/s je Fluchttür bei 3 offenen Fluchttüren erreicht wird.

Die Auslegung ergibt die folgenden Luftmengen und -drücke bei einer Auslegung nach ASTRA 13 002:

Tab. 29 Erforderliche Luftmengen der SiSto-Lüftung bei einer Auslegung nach ASTRA 13 002 für einen parallelen SiSto mit 6 Fluchttüren. Fahrraumlüftung mit Absaugung

Betrieb	Luftmenge [m ³ /s]	Totaldruck [Pa]
Normalbetrieb	2.8	400
Ereignisbetrieb	11.8	81

7.4.2 Bestimmung der aerodynamisch geeigneten Lösung

Bei der Wahl des geeigneten Antriebssystems für die SiSto-Lüftung ist das Verhältnis des geforderten Volumenstroms im Normalbetrieb zum Volumenstrom im Ereignisbetrieb entscheidend. Durch das gewählte System müssen die geforderten Betriebspunkte abgedeckt werden können, wobei der Betriebspunkt im Normalbetrieb mit minimalem Energieverbrauch erreicht werden soll. Die nach ASTRA 13 002 geforderte permanente Überdrückhaltung resultiert in Jahresbetriebsstunden von annähernd 8760 h/a (abzüglich Testbetrieb).

Abb. 95 zeigt die Auswahl des geeigneten Systems, wenn das Verhältnis der Volumenströme im Normal- resp. Ereignisbetrieb als Massstab angesetzt wird. Der Fokus liegt auf der Optimierung des Energiebedarfs. Aus der Bewertung gemäss Kapitel 7.4.4 können abweichende Bestvarianten erfolgen, da die Investitionskosten mitberücksichtigt sind. Zum Beispiel kann eine aerodynamisch besser geeignete Lösung mit einem zusätzlichen Ventilator für den Normalbetrieb in der Kostenbetrachtung schlechter abschneiden als eine Lösung mit ineffizientem Normalbetrieb, da die Energiekosten der ineffizienten Lösung weniger ins Gewicht fallen als die Investitionskosten der aufwendigeren Lösung.

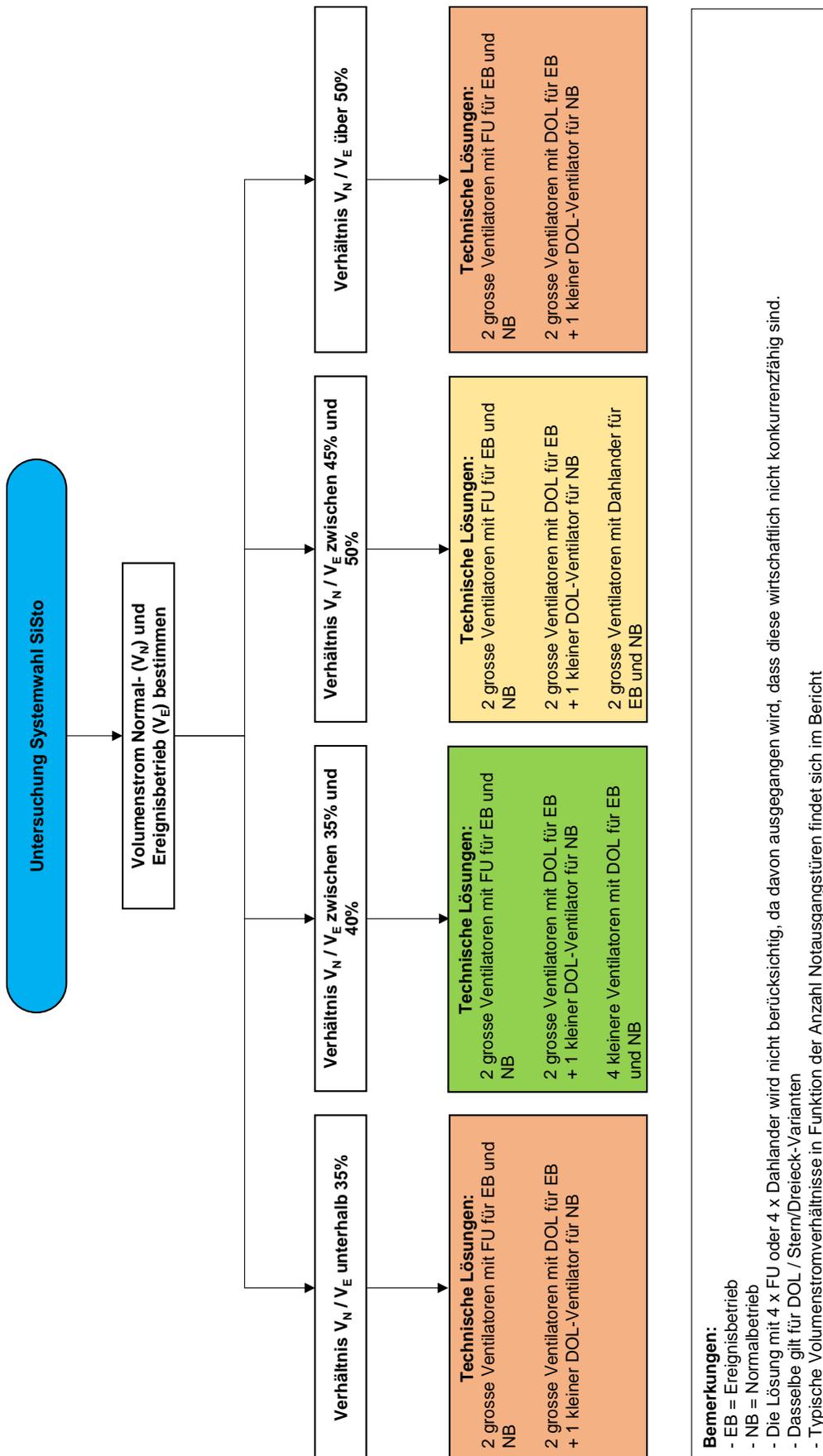


Abb. 95 Bestimmen der aerodynamisch geeigneten Lösungen anhand des Verhältnisses Volumenstrom Normalbetrieb zu Volumenstrom Ereignisbetrieb

Die einzelnen Schritte aus Abb. 95 sind im Folgenden erklärt:

«**Volumenstrom Normal- (V_N) und Ereignisbetrieb (V_E) bestimmen**»: Die Bestimmung der Volumenströme berücksichtigt die maximale Anzahl der gleichzeitig offenen Fluchttüren im Ereignisbetrieb und den durch die Fahrraumlüftung vorherrschenden Druck im Fahrraum. Im Normalbetrieb ist die Leckage durch die geschlossenen Türen ausschlaggebend und in der Regel abschätzbar. Eine unbekannte Grösse sind die Bauwerksleckagen, welche durch die eigentlichen Leckagen am Baukörper aber auch durch unverschlossene Kabelrohre oder Entwässerungsleitungen resultieren.

«**Verhältnis V_N / V_E unterhalb resp. zwischen xx% und yy%**»: Das Verhältnis V_N / V_E ist bei nur einer Fluchttür am kleinsten und liegt bis zu einer Anzahl von ca. 11 Fluchttüren bei unter 35%. Die Mehrheit der realisierten SiSto wird daher in diesem Bereich liegen. Werte von über 50% resultieren ab ca. 20 Fluchttüren.

«**Technische Lösungen: 2 grosse Ventilatoren mit FU für EB und NB**»: Bei dieser technischen Lösung werden 2 grössere Ventilatoren eingesetzt, welche nach ASTRA 13 002 in zwei unterschiedlichen Lüftungsstationen angeordnet sein sollen. Durch den FU-Betrieb lässt sich pro Ventilator ein Drehzahlbereich von 30 – 100% einstellen, wobei auch bei kleineren Drehzahlen eine ausreichende Motorkühlung vorhanden ist. Die Anlagenkennlinie ist im Normalbetrieb wegen der geringen Leckage steiler als im Ereignisbetrieb, da die Fluchttüren oder die Überdruckklappen offen sind. Bei 30% Drehzahl im Normalbetrieb resultiert ein Volumenstrom kleiner als 30% bezogen auf den Auslegungs-Volumenstroms bei offenen Fluchttüren. Durch den Einsatz von 2 grossen Ventilatoren mit FU lässt sich für jede Anzahl Fluchttüren der optimale Volumenstrom für den Normalbetrieb einstellen. Als Nachteil sind hier die elektronischen Komponenten eines FU und dadurch eine beschränkte Nutzungsdauer zu erwähnen. Die Nutzungsdauer des FU ist dabei kürzer im Vergleich zu den anderen Komponenten. Die Abwärme der FU bei den geringen Leistungen kann in der Regel ohne weitere Massnahmen an den Raum abgegeben werden.

«**2 grosse Ventilatoren mit DOL für EB + 1 kleiner DOL-Ventilator für NB**»: Bei dieser Lösung werden die Ventilatoren direkt gestartet. Um den Volumenstrom und damit den Energieverbrauch im Normalbetrieb zu senken, wird ein zusätzlicher Ventilator für den Normalbetrieb eingesetzt. Der zusätzliche Ventilator führt zu einer Erhöhung des Platzbedarfes. Ein Vorteil ist der Verzicht von komplexen elektronischen Komponenten, welche eine kurze Nutzungsdauer aufweisen. Nachteilig wirkt sich aus, dass das Nachstellen des Betriebspunkts mit dem Ventilator für den Normalbetrieb nur durch eine Schaufelverstellung möglich ist. Die Nachstellungen sind nur in einem gewissen Bereich zulässig, abhängig von der Motorleistung.

«**4 kleinere Ventilatoren mit DOL für EB und NB**»: Bei dieser Lösung wird im Normalbetrieb ein Ventilator allein betrieben und im Ereignisbetrieb alle 4 Ventilatoren im Parallelbetrieb. In der Richtlinie ASTRA 13002 wird diese Lösung genannt, kommt in der Praxis aber sehr selten auf Grund des hohen Platzbedarfes vor.

«**2 grosse Ventilatoren mit Dahlander für EB und NB**»: Diese Lösung ist für Systeme mit einem Volumenstromverhältnis V_N / V_E von 45 – 50% ideal. Mit 2 Ventilatoren und ohne den Einsatz von FU kann ein guter Wirkungsgrad erzielt werden. Die optimale Anwendung ergibt sich für SiSto mit ca. 18 bis 22 Türen, was bei 300 m Abständen zwischen den Fluchtwegen eine Tunnellänge von ca. 6'000 m voraussetzt.

Beispiel Tunnel Musterloch III: Beim Tunnel Musterloch III liegt das Verhältnis zwischen dem Volumenstrom im Normalbetrieb zum Volumenstrom im Ereignisbetrieb bei 24%.

Gemäss Flowchart in Abb. 95 sind die folgenden beiden Lösungen aus aerodynamisch geeignet:

- 2 grosse Ventilatoren mit FU für EB und NB
- 2 grosse Ventilatoren mit DOL für EB + 1 kleiner DOL-Ventilator für NB

7.4.3 Untersuchung der Netzverträglichkeit

Die aerodynamisch möglichen Lösungen müssen in einem zweiten Schritt betreffend ihrer Netzverträglichkeit untersucht werden. Dabei erfolgt für die FU-Lösungen eine Beurteilung der Oberschwingungen und für die Lösungen mit DOL, Stern-Dreieck-Anlauf, Dahlander-schaltung und Softstarter eine Beurteilung des Spannungsabfalls.

Da es sich bei den SiSto um einzelne, kleine Verbraucher mit Leistungen in der Regel unter 22 kW handelt, ist eine Detailabklärung in der Regel nicht erforderlich. Falls diese vorgenommen werden soll, so ist gemäss Kapitel 7.3.3 vorzugehen.

Die Abschätzung einer typischen Konstellation am mittelspannungsseitigen Verknüpfungspunkt ist im Folgenden dargestellt:

- Trafo 400 kVA mit Kurzschlussspannung $u_k = 4\%$
- Leistung Motor SiSto-Ventilator 22 kW (eher grosse Leistung für einen SiSto-Ventilator) mit Nennstrom 43 A
- $S_{kV} = \frac{\text{Trafoleistung } S_{r\text{Trafo}}}{\text{Kurzschlussspannung } u_k} = \frac{400 \text{ kVA}}{0.04} = 10 \text{ MVA}$
- $S_A = 400 \text{ kVA} = \text{Trafoleistung}$
- $S_{OS} = 43 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} \cdot \sqrt{3} = 29 \text{ kVA}$
- $\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{10000 \text{ kVA}}{400 \text{ kVA}} = 25$
- $\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{29 \text{ kVA}}{400 \text{ kVA}} = 0.07$

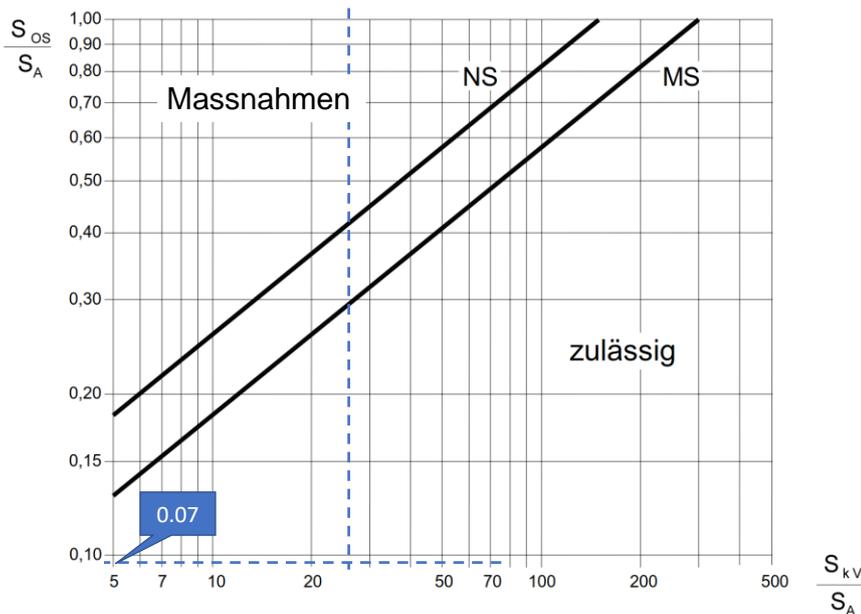


Abb. 96 Abschätzung der Netzverträglichkeit beim Einsatz eines 6-Puls FU für eine SiSto-Ventilator mit 20 kW. Die restliche Trafoleistung wird von Verbrauchern, die keine Oberwellen erzeugen, gebraucht. Der Einsatz eines 6-Puls FU ist ohne zusätzliche Massnahmen zulässig.

Beispiel Tunnel Musterloch III:

Da im Tunnel Musterloch III nur Ventilatoren mit einer Motornennleistung bis 5 kW zum Einsatz kommen, kann auf Detailabklärungen verzichtet werden.

7.4.4 Bewertung der Lösungen

Die technische Bewertung und die Bewertung der Kosten kann mit der im folgenden beschriebenen Bewertungstabelle erfolgen. Dabei werden Daten für alle untersuchten Varianten in die Bewertungstabelle eingegeben. Die Varianten umfassen die 4 gezeigten technischen Lösungen gemäss Kapitel 7.4.2.

Grundsätzlich könnten aus aerodynamischer Sicht alle 4 Varianten in allen Anlagen umgesetzt werden, sofern die Energieeffizienz keine Rolle spielt und es die Platzverhältnisse zulassen.

In den Eingabefeldern (siehe Abb. 97) werden die folgenden Daten eingegeben.

Anzahl Fluchttüren (1 = Stichstollen)		7
Fläche pro Fluchttür		2.63 m ² (nach ASTRA 13 011: 1.25m x 2.10m)
Zuschlag Luftmenge EB pro Tür		30 %
Leckage je Tür		0.4 m ³ /s
Luftmenge EB pro offener Tür		3.4 m ³ /s
Fahrraumlüftung mit Absaugung		Ja
Anzahl Fluchttüren offen bei Ereignis nach ASTRA 13002		3
Anzahl Fluchttüren geschlossen nach ASTRA 13002		4
Luftmenge NB	V _N	3.2 m ³ /s
Luftmenge EB	V _E	12.2 m ³ /s
Verhältnis V _N / V _E		26%
Totaldruck EB bei offenen Türen		376 Pa
Energiepreis		0.15 CHF/kWh
Wirkungsgrad Ventilator im EB		75 %
Wirkungsgrad Elektromotor im EB		90 %
Nutzungsdauer		20 a

Abb. 97 Eingabefelder für die technischen Daten

«**Anzahl Fluchttüren (1 = Stichstollen)**»: Gibt die gesamte Anzahl der Fluchttüren zum Fahrraum an.

«**Fläche pro Fluchttür**»: Fläche einer offenen Fluchttür. Diese beträgt für eine Fluchttür mit den Normabmessungen 2.63 m².

«**Zuschlag Luftmenge EB pro Tür**»: Der Zuschlag berücksichtigt Unsicherheiten bei der effektiven Leckage, beim Gegendruck im Fahrraum und stellt somit eine gewisse Auslegungsreserve sicher.

«**Leckage je Tür**»: Im Normalbetrieb muss die Leckage gemäss ASTRA 13 002 pro Notausgangstür 0.2 bis 0.4 m³/s betragen.

«**Anzahl Fluchttüren offen bei Ereignis nach ASTRA 13002**»: Bei Tunneln mit Absaugung wird nach ASTRA 13 002 von 3 gleichzeitig offenen Fluchttüren im Ereignisfall ausgegangen. Bei Längslüftungstunneln sind dies 5 gleichzeitig offenen Fluchttüren.

«**Anzahl Fluchttüren geschlossen nach ASTRA 13002**»: Die Differenz der gesamten Anzahl Fluchttüren zu den gleichzeitig offenen Fluchttüren sind die geschlossenen Fluchttüren.

«**Luftmenge NB, V_N**»: Volumenstrom im Normalbetrieb bei geschlossenen Türen errechnet aus der Anzahl Fluchttüren und der Leckage/Fluchttür.

«**Luftmenge EB, V_E**»: Volumenstrom im Ereignisbetrieb errechnet aus der Anzahl offenen und geschlossenen Fluchttüren.

«**Verhältnis V_N / V_E**»: Verhältnis der Volumenstrom im Normalbetrieb zu der Luftmenge im Ereignisbetrieb.

«**Totaldruck EB bei offenen Türen**»: Errechneter Totaldruck im Ereignisbetrieb bei der Anzahl geforderter geöffneter Fluchttüren.

«**Energiepreis**»: Strompreis in CHF pro kWh, welcher für die Kostenberechnung verwendet wird.

«**Wirkungsgrad Ventilator im EB**»: Wirkungsgrad des Ventilators im Ereignisbetrieb.

«**Wirkungsgrad Elektromotor im EB**»: Wirkungsgrad des Elektromotors im Ereignisbetrieb.

«**Nutzungsdauer**»: Die «Nutzungsdauer» fliesst in die Berechnung der Wartungskosten ein.

Die Gewichtung der Einflussgrössen kann durch den Nutzer projektspezifisch eingegeben werden. Abb. 98 zeigt die entsprechenden Eingabefelder (blau hinterlegt).

Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Ventilatoren	5
	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1
	Energieeffizienz Antriebssystem bei Vollast	1
	Leistungsbedarf Gesamtsystem bei häufigstem Betriebspunkt (Normalbetrieb)	5
Lüftung	Optimierung Betriebspunkt	3
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	2
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	1
Weiteres	Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1

Abb. 98 Eingabefelder für die Gewichtung der Einflussgrössen für die SiSto-Lüftung

Die Einflussgrössen und deren Gewichtung lassen sich wie folgt beschreiben:

«**Bauliche Anforderungen, Platzbedarf Ventilatoren**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Die Unterschiede im Platzbedarf resultieren aus der unterschiedlichen Anzahl Ventilatoren je nach Variante. Die Gewichtung wird mit 5 für durchschnittliche Projekte auf der Skala von 0 – 10 tief vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die generelle Bewertung wird mit 6 Punkten für die kompakteren Systeme mit 2 Ventilatoren und mit 1 bis 2 Punkt für die aufwendigeren Systeme 3 bis 4 Ventilatoren festgehalten.

«**Bauliche Anforderungen, Platzbedarf Schaltgerätekombination**»: *Gewichtung Einflussgrösse*: Die Unterschiede im Platzbedarf resultieren aus den unterschiedlich grossen Antriebsschaltgeräten je nach Antriebssystem. Die Gewichtung wird mit einem Wert von 2 auf der Skala von 0 – 10 für durchschnittliche Projekte vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die generelle Bewertung wird mit 4 Punkten für die kompakteren Systeme wie DOL und mit 2 Punkt für die aufwendigeren Systeme mit FU festgehalten. Durch die kleinen Nennleistungen und die dadurch resultierenden kleinen Installationen fällt diese Einflussgrösse weniger ins Gewicht als bei den grösseren Lüftungsinstallationen.

«**Energieversorgung, Netzurückwirkungen – Oberschwingungen**» *Gewichtung Einflussgrösse*: Da in der Bewertung nur Systeme untersucht werden, welche netzverträglich sind, wird eine Gewichtung mit 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Während der 6 Puls FU nur mit 1 bewertet wird, werden den Lösungen 12 Puls FU und AFE 4 resp. 5 Punkte gegeben, da diese Lösungen nach DACHCZ nicht als Oberschwingungserzeuger gelten.

«**Energieversorgung, Netzurückwirkungen – Spannungseinbruch**» *Gewichtung Einflussgrösse*: Da in der Bewertung nur Systeme untersucht werden, welche netzverträglich sind, wird eine Gewichtung mit 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung*: Die grösste Auswirkung auf den Spannungseinbruch hat DOL, sodass hier 1 Punkt resultiert. Das beste Ergebnis resp. keinen Spannungseinbruch gibt es bei allen FU-Lösungen.

«**Energieversorgung – Energieeffizienz Antriebssystem bei Vollast**» *Gewichtung Einflussgrösse*: Die Energieeffizienz berücksichtigt den Wirkungsgrad eines Systems bei 100% Drehzahl, bei welcher SiSto-Ventilatoren im Ereignis- oder im Testbetrieb betrieben werden. Unterschiede in der Energieeffizienz ergeben sich bei den Komponenten im Antriebsschaltgeräten. Die Auswirkungen der Energieeffizienz können bedingt durch die meist geringen Betriebsstunden im Ereignisbetrieb schwach gewichtet werden. Die Gewichtung wird daher mit 1 vorgeschlagen, kann aber projektspezifisch angepasst werden.

Generelle Beurteilung: Hinsichtlich Energieeffizienz bei 100% Drehzahl schneidet die FU-Lösungen am schlechtesten ab und werden mit 4 Punkt bewertet. Alle anderen Systeme, welche bei 100% Drehzahl ohne zusätzliche Verluste direkt am Netz betrieben werden, erhalten 6 Punkte.

«Energieversorgung - Leistungsbedarf Gesamtsystem bei häufigstem Betriebspunkt (Normalbetrieb)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Die Energieeffizienz berücksichtigt den Wirkungsgrad eines Systems bei Normalbetrieb, bei welcher SiSto-Ventilatoren zu praktisch 100% der Zeit betrieben wird. Unterschiede in der Energieeffizienz ergeben sich aus der Abweichung zwischen effektivem Betriebspunkt und gefordertem Betriebspunkt und bei den Komponenten im Antriebsschaltschrank. Die Auswirkungen der Energieeffizienz müssen bedingt durch die grosse Anzahl Betriebsstunden im Normalbetrieb hoch gewichtet werden. Die Gewichtung wird daher mit 5 vorgeschlagen, kann aber projektspezifisch angepasst werden. *Generelle Beurteilung:* Hinsichtlich Energieeffizienz schneiden die Lösungen mit einem separaten, genau auf den Normalbetrieb abgestimmten Ventilator am besten ab und erhalten daher 6 Punkte.

«Lüftung – Optimierung/Variation Betriebspunkt» *Gewichtung Einflussgrösse:* Die Optimierung resp. Variation des Betriebspunkts ist im Normalbetrieb von Bedeutung. Die Einflussgrösse wird mit 3 gewichtet. *Generelle Beurteilung:* Bei der FU-Lösung ist eine Anpassung schnell und einfach möglich. Demgegenüber ist die Einstellung der Laufschaufeln aufwendig und muss gegebenenfalls mehrfach wiederholt werden, wobei jeweils die Auswirkungen auf den Normal- und den Ereignisbetrieb überprüft werden müssen. Die FU-Lösung wird mit 6 bewertet, die anderen Lösungen erhalten 2 Punkte.

«Kommunikation / Leittechnik – Schnittstelle Steuerung – Antriebssystem (Schaltgerätekombination)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Schnittstellen bei der Ablösung von Anlagen eine Rolle spielen, wird eine Gewichtung von 2 vorgeschlagen. Im Gegensatz zu den grösseren Lüftungssystemen scheint aber bei den geringen Antriebsleistungen der Einsatz standardisierter Technik möglich, welche eine Ablösung vereinfacht. *Generelle Beurteilung:* Nach Erreichen der Nutzungsdauer einzelner Komponenten, können, bedingt durch einen Technologiewandel, Anpassungen an den Schnittstellen zur Steuerung erforderlich sein. Je komplexer das Antriebssystem, desto grösser die Wahrscheinlichkeit, dass eine Anpassung der Schnittstelle nötig ist.

«Kabelanlage – Kabelanlage» *Gewichtung Einflussgrösse:* Da die Kabelanlagen bei den geringen Leistungen und kurzen Kabelwegen nicht kostenrelevant sind und die Anzahl der Leiter keine Rolle spielen, wird eine Gewichtung von 1 vorgeschlagen. Die Anzahl erforderlicher Leiter und Anforderungen an die Schirmung von Kabeln werden berücksichtigt. *Generelle Beurteilung:* Die Dahlander-Lösung mit 6 Leitern wird mit 3 Punkt bewertet. FU Lösungen mit geschirmten Kabeln mit 4 Punkten. Die höchste Punktzahl von 5 Punkten erhält DOL und die Softstarter-Lösung.

«Nebeneinrichtungen – Abwärme (Bedarf an Kühlung)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Eine Gewichtung von 1 wird vorgeschlagen, da die anfallenden Wärmeleistungen ist sehr gering. *Generelle Beurteilung:* Die Systeme werden mit 4 Punkten (FU) bis 6 Punkten (DOL) bewertet.

«Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)» *Gewichtung Einflussgrösse:* Für die Gewichtung wird eine 1 vorgeschlagen. *Generelle Beurteilung:* Die Antriebe unterscheiden sich in ihrer Komplexität was sich sowohl bei der Inbetriebnahme als auch bei etwaigen Fehlerbehebungen bemerkbar machen kann. Die Punkte wurden ausgehend von FU-Lösungen mit einer hohen Komplexität mit 3 Punkt bis zu DOL, bestehend aus 2 Schützen, mit 6 Punkten, bewertet.

Die Gewichtung der aufgeführten Einflussgrössen auf das Gesamtsystem werden mit der generellen Beurteilung der jeweiligen Antriebstechnologie multipliziert. Es ergibt sich eine gewichtete Beurteilung. Die Summe aller gewichteten Beurteilung führt zu absoluten Gesamtbewertung, exkl. Kosten / Anzahl. Werden diese Ergebnisse untereinander verglichen, erhält man eine relative Gesamtbewertung in Prozent.

		2 x FU		
Technische Bewertung		Beurteilung		
Einflussgrösse (Gesamtsystem)		Gewichtung	generell	gewichtet
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Ventilatoren	5	6	30
	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2	2	4
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1	1	1
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1	6	6
	Energieeffizienz Antriebssystem bei Vollast	1	4	4
	Leistungsbedarf Gesamtsystem bei häufigstem Betriebspunkt (Normalbetrieb)	5	3	15
Lüftung	Optimierung Betriebspunkt	3	6	18
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	2	4	8
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1	4	4
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	1	4	4
Weiteres	Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1	3	3
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl				97
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]		5		95
Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl				106%

Abb. 99 Ausschnitt aus der Bewertungstabelle mit Einflussgrössen, Gewichtung und gewichteter Punktzahl für das Antriebssystem 2 x FU. Im Beispiel erhält 2 x FU 97 Punkte, wobei diese Punktzahl auf 95 gerundet wird. Die relative Bewertung ergibt 106%

In einem weiteren Schritt erfolgt die Bewertung der Kosten. Für diesen Teil der Bewertungstabelle sind typische Kosten hinterlegt. Die Kosten einer Variante resp. eines Antriebssystems werden aus den eingegebenen projektspezifischen Angaben und den hinterlegten Kosten ermittelt.

Beispiel Tunnel Musterloch III:

Für den Tunnel Musterloch III wurde die Bewertung für die 4 Varianten für einen SiSto mit 5 Fluchttüren und einer Fahrraumlüftung mit Absaugung durchgeführt. Zwar ergeben sich aus der «Bestimmung der aerodynamisch geeigneten Lösung» zwei geeignete Lösungen, in der Bewertung wurden aber auch die aerodynamisch nicht optimalen Varianten mitberücksichtigt. Als Bestvariante wurde die Lösung mit 2 grossen Ventilatoren, jeweils mit FU betrieben, evaluiert. Auf Platz 2 folgt die Variante mit 2 grossen Ventilatoren mit Dahlander-schaltung. Obwohl diese Variante energetisch schlechter ist, punktete sie bei den tieferen Investitionskosten und liegt in der Gesamtbewertung der Kosten weit vorne.

Tab. 30 Bewertung der SiSto-Lüftung für das Beispiel Musterloch III

Variante	Gesamt- bewertung Ein- fluss- grössen relativ ohne Kos- ten [%]	Gesamt- bewertung Kosten relativ [%]	Gesamt bewertung Einflussgrössen und Kosten [Punkte]	Rang [-]
Variante 1 2 grosse Ventilatoren FU Betrieb für NB und EB	106	100	1.06	1
Variante 2 2 grosse Ventilatoren Dahlanderbetrieb für NB und EB	100	100	1.00	2
Variante 3 4 kleinere Ventilatoren DOL-Betrieb für NB und EB	100	121	0.82	4
Variante 4 2 grosse Ventilatoren DOL-Betrieb für EB 1 kleiner Ventilator DOL-Betrieb für NB	106	107	0.99	3

EB = Ereignisbetrieb, NB = Normalbetrieb

7.4.5 Fazit SiSto-Lüftung

Liegen die Betriebspunkte nicht "günstig", sprich der Normalbetriebspunkt nicht nahe bei 50% der Nenndrehzahl (Dahlanderschaltung), lohnt sich der Einsatz eines FU. Dieser bietet zusätzlich den Vorteil, die Anlage durch Verstellung des Betriebspunkts auf den optimalen Betriebspunkt im Ereignisbetrieb einzustellen. Dieser Betriebspunkt kann in der Auslegung oft nur ungenau bestimmt werden, da die Leckage (Bauwerk, Türen, Drainage, Kabelrohranlagen des Bauwerks) nur ungenügend bekannt ist.

Der Wirkungsgrad eines FU wird beim Normalbetriebspunkt des Motors nicht günstig sein (siehe Abb. 50). Da aber der Leistungsbedarf durch den optimierten Betriebspunkt sinkt, und die Leistung sich kubisch zum geförderten Volumenstrom verhält, resultiert oftmals auch mit FU ein besserer Gesamtwirkungsgrad.

Die Energieeffizienz der Lüftung von Sicherheitsstollen fällt einerseits wegen des Dauerbetriebs eher ins Gewicht als die der Abluft oder der Längslüftung. Andererseits sind die Anschlussleistungen der SiSto-Lüftungen bedeutend tiefer.

Variante 1 ist für den Tunnel Musterloch III technisch und wirtschaftlich am besten geeignet.

			2 x FU		2 x Dahlander		4 x DOL		(2xEreignis + 1xNormal) DOL	
Technische Bewertung			Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung		Beurteilung	
Einflussgrösse (Gesamtsystem)			generell	gewichtet	generell	gewichtet	generell	gewichtet	generell	gewichtet
Bauliche Anforderungen	Platzbedarf Ventilatoren	5	6	30	6	30	1	5	2	10
	Platzbedarf Schaltgerätekombination	2	2	4	4	8	3	6	3	6
Energieversorgung	Netzurückwirkungen - Oberschwingungen	1	1	1	6	6	6	6	6	6
	Netzurückwirkungen - Spannungseinbruch	1	6	6	1	1	1	1	1	1
	Energieeffizienz Antriebssystem bei Vollast	1	4	4	6	6	6	6	6	6
	Leistungsbedarf Gesamtsystem bei häufigstem Betriebspunkt (Normalbetrieb)	5	3	15	2	10	6	30	6	30
Lüftung	Optimierung Betriebspunkt	3	6	18	2	6	2	6	2	6
Kommunikation / Leittechnik	Schnittstelle Steuerung - Antriebssystem (Schaltgerätekombination)	2	4	8	5	10	6	12	6	12
Kabelanlage	Kabelanlage (Anzahl Kabel, Kabeltyp /-durchmesser, Kabellänge ...)	1	4	4	3	3	5	5	5	5
Nebeneinrichtungen	Abwärme (Bedarf an Kühlung)	1	4	4	6	6	6	6	6	6
Weiteres	Systemkomplexität (Anzahl Parameter/Freiheitsgrade, Komplexität Komponenten)	1	3	3	4	4	6	6	6	6
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl					97		90		89	
Gesamtbewertung absolut exkl. Kosten bzw. Anzahl gerundet auf [Punkte]			5		95		90		95	
Gesamtbewertung relativ exkl. Kosten bzw. Anzahl					106%		100%		100%	

			2 x FU		2 x Dahlander		4 x DOL		(2xEreignis + 1xNormal) DOL	
Investitionskosten Ventilatoren	Herstellung, FAT, Montage, IBS, Dokumentation (Wetterschutzgitter, Aktivteil, Kanalteile, Absperrklappe, Überdruckkanal und Überdruckklappe)		310'000.00		310'000.00		373'000.00		357'000.00	
Wartungskosten Ventilatoren	Durchschnittliche Wartungskosten/Anlage pro Jahr		2'000.00		2'000.00		3'000.00		2'500.00	
	Wartungskosten SiSto_Ventilatoren komplett = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten/Anlage)		40'000.00		40'000.00		60'000.00		50'000.00	
Investitionskosten Schaltgerätekombinationen	Kosten Schaltgerätekombination pro Anlage Komplettes Anlasssystem inkl. Anteil an Schaltschrank, FAT Schaltschrank, Montage, IBS, Dokumentation pro Anlage		17'000.00		11'000.00		19'000.00		15'000.00	
Wartungskosten Schaltgerätekombinationen	Durchschnittliche Wartungskosten/Anlage pro Jahr		100.00		50.00		75.00		75.00	
	Wartungskosten Schaltgerätekombination über die Nutzungsdauer von 20 Jahren = Nutzungsdauer * (Pauschale + Anzahl x durchschn. Wartungskosten)		10'000.00		9'000.00		9'500.00		9'500.00	
	Wartungskosten Schaltgerätekombination komplett		18'500.00		9'000.00		9'500.00		9'500.00	
Investitionskosten Kabelanlage	Keine detaillierte Untersuchung vorgenommen		10'000.00		10'000.00		10'000.00		10'000.00	
Wartungskosten Kabelanlage	Wartungskosten Kabelanlagen über die Nutzungsdauer von 20 Jahren		-		-		-		-	
Energiekosten			23'683.20		26'757.48		44'127.87		11'559.23	
Investitionskosten Total			337'000.00		331'000.00		402'000.00		382'000.00	
Wartungskosten für 20 Jahre Total			58'500.00		49'000.00		69'500.00		59'500.00	
Gesamtkosten			419'183.20		406'757.48		515'627.87		453'059.23	
Gesamtkosten gerundet auf [CHF]			30'000		420'000.00		510'000.00		450'000.00	
Gesamtkosten relativ					100%		121%		107%	

			2 x FU		2 x Dahlander		4 x DOL		(2xEreignis + 1xNormal) DOL	
Gesamtbewertung Einflussgrössen und Kosten			relativ		1.06		1.00		0.82	
Rang					1		2		4	

Abb. 100 Übersicht über die Bewertung der SiSto-Lüftung

8 Auswahl und Auslegung Frequenzumrichter

Zusammenfassend sollen hier noch einmal die wichtigsten Punkte für die Auswahl und Auslegung von Frequenzumrichtern beschrieben werden.

Bestimmung des Verknüpfungspunkt V

Wie bereits im Kapitel 6.1 beschrieben, muss bei der Auswahl eines geeigneten FUs der Verknüpfungspunkt V definiert werden. Der Verknüpfungspunkt muss gegenüber Netzbetreiber und Anlagenintern zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs beurteilt werden.

Dabei werden in der Regel folgende Fälle unterschieden:

1. Verknüpfungspunkt V liegt auf der Mittelspannungsebene (MS) und keine anderen Verbraucher befinden sich am Trafo (vgl. Abb. 101)

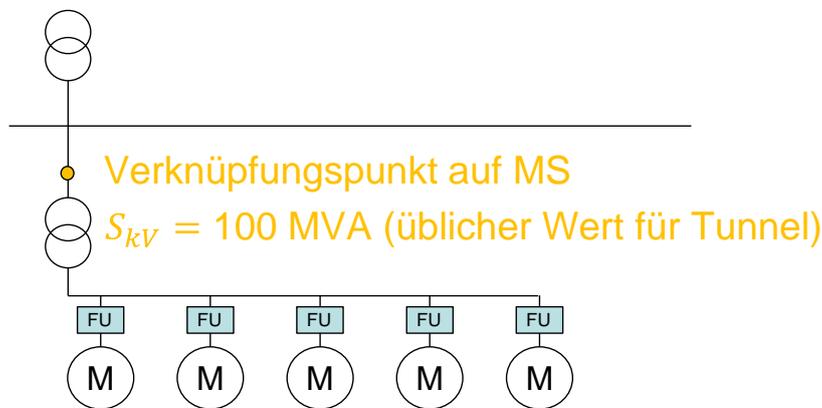


Abb. 101 Betrachtung Verknüpfungspunkt auf MS

2. Verknüpfungspunkt V liegt auf der Niederspannungsebene (NS) und weitere Verbraucher sind an den Trafo angeschlossen (vgl. Abb. 102)



Abb. 102 Betrachtung Verknüpfungspunkt auf NS

Pulszahl

Nach Definition des Verknüpfungspunkt V können die Oberschwingungen beurteilt werden. Die Netzurückwirkung hinsichtlich Oberschwingungen hängt von der gewählten Pulszahl des FUs ab, wie in Kapitel 5.3.5 beschrieben. So erzeugt der 6-Puls-Gleichrichter einen hohen Anteil an Oberschwingungen. Die Oberschwingungen nehmen mit der Anzahl der Pulse ab. Als «High-End» Ausführung kann der «Active-Front-End» Frequenzumrichter bezeichnet werden.

Quadranten der Antriebsanwendung

Um einen geeigneten FU auswählen zu können, sollte die Antriebsanwendung geklärt sein. Im Allgemeinen werden vier Quadranten unterschieden (siehe Abb. 103), wobei in der Praxis v.a. die Ein-, Zwei- und Vier-Quadranten verwendet werden.

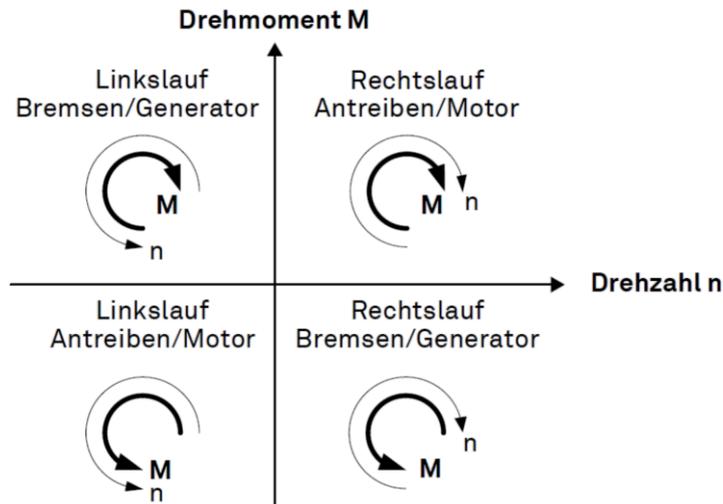


Abb. 103 Quadranten der Antriebsanwendungen nach Drehzahl und Drehmoment [26]

Bei der Ein-Quadrant-Anwendung weisen Drehzahl und Drehmoment immer in die gleiche Richtung, d.h. der Energiefluss erfolgt vom Wechselrichter zum Prozess [30].

Eine Zwei-Quadranten-Anwendung bedeutet, dass sich die Richtung des Drehmoments ändern kann, d.h. der Energiefluss kann vom Antrieb zum Motor und umgekehrt erfolgen [30].

Eine Vier-Quadranten-Anwendung bedeutet, dass sowohl Drehrichtung des Motors und Richtung des Drehmoments frei wechseln können.

In Standardantrieben ist der Gleichrichter normalerweise ein 6-Puls oder 12-Puls-Diodengleichrichter, der nur Strom aus dem AC-Netz an die DC-Sammelschiene, aber nicht umgekehrt, liefern kann [30]. Der rückgespeiste Strom würde die DC-Kondensatoren des FUs entsprechend belasten. Aus diesem Grund müsste das Bremsmoment des FUs reduziert werden (Überspannungsregelung).

Rückspeisefähigkeit

Eine Alternative zur Überspannungsregelung bei einer Vier-Quadranten-Anwendung sind folgende (vgl. hierzu auch Kapitel 5.3.5 mit Abb. 104):

- FU mit Brems-Chopper (elektrischer Schalter), welche die Bremsenergie zum Bremswiderstand leiten. Die Bremsenergie wird in Wärme umgewandelt. Anwendung, v.a. bei gelegentlich benötigten Bremszyklen; Bremsenergie ist im Verhältnis zur motorischen Energie gering.
- FU mit netzseitigem Umkehrgleichrichter bestehend aus zwei Thyristorbrücken. Es arbeitet immer nur eine Brücke, die andere ist blockiert. Umkehrgleichrichter werden v.a. dann verwendet, wenn die Bremsvorgänge ständig und regelmässig stattfinden und die Bremsenergie gross ist. Allerdings sind die Oberschwingungen grösser als bei rückspeisefähigen IGBT-Einheiten [30]
- FU mit IGBT-Rückspeiseeinheit bzw. Wechselrichter, auch bekannt als «Active-Front-End» (AFE) kann Energie in beide Richtungen führen. Anwendungen, auch in solchen Fällen, wo Oberschwingungen eine grosse Rolle spielen und hohe Dynamik durch schnelle Änderungen des Energieflusses auf Lastseite erwartet werden [30]

“Fire-Mode” oder “Run-to-death”

Als “Fire-Mode” oder “Run-to-death” wird die Funktion bezeichnet, bei welcher ein drehzahl geregelter Antrieb Fehler ignoriert oder diese bei einem Ereignis zurücksetzt. So soll die Verfügbarkeit der Anlage erhöht werden.

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, muss beim Einsatz von Frequenzumrichter die jeweilige Netzverträglichkeit geklärt werden. Hierbei sind die Oberschwingungen entscheidend. Darüber hinaus muss je nach gewünschter Anwendung geklärt werden, ob eine 4-Quadranten Lösung oder eine Rückspeisefähigkeit in Form von beispielsweise Brems-Chopper notwendig ist. Da Highend-Produkte wie beispielsweise AFE FU die meisten Anwendungen abdecken und zudem Netzverträglich sind, sind Kosten und Wartungsaufwand die jeweiligen Entscheidungskriterien.

Folgende Punkte sollten bei der Auswahl FU geklärt werden:

- Dimensionierung:
 - Klärung des Lasttyps bei der Applikation
 - Drehmomentbedarf und Anlaufstrom

- Auslegung des FU nach benötigtem Strom:
 - Berücksichtigung der Netzspannung
 - 15% mehr Leistung bei geringerer Luftdichte: Motor kann bei kalten Temperaturen mehr liefern
 - FU muss 15% Mehrleistung abdecken können
 - Oberschwingungsgehalt steigt mit der Höhe der von der nichtlinearen Last aufgenommenen Leistung. Daher haben sowohl die Anzahl installierter Frequenzumrichter als auch ihre einzelnen Leistungsgrößen und Lastprofile erheblichen Einfluss auf den Oberschwingungsgehalt

- Schnittstellen und Optionen
 - Klärung der Kommunikationsschnittstelle, eventuell auch im Hinblick auf Obsoleszenz

- Energieeffizienz
 - Möglichkeit zur zeitweisen Abschaltung (z.B. Abschalten Leistungsteil)
 - Kenntnis der Netzimpedanz

- Klärung benötigtes Beschleunigungs- und Bremsmoment:
 - Anforderung Rückspeisefähigkeit bzw. Regelungsqualität
 - Regelung der Drehzahl nach eindeutigen Bedarfskriterium mit entsprechenden Sensoren: Druck, Temperatur, Durchfluss, Volumen, etc.
 - Sorgfältige Parametrierung der Sollwerte nach effektivem Bedarf.

- Ältere Motoren, die nicht für den Betrieb an Umrichtern gebaut wurden, sind dafür nicht unbedingt geeignet, da die Gefahr von Isolationsdefekten besteht.

Anhänge

I	Untersuchung zur Beeinflussung der Längsströmung im Strassentunnel	171
I.1	Berechnung der stationären Geschwindigkeitsänderung	171
I.2	Berechnung der dynamischen Geschwindigkeitsänderung	172
II	Lüftung von Sicherheitsstollen – Berechnungsbeispiel und Empfehlung	175
II.1	Ausgangslage.....	175
II.2	Dimensionierung	175
II.3	Abschätzung des Energieverbrauchs	175
II.3.1	Wirkungsgrade	176
II.3.2	Gesamtwirkungsgrad, Leistungsbedarf und Energieverbrauch	177
II.3.3	Kostensparpotential	177
III	Messung und Beurteilung der Netzurückwirkungen	178
III.1	Tunnel Flüelen.....	178
III.1.1	Abluftventilator AV2 Tunnel Flüelen.....	178
III.1.2	Strahlventilator Tunnel Flüelen	184
III.1.3	SISTO Ventilator – «SiSto NORD» Tunnel Flüelen.....	187
III.2	Tunnel Sachseln	191
III.2.1	Abluftventilator Nord AV2 – Tunnel Sachseln (27. November 2019).....	191
III.2.2	SiSto-Ventilator – Tunnel Sachseln (27. November 2019)	194
III.2.3	Abluftventilator Süd AV1 – Tunnel Sachseln (15. Dezember 2020)	197
III.2.4	Beurteilung und Zusammenfassung Y/D-Anlauf bei AV Tunnel Sachseln	199
III.3	Tunnel Isisberg.....	200
III.3.1	Abluftventilator 1.1 – Tunnel Isisberg (17. Dezember 2019).....	200
III.3.2	Abluftventilator 1.2 – Tunnel Isisberg (17. Dezember 2019).....	203
III.3.3	Strahlventilator SV1 Luzern Tunnel Isisberg.....	205
III.3.4	Abluftventilator 1.1 – Tunnel Isisberg (15. Dezember 2020).....	208
III.3.5	Abluftventilator 1– Tunnel Uetliberg (15. Dezember 2020).....	211
III.3.6	Abluftventilator 1– Tunnel Gubrist (09. Dezember 2020)	214
III.4	Tunnel Umfahrung Saas	217
III.4.1	Abluftventilator Tunnel Umfahrung Saas vom 09.01.2011	217
III.5	Tunnel Crapteig.....	221
III.5.1	Abluftventilator Tunnel Crapteig 12.12.2017.....	221
III.6	Tunnel Umfahrung Roveredo.....	225
III.6.1	Abluftventilator Tunnel Umfahrung Roveredo 12.12.2017.....	225

I Untersuchung zur Beeinflussung der Längsströmung im Strassentunnel

Der Zusammenhang zwischen Ventilationsleistung und Längsströmung im Tunnel wird nachfolgend anhand von Strahlventilatoren erläutert. Das Prinzip lässt sich jedoch auf andere Formen von Lüftungen zur Längsströmungskontrolle übertragen.

I.1 Berechnung der stationären Geschwindigkeitsänderung

Der Zusammenhang von Strömung, Energie (Kraft) und Verlusten wird durch die bernoullische Druckgleichung beschrieben (siehe auch Kapitel 2.2). Daraus leiten sich die Druckverluste Δp_I für den Strömungszustand 1 (Luftgeschwindigkeit u_1) ab:

$$\Delta p_1 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 \left(\lambda \frac{L}{D_h} + \zeta_e + \zeta_a + \zeta_{Fz} \right)$$

Die Ein- und Ausströmverluste werden durch die Verlustkoeffizienten ζ_e sowie ζ_a beschrieben und die Reibungsverluste der im Tunnel stehenden Fahrzeuge durch ζ_{Fz} . Die Verluste aufgrund der Rohrreibung entlang den Tunnelwänden berechnet sich aus dem Reibungskoeffizienten λ , der Tunnellänge L und dem hydraulischen Durchmesser D_h .

Wird dem Strömungszustand 1 (Luftgeschwindigkeit u_1) zusätzliche Energie zugeführt, so stellt sich der Strömungszustand 2 (Luftgeschwindigkeit u_2) ein. Konkret stammt diese zusätzliche Energie von Strahlventilatoren, wobei sich die Druckwirkung Δp_{SV} eines Strahlventilators wie folgt berechnet wird:

$$\Delta p_{SV} = \frac{\rho(u_{SV} - u_L)Q_{SV}\eta_E\eta_{Schub}}{A_{Tunnel}}.$$

Dabei bezeichnet u_{SV} die Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators, u_L die Luftgeschwindigkeit im Tunnel, Q_{SV} dessen Volumenstrom, η_E den Einbauwirkungsgrad, η_{Schub} den Schubwirkungsgrad und A_{Tunnel} die Querschnittsfläche des Tunnels.

Werden die entsprechenden Formeln miteinander kombiniert und nach der Geschwindigkeit u_2) umgeformt, so ergibt sich:

$$u_2 = \sqrt{2 \frac{\Delta p_{SV}}{\rho \left(\lambda \frac{L}{D_h} + \zeta_e + \zeta_a + \zeta_{Fz} \right)} + u_1^2}$$

respektive

$$u_2 = \sqrt{2 \frac{\rho(u_{SV} - u_2)Q_{SV}\eta_E\eta_{Schub}}{A_{Tunnel} \left(\lambda \frac{L}{D_h} + \zeta_e + \zeta_a + \zeta_{Fz} \right)} + u_1^2}$$

Somit lässt sich, bei bekannten Tunnel- und Strahlventilatoreigenschaften die Strömungsgeschwindigkeit u_2 bestimmen, welche nach dem Einschalten eines Strahlventilators im Ausgangszustand u_1 erreicht wird.

Unter Vernachlässigung der Schubreduktion durch die Hintergrundgeschwindigkeit erhält man folgende Lösung für den Strömungszustand 2:

$$u_2 = \sqrt{2 \frac{\rho u_{SV} Q_{SV} \eta_E \eta_{Schub}}{A_{Tunnel} \rho \left(\lambda \frac{L}{D_h} + \zeta_e + \zeta_a + \zeta_{Fz} \right)} + u_1^2}$$

Bei typischen Werten für die Ausblasgeschwindigkeit, den Schub sowie den Strömungszustand im Tunnel ist die Luftgeschwindigkeit u_2 circa 3% grösser gegenüber der impliziten Formel.

Werden typische Werte für Schub- / Einbauwirkungsgrad, Reibungskoeffizient und Ein- / Ausströmverluste eingesetzt sowie die Verluste durch Fahrzeuge im Tunnel vernachlässigt (Annahme: leerer Tunnel) so ergibt sich folgende, vereinfachte Gleichung für die Luftgeschwindigkeit u_2 aufgrund des Standschubs eines Strahlventilators:

$$u_2 = \sqrt{\frac{\text{Standschub}_{SV}}{1.15 A_{Tunnel} \left(0.01 \frac{L}{D_h} + 1\right)}} + u_1^2$$

Somit kann nun in verschiedenen Komplexitätsgraden die Geschwindigkeit ermittelt werden, welche sich beim Einschalten eines Strahlventilators einstellt.

I.2 Berechnung der dynamischen Geschwindigkeitsänderung

Mittels des Zusammenhangs von Kraft, Masse und Beschleunigung (zweites Newtonsches Gesetz) ist möglich, die Luftströmung im Tunnel in Funktion der Zeit zu bestimmen.

$$F = m \cdot a = LA_{Tunnel}\rho \cdot \frac{du}{dt}$$

Für eine infinitesimale Geschwindigkeitsänderung du lässt sich, bei bekannter Kraft F und bekannter Tunnelcharakteristiken (Länge L , Querschnittsfläche A und Luftdichte ρ , die nötige Beschleunigungszeit dt bestimmen.

Die Kraft F entspricht dem effektiv verfügbaren Schub der Lüftungsaggregate. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Kraft mit zunehmender Geschwindigkeit im Tunnel abnimmt, einerseits aufgrund der bereits geleisteten Beschleunigung, andererseits aufgrund der reduzierten Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Ausblasgeschwindigkeit des Strahlventilators u_{SV} und der Luftgeschwindigkeit im Tunnel u_L .

$$\Delta t = \Delta u \cdot \frac{LA_{Tunnel}\rho}{F(u)}$$

Für ein Δu von z.B. 0.01 m/s lässt sich mit hinreichender Genauigkeit die entsprechende Beschleunigungszeit Δt berechnen und somit auch den zeitlichen Verlauf der Luftgeschwindigkeit im Tunnel beziehungsweise die Beschleunigungszeit Δt_{acc} für die Geschwindigkeitserhöhung von u_1 zu u_2 .

In Abb. 105 sind exemplarische Ergebnisse der dynamischen Geschwindigkeitsänderung in einem 1000 m langen Tunnel für drei unterschiedliche Strahlventilatoren (Standschub 500 N, 1000 N und 1500 N) gezeigt. Die Berechnungen berücksichtigen einen Fahrraumquerschnitt von 60 m², einen Füllungsgrad von 10% und einen Lastwagenanteil von 10%.

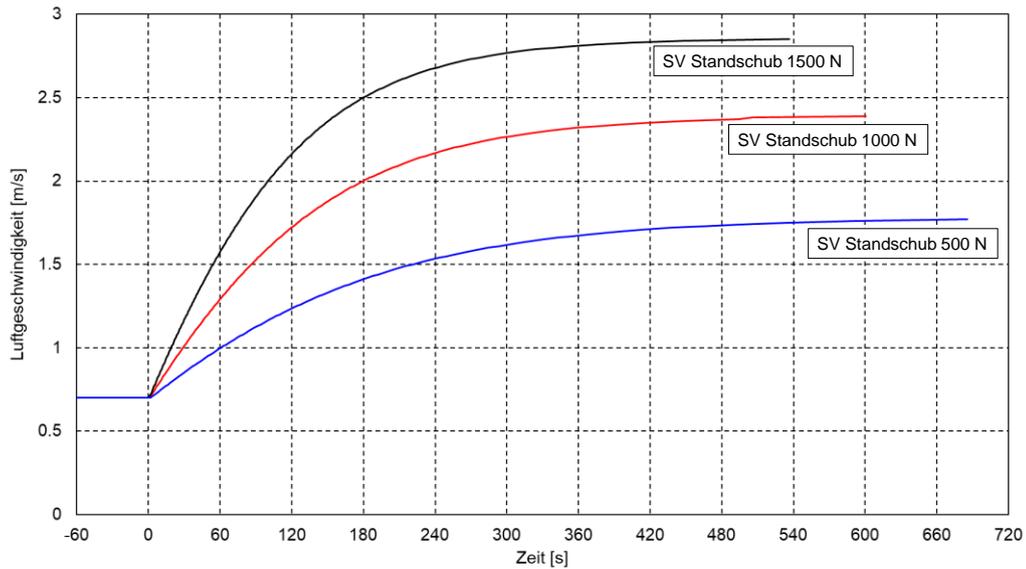


Abb. 105 Zeitliche Veränderung der Luftgeschwindigkeit durch unterschiedliche Strahlventilatoren in einem 1000 m langen Tunnel mit einer Querschnittsfläche von 60 m^2

Die hier vorgestellte Modellierung berücksichtigt eine sofortige Schubumsetzung. Das heisst Anlaufzeit, Zeitdauer bis zur Ausbildung der Strömung um den Strahlventilator und bis zur vollständigen Wirkung sind nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4.3).

In analoger Weise lässt sich das natürliche Abbremsen der Strömung berechnen. Dabei wirkt als Kraft die Reibung, welche die Tunnelluft abbrems (negativ beschleunigt). Um die Dauer für das Abbremsen Δt_{dec} bestimmen zu können, ist es nötig einen Gleichgewichtszustand zu definieren, welcher der natürlichen Strömungsgeschwindigkeit entspricht. Je grösser die Differenz zur effektiven Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel, umso schneller erfolgt das Abbremsen. In Abb. 106 wird der zeitliche Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit ab 1.3 m/s für drei unterschiedliche Gleichgewichtszustände (0 m/s , -1 m/s und -2 m/s) gezeigt.

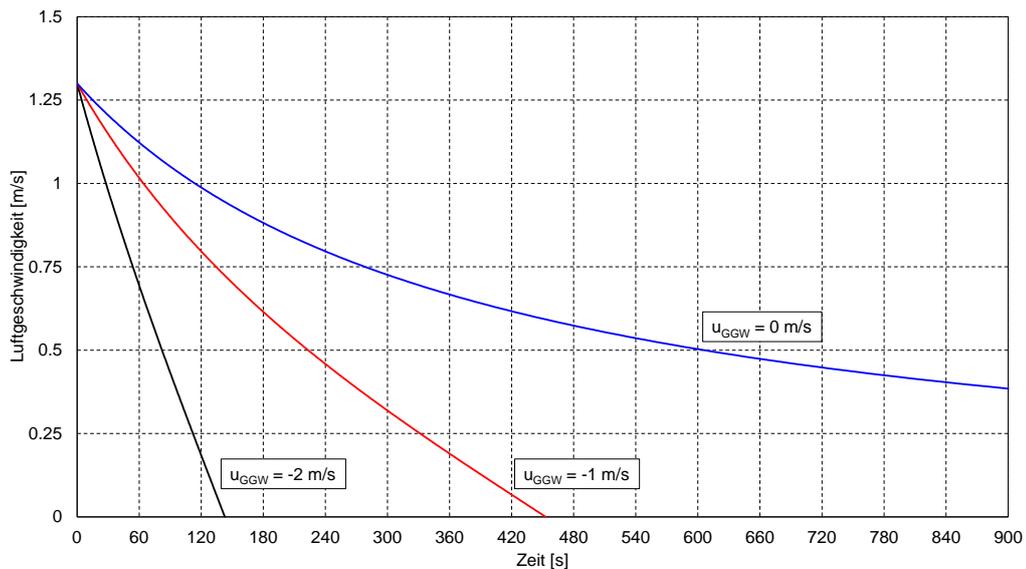


Abb. 106 Zeitliche Veränderung der Luftgeschwindigkeit durch Abbremsen aufgrund unterschiedlicher natürlicher Strömungsgeschwindigkeiten in einem 1000 m langen Tunnel mit einer Querschnittsfläche von 60 m^2

Werden nun die Geschwindigkeitsverläufe für Beschleunigen und Abbremsen kombiniert, so kann für ein spezifisches Objekt / Projekt die Zykluszeit Δt_{acc} berechnet werden und so die Regelbarkeit der Strömung beurteilt werden unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Strahlventilatoren und für unterschiedliche Annahmen hinsichtlich Verkehr (Füllungsgrad / Lastwagenanteil).

II Lüftung von Sicherheitsstollen – Berechnungsbeispiel und Empfehlung

Das nachfolgende Berechnungsbeispiel zielt darauf ab, den effektiven Energieverbrauch der Lüftungsanlage eines Sicherheitsstollens abzuschätzen. Anhand dieser Abschätzung können die technische Lösung mit Dahlander-Motor und diejenige mit Frequenzumrichter miteinander verglichen werden.

Auf dieser Basis wird eine Empfehlung für die technische Lösung der Lüftungsanlage abgegeben.

II.1 Ausgangslage

Im Rahmen dieses Berechnungsbeispiels gehen wir von der nachfolgend beschriebenen Ausgangslage aus:

Belüftet wird ein Sicherheitsstollen mit einer Länge von ca. 3 km (die effektive Länge ist irrelevant) mit insgesamt 9 Querverbindungen zum Fahrraum im Abstand von 300 m untereinander. Er verfügt über typische Werte für die Leckage durch die Notausgangstüren, durch die Schleusentüren sowie über das Bauwerk.

Die Lüftung erfolgt mittels zwei räumlich getrennter Lüftungszentralen, welche jeweils über einen Axialventilator verfügen.

Aufgrund der Länge des zugehörigen Tunnels wird von einem Lüftungssystem mit gezielter Rauchabsaugung ausgegangen. Dementsprechend berücksichtigt das Berechnungsbeispiel, dass im Auslegungsfall für den Ereignisbetrieb 3 Notausgangstüren gleichzeitig geöffnet sind.

II.2 Dimensionierung

Die verwendete Methodik zur Bestimmung der Luftmengen wurde in Kapitel 7.4.1 präsentiert.

Aufgrund der Annahmen ergeben sich folgende Luftmengen:

- Normalbetrieb: 4.5 m³/s
- Ereignisbetrieb 13.5 m³/s

Die Luftmenge im Normalbetrieb entspricht somit ca. 35% der Luftmenge des Ereignisbetriebs.

Die Druckverluste der Anlage sind nur insofern relevant, da sie die absolute Motornennleistung und damit den absoluten Energieverbrauch festlegen. Für die relativen Einsparungen sind die Druckverluste irrelevant. In Anlehnung an ausgeführte Anlagen berücksichtigen wir nachfolgend eine Motornennleistung von 11 kW, das heisst Druckverluste im Bereich von etwa 400-500 Pa.

II.3 Abschätzung des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch wird sowohl für eine Lösung mit zwei Drehzahlen (Dahlandermotor, Drehzahlverhältnis 1:2) als auch mit variabler Drehzahl mittels Frequenzumrichter abgeschätzt.

Das Berechnungsbeispiel geht davon aus, dass

- sich der geförderte Volumenstrom proportional zur Motordrehzahl verhält,

- sich das Drehmoment des Motors quadratisch mit dem geförderten Volumenstrom verhält und
- sich der Leistungsbedarf des Ventilators zur Drehzahl mit einer kubischen Proportionalität verhält.

Der aerodynamische Leistungsbedarf bei Förderung von 50% des Nennvolumenstroms beträgt somit 12.5% des nominalen Leistungsbedarfs. Bei 35% des Nennvolumenstroms beträgt der aerodynamische Leistungsbedarf noch 4.2% des Ausgangswerts.

II.3.1 Wirkungsgrade

Im Nennbetriebspunkt (100% Volumenstrom, 100% Drehzahl, 100% Drehmoment) gehen wir von den folgenden Wirkungsgraden aus:

Tab. 31 Technische Daten und Wirkungsgrade bei Nenndrehzahl

Parameter	Einheit	Wert / Annahme
Wellenleistung	[kW]	11
Wirkungsgrad Ventilator	[%]	85
Wirkungsgrad Elektromotor	[%]	95

Für die Verschlechterung der Wirkungsgrade aufgrund des Teillastbetriebs gehen wir davon aus, dass sich die Wirkungsgrade von Ventilator (aerodynamisch) und Motor (elektrisch) bei 50% Drehzahl und bei 35% Drehzahl um jeweils etwa 10% respektive 20% des ursprünglichen Werts verschlechtern [26].

Für den Frequenzumrichter wird im Teillastbetrieb (35% Drehzahl, 10% Drehmoment) von einem Wirkungsgrad von 65% ausgegangen [26].

Die Abhängigkeit des Wirkungsgrads des Frequenzumrichters von der Motordrehzahl für eine Anwendung mit quadratischer Proportionalität von Drehmoment und Drehzahl und für eine Motornennleistung von ca. 11 kW ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

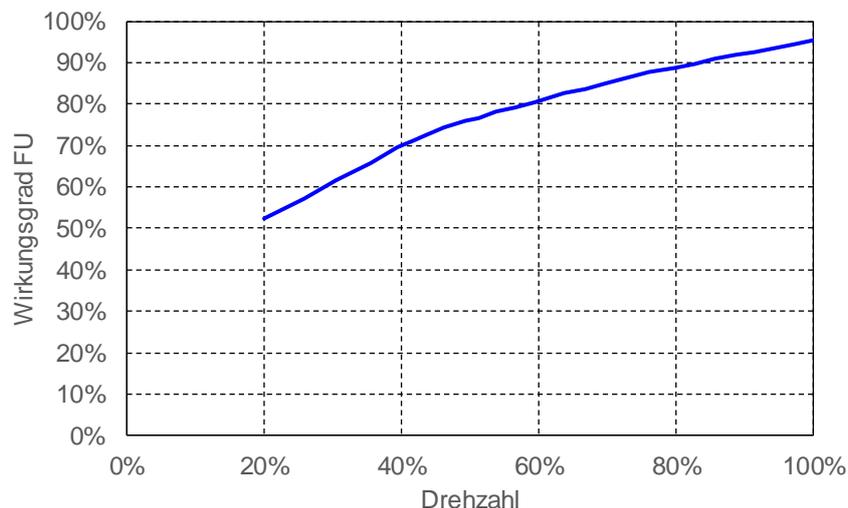


Abb. 107 Abhängigkeit des Wirkungsgrads des Frequenzumrichters von der Drehzahl für das vorliegende Berechnungsbeispiel.

II.3.2 Gesamtwirkungsgrad, Leistungsbedarf und Energieverbrauch

Aus den obigen Angaben lassen sich der Gesamtwirkungsgrad, Leistungsbedarf und der Energieverbrauch ermitteln.

Es wird davon ausgegangen, dass die Lüftung 100% der Zeit, das heisst 8760 h/a bei reduzierter Drehzahl (Normalbetrieb) betrieben wird.

Tab. 32 Technische Daten und Wirkungsgrade bei reduzierter Drehzahl

Parameter	Einheit	Ventilator mit Dahlandermotor	Ventilator mit Frequenzumrichter
Drehzahl	[%]	50	30
Aerodynamische Leistung	[kW]	1.25	0.27
Wirkungsgrad Ventilator	[%]	76.5	68.0
Wirkungsgrad Elektromotor	[%]	85.5	76.0
Wirkungsgrad Frequenzumrichter	[%]	-	65.0
Wirkungsgrad Gesamtsystem	[%]	65.4	33.6
Leistungsbedarf elektrisch	[kW]	1.9	0.8
Energieverbrauch / Jahr	[kWh]	16'741	7'041

Die Berechnung zeigt, dass der Wirkungsgrad des Gesamtsystems, welcher sich aus der Multiplikation der einzelnen Wirkungsgrade ergibt, beim System mit Frequenzumrichter circa 50% des Werts des Systems mit Dahlandermotor entspricht. Trotzdem ist der effektive Leistungsbedarf des Gesamtsystems mit FU ca. 50% geringer. Dies liegt daran, dass die aerodynamische Leistung dieses Systems bei nur circa 20% der Wellenleistung des Systems mit Dahlandermotor liegt.

II.3.3 Kostensparpotential

Zur Berechnung der Energiekosten wird der Energiepreis mit 0.2 CHF/kWh angenommen. Somit lässt sich ermitteln, dass für die besagte Anlage über eine Nutzungsdauer von 15 Jahren Energieeinsparungen im Bereich von circa CHF 18'000.- möglich sind. Das heisst, die Ausrüstung mittels FU lohnt sich finanziell, sofern die Mehrkosten des Systems mit Frequenzumrichter im Vergleich zum System mit Dahlandermotor kleiner als CHF 18'000.- sind.

Aufgrund der Leistungsklasse des eingesetzten Frequenzumrichters (Investitionskosten, Platzbedarf, Bedarf an Raumlüftung, Wartungskosten) und aufgrund des Mehrpreises eines Dahlandermotors im Vergleich zu einem Standardmotor scheinen die Mehrkosten der Lösung mit FU gegenüber der Dahlanderlösung geringer als die oben aufgeführten Grenzkosten auszufallen. Um aufwändige Anpassungen in der Steuerung bei späterem Ersatz des Umrichters von vornherein zu vermeiden, soll dieser über analoge Schnittstellen verfügen.

III Messung und Beurteilung der Netzurückwirkungen

III.1 Tunnel Flüelen

III.1.1 Abluftventilator AV2 Tunnel Flüelen

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 33 Technische Daten Transformator AV2 Tunnel Flüelen

Parameter	Wert
Hersteller	Siemens
Typ	4HD6199-9ZA09
Leistung	1250 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	725 V
Kurzschlussspannung	6.63%

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 34 Technische Daten Antriebsmotor AV2 Tunnel Flüelen

Parameter	Wert
Hersteller	Flender Loher
Motortyp	ANPA-400LN-06C
Bauform	IM B5
Spannung	690 V
Strom	520 A
Leistung	500 kW
Cos φ	0.84
Nennzahl	993 1/min

Technische Daten Frequenzrichter Abluftventilator

Tab. 35 Technische Daten FU AV2 Tunnel Flüelen

Parameter	Wert
Hersteller	Flender Loher
Umrichterfamilie	Dynavert T
Umrichtertyp	2T9A85690-500
Nennspannung	690 V
Nennstrom	530 A
Kurzzeitstrom	590 A/180 s
Nennleistung	633 kVA
Pulszahl	6
Netzdrossel	ja

Messergebnisse bei Betrieb mit Frequenzrichter

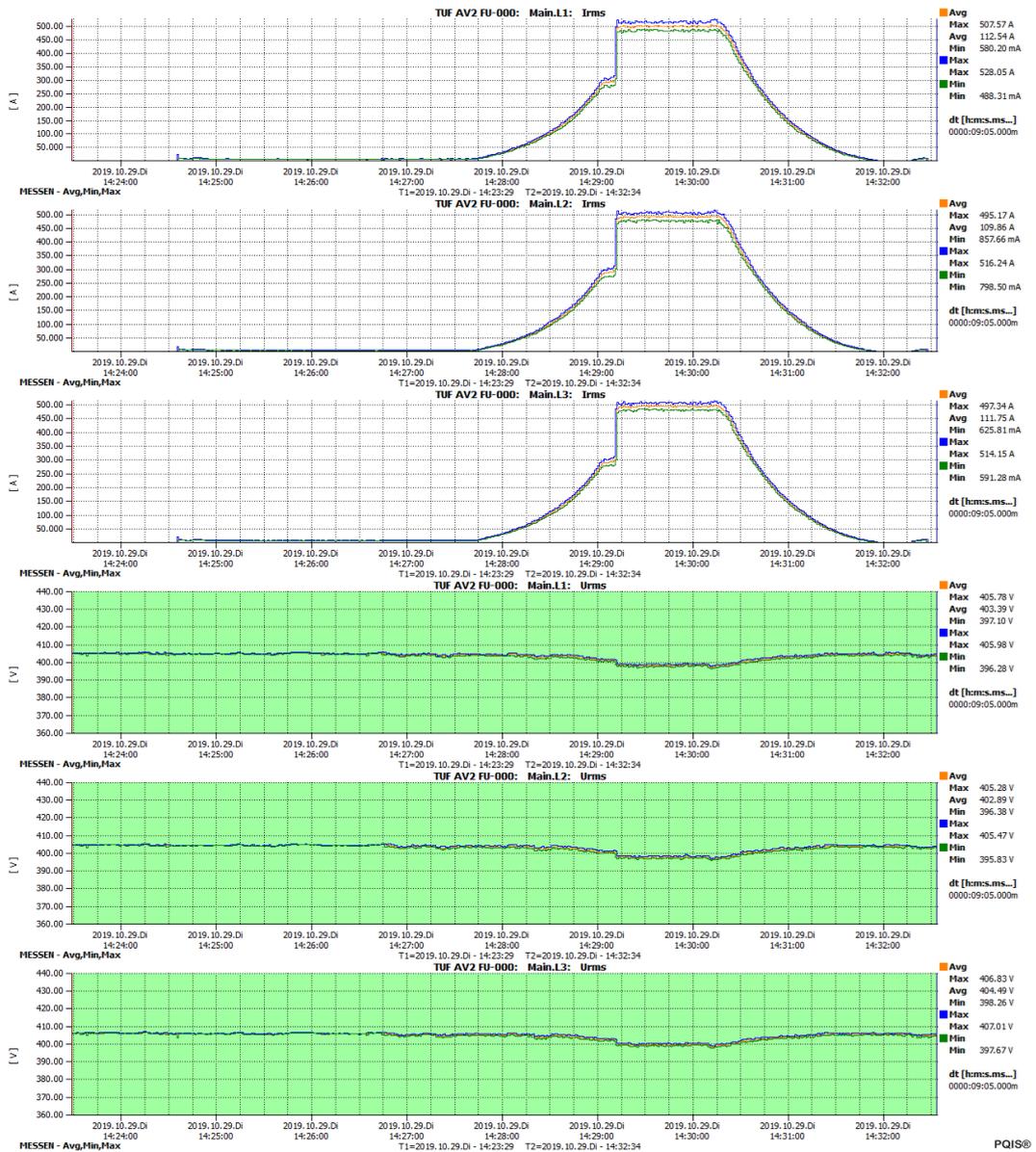


Abb. 108 Strom- und Spannungsverlauf AV2 bei Start mittels FU

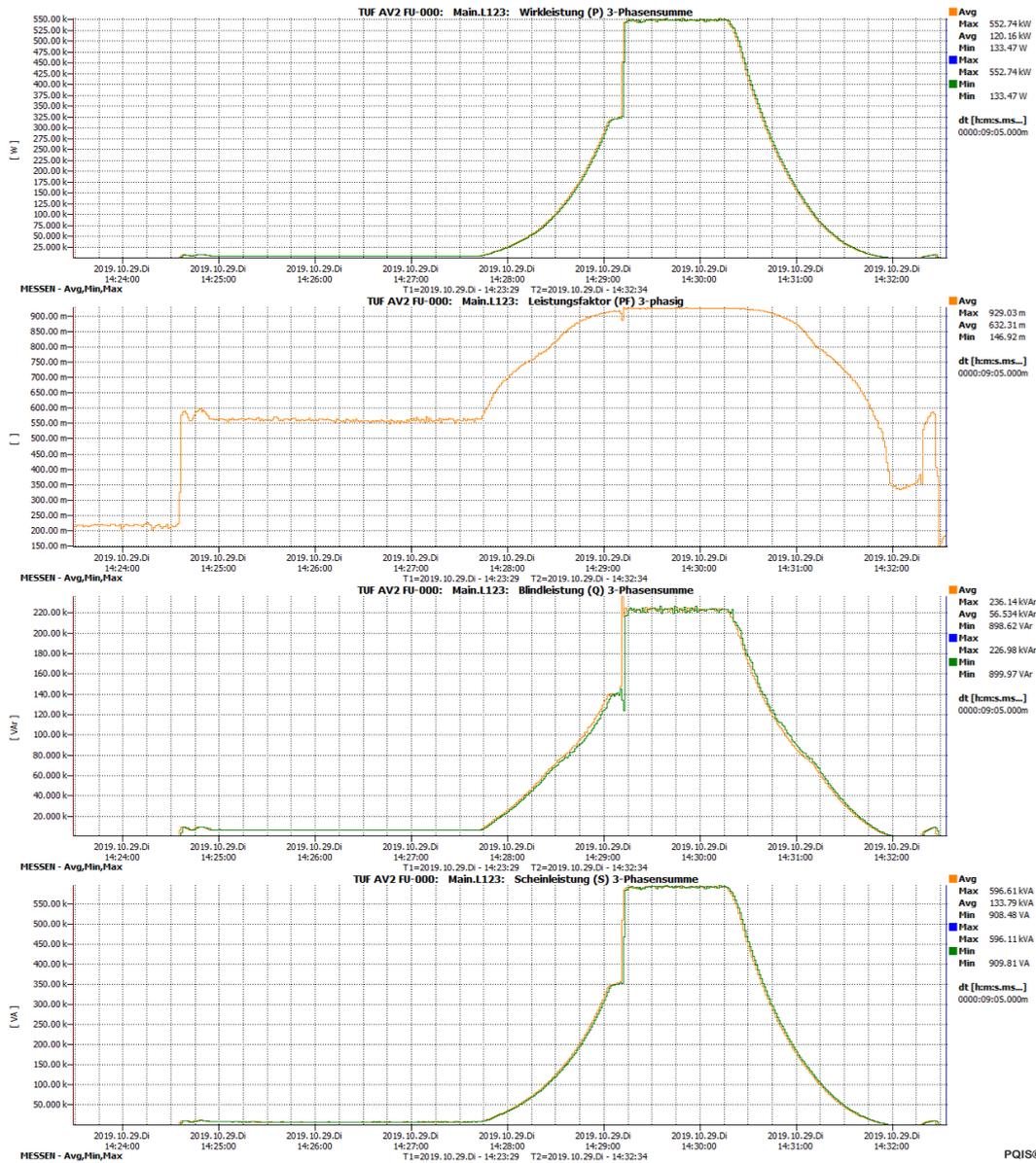


Abb. 109 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV2 bei Start mittels FU

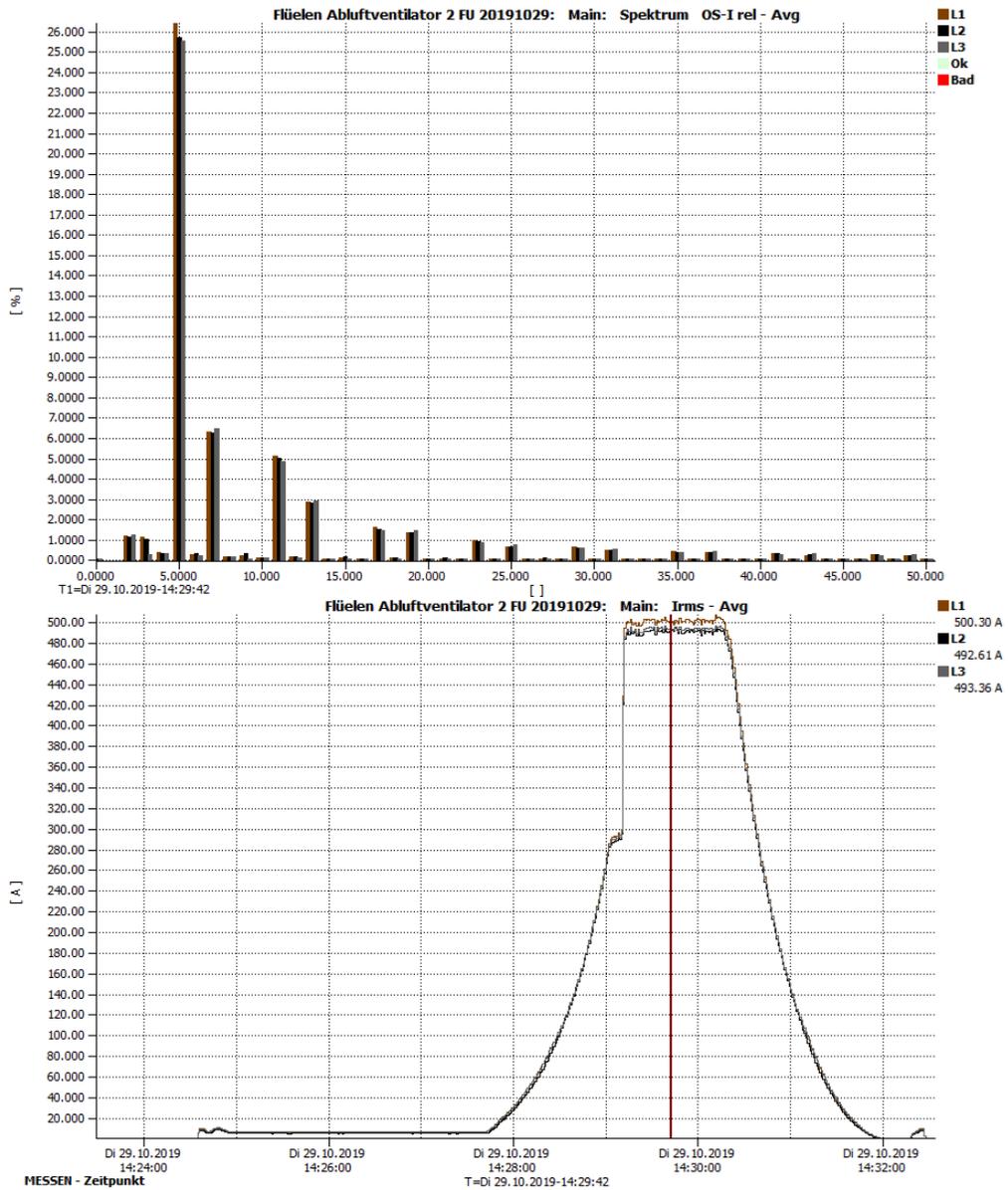


Abb. 110 Oberschwingungsströme relativ bezogen auf Grundschwingungsstrom $I_{50\text{Hz}}$ bei voller Leistung

Messergebnisse bei Direktanlauf

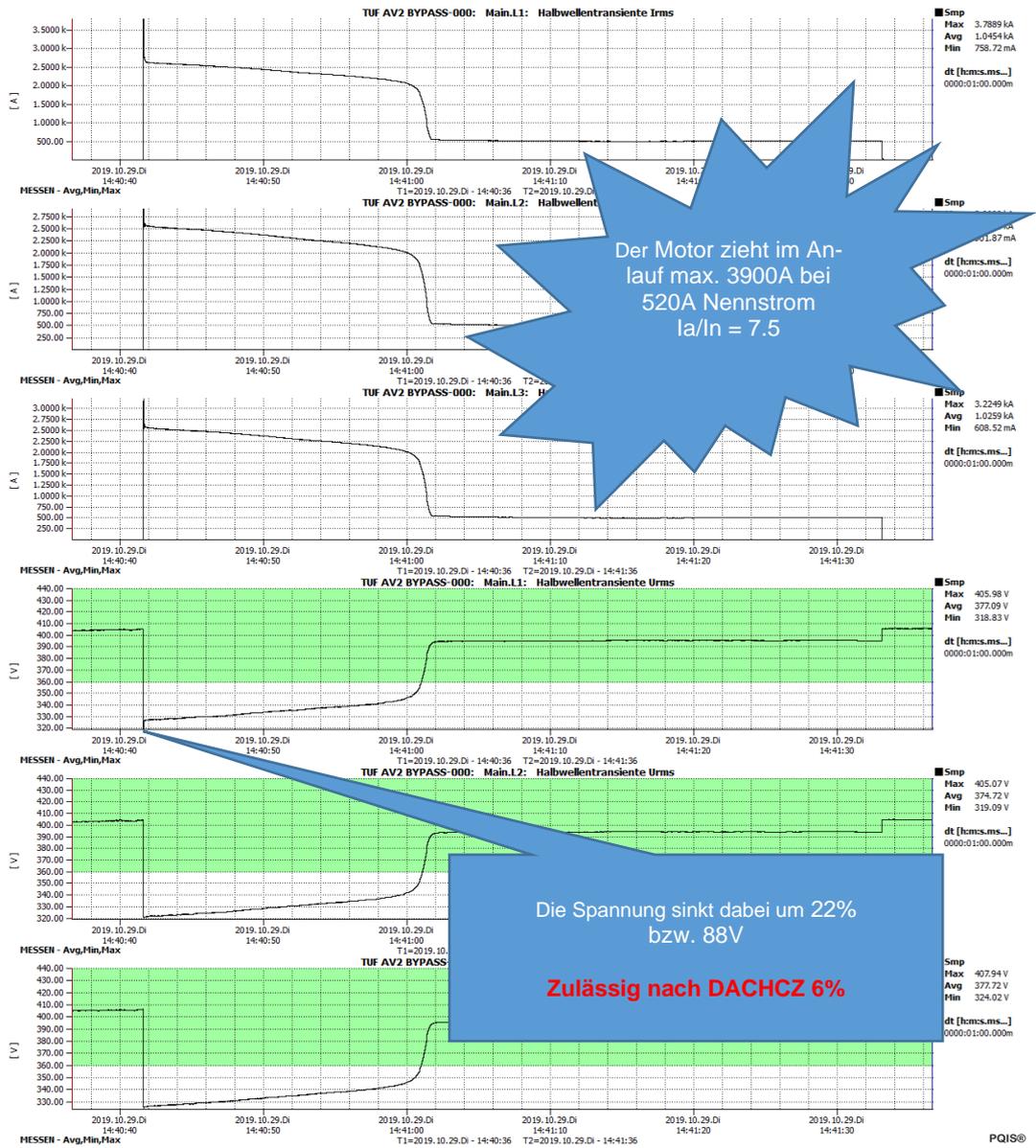


Abb. 111 Strom- und Spannungsverlauf AV2 bei DOL-Start (10ms Effektivwert)

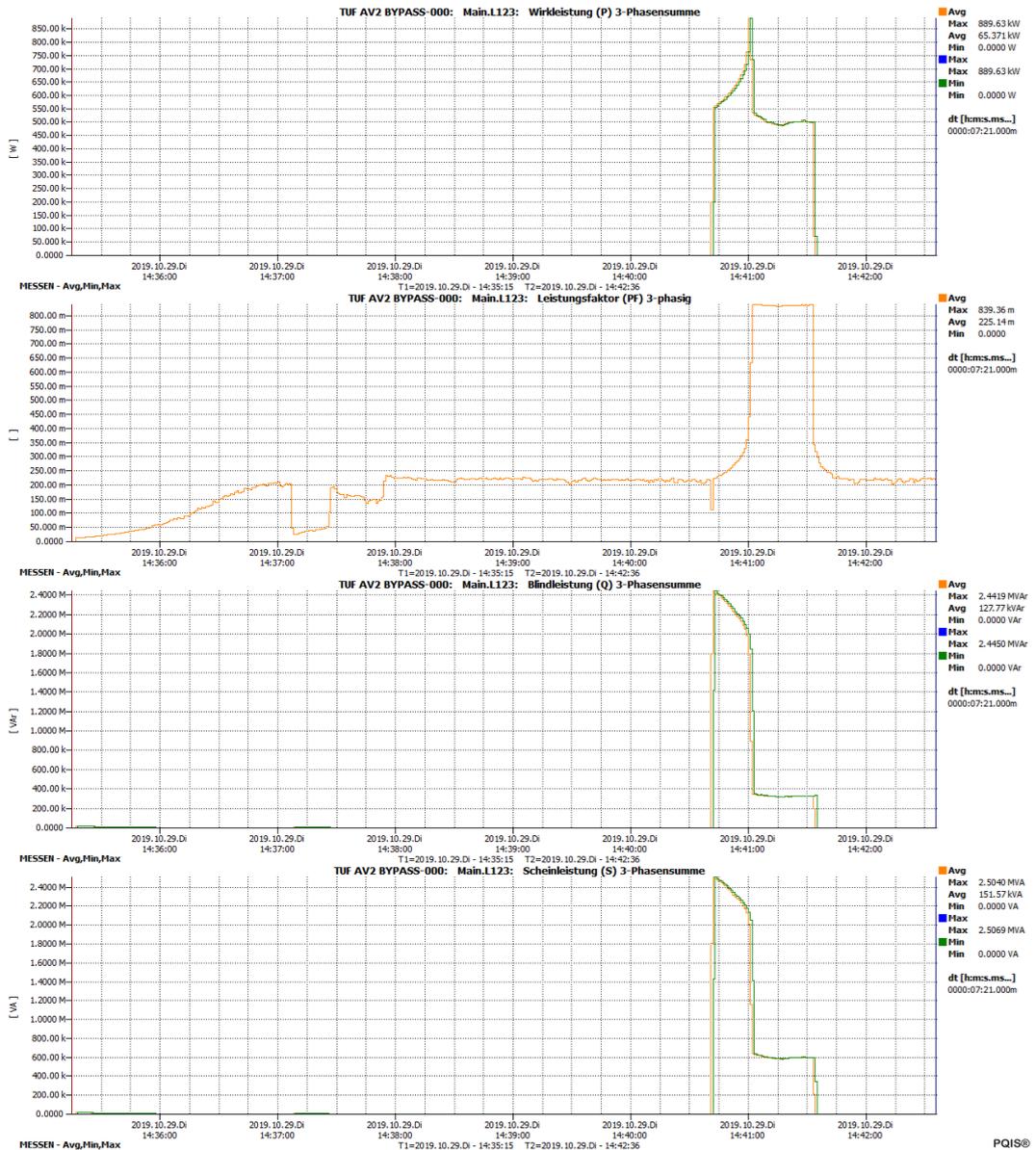


Abb. 112 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV2 bei DOL-Start

III.1.2 Strahlventilator Tunnel Flüelen

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 36 Technische Daten Transformator SV Tunnel Flüelen

Parameter	Wert
Hersteller	Siemens
Typ	4HB5699-4ZA09
Leistung	400 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	420 V
Kurzschlussspannung	3.95%

Technische Daten Antriebsmotor Strahlventilator

Tab. 37 Technische Daten Antriebsmotor SV Tunnel Flüelen

Parameter	Wert
Hersteller	AEG
Motortyp	AGU 160L RA2
Bauform	B14
Spannung	400 V
Strom	39.5 A
Anlaufstrom	332 A(Direktstart)
Verhältnis Anlaufstrom / Nennstrom	8.4
Leistung	22 kW
Cos φ	0.87
Nennzahl	2925 1/min

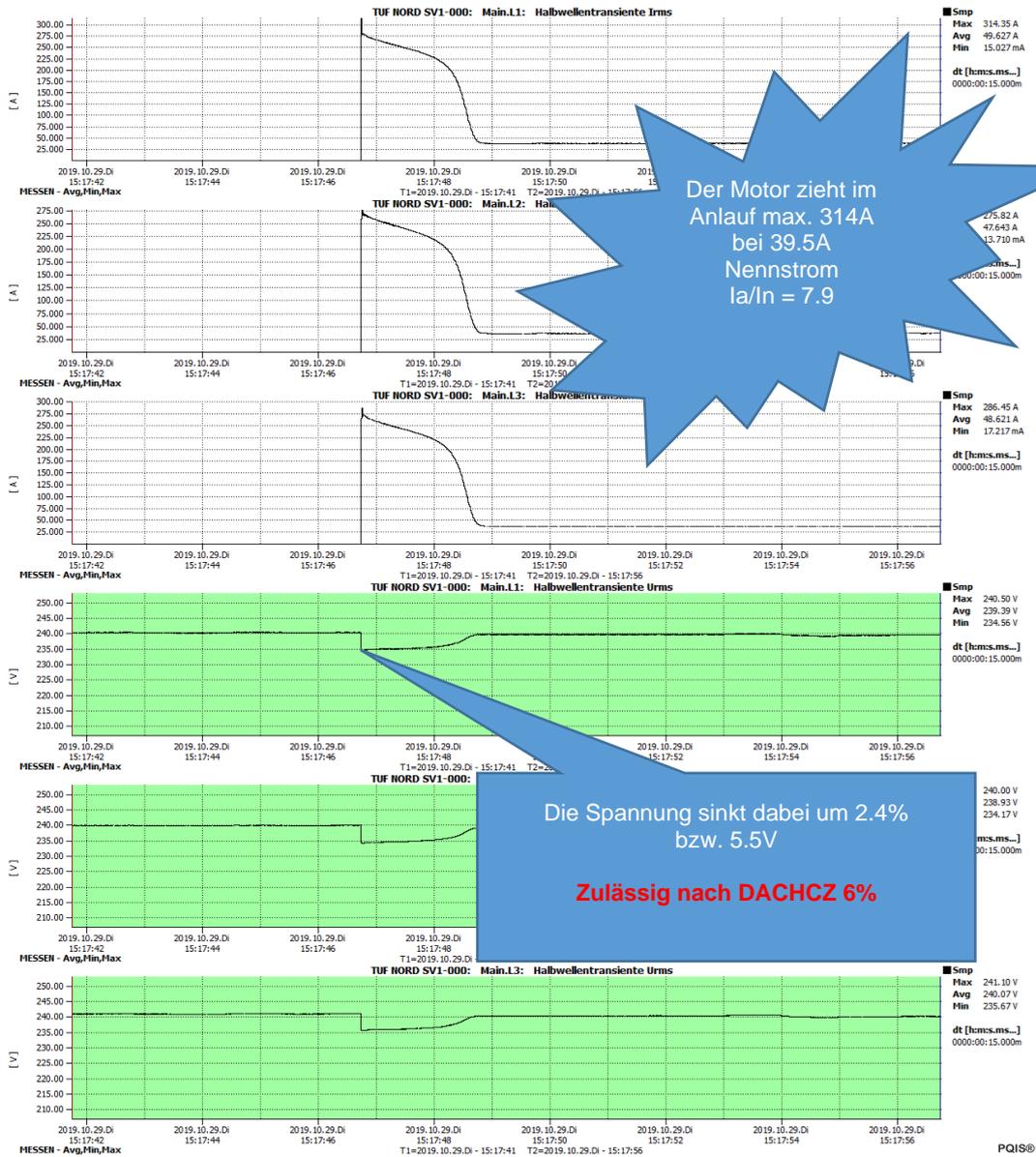


Abb. 113 Strom- und Spannungsverlauf Strahlventilator (DOL-Start)

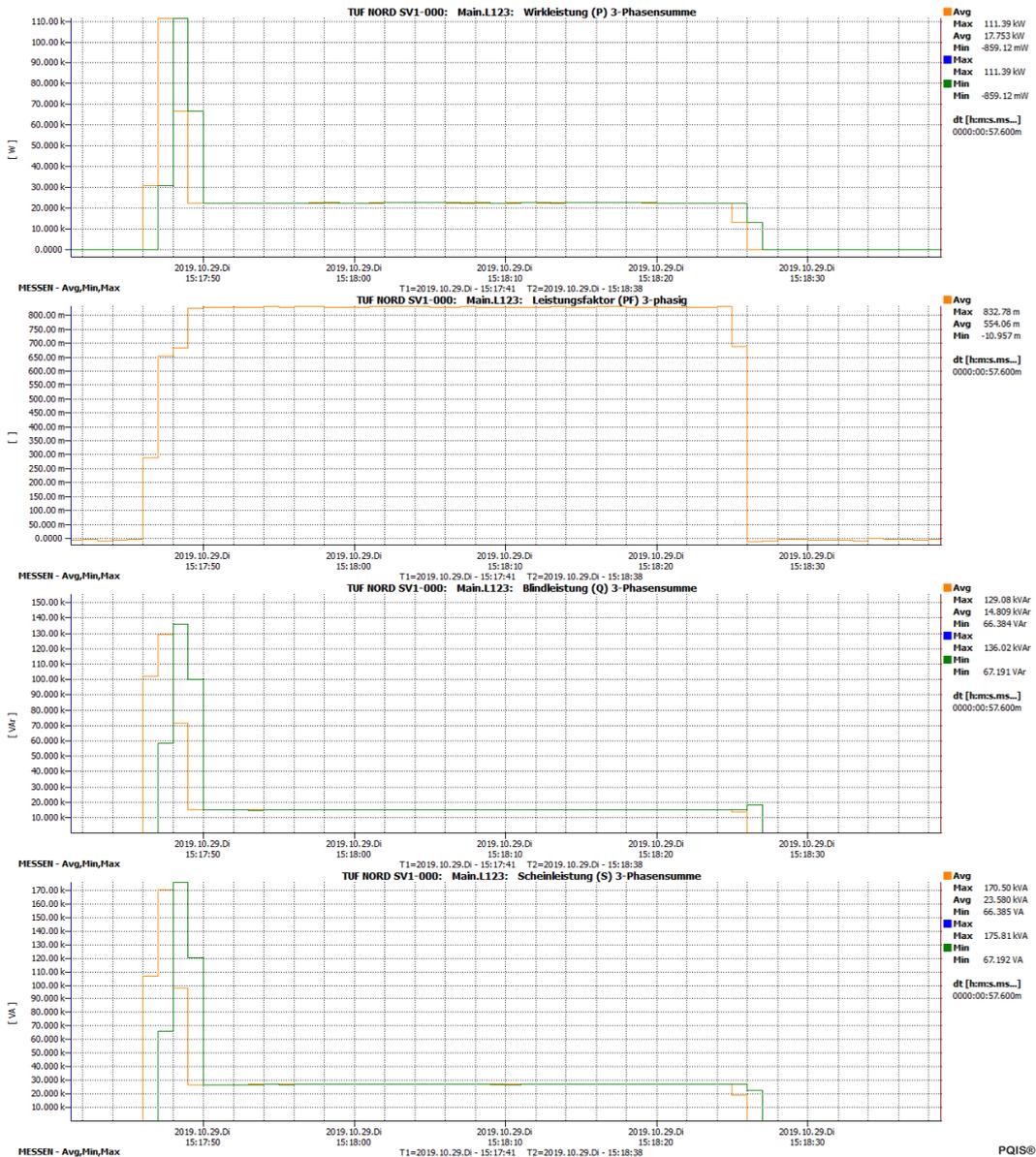


Abb. 114 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung Strahlventilator (DOL-Start)

III.1.3 SISTO Ventilator – «SiSto NORD» Tunnel Flüelen

Technische Daten Antriebsmotor SiSto-Ventilator

Tab. 38 Technische Daten Antriebsmotor SiSto Flüelen Nord

Parameter	Wert
Spannung	400V
Strom	21.8A
Leistung	11kW
Cos φ	0.84 (geschätzt)
Nenn Drehzahl	1500 1/min

Technische Daten Frequenzumrichter SiSto-Ventilator

Tab. 39 Technische Daten FU SiSto Flüelen Nord

Parameter	Wert
Hersteller	ABB
Umrichterfamilie	ACS550
Pulszahl	6

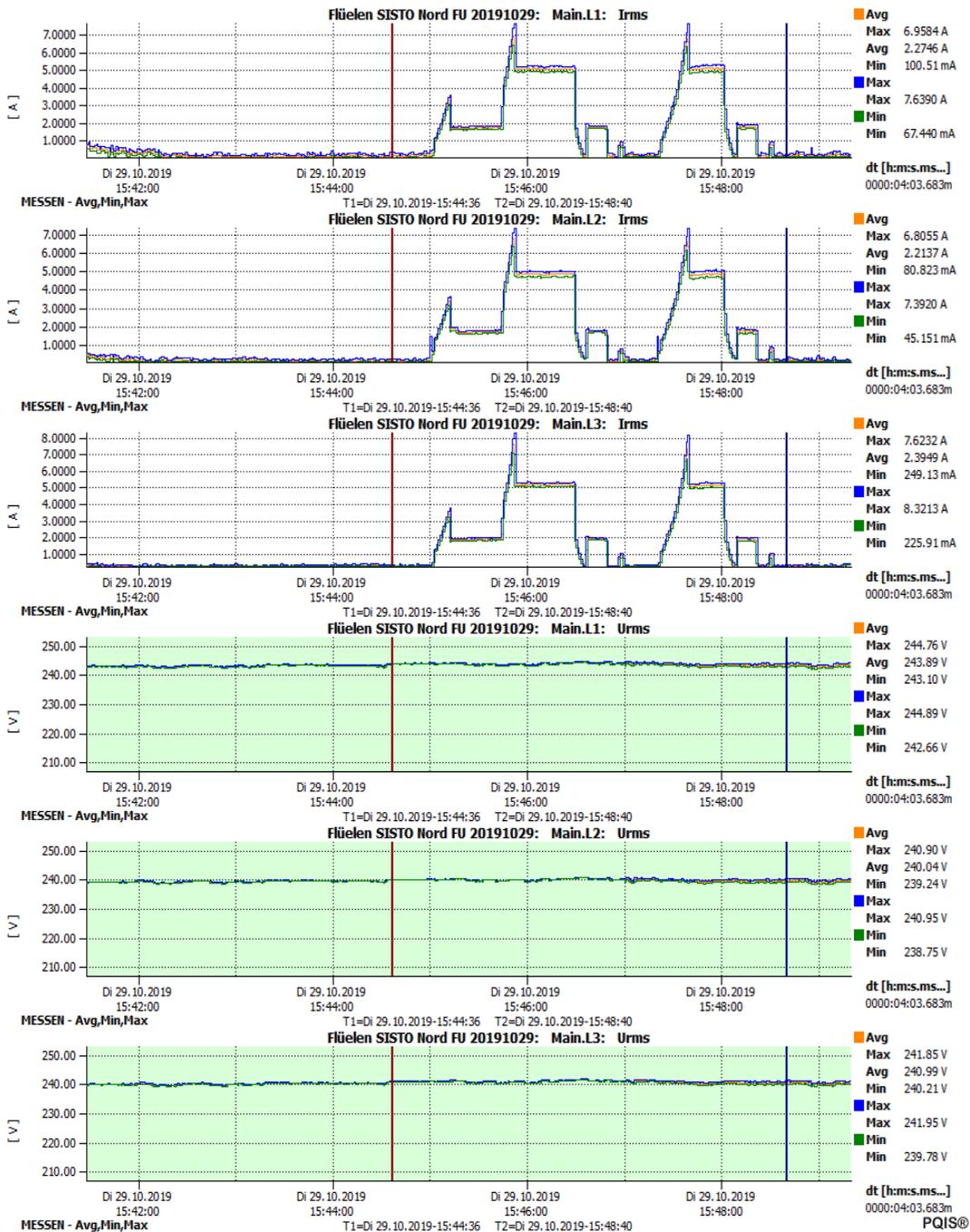
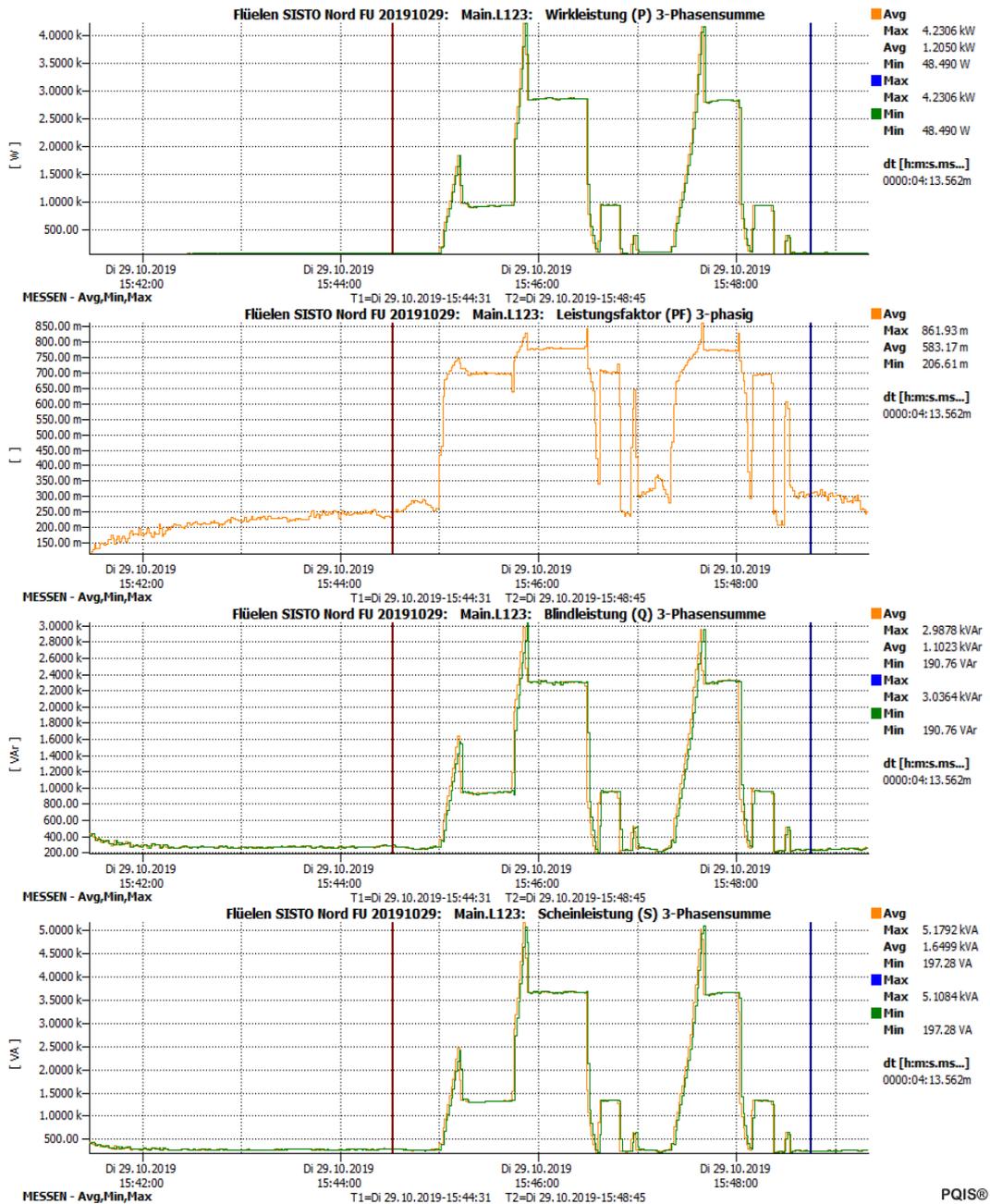


Abb. 115 Strom- und Spannungsverlauf SiSto-Ventilator (FU)



PQIS®

Abb. 116 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung SiSto-Ventilator bei FU-Start

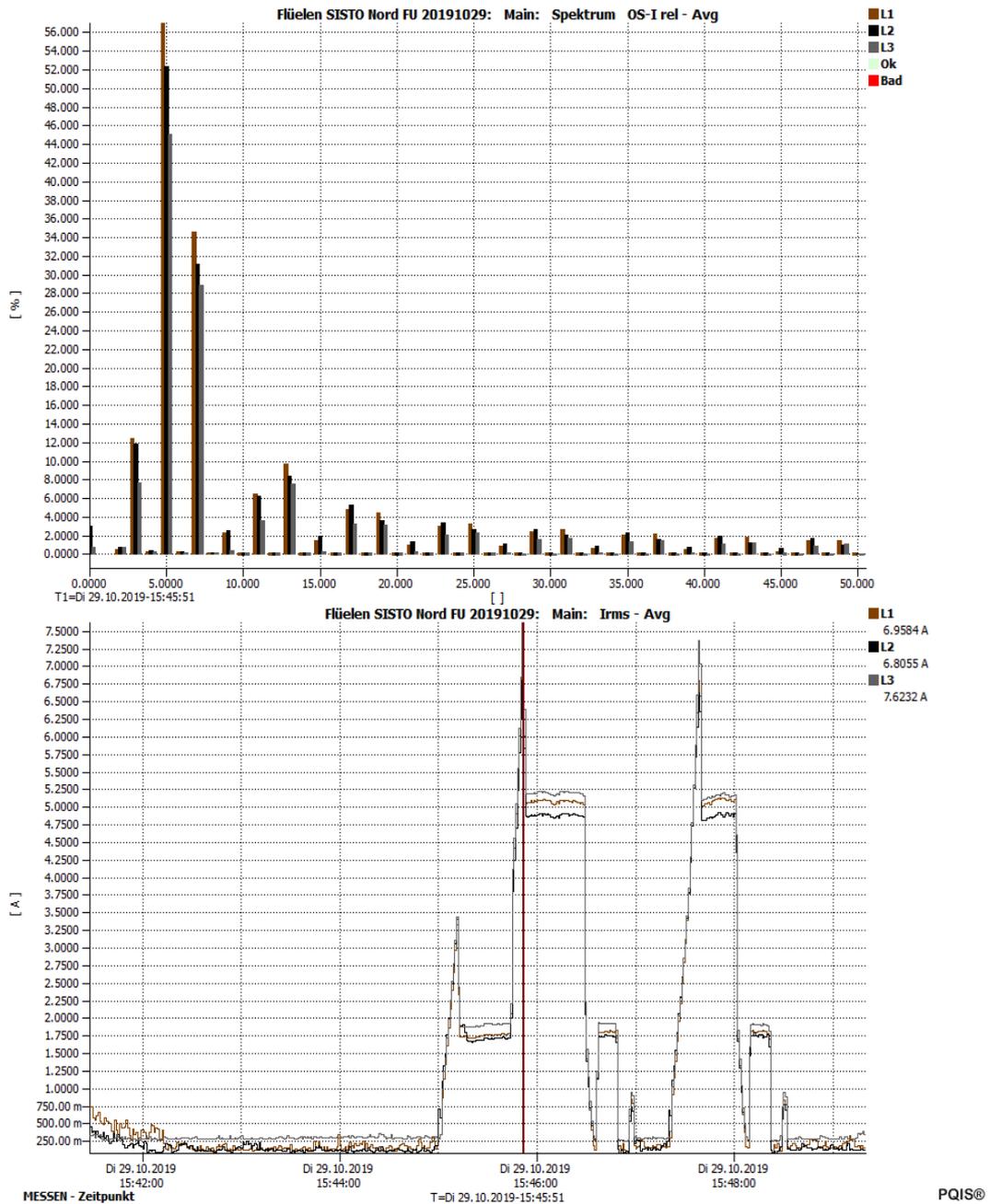


Abb. 117 Oberschwingungsströme relativ bezogen auf Grundschwingungsstrom $I_{50\text{Hz}}$ bei voller Leistung

III.2 Tunnel Sachseln

III.2.1 Abluftventilator Nord AV2 – Tunnel Sachseln (27. November 2019)

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 40 Technische Daten Transformator AV Nord Tunnel Sachseln

Parameter	Wert
Hersteller	ABB
Typ	DTE 1250/24
Leistung	1250 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	420 V
Kurzschlussspannung	5.919 %

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 41 Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator AV Nord Tunnel Sachseln

Parameter	Wert
Hersteller	
Motortyp	
Bauform	
Spannung	400 V
Strom	435 A
Leistung	250 kW
Cos φ	
Nennrehzahl	1491 1/min

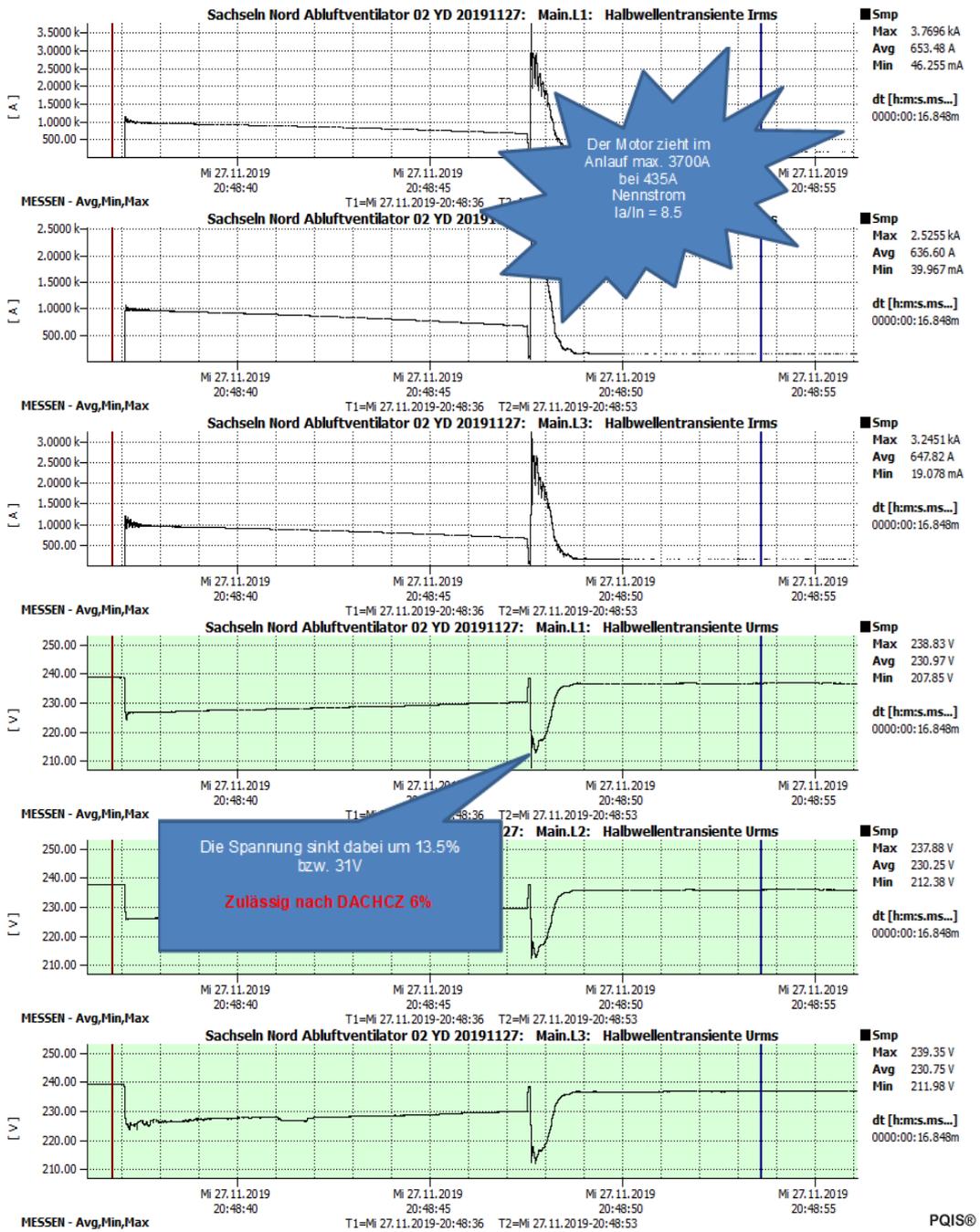


Abb. 118 Strom- und Spannungsverlauf AV2 Nord bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 8.5$

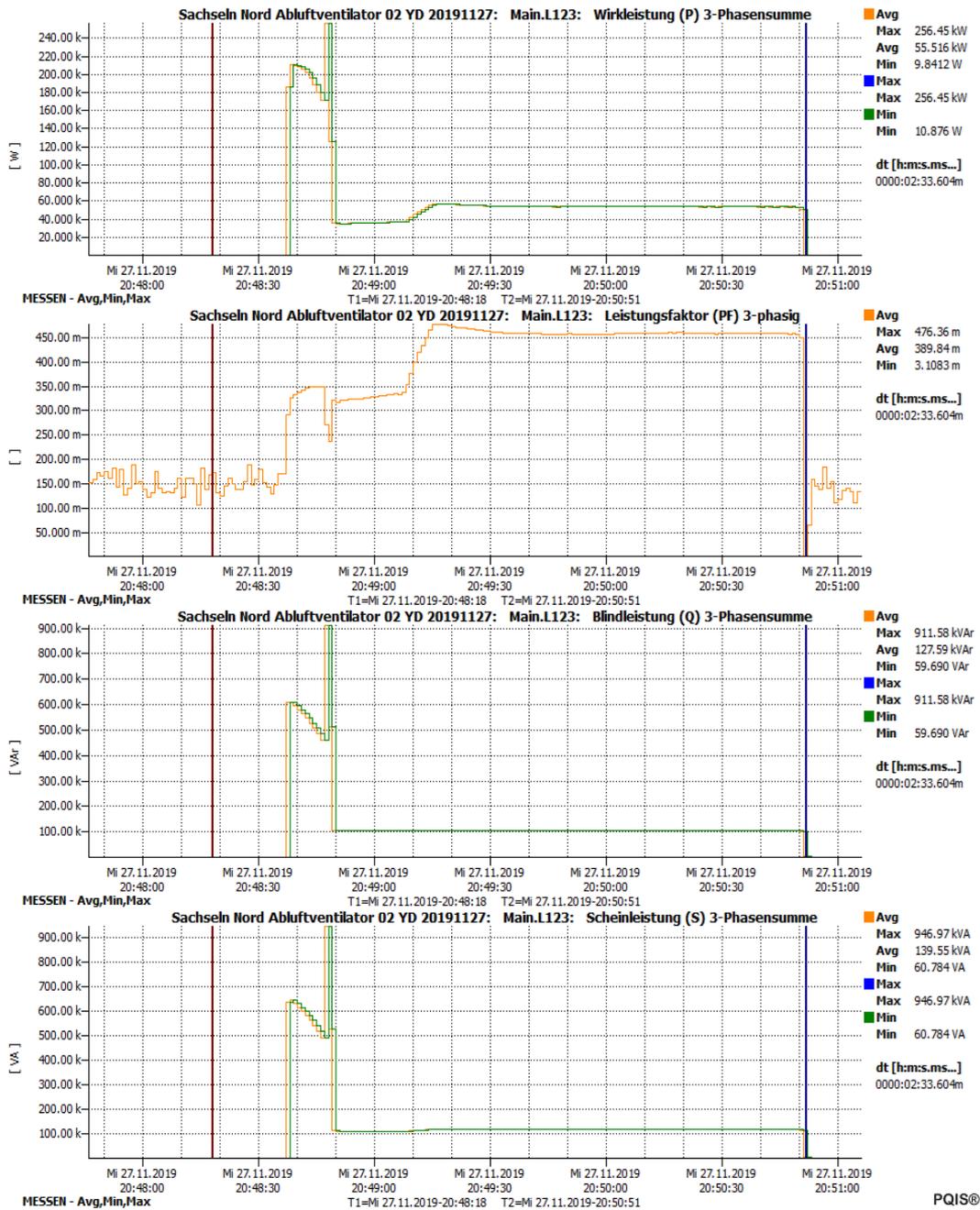


Abb. 119 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV2 Nord bei Y/D-Anlauf

III.2.2 SiSto-Ventilator – Tunnel Sachseln (27. November 2019)

Technische Daten Antriebsmotor SiSto-Ventilator

Tab. 42 Technische Daten Antriebsmotor SiSto-Ventilator Sachseln

Parameter	Wert
Motortyp	Dahlander (50%/100%)
Bauform	
Spannung	400 V
Strom	17.9 A / 46 A
Leistung	6.5 kW / 25 kW
Cos φ	0.62 / 0.87
Nenn Drehzahl	490/980 1/min

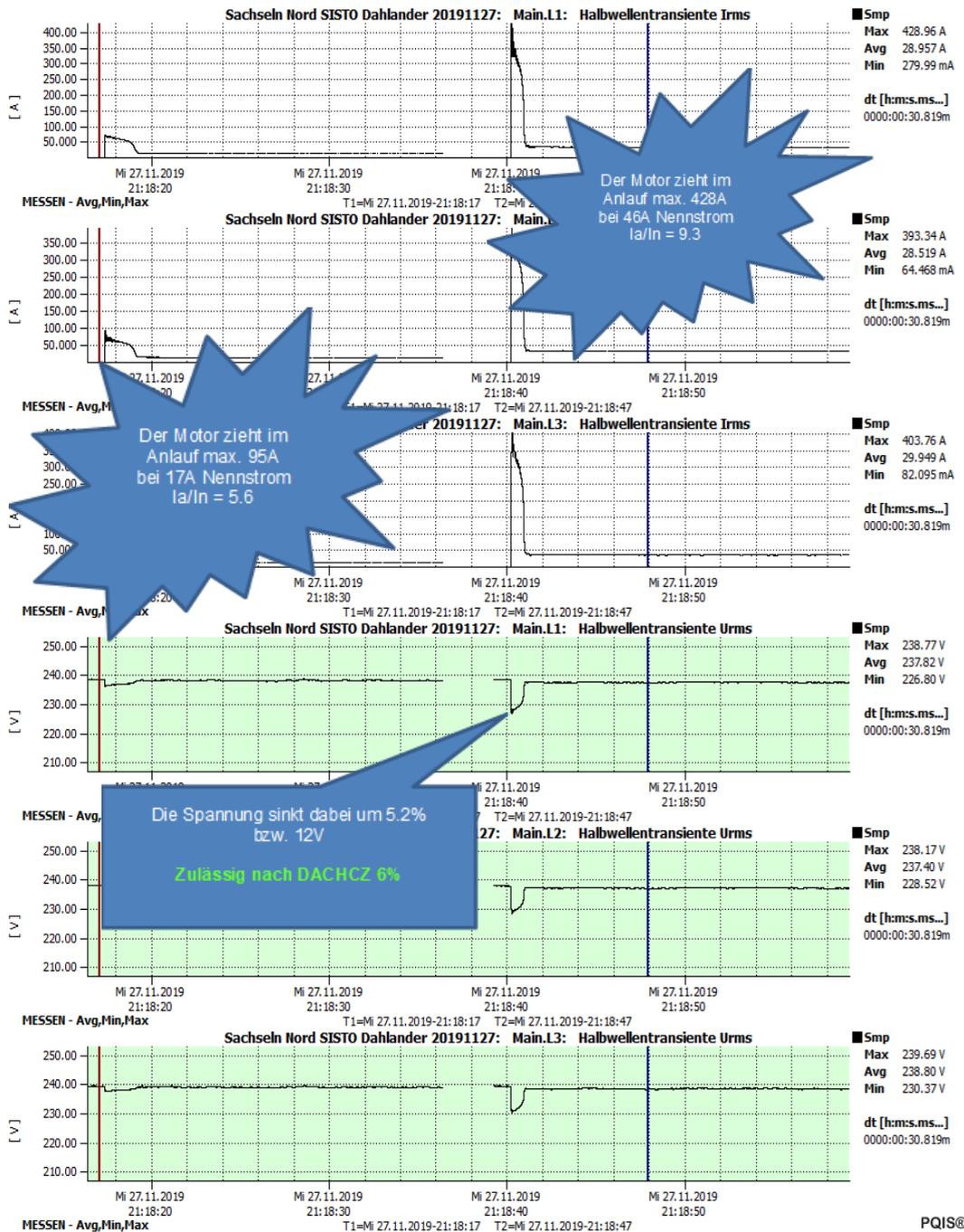


Abb. 120 Strom- und Spannungsverlauf SiSto-Ventilator mit Anlauf Dahlander

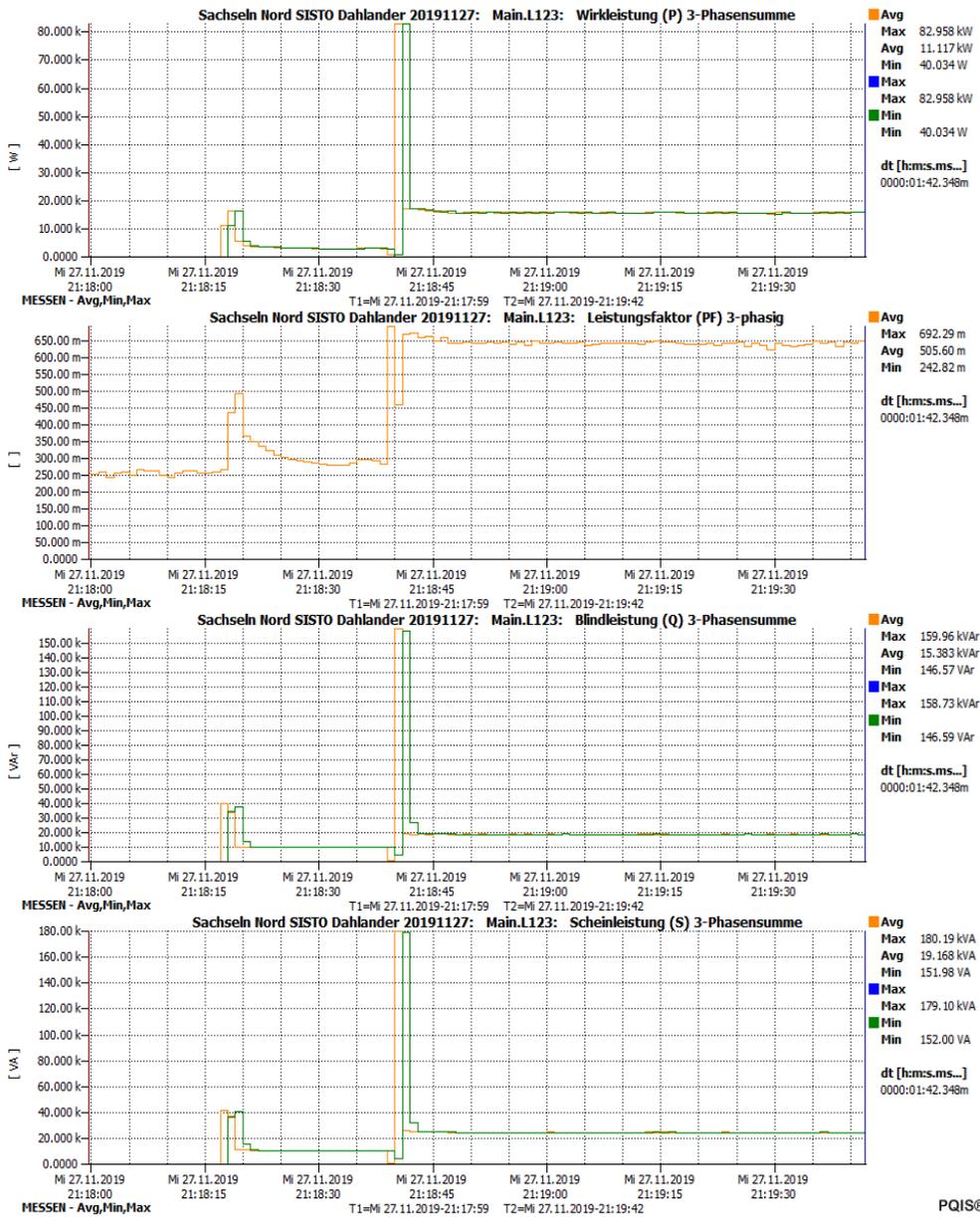


Abb. 121 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung SiSto-Ventilator mit Anlauf Dahlander

III.2.3 Abluftventilator Süd AV1 – Tunnel Sachseln (15. Dezember 2020)

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Gemäss Tab. 40

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Gemäss Tab. 41

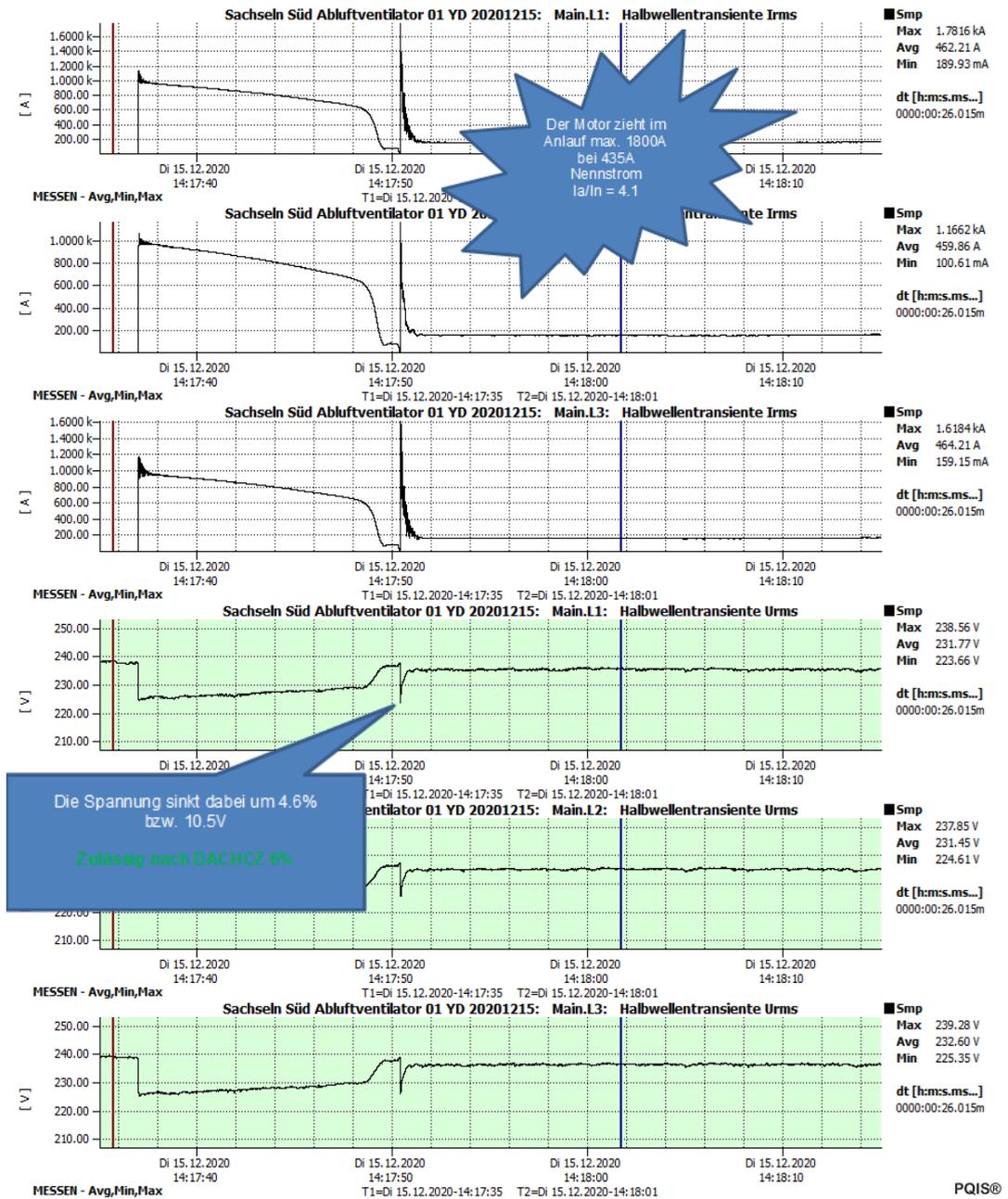


Abb. 122 Strom- und Spannungsverlauf AV1 Süd bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 4.1$

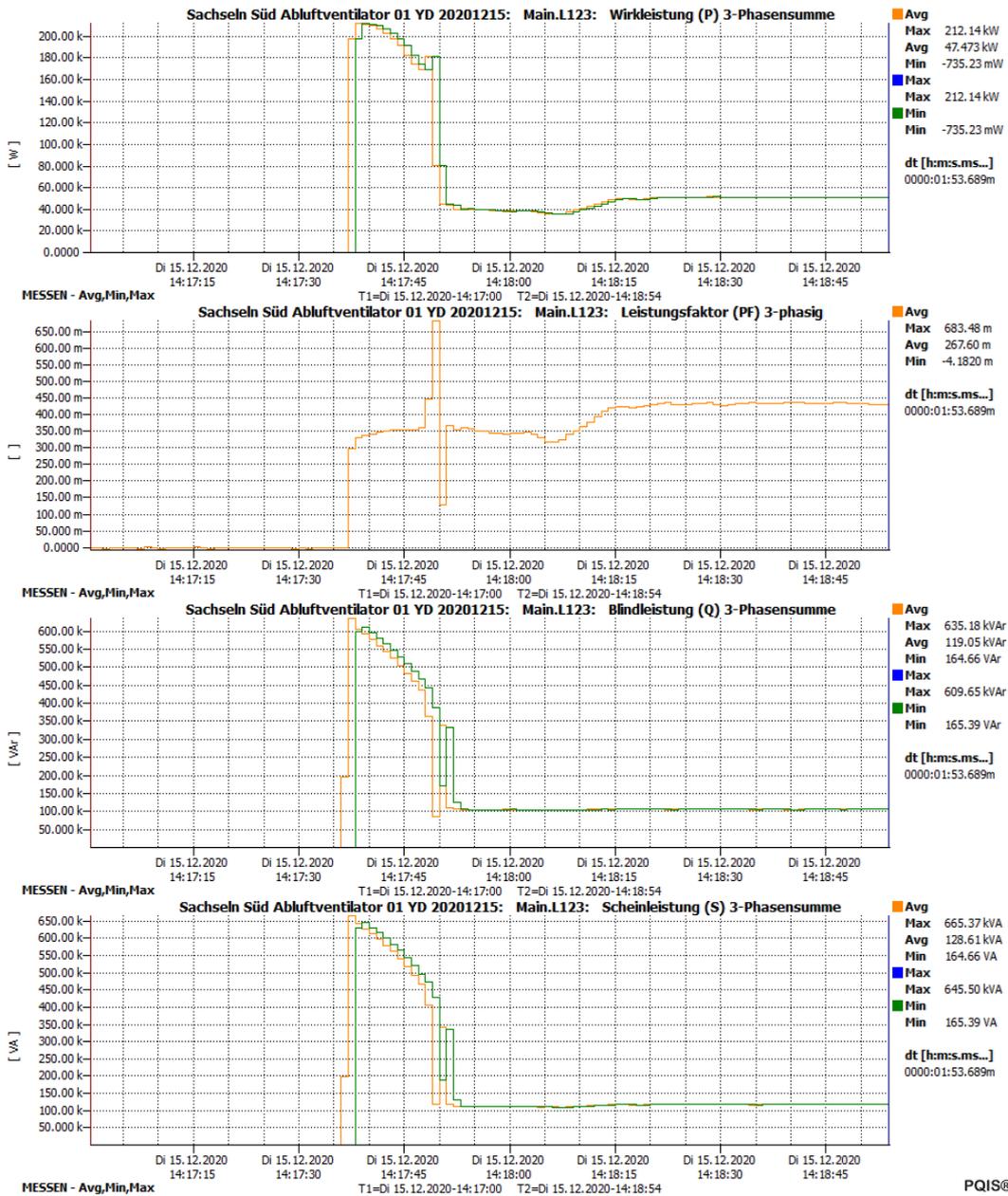


Abb. 123 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV1 Süd bei Y/D-Anlauf

III.2.4 Beurteilung und Zusammenfassung Y/D-Anlauf bei AV Tunnel Sachseln

Bei den Messungen vom 15. Dezember 2020 wurde festgestellt, dass der Grund für das aussergewöhnlich hohe Verhältnis von Anlaufstrom/Nennstrom dadurch zustande kommt, dass der Motor bei den Messungen vom 27. November 2019 zu früh vom Stern auf Dreieck umgeschaltet wurde.

Messungen vom 27. November 2019



Abb. 124 Ursprünglicher Stromverlauf beim Y/D-Anlauf bei AV Tunnel Sachseln

Messungen vom 15. Dezember 2020

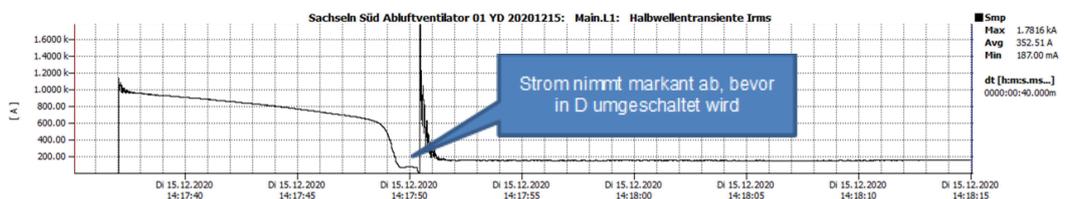


Abb. 125 Optimierter Stromverlauf beim Y/D-Anlauf bei AV Tunnel Sachseln

Im Endeffekt zeigten die Messungen vom 15. Dezember 2020, dass die Zeiteinstellungen für die Y/D Umschaltung im Tunnel Sachseln ungenügend waren, d.h. auch bei der IBN von Y/D Umschaltungen muss unbedingt darauf geachtet werden, dass das typische Verhalten eines Y/D Anlaufes auch in der Messung ersichtlich ist. Nur dann sind typische Werte von Anlaufstrom zu Nennstrom zu erwarten.

III.3 Tunnel Islisberg

III.3.1 Abluftventilator 1.1 – Tunnel Islisberg (17. Dezember 2019)

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 43 Technische Daten Transformator AV Tunnel Islisberg

Parameter	Wert
Hersteller	Areva
Typ	DCU 4234
Leistung	1600 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	720V
Kurzschlussspannung	5.91 %

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 44 Technische Daten Antriebsmotor AV Tunnel Islisberg

Parameter	Wert
Hersteller	Loher
Motortyp	ANPA-450LN-0C
Bauform	
Spannung	690 V
Strom	840 A
Leistung	850 kW
Cos φ	0.87
Nennrehzahl	1493 1/min

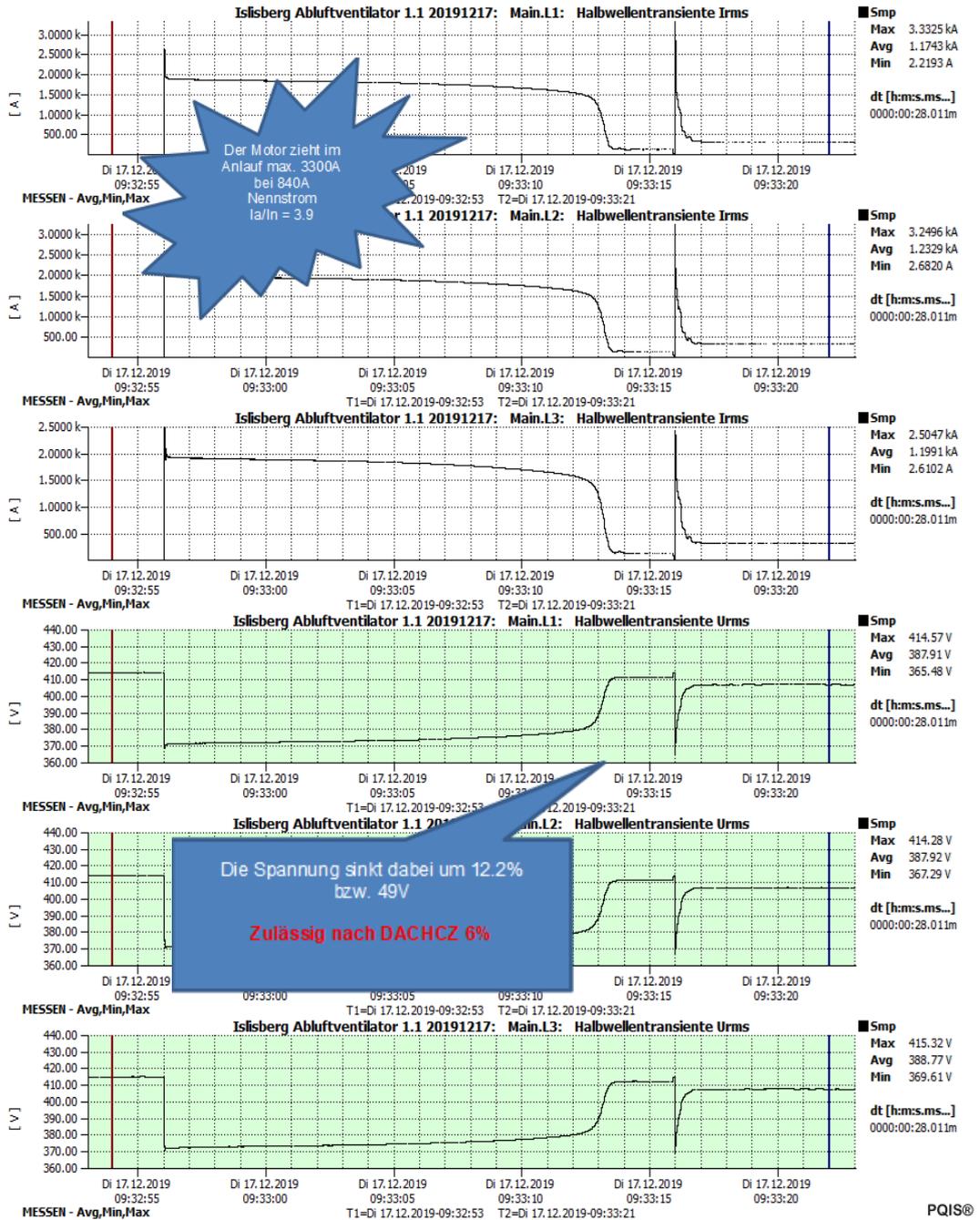


Abb. 126 Strom- und Spannungsverlauf AV 1.1 bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 3.9$

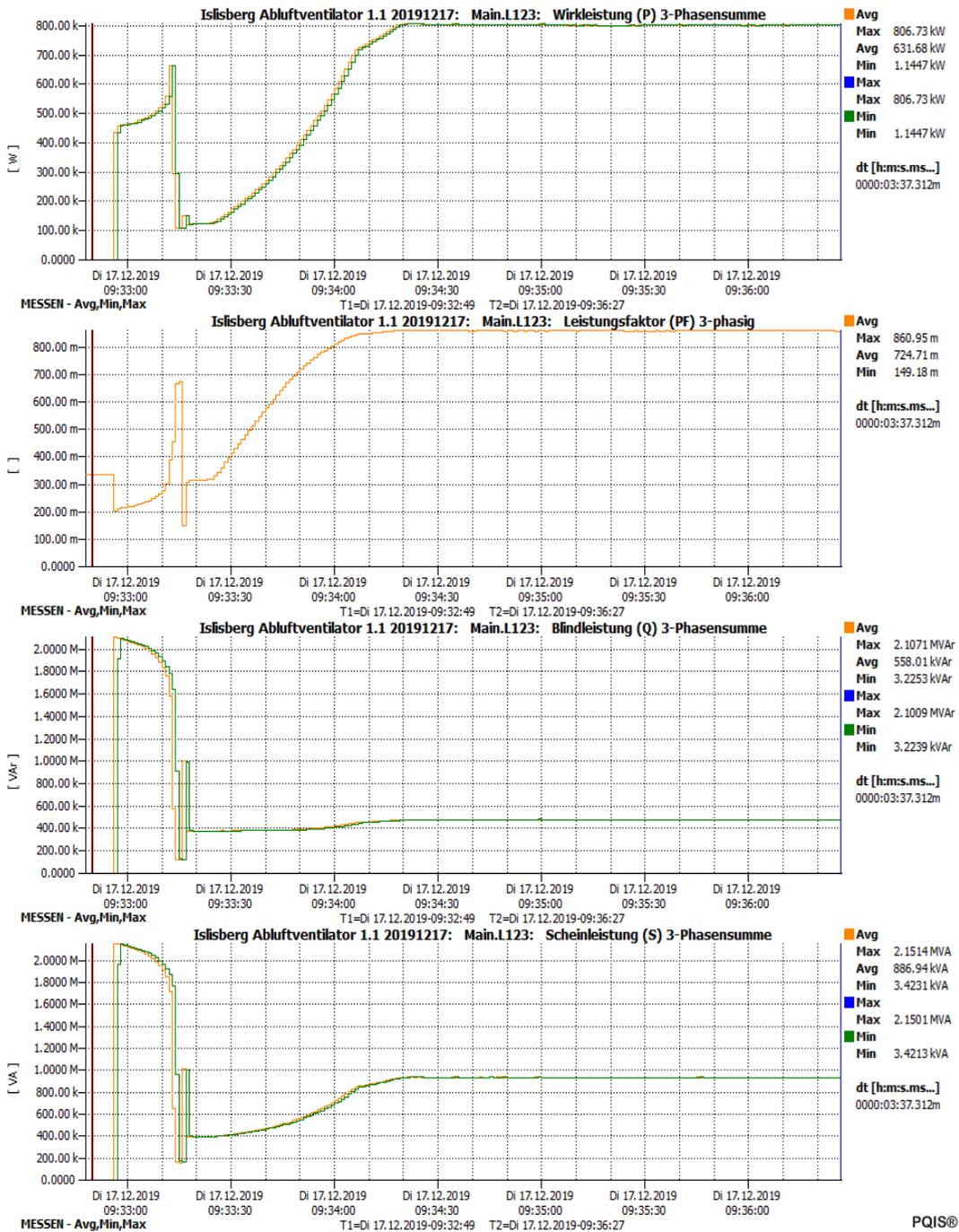


Abb. 127 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV 1.1 bei Y/D-Anlauf

III.3.2 Abluftventilator 1.2 – Tunnel Isisberg (17. Dezember 2019)

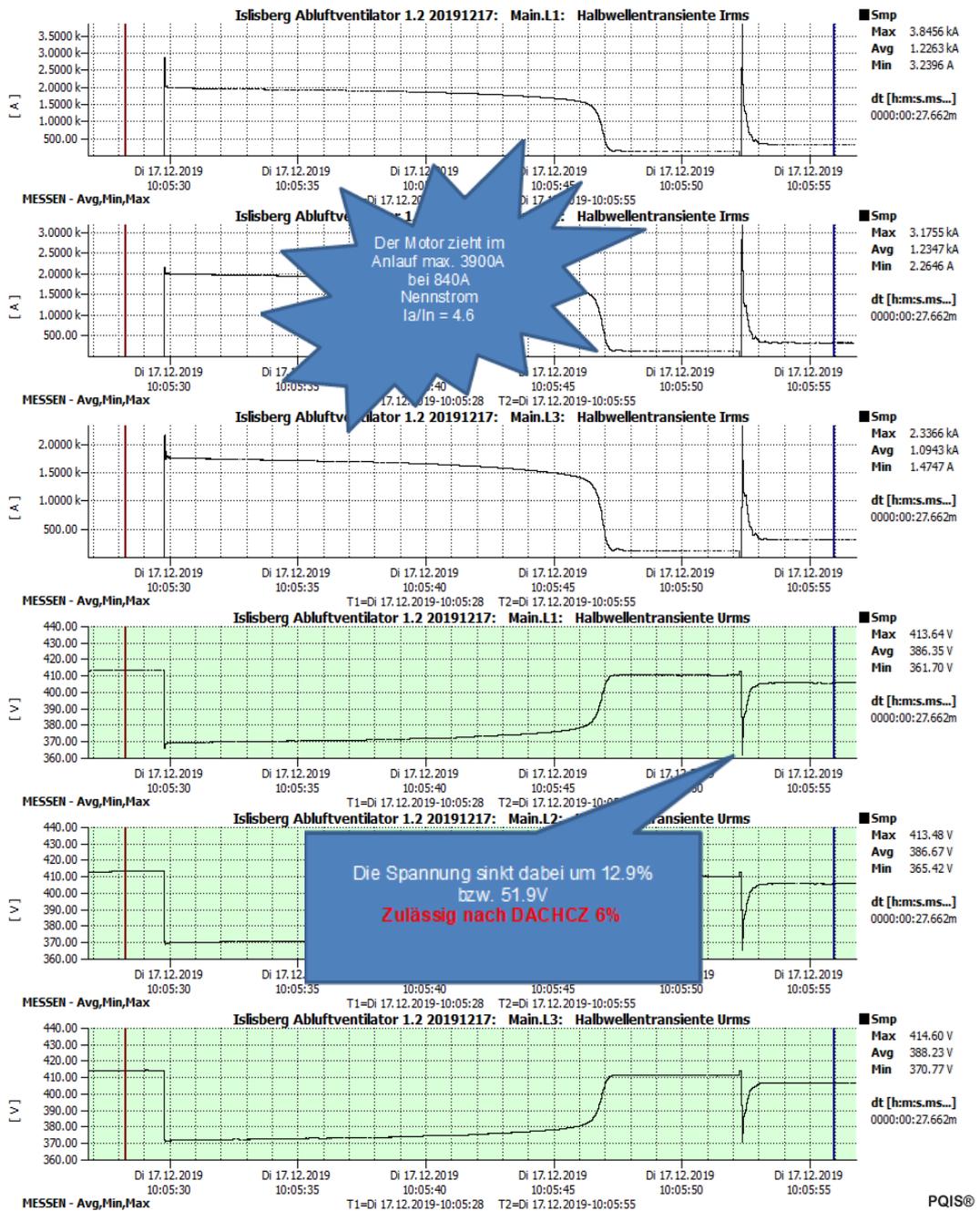


Abb. 128 Strom- und Spannungsverlauf AV 1.2 bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 4.6$

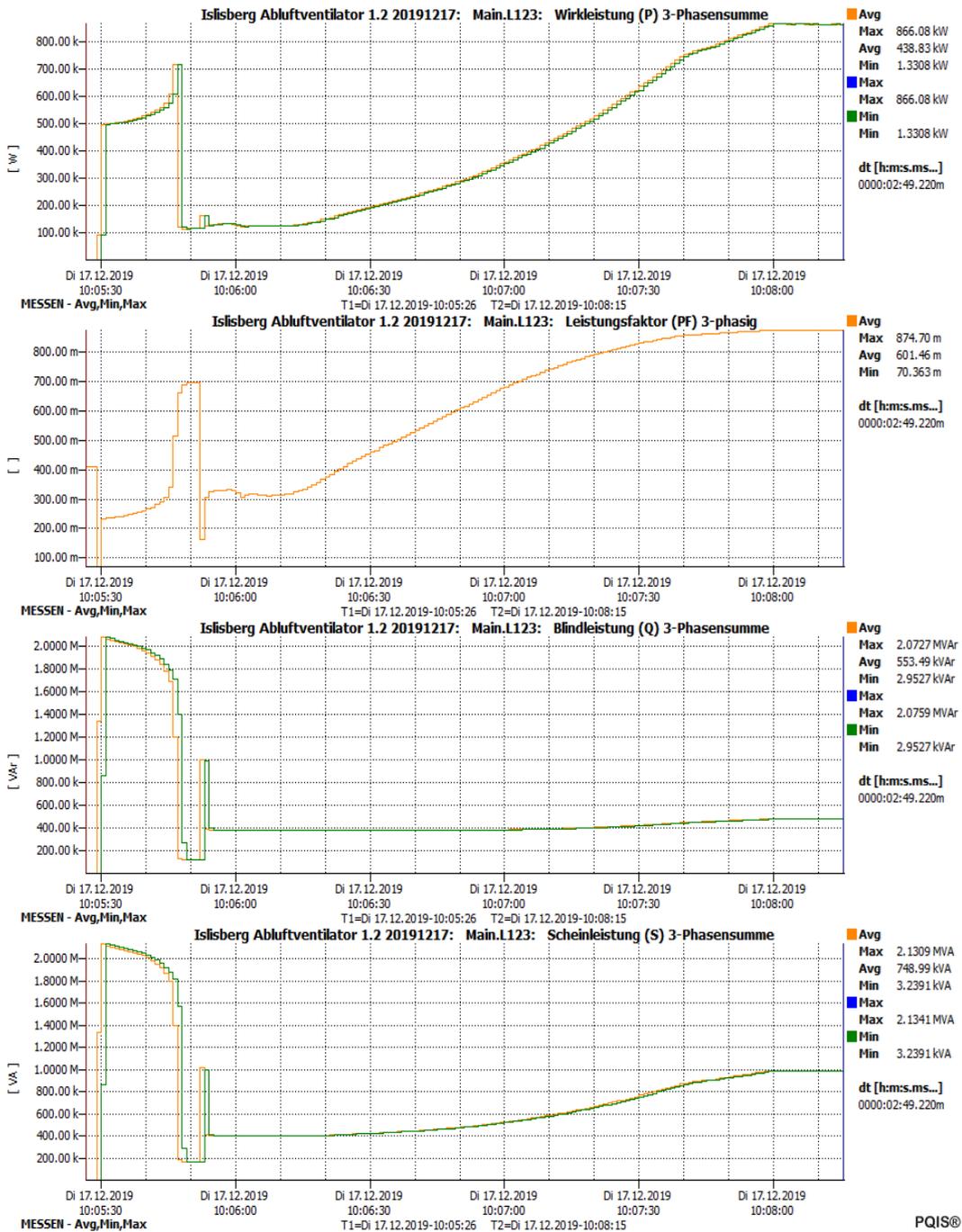


Abb. 129 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV 1.2 bei Y/D-Anlauf

III.3.3 Strahlventilator SV1 Luzern Tunnel Islisberg

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 45 Technische Daten Transformator SV1 Tunnel Islisberg

Parameter	Wert
Hersteller	Areva
Typ	DCU 3934
Leistung	800 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	720V
Kurzschlussspannung	6.12 %

Technische Daten Antriebsmotor Strahlventilator

Tab. 46 Technische Daten Antriebsmotor SV1 Tunnel Islisberg

Parameter	Wert
Hersteller	VEM
Motortyp	K10R 280S4 F300
Bauform	B14
Spannung	690 V
Strom	94 A
Anlaufstrom	780 A
Verhältnis Anlaufstrom / Nennstrom	8.3
Leistung	90 kW
Cos φ	0.85
Nennrehzahl	1485 1/min

Die Spannung sinkt dabei um 8.9%

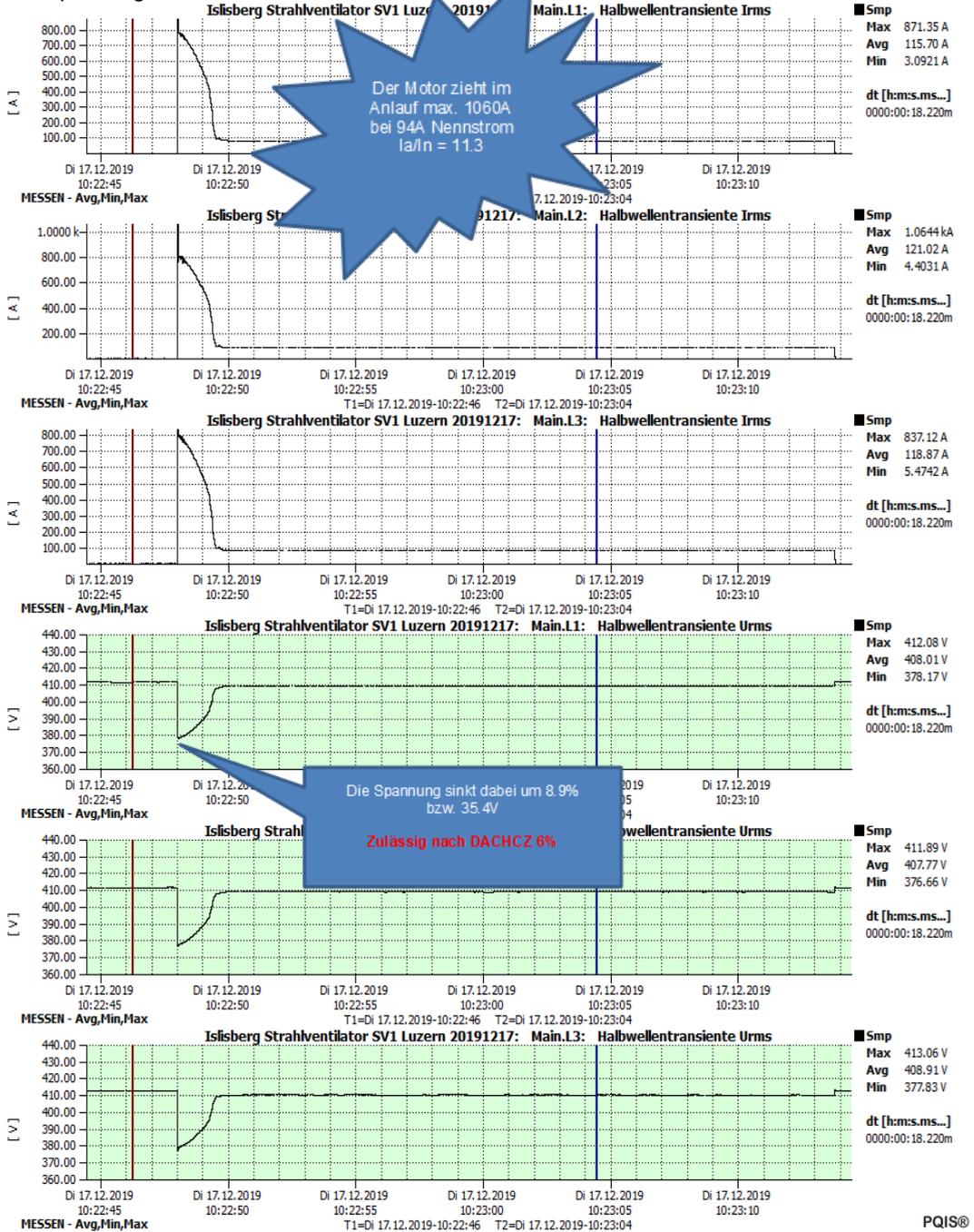


Abb. 130 Strom- und Spannungsverlauf Strahlventilator (DOL-Start)

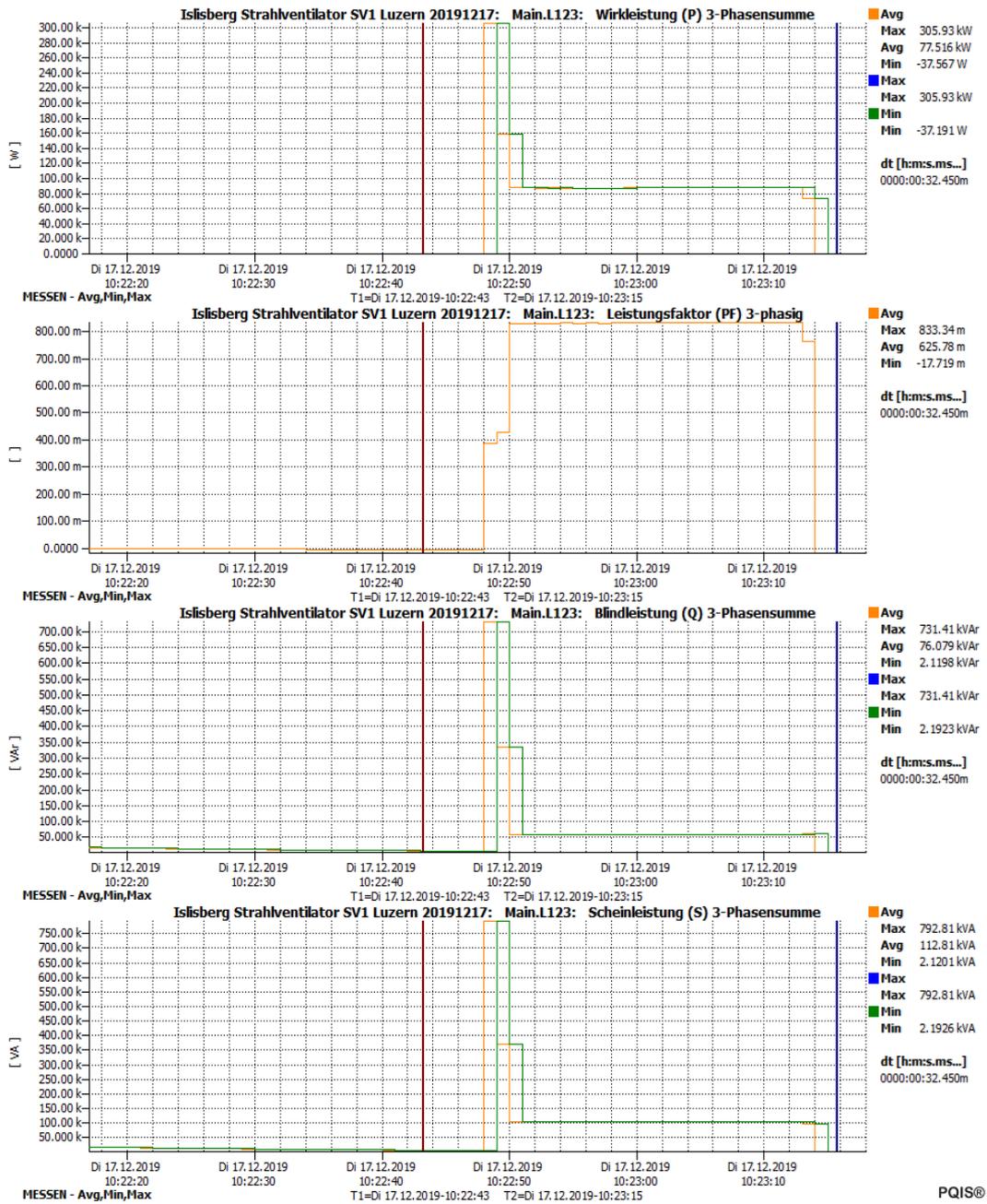


Abb. 131 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung Strahlventilator (DOL-Start)

III.3.4 Abluftventilator 1.1 – Tunnel Islisberg (15. Dezember 2020)

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 47 Technische Daten Transformator AV1.1 Tunnel Islisberg

Parameter	Wert
Hersteller	Areva
Typ	DCU 4234
Leistung	1600 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	720 V
Kurzschlussspannung	5.91%

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 48 Technische Daten Antriebsmotor AV1.1 Tunnel Islisberg

Parameter	Wert
Hersteller	Loher
Motortyp	ANPA-450LN-0C
Spannung	690 V
Strom	840 A
Leistung	850 kW
Cos φ	0.87
Nennzahl	1493 1/min

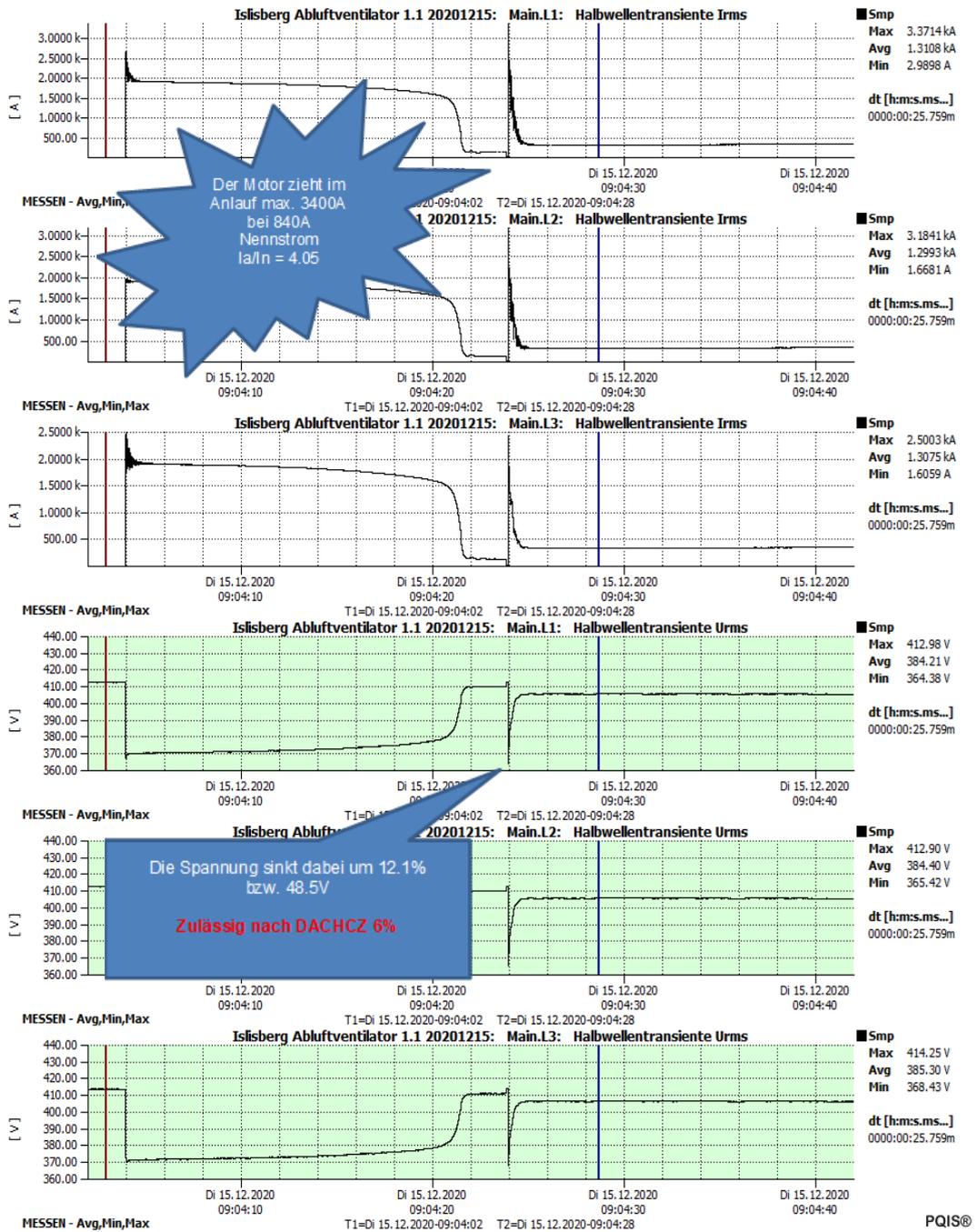


Abb. 132 Strom- und Spannungsverlauf AV 1.1 bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 4.05$

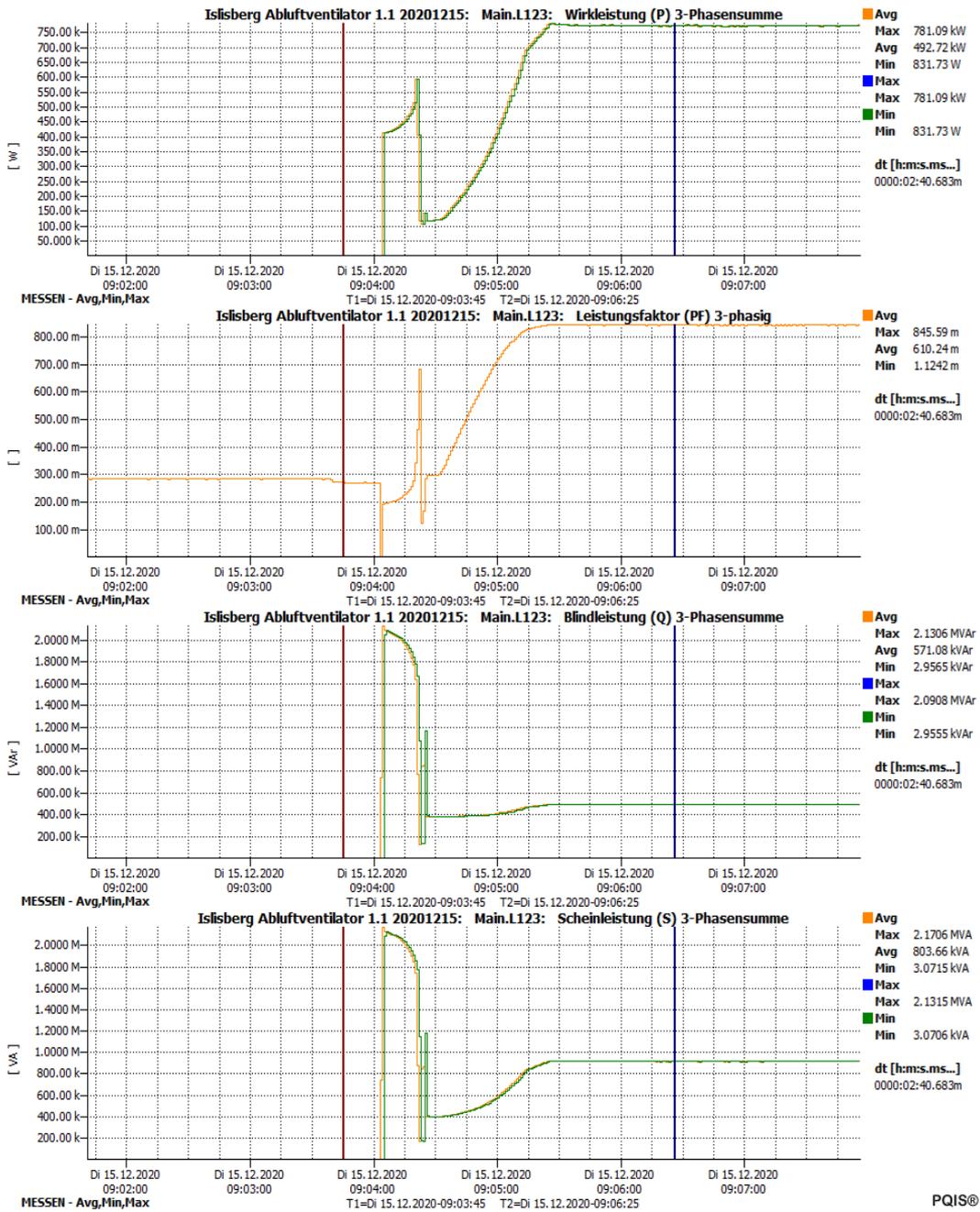


Abb. 133 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV 1.1 bei Y/D-Anlauf

III.3.5 Abluftventilator 1– Tunnel Uetliberg (15. Dezember 2020)

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 49 Technische Daten Antriebsmotor AV Tunnel Uetliberg

Parameter	Wert
Hersteller	Loher
Motortyp	ANPA-450LN-0C
Spannung	690 V
Strom	840 A
Leistung	850 kW
Cos φ	0.87
Nenn Drehzahl	1493 1/min

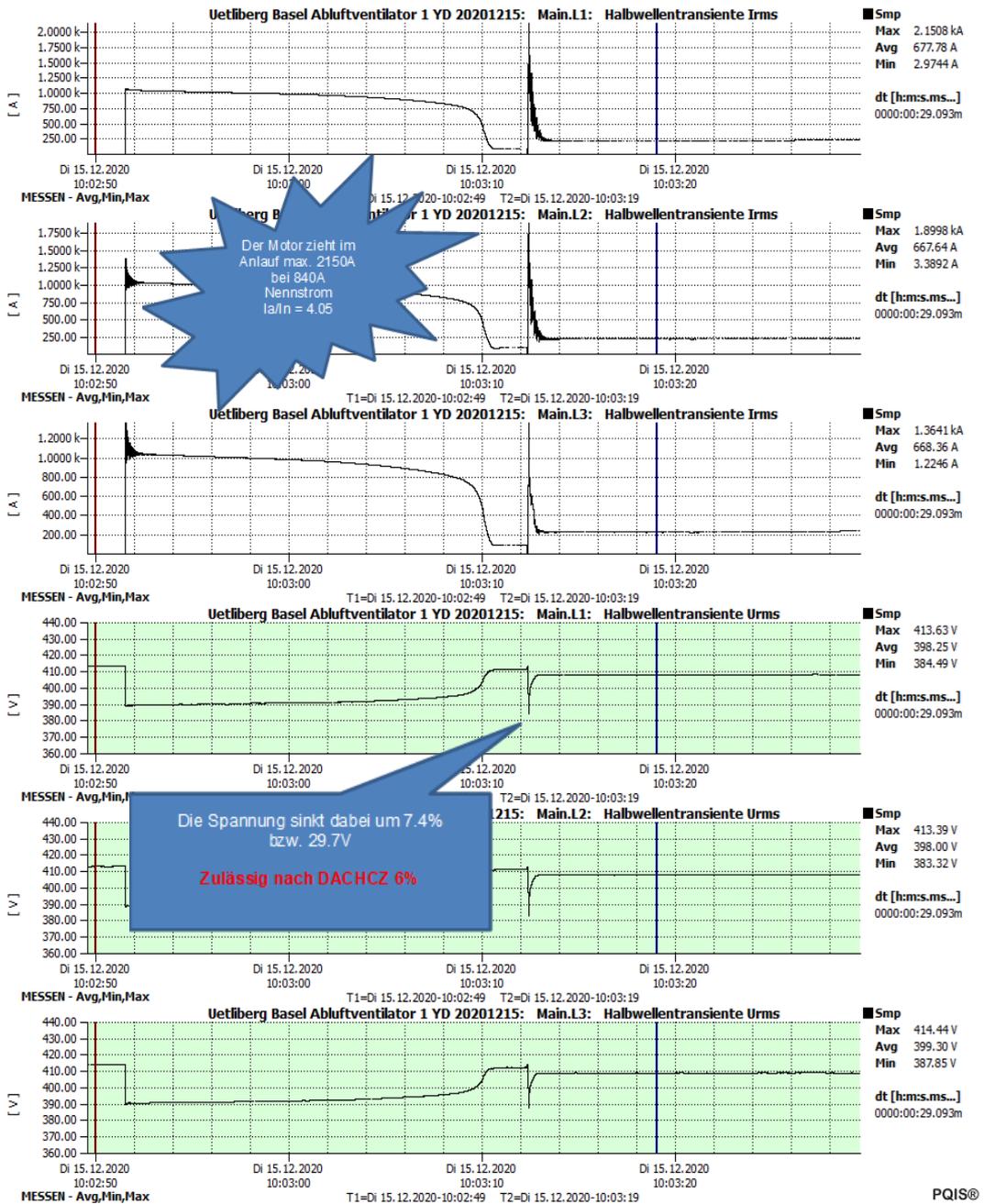


Abb. 134 Strom- und Spannungsverlauf AV 1 bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 4.05$

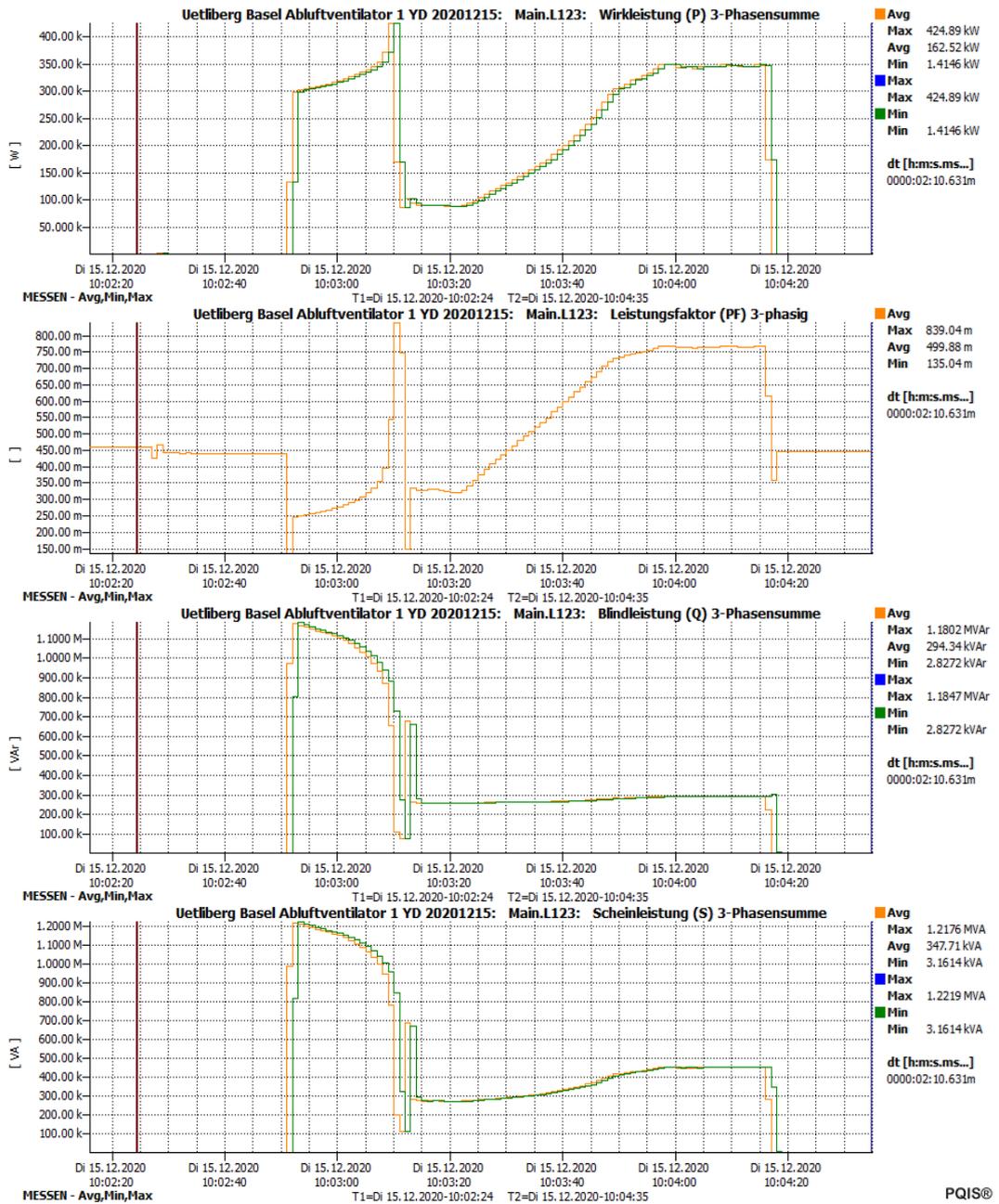


Abb. 135 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV 1 bei Y/D-Anlauf

III.3.6 Abluftventilator 1– Tunnel Gubrist (09. Dezember 2020)

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 50 Technische Daten Antriebsmotor AV Tunnel Gubrist

Parameter	Wert
Hersteller	Loher
Motortyp	ANPA-450LN-0C
Spannung	690 V
Strom	840 A
Leistung	850 kW
Cos φ	0.87
Nenndrehzahl	1493 1/min

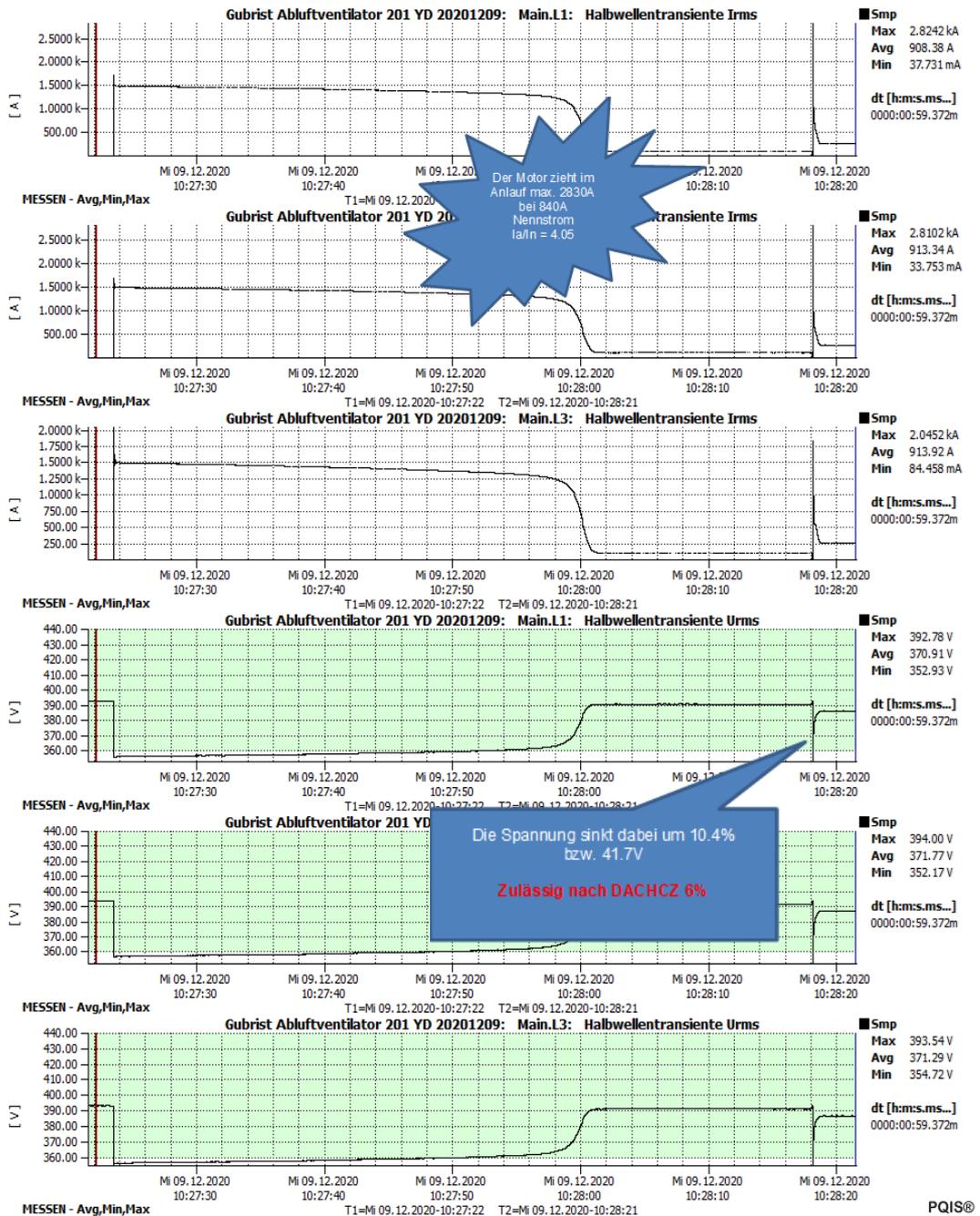


Abb. 136 Strom- und Spannungsverlauf AV 1 bei Start mittels Y/D-Anlauf $I_a/I_n = 4.05$

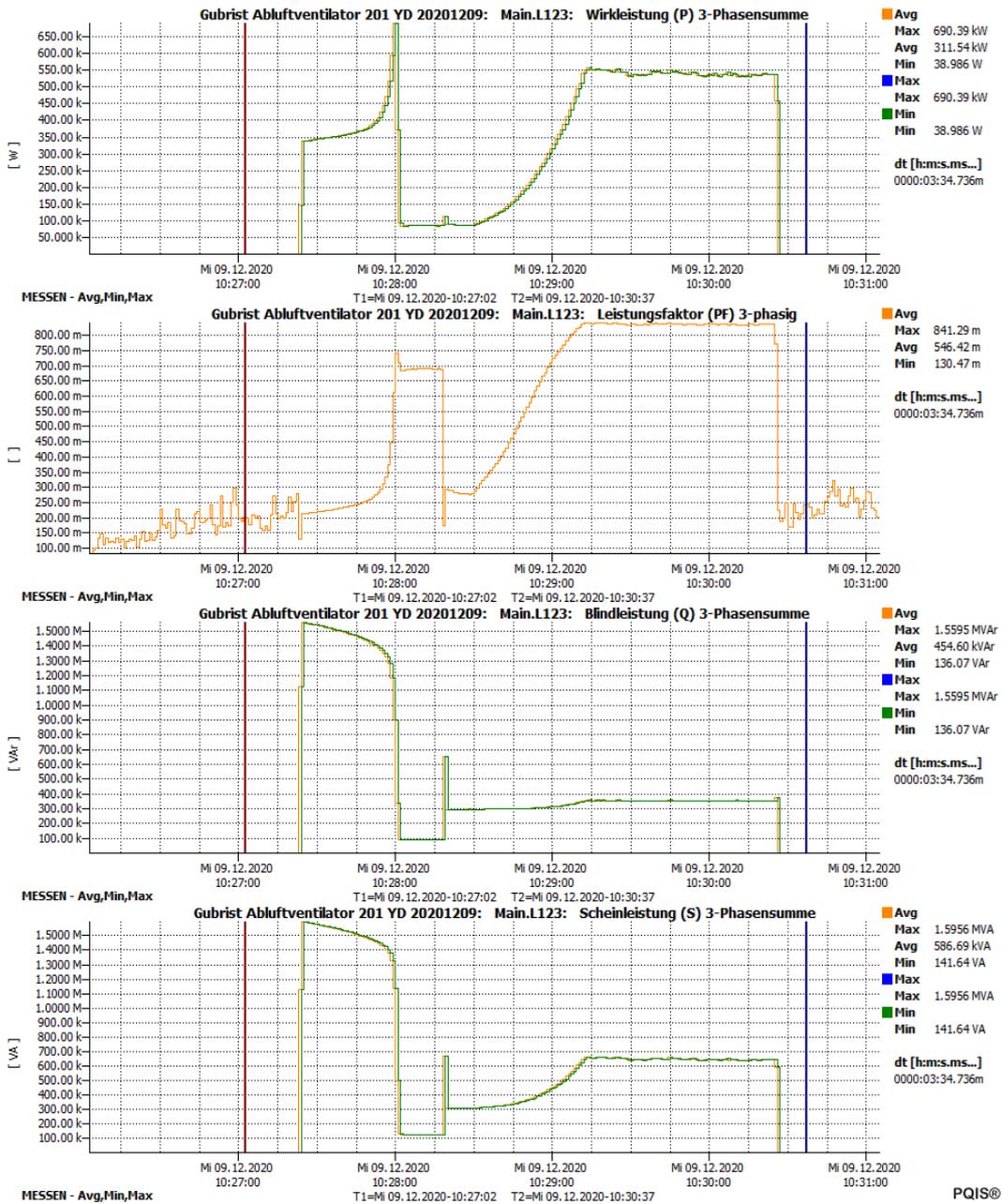


Abb. 137 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung AV 1 bei Y/D-Anlauf

III.4 Tunnel Umfahrung Saas

III.4.1 Abluftventilator Tunnel Umfahrung Saas vom 09.01.2011

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 51 Technische Daten Transformator AV Tunnel Saas

Parameter	Wert
Hersteller	Koncar
Typ	T30 24/1250
Leistung	1250 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	690 V
Kurzschlussspannung	5.89%

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 52 Technische Daten Antriebsmotor AV Tunnel Saas

Parameter	Wert
Hersteller	Loher
Motortyp	ANSA-400LX-04C
Bauform	IMB5
Spannung	690 V
Strom	625 A
Cos φ	0.88
Nenndrehzahl	1492 1/min

Technische Daten Frequenzumrichter Abluftventilator

Tab. 53 Technische Daten FU AV Tunnel Saas

Parameter	Wert
Hersteller	Siemens
Umrichterfamilie	SINAMICS S150
Umrichtertyp	6SL3710-7LG38-1AA0-Z
Nennspannung	690 V
Nennstrom	810 A
Kurzzeitstrom	1185 A
Nennleistung	800 kW

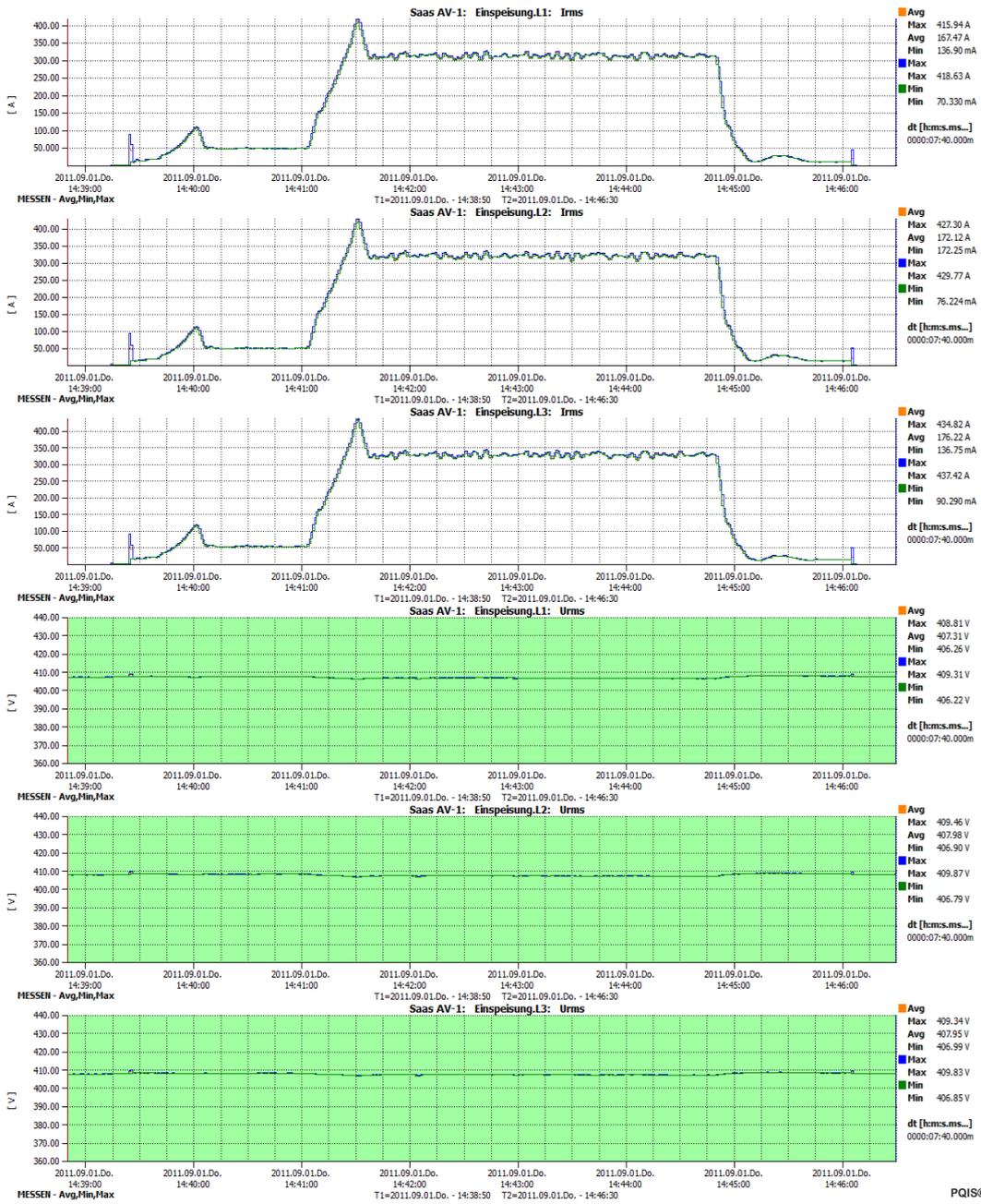


Abb. 138 Strom- und Spannungsverlauf Strahlventilator mit FU

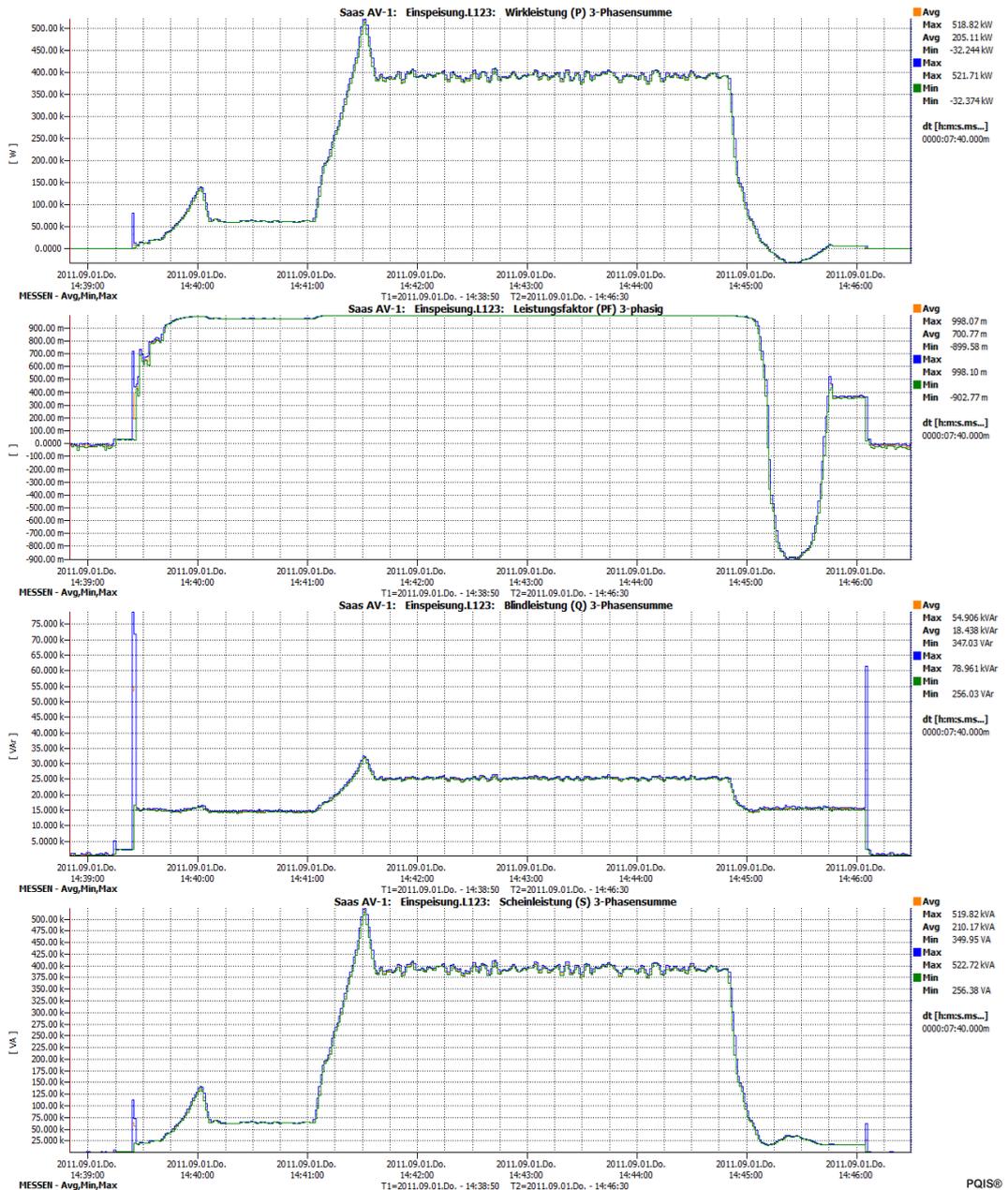


Abb. 139 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung SV mit FU

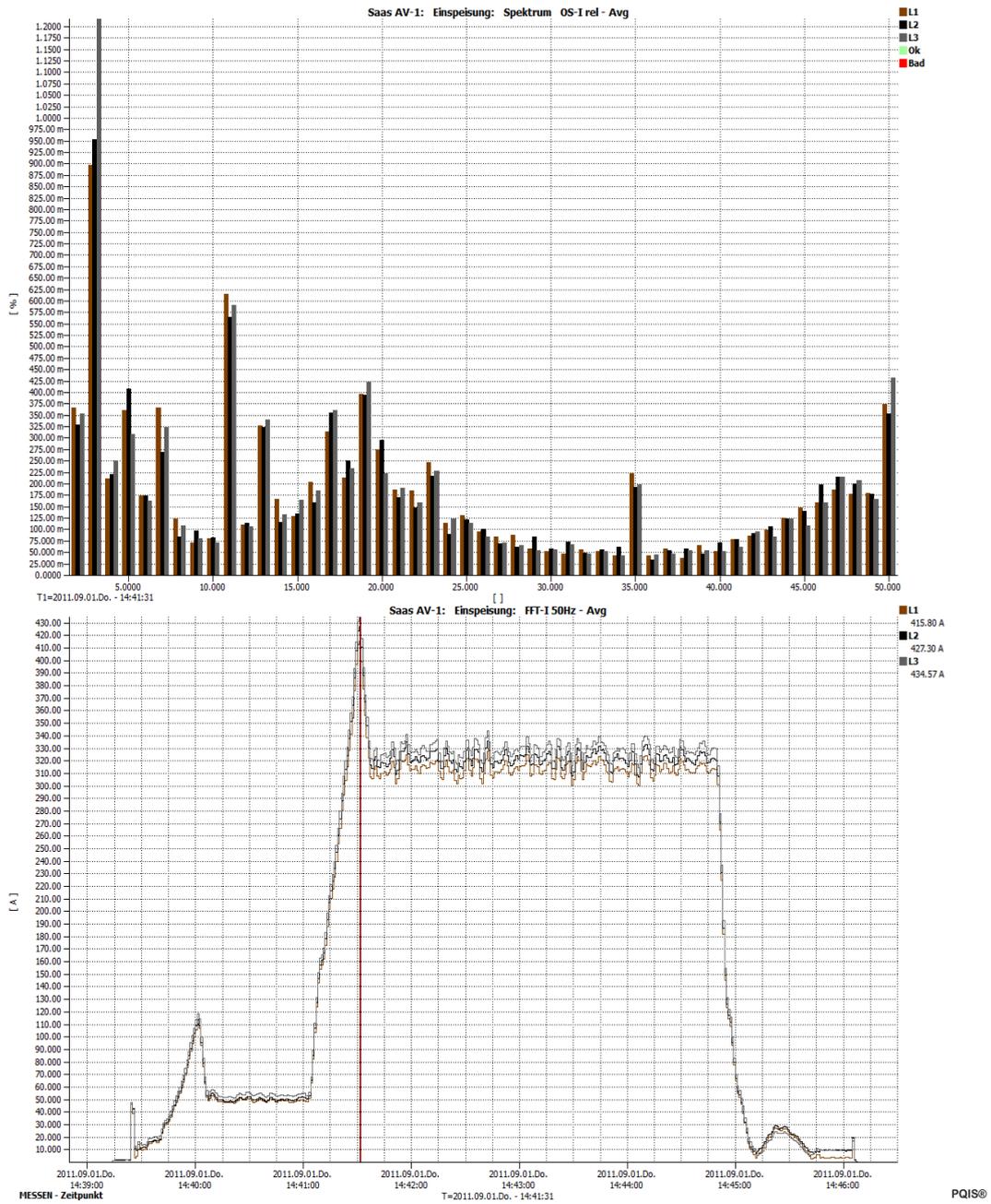


Abb. 140 Oberschwingungsströme relativ bezogen auf Grundschwingungsstrom $I_{50\text{Hz}}$ bei voller Leistung

III.5 Tunnel Crapteig

III.5.1 Abluftventilator Tunnel Crapteig 12.12.2017

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 54 Technische Daten Transformator AV Tunnel Crapteig

Parameter	Wert
Hersteller	Rauscher Stöcklin
Typ	DTO-630/24-SA
Leistung	630 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Nennspannung Unterspannung	690 A
Kurzschlussspannung	4.6%

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 55 Technische Daten Antriebsmotor Tunnel Crapteig

Parameter	Wert
Hersteller	WEG
Motortyp	W22 - IE2
Bauform	N
Spannung	690 V
Strom	270 A
Cos φ	0.81
Nenndrehzahl	990 1/min

Technische Daten Frequenzumrichter Abluftventilator

Tab. 56 Technische Daten FU Tunnel Crapteig

Parameter	Wert
Hersteller	ABB
Umrichterfamilie	ACS800-17-0320-7
Umrichtertyp	
Nennspannung	690 V
Nennstrom	250 A
Kurzzeitstrom	417 A
Nennleistung	250 kW
Pulszahl	

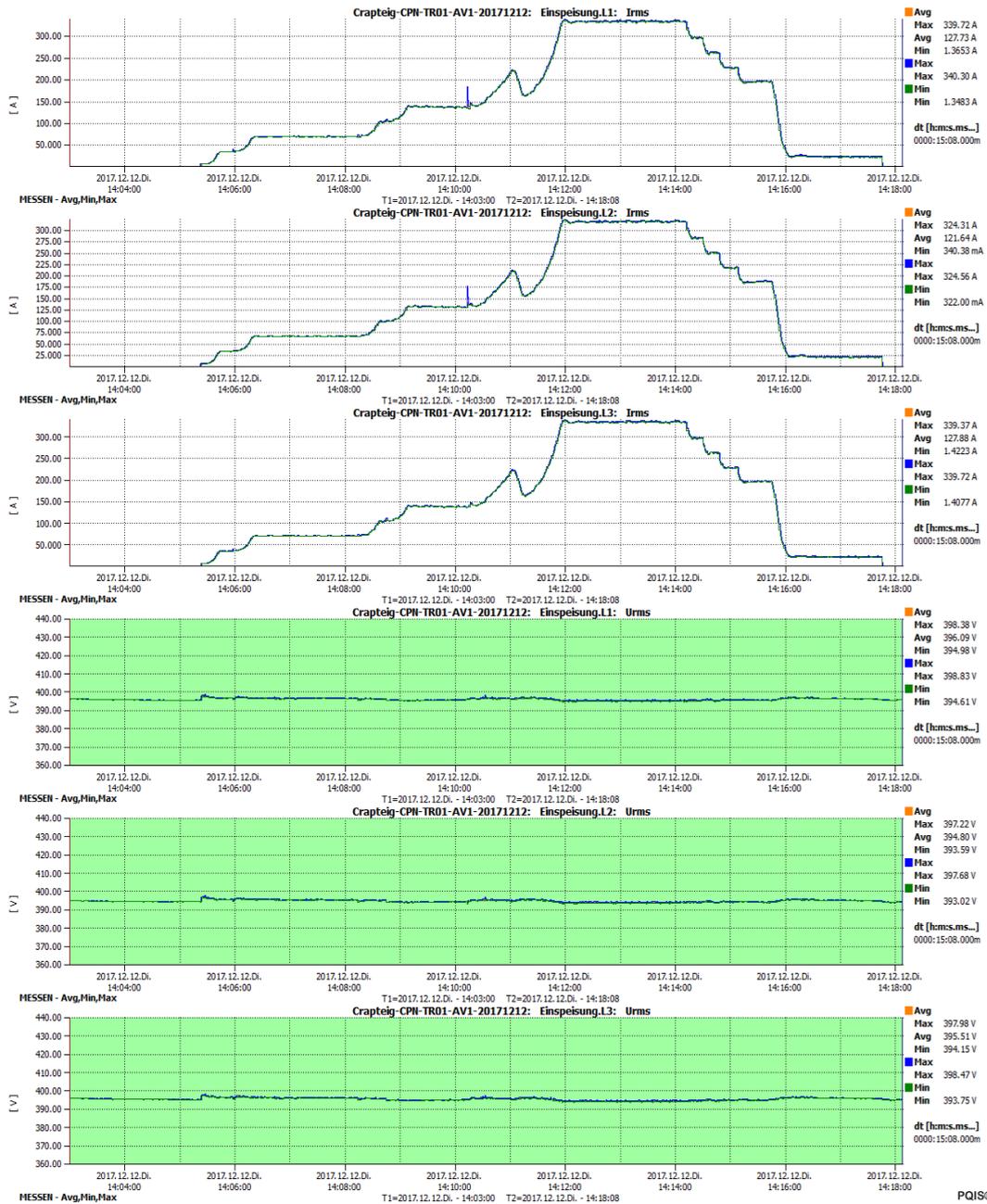


Abb. 141 Strom- und Spannungsverlauf Abluftventilator (FU), Messung auf Mittelspannungsebene

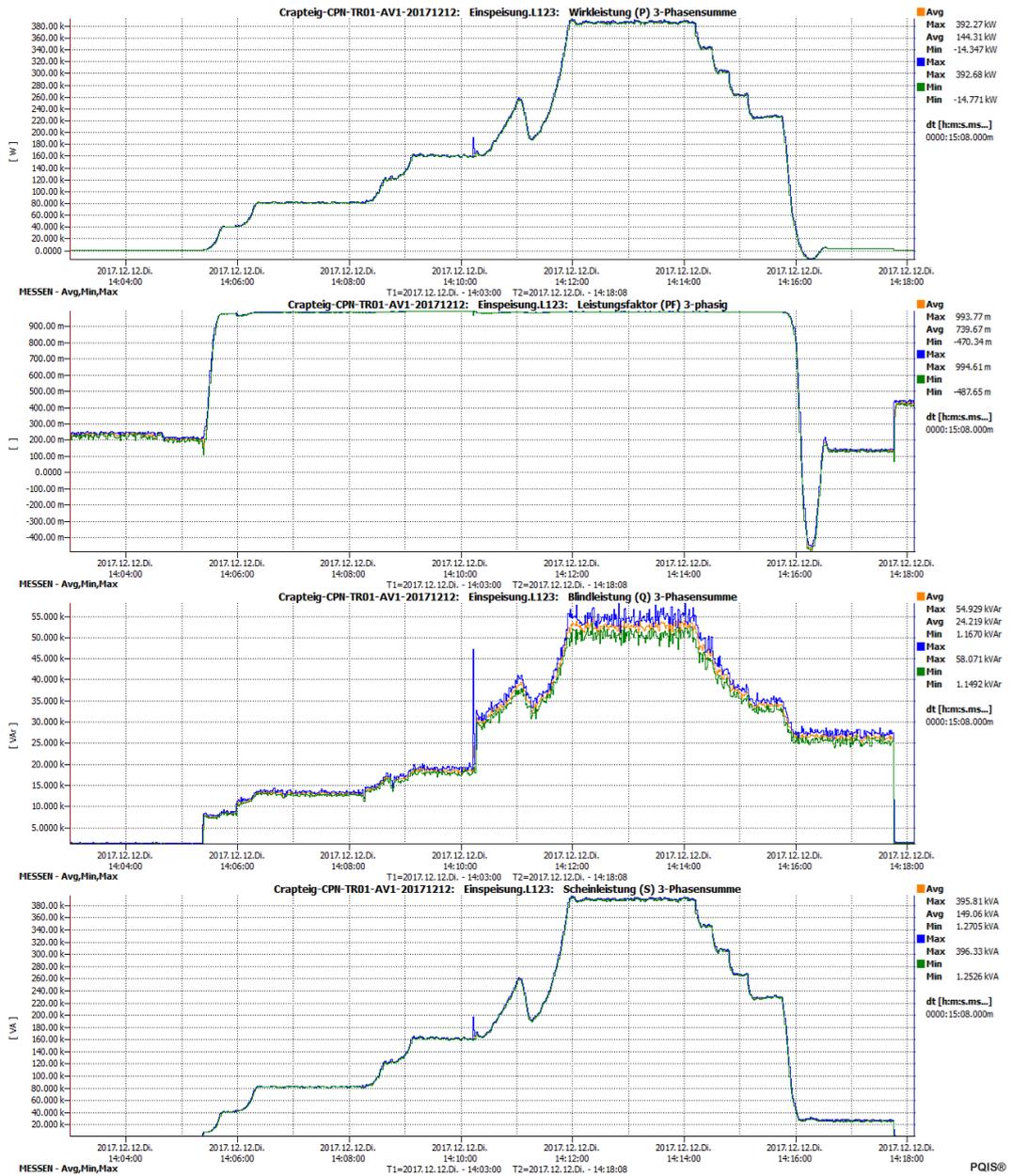


Abb. 142 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung Abluftventilator bei FU-Start

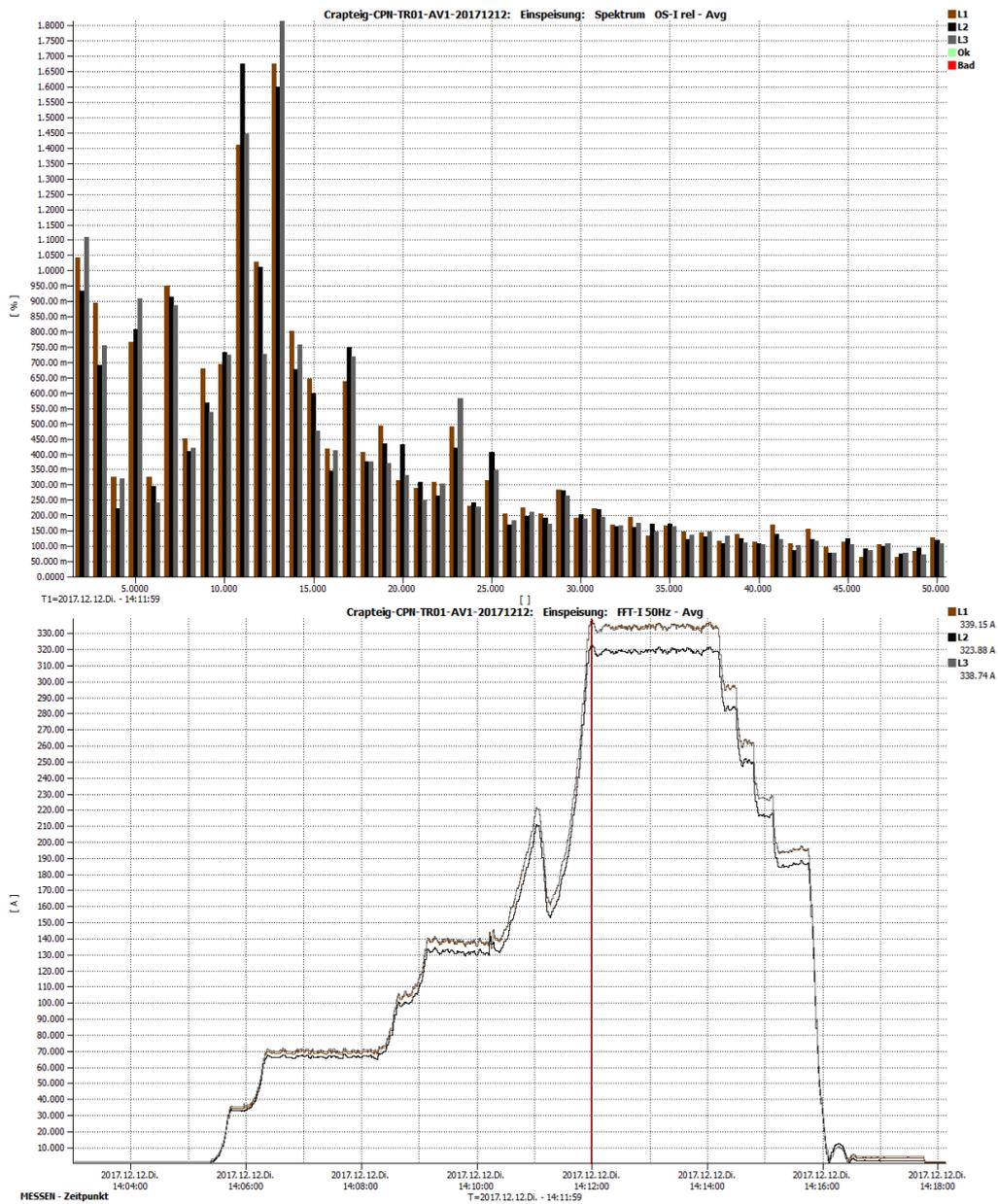


Abb. 143 Oberschwingungsströme relativ bezogen auf Grundschwingungsstrom $I_{50\text{Hz}}$ bei voller Leistung

III.6 Tunnel Umfahrung Roveredo

III.6.1 Abluftventilator Tunnel Umfahrung Roveredo 12.12.2017

Technische Daten Transformator Lüftungsanlage

Tab. 57 Technische Daten Transformator AV Tunnel Roveredo

Parameter	Wert
Hersteller	Siemens Trockentrafo
Typ	
Leistung	870 kVA bzw. 2 · 435 kVA
Schaltgruppe	Yy6Yd5
Nennspannung Unterspannung	0.71
Kurzschlussspannung	6 %

Technische Daten Antriebsmotor Abluftventilator

Tab. 58 Technische Daten Antriebsmotor AV Tunnel Roveredo

Parameter	Wert
Hersteller	ABB
Motortyp	
Bauform	
Spannung	690 V
Strom	569 A
Wirkleistung	560 kW
Cos φ	0.85
Nenndrehzahl	993 1/min

Technische Daten Frequenzumrichter Abluftventilator

Tab. 59 Technische Daten FU AV Tunnel Roveredo

Parameter	Wert
Pulszahl	12 Puls

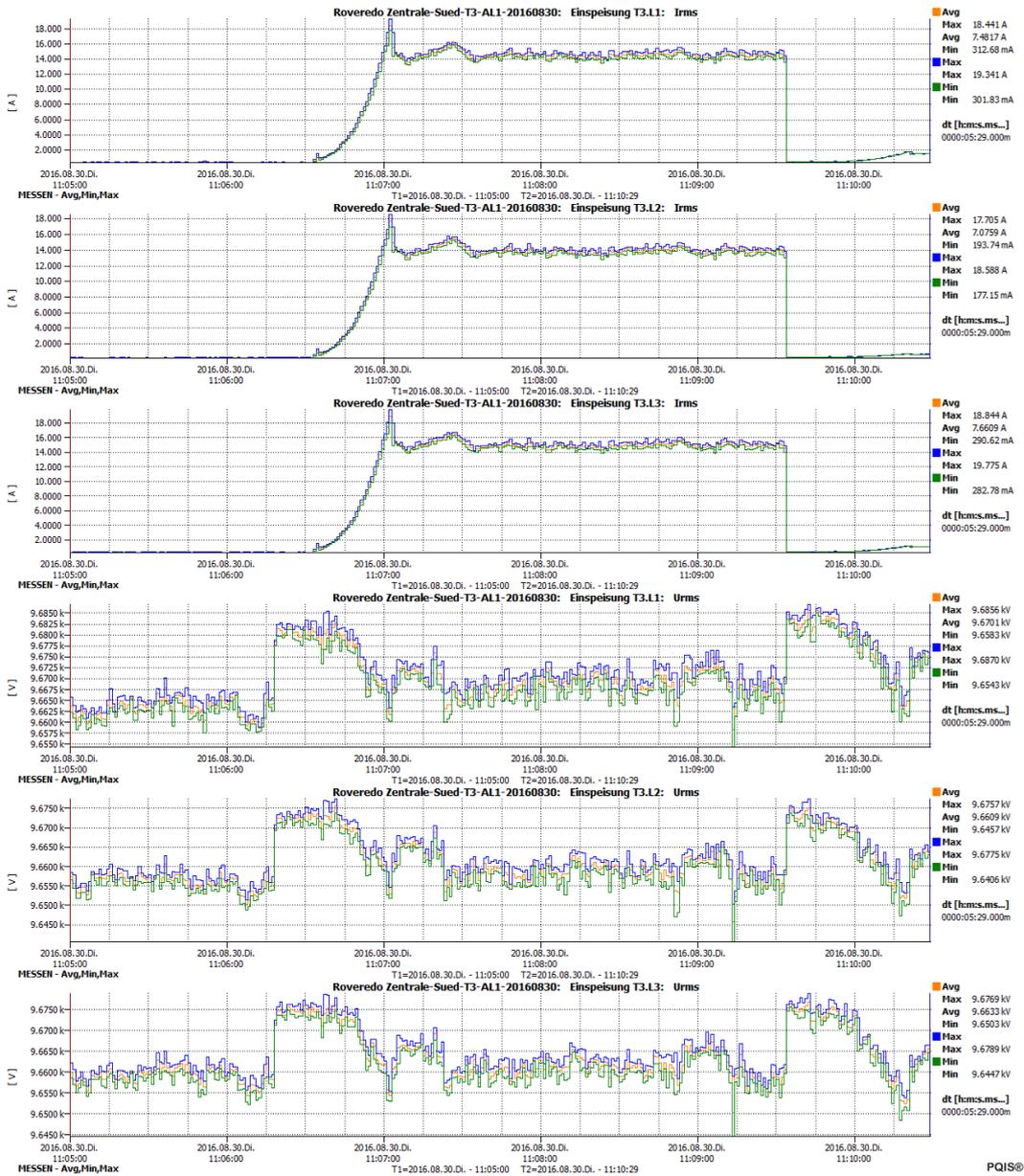


Abb. 144 Strom- und Spannungsverlauf Abluftventilator (FU)

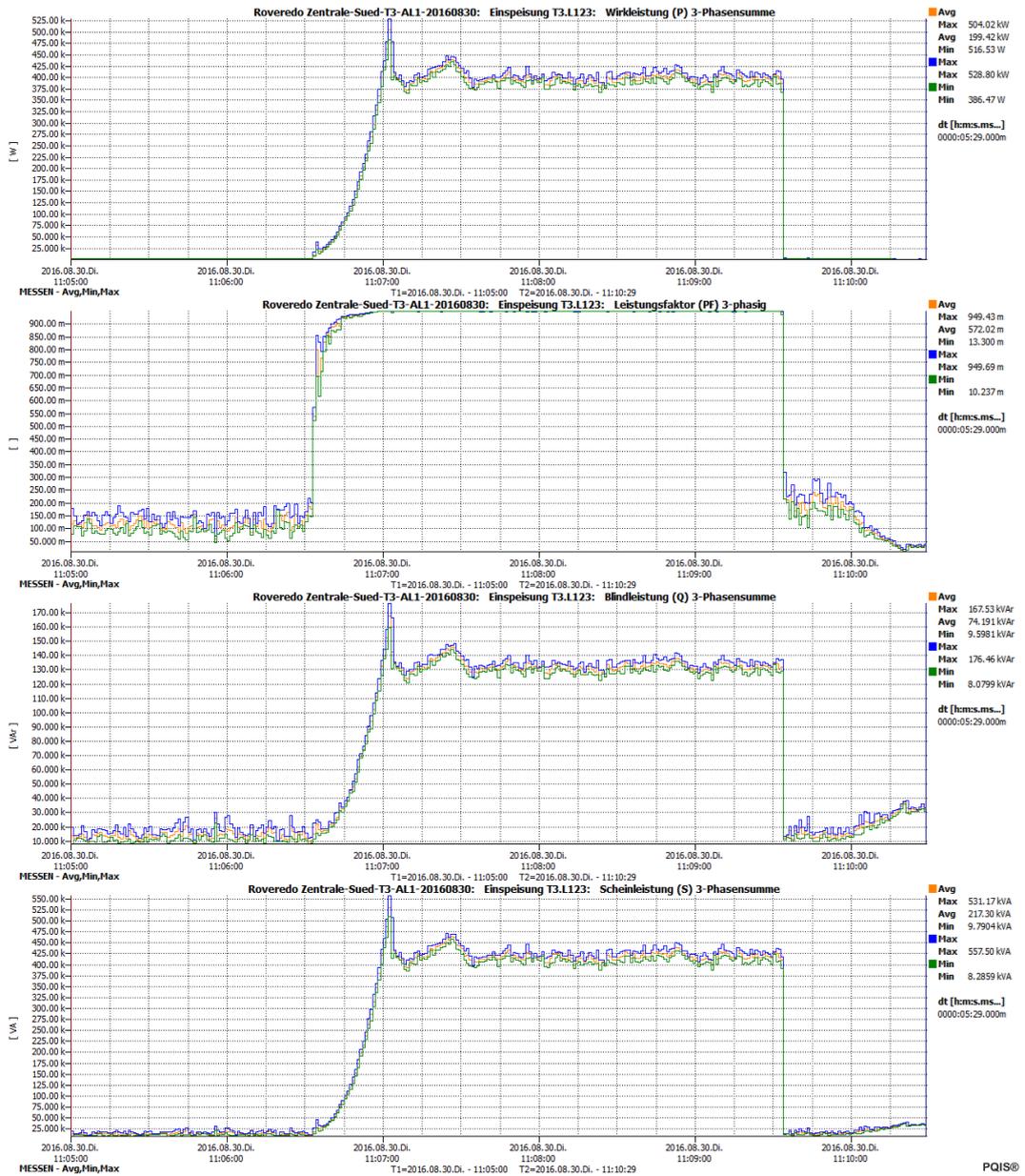


Abb. 145 Wirkleistung, Leistungsfaktor, Blindleistung und Scheinleistung Abluftventilator bei FU-Start

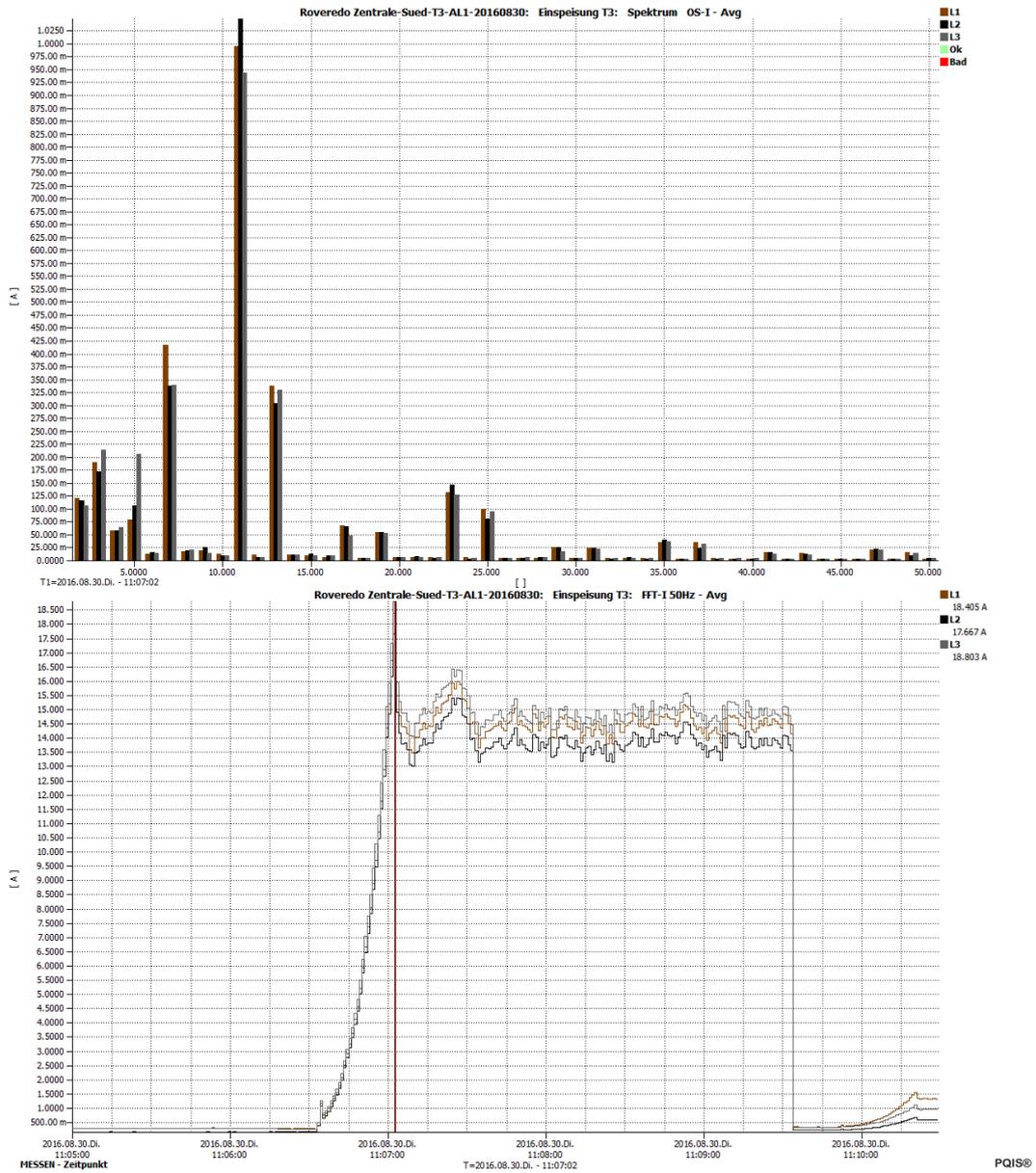


Abb. 146 Oberschwingungsströme relativ bezogen auf Grundschwingungsstrom $I_{50\text{Hz}}$ bei voller Leistung

Glossar

Begriff	Bedeutung
FU	Frequenzumrichter
AV	Abluftventilator
SV	Stahlventilator
SiSto	Sicherheitsstollen
λ	Reibungskoeffizient
ρ	Luftdichte
η	Wirkungsgrad
ζ	Verlustfaktor
Δ	Differenz
D_h	Hydraulischer Durchmesser
p	Druck
L	(Tunnel-) Länge
A_{Tunnel}	Querschnittsfläche des Tunnelfahrtraums
Q	Volumenstrom
ν	Zähigkeit
R	Gaskonstante
T	Temperatur
C	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
P_t	Gesamtdruck
p_s	Statischer Druck
p_d	dynamischer Druck
Δp_v	Druckverlust
h	Geodätische Höhe
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)
\dot{V}	Volumenstrom
AC	Wechselstrom oder -spannung
DC	Gleichstrom oder -spannung

Literaturverzeichnis

Richtlinien:

- [1] ASTRA Richtlinie 13001, Lüftung der Strassentunnel, 2008, V2.03
- [2] ASTRA Richtlinie 13002, Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln, 2008, V1.06
- [3] ASTRA Fachhandbuch Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen, 23001, 2021-01-01
- [4] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11310, Leittechnik Lüftungsanlage, 2018, V1.20
- [5] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11315, Funktionen der Lüftungssteuerung, 2015, V2.00
- [6] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11318, Verfügbarkeit, 2021, V2.10
- [7] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11320, Sensorik, 2015, V2.00
- [8] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11330, Längslüftung, 2020, V1.20
- [9] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11340, Abluftsystem, 2011, V1.00
- [10] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11350, SiSto-Lüftung, 2018, V1.10
- [11] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-11100, Energieversorgung, 2018, V1.30
- [12] ASTRA Fachhandbuch BSA, Merkblatt 23001-12120, Werkstoffwahl und Korrosionsschutz, 2021, V2.30

Ventilatortechnologie:

- [13] TLT-Turbo GmbH, Ventilatoren-Fibel, ISBN 3-00-015699-2, 2. Auflage März 2005
- [14] Bohl Willi, Strömungsmaschinen 1, ISBN 3-8023-0107-2, 5. überarb. Auflage
- [15] Howden Ventilatoren GmbH, Luft für die Verkehrsadern unter der Erde
- [16] F. van Vemden, Starting-up-time and –methods of fans for emergency tunnel ventilation systems, 4. Int. Conference "Tunnel safety and ventilation" 2008 Graz
- [17] Strassentunnel:
- [18] Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer direction des routes, Dossier pilote des tunnels équipements, section 4.1, Ventilation, Novembre 2003
- [19] Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse/Schiene/Verkehr, Richtlinien und Vorschriften für das Strassenwesen (2014). RVS 09.02.31 Tunnel Equipment, Ventilation System.
- [20] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement (2019). Empfehlung für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h, EABT-80/100.
- [21] PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation (2011 R02). Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation.

Motorentechnologie:

- [22] ABB, Sanftanlasser Handbuch, September 2003
- [23] ABB, Technische Anleitung Nr. 6 – Netzoberschwingungen bei AC-Antrieben
- [24] Binder Andreas, Elektrische Maschinen und Antriebe – Grundlagen, Betriebsverhalten, 2012
- [25] Binder, Andreas, TU Darmstadt, Elektrische Maschinen und Antriebe, Ausgabe WS 2018/2019
- [26] Topmotors, Merkblatt Nr. 25: Frequenzumrichter, Oktober 2014
- [27] Topmotors, Merkblatt Nr. 29: Neue Motorentechnologien, November 2018
- [28] Müller, Germar; Ponick, Bernd, Grundlagen elektrischer Maschinen, 10. Auflage 2014
- [29] Danfoss, Oberschwingungen – ein kostspieliges Problem einfach gelöst, DKDD.PB.41.M2.03
- [30] ABB, Technische Anleitung Nr. 8 – Elektrisches Bremsen
- [31] Recom Electronic AG, Beschreibung Fluke MDA-550, <https://www.recom.ch/mda-500/>

Normen:

- [32] DIN EN 60034-1: Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten, Februar 2011
- [33] IEC 60909-0: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents, January 2016
- [34] SIA 197/2: 2004: Projektierung Tunnel, Strassentunnel

Elektrotechnik:

-
- [35] VSE – Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, D-A-CH-CZ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen, 2. Ausgabe, 2007
-
- [36] VSE – Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, Branchenempfehlung Werkvorschriften CH, Ausgabe 2018
-
- [37] VSE – Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, Branchenempfehlung Werkvorschriften CH: Technisches Anschlussgesuch TAG, Ausgabe 2019
-
- [38] Grundlagen der Niederspannungs-Schaltechnik, Siemens AG, 2008
-
- [39] EAA – Elektrische Antriebstechnik und Aktorik, Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, Universität München
-
- [40] Stern-Dreieck-Schalten von Drehstrommotoren; Verringerung der Umschaltstromspitze durch Vorzugschaltung für Rechts- und Linkslauf, Siemens Publikationen, V2.0, 11/2020
-

Forschungsprojekte:

-
- [41] HBI Haerter AG, Forschungsauftrag ASTRA 2007/002_OBF, Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall, September 2010
-

Weiteres:

-
- [42] Meidinger, Dokumentation des ausgeführten Werkes Lüftung Sicherheitsstollen Tunnel Chlus (Graubünden), Plan 95447-01-0-01-3
-
- [43] HBI internes Fachwissen
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 06.01.2022

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2015/005

Projekttitel: Untersuchung zu Gesamtsystemen aus Ventilator- und Antriebstechnologie zur Lüftung von Strassentunneln und Fluchtwegen

Enddatum: 31.03.2022

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel und Vorgehen:

Um das zentrale Forschungsziel, die Auswahl geeigneter Lüftungssysteme inkl. deren Antriebe, hinreichend klären zu können, wurden die verschiedenen Anforderungen an die Aerodynamik und an die Netzverträglichkeit hinsichtlich der jeweiligen Anwendung in Form eines Prozessdiagrammes erarbeitet. Die verschiedenen Antriebe wurden nach spezifisch relevanten Kriterien gegenübergestellt und mit einem eingeführten Punktesystem verglichen. Als Basis für diese Evaluation wurden notwendigen Grundlagen beschafft und entsprechend aufgearbeitet.

Erarbeitung und Zusammenfassung notwendiger Grundlagen:

Die Themengebiete wurden in Strömungstechnik, Ventilatorstechnologie, Strassentunnel, Antriebstechnologie und deren Netzurückwirkungen unterteilt.

Vorgehen und Bewertung der Kombinationen von Ventilatoren und Antriebssysteme

- Unterteilung der Lüftungssysteme in Abluft, Längslüftung und SiSto-Lüftung
- Beschreibung und Evaluation der Antriebssysteme (Direktanlauf, Stern-Dreieck, Dahlander und Frequenzumrichter) mittels morphologischem Kasten
- Erarbeitung eines aerodynamischen Auswahlprozess hinsichtlich Antriebstechnologie für die Lüftungssysteme Abluft, Längslüftung und SiSto-Lüftung
- Erarbeitung eines Prozesses zur Untersuchung der Netzverträglichkeit der möglichen Antriebe
- Bewertung der technisch möglichen Lösungen anhand spezifischer und relevanter Kriterien für das jeweilige Lüftungssystem mit unterschiedlicher Gewichtung (je nach Wichtigkeit)
- Durchführung einer Kostenevaluation und einer anschliessenden Gesamtbewertung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Zielerreichung (Vergleich der erzielten Ergebnisse mit dem Projektbeschreibung): "Erfüllt"

- Grundlagenbeschaffung und –aufarbeitung
- Analyse der technischen Lösungen
- Ventilator-technologie
- Antriebssystem
- Morphologischer Kasten
- Prozesse zur Systemwahl
- Investitionskosten

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Bewertungstabellen für die Lüftungssysteme mit Einflussgrössen und Gewichtung der Punktzahl für das Antriebssystem ist sehr projektspezifisch und ist bei jeder Variante durch einen fachkundigen Nutzer zu prüfen. Ein Vorschlag zur Gewichtung wurde im Bericht festgehalten. Eine überlegte und fachkundige Nutzung wird empfohlen.

Beurteilung der verschiedenen FUs: Die Unterscheidung zwischen 12-Puls und Active Frontend Frequenzumrichter hinsichtlich Oberschwingung ist marginal und bei der Untersuchung Netzverträglichkeit nicht entscheidend. Der 12-Puls FU benötigt jedoch spezifische Transformatoren. Eine differenzierte und fachkundige Beurteilung wird empfohlen.

Die Mittelspannungsseite (Auswirkungen Auswahl Transformator) ist in den Variantenvergleichen nicht berücksichtigt. Durch einen grösseren Transformator könnten gewisse Antriebssysteme als netzverträglich bewertet werden.

Publikationen:

Die Vorstellung der erreichten Ziele aus dem Forschungsprojekt sollen eventuell bei der nächsten PM-Tagung oder anderen Konferenzen der ASTRA präsentiert werden.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Frey

Vorname: Simon

Amt, Firma, Institut: HBI Haerter AG, Zürich

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Insgesamt wurden die vorgenommenen Ziele erreicht, mit Ausnahme einer Betrachtung der Baukosten.

In Zukunft werden noch folgende Themen relevant:

- Nachhaltigkeit – seitens ASTRA wird angemerkt, dass neu der Fokus bei Projekten auch auf das Thema Nachhaltigkeit gesetzt werden soll → Nachhaltigkeit wurde bei der Bewertung der technisch möglichen Lösungen so nicht berücksichtigt
- Energie Testbetrieb wird bei der Kostenevaluation nicht betrachtet, da eine Abschätzung über Dauer, etc. nicht immer gewährleistet ist.
- Ersatzteile nicht in der Kostenevaluation berücksichtigt

Umsetzung:

Zusammenfassend wird die Arbeit gelobt und für gut befunden. Die praktische Anwendbarkeit soll/muss in zukünftigen ausgewählten Projekten überprüft werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Prüfung Anwendbarkeit des Auswahlprozesses und Bewertungssystem
- Prüfung der praktische Anwendung der Kostenevaluation und Gesamtbewertung
- Auswahl und Anforderungen Trafo spezifizieren
- Erstellung bzw. Bereinigung Dokument zur Untersuchung der Netzverträglichkeit, insbesondere Bewertung der Oberschwingungen

Einfluss auf Normenwerk:

Bedeutende Punkte aus dem vorliegenden Forschungsbericht hinsichtlich potentieller Anpassung von Richtlinien und technischen Merkblättern wurden herausgearbeitet und an die entsprechende Stelle der ASTRA versandt.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Tschuppert

Vorname: Diego

Amt, Firma, Institut: ASTRA, Filiale Zofingen

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

 Tschuppert Diego W12WQP
10.01.2022
Info: admin.ch/esignature | validator.ch